



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.106 (2023)

# 第106回 2023年度秋季

## 低温工学・超電導学会

### 講演概要集

2023年  
12月4日, 5日, 6日

海峡メッセ下関+ WEB

〒750-0018 山口県下関市豊前田町3丁目3-1

主催 公益社団法人 低温工学・超電導学会

〒113-0033 文京区本郷 6-12-8 パレドール本郷302号  
TEL 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573

協賛 応用物理学会、日本物理学会、日本機械学会、  
日本冷凍空調学会、電気学会、日本表面真空学会

後援 下関観光コンベンション協会

# 106回

# THE WORLD'S SMALLEST 2 Kelvin GM CRYOCOOLER

## RDC-02K | 0.02W @ 2.3K

- LOW VIBRATION (3Phase Motor)
- COMPRESSOR (1Phase 100, 120, 220, 230, 240V)
- BASE TEMPERATURE <2.2K
- SIMPLE MAINTENANCE PROCEDURES



住友重機械工業株式会社 精密機器事業部

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号  
ThinkPark Tower26階

TEL : 03-6737-2550 MAIL : shi.cryo@shi-g.com

 Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

# 2023 年度秋季低温工学・超電導学会

2023 年 12 月 4 日（月）～ 12 月 6 日（水）

会 場： 海峡メッセ下関 + WEB

所在地：〒750-0018 山口県下関市豊前田町 3 丁目 3-1

参加費： お支払いは銀行振込になります。講演概要集代が含まれます。

期限内申込（11 月 6 日（月）～ 11 月 20 日（月）17 時）

正会員 \* 10,000 円，賛助会員 \*\* 11,000 円，協賛等団体会員個人 \*\*\*15,000 円，学生 4,000 円，  
非会員（一般）20,000 円，非会員（学生）5,000 円

期限後申込（11 月 20 日（月）17 時以後）

正会員 \* 12,000 円，賛助会員 \*\* 13,200 円，協賛等団体会員個人 \*\*\*18,000 円，学生 5,000 円，  
非会員（一般）24,000 円，非会員（学生）6,000 円

（講演概要集のみ：正会員 \* 5,000 円，賛助会員 \*\* 5,000 円，協賛等団体会員個人 \*\*\* 7,000 円，  
学生 2,500 円，非会員（一般）7,000 円，非会員（学生）2,500 円）

\* 65 歳以上で所定の手続きを終えた正会員は参加費 5,000 円（期限後申込は 6,000 円）。

\*\* 賛助会員価格の適用は，秋季春季合わせて 1 口 2 名まで。適用期間が，会員年度と半期ずれますこと  
ご注意ください。例えば 2023 年度会員の場合は，2023 年秋季から 2024 年春季に適用。また、口数に  
より適用人数が異なりますこと，ご注意ください。

\*\*\* 協賛等団体に属する個人参加者。所属団体を証する会員証等の提示が必要。

懇親会： 12 月 5 日（火）18:30 - 20:30

シーモールパレス「ダイヤモンドの間」

参加費：6,500 円

主 催： 公益社団法人 低温工学・超電導学会

電話：03-3818-4539 Fax：03-3818-4573

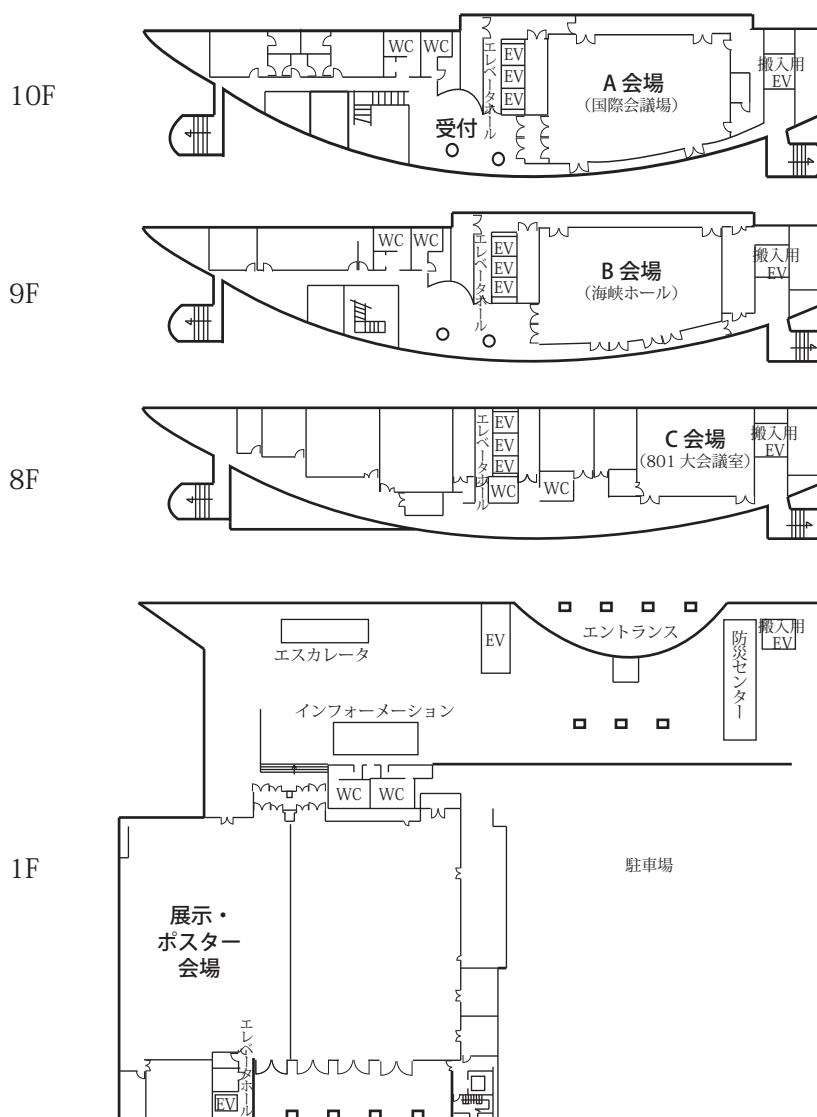
後 援： 下関観光コンベンション協会

協 賛： 応用物理学会，電気学会，日本物理学会，日本機械学会，日本表面真空学会，日本冷凍空調学会

交通案内：JR 下関駅から徒歩 7 分（600 m）



会場配置図：海峡メッセ下関



講演の形式：詳細は低温工学・超電導学会のホームページをご覧ください。

<https://www.csj.or.jp/conference/2023a/>

口頭講演：現地口頭発表会場には液晶プロジェクターが用意されます。発表をオンラインで配信するのに伴い、現地での発表におきましては、会場に備えつけのPCを使用していただきます。PCを持ち込んだ発表はできませんので注意してください。

※口頭発表は、すべてWEB会場にて視聴できます。

ポスター講演：ポスター発表質疑応答は現地のみで行われます。WEB会場には資料のみ掲載されます。講演1件につき、幅90cm、高さ180cmのパネルが用意されます。ポスターは、同一セッション内の他の発表者も見られるよう手短紹介が始まる30分前には指定の場所に掲示し、終了後は直ちに撤去してください。パネルには講演番号しか掲示されていないので、ポスター内に講演題目と発表者名を明記してください。詳細は上記ホームページのポスター発表要領をご覧ください。ポスター発表者は、発表当日(12月4日、12月5日)の「ポスター手短紹介」にて1件1分以内で概要を話していただきます。事前にお送りいただいたPDFファイルをスクリーンに映します。それを使ってご紹介ください。詳細は上記ホームページのポスター手短紹介のページをご覧ください。

お知らせ：展示案内より先にポスター手短紹介を行います。開始時間にご注意ください。今回も学会併設展示会を開催いたします。

2023 年度秋季低温工学・超電導学会 セッションテーブル

	A 会場	B 会場	C 会場
12 月 4 日 (月)	受付 9:00 ~		
	9:30 - 11:15 薄膜・線材作製 p. 1	9:45 - 11:15 環境・磁場応用 p. 21	9:30 - 11:30 デバイス応用 p. 38
	昼食		
	ポスター手短紹介 / 展示案内 12:30 - 13:15 (A 会場)		
	ポスターセッション I 13:15 - 14:30 (Poster 会場) Nb <sub>3</sub> Sn 機械特性 p. 53, HTS 臨界電流 (1) p. 54, HTS 薄膜・バルク p. 58, MgB <sub>2</sub> (1) p. 63, MgB <sub>2</sub> コイル p. 66, 回転機 (1) p. 68		
	14:45 - 16:00 回転機 (2) p. 8	14:45 - 16:00 加速器・核融合 p. 27	14:45 - 15:45 小型冷凍機 p. 45
	16:15 - 17:30 HTS コイル (1) p. 13	16:15 - 17:45 HTS 臨界電流 (2) p. 32	16:00 - 17:00 極低温システム p. 49
17:45 - 18:30 マグネット要素技術 p. 18			
12 月 5 日 (火)	9:15 - 11:00 核融合用導体 p. 75	9:15 - 11:00 MgB <sub>2</sub> (2) p. 82	9:30 - 11:00 水素液化用磁気冷凍機 p. 89
	特別セッション 11:15 - 12:00 (A 会場) 「ザ・メーカー」		
	昼食	賛助会員と学生の交流会	昼食
	ポスター手短紹介 13:15 - 13:45 (A 会場)		
	ポスターセッション II 13:45 - 15:00 (Poster 会場) 教育・セミナー p. 95, 伝熱・磁気冷凍 p. 99, HTS 交流損失・導体化 p. 103, HTS コイル (2) p. 107, 電力・磁場応用 p. 114		
	特別セッション 15:15 - 18:00 (A 会場) 第 2 回カーボンニュートラルシンポジウム「カーボンニュートラル社会創出に向けて - Superconductivity Global Alliance (ScGA) および国内の取り組み-」		
懇親会 (シーモールパレス「ダイヤモンドの間」) 18:30 - 20:30			
12 月 6 日 (水)	9:15 - 11:00 SCSC ケーブル p. 119	9:15 - 10:45 HTS 特性評価 p. 134	9:15 - 10:45 計測・基礎 p. 150
	11:15 - 12:00 医療用加速器 p. 126	11:00 - 12:15 バルク作製・着磁 p. 140	11:00 - 12:00 低温化合物超電導体 p. 156
	昼食		
	特別セッション 13:15 - 15:15 (A 会場) 「小型核融合に向けた課題と展望」		
15:30 - 16:45 超電導・低抵抗接合 p. 129	15:30 - 16:45 送電ケーブル p. 145		

※プログラムの詳細は <https://csj.or.jp/conference/2023a/> をご覧ください。

2023 年度秋季低温工学・超電導学会 研究発表会 運営委員会

研究発表会実行委員会

委員長	柁川 一弘	山口東京理科大学
委員	増山 新二	大島商船高等専門学校
	原田 直幸	山口大学
	結城 光平	山口東京理科大学

プログラム編成委員会（企画委員会）

委員長	伴野 信哉	学会運営担当 / 物質・材料研究機構
副委員長	井上 昌睦	プログラム編成担当 / 福岡工業大学
委員	岩井 貞憲	京都フュージョニアリング株式会社
	岡村 崇弘	高エネルギー加速器研究機構
	川越 明史	鹿児島大学
	下山 淳一	青山学院大学
	高田 卓	核融合科学研究所
	田中 秀樹	株式会社 日立製作所
	宮城 大輔	千葉大学
	村上 陽之	量子科学技術研究開発機構
	山梨 裕希	横浜国立大学
	横山 和哉	足利大学

オブザーバー（前委員長）

	古瀬 充穂	産業技術総合研究所
--	-------	-----------

## 低温工学・超電導学会 2023 秋季講演会特別セッション

### ■第 2 回カーボンニュートラルシンポジウム

「カーボンニュートラル社会創出に向けてー Superconductivity Global Alliance (ScGA) および国内の取り組みー」

日時：12月5日(火) 15:15～18:00

場所：A 会場 (国際貿易ビル 10F 国際会議場)

プログラム：15:15～15:20 開会の挨拶

15:20～16:00 Overview of Superconductivity Global Alliance (ScGA)

Ziad Melhem (Founder and CEO, Oxford Quantum Solutions Ltd.)

16:00～16:20 カーボンニュートラルの実現に向けて

ー技術開発の現状・課題と超電導技術・低温技術の役割ー

矢部 彰 (NEDO 技術戦略研究センター フェロー)

16:20～16:40 水素・超電導コンプレックス

来栖 努 (産業競争力懇談会 (COCN) 推進テーマリーダー, 東芝 ESS シニアフェロー)

16:40～17:00 液体水素冷却超電導発電機の開発

大屋 正義 (関西学院大学)

17:00～17:55 パネルディスカッション

17:55～18:00 閉会の挨拶

モデレーター：秋田 調 (低温工学・超電導学会会長)

パネラー：Ziad Melhem (OQS), 矢部 彰 (NEDO), 来栖 努 (COCN, 東芝 ESS), 大屋 正義 (関西学院大学), 林 和彦 (低温工学・超電導学会専務理事)

### ■「小型核融合に向けた課題と展望」

日時：12月6日(水) 13:15～15:15

場所：A 会場 (国際貿易ビル 10F 国際会議場)

プログラム：はじめに 山田 穰 (中部大学)

(小型核融合用 REBCO 導体とマグネットの実用化に関する調査研究会主査)

1. 核融合原型炉設計の現状と高磁場コイルを仮定した場合の炉設計パラメータ (25 分)

宇藤 裕康 (量子科学技術研究開発機構)

2. 核融合炉マグネット用大電流高温超伝導導体の開発状況と課題 (25 分)

柳 長門 (核融合科学研究所)

3. 最新情報 1 米国 (10 分)

野口 聡 (北海道大学)

4. 最新情報 2 欧州日中 (10 分×2)

宮崎 寛史 (九州大学), 植田 浩史 (岡山大学)

5. 会場討論 “高温超電導化でやるべきこと” (30 分)

司会 植田 浩史 (岡山大学)

閉会 植田 浩史 (岡山大学)

### ■「ザ・メーカー」

日時：12月5日(火) 11:15～12:00

場所：A 会場 (国際貿易ビル 10F 国際会議場)

プログラム：1. 谷口 諒 (古河電気工業株式会社 研究開発本部 超電導製品部 開発課)

2. 菊地 邦仁 (株式会社 フジクラ 超電導事業推進室)

3. 川嶋 慎也 (株式会社 神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 材質制御研究室)

12月4日(月)  
受付開始 9:00～

※一般講演の発表時間はすべて10分、質疑応答4分です。  
(なお、発表資料の切替や登壇等の時間を考慮し、+1分  
確保してプログラムを編成しています。)

プログラム番号の例

1A-a05: 1日目A会場の午前5番目

1B-p05: 1日目B会場の午後5番目

※タイトル、著者、所属は講演申し込み時のものです。

12月4日(月) A会場 9:30 - 18:30

薄膜・線材作製 9:30 - 11:15 座長: 藤田真司

1A-a01	精密酸素量制御したRE系超伝導体の物性-----	1
	下山淳一, 松下哲哉, 新津遥都, 元木貴則(青学大)	
1A-a02	ひずみアニールによるYBCO線材の酸素量と臨界温度の制御-----	2
	李祖涵, 堀出朋哉, 吉田隆(名大)	
1A-a03	FF-MOD法による金属基体上希土類混合RE123薄膜の作製-----	3
	堀口佳吾, 大崎瑛介, 元木貴則, 下山淳一(青学大); 吉原健彦, 本田元気, 小林慎一(住友電工)	
1A-a04	組成がTFA-MOD法 $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ 薄膜の諸特性に及ぼす影響-----	4
	海谷真大, 大木元勇貫, 鈴木匠, 三浦正志(成蹊大)	
1A-a05	可溶性基板上へのREBCO薄膜作製の検討-----	5
	木許陽登, 寺西亮, 岩熊成卓(九大)	
1A-a06	TFA-MOD法を用いたYBCO-YPrBCOストライプ構造細線の特長検証-----	6
	山下知大, 石井宏尚, 荒木猛司, 江口朋子(東芝)	
1A-a07	圧力集中法により作製したREBCOスプリット線材の磁化測定の評価-----	7
	西山凌平, 奥村太一, 陰山彰, 上坂稜, 津川大輝, 山崎隼, 金沢新哲(室蘭工大)	

昼食 11:15 - 12:30

回転機(2) 14:45 - 16:00 座長: 小川純

1A-p01	ポインティングベクトルを用いた高温超伝導誘導同期モータにおける電気-機械エネルギー変換過程の 解析的検討-----	8
	中村武恒(京大)	
1A-p02	水素エンジン車への搭載を目指した3kW級液体水素ポンプ用高温超伝導誘導同期モータの解析的検討-----	9
	山本真嘉, 中村武恒(京大)	
1A-p03	積層超伝導体を使用した磁気軸受のばね定数と回転損失に関する考察-----	10
	寺尾悠, 淵野修一郎(東大); 大屋正義(関西学院大)	
1A-p04	空芯型REBCO誘導電動機用回転子の損失特性評価-----	11
	中川心平, 鳥居龍ノ介, 川越明史(鹿児島大); 三浦峻, 宮崎寛史, 岩熊成卓(九大)	
1A-p05	交流損失予測に基づく電磁界・熱連成解析による電動航空機用REBCO全超伝導同期機的设计-----	12
	佐々滉太, 三浦峻, 宮崎寛史, 岩熊成卓(九大)	

休憩 16:00 - 16:15

HTSコイル(1) 16:15 - 17:30 座長: 植田浩史

1A-p06	抵抗制御界面を備えたintra-Layer No-Insulation (LNI) REBCOコイルの開発(1) - 抵抗界面モデルによる実験 - -----	13
	田中湧也, 川畑瑞穂, 高橋佳佑, 高尾智明(上智大); 末富佑, 小林賢介, 朴任中,	



	山崎 俊夫, 柳澤 吉紀 (理研)	
1A-p07	抵抗制御界面を備えた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの開発 (2) ー 界面を実装したコイルの 77 K 特性 ー -----	14
	川畑 瑞穂, 田中 湧也, 高橋 佳佑, 中村 一也, 高尾 智明 (上智大); 末富 佑, 小林 賢介, 朴 任中, 山崎 俊夫, 柳澤 吉紀 (理研)	
1A-p08	REBCO 3 ターンコイルの液体水素中の熱暴走実験 -----	15
	今川 信作 (NIFS); 大屋 正義 (関西学院大); 白井 康之 (京大); 山川 友瑚, 中西 啓太, 石田 悠人, 嶋田 健 (関西学院大); 濱口 真司 (NIFS); 小林 弘明 (JAXA)	
1A-p09	ステンレステープを共巻きした YBCO ダブルパンケーキコイルの交流損失特性 -----	16
	元木 悠太, 摺木 惇人, 川越 明史 (鹿児島大); 平野 直樹 (NIFS)	
1A-p10	磁性体と組み合わせた HTS コイルの交流損失測定法に関する検討 -----	17
	上垣 終季, 平野 貴之 (京大); 福井 聡 (新潟大); 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	

休憩 17:30 - 17:45

マグネット要素技術 17:45 - 18:30 座長：横山 彰一

1A-p11	Nb <sub>3</sub> Sn 超電導マグネットの含浸のための高比熱樹脂の研究 -----	18
	菊池 章弘, 平田 和人 (NIMS); 竹内 正基 (RIMTEC); 王 旭東, 中本 建志, 土屋 清澄 (KEK); BARZI Emanuela, TURRIONI Daniele (Fermi Lab.); KESGIN Ibrahim (Argonne Lab.)	
1A-p12	マグネット含浸用樹脂のガンマ線照射前後での曲げ強度 -----	19
	王 旭東 (KEK); 菊池 章弘 (NIMS); 竹内 正基 (RIMTEC); 中本 建志, 土屋 清澄 (KEK)	
1A-p13	NbTi/Cu 線の冷却安定性に対する銅線の影響に関する実験と解析 -----	20
	島本 知輝 (総研大); 今川 信作, 高田 卓, 濱口 真司, 尾花 哲浩 (NIFS)	

12月4日(月) B会場 9:45 - 17:45

環境・磁場応用 9:45 - 11:15 座長：柳 長門

1B-a01	誘導加熱の電気機器学的考察と回転磁石式誘導加熱法の提案 -----	21
	野村 新一, 許 航 (明治大); 平野 直樹, 力石 浩孝 (NIFS)	
1B-a02	超伝導バルクコイルを用いたワイヤレス電力伝送のための冷却システムの開発 及びそれを用いた温度依存性の評価 -----	22
	押本 夏佳, 藤田 貴紀, 作間 啓太, 關谷 尚人 (山梨大)	
1B-a03	超電導コイルを用いた磁気浮上型免震装置の磁気浮上力特性に関する検討 -----	23
	佐々木 修平 (福島高専)	
1B-a04	リスク物質の濃縮回収のための球状磁気フィルタを用いた磁気分離プロセス -----	24
	江村 寛, 吉田 弦, 井原 一高 (神戸大)	
1B-a05	磁気冷凍システム向け Bi-2223 超伝導マグネットの開発ー性能評価試験ー -----	25
	西島 元, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)	
1B-a06	SMES ケーブルを用いた直流マイクログリッドの最適電源構成に関する検討 -----	26
	東川 甲平, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)	

昼食 11:15 - 12:30

加速器・核融合 14:45 - 16:00 座長：小野寺 優太

1B-p01	LHC 高輝度化アップグレード用超伝導磁石の開発 (18) ープロジェクト概要と 7 m 長実証機・実機製造ー -----	27
	菅野 未知央, 中本 建志, 鈴木 研人, 荻津 透, 池本 由希子, 寺島 昭男, 岡田 尚起,	

	川又 弘史 (KEK); 木戸 修一, 田原 大夢 (日立); 市原 直 (フューザック・テクノロジーズ); PRIN Herve, PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)	
1B-p02	LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (19) - 実機 1 号機性能試験結果-----	28
	鈴木 研人, 中本 建志, 菅野 未知央, 荻津 透, 池本 由希子, 岡田 竜太郎, 高橋 直人, 田中 賢一, 岡田 尚起, 川又 弘史 (KEK); 木村 誠宏 (東大); PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)	
1B-p03	高粒子透過性検出器を実現する薄肉ソレノイドコイル用アルミ安定化 MgB <sub>2</sub> 導体開発-----	29
	谷貝 剛, 猪俣 涼, 吉田 輝弥 (上智大); 榎田 康博, 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS); 濱島 高太郎 (東北大)	
1B-p04	JT-60SA 超電導コイルの第二回運転結果-----	30
	村上 陽之, 土屋 勝彦, 福井 良磨, 大西 祥広, 河野 勝己, 薄井 勝富, 柏 好敏, 井口 将秀, 佐藤 稔, 本田 敦, 市毛 尚志, 濱田 一弥 (量研機構)	
1B-p05	ITER TF コイル製作の完遂-----	31
	辺見 努 (量研機構)	

**休憩 16:00 - 16:15**

**HTS 臨界電流 (2) 16:16 - 17:45 座長: 土井 俊哉**

1B-p06	ナノコンポジット REBCO 高温超伝導薄膜におけるエピタキシャル歪とピン止め特性の解析-----	32
	松本 要 (九工大); 堀出 朋哉 (名大)	
1B-p07	FF-MOD 法 RE123 薄膜における積層欠陥導入による臨界電流特性改善の試み-----	33
	大崎 瑛介, 元木 貴則, 堀口 佳吾, 下山 淳一 (青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一 (住友電工)	
1B-p08	高濃度 BaHfO <sub>3</sub> が TFA-MOD (Y <sub>0.77</sub> Gd <sub>0.23</sub> ) Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 線材の微細構造と超伝導特性に及ぼす影響-----	34
	青砥 慶典, 鈴木 匠, 三浦 正志 (成蹊大)	
1B-p09	IBAD-PLD 法による長尺 REBCO 線材の臨界電流に関する考察-----	35
	木須 隆暢, 呉 澤宇, 田中 佑斗, 陳 嘉磊, 東川 甲平 (九大)	
1B-p10	RtR 式本焼成炉を用いた BaZrO <sub>3</sub> ナノ粒子導入 YGdBCO 線材の作製-----	36
	佐藤 迪夫, 高橋 保夫, 青木 裕治, 足立 和久 (昭和電線); 中岡 晃一, 和泉 輝郎 (産総研)	
1B-p11	Reel to Reel 式 TFA-MOD 法 (Y <sub>0.77</sub> Gd <sub>0.23</sub> )Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> +BaZrO <sub>3</sub> 線材の高 J <sub>c</sub> 化-----	37
	齋藤 隼輝, 青砥 慶典, 鈴木 匠 (成蹊大); 佐藤 迪夫, 青木 裕治 (昭和電線); 三浦 正志 (成蹊大)	

**12月4日 (月) C会場 9:30 - 17:00**

**デバイス応用 9:30 - 11:30 座長: 日高 睦夫**

1C-a01	L モードガイド波を用いた HTS-SQUID ベースの非接触ガイド波試験技術の開発 - その 1 - -----	38
	廿日出 好, 岡田 亘平, 清水 淳平 (近畿大)	
1C-a02	誘電体フリー超伝導共振器の中空構造に関する研究-----	39
	中城 悠翔 (埼玉大); 美馬 覚 (NICT); 野口 卓 (国立天文台); 大谷 知行, 亀井 雄斗, 伊藤 凌太 (理研); 小林 達哉, 田井野 徹 (埼玉大)	
1C-a03	基板ノイズ低減に向けた STJ 検出器の Buffer 材料選定-----	40
	野口 剛志 (埼玉大); 藤井 剛, 志岐 成友 (産総研); 田井野 徹 (埼玉大)	
1C-a04	(取り消し)	
1C-a05	再編集可能な超伝導ベイジアンネットワークの設計-----	41
	山中 陸央, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)	
1C-a06	ネットワーク型侵入検知システムに向けた SFQ ハードウェアアクセラレーションの研究-----	42
	鈴木 琢也, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)	
1C-a07	超伝導ストカスティック演算回路における信号分岐回路の性能評価-----	43
	浅香 海斗, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)	

1C-a08	単一磁束量子論理による MKID 用低消費電力デジタル信号処理回路の設計	44
	藤江 和輝, 成瀬 雅人, 明連 広昭 (埼玉大)	

昼食 11:30 - 12:30

小型冷凍機 14:45 - 15:45 座長：平山 貴士

1C-p01	蓄冷式冷凍機の 20 K 以下における冷凍能力向上 (その 2)	45
	安田 仰, 大塚 清見, 金尾 憲一, 恒松 正二, 平塚 善勝 (住重), 檜崎 勝弘 (新居浜高専)	
1C-p02	2 段スターリング型パルス管冷凍機の開発	46
	平塚 善勝, 大塚 清見, 恒松 正二, 金尾 憲一 (住重); 檜崎 勝弘 (新居浜高専)	
1C-p03	磁気遮蔽方式磁気冷凍システムに関する基礎研究	47
	平野 直樹, 小野寺 優太 (NIFS); 高澤 拓海, 逢坂 昇汰, 杉原 健心, 岡村 哲至 (東工大)	
1C-p04	静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討	48
	脇 耕一郎, 恩地 太紀, 坂本 泰明, 富田 優 (鉄道総研); 平野 直樹, 小野寺 優太 (NIFS)	

休憩 15:45 - 16:00

極低温システム 16:00 - 17:00 座長：濱口 真司

1C-p05	超流動ヘリウム 4 の効率的な超低温冷却のための熱交換器表面の構造サイズ	49
	中川 久司 (産総研)	
1C-p06	ILC に向けたクライオモジュール RF テストステーションの開発	50
	中西 功太, 原 和文, 清水 洋孝, 結束 汐織, 仲井 浩孝, 本間 輝也 (KEK)	
1C-p07	SuperKEKB QCS クライオスタット断熱真空槽の真空度とリーク試験	51
	宗 占国, 大内 徳人, 有本 靖, 大木 俊征, 青木 和之, 王 旭東 (KEK); 遠藤 友成 (日立テクノロジーアンドサービス)	
1C-p08	超電導・極低温機器の安全と信頼性のアンケート実施に向けたアンケート WG の活動	52
	鷺山 玲子 (東大); 伊藤 聡 (JASTEC); 淵野 修一郎 (東大); 三戸 利行 (NIFS); 植田 康博 (KEK); 平井 寛一 (太陽日酸); 池内 正充 (前川)	

ポスター手短紹介 / 展示案内 12:30 - 13:15 (A 会場)

12月4日(月) ポスターセッション I Poster 会場 13:15 - 14:30

Nb<sub>3</sub>Sn 機械特性 13:15 - 14:30 座長：伴野 信哉

1P-p01	Nb <sub>3</sub> Sn を模擬した横圧縮変形におけるひずみ分布の予測	53
	片山 翔太, 町屋 修太郎 (大同大); 菅野 未知央 (KEK); 淡路 智 (東北大)	

HTS 臨界電流 (1) 13:15 - 14:30 座長：松本 要

1P-p02	マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流 II	54
	毛利 誠一, 小田部 荘司 (九工大); 馬渡 康徳 (産総研)	
1P-p03	超電導複合導体の流入部の電流分布の解析 (3)	55
	高橋 正希, 田中 祥貴 (福岡工大); 岩熊 成卓 (九大); 井上 昌睦 (福岡工大)	
1P-p04	Zr をパターニングした基板上に形成した REBCO 薄膜の臨界電流特性 (3)	56
	白土 裕一朗 (福岡工大), 酒井 秀哉, 田中 祥貴 (福岡工大); 松本 明善 (NIMS); 井上 昌睦 (福岡工大)	
1P-p05	(取り消し)	
1P-p06	REBCO 線材の臨界電流と層間抵抗率の加熱温度・時間依存性評価	57
	伊藤 悟, 阿竹 洋輔, 佐藤 光一, 橋爪 秀利 (東北大)	

**HTS 薄膜・バルク 13:15 - 14:30 座長：井上 昌睦**

1P-p07	実用 REBCO 線材の断面形状と真応力-----	58
	佐藤 倅希 (大同大)；長村 光造 (応用科学研)；町屋 修太郎 (大同大)； SHIN Hyung-Seop (安東大)	
1P-p08	RE 系コート線材の縦磁界下での電流と磁界の構造-----	59
	島田 涼平, 木内 勝 (九工大)	
1P-p09	低コスト REBCO-CC の中間層に用いる導電性 LaNiO <sub>3</sub> 薄膜の還元スパッタ成膜-----	60
	船木 修平, 辻 大佑, 山田 容士 (島根大)；土井 俊哉 (京大)	
1P-p10	Zr パターニング基板上でフィラメント構造化した MOD-YBCO 薄膜の TEM による微細組織観察-----	61
	藤本 大貴, GUO Zimeng, 波多 聰, 寺西 亮 (九大)；松本 明善, 大井 修一 (NIMS)	
1P-p11	超電導バルクの磁場特性向上に向けた研究-----	62
	矢野 俊, 赤坂 友幸, 石原 篤, 恩地 太紀, 山本 春海, 富田 優 (鉄道総研)	

**MgB<sub>2</sub> (1) 13:15 - 14:30 座長：田中 秀樹**

1P-p12	電磁力平衡ヘリカルコイル開発のための MgB <sub>2</sub> 素線の曲げひずみに対する臨界電流特性評価-----	63
	許 航, 矢島 健大, 林 大吉, 野村 新一 (明治大)；力石 浩孝, 平野 直樹 (NIFS)； 新富 孝和 (KEK)；仁田 旦三 (東大)	
1P-p13	MgB <sub>2</sub> ラザフォード導体短尺試験のための断熱二重容器の冷凍機冷却試験-----	64
	矢島 健大, 林 大吉, 許 航, 野村 新一 (明治大)；新富 孝和 (KEK)；仁田 旦三 (東大)； 平野 直樹 (NIFS)	
1P-p14	MgB <sub>2</sub> 線材の中性子散乱によるひずみ測定-----	65
	町屋 修太郎 (大同大), 長村 光造 (応用科学研)；菱沼 良光 (NIFS)；HARJO Stefanus, 川崎 卓郎 (原子力機構)	

**MgB<sub>2</sub> コイル 13:15 - 14:30 座長：菊池 章弘**

1P-p15	高抵抗 PCS 線を用いた MgB <sub>2</sub> コイルの永久電流運転-----	66
	青木 学, 一木 洋太, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司, 田中 秀樹 (日立)	
1P-p16	2 T 小径 MgB <sub>2</sub> 超電導コイルの製作-----	67
	古賀 智之, 安藤 竜弥, 坂本 和也 (日立)；山本 明保 (東京農工大)	

**回転機 (1) 13:15 - 14:30 座長：中村 武恒**

1P-p17	液体水素ポンプに適用する超電導同期モータの電磁特性-----	68
	河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	
1P-p18	超電導発電機向け高温超電導コイルの液体水素供給停止模擬試験-----	69
	石田 悠人, 山川 友瑚, 中西 啓太, 嶋田 健, 大屋 正義 (関西学院大)；白井 康之 (京大)； 小林 弘明 (JAXA)；三浦 英明, 小畑 慶人 (三菱電機)	
1P-p19	高温超電導回転機を構成するパンケーキコイルの着磁特性評価-----	70
	井浦 康伸, 古賀 太陽, 窪田 涼介 (福岡工大)；岩熊 成卓 (九大)；井上 昌睦 (福岡工大)	
1P-p20	MgB <sub>2</sub> 多芯線の高調波成分を含む回転磁界下での交流損失の数値解析-----	71
	奥村 皐月, 河野 亮介, 中村 大翔, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	
1P-p21	無絶縁高温超伝導界磁巻線を有する大型同期電動機のベクトル制御特性の解析-----	72
	吉田 愨生, 原山 亨介, 小川 純, 福井 聡 (新潟大)；石山 敦士 (早大)	
1P-p22	アキシシャルギャップ型高温超伝導誘導電動機の実験用モデル機の電気設計と特性解析-----	73
	瀧 頼 頼, 鈴木 優輔, 市橋 駿, 小川 純, 福井 聡 (新潟大)	
1P-p23	超電導磁気軸受における分割構造と損失特性との関係に関する数値解析-----	74
	原島 郁弥, 奥村 皐月, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)；桜井 雄基 (岡山大)；松村 知岳, 片山 伸彦 (東大)	

12月5日(火) A会場 9:15 - 18:00

核融合用導体 9:15 - 11:00 座長: 辺見 努

2A-a01	縮小版 FAIR 導体の交流損失評価 -----	75
	摺木 惇人, 川越 明史 (鹿児島大); 平野 直樹, 小野寺 優太, 三戸 利行 (NIFS)	
2A-a02	20 kA 級高温超伝導 STARS 導体の開発進展とマグネット適用検討 -----	76
	柳 長門, 成嶋 吉朗 (NIFS); GARFIAS Davalos Diego Armando (総研大); 小野寺 優太 (NIFS); 伊藤 悟 (東北大); 濱口 真司, 力石 浩孝, 平野 直樹, 高畑 一也 (NIFS)	
2A-a03	回転磁化法を用いた積層 REBCO 線材中の劣化位置の評価と解析 -----	77
	小野寺 優太, 平野 直樹, 三戸 利行 (NIFS)	
2A-a04	へリカル型核融合炉 HESTIA 用候補超伝導導体の機械的挙動解析 -----	78
	田村 仁 (NIFS); 宮澤 順一, 後藤 拓也 (Helical Fusion)	
2A-a05	単純積層 REBCO 導体を用いた 3次元巻線マグネットのエッジ方向歪みの定量評価とその最小化 -----	79
	成嶋 吉朗 (NIFS); GARFIAS Davalos Diego Armando (総研大); 柳 長門 (NIFS)	
2A-a06	ITER 中心ソレノイド導体の内部ひずみに対する短ツイストピッチの効果の解明 -----	80
	諏訪 友音, 磯野 高明 (量研機構); HARJO Stefanus, 川崎 卓郎, 相澤 一也 (原子力機構)	
2A-a07	JA-DEMO 候補強化 Nb <sub>3</sub> Sn 線材の交差接触応力下での I <sub>c</sub> および材料組織 -----	81
	伴野 信哉, 浅野 稔久 (NIMS); 谷貝 剛 (上智大); 川嶋 慎也 (神戸製鋼); 杉本 昌弘 (古河電工); 淡路 智 (東北大); 宇藤 裕康, 坂本 宜照 (量研機構)	

休憩 11:00 - 11:15

特別セッション 11:15 - 12:00 (A会場)

「ザ・メーカー」

昼食 12:00 - 13:15

12月5日(火) B会場 9:15 - 11:00

MgB<sub>2</sub>(2) 9:15 - 11:00 座長: 木内 勝

2B-a01	MgB <sub>2</sub> 線材の印加ひずみ - I <sub>c</sub> 特性に対する断面構成率および評価温度の影響 -----	82
	田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司 (日立); 菅野 未知央, DHAKARWAL Mukesh, 荻津 透 (KEK); 寺尾 悠 (東大)	
2B-a02	MgB <sub>2</sub> 多芯線の結合損失特性の実験的評価 -----	83
	祖父江 卓哉, 上垣 冬季, 高橋 明, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
2B-a03	超極細 PIT 法 MgB <sub>2</sub> 線材及びフレキシブルケーブルの開発 -----	84
	菊池 章弘, 飯嶋 安男, 熊倉 浩明 (NIMS); 山本 優, 河野 雅俊, 大坪 正人 (JSA); 田邊 豪, 根岸 伸行 (潤工社)	
2B-a04	データ駆動型アプローチによるプレミックス IMD 法 MgB <sub>2</sub> 線材の開発 -----	85
	松本 明善, 石井 秋光 (NIMS); 川崎 玲, 山本 明保 (東京農工大)	
2B-a05	混合 B 原料を用いて作製した MgB <sub>2</sub> バルクの超伝導特性 -----	86
	岩崎 響, 芝崎 奏, 関口 直希, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 末本 祐也, 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー)	
2B-a06	過剰 B 組成を制御した MgB <sub>2</sub> を原料とした MgB <sub>2</sub> 多結晶体の合成 -----	87
	関口 直希, 芝崎 奏, 岩崎 響, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)	
2B-a07	超伝導 MgB <sub>2</sub> 線材を用いた液体水素用液面センサーの研究開発 -----	88
	大島 冬真 (神戸大); 福本 祥一, 高田 芳宏 (山本電機製作所); 武田 実, 前川 一真 (神戸大)	

12月5日(火) C会場 9:30 - 11:00

水素液化用磁気冷凍機 9:30 - 11:00 座長：平野直樹

2C-a01	JST 未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」 ステージ2における開発状況-----	89
	沼澤 健則, 神谷 宏治, 夏目 恭平, 齋藤 明子 (NIMS); 松本 宏一 (金沢大); 武田 良彦, 北澤 英明, 清水 禎, 西宮 伸幸 (NIMS)	
2C-a02	磁気冷凍用磁性体 HoB <sub>2</sub> の輸送特性-----	90
	長谷川 博紀, 堀江 征生, 松本 宏一 (金沢大); 北澤 英明, 齋藤 明子, 沼澤 健則 (NIMS)	
2C-a03	能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMR) におけるアクチュエータ負荷低減方法の検討-----	91
	大前 聡, 白井 毅, 石田 政義 (筑波大); 神谷 宏治, 夏目 恭平, 内田 公, 齋藤 明子, 竹屋 浩幸, 沼澤 健則 (NIMS); 松本 宏一 (金沢大)	
2C-a04	能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMR) における水素凝縮熱交換器の開発-----	92
	白井 毅, 大前 聡, 石田 政義 (筑波大); 沼澤 健則, 神谷 宏治, 夏目 恭平, 内田 公, 齋藤 明子, 竹屋 浩幸 (NIMS); 松本 宏一 (金沢大)	
2C-a05	低温磁気冷凍機の効率向上に向けた低温ポンプの開発-----	93
	西岡 颯太郎, 神谷 宏治, 沼澤 健則, 齋藤 明子 (NIMS); 松本 宏一 (金沢大); 白井 毅 (筑波大); 内田 公 (NIMS)	
2C-a06	高効率を目指した2台の1段GMコールドヘッドの同相運転-----	94
	増山 新二 (大島商船高専); 夏目 恭平, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)	

ポスター手短紹介 13:15 - 13:45 (A会場)

12月5日(火) ポスターセッションII Poster会場 13:45 - 15:00

教育・セミナー 13:45 - 15:00 座長：増山新二

2P-p01	2023年度低温技術夏合宿 - オフィス開度の影響 - -----	95
	結束 汐織 (KEK); 田中 寛人 (JAXA); 増田 大誠 (住重)	
2P-p02	2023年度低温技術講習会 - 温度測定 - -----	96
	金山 高大 (KEK); 関 孝峻 (NIMS); 渡辺 奈生巳 (東陽テクニカ)	
2P-p03	2023年度低温技術夏合宿 - 蓄冷材の材料特性による効果 - -----	97
	小田 航大 (KEK); 石井 輝 (明星大); 永井 敏也 (住重)	
2P-p04	物理嫌を減らす試み - 大学初年次科目「自然を読みとく」の事例から - -----	98
	重松 利信, 稲垣 祐次 (岡山理科大)	

伝熱・磁気冷凍 13:45 - 15:00 座長：高田卓

2P-p05	高純度アルミニウムの接合による伝導特性への影響-----	99
	秋山 柚貴, 久保田 侑治, 小林 拓矢, 星河 浩介 (住友化学)	
2P-p06	薄板組立型熱スイッチの試作と性能評価-----	100
	竹内 文哉, 市川 慧, 小田 靖久 (摂南大); 夏目 恭平, 内田 公, 神谷 宏治 (NIMS)	
2P-p07	冷媒循環冷却システムの熱流体解析-----	101
	杉原 健心, 逢坂 昇汰, 岡村 哲至 (東工大); 平野 直樹 (NIFS)	
2P-p08	カム機構を用いた室温磁気冷凍装置の性能-----	102
	濱岡 遼真, 安部 勇汰, 岡村 哲至 (東工大)	

HTS交流損失・導体化 13:45 - 15:00 座長：土屋雄司

2P-p09	外部磁界印加用マグネット内の磁場分布対称性の改善によるピックアップコイル法における キャンセル残りの低減-----	103
	近森 希望, 永山 悟志, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)	

2P-p10	鉄心スロット内に配置した高温超電導テープ巻線の交流損失解析-----	104
	柳澤 隼輔, 柁川 一弘 (山理大); 中村 武恒 (京大)	
2P-p11	REBCO スパイラル導体の基礎検討-----	105
	藤田 真司, 中台 優希, 武藤 翔吾, 中村 直識, 大保 雅哉 (フジクラ)	
2P-p12	単純積層 HTS テープにおける電流分布に対するインダクタンス効果のシミュレーション-----	106
	GARFIAS Davalos Diego Armando (総研大); 成嶋 吉朗, 柳 長門 (NIFS)	

#### HTS コイル (2) 13:45 - 15:00 座長：馬渡 康徳

2P-p13	等価回路モデルのみに基づく無絶縁 REBCO コイルの励磁特性評価-----	107
	島田 亜緒, 太田 海斗, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則 (中部電力); 福田 光宏 (阪大)	
2P-p14	層間接触不良領域を持つ無絶縁 REBCO コイルにおける保護方式の検討-----	108
	日浦 琢言, 寺内 和, 中村 太郎, 天野 一樹, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 渡辺 智則 (中部電力)	
2P-p15	ピックアップコイルを用いた無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける局所劣化の監視技術-----	109
	大石 崇史, 石山 敦士 (早大)	
2P-p16	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2023 年秋): 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの励磁特性試験-----	110
	折原 菜月, 熊谷 塁, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則 (中部電力); 吉田 潤 (住重); 福田 光宏 (阪大)	
2P-p17	液体水素浸漬冷却高温超電導コイルの過通電試験-----	111
	中西 啓太, 大屋 正義 (関西学院大); 松本 郁哉, 白井 康之 (京大); 今川 信作 (NIFS); 小林 弘明 (JAXA)	
2P-p18	レーストラック型無絶縁 HTS コイルの通電特性の基礎検討-----	112
	栗賀 勇輔, 藤田 悠斗, 高桑 天通希, 小川 純, 福井 聡 (新潟大)	
2P-p19	トロイダル型消磁コイルが作る漏洩磁界の数値解析-----	113
	白石 和輝, 加納 佳祐, 柁川 一弘 (山理大)	

#### 電力・磁場応用 13:45 - 15:00 座長：川畑 秋馬

2P-p20	高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイル用小型巻線機の連続巻線モジュールの開発-----	114
	橋本 博正, 許 航, 野村 新一 (明治大); 仁田 旦三 (東大); 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS)	
2P-p21	超電導ケーブルの鉄道き電線への適合試験-----	115
	福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 富田 優 (鉄道総研)	
2P-p22	超電導き電ケーブルに向けた線材接手法の実験的評価-----	116
	石原 篤, 恩地 太紀, 赤坂 友幸, 山本 春海, 矢野 俊, 富田 優 (鉄道総研)	
2P-p23	超電導き電ケーブルに向けた線材接手法の解析評価-----	117
	赤坂 友幸, 石原 篤, 恩地 太紀, 矢野 俊, 富田 優 (鉄道総研)	
2P-p24	電磁力型海水・油分離装置における整流板の分離性能への影響-----	118
	橋本 祐希, 浅野 晃平, AMORIM Kenjirafael, 白石 浩貴, 後藤 駿介, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹 (神戸大)	

休憩 15:00 - 15:15

#### 特別セッション 15:15 - 18:00 (A会場)

第2回カーボンニュートラルシンポジウム「カーボンニュートラル社会創出に向けて  
ー Superconductivity Global Alliance (ScGA) および国内の取り組みー」

12月6日(水) A会場 9:15 - 16:45

SCSC ケーブル 9:15 - 11:00 座長：東川 甲平

- 3A-a01 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (1) :  
リール・トゥ・リール式ケーブル作製機による長尺実ケーブル作製を含めた進捗概要----- 119  
雨宮 尚之, 曾我部 友輔, 高橋 明, 藤野 正人 (京大); 手嶋 雄太, 山野 聡士 (古河電工);  
坂本 久樹 (SuperPower Inc.)
- 3A-a02 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (2) :  
様々な条件における交流損失の実験則に基づく評価----- 120  
重政 茉於, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 3A-a03 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (3) : スパイラル銅複合マルチフィラメント  
薄膜高温超伝導線材における銅メッキ層電気抵抗率と結合時定数の温度依存性----- 121  
上垣 柁季, 祖父江 卓哉, 高橋 明, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 3A-a04 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (4) : スパイラル銅複合マルチフィラメント  
薄膜高温超伝導線材のフィラメント間分流と熱暴走に対する保護----- 122  
小山 湧也, 許 光煒, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 3A-a05 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (5) : 交流クエンチ試験----- 123  
曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之 (京大)
- 3A-a06 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (6) :  
数値解析による SCSC ケーブルの保護特性の基礎的評価----- 124  
曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 3A-a07 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (7) :  
機器環境下での交流損失のケーブル形状依存性----- 125  
江崎 友哉, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)

休憩 11:15 - 12:00

医療用加速器 11:15 - 12:00 座長：宮崎 寛史

- 3A-a08 陽子線治療向け超電導サイクロトロンにおける等時性磁場形成と遮蔽電流誘起磁場の影響----- 126  
江原 悠太, 吉田 潤, 筒井 裕士, 中島 秀, 鶴留 武尚, 宮下 拓也 (住重)
- 3A-a09 「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2023 年秋) :  
1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムにおける遮蔽電流磁場の数値解析・評価----- 127  
吉藤 夢来, 太田 海斗, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)
- 3A-a10 「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2023 年秋) :  
1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの機械特性評価----- 128  
植田 浩史, 山下 葵, 小前 諒太, 井上 良太, 金 錫範 (岡山大); 野口 聡 (北大);  
渡部 智則 (中部電力); 吉田 潤 (住重); 西島 元 (NIMS); 福田 光宏 (阪大);  
熊谷 塁, 石山 敦士 (早大)

昼食 12:00 - 13:15

特別セッション 13:15 - 15:15 (A会場)

「小型核融合に向けた課題と展望」

休憩 15:15 - 15:30



**超電導・低抵抗接合 15:30 - 16:45 座長：石原 篤**

- 3A-p01 量産評価用ジョイントテスト装置の開発----- 129  
横山 彰一, 永濱 秀明, 福山 和宏 (JASTEC)
- 3A-p02 超伝導 Nb<sub>3</sub>Al ペーストの作製と接続技術----- 130  
高島 浩, 吉田 良行, 古瀬 充穂 (産総研)
- 3A-p03 REBCO 線材の低抵抗接続技術と臨界電流特性評価----- 131  
江口 朋子, アルベサル 恵子, 萩原 将也, 服部 靖 (東芝)
- 3A-p04 Bi-2223 超伝導接合の抵抗と臨界電流の磁場角度依存性----- 132  
武田 泰明, 西島 元 (NIMS); 中井 優亨, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 北口 仁 (NIMS)
- 3A-p05 Bi2223 線材の小型コイルの永久電流測定----- 133  
奥村 太一, 西山 凌平, 陰山 彰, 山崎 隼, 上坂 稜, 津川 大輝, 金沢 新哲 (室蘭工大)

**12月6日(水) B会場 9:15 - 11:00**

**HTS 特性評価 9:15 - 10:45 座長：小田部 荘司**

- 3B-a01 機械学習を導入したリール式磁気顕微鏡観察による長尺 REBCO 線材の局所不均一性の解析：  
Classification model と Object detection model の比較----- 134  
呉 澤宇, SOMJAIJAROEN Natthawiro, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)
- 3B-a02 REBCO テープ線を集合させた大容量導体の新しい健全性診断方法の開発----- 135  
永田 秀輝, 宮原 誉, 川越 明史 (鹿児島大); 平野 直樹 (NIFS)
- 3B-a03 HTS 線材の I<sub>c</sub> 測定に向けたスーパーキャパシタを用いた 2 kA パルス電源の開発----- 136  
土屋 雄司 (東北大); 水野 謙一郎 (MTL); 小濱 芳允 (東大); 淡路 智 (東北大)
- 3B-a04 過電流条件における高温超電導線の交流損失特性の解析的検討----- 137  
小川 純, 福井 聡, 山田 有宇斗, 伊藤 俊輔, 野口 陽平, 鍋谷 知廣, 荒川 稜太 (新潟大)
- 3B-a05 1 サファイアーマルチモード円柱共振器法を用いた高温超伝導薄膜の表面抵抗測定の  
国際標準化に向けた研究開発 (1)----- 138  
作間 啓太, 山下 星穂, 關谷 尚人 (山梨大); 大嶋 重利 (山形大)
- 3B-a06 BSCCO テープにおける縦曲げ歪と臨界電流の関係----- 139  
長村 光造 (応用科学研); 町屋 修太郎 (大同大); 武田 宗一郎, 山崎 浩平 (住友電工)

**休憩 10:45 - 11:00**

**バルク作製・着磁 11:00 - 12:15 座長：赤坂 友幸**

- 3B-a07 一方向溶融成長 (SDMG) 法による様々な内外径のリング状 REBCO 溶融凝固バルクの育成----- 140  
元木 貴則, 仙波 実怜, 遠藤 淳, 國本 慧太, 下山 淳一 (青学大)
- 3B-a08 SDMG バルクを種板とした単一ドメイン REBCO 溶融凝固バルクの作製----- 141  
仙波 実怜, 元木 貴則, 遠藤 淳, 國本 慧太, 下山 淳一 (青学大)
- 3B-a09 K ドープ Ba122 多結晶バルクの捕捉磁場特性評価----- 142  
菊池 慎次郎, 石渡 翔大, 徳田 進之介, 山本 明保 (東京農工大)
- 3B-a10 形状変更した軟鉄ヨークを用いた REBCO バルク磁石のパルス着磁特性の評価----- 143  
SHANG Jiahao, 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)
- 3B-a11 細孔加工したバルク磁石のパルス着磁特性の数値解析----- 144  
横山 和哉, SHANG Jiahao (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)

**昼食 12:15 - 13:15**

送電ケーブル 15:30 - 16:45 座長：筑本知子

3B-p01	有限要素法を用いた超伝導ケーブル臨界電流及び表面磁場の評価 -----	145
	張宇威, 今泉圭佑, 小田部 莊司, 鐘宇軒 (九工大); 赤坂友幸, 富田 優 (鉄道総研)	
3B-p02	航空機用超伝導ケーブル接続部の開発 -----	146
	金山 諄志, 足立 和久, 塩原 敬, 佐藤 迪夫, 中西 達尚, 高橋 保夫, 青木 裕治, 三堂 信博 (昭和電線); 和泉 輝郎 (産総研); 岩熊 成卓 (九大)	
3B-p03	RE 系超伝導線材を用いた単層縦磁界直流超伝導ケーブルの過冷却状態における通電特性 -----	147
	山口 柁平, 濱本 拓郎, 西島 太一, 木内 勝 (九工大)	
3B-p04	鉄道用超伝導ケーブルの営業運転に至るまで -----	148
	富田 優 (鉄道総研)	
3B-p05	接続部のある HTS テープ線材の短絡電流試験 -----	149
	山口 作太郎, 江口 実穂, IVANOV Yury, 神田 昌枝 (中部大)	

12月6日(水) C会場 9:15 - 16:30

計測・基礎 9:15 - 10:45 座長：中川久司

3C-a01	新型ヘリカル式液体水素用流量計の試作と流量計表面のひずみ測定 -----	150
	佐藤 更, 章 誠豫, 杉原 弥悠加, 武田 実, 前川 一真 (神戸大)	
3C-a02	極低温二相流による静電容量式ポイドメーターの評価 -----	151
	國本 直希, 辻上 博司 (岩谷産業); 中村 勝美 (京セラ)	
3C-a03	超伝導体内部に侵入した水素が引き起こす量子現象の観測 -----	152
	河江 達也, 太子周, 芳賀 雄仁, 宮川 一慶, 志賀 雅亘 (九大)	
3C-a04	液体窒素との違いよりみた液体水素タンク内部の状態変化予測に関する研究 -----	153
	幡井 翔悟, 武中 悠一郎, 山下 陽也, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実 (神戸大)	
3C-a05	横振動時における液体水素の貯蔵・輸送に関する基礎研究 -----	154
	武中 悠一郎, 幡井 翔悟, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実 (神戸大)	
3C-a06	歪ゲージの高感度測定とキャリブレーション法 -----	155
	神田 昌枝, 山本 実奈, IVANOV Yury, 山口 作太郎 (中部大)	

休憩 10:45 - 11:00

低温化合物超伝導体 11:00 - 12:00 座長：斉藤一功

3C-a07	Nb <sub>3</sub> Sn 生成に対する Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 添加効果 -----	156
	箱石 裕人, 金木 大祐, 小山田 拓真, 内藤 智之 (岩手大); 菊池 章弘 (NIMS)	
3C-a08	Sn 高拡散駆動力下での Nb 母相への Hf 添加による Nb <sub>3</sub> Sn 結晶粒微細化 -----	157
	浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大); 諸永 拓, 原 徹, 伴野 信哉 (NIMS)	
3C-a09	超極細ブロンズ法 Nb <sub>3</sub> Sn 線材及びフレキシブルケーブルの開発 -----	158
	菊池 章弘, 飯嶋 安男, 北口 仁 (NIMS); 山本 優, 河野 雅俊, 大坪 正人 (JSA); 王 旭東, 菅野 未知央, 土屋 清澄 (KEK); 菱沼 良光, 高畑 一也 (NIFS); 谷口 博康, 西村 俊則 (大阪合金)	
3C-a10	RHQT 法 Nb <sub>3</sub> Al テープ状線材と銅ストリップを複合化した大容量導体の開発 ー 安定化材配置の影響 -----	159
	高畑 一也, 菱沼 良光 (NIFS); 菊池 章弘, 飯嶋 安男 (NIMS); 土屋 清澄, 王 旭東, 大内 徳人 (KEK); 濱口 真司, 今川 信作, 三戸 利行 (NIFS)	
3C-a11	(取り消し)	

## 精密酸素量制御した RE 系超伝導体の物性

## Physical properties of precisely oxygen content controlled RE-based superconductors

下山 淳一、松下 哲哉、新津 遥都、元木 貴則(青学大)

SHIMOYAMA Jun-ichi, MATSUSHITA Tetsuya, NIITSU Haruto, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

## 1. はじめに

RE123( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ), RE247( $\text{RE}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ )は CuO 鎖面に大きな酸素不定比性を有し、これがキャリア濃度の変化を伴うことから低温物性に大きく影響することはよく知られている。RE123 では $\delta \sim 0.07$ で、RE247 では $\delta \sim 0$ [1]で  $T_c$  が最高の最適キャリアドープ状態となり、両物質とも 90 K 以上の  $T_c$  を示す。RE123 では比較的広い酸素組成で  $T_c$  が 90 K を超えるが、これは弱いオーバードープ状態から弱いアンダードープ状態にまたがるもので、磁場侵入長が 140 nm から 180 nm に変化する[2]など、90 K 級であっても  $T_c$  以外の物性は大きく変化する。さらに酸素量の減少とともに  $T_c$  は単調に低下し、 $\delta = 0.35 \sim 0.5$  では 60 K 相とも呼ばれる  $T_c$  の酸素量依存性が小さくなる領域に至る。さらに  $\delta$  が大きくなると再び  $T_c$  が低下し  $\delta = 0.6$  付近で超伝導が消失する。結晶構造解析ではちょうどこの組成で直方晶から正方晶に転移する[3]。この挙動は 30 年以上前から知られていたものであるが、臨界電流特性と結びつけた研究例は単結晶や溶融凝固バルクを用いた比較的古い少数にとどまっている。一方、RE247 は、 $\delta$  の増加とともに  $T_c$  が単調に低下するが、Pr247 では  $\delta = 0.6$  付近でのみバルクの超伝導が発現[4]するなど、CuO 二重鎖の役割も考慮する必要がある。以上の背景のもと、本研究では RE 系超伝導体の精密酸素量制御をその分布にも考慮して行い、超伝導特性、格子定数と関連付ける実験を進めている。

## 2. 実験

固相反応法で合成した無配向の Y123 焼結体の酸素量をポストアニールや急冷条件を変えて制御し、超伝導特性を SQUID 磁束計により、格子定数を粉末 X 線回折により調べた。一部の試料には酸素量分布をより均一にするため、石英封管内でポストアニール後、急冷を行った。

## 3. 結果と考察

様々な酸素量に調節した Y123 焼結体の  $T_{c(\text{onset})}$ 、不可逆温度  $T_{\text{irr}}$ 、磁場中冷却(FC)磁化の転移幅で定義した  $\Delta T_c$  および直方晶性(orthorhombicity)の  $\delta$  依存性を Fig. 1 に示した。弱い反磁性が現れ始める温度である  $T_{c(\text{onset})}$  に注目すると、 $\delta = 0.2$  以上では単調に  $\delta$  の増加とともに低下しているように見える。一方、通電測定でのゼロ抵抗温度に相当する  $T_{\text{irr}}$  には、 $\delta = 0.4$  付近に平坦部、また  $\Delta T_c$  にも同組成領域に極小がありこれが所謂 60 K 相である。しかし、直方晶性が単調に変化していることから 60 K でゼロ抵抗を示す領域が  $\delta \sim 0.55$  までの間に徐々に減っていることが示唆される。また、キャリアの弱いオーバードープ領域である  $\delta < 0.05$  の組成では、 $\delta$  の減少とともに  $T_c$  が低下したが、 $T_{\text{irr}}$  はより大きく低下し、 $\Delta T_c$  は増加した。Fig. 2 に別々に熱処理し  $\delta = 0.02_6$  に調整した 2 つの試料、および  $\delta = 0.04_8$  に調整した最適ドープ状態にやや近い試料の 1 Oe の磁場で測定した FC 磁化の温度依存性を示す。 $\delta = 0.02_6$  に調整した試料は再現性良く、87 K 付近で 2 段階の超伝導転移を示した。これはオーバードープ領域で 2 相分離が起

きている可能性を示唆している。過去に実施した同様な実験でも 90 K 近傍で 3 K 以上の  $T_c$  の飛びが観測されている[5]が、 $T_c$  以外の物性の違いはよくわかっていない。

講演では Y247 焼結体に関する研究結果も含めて、 $\delta$  が 0 に近い領域での酸素組成と超伝導特性、さらに粒内、粒間の臨界電流特性の関係を中心に報告する。

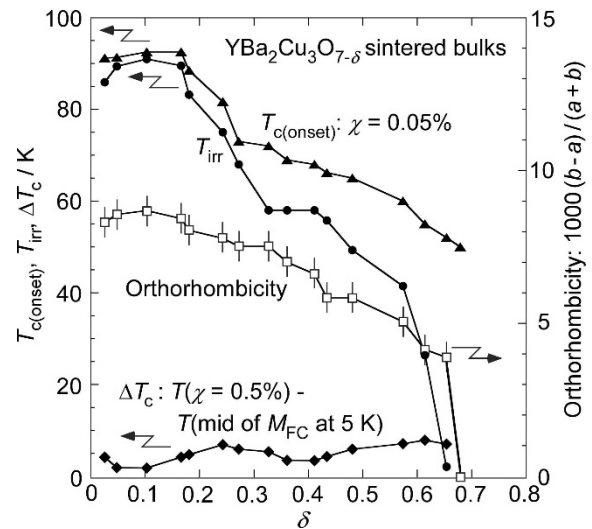


Fig. 1 Dependences of  $T_{c(\text{onset})}$ ,  $T_{\text{irr}}$ ,  $\Delta T_c$  and orthorhombicity on  $\delta$  of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  sintered bulks.

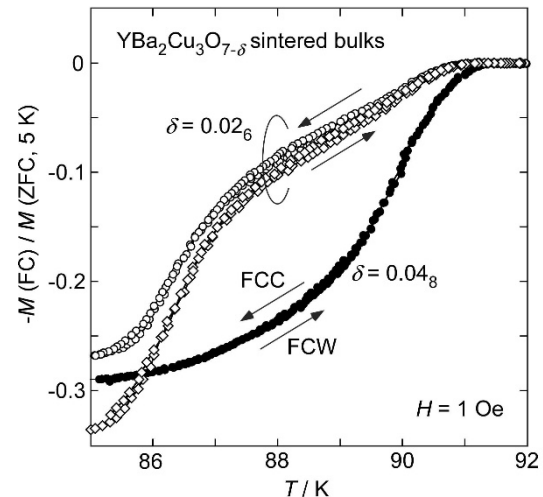


Fig. 2 Field-cooled-warming (FCW) and field-cooled-cooling (FCC) curves of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  sintered bulks at slightly carrier overdoped state.

## 参考文献

1. J.-Y. Genoud *et al.*, *Physica C* **177** (1991) 315.
2. Y.J. Uemura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **62** (1989) 2665.
3. J.D. Jorgensen *et al.*, *Phys. Rev. B* **41** (1990) 1863.
4. S. Nishioka *et al.*, *Appl. Phys. Express* **15** (2022) 023001
5. J. Shimoyama *et al.*, *MRS Proceedings* **848** (2004) 65.

# ひずみアニールによる YBCO 線材の酸素量と臨界温度の制御

## Control of oxygen content and critical temperature in YBCO Coated Conductor by annealing under external strain

李 祖涵, 堀出 朋哉, 吉田 隆(名大)  
 LI Zuhan, HORIDE Tomoya, YOSHIDA Yutaka (NAGOYA UNIVERSITY)  
 E-mail: li.zuhan.c6@s.mail.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

Coated conductor の開発に向けて  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (YBCO) の高性能化が進められている。YBCO では酸素ドーパ量  $y$  によって臨界温度 ( $T_c$ ) や臨界電流密度 ( $J_c$ ) が変化するため、酸素量の制御は重要な課題である。プロセスでの温度や酸素分圧、元素置換により酸素量が増加する。これらをパラメータとして酸素アニールにより酸素量が最適化されてきた。しかしナノ構造を制御するうえで酸素に関する問題も明らかになってきた。ナノ構造導入によって生じるひずみや欠陥により酸素量が低減する。このような問題は最適酸素アニール条件で作製した膜でも起こっており、酸素アニールとは別の観点から酸素量の制御を行う必要がある。

これまで温度や酸素分圧といったマクロな酸素アニール条件をパラメータと考えられてきた。一方、本研究では酸素空孔形成エネルギーというミクロなパラメータに着目した酸素量制御を試みる。第一原理計算を利用した研究において YBCO における酸素空孔の形成エネルギーへのひずみの影響が明らかにされた[1]。ひずみを加えることで酸素の局所環境が変化し、それが酸素空孔形成エネルギーを変化させる。ナノコンポジット膜における酸素量低減は酸素空孔形成エネルギーのひずみ依存性から説明することができる。ナノコンポジット膜のひずみはナノ構造形成によって副次的に生じるものであるが、酸素アニール時のひずみを外部パラメータとして導入することで酸素空孔形成エネルギーが制御できることが期待される。

本研究では、外部ひずみによる酸素空孔形成エネルギーの変化を利用して YBCO 中の酸素空孔量の制御をすることを目的とした。パルスレーザー蒸着 (PLD) 法により作製した薄膜のポストアニールの際にひずみを加えた。成膜条件および酸素アニール条件を変化させひずみアニールを行い、ひずみと  $T_c$  の関係について明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験方法

本研究では、KrF エキシマレーザー-PLD 法を使用して、Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) 基板上に YBCO 膜を作製した。膜厚は約 300 nm で一定とした。Fig.1 に示したように、成膜後のポストアニールの過程で、円柱状および筒状のステンレス製の型を使用して、曲げ変形を加えたうえで酸素アニールを行った。作製した超伝導膜の配向性および超伝導特性は、X 線回折法と直流四端子法を使用して評価した。成膜条件と酸素アニール条件を変化させ、ひずみアニールが酸素量および  $T_c$  に及ぼす影響を議論した。

### 3. 実験結果及び考察

成膜温度 840°C で YBCO 膜を成膜し、アニール温度 ( $T_A$ ) を変更した。  $T_A = 400^\circ\text{C}$  及び  $500^\circ\text{C}$  でアニールする際、ひずみを印加した試料と通常のひずみを印加しないでアニールを行った試料を準備した。Fig.2 に抵抗-温度曲線を示す。

す。図 2(a) は  $T_A = 400^\circ\text{C}$  でのアニールの結果を示しているが、圧縮ひずみを印加した試料、通常のひずみを印加しないでアニールした試料ともに  $T_c$  が 85.9K 程度であった。この試料ではアニール時のひずみがほとんど  $T_c$  に影響していない。図 2(b) には  $500^\circ\text{C}$  でのアニールの結果を示している。ひずみを印加しないときは  $T_c$  が 81.7K であったが、圧縮ひずみを印加すると  $T_c$  が 85.7K となった。この試料では圧縮アニールが  $T_c$  に大きな影響を及ぼしていた。

第一原理計算の結果より、圧縮ひずみを印加すると酸素空孔形成エネルギーが増加する[1]。圧縮ひずみを印加することにより酸素空孔形成エネルギーが増加し、酸素空孔量が減少した。  $500^\circ\text{C}$  でアニールした際、圧縮ひずみにより  $T_c$  が向上したことは、酸素空孔形成エネルギーの観点から説明できる。一方  $400^\circ\text{C}$  でのアニールで  $T_c$  が変化しなかったことについては酸素空孔形成エネルギーだけでは説明することができず、酸素のオプティマム量や酸素量の最大値 (通常  $y \sim 7$ ) を考慮する必要があると考えられる。

当日は、様々な条件で作製した YBCO 膜に対しひずみアニールを行い、 $c$  軸長や  $T_c$  の変化を比較する。結果をもとにひずみアニールが酸素量に及ぼす影響を解析する。さらに本手法を線材に適用する際の構造やプロセス設計についても議論する。

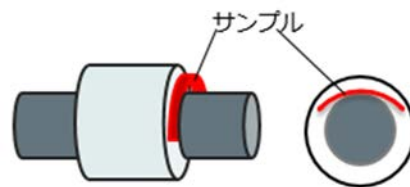


Fig. 1. Schematic illustration of the film under external strain.

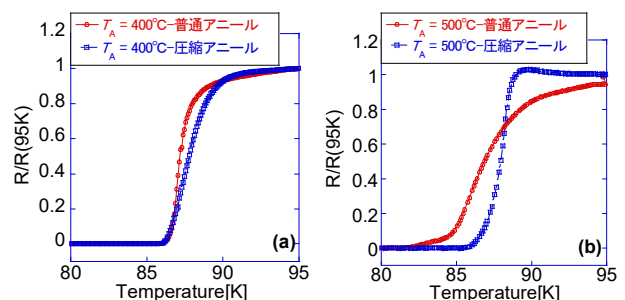


Fig.2. Resistance ( $R$ )-Temperature curves for the annealing temperature of (a)  $400^\circ\text{C}$  and (b)  $500^\circ\text{C}$ . (Red : Typical annealing. Blue: Sample with applied strain)

### 4. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 補助金 (20H02862, 19K22154)、NEDO、大倉和親記念財団及び JST-CREST (JPMJCR2336) の支援を受けて実施した。また IBAD 基板は Faraday Factory Japan 社から提供を受けた。

### 5. 参考文献

[1] T. Horide and K. Matsumoto 2014 Supercond. Sci. Technol. 27 115013.

# FF-MOD 法による金属基体上希土類混合 RE123 薄膜の作製

## Preparation of RE-mixed RE123 thin films on metallic substrates by FF-MOD method

堀口 佳吾, 大崎 瑛介, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一 (住友電工)

HORIGUCHI Keigo, OSAKI Eisuke, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

YOSHIHARA Tatsuhiko, HONDA Genki, KOBAYASHI Shinichi (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: [c5623071@aoyama.jp](mailto:c5623071@aoyama.jp)

### 1. 緒言

RE123 薄膜線材は、その高い磁場中臨界電流特性を活かして強磁場発生コイル等への応用が進められているが、比較的高価格であることが広範な普及を抑制している。RE123 薄膜線材は、金属基板上に多層構造の酸化物中間層を 2 軸配向し、その上に RE123 層をエピタキシャル成長させる方法で作製される。RE123 薄膜線材の製造方法の一つに常圧プロセスで金属組成比制御が容易な有機金属塗布熱分解 (MOD)法が挙げられ、中でも成膜速度が速く複数回焼成により厚膜化も可能なフッ素フリー-MOD (FF-MOD)法は最も低コストであり量産化に適している[1]。原料溶液中に微量の Cl を添加することで  $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$  ( $\text{Ba}2342$ )微結晶が RE123 より先に成長するため、2 軸配向薄膜生成条件が拡大するとともに、 $T_c$  が低下することなく  $J_c$  が向上することを見出している[2]。この方法では塗布と焼成を繰り返し厚膜化が容易で、 $200 \text{ A cm}^{-1}$  を超える  $I_c$  を示す Y123 薄膜が得られるだけでなく、実用レベルの臨界電流特性を有する Gd123 長尺線材開発も進められている[3]。しかし、FF-MOD 法 RE123 薄膜における希土類混合の効果はほとんど調べられた例がない。そこで、本研究では、FF-MOD 法 RE123 薄膜の臨界電流特性の向上や 2 軸配向薄膜生成条件の拡大を期待し、(Y,Gd)123 薄膜を様々な条件下で IBAD 基板上に作製した。

### 2. 実験方法

金属組成比を  $(\text{Y}_x\text{Gd}_{1-x}) : \text{Ba} : \text{Cu} : \text{Cl} = 0.95 : 2 : 3 : 0.2$  ( $x = 0 - 1$ )で混合した住友電気工業社製 Y123, Gd123 溶液もしくは自作の希土類混合(Y,Gd)123 溶液を作製し、2 軸配向したバッファ層表面を有する IBAD 基板上にスピコート法により溶液を塗布、乾燥後、仮焼した。この塗布と仮焼を 1 - 3 回繰り返した後、様々な条件下で本焼成を行い、最後に酸素アニールにより酸素量を制御した。さらに、これらの工程を繰り返す行う複数回焼成法により厚膜化した。(Y,Gd)123 薄膜の最終膜厚は塗布 1 層当たり約  $100 \text{ nm}$  である。得られた試料に対して XRD による結晶性評価、SEM による微細組織観察を行い、誘導法により液体窒素浸漬下における  $I_c$  を評価した。

### 3. 結果と考察

Cl を添加した  $x = 0.5$  の住友電気工業社製溶液より作製した  $(\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5})123$  薄膜の線材幅  $1 \text{ cm}$  当たりの液体窒素浸漬 ( $77 \text{ K}$ )における  $I_c$  は、3 層薄膜で  $I_c = 111 \text{ A cm}^{-1}$ 、6 層薄膜で  $I_c = 112 \text{ A cm}^{-1}$ 、9 層薄膜で  $122 \text{ A cm}^{-1}$  と、厚膜化による大きな  $I_c$  の向上は見られなかった。Fig. 1 に示す 3 層薄膜と 6 層薄膜の表面二次電子像より、厚膜化にともない不純物が増加していることがわかる。一方、焼成した 3 層の Y123 ( $x = 1$ )薄膜の上に 3 層の Cl 添加  $(\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5})123$  ( $x = 0.5$ )薄膜を作製したところ、 $I_c$  は  $(\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5})123$  (3 層) / Y123 (3 層) 薄膜で  $87 \text{ A cm}^{-1}$ 、さらに  $(\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5})123$  を 3 層追加した薄膜で  $117 \text{ A cm}^{-1}$  と  $I_c$  が向上する傾向が見られた。これらの薄膜の表面 XRD パターンを Fig. 2 に示す。いずれの試料においても鋭い 001 ピークが確認できた。講演では Cl 添加  $(\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5})123$  薄膜の焼成条件の最適化およびさらなる厚膜化と、 $x$  の値を変えた  $(\text{Y}_x\text{Gd}_{1-x})123$  薄膜の特性についても報告する。

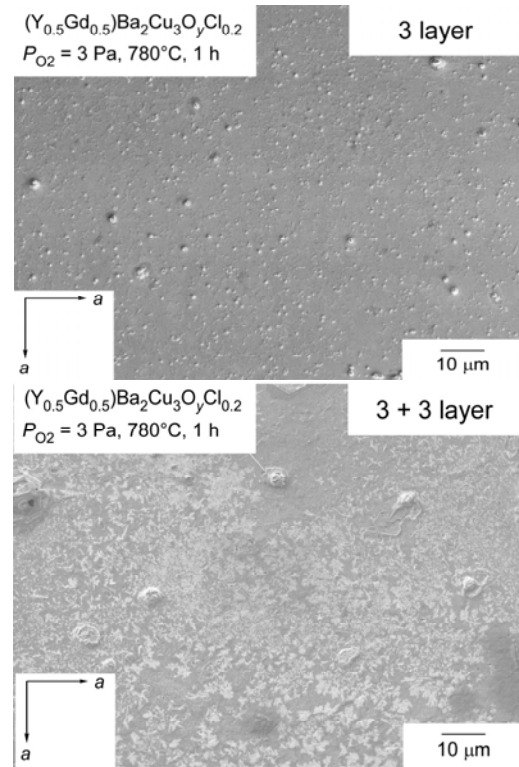


Fig. 1. Secondary electron images of surface of (Y,Gd)123 thin films with various thicknesses

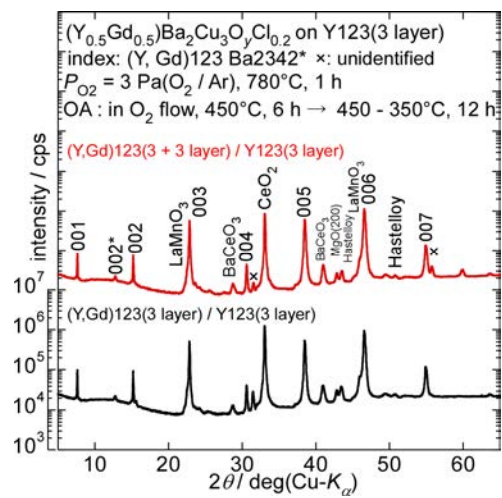


Fig. 2. Surface XRD patterns of c-axis oriented (Y,Gd)123/Y123 thin films with various thicknesses

### 参考文献

- [1] Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 095017.
- [3] T. Yoshihara *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33** (2023) 6600205.

# 組成が TFA-MOD 法 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の諸特性に及ぼす影響

## The influence of composition on the properties for TFA-MOD $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ films

海谷 真大, 大木元 勇貴, 鈴木 匠 (成蹊大); 三浦 正志 (成蹊大, JST-FOREST)

KAIYA Mahiro, OGIMOTO Yuki, SUZUKI Takumi (Seikei Univ.); MIURA Masashi (Seikei Univ., JST-FOREST)

E-mail: us203028@cc.seikei.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導材料の臨界電流密度( $J_c$ )を向上させることは臨界温度( $T_c$ )を向上させることと同様に超伝導機器応用の可能性を広げる。特に、銅酸化物超伝導体  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (REBCO) は、高い  $T_c$  かつ高い  $J_c$  を有することから様々な応用が期待されており、更なる  $J_c$  特性の向上が望まれている。近年、我々は REBCO 線材や鉄系超伝導体  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  (Ba122:P) 薄膜において、①キャリア密度などのチューニングパラメーター制御による熱力学的アプローチと②磁束ピン止め点導入の融合により  $J_c$  特性を向上させることに成功した[1]。①の熱力学的アプローチによる磁場侵入長( $\lambda_{ab}$ )とコヒーレンス長( $\xi_{ab}$ )の低減は、 $J_c$  の向上と同時に対破壊臨界電流密度 ( $J_d \propto 1/\lambda_{ab}^2 \xi_{ab}$ )をも向上させる。一方、②の磁束ピン止め点としては、REBCO 線材及び Ba122:P 薄膜の母相の結晶性に影響を与えないインコヒーレントな  $\text{BaMO}_3$  (M = Sn, Zr, Hf) ナノ粒子を導入しピンニング力を向上させた。これらの融合アプローチにより、REBCO 薄膜は、約 30%  $J_d$  の  $J_c$  (4.2 K) を、Ba122:P 薄膜の約 10%  $J_d$  の  $J_c$  (4.2 K) を得た。しかし、上記の融合アプローチの有効性は他の超伝導体では十分に検討されていない。

そこで、本研究では、融合アプローチによる高  $J_c$  材料設計の有効性を確認するため、REBCO や Ba122:P 材料とは諸特性の異なる  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  (LBCO) を対象として、チューニングパラメーターとして Ba 組成によりキャリア密度を制御し、それが LBCO 薄膜の超伝導特性に及ぼす影響について検討した。

### 2. 実験方法

Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition(TFA-MOD)法を用いて、Ba 組成の異なる LBCO ( $x = 0.05 \sim 0.19$ ) 薄膜を  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) 単結晶基板上に作製した。薄膜の結晶性を X 線回折法、超伝導特性を四端子法により評価した。

### 3. 実験結果

**Fig. 1(a)** に Ba 組成の異なる LBCO 薄膜の  $T_c$  を示す。図より  $x = 0.08$  及び  $0.17$  組成において、高い  $T_{c\text{onset}} \cdot T_{c\text{zero}}$  を示した。一方、**Fig. 1(b)** に示す自己磁場  $J_c$  ( $J_c^{\text{s.f.}}@4.2\text{K}$ ) は、Ba 組成の増加に伴い高い値を示し、 $x = 0.17$  組成で最大となった。なお、 $x = 0.125$  付近でのほぼゼロに近い  $T_{c\text{zero}}$  及び  $J_c^{\text{s.f.}}$  は、1/8 異常[2,3]によるものと考えられる。

当日は、Ba 組成の異なる LBCO 薄膜の詳細な実験結果を報告する。

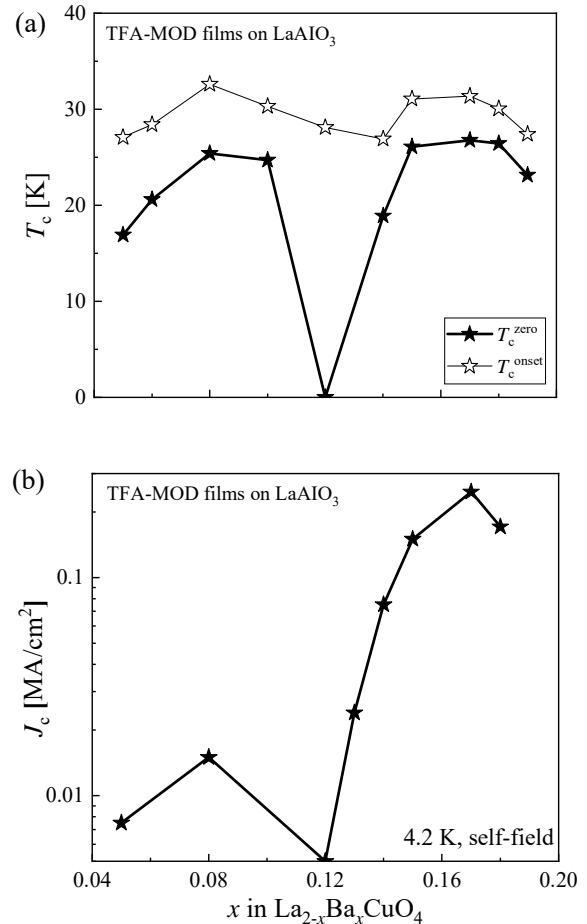


Fig. 1 Ba dependence of (a)  $T_c$  and (b)  $J_c^{\text{s.f.}}(4.2\text{K})$  for TFA-MOD  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  films.

### 謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 (FOREST) JPMJFR202G の助成を受け実施したものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 (23H01453) の助成を受け実施したものである。

### 参考文献

- [1] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.
- [2] K. Kumagai *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **76&77** (1988) 601.
- [3] H. Sato *et al.*, *Phys. Rev. B* **62** (2000) R799.

# 可溶性基板上への REBCO 薄膜作製の検討

## Fabrication of REBCO film on water soluble substrate

木許 陽登, 寺西 亮, 岩熊 成卓(九大)

KIMOTO Haruto, TERANISHI Ryo, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

E-mail: kimoto.haruto.675@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、航空機業界では温室効果ガス排出抑制の観点から航空機の電動化が注目されている[1]。モーターは磁力によって動力を得る反面、モーターからの漏れ磁場による電子機器への影響が懸念されることから、磁場シールド材が有用となる[2]。特に電動航空機への適用を考慮すると遮蔽能力のみならず、軽量・形状自由度の高さ・大面積などが求められる。

我々は超伝導体の完全反磁性に注目し、樹脂シートと  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (REBCO) の組み合わせによる磁場シールド材の開発を試み、YBCO 粉末と樹脂を組み合わせることで軽量かつ形状自由度の高い磁場シールド材を得ている[3]。反磁性効果が小さいことが課題である。

反磁性効果が小さい原因の一つに REBCO 粉末間に樹脂が入り込むことによって磁束線がすり抜けるためだと考えられる。よって REBCO を薄膜にすることで磁束線のすり抜けを抑制できると期待される。ここで REBCO の結晶化温度は約  $700^\circ\text{C}$  以上であり PET 樹脂の融点( $264^\circ\text{C}$ )に対し高温であるため、樹脂上に直接 REBCO を成膜することはできない[4][5]。そこで、REBCO 薄膜を可溶性基板上に一旦成膜したのち、REBCO 層を樹脂シートに張り合わせ、その後、基板を除去する方法を検討している。

本研究では可溶性基板上に REBCO 薄膜を作製する際の基板との反応性について考察する。

### 2. 実験方法

基板には NaCl(100)単結晶基板と、比較用に IBAD- $\text{CeO}_2$  基板(実用基板)を用い、ターゲットには LuBCO を用いて PLD にて成膜した。NaCl は融点が約  $800^\circ\text{C}$  であるのに対して LuBCO は約  $640^\circ\text{C}$  の成膜が報告されていることから、NaCl の融点未満での成膜が期待される[6][7]。成膜は KrF エキシマレーザーを用い、ターゲットと基板間の距離を 4 cm、基板温度を  $635^\circ\text{C}$ 、酸素分圧を 0.1 Torr、周波数を 10 Hz、レーザーのエネルギーを約 150 mJ、蒸着時間を 1 時間とした。サンプル作製後、XRD を用いた生成相の同定によって、基板との反応性を評価した。

### 3. 結果と考察

Fig.1 は XRD による  $\theta$ - $2\theta$  測定の結果である。LuBCO の 001 ピークを正方形、異相を菱形、基板由来のピークを丸でそれぞれ示している。実用基板上では c 軸配向した LuBCO が生成された一方、NaCl 基板上では LuBCO が生成されず、 $\text{Ba}_4\text{Cl}_6\text{O}$ 、 $\text{Ba}_2\text{CuClO}_2$ 、CuCl や LuClO などの異相が観察された。NaCl 基板上の異相には構成元素に Cl を共通して含んでいることから基板上に蒸着した Lu, Ba, Cu と基板が反応することが確認された。

基板との反応を防ぐ方法として、基板温度を下げて熱拡散を防ぐ方法の他、NaCl と LuBCO の間に中間層を導入して拡散を防ぐ方法が挙げられる。ここで前者については LuBCO 成膜時の基板温度が低温になる程  $T_c$  が低下することが報告されているため、これ以上の基板温度の低下は望ましくない[7]。後者については LuBCO とのミスフィット率が 0.86%、NaCl とのミスフィット率が 4.2%である  $\text{CeO}_2$  が中間層として期待される。

以上のことから、本実験での成膜条件において NaCl 基板

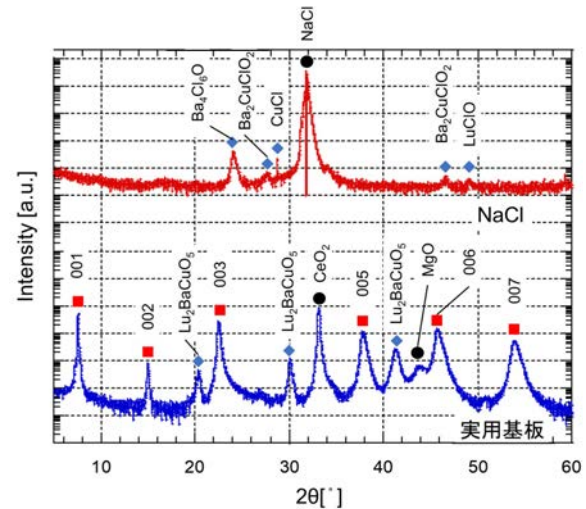


Fig.1 XRD  $\theta/2\theta$ -scan of each sample

上に LuBCO を成膜すると、基板と蒸着元素とが反応することが明らかとなった。基板との反応を防ぐ方法としては中間層の導入が有効だと考えられ、IBAD- $\text{CeO}_2$  基板上に LuBCO の c 軸配向膜が作製できたことから、 $\text{CeO}_2$  が中間層の候補として挙げられる。

### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。また、研究の一部は JSPS 科研費 21K18831 および 22H02019 の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] H. Sasa, M. Iwakuma, et al.: IEEE TAS, Vol. 31, No. 5 (2021) 5200706
- [2] 松葉博則, 表面科学, 12 巻, 9 号 (1991) p.567-573
- [3] J. Tamaru, R. Teranishi, et al.: IEEE TAS, Vol. 32, No. 6 (2022) 7200404
- [4] S. Favre, et al.: Materials Chemistry and Physics, Vol. 266 (2021) 124507
- [5] 大木道則ら, 『化学辞典』. 東京化学同人, (1994)
- [6] 昭和化学株式会社, “製品安全データシート(SDS)”, 製品安全データシート, 2023/02/25 改訂, <http://www.st.rim.or.jp/~shw/MSDS/19290250.pdf>, (参照 2023/10/30)
- [7] Y. Ishimaru, et al.: Physica C, Vol. 445-448 (2006) p.908-911
- [8] H. Shindo, et al.: Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn, Vol. 58 No.1 (2004), p.30-35

# TFA-MOD 法を用いた YBCO-YPrBCO ストライプ構造細線の特性検証

## Property verification of YBCO-YPrBCO striped filaments using TFA-MOD process

山下 知大, 石井 宏尚, 荒木 猛司, 江口 朋子(東芝)

YAMASHITA Tomohiro, ISHII Hirotaka, ARAKI Takeshi, EGUCHI Tomoko (Toshiba Corporation)

E-mail: tomohiro7.yamashita@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO) 線材は、高い臨界温度と磁場中臨界電流密度を有し、超電導機器への適用と実用化が期待されている。超電導機器の交流駆動で発生する交流損失のうち、最も大きな要因であるヒステリシス損失を低減するためには、REBCO 線材を細線化することが有効である[1]。細線化手法としてレーザー加工が一般的であるが、そのほかにも、機械加工、ケミカルエッチング、インクジェットプリントなど様々な手法で線材の細線化が試みられている[2]。しかしレーザー加工や機械加工は、加工速度が速く長尺にも対応できる一方で、線幅を細くするほど剥離が生じやすくなり、細線のエッジ部分に熱的・物理的なダメージが生じやすい。

本報告では TFA-MOD 溶液を用い、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YBCO) 溶液と、YBCO と同様のペロブスカイト結晶構造で非超電導体となる Y<sub>x</sub>Pr<sub>1-x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YPrBCO) 溶液[3]とを、細線状に交互に塗布し、超電導と非超電導の細線が隣接したストライプ構造の形成を試みた。ストライプ構造の模式図を Fig. 1 に示す。本構造は、複数の細線が一体化して幅広膜を模した形状となるため、細線の剥離を抑制することができる。また全体が連続したペロブスカイト結晶構造となるため、細線のエッジダメージを低減でき、YBCO 細線中の結晶配向乱れおよびそれに伴う臨界電流密度低下を抑制することが期待される。

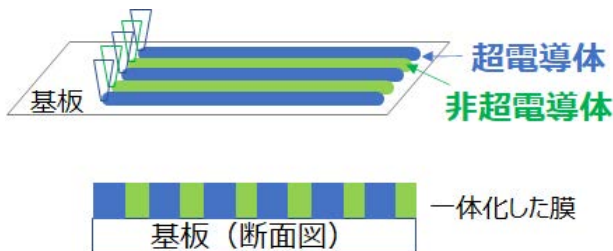


Fig. 1 Schematic diagram of a striped structure

### 2. 実験方法

YBCO、YPrBCO の TFA-MOD 溶液を合成し、幅 10 mm × 長さ 20 mm × 厚み 0.50 mm の LaAlO<sub>3</sub> 単結晶基板(100)面に、ディスペンサー装置を用いて溶液を直線状に塗布した。1 本の YBCO 溶液線の両隣りに YPrBCO 溶液を 1 本ずつ塗布、合計 3 本の直線が隣接したストライプ構造を形成し、仮焼、本焼、酸素アニールをおこなった。

作製した細線試料を液体窒素に浸漬し、四端子法にて電流電圧特性を測定して臨界電流値を評価した。電圧端子、電流端子を取り付ける部分には、試料表面に Pt を成膜している。また触針式段差計により細線の厚さと断面積を計測し、これと臨界電流値から、臨界電流密度を算出した。またストライプ構造試料との比較のため、YBCO 単独細線も作製し同様の評価をおこなった。

試料表面は光学顕微鏡にて観察し、EPMA (電子プローブマイクロアナライザ)にて元素分析を行った。

### 3. 結果・考察

Fig. 2 に、焼成後のストライプ構造細線試料 A の光学顕微鏡写真を示す。試料中に通電を妨げるようなクラックはなく、3

本の細線を隣接できていることがわかる。YBCO、YPrBCO の線幅は、それぞれ約 160 μm、膜厚は約 500 nm であった。

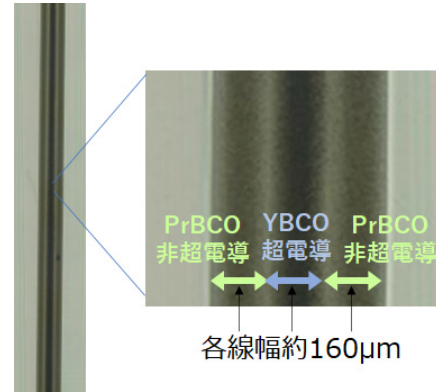


Fig. 2 Photo of three bordering lines observed with an optical microscope (sample A)

Fig. 3 に、焼成後のストライプ構造細線試料 B の EPMA による Pr 元素マッピングを示す。2 種類の溶液を隣接して塗布する本手法では、細線エッジ部分での 2 液の混ざりを抑制することが重要となるが、Fig. 3 から 2 液は明瞭に塗り分けできていると考えられる。

また電流電圧特性測定にて、YBCO 単独細線では線幅と臨界電流密度  $J_c$  が相関しており、線幅を細くするほど  $J_c$  が低下した。一方ストライプ構造細線は、同じ線幅の単独細線と比較して  $J_c$  を 5 倍以上向上できる結果を得た。これは前述したように、ストライプ構造細線ではエッジダメージが低減できるためと推察される。発表では、2 液の隣接界面や  $J_c$  の詳細についても報告する。

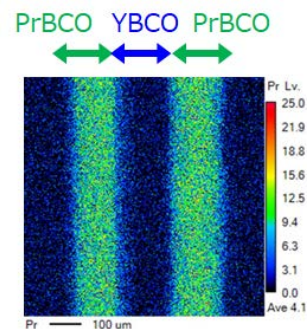


Fig. 3 Pr mapping using EPMA of three bordering lines (sample B)

### 参考文献

1. N. Amemiya, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **17**, 1464 (2004).
2. T. Machi, *et al.*: J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol. 50 No. 10 (2015) p. 476
3. M. Hayashi, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **31**, 055013 (2018).



## 圧力集中法により作製した REBCO スプリット線材の磁化測定の評価

### Evaluation of magnetization measurement of REBCO split wire made by pressure concentration method

西山 凌平, 奥村 太一, 影山 彰, 山崎 隼, 上坂 稜, 津川 大輝, 金沢 新哲  
 Nisiyama Ryohei, Okumura Taichi, Kageyama Akira, Yamazaki Hayato, Uesaka Ryo,  
 Tsugawa Taiki, Kanazawa Shintetsu

#### 1. はじめに

我々の研究室では主に REBCO 線材を内部スプリット法により多芯化させたスプリット線材を開発している[1]。

内部スプリット法には圧力集中法、V字曲げ法、ひきさき加工法などの3種類が存在し、本研究では圧力集中法とV字曲げ法について研究を行っている。Fig.1に示すように圧力集中法はガイドローラー部分にSUSなどの硬い素材が使われており、V字曲げ法はPOMなどの柔らかい素材を使っている。

#### 2. サンプル作製と磁化測定

本研究で使用した線材は希土類元素に Gd を使用したフジクラ製の GdBCO 線材である。多芯化するために、Fig.2 ようなマルチスプリッターを使用した。マルチスプリッターには3つの加工部にローラーカッターがそれぞれ37枚重ねてあり、往復のローリング加工をすることで線材に複数の加工ラインが入る。今回は加工方法、負荷、加工回数を変化させた線材サンプルを多数作製し、磁化測定を行った。本原稿では圧力集中法で負荷が75N、加工回数100回で作製したサンプル1と無加工のオリジナル線材について述べる。

#### 3. 実験結果

MPMS 装置を利用して磁化の磁場依存性を測定した結果を Fig.3 示した。ヒステリシス曲線で囲まれた面積が磁化損失の大きさである。サンプル1はオリジナル線材と比べて面積がかなり小さくなっており、磁化損失が大幅に低減していることがわかる。

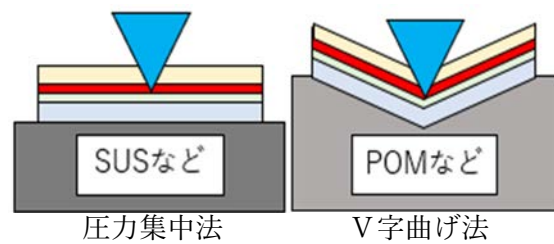


Fig.1 manufacturing methods of split

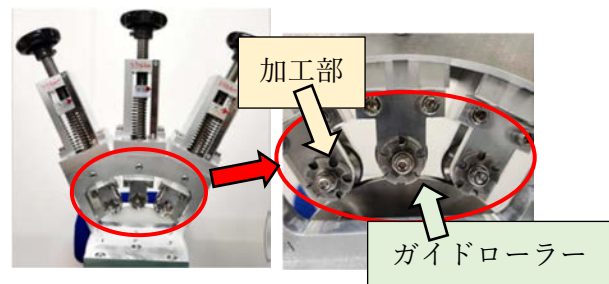


Fig.2 Multi splitter

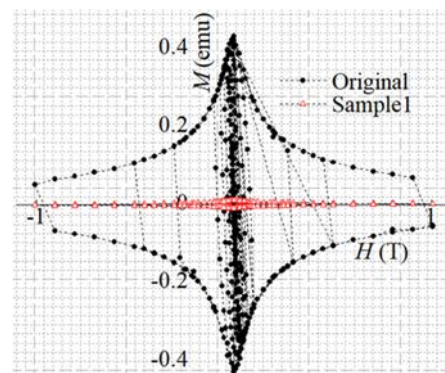


Fig.3Magnetic field dependence of magnetization

#### 参考文献

1. X. Jin, et al.: Development of a REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> multi-core superconductor with 'inner split' technology, IOP Publishing, Vol. 29(2016)

# ポインティングベクトルを用いた高温超伝導誘導同期モータにおける 電気－機械エネルギー変換過程の解析的検討

## Analytical Study of Electromechanical Energy Conversion Process in High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor using Poynting Vector

中村 武恒 (京大)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、誘導機のかご形回転子巻線を高温超伝導材料で構成する高温超伝導誘導同期モータ(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)[1]の研究開発を行っている。HTS-ISMの応用ターゲットとしては、各種輸送機器や液化水素移送・昇圧ポンプが考えられる。特に、液化水素移送ポンプは水素サプライチェーンの構築に向けて大きく注目されており、超伝導モータとして世界初の実用化を目指した NEDO プロジェクトを進めている状況にある[2]。

HTS-ISM の特長としては、高効率特性かつ高出力(and/or トルク)密度特性が挙げられる。例えば、前報では 50 kW 級 HTS-ISM(運転温度: 20 K)について効率 99.85%かつ出力密度 1.2 kW/kg の両立を精密な解析に基づいて実現している[3]。一方で、上記特性のさらなる改善を目指す場合、単位容積(若しくは単位質量)中に蓄えられる磁気エネルギー、及びその空間変位として取り出せる機械出力の究極値は、境界条件としての回転機構造や複数材料特性の複雑性もあり現状は不明である。HTS は、極めて小さな断面中に大電流を輸送可能なことから、電気－機械エネルギー変換の主体である磁束の空間構造を作る際に起磁力が局所化することになり、導体配置の相違が回転特性に大きな影響を与えると考えられる。

我々は、上記空間磁束構造に擾乱として作用するスロットについて、それを(経験則に依らず)一意に設計できる自己組織化設計法を提案している[4]。本講演では、自己組織化法によって HTS-ISM の回転特性を究極化するため、まずは感度解析による設計条件の検討を行った。即ち、HTS ロータバー構造を系統的に変化させ、機械出力との関係を 2 次元電磁界解析に基づいてポインティングベクトルによって検討した。

### 2. ポインティングベクトルによる回転特性表現

ポインティングベクトル  $\mathbf{P}$  は、任意の曲面  $S$  を流入あるいは流出するエネルギー量を表し、次式で定義される。

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{E}$  ならびに  $\mathbf{H}$  はそれぞれ  $S$  における電界ならびに磁界である。紙面の都合で詳細は文献[5]に譲るが、式(1)を用いると、回転子に発生するトルク  $\tau$  として次式が導出される(回転子外表面に接する空気層で定義)。

$$\tau = \frac{LR^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_r B_\theta d\theta \quad (2)$$

ここで、 $L$  は回転子軸長、 $R$  は回転子半径、 $\mu_0$  は真空の透磁率である。また  $B_r$  ならびに  $B_\theta$  は、それぞれ回転子表面における半径( $r$ )方向磁束密度ならびに周( $\theta$ )方向磁束密度である。同式から、 $B_r$  だけでなく  $B_\theta$  との積としてトルクが与えられることになり、両者の空間分布を精密に制御することが重要である。

### 3. 対象とする HTS-ISM と解析方法

本研究では、1 kW 級 HTS-ISM を対象にした。固定子(外径: 112.0 mm, 軸長: 60.0 mm)は三相6極Y結線の銅巻線(3分布巻; 固定子スロット数: 36)とした。一方で、回転子(外径: 55.0 mm, 軸長: 60.0 mm)のかご形巻線としては、Fig. 1に示すように微小な断面積( $w_r \cdot d$ )を有するかご形ロータバーを回転子外周面に等間隔で配置し、かつ  $w_r = w_m$  とした。本配置によって、ロータバーの周方向合計長( $\sum w_r$ )及び主磁束の磁路幅の合計長( $\sum w_m$ )が一致する( $\sum w_r = \sum w_m$ )。次に、 $d$  を固定し

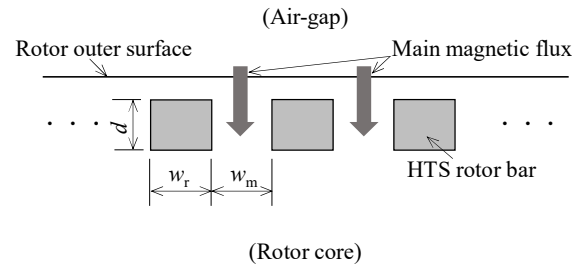


Fig. 1 Schematic diagram of rotor bar arrangement.

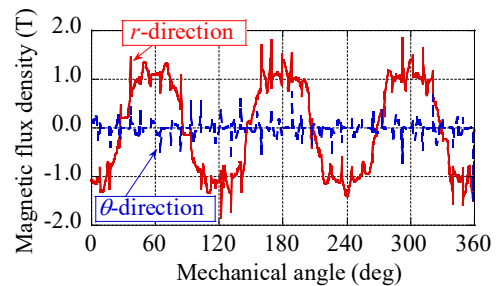


Fig. 2 Spatial distribution of air-gap magnetic flux density when the number of rotor bars is 19.

てロータバー数を  $1/n$  ( $n$ : 自然数)にし、 $nw_r = nw_m$  となるようにロータバーを配置する。この操作によって、ロータバーの総断面面積は常に一定となる。

電磁界解析には JMAG-Designer<sup>®</sup> を使い、電流源駆動(20 A, 277.5 Hz)に対する機械出力特性を解析した。また、高温超伝導ロータバー特性を模擬するために十分高い導電率 ( $10^{11}$  S/m) を仮定した。なお、定常状態における HTS かご形巻線は一定の Ohmic 抵抗として振る舞うことを示している [6]。

### 4. 解析結果と考察

解析の結果、ロータバー数が 19 付近にて磁気遮蔽が崩されて機械出力が実現された。Fig. 2 には、上記条件における  $r$  ならびに  $\theta$  方向磁束密度分布を示すが、これら値から式(2)を用いてトルクを計算することができる。即ち、ギャップ磁束密度の空間分布と機械出力の関係を系統的に議論できるが、紙面の都合により、詳細は講演当日に報告する。

### 謝辞

電磁界解析の実施に際し、一部協力頂いた箕西稜太氏に謝意を表す。本研究は、科学研究費補助金(22H01471)の助成を受けた。

### 参考文献

1. T. Nakamura: TEION KOGAKU, Vol. 57, No. 2 (2022) 101-108
2. (株)西島製作所ニュース: <https://www.torishima.co.jp/2023/09/21/post-8854/> (2023年10月31日閲覧)
3. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.2
4. 中村 武恒, 木戸 勇志, 特願 2021-158009 (2021)
5. T. Kenjo: IEEJ Trans. Pow. Ener., 95(7) (1975) 359-366
6. T. Nakamura, to be presented at ISS2023 (AP-2-7)

# 水素エンジン車への搭載を目指した 3 kW 級液体水素ポンプ用 高温超電導誘導同期モータの解析的検討

## Analytical Study of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor for 3 kW Class Liquid Hydrogen Pump Aimed at Installation in Hydrogen Engine Vehicle

山本 真嘉, 中村 武恒 (京大)

YAMAMOTO Masayoshi, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、高温超電導誘導同期モータ(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)[1]の水素ポンプへの応用研究を行っている。HTS-ISM は、かご形回転子巻線の HTS 化を基本としており、鉄心中の HTS 導体の大電流低損失輸送特性を利用することで、高効率化や高出力密度化を実現できる。

本研究では、水素エンジン車への搭載を目標として、当該車内に搭載される液体水素の昇圧ポンプ用 3 kW 級 HTS-ISM の電磁設計を実施した。

### 2. 液体水素ポンプに求められる性能

液体水素タンクが搭載されている水素エンジン車では、当該タンクからレシプロポンプによって昇圧し、気化ガスを水素エンジンに導入して動力を得ている。一方で、液体水素の大気圧沸点が 20 K であることから、HTS-ISM を液体内に浸漬すれば冷却ペナルティの問題を考える必要なく運転することができる。本研究では、ギアを用いないシステム構成を検討するため、回転数 250 rpm、出力 3 kW の HTS-ISM を指向した。さらに、車載システムであることから、バッテリー電圧を利用した設計が求められ、本研究では DC48 V に設定した。

### 3. 設計方法

回転子巻線用の HTS 導体としてビスマス系テープを想定し、運転温度は 20 K とした。HTS 導体の電流輸送特性としては所謂 n 値モデルを仮定し、臨界電流密度の磁界依存性としては Kim モデルを用いている。2次元電磁界解析には COMSOL Multiphysics を用いた。

### 4. 設計結果と考察

Fig. 1には、設計した 3 kW 級 HTS-ISM の断面図を示す。固定子スロットは 36 (三相 4 極, 3 分布巻) であり、回転子スロット数は 26 である。また、Fig. 2にはトルク特性を示す。回転数 250 rpm、出力 3 kW に相当するトルク値 (120 Nm) が実現されている。さらに、Fig. 3には定常状態における磁束密度コンター図を示すが、ギャップ磁束は 2 T 程度に収まっている。

### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22H01471)の助成を受けた。

### 参考文献

1. T. Nakamura: TEION KOGAKU, Vol. 57, No. 2 (2022) pp. 101-108
2. (株)西島製作所ニュース: <https://www.torishima.co.jp/2023/09/21/post-8854/> (2023 年 10 月 30 日閲覧)

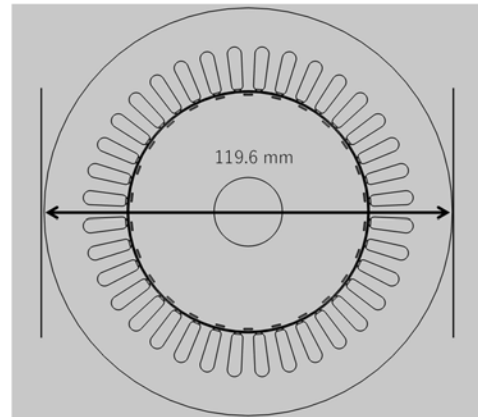


Fig. 1 Geometry of 3 kW class HTS-ISM.

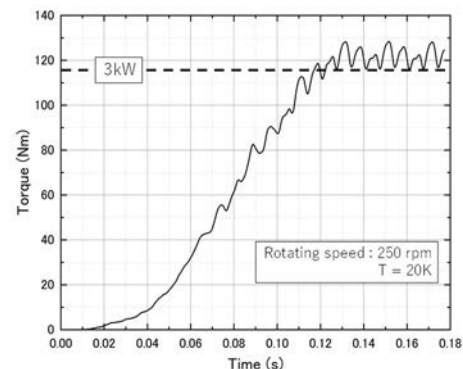


Fig. 2 Torque of 3kW HTS-ISM.

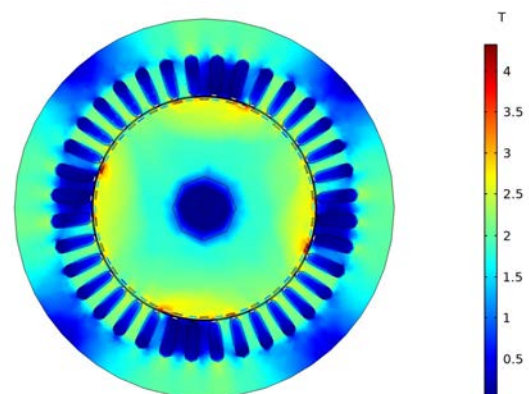


Fig.3 Contour Diagram of Magnetic flux density of 3kW HTS-ISM

# 積層超電導体を使用した磁気軸受のばね定数と回転損失に関する考察

## Study on Spring Constants and Rotational Losses of Magnetic Bearings with Stacked Superconductors

寺尾 悠, 淵野 修一郎(東大); 大屋 正義(関学)

TERAO Yutaka, FUCHINO Shuichiro (Univ. of Tokyo); OHYA Masayoshi (Kwansei Gakuin Univ.)

E-mail: yterao8934@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

回転機の機械損失として大きな要因は軸受部分での摩擦である。例えば SuperGM では全体損失の中で機械損失が約20%を占めていた[1]。すなわち、機械損失の低減は高効率な回転機を実現する上で重要な課題である。我々は REBCO 線材をリング状に巻いて加工した積層超電導体と永久磁石を組み合わせた軸受を提案している[2]。今回は3段の積層超電導体による軸受のスラスト力曲線からばね定数を算出し、1段のバルク/積層超電導体との比較を行う。さらに回転損失の測定を行い、共振点等を考察した結果を報告する。

### 2. スラスト力の測定とばね定数の算出

Fig. 1 にスラスト方向の電磁力測定システムを示す。リング状の超電導体中(外径46 mm、内径17 mm、高さ13.5 mm)に配置した永久磁石(直径13 mm、高さ20 mm)とロードセルが非磁性の棒で接続され、これをラックアンドピニオンで±7 mmの範囲で準静的に上下させて電磁力の測定を行う。Fig. 2 に3段重ねのリング状積層超電導体による電磁力測定結果、Table 1 に1段のバルク及び積層超電導体による電磁力 [2]の最大点から算出したばね定数を示す。上下方向で値が異なるのは、冷却時の永久磁石の初期配置の位置が完全に超電導体の中心でなかったためと考えられる。しかし、積層超電導体を3段にすることにより、ばね定数は1段のバルク及び積層超電導体より最大73%程度まで増加することが分かる。これを踏まえ、冷却温度をさらに下げるとピン止め力が増して、数 kg の回転子を持つ回転機(数 kW 級)での使用が期待出来る。

### 3. 回転損失の測定

積層超電導体を3段重ねた磁気軸受二個で、回転子を模擬した SUS 製イナーシャ(直径65 mm、厚さ15 mm、223 g)を両側から挟んだ回転系を構成し、回転損失の測定を行った。先に報告した装置 [2]を使用し、500-4500 rpm の範囲で回転数を変化させる。そして定常状態で磁気クラッチにより回転系を切り離し、回転数が定常の63%(1/e)、すなわち時定数まで減衰する間の回転損失を求めた。Fig. 3 に求めた回転損失の結果を示す。実験中の回転系の様子や実際の結果より、今回の測定系では1300-1500 rpm 及び2400 rpm において共振現象がみられた。一方、3000 rpm 付近でも上に凸の様相がみられるが、これは線形補間の近似曲線の影響であり共振点ではないと考える。今回の回転系での損失値は全体として10 W 未満のオーダーであった。

### 4. まとめと今後の課題

提案する磁気軸受で電磁力測定及びばね定数の算出と、回転損失の測定を行った。線材によるリング状の超電導体を複数積層させることでピン止め効果による電磁力がバルクより強くなり、また損失も幅広い範囲で数 W オーダーと低損失な磁気軸受として使用できる可能性がある。現在、φ140 mm の積層超電導体による軸受を製作中であり、今後は更に大型の軸受に関して実験・考察していく。

### 謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)として実施した。また、軸受構成に関して助言いただいた元・産総研の岡野真氏に深く感謝申し上げる。

### 参考文献

1. 上之園博:「超電導発電機」オーム社(2018)
2. Y. Terao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 91.

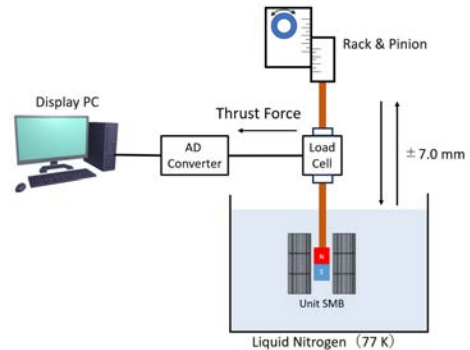


Fig. 1 Thrust force measurement system for the SMBs.

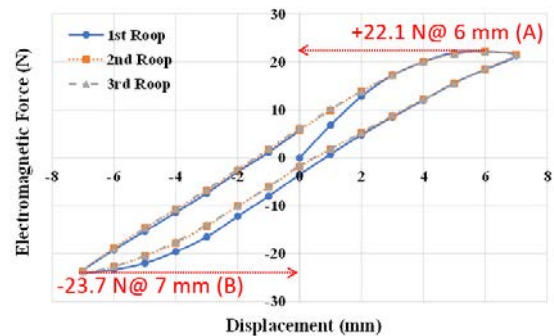


Fig. 2. Experimental result of thrust electromagnetic forces of the 3-stacked SCs.

Table 1. Spring constant values of the three SMBs

	1-Bulk SC	1- Stacked SC	3- Stacked SC
Upper spring constant at A, N/m	$2.17 \times 10^3$	$2.35 \times 10^3$	$3.67 \times 10^3$
Downer spring constant at B, N/m	$1.96 \times 10^3$	$1.96 \times 10^3$	$3.39 \times 10^3$

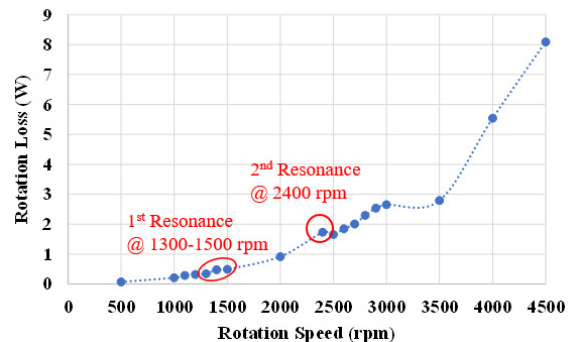


Fig. 3. Rotational loss characteristics of the SMB with 3-stacked SCs.

# 空芯型 REBCO 誘導電動機用回転子の損失特性評価

## Evaluations of loss Properties in a rotor for REBCO induction motors with air core

中川 心平, 鳥居 龍ノ介, 川越 明史(鹿児島大学); 三浦 竣, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓(九州大学)

SHINPEI Nakagawa, RYUNOSUKE Torii, AKIFUMI Kawagoe (Kagoshima University);

SHUN Miura, HIROSHI Miyazaki, MASATAKA Iwakuma (Kyusyu University)

Email: k6591750@kadai.jp

### 1. はじめに

電動航空機を実現するためには、推進システム全体の軽量化が必要である。そこで我々は、鉄心を用いない軽量な全超伝導誘導電動機の研究開発を進めている。鉄心なし誘導電動機の最適設計を行うためには、空芯の超伝導回転子の回転磁界中の特性を定量的に把握する必要がある。前回は、回転子に流れる電流を評価できることを示した[1]。誘導電動機のトルクは、回転子の二次銅損から求められることから、回転子の損失が評価できれば、トルクの評価が可能となる。今回は、回転子の損失を評価した結果を報告する。

### 2. 実験方法

誘導電動機のトルクは、回転子に誘導された電流と固定子の作る回転磁界との相互作用で発生する。回転子が回転中に経験する回転磁界は、回転子の周りをすべり周波数で回転する。この経験磁界によって誘導電流が誘起される。したがって、回転子の誘導電流や損失の特性を調べるには、回転子を固定した状態で回転磁界を印加する実験でも十分である。今回は、回転子を固定して回転磁界を印加した。回転磁界は、120度ずつ向きを変えた UVW 相のマグネットに対称三相電流を通电して発生させた。この回転磁界発生マグネットは、中央に直径 120mm、長さ 300mm のボア空間がある。この空間にサンプルを配置する。今回のサンプルは、77K、自己磁界中の臨界電流が 110A の YBCO 線材で作製したかご型回転子とした。Fig. 1 に示す回転子サンプルは、直径 81mm、長さ 155mm で、ローターバー 6 本である。エンドリングは同じ線材を 3 ターンソレノイド状に巻いて構成した。ローターバーとエンドリングは、超伝導層を向き合わせて半田付けした。

回転子に誘導電流が流れると、回転子が磁化したと見做せる。回転子の作る磁気モーメントを測定し、印加した回転磁界との内積を一周積分することによって回転子の損失を評価できる。磁気モーメントは、円断面の鞍型ピックアップコイル 3 個を用いて測定した。それぞれ UVW 相の磁界方向成分を測定するように、空間的に 120 度ずつ向きを変えて配置した。U, V, W 相用ピックアップコイルの長さは、それぞれ、75mm, 70mm, 65mm である。直径 88.5mm で、ターン数は 30 ターンである。

超伝導体などの交流損失を測定する場合には、一般に一樣な交流磁界を印加し、その磁界と同じ方向の磁化を測定し、磁化曲線の面積を求めることで損失を得る。回転磁界中

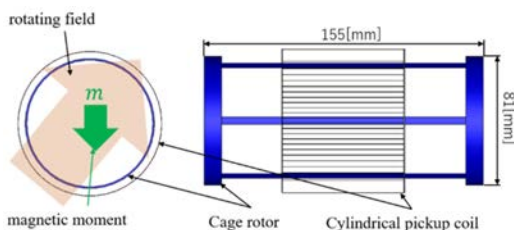


Fig.1 Set up of pick-up coil with round cross-section and the squirrel cage type rotor sample. Three pick-up coils were mounted to measure three direction components of magnetic moments due to induced currents in the rotor.

では、方向の異なる磁界が存在する。一樣な回転磁界は、 $x$  方向と  $y$  方向磁界が位相差 90 度でサンプルに印加されると考えることができる。したがってサンプルの損失は、 $x$  方向成分と  $y$  方向成分のそれぞれの磁化曲線から求めた損失の和で求めることができる。本実験では、UVW 相それぞれの 3 方向成分を測定したので、これらの結果から、 $x, y$  方向の 2 方向成分に変換して処理を行った。U 方向を  $x$  方向としているので、 $y$  方向成分は、VW の成分から得ることができる。

今回の測定では、周波数を 0.005~10Hz まで変化させた。また、回転磁界の大きさは 0.5mT と 1mT とし、誘導電流が臨界電流未満になる条件とした。臨界電流未満であれば、回転子電流は線形方程式を解くことで容易に求めることができる。

### 3. 実験結果

回転子損失の周波数依存性を Fig. 2 に示す。0.5mT が○、1mT が△である。0.14Hz 付近にピーク周波数をもつデバイ型曲線を示している。実線と波線は、それぞれの磁界振幅の時の理論曲線である。抵抗を  $0.247\mu\Omega$ 、インダクタンスを  $0.275\mu\text{H}$  とした結果である。これらのパラメータは、磁気モーメントから誘導電流を算出した結果からフィッティングパラメータとして得た値である。理論値と測定値がよく一致していることから、本測定法により、回転子の損失を精度良く測定できていることが実証できた。なお、今回の実験で印加した回転磁界の周波数をすべり周波数と見れば、損失エネルギーを  $2\pi$  で割ることによってトルクを得ることができる。

### 4. まとめ

本研究では、ピックアップコイルを用いて測定した回転子の作る磁気モーメントを用いて回転子損失を評価した。実験値は理論値とよく一致しており、本測定法の有効性を示すことができた。

### 参考文献

[1] R. Torii, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.96

### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

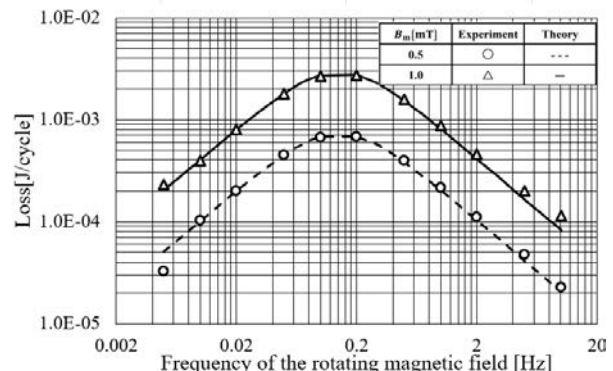


Fig.2 Frequency dependences of losses in the rotor.

# 交流損失予測に基づく電磁界・熱連成解析による 電動航空機用 REBCO 全超伝導同期機の設計

## Design of REBCO Fully Superconducting Synchronous Machine for Electric Aircraft by Electromagnetic-Thermal Coupled Analysis Based on Estimation of AC losses

佐々 滉太, 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓(九大)

SASA Hiromasa, MIURA Shun, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

E-mail: h.sasa@ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導同期機の界磁巻線には直流と交流の重畳磁界が印加される。REBCO 超伝導線材の交流損失は直流磁界の影響で増大し、巻線の温度上昇を引き起こすため、回転機設計の際には直流磁界を無視した損失見積りでは不十分である。そこで、直流・交流重畳磁界中における REBCO 超伝導線材の交流損失特性を実験により調べ、そのような条件における交流損失の予測手法を提案した。この手法を電動航空機用の REBCO 全超伝導同期機の設計に応用し、交流損失の定量的な見積りの必要性を示す。

### 2. 交流損失の予測手法

同期機内の REBCO 超伝導線材の各所において以下の手順に従って交流損失値を算出する(Fig.1)。

- ①線材の臨界電流特性  $I_c(B, T)$  のデータを用意する。ある条件(直流磁界強度  $B_{DC}$ 、温度  $T$ 、線材積層枚数  $n$ )での REBCO 超伝導線材の交流損失特性を測定する。例えば、 $B_{DC} = 0$  T,  $T = 77$  K,  $n = 10$  枚。その特性に対して  $I_c(B_{DC}, T)$  と  $n$  を用いた規格化[1]を行い、 $B_{DC}$ 、 $T$ 、 $n$  依存性を排除したマスターカーブを得る。
- ②電磁界解析および熱解析の結果から、予測先条件の直流磁界強度  $B_{DCe}$ 、温度  $T_e$  を得る。積層枚数  $n_e$  は同期機の設計から決まる。これらの値を使ってマスターカーブに対して規格化と逆の操作を行うことで、条件  $B_{DCe}$ 、 $T_e$ 、 $n_e$  における交流損失特性が得られる。
- ③線材への印加磁界の振幅  $B_m$  を電磁界解析から得、②の特性に適用することで交流損失値が得られる。

本手法を用いることで、一度の測定実験の結果から様々な条件における交流損失特性を見積もることが可能である。なお、本手法が適用できるのは交流磁界による  $I_c$  の変動が無視できるほど小さい、 $B_{DC} \gg B_m$  の場合に限られる。同期機の界磁巻線への印加磁界は、界磁が作る直流磁界と、電機子の回転磁界と界磁の磁界それぞれに含まれる高調波成分によって発生するわずかな交流磁界であり、 $B_{DC} \gg B_m$  が成り立つ。

### 3. 解析方法

$I_c = 219$  A(77K, s.f.)の人工ピンなし線材で構成した 10 MW 出力の全超伝導同期発電機を対象とした(Fig.2)。交流損失と巻線温度の相互作用を考慮するため、電磁界・熱連成解析を実施した。電機子巻線はサブクール液体窒素(65 K)での冷却、界磁巻線は風損低減の観点からガスヘリウム(65 K)による冷却を想定し、巻線周囲は 65 K に保たれると仮定した。

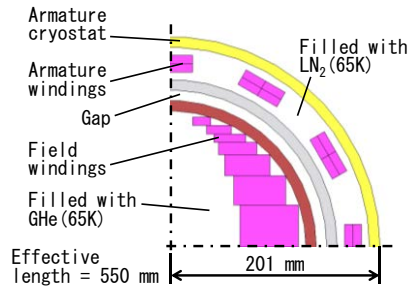


Fig.2 Cross-section of the quarter model for thermal analysis. The iron yoke on the outside of the armature cryostat is omitted in the thermal analysis.

### 4. 解析結果

界磁巻線に印加される磁界は、最大で 1.9 T の直流成分と振幅  $2.2 \times 10^{-2}$  T の交流成分の重畳磁界で、そのような磁界によって界磁巻線には 261.9 W の損失が発生する。直流磁界の効果を検討しない場合に比べて 3.4 倍の損失であり、界磁巻線の最大温度には 3.8 K の差が見られた。 $I_c$  は、直流磁界効果を検討しない場合に比べて 30% 低下し 51.4 A になる。以上のような、界磁巻線の交流損失における差は出力 10 MW に比べると小さく、効率にはほとんど影響しないものの、巻線の負荷率設計や冷却システム設計における影響は無視できない。超伝導回転機の設計において界磁巻線での交流損失を定量的に見積もることの必要性を示す結果である。

Table.1 Results of analysis.

AC loss estimation	Without $B_{DC}$		With $B_{DC}$	
	Armature	Field	Armature	Field
$B_{max}$ [T]	1.2	1.9	1.2	1.9
AC loss [W]	$10.3 \times 10^3$	77.7	$10.3 \times 10^3$	261.9
$T_{max}$ [K]	74.1	68.5	74.1	72.3
$I_c$ [A] at $B_{max}, T_{max}$	55.0	72.1	55.0	51.4

$B_{max}$ : Maximum field applied to tape,  $T_{max}$ : Maximum temperature

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(21K20432)および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

1. H. Sasa et al.: Physica C, Vol. 580 (2021) 1353801.

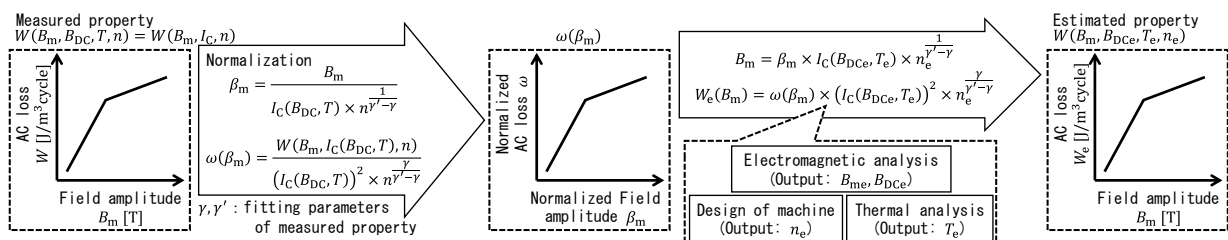


Fig.1 Procedure of AC loss estimation.

# 抵抗制御界面を備えた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの開発 (1) 抵抗界面モデルによる実験

## Development of an intra-layer-No-Insulation (LNI) REBCO coil with resistance-controlled (RC) interface (1) Experiments on resistive interface model

田中 湧也, 川畑 瑞穂, 高橋 佳佑, 高尾 智明(上智大); 末富 佑\*, 小林 賢介, 朴 任中, 山崎 俊夫, 柳澤 吉紀(理研)

TANAKA Yuya, KAWAHATA Mizuho, TAKAHASHI Keisuke, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

SUETOMI Yu\*, KOBAYASHI Kensuke, Piao Renzhong, YAMAZAKI Toshio, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN)

E-mail: [y-tanaka-6d9@eagle.sophia.ac.jp](mailto:y-tanaka-6d9@eagle.sophia.ac.jp)

### 1. はじめに

NMRやMRIなどの安定で均一な磁場を必要とする永久電流HTSマグネット機器では、レイヤー巻コイルが適している。過去に提案したintra-Layer No-Insulation (LNI)<sup>[1]</sup>法は、レイヤー巻REBCOコイルを高電流密度クエンチから保護するために有望な手法である。LNI法は、無絶縁の線材をレイヤー巻線しながら、各レイヤー間に片面が絶縁された銅シートを挿入する手法である。コイルクエンチ時には、レイヤー間の銅シートが電流バイパス経路として機能し、コイルを過度な温度上昇から保護する。

LNI-REBCOコイルのクエンチ保護性は、線材と銅シート間の接触抵抗率( $\rho_{ct}$ )に大きく影響を受ける<sup>[2]</sup>。一例として、小型 All-REBCO 900 MHz NMR用のコイルでは、100 m $\Omega$ cm<sup>2</sup>級の高抵抗<sup>[3]</sup>が必要である。また、サーマルサイクル・高電流密度・電磁力の経験下でも接触状態すなわち $\rho_{ct}$ 値が保持されることが重要である。これらのことから、エポキシ樹脂に複数種のフィラーを混合したエポキシ接着剤を用いて、層厚30  $\mu$ m級で、100 m $\Omega$ cm<sup>2</sup>級の高抵抗値を選択的に得ることのできる抵抗制御界面(resistance-controlled (RC) interface)を形成する技術開発に取り組んだ。本報では、短尺接触界面モデルを用い、各種フィラーの混合比率が $\rho_{ct}$ 値に与える影響について調べた結果について報告する。

### 2. 実験方法

Fig. 1に2本のREBCO線材(SuperPower Inc. SCS4050-AP)と巻枠、電極からなる短尺接触界面モデルの模式図を示す。エポキシ接着剤を線材間に塗布し、外周側線材におもりで張力をかけた状態で凝固させ、界面を形成した。液体窒素浸漬下で通電し、抵抗値( $=V/I$ )と界面面積 $A_{ct}$ を掛け合わせたものを接触抵抗率 $\rho_{ct}$ と定義した。エポキシ接着剤は、60 wt%のエポキシ樹脂(CTD-521)、30 wt%の導電性フィラー、10 wt%の絶縁フィラー(MgO)からなる。導電性フィラーには粒径20  $\mu$ m程度の銅粉と黒鉛粉を合わせて用いた。MgO粉(粒径 ~20  $\mu$ m)は、線材同士の直接接触を防ぎ、均一なエポキシ接着剤層を形成するためのスペーサーの役割を持つ。

### 3. 実験結果

Fig. 2に結果を示す。縦軸が接触抵抗率 $\rho_{ct}$ 、横軸が導電性フィラー(銅+黒鉛)中の銅フィラーの割合 $\alpha$ である。各プロットは、同条件で複数作製したサンプルの平均値である。 $\rho_{ct}$ 値は、 $\alpha=0$  wt%で最大値1,455 m $\Omega$ cm<sup>2</sup>となり、 $\alpha$ が増加するにしたがって減少し、 $\alpha=50$  wt%で1.16 m $\Omega$ cm<sup>2</sup>となった。このように、2種の導電性フィラーの混合比率を変化させることによって1-1000 m $\Omega$ cm<sup>2</sup>に及ぶ広い範囲で $\rho_{ct}$ 値を制御できる。 $\alpha=5$  wt%サンプルの断面を光学顕微鏡で観察すると、エポキシ接着剤層の厚さは、30  $\mu$ m程度と十分に薄く、従来のカプトン絶縁被覆と同レベルであることが確認された。

### 4. まとめ

スペーサーとしての絶縁性フィラー、複数材料を混合した導電性フィラーを用いることにより、100 m $\Omega$ cm<sup>2</sup>級の高抵抗を含む広い範囲で $\rho_{ct}$ 値を制御可能かつ、層厚が30  $\mu$ m程度と薄い抵抗制御界面(resistance-controlled (RC) interface)を形成することに成功した。本手法は、高電流密度HTSマグネットの巻線方式として有望である。

当日の発表では、RC界面の $\rho_{ct}$ 値の通電電流および接触圧力に対する安定性についても報告する。

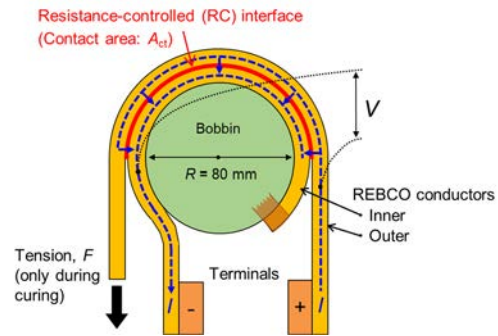


Fig. 1 Schematic of the short sample interface model

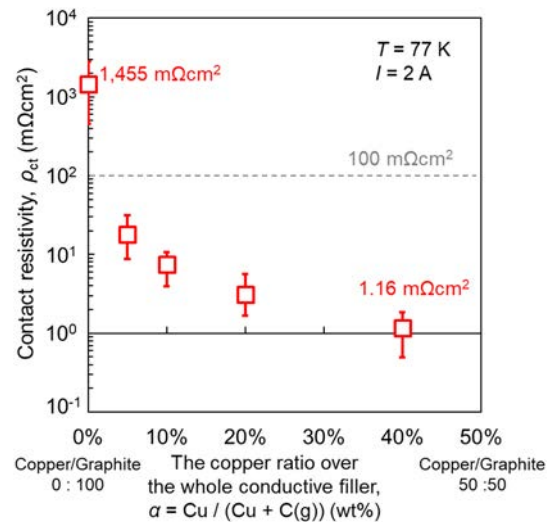


Fig. 2 Measured contact resistivity  $\rho_{ct}$  values for the short sample interface model

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K20419 および理化学研究所基礎科学研究員制度の支援を受けたものである。

\*印の著者の所属は研究当時のものである。

### 参考文献

- [1] Y. Suetomi et al., SuST, 32 045003 (2019)
- [2] Y. Suetomi et al., SuST, 34 064003 (2021)
- [3] Y. Suetomi et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 64

# 抵抗制御界面を備えた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの開発 (2) 界面を実装したコイルの 77 K 特性

## Development of an intra-layer-No-Insulation (LNI) REBCO coil with resistance-controlled (RC) interface (2) Performance of a coil implemented with the interface at 77 K

川畑 瑞穂, 田中 湧也, 高橋 佳佑, 中村 一也, 高尾 智明(上智大);

末富 佑\*, 小林 賢介, 朴 任中, 山崎 俊夫, 柳澤 吉紀(理研)

KAWAHATA Mizuho, TANAKA Yuya, TAKAHASHI Keisuke, NAKAMURA Kazuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

SUETOMI Yu\*, KOBAYASHI Kensuke, Piao Renzhong, YAMAZAKI Toshio, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN)

E-mail: [m-kawahata-3b8@eagle.sophia.ac.jp](mailto:m-kawahata-3b8@eagle.sophia.ac.jp)

### 1. はじめに

永久電流 HTS マグネット機器に適したレイヤー巻 REBCO コイルの保護法として、intra-Layer No-Insulation (LNI) [1]法が有望である。LNI 法は、無絶縁の線材を使用し、各レイヤー間に片面が絶縁された銅シートを挿入することで、コイルクエンチ時に銅シートが電流バイパス経路として機能し、コイルを保護する。LNI-REBCO コイルのクエンチ保護性は、線材と銅シートの接触抵抗率( $\rho_{ct}$ )に依存し[2]、小型 HTS コイルには  $100 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  級の高抵抗[3]が必要となる。このため、エポキシ接着剤を用いて、抵抗値を選択的に得るための抵抗制御界面 (resistance-controlled (RC) interface)の技術開発に取り組んだ。

本報では、前報の短尺試験で構築した RC 界面を実装した LNI-REBCO コイルを作製し、サーマルサイクルによるコイル  $\rho_{ct}$  値の変化と過電流クエンチ時の振る舞いについて調べた結果を報告する。

### 2. 実験方法

内径 50 mm、9 ターン×8 レイヤーの LNI-REBCO コイルを作製した。線材には絶縁無し SuperPower Inc. SCS4050-AP を使用し、1.0 kgf の張力で巻線した。RC 界面のエポキシ接着剤のフィラー配合は、絶縁性(MgO)フィラー 10 wt%、導電性フィラー 30 wt%とした。導電性フィラーには銅と黒鉛の二種を使い、両フィラー合計重量における銅フィラーの割合  $\alpha$  は 5 wt%とした。このフィラー入りエポキシを銅/絶縁シートの銅面に塗布し、各レイヤーの線材表面に接着させながら巻線した。巻線後、室温でエポキシ樹脂を凝固させ、コイル内部の線材/銅シート間に RC 界面を形成した。

作製した LNI-REBCO コイルに対して、(1) 液体窒素浸漬下 77 K に冷却、(2) 2 A まで励磁後、電源遮断試験、(3) コイル  $I_c$  測定、(4) 室温への昇温、のサイクルを 6 回繰り返した。各電源遮断試験で得た中心磁場減衰波形に対し、LNI コイルの電氣的等価回路モデル[1]で得た減衰波形をフィッティングすることにより、 $\rho_{ct}$  値を推定した。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に繰り返しサーマルサイクルによる  $\rho_{ct}$  値の変化を示す。参考として示す非含侵の LNI-REBCO コイル (Fig. 1(a)) [3] では、サーマルサイクルを経ることで  $\rho_{ct}$  値が 10 倍程度大きくなって飽和する。一方で、RC 界面を実装した本コイルでは、初期  $\rho_{ct}$  値は  $21 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  に対し、サーマルサイクルを繰り返した結果  $\rho_{ct}$  値は  $34 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  で飽和し、その変化はわずか 1.64 倍であった(Fig.1(b))。また、サーマルサイクルの過程でコイル電流電圧特性は変化せず、劣化は生じなかった。

その後、液体窒素浸漬下で過電流クエンチ試験を行った。87.5 A (コイル  $I_c$  の 120%) まで電流を上昇させたところで、コイル電圧の急激な上昇と中心磁場の減少がみられ、消磁された。これはレイヤー間の RC 界面～銅シートへの電流バイパスによる自己保護性によるものである。試験前後でコイルの電流電圧特性に変化は見られず、劣化はなかった。一方で、 $\rho_{ct}$  値は、

試験前の  $34 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  から  $6 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  に低下した。さらにサーマルサイクルを繰り返すと、 $\rho_{ct}$  値は増大し、 $13 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  で飽和した。すなわち、コイルの通電特性は変わらなかった一方、 $\rho_{ct}$  値は有意な変化が見られた。この点は今後の検証課題である。

### 4. まとめ

RC 界面を実装した LNI-REBCO コイルは、狙った  $\rho_{ct}$  値が得られ、その値がサーマルサイクルに対して安定であることが確認でき、クエンチからの自己保護性も示された。一方で、クエンチ時の  $\rho_{ct}$  値の変化についてはそのメカニズムと対処法の確立が必要である。

低温超伝導マグネットでは、コイル外部に適切な抵抗素子を組み合わせた保護回路技術が確立されている。今回の RC 界面形成技術は、 $\rho_{ct}$  値を部位によって選択的に設定できるので、保護回路を巻線内に組み込んでしまうコンセプトと言えよう。

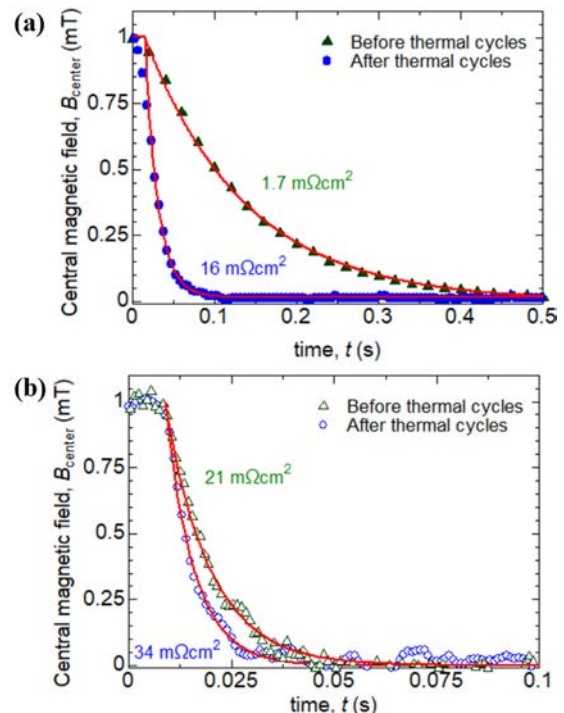


Fig. 1 Magnetic field curves obtained in power supply shutdown tests and simulated curves fitted to the results : (a) dry-LNI-REBCO coil in previous work [3] and (b) LNI-REBCO coil implemented with the RC interface.

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K20419 および理化学研究所基礎科学研究員制度の支援を受けたものである。

\*印の著者の所属は研究当時のものである。

### 参考文献

- [1] Y. Suetomi et al., SuST, 32 045003 (2019)
- [2] Y. Suetomi et al., SuST, 34 064003 (2021)
- [3] K. Takahashi et al., IEEE TAS, 32, 6 (2022)



## REBCO 3ターンコイルの液体水素中の熱暴走実験

## Experiments on thermal runaway of REBCO 3 turn coils cooled with liquid hydrogen

今川信作, 濱口真司(NIFS); 大屋正義, 山川友瑚, 中西啓太, 石田悠人, 嶋田健(関西学院大); 白井康之(京都大); 小林弘明(JAXA)

IMAGAWA Shinsaku, HAMAGUCHI Shinji (NIFS); OHYA Masayoshi, YAMAKAWA Yugo, NAKANISHI Keita, ISHIDA Yuto, SHIMADA Ken (Kwansei Gakuin Univ.); SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)  
E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

液体水素で直接冷却することによりクエンチ保護が可能な電圧発生まで冷却安定な高温超伝導コイルの開発を目指している。局所的に劣化させた REBCO テープ線材を用いて、内径 160 mm の 3 ターンコイルを製作し、液体窒素および液体水素中において熱暴走実験を実施した。試験体は、厚さ 8 mm の GFRP 板に加工した深さ 4 mm の溝に 3 ターンコイルを挿入し、片面の幅方向のみが冷媒で冷却される構造とした(図 1 参照)。3 ターンコイルの中央部 0.1 m の範囲は、巻線前に半径 3 mm の両面曲げ加工を施して劣化させた。安定化材厚さ 0.1 mm の REBCO 線に厚さ 0.2 mm の銅テープを添加した Sample 1 (S1) と REBCO 線のみ Sample 2 (S2) を評価した。素線絶縁は厚さ 12.5  $\mu\text{m}$  のカプトンテープのハーフラップ巻きとした。

## 2. 劣化部の臨界電流

劣化部の臨界電流  $I_c$  (電界基準, 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ ) の磁場・温度依存性を図 2 に示す。出荷時の 77 K, 自己磁場での  $I_c$  は 120 A なので、その 1/10 以下である。液体水素中での一連の熱暴走実験において、飽和温度における  $I_c$  の偏差は 1% 以内であり、どちらの試験体も  $I_c$  の劣化は生じていない。29 K と 30 K はサブクール状態に対応している。吊りフランジ部の温度計には通電中に  $\pm 0.5$  K 程度の変動があるため、小数点以下は四捨五入した。20-31 K での  $n$  値は、どちらの試験体も  $I_c$  近傍では 10 に近い値であり、負荷率の上昇に伴って低下し 100 A 付近で 2.5 程度に収束する。S2 は、S1 よりも  $I_c$  が低いが、負荷率上昇に伴う  $n$  値の低下が早く、80 A 付近の電界は S1 と同等となる。

## 3. 液体水素中の熱暴走実験

熱暴走実験における電圧と温度の時間変化の 1 例を図 3 に示す。電圧上昇が急峻になった時点で 50 A/s の減磁を開始したが、クエンチ検知 (0.1 V, 0.1 s) が働いて 945.6 s に電流が遮断された。REBCO 線の劣化部中央に張り付けた温度計 (金鉄・ノーマル銀熱電対) は 100 K を超えたことを示している。電圧 0.1 V 付近までは常伝導部が劣化部に限定されている。

熱暴走開始電流値の温度依存性を図 4 に示す。ここでは、変化率 0.1 A/s で電流上昇中あるいは電流保持中に劣化部の電圧 V2 (電圧端子間 0.1 m) の上昇率が 0.2 mV/s となった点を熱暴走開始点とした。この電流値以下では冷却安定といえる。S1 の 30 K, 2.1 T での熱暴走開始電流値が高くなっている原因は、絶対圧力 0.96 MPa の飽和温度 31.0 K に対して 1-2 K だけ低いサブクール状態であったためと考えられる。S1 の冷却安定 (冷却 > 発熱) 限界は、V2 が 11-15 mV, 劣化部中央温度 TC1 が 40 K 程度であり、S2 は 8-10 mV, 35 K 程度である。S1 の熱暴走を開始する発熱量は S2 の 1.5-1.8 倍であり、冷却面積の差と整合する。熱暴走開始電流の温度依存性は緩やかである一方で、サブクールの効果は顕著である。

300 A 超での熱暴走実験では、導体温度が急上昇し 300 K を超えるケースがあった。この場合には膜沸騰への遷移が生じたが、それ以外は核沸騰あるいは遷移沸騰に留まったと考えられる。よって、熱暴走開始は、導体温度上昇による発熱増加が表面温度上昇による冷却増加より大きくなる時点である。

謝辞: 本研究は、NIFS 共同研究 NIFS23MIS009 の支援の下に実施されました。

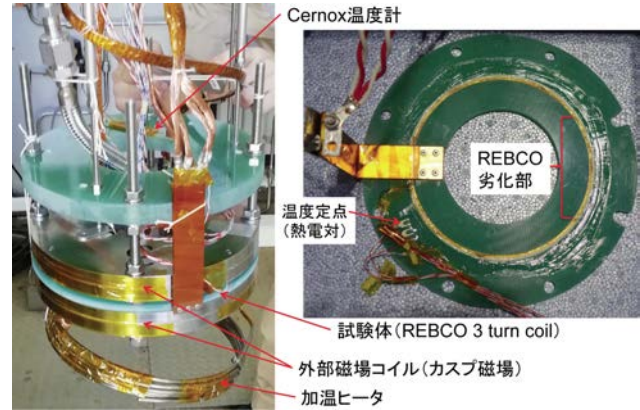


Fig. 1. Setup of a sample cooled with liquid hydrogen.

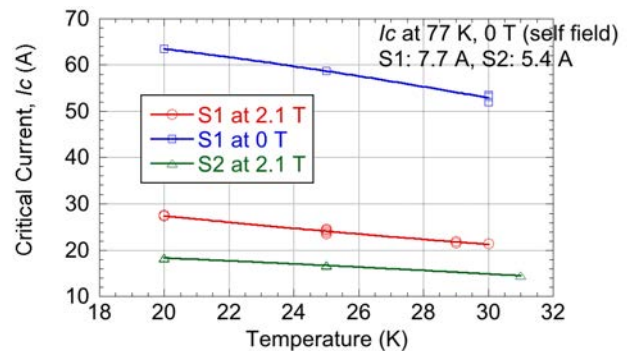


Fig. 2.  $I_c$  of damaged part of Sample 1 (S1) and 2 (S2).

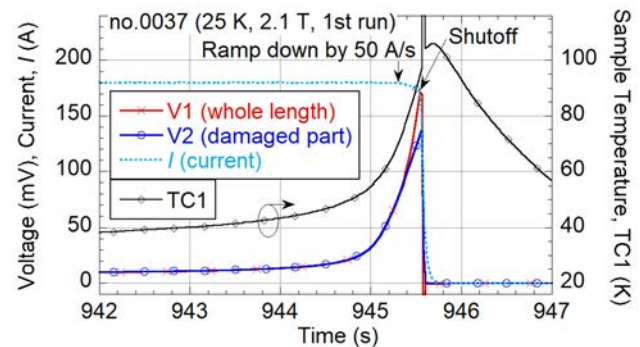


Fig. 3. Voltage and temperature of Sample 2 during thermal runaway test at 25 K, 2.1 T.

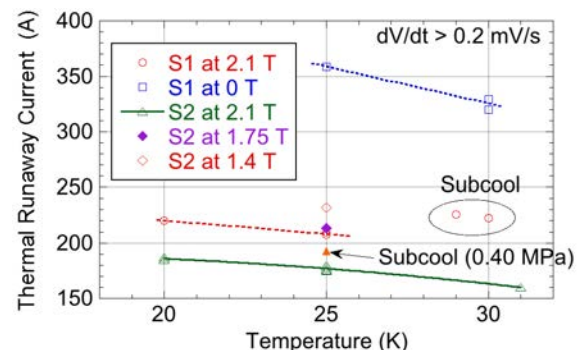


Fig. 4. Thermal runaway currents in liquid hydrogen.

# ステンレステープを共巻した YBCO ダブルパンケーキコイルの交流損失特性

## AC loss properties of YBCO double pancake coils with co-winding of stainless-steel tapes

元木 悠太, 摺木 淳人, 川越 明史(鹿児島大学); 平野 直樹 (NIFS)

YUTA Motoki, ATSUTO Suruki, AKIFUMI Kawagoe(Kagoshima University); NAOKI Hirano (NIFS)

E-mail: k3053003@kadai.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材を大型応用する検討は、様々な分野で行われている。直流的な応用では、ターン間を絶縁せずに巻線した無絶縁コイルの研究も進められている。本研究では、ステンレステープを共巻きしたダブルパンケーキコイルに交流通電を行い、その交流損失特性を評価した[1]。

### 2. サンプルコイル

サンプルコイルは、幅 4.25mm、厚さ 60 $\mu$ m の YBCO 線材( $I_c = 85$  A at 77 K s.f.)と、幅 4.25mm、厚さ 30 $\mu$ m のステンレステープ(SUS316L)を共巻したダブルパンケーキコイルである。コイルの寸法は内径 30mm、外径 63.5mm で、シングルパンケーキコイル間には 0.5mm 厚のスペーサが挿入されている。コイル全体の高さは 9mm である。ターン数は 186 ターン $\times$ 2 の 372 ターンである。ターン間抵抗が交流損失特性に影響すると思われるので、同様の作製法で巻線したコイルを 4 つ準備した。

### 3. 測定原理

Fig.1 に、サンプルコイルの交流損失を測定する回路図を示す。サンプルコイルに通電し、サンプルコイルの両端電圧と電流の積を一周期積分して交流損失を求めた。サンプルコイルの電圧には大きな誘導電圧成分が含まれるため、キャンセルコイルの電圧を用いたキャンセルングによって測定感度を向上させた。キャンセルコイルは、通電回路に直列に挿入した空芯トランスの二次側コイルである。通電電流振幅を 2.9~24A、周波数は 1~30Hz で測定した。

### 4. 測定結果

Fig. 2 に交流損失測定結果の一例を示す。サンプルコイル 1 で測定された電流依存性である。縦軸は交流損失パワー、横軸は通電電流の振幅を示している。図中の直線は、それぞれ電流の 2 乗に比例する直線と 3 乗に比例する直線を示している。低周波数では、おおよそ電流振幅の 3 乗に比例する特性であるので、ヒステリシス損失が支配的であると考えられる。高周波数では、ターン間を渡る遮蔽電流による結合損失が発生するため、電流振幅の 2 乗に比例する特性に近づいている。どの周波数領域でも、高電流域では傾きが大きくなる傾向がある。電流増加に伴う臨界電流密度の低下に起因すると思われる。

Fig. 3 に、交流損失の周波数依存性を示す。縦軸は、交流損失パワーを周波数で割った、交流通電一周期当たりの交流損失エネルギーである。電流振幅 8.5A のときの結果である。サンプルコイル 1~4 のデータを載せている。いずれのコイルでも周波数に比例する成分が観測されている。この成分が結合損失であると考えられる。また切片は、周波数に依存しないヒステリシス損失であると考えられる。図中の線は、各コイルの測定値を一次関数でフィッティングしたものである。この直線の関数も図中に示している。傾きが結合損失の大きさを示しコイルごとにばらつきが観測されている。特にコイル 1 が他のコイルに比べて 30%から 40%大きい。ターン間抵抗がばらついたものと考えられる。一方、ヒステリシス損失と考えられる切片

の値にもばらつきが観測されていた。コイル 4 が他のコイルに比べて 25~30%ほど大きい。線材リールがコイル 4 のみ異なるものであったことが要因と考えられる。

### 5. まとめ

ステンレステープを共巻きしたダブルパンケーキコイルの交流損失測定を行った。結合損失とヒステリシス損失の両方が観測される結果となった。同様に作製したコイルでも、結合損失が 3-4 割程度ばらつく結果となった。線材特性のばらつきを考慮してヒステリシス損失の特性を評価する必要がある。

### 参考文献

[1]N. Hirano, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 104 (2022), p. 48.

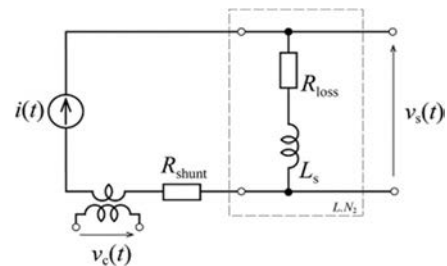


Fig. 1 The circuit to measure ac losses in REBCO coil.

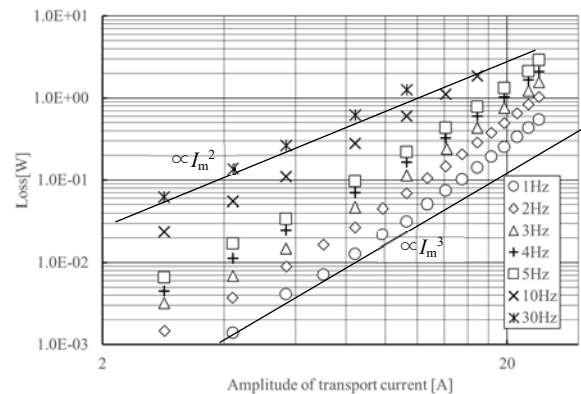


Fig.2 Transport current dependencies of AC losses in the sample coil 1

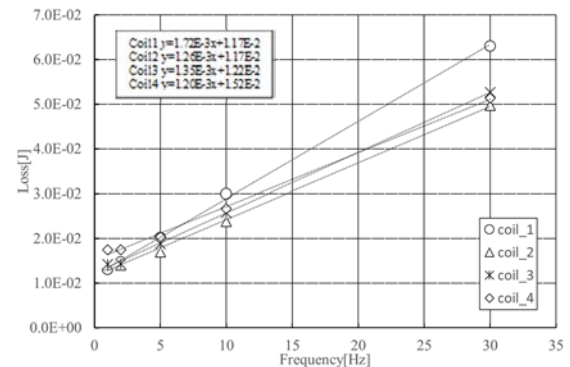


Fig.3 Frequency dependences of AC losses in the sample coils 1-4.

# 磁性体と組み合わせた HTS コイルの交流損失測定法に関する検討

## Ac loss measurement method of HTS coil coupled with magnetic materials

上垣 終季, 平野 貴之, 曾我部 友輔(京大); 福井 聡(新潟大); 雨宮 尚之(京大)

UEGAKI Hiiragi, HIRANO Takayuki, SOGABE Yusuke (Kyoto U.); FUKUI Satoshi (Niigata U.); Amemiya Naoyuki (Kyoto U.)  
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

HTS コイルを磁性体と組み合わせると、磁性体によって HTS 線材が経験する磁界分布が変化するため、臨界電流や交流損失が変化する。また、磁性体内部でもヒステリシス損失や渦電流損失が生じる。そのため、HTS コイルと磁性体を組み合わせた系全体について測定した損失から HTS コイル自体の交流損失を知るためには、磁性体で生じる損失を推定し、測定した損失から差し引く必要がある。本研究では、磁性体として損失が小さい圧粉鉄心を用いた場合について交流損失を求める方法について検討した。

### 2. 測定対象コイル

SuperPower Inc. 製薄膜高温超伝導線材を用いて、Table 1 に諸元を示すようなダブルパンケーキコイルを自作した。Fig. 1 に製作した HTS コイルの外観を示す。ターン間はカプトンテープを用いて絶縁した。Fig. 2 に示すように、円形の圧粉鉄心をコイルを挟むように上下に配置した。

### 3. 交流損失測定法と鉄損の推定

HTS コイルの交流損失測定にはパワーメータを使用した方法[1]とロックインアンプを使用した方法[2]がある。HTS コイルは力率が極めて低いため、位相確度が損失測定値に大きく影響を及ぼす。本実験では Newtons4th Ltd 製パワーメータ PPA5500 を使用し、HTS コイルに 42.4 A peak (30 A rms) までの正弦波交流電流を通电した際の交流損失を測定した。液体窒素で浸漬冷却しながら 77 K にて測定した。鉄損はコアを組み合わせた銅コイルに HTS コイルの場合と起磁力が一致するように交流電流を流し、HTS コイルと同様に鉄心を磁化させた状態の損失から、交流電流を通电した場合における銅コイル単体のジュール損失を差し引くことで推定する [3]。銅コイルは線径 0.8 mm、直径 60 mm、巻き数 90 ターンとした。

### 4. 実験結果

Fig. 3 にコアあり HTS コイル、HTS コイル単体、コアあり銅コイル、銅コイル単体の損失測定結果、推定した鉄損を示す。

コアあり HTS コイルと HTS コイル単体の交流損失には差がみられる。低い起磁力の範囲ではコアあり HTS コイルの損失が HTS コイル単体の損失と比べて大きい、高い起磁力の範囲ではコアあり HTS コイルの損失が HTS コイル単体の損失よりも小さくなる。これには、鉄損による損失の増加と、磁界分布の変化による HTS コイルの損失の変化が含まれていると考えられる。なお、同じ HTS コイルを用いてロックインアンプを用いた交流損失測定を行い、コアを組み合わせた HTS コイルについてパワーメータで測定した際と同様の交流損失特性が得られることを確認した。

今回、推定した鉄損には多くの誤差が含まれる。これは使用したコアが圧粉鉄心であるため、コアで生じる渦電流損失が小さく、銅コイルで生じるジュール損失における鉄損の比率が小さくなったためであると考えられる。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H00245 及び 22H01464 の助成を受けたものである。ロックインアンプを用いた交流損失測定は New Zealand, Victoria University of Wellington, Robinson Research Institute にて行い、渡航は、京都大学大学院支援機構 DoGS 海外渡航助成金によって実現した。協力いただいた Jiang 博士、Yue 氏に感謝いたします。

Table 1. Specification of the HTS coil and magnetic cores.

Number of turns	60 (30 × 2)
Inner diameter $d$	60 mm
Inductance without core $L_{wo}$	383 $\mu$ H
Inductance with core $L_{wc}$	650 $\mu$ H
Magnetic core	SermaLoy <sup>®</sup>
Core diameter	80 mm
Core thickness	20 mm

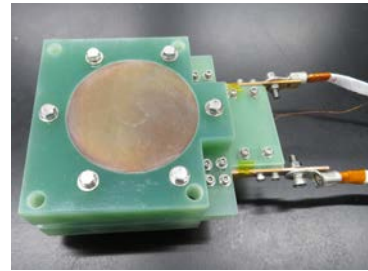


Fig. 1 The photo of the HTS coil assembly with magnetic cores.

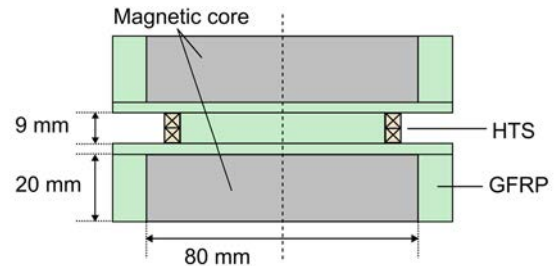


Fig. 2 Cross section of the HTS coil with magnetic cores.

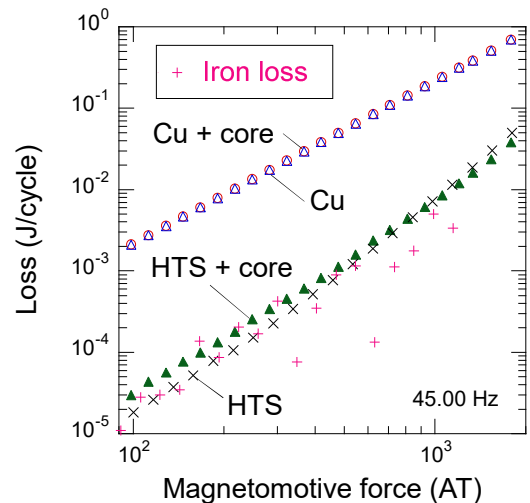


Fig. 3 Measured ac loss of HTS coil with/without core, measured joule loss of copper coil with/without core and estimated iron loss at 45 Hz, 77 K. A few negative iron loss values caused by error are not drawn.

### 参考文献

- [1] S. Fukui, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **22** (2012), 4704904
- [2] Z. Jiang, et al.: Supercond. Sci. Technol. **29** (2016), 095011
- [3] S. Fukui, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **26** (2016), 5203705

## Nb<sub>3</sub>Sn 超電導マグネットの含浸ための高比熱樹脂の研究

### Study of High Heat Capacity Resin for Impregnation of Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Magnets

菊池 章弘, 平田 和人 (NIMS); 竹内 正基 (RIMTEC); 王 旭東, 中本 建志, 土屋 清澄 (KEK);  
 BARZI Emanuela, TURRIONI Daniele (FNAL); KESGIN Ibrahim (ANL)  
 KIKUCHI Akihiro, HIRATA Kazuto (NIMS); TAKEUCHI Masaki (RIMTEC);  
 WANG Xudong, NAKAMOTO Tatsushi, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK);  
 BARZI Emanuela, TURRIONI Daniele (FNAL); KESGIN Ibrahim (ANL)  
 E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

#### 1. はじめに

樹脂含浸材は Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導磁石 (特に加速器用) に大きな影響を及ぼす重要なコンポーネントである。現在はエポキシが広く利用されているが、樹脂中の気泡やクラックが引き金となり磁場性能が低下する問題が指摘されている。さらに衝突点近傍の磁石では、含浸樹脂材の照射線劣化が大きな懸念となっている。本研究では、エポキシよりも粘性が低いジシクロペンタジエンに、高比熱の粉末フィラーを充填した新しい樹脂含浸材を開発し、磁石のトレーニング効果の抑制や熱的安定性の向上及び耐放射線性能について日米協力により明らかにすることを目的とする。

#### 2. 実験方法

本研究では RIMTEC 社から市販されているジシクロペンタジエンを使用している。混合する高比熱粉末フィラーには、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S、HoCu<sub>2</sub> の 3 種類を用いた。いずれも粉末粒径は 10 ミクロン以下である。樹脂 (高比熱フィラー有無) そのものの粘性の測定、極低温での比熱測定及び熱伝導率の測定を日本側で実施し、さらに、それら樹脂試料に対してガンマ線照射を量研機構高崎研で行って、ガンマ線が樹脂の機械特性に与える影響について研究した。このガンマ線照射の結果については、本講演の後に王 (1A-p12) から報告する。

各種高比熱樹脂は、短尺の NbTi 線にコーティングして低磁場下での通電測定 (Ic 測定並びに MQE 測定) を行い、さらに、小型アンジュレーターモデルコイルを作成して、不活性ガス雰囲気中で熱処理した後にジシクロペンタジエン (高比熱フィラー有無) を含浸して通電実験を行った。これらは米国側のタスクとして行った。

#### 3. 実験結果

Fig. 1 は加速器用 Nb<sub>3</sub>Sn 磁石の含浸に広く用いられている CTD 社製のエポキシ樹脂 (CTD-101k®) と、RIMTEC 社製のジシクロペンタジエン (TELENE®) の粘性の結果で、Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub> フィラーの混合量を徐々に増加させて比較した。そもそもフィラー無しの粘性で TELENE® は CTD-101k® よりも一桁以上低くさらさらである。CTD-101k® に対して Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub> フィラーを混合すると速やかに粘性は増加するが、TELENE® では 70% を超えたあたりから増加して、85% 程度でようやく CTD-101k® のフィラー無しと同等の粘性となることがわかった。Fig. 2 及び Fig. 3 は TELENE® に対して Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S、HoCu<sub>2</sub> をそれぞれ適量混合した場合の極低温での比熱と熱伝導率である。比熱については、いずれの TELENE® もフィラーの性質を反映して極低温で大きい値が得られた。一方、熱伝導率は、Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S フィラーで大きい値が得られることがわかった。

#### 謝辞

本研究は、日米科学技術協力事業 (高エネルギー物理学分野) 13-2023a の一環として実施した。

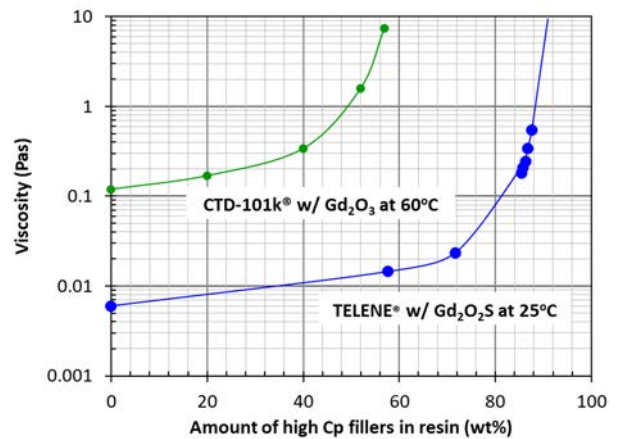


Fig. 1 Viscosity as function of TELENE® and CTD101k® as a function of high Cp fillers.

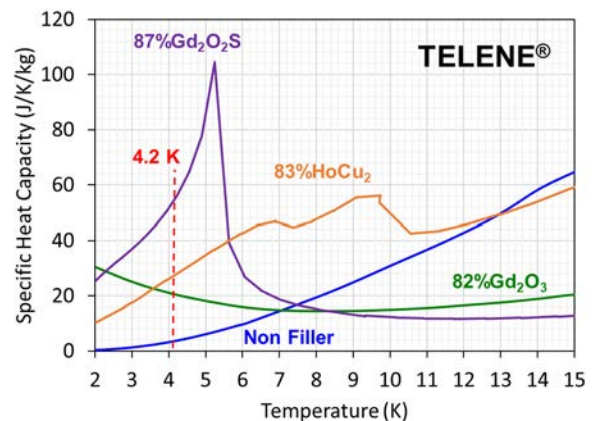


Fig. 2 Specific heat vs. temperature for pure and mixed TELENE® resins in absence of external magnetic field.

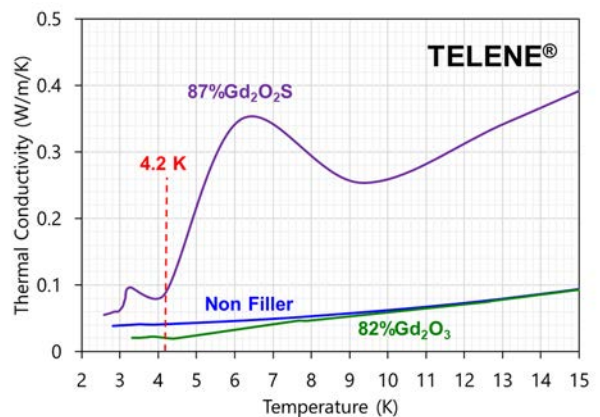


Fig. 3 Thermal conductivity vs. temperature for pure and mixed TELENE® resins in absence of external magnetic field.

# マグネット含浸用樹脂のガンマ線照射前後での曲げ強度

## Flexural Strength of Resins for Magnet Impregnation Before and After Gamma Ray Irradiation

王 旭東 (KEK); 菊池 章弘 (NIMS); 竹内正基 (RIMTEC Corp.); 中本建志, 土屋 清澄 (KEK)

WANG Xudong (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); TAKEUCHI Masaki (RIMTEC Corp.); NAKAMOTO Tatsushi, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK)  
E-mail: wanxdon@post.kek.jp

### 1. はじめに

我々はジシクロペンタジエン樹脂をベースとした超伝導磁石含浸用高比熱樹脂の開発を行っている。モノマーのジシクロペンタジエンは従来の含浸用樹脂であるエポキシより粘性が低く、またその樹脂は比熱が高いため、超伝導磁石の含浸性能と熱的安定性を向上させることが期待される。加速器や核融合の磁石へ応用する場合、放射線による樹脂の特性変化を調査する必要がある[1]。本研究は、これらの樹脂のガンマ線照射前後の曲げ強度について測定したので報告する。

### 2. 試料サンプル

実験に用いたジシクロペンタジエン樹脂は、RIMTEC社の製品である TELENE®と、TELENE®をベースとして比熱の向上を目的に3種類のフィラー(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>S、HoCu<sub>2</sub>)をそれぞれ混ぜた合計4種類である。フィラーを混ぜた樹脂のTELENE®のwt%は、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が82%、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sが87%、HoCu<sub>2</sub>が83%となっている。また、比較として一般的な含浸材であるエポキシ(CTD-101K)についても測定した。試料サンプルは樹脂を固化させた後に長さ100 mm×幅8 mm×厚さ4 mmに切り出して、各樹脂で15個のサンプルを用いてガンマ線照射実験と三点曲げ実験を行った。

### 3. ガンマ線照射実験と三点曲げ実験

ガンマ線照射実験は、量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所においてコバルト60線源を用いて行った。線量率5-7 kGy/hourで継続照射を行い、合計線量が3 MGy、5 MGy、7 MGy、9 MGy付近で各樹脂から3個のサンプルを使用して三点曲げ実験を行った。ガンマ線照射の過程において、サンプルの変色状態をFig. 1に示す。照射が進むにつれてサンプル表面が黒く変色していき、特に半透明であったTELENE®とエポキシは透明性を失った。

三点曲げ実験はFig. 2に示すように島津製AG-5000Cを使用し、支点間距離 $L=64$  mmでサンプルを設置して、試験速度2 mm/minで実施した。測定した荷重 $F$ とたわみ $s$ を用いて、曲げ応力 $\sigma=3FL/2wt^2$ と曲げひずみ $\epsilon=6st/L^2$ を計算した。 $w$ と $t$ はサンプルの幅と厚みである。各樹脂の照射前と5 MGy照射後の応力-ひずみ特性をFig. 3に示す。また、各樹脂の照射線量と曲げ強さ(最大曲げ応力)および曲げ弾性率(0.05%と0.25%のひずみに対する応力の差をひずみの差で除した値)の関係をFig. 4に示す。ガンマ線照射によって、TELENE®とそれをベースとした樹脂は曲げ強さと曲げ弾性率の向上が見られた。特に、フィラーとしてGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Sを混ぜた樹脂は、線量が9 MGyに達しても曲げ強さと曲げ弾性率の継続上昇が見られた。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を混ぜたTELENE®は、9 MGyでエポキシとほぼ同程度の曲げ強さ、2倍以上の曲げ弾性率となった。今後は、25 MGy程度まで照射線量を上げながら曲げ特性を継続して評価する予定である。

### 謝辞

本研究は日米科学技術協力事業(高エネルギー物理分野)の助成により実施したものである。

### 参考文献

1. A. Idesaki, T. Nakamoto, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 112 (2016) pp. 418-424

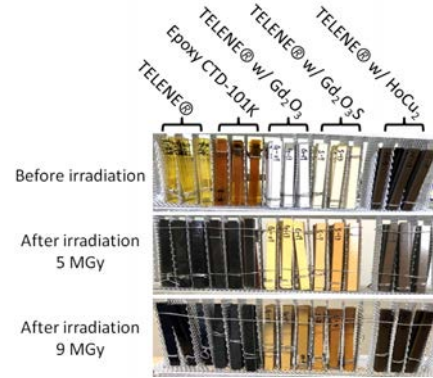
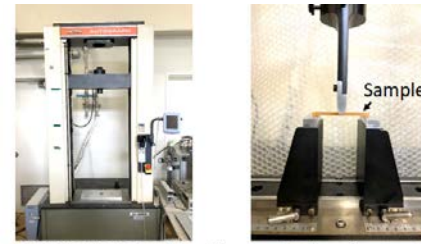


Fig. 1 Discoloration process of the resin samples before gamma ray irradiation and after 5 MGy and 9 MGy irradiation.



SHIMADZU AG-5000C Three-point bending test setup

Fig. 2 Experimental equipment for the three-point bending measurement.

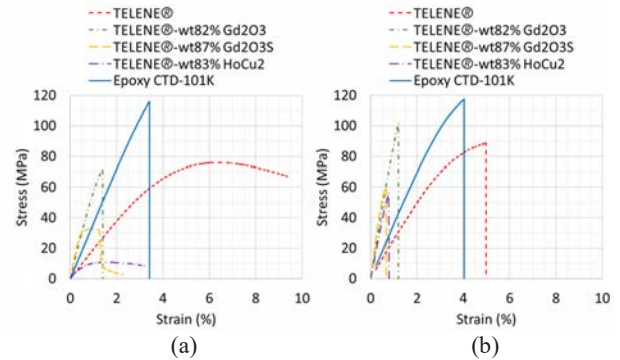


Fig. 3 Stress-strain properties of the resins (a) before irradiation and (b) after 5 MGy irradiation.

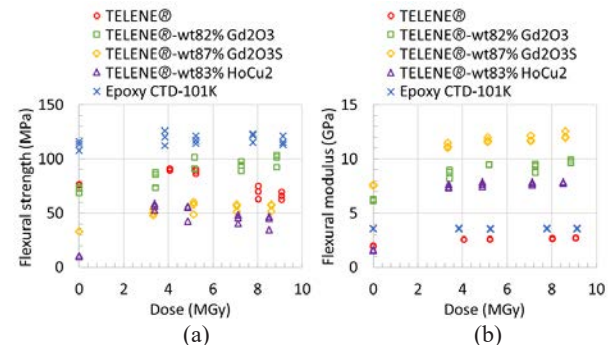


Fig. 4 (a) Flexural strength and (b) flexural modulus of the resins as a function of irradiation dose.

## NbTi/Cu 線の冷却安定性に対する銅線の影響に関する実験と研究

## Experiments and analysis of a segregated copper for cryogenic stability of NbTi/Cu wires

島本 知輝(総合研究大学院大学); 今川 信作, 高田 卓, 濱口 真司, 尾花 哲浩(核融合科学研究所)

SHIMAMOTO Tomoki (SOKENDAI); IMAGAWA Shinsaku, TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, OBANA Tetsuhiro (NIFS)

E-mail: shimamoto.tomoki@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

現在フランスで建造中のITERでは、全ての超伝導コイルの導体にCIC(Cable in Conduit)導体が採用されている。これらのCIC導体においては、超伝導素線のみならず、クエンチ保護とコスト低減の目的で銅線も採用しても良いとされた<sup>[1]</sup>。また、銅線は導体の冷却安定性を向上させることが実験により示唆された<sup>[2]</sup>が、その効果の定量的理解は十分ではないとされITERにおける設計では十分に考慮されていない<sup>[1]</sup>。

本発表では、これまで行ってきた実験によるデータを考察するための追加実験の結果や、実験と数値解析の比較検討の結果等について報告を行う。

## 2. 方法

円筒形の支持治具にSC線を巻き付けたサンプルを液体ヘリウムで浸漬冷却されたソレノイドコイル内に挿入した。SC線に流す電流値や印加する磁場を変化させながらヒーターによる加熱を加え、線が常伝導転移することによる電圧を計測した。SC線には銅比1.7、径0.65mmのNbTi線を用いた。

サンプルの構成図をFig.1に示す。支持治具は二種類ある。一つはステンレス製の治具(a)で、200mm程度の長さを計測することが可能である。もう一つはFRP製の治具(b)で、1400mm程度の長さを計測することが可能である。

SC線には、常伝導転移を引き起こすための加熱ヒーター1つと電圧タップを取り付けた。タップの取り付け位置は支持治具ごとに異なる。詳細をFig.1(c)に示す。これまでの実験から、SC線に計測タップを取り付けるためのはんだによる常伝導伝播速度への影響が確認された。そのため、FRP製治具の実験では、はんだによる影響を最小限にするために計測タップの取り付け数を減らし、タップ間距離を500mmとした。

## 3. 結果と考察

それぞれの治具を用いたSC線1本における常伝導伝播速度を得ることができた。その結果をFig.2に示す。結果から、FRP製治具における伝播速度は、ステンレス製治具のそれと比べ速くなるのがわかる。また、FRP製は最小伝播電流値が低い。これらはSC線の冷却安定性が低下していることを示している。以前より、全体電圧の立ち上がり速度に変動が見られたことから、SC線に取り付けたはんだが伝播速度に影響していることは確認されていた。したがって結果において、はんだの影響を最小限とした場合は伝播速度が大きく上昇することは想像の範囲内であった。しかし、最小伝播電流値が大きく低下することは想定しておらず、治具やはんだがSC線の冷却安定性において大きな寄与を持っていたことがわかった。

次に、実験と数値計算を比較した結果をFig.3に示す。数値計算は素線の要素ごとの熱収支を計算する式1を用いた。

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = -k(B, T) A \frac{\partial T}{\partial x} - h(\theta) P + RI^2 + Q_{EXT} \quad (1)$$

このとき、 $C$ は熱容量[J/K]、 $T$ は素線の温度[K]、 $k$ はSC線の熱伝導率[W/mK]、 $B$ は磁場[T]、 $A$ は素線の断面積[m<sup>2</sup>]、 $h$ は液体ヘリウムの熱伝達率[W/m<sup>2</sup>]、 $\theta$ は液体ヘリウムとSC線間の温度差[K]、 $P$ は冷却面積[m<sup>2</sup>]、 $R, I$ は素線の抵抗値[Ω]と電流値[A]、 $Q_{EXT}$ はヒーターによる加熱[W]である。数値計算において、素線を治具に巻くことによる冷却面積の減少と、熱容量の増加の2つをそれぞれパラメータ $Pm, Cm$ として与え、冷却面積 $P$ と熱容量 $C$ に対する係数とした。

結果より、 $Pm$ が0.25、 $Cm$ が3.8の場合に計算結果は実験結果とよく一致した。したがって、考案したモデルは実験結果を表すことができると言える。

今後は、他の種類の試験線として使用した場合の結果について同様のモデルを用いて考察のための計算を行う。

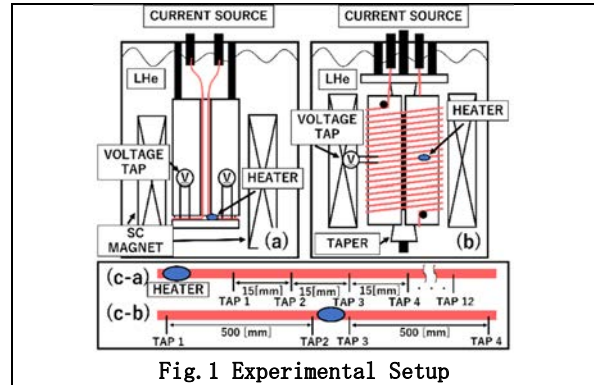


Fig. 1 Experimental Setup

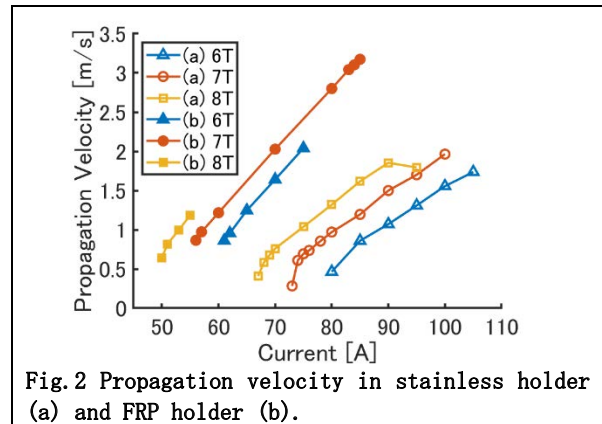
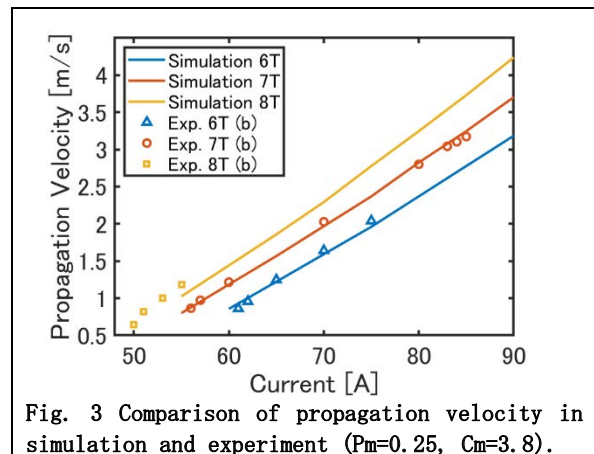


Fig. 2 Propagation velocity in stainless holder (a) and FRP holder (b).

Fig. 3 Comparison of propagation velocity in simulation and experiment ( $Pm=0.25, Cm=3.8$ ).

## 参考文献

- [1] ITER, Magnet Superconducting and Electrical Design Criteria, p.16.
- [2] J. W. Lue, "Review of stability experiments on cable-in-conduit conductors", Cryogenic, Vol. 34, No. 10, 1994.

# 誘導加熱の電気機器学的考察と回転磁石式誘導加熱法の提案

## Electrical Mechanical Consideration of Induction Heating and Proposal of Rotating Magnet Induction Heating Method

野村 新一, 許 航 (明治大); 平野 直樹, 力石 浩孝 (NIFS)  
 NOMURA Shinichi, XU Hang (Meiji Univ.); HIRANO Naoki, CHIKARAISHI Hirotaka (NIFS)  
 E-mail: nomuras@meiji.ac.jp

### 1. はじめに

通常、誘導加熱はファラデーの電磁誘導の法則により交流磁場を加熱対象物に印加して誘導電流を流して加熱させる。近年、アルミビレットを超電導コイルで発生した直流磁場中で回転させ速度起電力を利用した誘導加熱法が研究されている。本研究では、アルミビレットの加熱処理への応用を想定して回転磁石式誘導加熱法を提案し、交流磁場を印加して加熱する従来法と直流磁場を印加して加熱対象物を回転させる手法と電気機器学的観点から考察する。

### 2. 誘導加熱法の分類

表 1 は電磁現象を利用した考え得る誘導加熱法の原理を整理した表である。従来法は加熱対象物に交流磁場(交番磁界)を印加する手法で変圧器の短絡試験を行っている状態と同じである。このとき、入力電力は加熱のための有効電力だけでなく、電磁石を励磁するための無効電力が必要になる。例えば、ビレット誘導加熱装置が産業化された初期の装置では、800 kW の加熱入力(有効電力)に対して力率改善用コンデンサ容量(無効電力補償)は 3,000 kVA 必要であった[1]。近年、誘導加熱装置用変換器もサイリスタ変換器から IGBT などを用いた高周波インバータが適用され系統入力側の設備容量は低減されているが[2]、本質的に無効電力の問題は残っており、高周波インバータの電圧容量を下げるために加熱コイルとの間に直列コンデンサが接続されている。この考え方は磁気共鳴と呼ばれる非接触給電の高周波インバータの考え方と原理は同じである。

一方、2000 年代より超電導コイルで発生した直流磁場中でアルミビレットを回転させて加熱する方法が研究され、わが国でも 400 kW 級の誘導加熱装置が開発されている[3]。この方法は、直流磁場を利用しているため無効電力は原理的には発生せず、加熱のための電力はアルミビレットを回転させるためのモータ機械出力から供給される。

### 3. 回転磁石式誘導加熱法の提案

表 1 に示した従来の誘導加熱の方法に対して、本研究では、着磁させた高温超電導バルク体など強力超電導磁石を

静止したアルミビレットの周りに回転させて誘導加熱を行う手法を提案する。磁石と同じ回転座標系から見れば、アルミビレットを直流磁場中で回転させていることと同じ効果が得られ、速度起電力によって誘導加熱が行われることになる。つまり、直流磁場を利用しているため無効電力は原理的には発生せず、加熱のための電力は超電導磁石を回転させるためのモータ機械出力から供給される。

前節で述べた直流磁場中でアルミビレットを回転させて誘導加熱を行う手法では、目標 500 °C までの加熱に対して、1 T の磁場中でアルミビレットを 900 min<sup>-1</sup> で回転させ 400 kW の加熱パワーが得られる概算がされている[4]。相対速度の関係から、原理的に 1 T に着磁させたバルク体を 900 min<sup>-1</sup> で回転させることができればアルミビレットを 500 °C まで加熱できるということになる。

提案法は従来法の交番磁界を利用した誘導加熱と同じくアルミビレットを回転させる必要はないが、誘導機の原理であるアラゴの円盤による回転トルクが発生するためアルミビレットを固定させておく必要がある。提案法と同じ効果は、多相交流による回転磁界を利用することでも実現できるが、この場合、誘導機の拘束試験と同じ状態となり無効電力の補償が必要になる。なお、提案法と同様の原理で永久磁石を並べた円盤をアルミインゴットの下で回転させて誘導加熱を行う装置が TSK 株式会社によって開発されている。

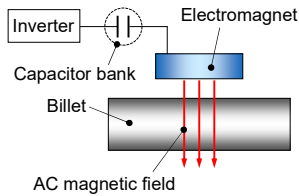
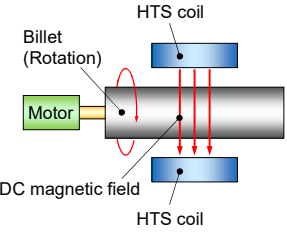
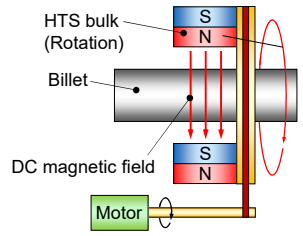
### 4. 今後の課題

回転磁石式誘導加熱法の可能性検証のために、高温超電導バルク体を用いた加熱実験を行い、実機を想定したバルク体の配置方法、着磁方法と冷却方法に関して検討を進めていく。

### 参考文献

1. 後藤: 日立評論, 1967 年 6 月号 pp. 17-21.
2. 倉田ほか: 富士時報, Vol. 80 (2007) pp. 135-140.
3. T. Ito, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 58 (2023) pp. 124-131.
4. T. Ito, et al.: in Proc. 2022 Annual Meeting IEEJ, p. 201.

Table 1. Classification of Induction Heating Methods.

	Conventional method	Advanced method	Proposed method
Schematic layout			
Heating principle	Faraday's law	Speed electromotive force	Speed electromotive force
Magnetic field	AC field	DC field	DC field
Magnetic field generator	Stationary state (Electromagnet)	Stationary state (Superconducting magnet)	Rotation state (Superconducting bulk)
Heating object	Stationary state	Rotating state	Stationary state
Reactive power compensation	Required (Voltage capacity reduction)	None	None

# 超伝導バルクコイルを用いたワイヤレス電力伝送のための冷却システムの開発 及びそれを用いたワイヤレス電力伝送の各種特性の温度依存性評価

Development of cryocooler system for wireless power transfer system using superconducting bulk coil and investigation of its temperature dependence using developed system

押本 夏佳, 藤田 貴紀, 作間 啓太, 關谷 尚人(山梨大)

OSHIMOTO Natsuka, FUJITA Takanori, SAKUMA Keita, SEKIYA Naoto (University of Yamanashi)

E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

## 1. はじめに

ワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer: WPT)は近年, 研究・開発が活発に行われている. WPT は高効率化が求められており, それを達成する方法として送受電コイルの Q 値の向上が挙げられる. しかし, 従来の銅コイルではこれ以上導電率を向上させるのは困難であるため, 超伝導体(超伝導線材[1]や超伝導バルク[2])を用いた送受電コイルを WPT に用いる研究が行われている. これらの超伝導コイルを用いた WPT は冷却が容易な液体窒素を用いた研究しかなく, 液体窒素温度以下のコイルの Q 値や WPT の特性(伝送効率, 耐電力特性)の報告はない.

本発表では我々がこれまで報告した超伝導バルクコイルを用いた WPT のための冷却システムを開発し, それを用いて 77 K 以下のコイルの Q 値と WPT の特性の温度依存性を評価したので報告する.

## 2. 冷却システムの開発

図 1 に開発した冷却システムの構造を示す. 超伝導バルクコイルは 2 枚の非常に熱伝導率の高いサファイア基板で挟み, それを銅治具で挟んで固定した. 銅治具は冷凍機のコールドヘッドに固定し熱伝導を利用して超伝導バルクコイルを冷却した. ここで銅治具に発生する渦電流を抑制するため銅治具にはスリットを入れた. また, チャンバーは一般的にステンレスを使用するが渦電流が発生しないように材質をアクリルにした. また, アクリルは誘電体損失が大きいのでチャンバーのコイル前面と背面のみ誘電体損失が非常に小さいアルミナ窓にした. 銅治具の導体損, アクリルチャンバーとアルミナ窓の誘電体損失によって超伝導バルクコイルの Q 値が低下しないように, それらと超伝導バルクコイル間の距離を三次元電磁界シミュレータ(CST studio)を用いて最適化した. 設計の詳細は当日述べる.

## 3. 超伝導バルクコイルの Q 値とそれを用いた WPT の特性(伝送効率と耐電力特性)の温度依存性

作製した冷却システムを用いて, 超伝導バルクコイルの Q 値および伝送効率の温度依存性をネットワークアナライザを用いて測定した. 図 2 に超伝導バルクコイルの Q 値の温度依存性を示す. 図 2 より Q 値は 77 K で 9051, 25 K で 14050 となり, 温度低下に伴い向上した. WPT の測定では送電コイルにチャンバー内の超伝導バルクコイル, 受電コイルにチャンバー外の銅コイルを用いた. 伝送効率も温度低下に伴う Q 値向上により向上した. 詳細は当日述べる.

また, 超伝導バルクコイルを用いた WPT の耐電力特性を測定した. コイル間距離は 12 cm とし, 共振周波数である約 68 MHz の信号をシグナルジェネレータで入力し, 出力電力をスペクトラムアナライザで測定した. 耐電力値は 25 K で 44.0 dBm(25.2 W), 77 K で 36.5 dBm(4.56 W)となり, 温度低下に伴い耐電力値が約 5.6 倍と大幅に向上した. 耐電力特性の温度依存性の結果の詳細は当日示す.

## 4. まとめ

超伝導バルクコイルを用いた WPT 用の冷却システムを開発し, WPT の性能(Q 値, 伝送効率, 耐電力特性)の温度依存性を測定した. 温度低下に伴い, Q 値および伝送効率が向上することを明らかにした. また, 耐電力特性も約 5.6 倍と大幅に向上した.

## 参考文献

1. N. Sekiya, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, Art. no. 6602005, Jun. 2017.
2. N. Oshimoto, et al., *Appl. Phys. Express*, vol. 16, p. 023002, 2023.

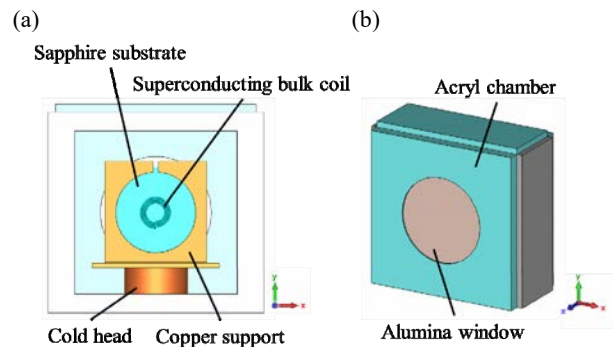


Fig.1 Schematic of cryocooler system ((a) inside, (b) appearance).

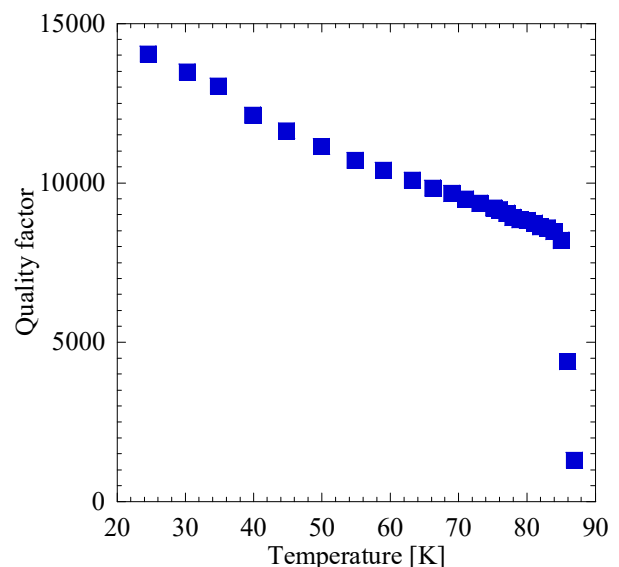


Fig.2 Temperature dependence of quality factor of superconducting bulk coil.



# 超電導コイルを用いた磁気浮上型免震装置の磁気浮上力特性に関する検討

## A study on the magnetic levitation force characteristics of a magnetic levitation type seismic isolation device with superconducting coils

佐々木 修平(福島工業高等専門学校)

SASAKI Shuhei (National Institute of Technology, Fukushima College)

E-mail: sasaki-s@fukushima-nct.ac.jp

### 1. はじめに

地震被害を抑制するために、超電導体を用いた磁気浮上型免震装置の開発を進めてきた[1]。本提案装置の実用化には、磁気浮上力の確保が不可欠であり、そのためには超電導バルク材の体積増加が重要になる。試料の単純な大型化は特性の不均一性を招くため、小型試料の個数確保が最善となる。しかし、熔融法による試料の量産は難しく、現実的でないといえる。そこで、本研究では、超電導領域の拡大を図るために、超電導線材を用いて任意の超電導コイルを作製し、バルク材と組み合わせた磁気浮上力特性を検討した。

### 2. 永久磁石レールと超電導線材コイル

固定層である永久磁石レールにおいては、永久磁石を基礎に対して垂直に立てるRadial型を採用した。さらに、新たに永久磁石レールを設け、レール同士を対向させたダブルレールを考案した(Fig. 1 参照)。永久磁石レールの磁極は異極同士が対向するように(吸着する方向に)設置し、永久磁石レール間隔  $D_{PM\ rail-PM\ rail}$  を 70 mm とした。

浮上層においては、構成の容易さ、冷却効率を考慮し、超電導バルク材(直径 32 mm, 厚さ 5 mm)の側面に超電導線材を巻き付け、超電導コイルを付加した。コイルの大きさは外径 46 mm, 内径 33 mm とした(Fig. 2 参照)。なお、超電導線材は許容両曲げ直径が小さく、コイル化しやすい住友電工製の DI-BSCCO<sup>®</sup> を使用した。

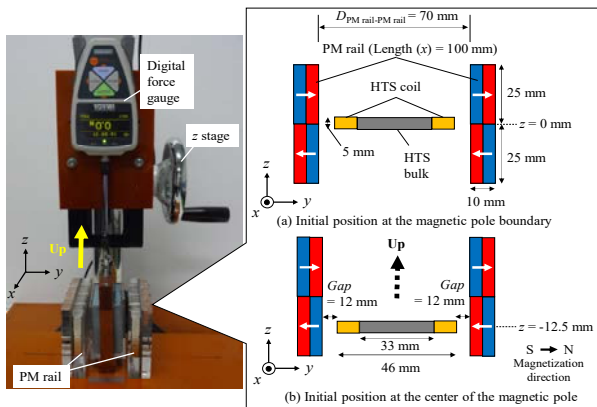


Fig. 1 Experimental device for restoring force of  $z$ -direction and measurement condition.

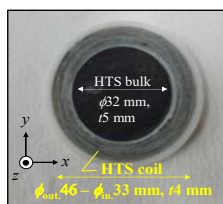


Fig. 2 Sample of the HTS bulk and HTS coil.

### 3. 磁気浮上力特性

磁気浮上力の測定方法は、まず、保冷容器に埋め込んだ超電導体の中心を基礎に設置した磁石レール中央位置( $x = 50$  mm,  $z = 0$  mm (Fig. 1(a)参照)および  $z = -12.5$  mm (Fig.

1(b)参照))に合わせ、液体窒素によって浸漬冷却(着磁)を施した。その後、保冷容器(超電導体)を  $z$  ステージによって引き上げ、その際に発生する力をデジタルフォースゲージによって計測した。発生する力がマイナスに大きいほど初期位置に戻ろうとする復元力(磁気浮上力)が大きく、また、その点における負の傾きが大きいほど剛性が強く、安定に浮上することができることを意味する。なお、浮上層の自重分が加味されないようにゼロ調整を施した。

$z = 0$  mm および  $z = -12.5$  mm の着磁位置に対する復元力特性をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。Fig. 3 より、超電導コイルを用いることによりバルク材単体よりも復元力が弱まる結果が得られた。これは、コイルの磁気遮蔽によりコイル内の磁束変化が抑制され、復元力が得られにくくなったと考えられる。一方、Fig. 4 ではそれぞれの力が足し合わされた形で発生しており、磁極が対向する位置(磁極中央位置  $z = -12.5$  mm)で着磁させることで、変位に対して垂直成分である  $y$  方向の磁束ピンニングが有効に寄与したと考えられる。このように、変位に対して磁極変化が伴う(磁束密度勾配が大きくなる)位置で超電導コイルを着磁させることで、有効に磁気浮上力を得ることができることが分かった。

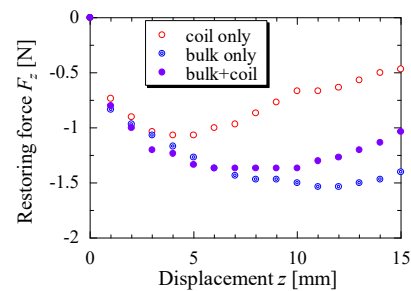


Fig. 3 Restoring force characteristics to the initial position at the magnetic pole boundary.

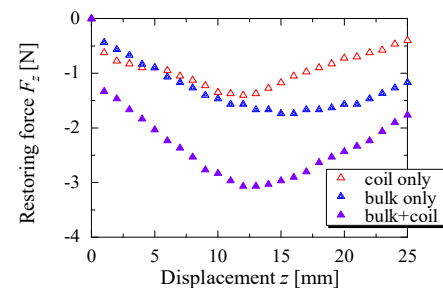


Fig. 4 Restoring force characteristics to the initial position at the center of the magnetic pole.

### 謝辞

本研究の一部は公益財団法人天野工業技術研究所の研究助成を受けたものである。

### 参考文献

- 佐々木 修平, 長崎 陽, 宮城 大輔, 津田 理: 電気学会論文誌 B, Vol. 140, No. 3, (2020), pp.154-161

# リスク物質の濃縮回収のための球状磁気フィルタを用いた磁気分離プロセス Magnetic Separation Process using Magnetic Ball Filters for Concentration and Recovery of Risk Substances

江村 寛, 吉田 弦, 井原 一高(神戸大学)  
EMURA Hiroshi, YOSHIDA Gen, IHARA Ikko (Kobe University)  
E-mail: 221a003a@stu.kobe-u.ac.jp

## 1. 研究背景

水環境において、PPCPs(医薬品や化粧品などのパーソナルケア用品)等のリスク物質の環境拡散は生態系に対し悪影響を及ぼす懸念がある。リスク物質の例として、畜産廃水に残留する動物用抗菌剤が挙げられる。これは環境拡散により薬剤耐性菌の発生のリスクがある[1]。リスク物質の環境拡散防止は急務であり、リスク物質を廃水等から分離し、無害化処理のために回収することが求められる。本研究では、対象水からリスク物質を分離・回収する技術として磁気フィルタを用いた高勾配磁気分離に着目した。磁気フィルタに分離された対象物質に対し、逆洗によってフィルタからの回収が実現する。しかし、磁場の解除後も残留磁化等の影響により、分離した物質の回収率が低いことが指摘されている[2]。回収においては、洗浄液量を極力抑制し、対象廃水に対して高い濃縮率を実現することが無害化処理には望ましい。すなわち、磁気フィルタからの高回収率と高濃縮率を両立させる分離・回収プロセスの開発が必要である。本研究では、模擬リスク物質として磁性粒子を用いて、高濃縮率条件下における磁気分離・回収プロセスについて検討した。

## 2. 実験方法

模擬廃水として、脱イオン水を用いて磁性粒子濃度 50 mg/L の溶液 1.8 L を用いた。磁性粒子として、マグネタイトを使用した。磁気フィルタとして SUS440C 球を装填したキャニスタを、ネオジム磁石による磁場空間を持つ磁気分離装置(最大中心磁場 0.6 T)に装着し、実験に使用した。磁性粒子溶液を循環させ磁性粒子の分離試験を行った (Fig.1)。つづいて印加磁場を解除し脱磁操作を行った後、濃縮倍率が 30 倍となるように回収液量を設定し磁性粒子の回収試験を行った。濃縮率  $C(-)$  は式(1)から算出した。

$$C = b/s \quad (1)$$

ここで  $b$  は磁性粒子溶液量(L),  $s$  は回収液量(L) である。

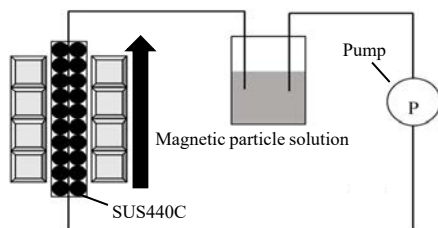


Fig.1 Apparatus for magnetic separation

原子吸光光度計を用いてサンプル中の鉄濃度を測定した。溶液量から磁性粒子量に換算し、式 (2), (3), (4) から分離率  $S$  (%), 捕捉量基準回収率  $R_c$  (%) そして投入量基準回収率  $R_i$  (%) を算出した。

$$S = c/I \quad (2)$$

$$R_c = r/c \quad (3)$$

$$R_i = r/I \quad (4)$$

ここで  $c$  は分離試験によってフィルタで捕捉された磁性粒子分離量 (g),  $i$  は分離試験に供試した溶液に含有する磁性

粒子量 (g),  $r$  は回収試験でのフィルタからの磁性粒子回収量 (g) である。

## 3. 結果および考察

磁気分離試験において、分離流量 5.4 mL/s と比較すると、21 mL/s ではマグネタイト分離率 99% までの所要時間は短縮された。分離流量の増大は磁気分離プロセスの高速化に寄与すると考えられる。しかし分離流量を過大にすると、粒子に作用する流れ由来のドラッグ力が増大し磁気分離が困難になる可能性があり、留意が必要である。

濃縮倍率を 30 倍とした回収試験において、回収流量 12 mL/s では、3.0 mL/s や 5.4 mL/s と比較するとマグネタイト回収率は 84.8% と高くなったが、流量増大に伴う回収率の増加は鈍化した。また回収溶液量が回収率に与える影響はほとんど観察されなかった。後処理によるリスク物質の無害化を想定した場合、回収溶液量を抑制する必要がある。また分離流量 21 mL/s での分離後の回収において、回収率は 31.5% と低くなった。分離条件も回収に影響を与えることが示唆された。フィルタ充填率をほぼ最大の 55% から低下させると、回収率は向上した (Fig.2)。充填率の低下によりモジュール内に生まれたスペースが回収率向上に寄与したと考えられる。

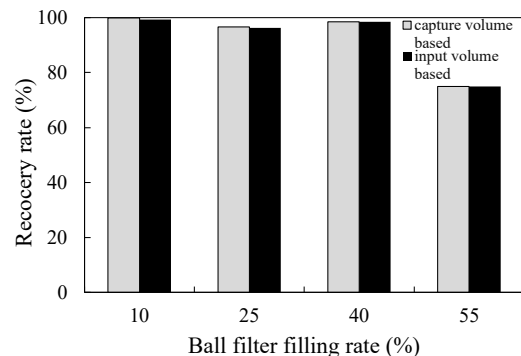


Fig. 2 Effect of Ball filter filling rate on recovery rate

## 4. まとめ

分離流量の増加により分離時間は短縮された。回収流量は回収率に影響を与えたが、回収溶液量が回収率に与える影響は小さかった。回収率向上には、磁気フィルタ充填率をやや低くすることが重要であることが明らかになった。

## 謝辞

本研究は文科省科研費20H03107の支援を得て行われた。

## 参考文献

- F.J. Angulo, et al.: Origins and Consequences of Antimicrobial-Resistant Nontyphoidal Salmonella: Implications for the Use of Fluoroquinolones in Food Animals, Microbial Drug Resistance, Vol. 6 (2000) pp.77-83.
- P. Kampeis, et al.: Einsatz von Magnetfiltern in der Bioverfahrenstechnik Teil 1: Vergleich verschiedener Verfahren zum Rückspülen der Magnetfilter, Chemie Ingenieur Technik, Vol. 81 (2009) pp.275-281.

# 磁気冷凍システム向け Bi2223 超伝導マグネットの開発 -性能評価試験-

## Testing of Bi2223 superconducting magnet for magnetic refrigeration system

西島 元, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)

NISHIJIMA Gen, KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)

E-mail: nishijima.gen@nims.go.jp

### 1. はじめに

我々は JST 未来社会創造事業「革新的水素液化技術」において水素液化用磁気冷凍システム開発を進めている。この磁気冷凍システムでは、磁気熱量効果発現に必要な磁場変化を、磁性体を超伝導マグネット中に出し入れすることで与える[1]。現在用いられている超伝導マグネットは NbTi マグネットであるが、将来的には高温超伝導マグネット実装が想定されており、我々は Bi2223 超伝導マグネットの開発に取り組んできた。2022 年度の励磁試験においては不具合により定格未達であったが[2]、今回 20 K 運転において定格励磁に成功するとともに、より高温での励磁試験も行った[3]。

### 2. マグネット諸元

マグネット諸元を Table 1 に示す。マグネットはメインコイルとシールドコイルから成る。シールドコイルはメインコイルと逆向きの磁場を発生し、マグネット両端の磁場をほぼゼロにする。両コイルとも DI-BSCCO® Type HT-CA 線材を用い、エポキシ樹脂で含浸したダブルパンケーキ (DP) を積層して製作された。DP 間には冷却のための Al シートが挿入され、垂直冷却板に接続されている (Fig. 1)。2 枚の垂直冷却板と上下の冷却板は冷凍機 2 段ステージと熱的に接続されており、垂直冷却板と冷凍機 2 段ステージにはヒータが設置されている。

### 3. 20K 励磁

初期温度~21 K からマグネットを定格 4.8 T まで励磁し、6 時間保持したときの温度変化を Fig. 2 に示す。HTS CL 高温端 (と輻射シールド) の温度が上昇しているのは、HTS CL の上流側にある Cu バスバーからの熱侵入が大きいためと考えられている。この熱侵入が HTS CL を通して下部冷却板への熱侵入となり、コイル温度の上昇につながったと考えられる。

マグネット性能の温度依存性を調べるために、30 K 以上の温度でも励磁試験を行った。Fig. 3 には初期温度~30 K における励磁において電圧が徐々に発生する様子を示す。電圧が約 30 mV 発生したときの電流値は、マグネットに用いた線材の  $I_c$  測定結果から予測されるコイル  $I_c$  値とほぼ一致した。

### 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」(JPMJMI18A3) の支援を受けた。

### 参考文献

- [1] K. Kamiya *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 15 (2022) 053001.
- [2] G. Nishijima *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 33 (2023) 4602605.
- [3] G. Nishijima *et al.*, presented at MT-28, Aix-en-Provence, France.

Table 1 Specifications of Bi2223 Superconducting Magnet

	Main coil (16DP)	Shield coil (4DP×2)
Inner diameter [mm]	142	150
Outer diameter [mm]	238	226
Height [mm]	166	41
Number of turns	3592 (224.5/DP)	714×2 (178.5/DP)
Operating current ( $I_{op}$ ) [A]	300	
Central magnetic field ( $B_0$ ) [T]	4.8	

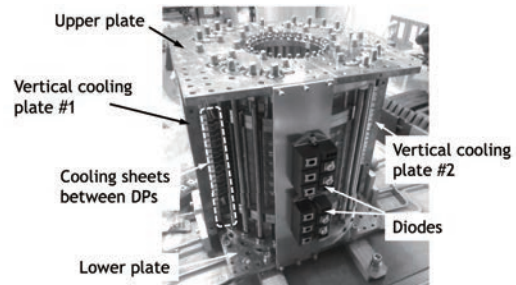


Fig. 1 Cooling structure of the Bi2223 magnet.

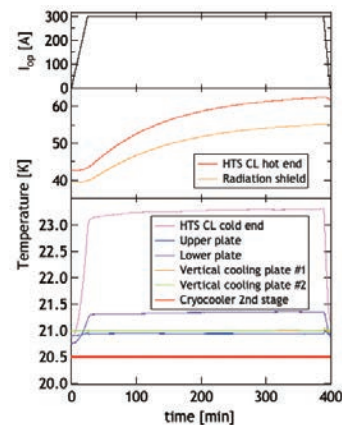


Fig. 2 Magnet temperature as a function of time at 20 K operation.

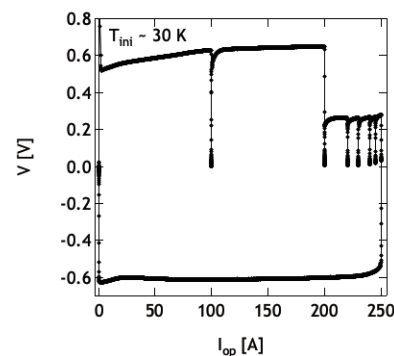


Fig. 3 Magnet voltage as a function of operation current at 30 K operation.

# SMES ケーブルを用いた直流マイクログリッドの最適電源構成に関する検討 Study on optimal power supply configuration for DC microgrids with SMES cables

東川 甲平, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)  
HIGASHIKAWA Kohei, BIAN Wenhao, KISS Takano (Kyushu Univ.)  
E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々は、エネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブル (SMES ケーブル) の直流マイクログリッドにおける運用を提案しており、他のエネルギー貯蔵装置では対処が困難となる再生可能エネルギーの激しい出力変動を補償できることを報告してきた<sup>[1][2]</sup>。前回の発表ではこの機能が再エネのエネルギー利用率の向上にも大きく寄与することを報告した<sup>[3]</sup>。そこで本発表では、上記エネルギー利用率向上がエネルギーコストに与える効果を試算し、この観点からマイクログリッドの最適電源構成を検討したので、その結果を報告する。

## 2. マイクログリッドにおける SMES ケーブルの効果

典型的な単位として 10 MW 級のマイクログリッドを想定し、構成要素は Fig. 1 に示す全てまたはその一部とした<sup>[3]</sup>。具体的には、Table 1 に示す様々な組み合わせに対して需給バランスの成否やその際のエネルギー利用率を評価した。太陽光発電の出力変動は最大で 10%/秒にも及ぶため、このような出力変動を補償できるかが、太陽光発電の電気エネルギーをリアルタイムに利用できるかの鍵となる。Fig. 2 に Case SB の例を示しているが、蓄電池や水素発電では吸収困難な程度の太陽光発電の出力変動に対して、SMES ケーブルが補償動作を行い、全体として負荷には一定の電力を届けられている様子が見える。すなわち、SMES ケーブルの適用すれば、太陽光発電による電気エネルギーを予め水素などの化学エネルギーとして貯蔵しておく必要性を最小限とし、可能な限り電気エネルギーを電気エネルギーのまま利用できることによって、エネルギー利用率が向上する。

## 3. マイクログリッドのエネルギー利用率とコストの評価

SMES ケーブルの適用によるマイクログリッドのエネルギー利用率の向上とそれにかかるコスト低減効果を Table 1 にまとめている。SMES ケーブルの適用により、マイクログリッドの定格を超える太陽光発電を受け入れられる可能性があり、その電気エネルギーの最大限の利用によって、エネルギー利用率が向上していく様子が見える。これは、再エネ由来の水素 (グリーン水素) の消費を大幅に低減するものであり、主にその効果がエネルギーコストに反映されている。また、最右列には蓄電池にかかるコストも勘案した上でのコスト低減効果

を示しているが、この値が SMES ケーブルの導入と維持にかかる費用を上回れば、再エネの有効利用のみならず、経済性においてまでメリットが生まれることになる。本検討の詳細な前提や最適電源構成にかかる考察は当日に報告する。

謝辞 本研究は、NEDO 先端研究プログラム/未踏チャレンジ 2050 の一環として行うとともに、科学研究費補助金 (JP 20H02132) による助成を得て行ったものである。

## 参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 29 (2019) 5402204.
- [2] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 33 (2023) 5400405.
- [3] K. Higashikawa et al., Abstract of CSSJ Conference 105 (2023) 105.

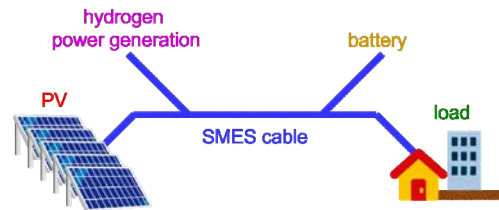


Fig. 1. Conceptual diagram of a microgrid using SMES cable.

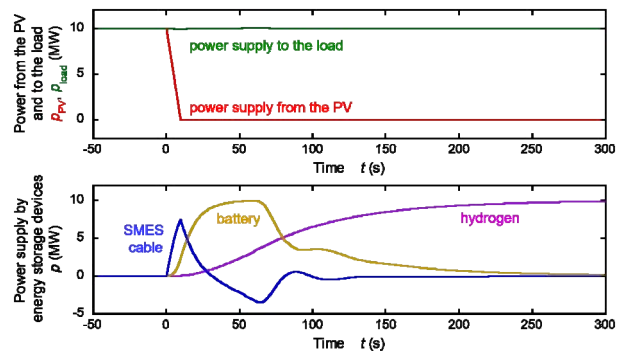


Fig. 2. Example of compensating operation for the most severe output change of PV in the microgrid.

Table 1. Energy use efficiency and the corresponding cost estimated for various power supply configurations.

Case	PV	hydrogen	battery	SMES cable	supply-demand balancing	energy utilization efficiency (cloudy day)	energy utilization efficiency (clear sometimes cloudy day)	energy utilization efficiency (clear day)	annual average efficiency	electricity directly supplied by PV for 30 years	electricity supply by hydrogen for 30 years	energy cost for 30 years: present, future	Allowable cost for installing SMES cable: present, future
Case O	10 MW	10 MW	-	-	NG	-	-	-	-	-	-	-	-
Case B	10 MW	10 MW	10 MW	-	NG	-	-	-	-	-	-	-	-
Case H	-	10 MW	-	-	OK	30%	30%	30%	30%	-	1.75 TWh	175 Byen, 53 Byen	-
Case SB	10 MW	10 MW	10 MW	60 MJ	OK	32%	37%	43%	38%	0.52 TWh	1.24 TWh	134 Byen, 42 Byen	38 Byen, 8 Byen
Case S	10 MW	10 MW	-	500 MJ	OK	32%	38%	43%	38%	0.52 TWh	1.23 TWh	133 Byen, 42 Byen	42 Byen, 11 Byen
Case S15	15 MW	10 MW	-	750 MJ	OK	34%	41%	46%	41%	0.68 TWh	1.07 TWh	121 Byen, 38 Byen	54 Byen, 15 Byen
Case S19	19 MW	10 MW	-	1 GJ	OK	35%	43%	48%	43%	0.77 TWh	0.98 TWh	113 Byen, 37 Byen	62 Byen, 16 Byen
Case SB19	19 MW	10 MW	10 MW	120 MJ	OK	35%	43%	48%	43%	0.77 TWh	0.99 TWh	114 Byen, 37 Byen	58 Byen, 13 Byen

“Byen” means billion yen. The costs are estimated both from present unit cost of energy and from future one, and are listed above and below in each cell, respectively. The battery is assumed to be replaced twice every 30 years due to its lifetime.

## LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(18)

## - プロジェクト概要と7 m 長実証機・実機製造

## Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (18)

## - Project overview and construction of 7 m-long prototype and series production magnets

菅野 未知央, 中本 建志, 鈴木 研人, 荻津 透, 池本 由希子, 寺島 昭男, 岡田 尚起, 川又 弘史 (KEK);

木戸 修一, 田原 大夢(日立); 木村 誠宏(東大); 市原 直(フューザック・テクノロジーズ);

PRIN Herve, PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)

SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, SUZUKI Kento, OGITSU Toru, IKEMOTO Yukiko, TERASHIMA Akio, OKADA Naoki, KAWAMATA Hiroshi (KEK);

KIDO Shuichi, TAHARA Taimu (Hitachi); KIMURA Nobuhiro (Univ. of Tokyo); ICHIHARA Tadashi (Fusac Technologies);

PRIN Herve, PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)

E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

## 1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ルミノシティを現行 LHC の10倍以上の3000 fb<sup>-1</sup>まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。目標達成には衝突点近傍の加速器システムの性能向上が不可欠であり、KEK はビーム分離超伝導双極磁石 (D1 磁石, 磁石名は MBXF) の製造を担当している。

D1 磁石では Nb-Ti 超伝導コイルが採用されている。重要な要求性能は、150 mm の大コイル口径、35 T・m の積分磁場、想定吸収線量 25 MGy に対する耐放射線性などである。1.9 K の超流動ヘリウムで冷却され、定格電流 12.11 kA で主双極磁場は 5.6 T である。2018 年に KEK が HL-LHC 計画に正式参加することが決定され、日本の貢献として 7 m 長コールドマス (磁石を含むヘリウム容器) 実証機 1 台と実機 6 台を製造することになった。現在、日立製作所においてコールドマス製造が進められている。本講演では、プロジェクトの全体概要、実証機コールドマスの製造と CERN への輸送、実機製造の進捗などについて報告する。

## 2. 7 m 長実証機コールドマスの製造

D1 磁石製造は、磁石本体製造、コールドマス組み立ての2段階に分けられる。磁石本体製造が完了した段階で一旦 KEK に輸送され、縦型クライオスタットにおいて冷却励磁試験が実施される。その後、日立製作所でのコールドマス組み立てを経て KEK に納品され、最終的に CERN に輸送される。7 m 実証機の製造および性能評価試験については既報を参照されたい[1][2]。

コールドマスの圧力容器設計は ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sec. VIII Div.2 に従って KEK が行い、認証機関である CERN Health and Safety Unit (HSE) の承認を受けた。コールドマス製造および溶接認証も上記 ASME 規格に従って実施された。

Fig. 1 にコールドマスの全体構造を示す。コールドマスは、磁石本体、エンドカバー、エンドドーム、端部配管部から構成される。コールドマス組み立てにおいて加速器

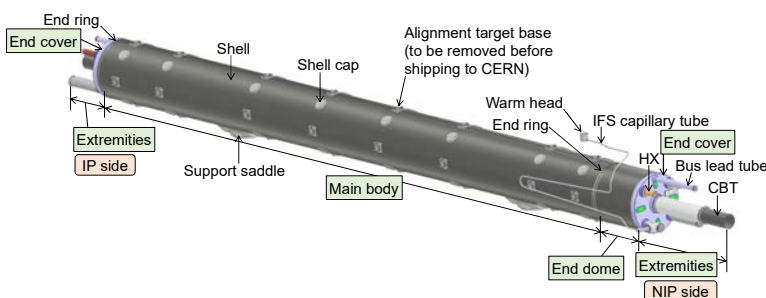


Fig. 1. 3D CAD model of the completed MBXF cold mass.

磁石としてビームチューブ (CBT)、熱交換器 (HX) 等の配管類やサポートサドルの位置公差が厳しく定められている。これらの要求を満足しつつ ASME 規格に則って圧力容器として製造するため、レーザートラッカーによる測量を行いつつ各継手の溶接が行われた。コールドマス組み立て後に耐圧気密検査を実施し、コールドマス本体で 2.5 MPa の耐圧性能、およびリーク量が規定量 (1x10<sup>-10</sup> Pa m<sup>3</sup>/s) 以下であることを確認した。

## 3. 実証機の CERN 輸送および横励磁試験

完成したコールドマスは KEK において最終的な常温磁場測定を行った後、2023 年 4 月に CERN に輸送された。Fig. 2 に示すように CERN においてクライオスタットへの組み込みが完了し、現在、横冷却励磁試験のための準備が進められている。試験後の実証機は、CERN、米国で開発された Nb<sub>3</sub>Sn 最終収束四極磁石や補正磁石群と接続され、MgB<sub>2</sub> 超伝導ケーブルを介した地上での同時励磁試験 (IT String 試験) に使用される予定である。

## 4. 実機製造の進捗およびまとめ

LHC 高輝度化アップグレード計画のためのビーム分離双極磁石の 7 m 長実証機コールドマス製造が完了し、CERN に輸送された。実証機とほぼ同じ設計で実機磁石の製造も進められている。現在までに磁石 2 台が完成し、うち 1 台について KEK での冷却励磁試験を終えたところである。

## 参考文献

1. M. Sugano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 32 (2022) 4003407.
2. K. Suzuki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 32 (2022) 9000407.



Fig. 2. MBXF cold mass prototype assembled into the cryostat.

# LHC 高輝度アップグレード用超伝導双極磁石の開発 (19)

## － 実機 1号機性能試験結果

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (19)  
 - Test results of the first series magnet

鈴木 研人、中本 建志、菅野 未知央、荻津 透、池本 由希子、岡田 竜太郎、高橋 直人、田中 賢一、  
 岡田 尚起、川又 弘史 (KEK)、木村 誠宏 (東大)、PEREZ Juan Carlos、TODESCO Ezio (CERN)  
 SUZUKI Kento, NAKAMOTO Tatsushi, SUGANO Michinaka, OGITSU Toru, IKEMOTO Yukiko, OKADA Ryutarou,  
 TAKAHASHI Naoto, TANAKA Kenichi, OKADA Naoki, KAWAMATA Hiroshi (KEK),  
 KIMURA Nobuhiro (Univ. of Tokyo) PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)  
 E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

### 1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は欧州原子核機構 (CERN) との国際協力の枠組みで LHC 高輝度化アップグレード (HL-LHC) に向けたビーム分離用双極超伝導磁石 (通称 D1、磁石名 MBXF) の製造を進めている。KEK が保有する 9 m 長縦型クライオスタットにて磁石の事前性能評価が行われ、ここでは 1) 受入電流値 13.23 kA までの励磁が可能である事、そして 2) 磁場精度が  $10^{-4}$  オーダー以下である事、等を確認する必要がある。2023 年 4 月から 6 月にかけて初めての实機となる 1 号機 (MBXF1) の性能評価を実施した。本発表では、この磁石の励磁試験結果について報告する。

### 2 試験設備の改良

実機 MBXF の蓄積エネルギーは定格運転時で 2.1 MJ にも及ぶ。そのため、クエンチの際はそのエネルギーの一部を外部抵抗で消費させる。しかし、定格電流値以上でのクエンチでは、磁石内部で消失されるエネルギーが大きくなるため蒸発ヘリウムガス量は回収能力を上回り、放出弁が作動してしまう事が明らかとなっていた。また、励磁回路の中に含まれる遮断器の許容電圧は 600 V と制限されている。外部抵抗値を高める事で消失エネルギーは減らせるが、逆に磁石両端電圧は上昇して 600 V を超えてしまう事も分かっていた。以上の制約により、実証機では受入電流値までのトレーニングが不可能だった [1]。そこで、13.23 kA までのトレーニングを実現するため、回収用ガスバッグを増設し、加えてバリスタと呼ばれる SiC 製の非線形抵抗器を導入する事で、試験設備の改良を施し MBXF1 試験に臨んだ。

### 3 トレーニング試験結果

励磁試験は一度の磁石昇温を挟んだ 2 つのサイクルに分けて実施した。トレーニング試験結果を図 1 に示す。第 1 サイクルでは 2 回のクエンチ後に定格電流値 12.11 kA に到達、その後 5 回のクエンチを経て初めて受入電流 13.23 kA に到達した。昇温を挟んだ第 2 サイクルではクエンチなしで 13.23 kA に到達している。さらにクエンチアンテナを用いて全てのクエンチイベントを解析した結果、特定の箇所でクエンチが集中していない事も確認できた。改良した設備の性能を確認するため 13.23 kA 保持後に遮断試験を行なった結果、回収ガスバッグを増設した事により全ての蒸発ガス量を回収できただけでなく、バリスタの導入によって磁石の消失エネルギーも最大で 1.4 MJ 程度に抑える事ができた。また、磁石の両端電圧を電流値毎にプロットしたのが図 2 であるが、バリスタの非線形な抵抗特性の効果が現れており、13.23 kA の遮断においても 600 V 以下を達成できている事が確認できた。

### 4 磁場測定結果

2021 年に評価した実証機では主要磁場誤差成分の 1 つであるノーマル 10 極 ( $b_5$ ) が要求仕様から外れていたため、実機では磁場特性の改善を図っている [2]。今回の励磁試験中に測定した定格運転時の MBXF1 磁場精度を 4 極から 12 極まで図 3 に示したが、全て 1 unit ( $10^{-4}$ ) のオーダーであり、概ね計算通りの値である事が確かめられた。スキュー 4 極 ( $a_2$ ) が -4 units 程出ているが、これは加速器運転の観点からも問題ない事が確かめられている。最終的には CERN で実施する磁場測定で評価されるが、KEK の試験結果ではほぼ計算通りの性能を示しており、磁場設計が改善された事が明らかとなった。

### 5 まとめ

HL-LHC 向け MBXF 実機 1 号機である MBXF1 の励磁試験を実施した。設備の改良もあり、受入電流 13.23 kA までのトレーニングを完遂した。また、磁場測定を行った結果、設計通りの性能である事が確かめられた。

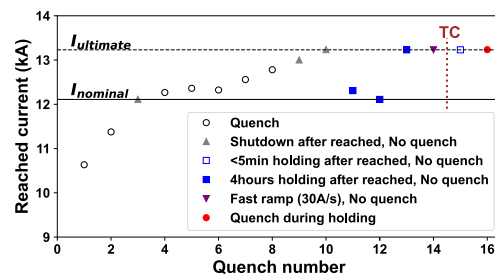


Fig. 1: Training summary of MBXF1.

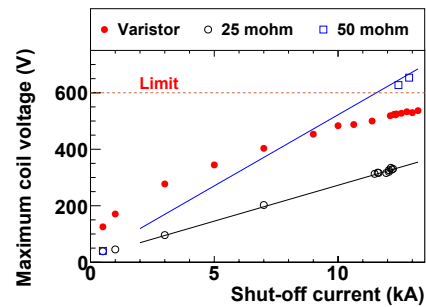


Fig. 2: Measured magnet terminal voltage for the varistor and the fixed resistances ( $R_{fix}$ ), 25 m $\Omega$  and 50 m $\Omega$ . The data for  $R_{fix}$  were derived from the prototype test in 2021.

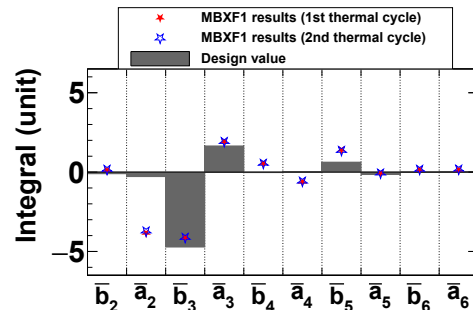


Fig. 3: MBXF1's field quality compared with the design value.

### 参考文献

1. M. Sugano, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 32 (2022) 4003407.
2. K. Suzuki, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 32 (2022) 9000407.

# 高粒子透過性検出器を実現する薄肉ソレノイドコイル用アルミ安定化 MgB<sub>2</sub> 導体開発

## Development of Aluminum Stabilized MgB<sub>2</sub> Conductor for Thin Solenoid Coil of Particle Detector Aiming High Transparency

谷貝 剛, 猪俣涼, 吉田輝弥 (上智大); 榎田 康博, 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS); 濱島 高太郎(東北大)  
 YAGAI Tsuyoshi, INOMATA Ryo, YOSHIDA Teruya (Sophia Univ.); MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK);  
 HIRANO Naoki (NIFS); HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)  
 E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

粒子加速器で生成された粒子の検出器では、磁場空間の粒子の飛跡を測定し、その曲率から運動量を求める手法が利用されている。検出粒子がマグネットを通過するため、高検出感度実現には、数 T の必要な磁場空間を発生しながら、粒子との反応性を最小限にする必要がある[1]。具体的には低物質量・薄肉化設計となるが、従来の NbTi ソレノイドは、マグネットとしての運用実績が豊富な反面、分子量が大きく、かつヘリウム冷却で厚いシールド層が必要で、冷却システム全体サイズが大きくなるため、マグネットの薄肉・コンパクト化には限界がある。そこで本グループでは、低質量数で T<sub>c</sub> が 39K と高い MgB<sub>2</sub> に着目し、粒子検出感度の向上を実現するマグネット用導体の開発を行ってきた。本報告は、MgB<sub>2</sub> 単線に様々な純度のアルミ板をハンダ付けしたシンプルな導体を用いて擾乱発生時の電流分布を計測し、MgB<sub>2</sub> アルミ安定化導体の安定性についての実験的な検証結果を示す。

### 2. 導体サンプルおよび実験セッティング

直径 0.84mm、熱処理済み MgB<sub>2</sub> 素線 (HyperTech 社製) 単線に、長さ 70 mm、幅 10 mm、厚み 1 mm のアルミ板をハンダ付けした導体サンプルを製作した。その模式図を Fig.1 に示す。アルミ板は純アルミ、Al5052 合金、Al6061 合金の 3 種類を選択して、異なる抵抗率で電流分流の違いを確認できるようにした。MgB<sub>2</sub> 中央には 1mm × 5.6 mm の SUS316L ヒータ (130 mΩ・最大 5A) を、絶縁シートを挟んで MgB<sub>2</sub> 線に接着して電圧タップを設置した。クエンチを判別するため、アルミ板と長さで電圧タップを設置した。電流分布を測定するホールセンサーは旭化成製 HG166A (1.5mm 角) を 3.3mm 間隔で 3 個設置できる G10 ホルダーを製作、導体上に 20 mm 間隔で配置して電流の垂直方向の磁場を検出する。これにより通電電流による磁場の他、擾乱印加後にアルミ板に分流した電流による磁場の変動も検出できる。各ホルダーのセンサー位置は MgB<sub>2</sub> 素線に近い位置から Shallow, Center, Deep と定義している。導体サンプルとホールセンサーは高真空グリッドで覆って断熱し、液体ヘリウム浸漬冷却条件にて最大 5T の外部磁場中で通電・擾乱印加試験を行った。MgB<sub>2</sub> 素線の I<sub>c</sub> は、3, 4,

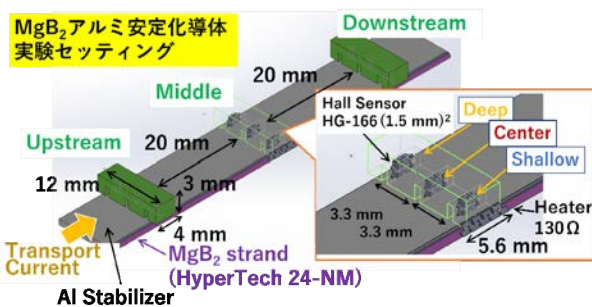


Fig.1 Schematic drawing of Al-stabilized MgB<sub>2</sub> conductor.

5T 背景磁場中で各々約 225A, 130A, 85A である。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 2 は、純アルミ安定化 MgB<sub>2</sub> 導体に、背景磁場 3T の I<sub>c</sub> より少し低い 182 A を通電し、ヒータに 3.25 A から 3.5A の 1sec パルス電流を計 6 回印加したときの各ホールセンサーの変動磁場検出波形である。通電電流印加した正極に近い上流側センサー 3 つのアレイを Upstream, ヒータ部 (中央) のセンサーを Middle, ヒータより下流を Downstream としている。タップ間電圧は、ヒータパルスの終了付近で立ち上がっており、その値が 1 μV/cm の電界基準以下であるケースもある。全ての擾乱印加で Middle のホールセンサーに通電電流と同じ方向の電流に起因する 1mT の磁場変動が観測される一方、Upstream・Downstream では有意な変化が見られなかった。ヒータ付近では、アルミに分流した電流による磁場強度が、MgB<sub>2</sub> 素線に近い Shallow, 中間の Center, 素線から遠い Deep の各センサーでほぼ同じであることから、分流電流は板の幅方向に均一なシート形状に流れていると考えられる。合金アルミ導体では、純アルミと異なる分流傾向が得られており、抵抗率の差、すなわち電流拡散係数 [2] の違いが電流分流に影響している事が示唆され、薄肉ソレノイド用の導体として適した導体設計に対する重要な知見が得られた。詳細は講演にて発表する。

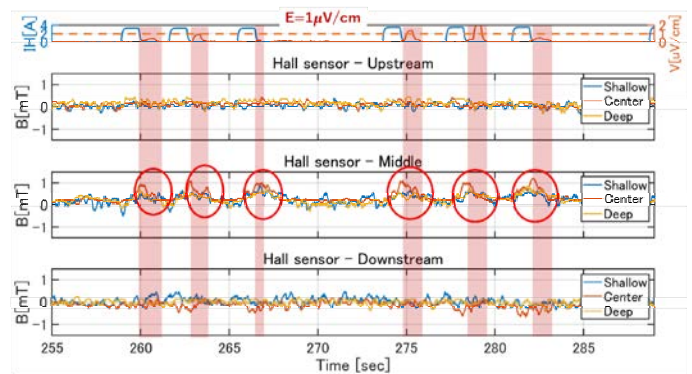


Fig.2 A generated magnetic fields detected by Hall sensors being oriented from pulsed quench initiations.

### 8. 謝辞

本研究は科学研究費補助金 基盤研究 (B) 課題番号 21H01100 (代表 榎田康博) の助成を受けて行われた。

### 参考文献

1. A. Yamamoto, et al.: IEEE. Trans. Appl. Supercond. Vol. 9 (1999) p.852
2. A. Lee, et al.: Cryogenics, Vol. 32 (1992) p.863.

## JT-60SA 超電導コイルの第二回運転結果

### Second operation result of JT-60SA superconducting coil

村上 陽之、土屋 勝彦、福井 良磨、大西 祥広、河野 勝己、薄井 勝富、  
柏 好敏、井口 将秀、佐藤 稔、本田 敦、市毛 尚志、濱田 一弥(量研)

MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, FUKUI Kazuma, ONISHI Yoshihiro, KAWANO Katsumi, USUI Katsutomi,  
KASHIWA Yoshitoshi, IGUCHI Masahide, SATO Minoru, HONDA Atsushi, ICHIGE Hisashi, HAMADA Kazuya (QST)

#### 1. はじめに

欧州と日本が共同で進めているトカマク型核融合実験装置(JT-60SA)プロジェクトは、超電導コイルを含む装置の組み立て[1]が2020年3月に完了したが、2021年3月に発生した超伝導コイルの短絡事象により運転が停止していた。短絡の原因となった絶縁不良の補修および水平展開による絶縁補強を行い[2]、2023年6月より超電導コイル冷却を開始した。

第二回運転における超伝導コイルの通電は2023年8月より開始し、まず超伝導コイルのコミッショニングとして、コイル単独での通電およびプラズマ運転を模擬した全てのコイルを同時に運転する試験を実施した。全てのコミッショニング完了後は、トカマクプラズマの生成に向けた運転条件の調整を進め、2023年10月23日にJT-60SAで初めてトカマクプラズマを生成することに成功した。

本発表では、第二回の運転で得られた超電導コイルの運転結果について報告する。

#### 2. 超伝導コイルの通電試験およびプラズマ運転

JT-60SAの超電導コイルは、直列に接続され一つの電源で励磁される18個のトロイダル磁場(TF)コイルと、プラズマの位置・形状制御を行うため個別の電源で励磁される4個のセンターソレノイド(CS)モジュールと6個の平衡磁場(EF)コイルで構成される。

第二回コミッショニングでは、TFコイルは25.7 kA、CSおよびEFコイルは3 kA、±1kVの運転条件を目標に機器の調整を進めた。コミッショニングは、単独のコイル通電から開始し、最終的にはプラズマ運転を模擬した全コイルの同時運転を実施した。コミッショニングの項目を以下に示す。

- TFコイルの通電試験：1→3→5→10→15→20→25.7A
- TFコイルの長時間通電試験：
  - 7.7 kA-30 min→12.8 kA-60 min→18.0 kA-90 min
  - 23.4 kA-120 min→25.7 kA-10 hours
- CS,EFコイルの単独通電試験：1 kA→3 kA
- CS,EFコイルの複合通電：4コイル→6コイル→全コイル
- TF+CS, EFコイルの複合通電(プラズマ運転模擬)

JT-60SAの超伝導コイルは、ACロスや接続抵抗による発熱などに大きな問題はなく、目標とした今回の運転範囲では全ての通電条件で安定に運転できることが確認できた。

10月23日に初プラズマの生成に成功し、引き続きプラズマ電流の上昇やプラズマ形状の制御を目的にプラズマ運転を継続している。

#### 3. JT-60SA 実機 EF コイルのクエンチ検出器の調整

EFコイルのクエンチ検出はピックアップコイルを用いて誘導電圧を除去し、クエンチによって発生する抵抗性の電圧を検出する(図1)。前回の通電試験では、可変抵抗器の容量が大きく(0-100 kΩ)微調整が困難であった。そこで容量の小さな可変抵抗器(0-1 kΩ)を追加し微調を容易に行える改造を行い、さらに抵抗値を遠隔で調整できる機能を追加したことで効率よくバランス調整することができた。クエンチ判定のしきい値である1.0Vに対し十分低い電圧でインダクタンス成分を除去できている(図2)。

一方で、フィルタ回路のキャパシタが影響し、電圧変化時(電流立ち上げや電流立下げ時)にノイズが生じることが確認された。これは図3に示す通り、印加電圧(電圧変化率)が大きいほど顕著に生じている。EFコイル本体とピックアップコイルのインダクタンスは最大±10%程度異なり、誘導電圧の差分は可変抵抗によって調整できている。一方で分圧抵抗は同一の素子(50MΩ)を用いていることから、キャパシタの充電時定数が異なり、電圧変化時のノイズの発生要因となっている。なお、スパイク状に電圧が立ち上がった後は、0付近に漸近しておりインダクタンス成分の除去は出来ていると考えられる。

今後は充電時定数の調整用に可変のキャパシタを追加することを計画している。現状は通電電流を定格の20kAに対して3kAと制限していることから、クエンチ検出判定のしきい値を大きくすることで誤検知が生じないように運転を行っている。

#### 参考文献

- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.65
- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.103

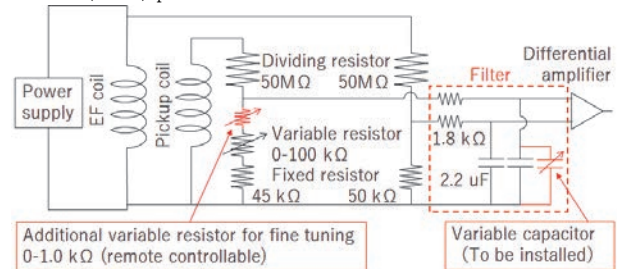


Fig. 1 Quench detector for EF coils

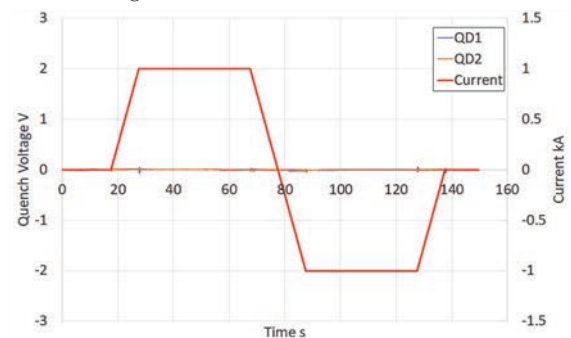


Fig. 2 Quench voltage (Ramp rate 0.1kA/s)

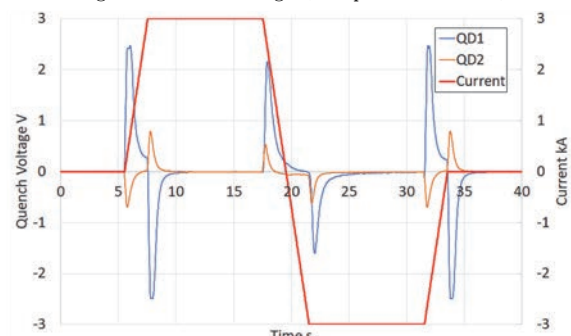


Fig. 3 Quench voltage (Ramp rate 1.5kA/s)



# ITER TF コイル製作の完遂

## Completion of ITER TF coil manufacturing

辺見 努(量研機構)

HEMMI Tsutomu (QST)

E-mail: hemmi.tsutomu@qst.go.jp

### 1. はじめに

核融合実験炉 ITER には、プラズマを閉じ込めるための磁場を発生させるため、18機のトロイダル磁場(TF)コイルが組み込まれる。Fig.1 に示すように、ITER TF コイルは高さ 16.5 m × 幅 9.2 m、重量 310 トンの D 型 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導マグネットである。68 kA の電流を通電することにより、大半径 6.2 m の位置に 5.3 T の磁場を発生させてプラズマを閉じ込めるが、TFコイル内の最大磁場は 11.8 T になる。600 MN の巨大な電磁力に耐えるため、巻線部は肉厚の構造物と一体化される。

### 2. TF コイルの製作

中国、欧州、日本、韓国、ロシア、米国で製作された超伝導導体は、TF コイルの製作を担当する日本と欧州に輸送される。導体は D 型に巻線され、Nb<sub>3</sub>Sn を生成するための 650℃、3 週間の熱処理が行われる。並行して、熱処理した導体の形状に一致するようにラジアルプレート(RP)の製作が行われる。絶縁した導体を RP に挿入し、ダブルパンケーキ(DP)の周りをさらに絶縁して耐放射線性樹脂で真空含浸する。完成した DP は 7 枚積層されて、さらに対地絶縁を施工し、含浸して巻線部が完成する。構造物については、日本が全数を製作し、日本と欧州のコイルメーカに送り、巻線部と一体化される。一体化の手順としては、構造物に巻線部を挿入し、封止溶接を行って、巻線部と構造物の間を樹脂で埋める。最後に公差が厳しいインターフェース部を最終機械加工して TF コイルの完成となる。

### 3. TF コイルの技術課題

TF コイル製作において、1) RP 製作及び巻線・熱処理技術、2) 耐放射線性樹脂を用いた電気絶縁技術、3) 厚肉構造物の高精度溶接技術、4) 良好なプラズマ閉じ込めのための電流中心(CCL)管理技術などの技術課題に対して、技術開発や実機大の試作試験により問題を解決し、実機 TF コイルの製作を進めた。

これらの主要な技術課題の中で、CCL 管理技術は特に困難な技術課題とされた。TF コイルは非常に巨大であるにもかかわらず、最も厳しいインボード部では、CCL が直径 2.6 mm の円筒内に入る必要がある。このため、各製作ステップで CCL 位置をレーザトラックで計測し、位置調整をしながら慎重に製作を進めた。構造物内に巻線部を挿入した後も構造物の空けた穴から CCL を計測したり、封止溶接後に構造物内にある巻線部をジャッキボルトで押して CCL 位置を調整したりすることで、Fig.2 に示すように全ての TF コイルで厳しい要求を満足することを確認した。

### 4. まとめ

2007 年に Nb<sub>3</sub>Sn 素線の製作を開始してから、約 15 年の長い年月を経て、2023 年 7 月に日本が製作する全 9 機の TF コイル製作を完了した。欧州も 2023 年 9 月に最後の TF コイル(TF18)の製作を完了しており、予備を含めた全 19 機の ITER TF コイルの製作が完了している。これらの成果は、高い技術力と徹底した品質管理体制に加えて、関係者の核融合に対する情熱とやり遂げるといふ強い意志で、数々の困難を乗り越え、無理とも言えられた厳しい要求を達成して、TF コイルの製作を完遂したものである。

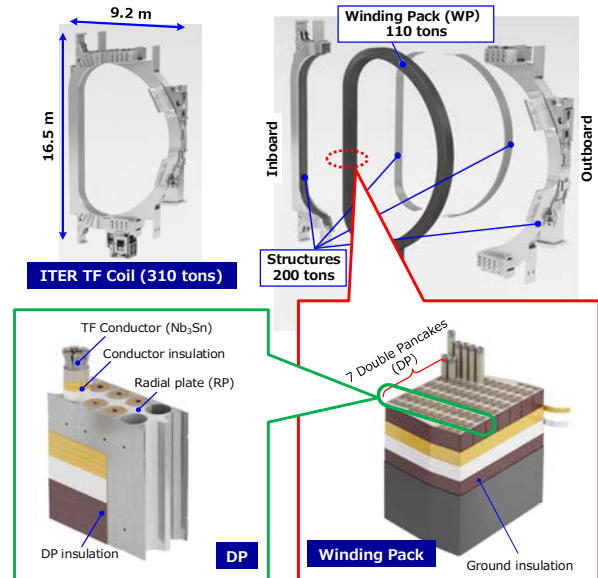


Fig.1 ITER TF coil

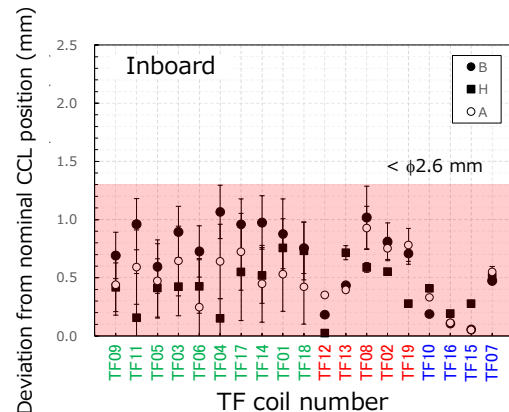


Fig.2 Deviation from nominal CCL position in TF coils.

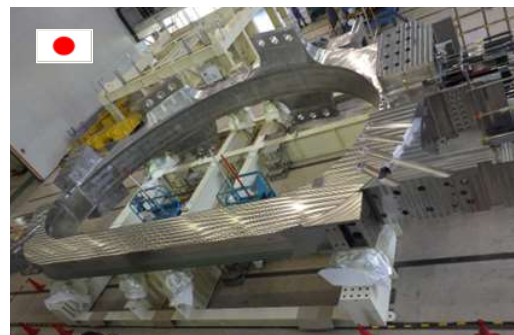


Fig.3 Final TF coil (TF19) manufactured in Japan.

### 参考文献

1. N. Koizumi, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.) Vol. 55 No. 5 (2020) p.315
2. M. Nakahira, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.) Vol. 55 No. 6 (2020) p.381

# ナノコンポジット REBCO 高温超伝導薄膜におけるエピタキシャル歪と ピン止め特性の解析

## Analysis of epitaxial strain and pinning properties in nanocomposite REBCO high-temperature superconducting thin films

松本 要 (九工大); 堀出 朋哉 (名大、九工大); 一瀬 中 (電中研)

MATSUMOTO Kaname (Kyutech); HORIDE Tomoya (Nagoya Univ., Kyutech); ICHINOSE Ataru (CRIEPI)

E-mail: matsu@post.matsc.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO コーテッドコンダクターの開発が進んでおり、動作温度が 20 K や 65 K 近傍における機器応用を目指した超伝導通電特性向上が望まれている。この目的のためには REBCO 薄膜中への人工ピン止め中心 (APC) の適切な導入が有効であり、より高濃度の APC の導入によってピン止め点の密度を増やすことが必要である。例えば NbTi 金属系線材の主要なピン止め中心は  $\alpha$ -Ti 常伝導析出物であり、その体積分率の上限は 25-30% ほどである。<sup>1)</sup> しかしながら、REBCO 薄膜における APC の体積分率の上限はこれよりもはるかに低い。もし REBCO 薄膜において  $\alpha$ -Ti の体積分率と同レベルまで APC 導入が可能となるならば、現在よりも数倍高い臨界電流密度  $J_c$  性能が得られると期待される。現時点では REBCO 薄膜中の APC 濃度の上限が 5~10% 程度であることは実験的にわかっている。<sup>2), 3)</sup> ここでは、この課題を「APC 体積分率の上限問題」と呼ぶことにする。原因としては APC 導入に伴うエピタキシャル歪、種々の格子欠陥の形成、界面における酸素欠損量の増大、および複雑構造に起因した超伝導電流パスの減少、等々が考えられる。例えば、APC 導入に伴うエピタキシャル歪は酸素欠損形成エネルギーの低下を招き、APC 近傍での臨界温度  $T_c$  の低下を引き起こす。<sup>4), 5)</sup> また、積層欠陥や点欠陥、界面転位等も母材中に導入されるため、APC と REBCO 界面の超伝導秩序パラメータの変化が緩慢になり、要素的ピン止め力の低下が生じる可能性もある。このような複雑・不均一構造の条件下で、応用に最適な APC 構造を見出すことは大変難しい。そこで本研究では、まず、APC 濃度の上限近傍における REBCO 薄膜の微細組織とエピタキシャル歪が及ぼす超伝導性能劣化について調べ、APC 体積分率の上限問題を解決するための糸口を得ることを目指す。

### 2. 実験方法および解析法

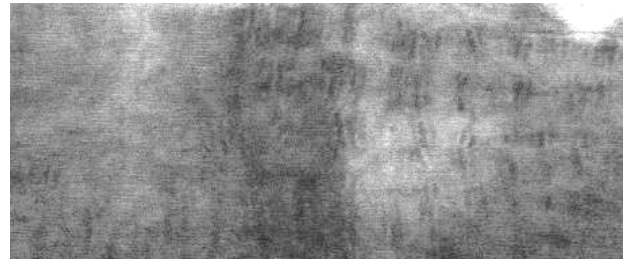
本研究では、PLD 法により BHO ナノロッド APC を導入した GdBCO 薄膜を IBAD-CeO<sub>2</sub> 基板上に作製した。ターゲットは 4.0、4.5、5.0、5.5 wt% BHO 添加 GdBCO を使用した。PLD 条件は成膜温度 760-840°C、酸素分圧 300 mTorr、基板間距離は 60 mm、レーザー周波数は 10、100 Hz、レーザーエネルギーは 300 mJ/pulse であった。作製した試料は XRD による構造解析、PPMS による  $J_c$ 、 $T_c$  等の超伝導特性評価、TEM、STEM による微細組織観察を行った。薄膜中のエピタキシャル歪に関しては、GPA (Geometrical Phase Analysis) 解析や、マイクロメカニクス理論に基づく独自モデルによって調べた。また、TDGL (時間依存 Ginzburg-Landau) シミュレーションを用いて複雑な APC 界面における要素的ピン止め力に関する評価も併せて行った。

### 3. 結果と考察

レーザー周波数 10 Hz で成膜された試料においては BHO が低濃度側濃度では、 $c$  軸に平行なナノロッドの成長が観察されたが、より高濃度側ではナノロッド構造が崩れ、基板面に水平方向の層状構造が現れることが TEM 観察により確認さ

れた。(Fig.1 参照) 元素マッピングによれば、これらは BHO 添加物であることが確認された。このとき  $T_c$  の低下と共に  $J_c$  特性の劣化も観測された。観察されたナノロッドから層状への構造転移は、BHO 添加に伴う歪エネルギーの増大を緩和するために生じると考えられる。ナノロッド構造の崩壊は  $c$  軸方向の  $J_c$  特性の劣化を引き起こすであろう。一方、レーザー周波数 100 Hz によって作製された試料では、比較的ナノロッド構造は保たれるが、BHO 高濃度側では層状化の傾向がみられ、 $J_c$ 、 $T_c$  等の劣化も観測された。以上より、微細組織形成においては、歪エネルギーの緩和と動力学的な競合が起こっていることが示唆される。詳細については当日報告する。

(a)



(b)

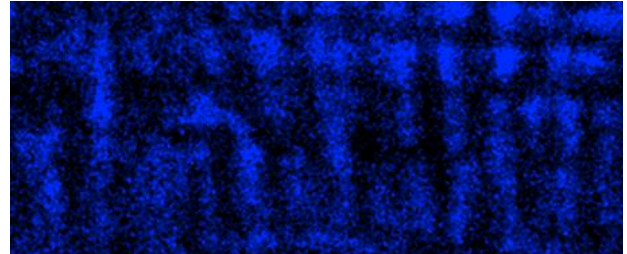


Fig.1 Cross-sectional TEM photograph of a BHO-introduced REBCO thin film fabricated at a laser frequency of 10 Hz. (a) TEM cross-sectional photograph, (b) Hf element mapping by EDX.

### 参考文献

1. P. J. Lee, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* 21 (1999): 75-87.
2. P. Mele, K. Matsumoto, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, S. Horii, R. Kita, *Superconductor Science and Technology* 21.12 (2008): 125017.
3. K. Matsumoto, M. Nishihara, T. Kimoto, T. Horide, A. K. Jha, Y. Yoshida, S. Awaji, A. Ichinose, *Superconductor Science and Technology*, 30.10 (2017), 104006.
4. C. Cantoni, G. Yanfei, S. H. Wee, E. Specht, J. Gazquez, J. Meng, S. Pennycook, A. Goyal, *Acs Nano* 5.6 (2011): 4783-4789.
5. T. Horide, F. Kametani, S. Yoshioka, T. Kitamura, K. Matsumoto, *ACS nano* 11.2 (2017): 1780-1788.

# FF-MOD 法 RE123 薄膜における積層欠陥導入による臨界電流特性改善の試み Attempts to improve critical current characteristics by introduction of stacking faults in RE123 thin films prepared by FF-MOD method

大崎 瑛介, 元木 貴則, 堀口 佳吾, 下山 淳一(青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一(住友電工)  
OSAKI Eisuke, MOTOKI Takanori, HORIGUCHI Keigo, SHIMOYAMA Jun-ichi(Aoyama-Gakuin Univ.);  
YOSHIHARA Tatsuhiko, HONDA Genki, KOBAYASHI Shinichi(Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

## 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123, RE: 希土類元素)は、90 K 超える高い臨界温度を持ち、磁場中でも高い臨界電流密度  $J_c$  を示すことから、超伝導線材として広く応用されている。RE123 薄膜作製法の中でもフッ素フリー有機金属塗布熱分解(FF-MOD)法は、均質で平坦な表面を有する薄膜が常圧下の短時間焼成で得られるため高い量産性が期待できる手法である。しかし、他の手法に比べて RE123 層の結晶性が高く、内因的なピンニングセンターが少ないことから、磁場下での  $J_c$  が低いことが課題となっている。我々のこれまでの研究により FF-MOD 法 Y123 薄膜を含水蒸気酸素雰囲気中、500°C 以下の低温で後熱処理することにより、RE123 の類縁物質である RE<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15.5</sub> (RE247) や REBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> (RE124) に見られる Cu-O 二重鎖に類似した構造の積層欠陥が生成し[1]、その濃度や分布を制御することで低磁場下での  $J_c$  が著しく向上することを見出した。一方、Y123 薄膜に対し、銀コート後のアニールが積層欠陥導入に有効であることもわかってきている。以上の背景のもと、本研究では FF-MOD 法 RE123 薄膜における積層欠陥導入による臨界電流特性の改善を目的とし、単結晶 SrTiO<sub>3</sub> 上に製膜した Y123 薄膜および住友電工社製 FF-MOD 法 Gd123 線材に対して、室温で超伝導層表面にスパッタリングにより Ag 層を形成した後、後熱処理を行い積層欠陥の導入を試みた。

## 2. 実験方法

以下に住友電工社製 Gd123 線材を用いた研究の方法を記す。アンモニア水と過酸化水素水を用いて Ag 保護層を除去した後、Ag スパッタを 0–40 s 行い、厚さ 0–20 nm の Ag 層を Gd123 層の表面に形成した後、 $P_{O_2} = 1$  kPa, 400°C で 1–12 h 後熱処理し、酸素アニールを行った。得られた試料について、XRD 測定により構成相を、SQUID 磁束計による磁化測定から超伝導特性を評価した。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 に Ag スパッタ時間を 10, 40 s とし、 $P_{O_2} = 1$  kPa, 400°C, 1 h もしくは 12 h で後熱処理した試料の XRD パターンを示す。Ag 層の厚膜化や後熱処理時間の延長に伴い、Gd123 の 00l ピークがブロードになったことから、Ag 層の厚さと後熱処理時間が積層欠陥濃度に影響することがわかった。Fig. 2 に銀スパッタを 40 s 行い、後熱処理した試料の  $J_c$  の磁場依存性を示す。後熱処理時間の延長に伴い  $J_c$  が低下した。これは、積層欠陥が過剰に生成し、ピンニングへの寄与よりも超伝導特性の劣化を招いたためと考えられる。Fig. 3 に Ag スパッタを 10 s 行い、後熱処理した試料の  $J_c$  の磁場依存性を示す。後熱処理時間の延長に伴い  $J_c$  が向上したことより、Ag 層の厚さを適切に制御することで、ピンニング力向上に有効な濃度の積層欠陥が導入できることが明らかになった。Ag 層の厚さや後熱処理条件の最適化によるさらなる  $J_c$  の向上が十分に期待できる。よって、本方法は FF-MOD 法線材に対する簡便かつ効果的

な  $J_c$  改善手法になりうると考えられる。当日は、自作 Y123 薄膜の臨界電流特性に対する Ag 被覆、後熱処理の効果や断面微細組織についても報告する。

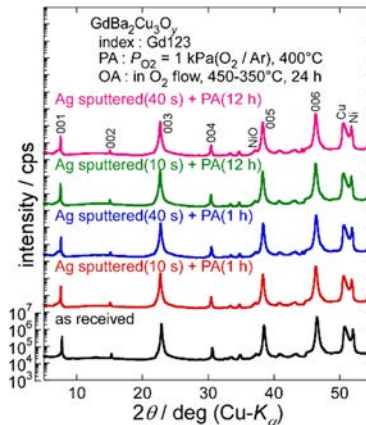


Fig. 1. XRD patterns of Ag-sputtered Gd123 tapes post-annealed at 400°C for 1 or 12 hours under  $P_{O_2} = 1$  kPa.

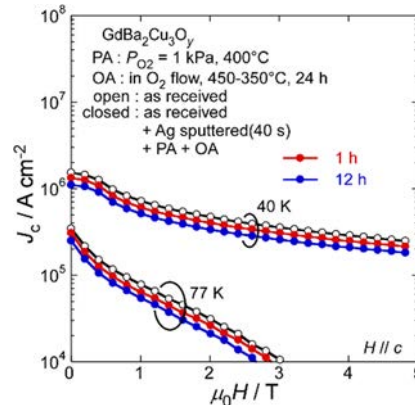


Fig. 2. Magnetic field dependence of  $J_c$  for Gd123 tapes Ag-sputtered for 40 seconds followed by post-annealing.

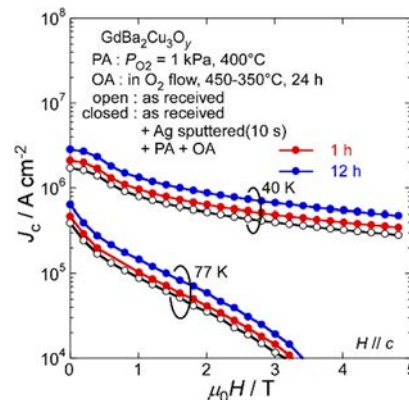


Fig. 3. Magnetic field dependence of  $J_c$  for Gd123 tapes Ag-sputtered for 10 seconds followed by post-annealing.

## 参考文献

[1] S. Gondo *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference 97* (2018) 105.

# 高濃度 BaHfO<sub>3</sub> が TFA-MOD (Y<sub>0.77</sub>Gd<sub>0.23</sub>) Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 線材の微細構造と超伝導特性に及ぼす影響

The effect of very large BaHfO<sub>3</sub> additions on the microstructure and superconducting properties for TFA-MOD (Y<sub>0.77</sub>Gd<sub>0.23</sub>) Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> CCs

青砥 慶典, 鈴木 匠(成蹊大); 三浦 正志(成蹊大, JST-FOREST)

AOTO Keisuke, SUZUKI Takumi (Seikei Univ.); MIURA Masashi (Seikei Univ., JST-FOREST)

E-mail: dm226301@cc.seikei.ac.jp

## 1. はじめに

航空機用モーターなどのマグネット応用に向けて、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(REBCO, RE:Rare Earth, Y, Gd, Sm など)超伝導線材は更なる磁場中臨界電流密度( $J_c$ )の向上が求められている。我々は、これまで Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法を用いて 超伝導相に対してインコヒーレント(粒子との界面の結晶格子が不連続)な BaHfO<sub>3</sub> (BHO)ナノ粒子を磁束ピン止め点として(Y<sub>0.77</sub>Gd<sub>0.23</sub>)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> ((Y,Gd)BCO)線材に導入することで高い磁場中  $J_c$  特性を得ることに成功してきた[1,2]。特に、BHO 添加量 12vol.%の (Y,Gd)BCO+BHO 線材は、高密度な BHO ナノ粒子を有するため、幅広い温度・磁場で高い磁場中  $J_c$  特性を示した。しかし、BHO 添加量が 12 vol.%より多い(Y,Gd)BCO+BHO 線材における結晶性、キャリア密度や超伝導特性などはこれまで検討されていない。

本研究では、BHO 添加量 16vol.%の (Y,Gd)BCO+BHO (+16BHO)線材を作製し、更なる BHO 添加量が、結晶性、キャリア密度、微細構造や超伝導特性に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験方法

TFA-MOD 法を用いて金属基板上に(Y,Gd)BCO+16BHO 線材を作製し、微細構造及び超伝導特性の評価を行った。微細構造を透過型電子顕微鏡(TEM)、結晶性はX線回折法、超伝導特性は四端子法を用いた通電法で評価した。

## 3. 実験結果

Fig. 1 に BHO 添加量の異なる(Y,Gd)BCO+BHO 線材における面内配向性( $\Delta\phi$ )、臨界温度( $T_c$ )及び自己磁場  $J_c$ ( $J_c^{s.f.}$ , 65 K)を示す。+16BHO 線材は、他の線材に比べて  $\Delta\phi$ ,  $T_c$ ,  $J_c^{s.f.}$ がいずれも低下していることが分かる。Fig. 2 に BHO 添加量の異なる (Y,Gd)BCO+BHO 線材の  $J_c$ の磁場依存性(65 K,  $H\parallel c$ )を示す。+16BHO 線材は、+12BHO 線材に比べて低い磁場中  $J_c$  特性を示すことが分かった。透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて、+16BHO 線材の微細構造の解析を行った結果、+12BHO 線材に比べて、BHO ナノ粒子のサイズが異なり、密度も低下していることが分かった。

当日は、詳細な実験結果をもとに高 BHO 添加量が諸特性に及ぼす影響について報告する。

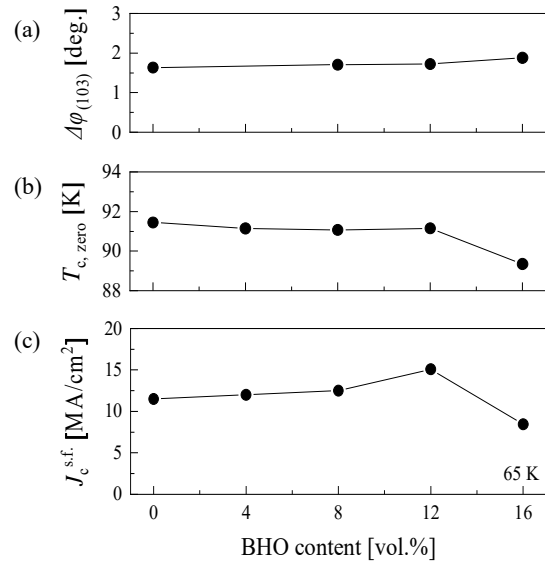


Fig.1 (a)  $\Delta\phi$ , (b)  $T_c$ , (d)  $J_c^{s.f.}$  (at 65 K) as a function of vol.% of BHO for (Y,Gd)BCO+BHO coated conductors.

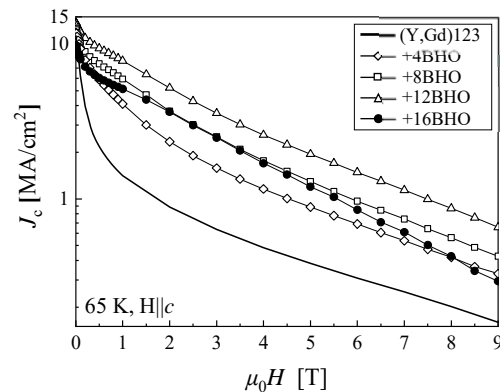


Fig.2 Magnetic field dependence of  $J_c$  at 65 K and  $H\parallel c$  for (Y,Gd)BCO+BHO coated conductors.

## 謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202G の支援を受けたものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 (23H01453)の助成を受け実施したものである。

## 参考文献

- [1] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **9** (2017) e447.
- [2] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.

# IBAD-PLD 法による長尺 REBCO 線材の臨界電流に関する考察

## Consideration on critical currents of long REBCO coated conductors obtained by the IBAD-PLD method

木須 隆暢, 吳澤宇, 田中 佑斗, 陳 嘉磊, 東川 甲平 (九大)

KISS Takanobu, WU Zeyu, TANAKA Yuto, CHEN Jiale, HIGASHIKAW Kohei (Kyushu Univ.);  
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導線材の臨界電流は、材料の実用性能として最も重要な特性であり、温度、磁界で複雑に変化する特性の把握が求められる。この観点からは、磁束ピン止め特性に基づく量子化磁束挙動に関する考察が重要な位置付けを成す。また、長尺線材の実用環境における臨界電流  $I_c$  の空間的、統計的なバラツキが応用機器の信頼性、可設計性を左右する重要な因子である事が近年認識されつつある。しかしながら後者については、定量的な議論はもとより、その為の評価解析法すら十分に確立できていないのが現状である。我々は、先行研究によって、極低温・垂直磁場下の  $I_c$  を連続に評価し、臨界電流密度  $J_c$  の温度・磁場依存性は場所によらず良い均一性を有する一方、マクロな欠陥による等価断面積の変化の帰結として  $I_c$  のバラツキが生じる事を示した。本研究では、これらの知見を元に、より広い磁界範囲におけるリフトファクタの決定、測定条件による  $I_c$  のバラツキへの影響等について、さらなる実験と考察を行った。

### 2. 臨界電流密度の空間変化と温度、磁場依存性

IBAD-PLD 法による REBCO 線材に対して、リール式磁気顕微鏡による測定を液体窒素中の磁場下 (0.02~0.10 T) の測定に加え、液体ヘリウム中、磁場下 (0.20~1.00 T) の測定にも展開し、 $I_c$  の長手位置(x)の変化を 4 m 長にわたって空間分解能 1 mm で連続に計測した。各測定条件における空間平均値によって  $I_c(x)$  を規格化したところ、Fig. 1 に示すように、温度、磁場によらずほぼ同様の变化を示した。さらに、同じ試料から 1 cm 長の短尺試料を切り出し、磁気顕微鏡を用いて試料面内の磁化電流分布を、より高磁場領域を含み、かつ高分解能 ( $\Delta x=200 \mu\text{m}$ ,  $\Delta y=10 \mu\text{m}$ ) で計測した。77 K, 0.07 T と 5.0 K, 4 T の結果を比較したものを Fig. 2 に示す。短尺試料においても空間変化はやはり温度磁場によらずほぼ同様の特性を示すことが分かる。

### 3. リフトファクタの導出

前項の結果より、本線材の  $I_c$  の温度、磁界依存性は試料内の空間位置によらずほぼ同一であると結論できる。したがって、実用上重要となるリフトファクタも短尺試料を用いて導出したものが長尺試料に対しても適用可能である。長尺線材の磁場下の連続  $I_c$  測定と、短尺試料における面内測定によりリフトファクタを導出した結果を Fig. 3 に示す。両者の結果は定量的に非常に良い一致を示した。以上の結果は、低温高磁場下の長尺線材の  $I_c$  を 77 K の測定結果をもとに推定することに対して実験的根拠を与えるだけでなく、リフトファクタの具体的な測定法としても重要な知見を与えるものであり、実用上も大きな意義を有する。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP19H05617 の助成を受けたものである。

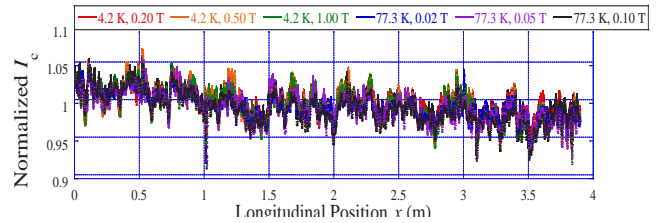


Fig. 1 Longitudinal  $I_c$  variations in 4 m long REBCO tape, which are normalized by the average value at each condition: 4.2 K, 0.20 to 1.00 T and 77 K, 0.02 to 0.10 T, respectively.

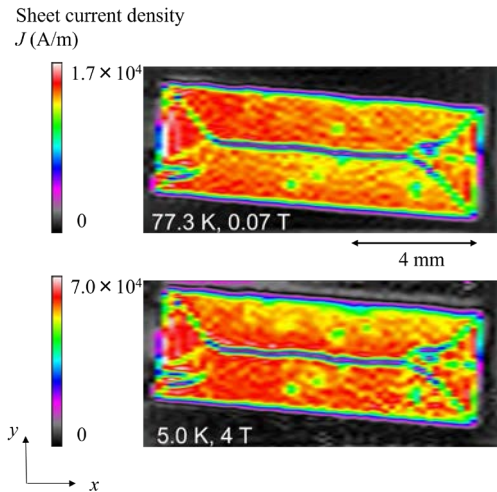


Fig. 2 In-plane magnetization current density obtained in a short piece sample at 77 K, 0.07 T and 5.0 K, 4 T, respectively.

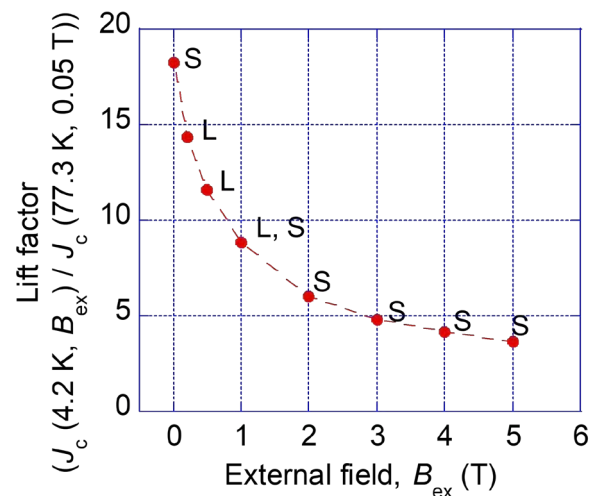


Fig. 3 Lift factor determined by long sample (L) and short sample (S).

## Reel-to-Reel 式本焼成炉を用いたYGdBCO 線材の作製 (II) BaZrO<sub>3</sub> ナノ粒子導入した長尺線材の磁場特性向上

Development of TFA-MOD YGdBCO+BZO CCs by using a reel-to-reel system furnace

佐藤 迪夫, 高橋 保夫, 青木 裕治, 足立 和久 (SWCC); 中岡 晃一, 和泉 輝郎 (AIST)  
SATO Michio, TAKAHASHI Yasuo, AOKI Yuji, ADACHI Kazuhisa (SWCC);  
NAKAOKA Koichi, IZUMI Teruo (AIST)  
E-mail: m.sato468@swcc-g.com

### 1. はじめに

近年、温室効果ガスである CO<sub>2</sub> の排出抑制が世界的に求められている。航空機業界では国際航空運送協会 International Air Transportation Association (IATA) が、2050 年までに CO<sub>2</sub> 排出量を 0% に削減することを表明している。この CO<sub>2</sub> 削減目標値の達成に向け、バイオ燃料 (SAF) への転換などの新技術開発が重要である。その中でも超電導技術を用いた電動推進システム [1] は、鉄心が不要となるため従来の電動機に比べて軽量かつ高効率になることが期待されている。

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO) 線材は、液体窒素温度下で超電導状態を示し、磁場中における臨界電流 ( $I_c$ ) が高い。そのため、軽量かつ高効率な推進システムが求められる航空機への利用が期待できる。我々は、超電導線材作製方法の一つである Trifluoroacetates Metal Organic Dposition (TFA-MOD) 法を選択して開発を行っている。

REBCO 線材の実用化に向けて磁場中における高  $I_c$  化が必要である。磁場中  $I_c$  の向上方法として、3次元形状の磁束ピンニング点 BaMO<sub>3</sub> (BMO: M = Zr, Hf) の導入が報告されている [1]。また、BMO ナノ粒子密度を増加させることで磁場中  $I_c$  が向上することが確認されている [2]。更に、REBCO 相の結晶化温度より低い温度で熱処理 (この熱処理を中間熱処理と呼ぶ) をすることで BMO ナノ粒子を微細化させて磁場中  $I_c$  を向上させることが報告されている [3]。

当社では Reel-to-Reel (RTR) 焼成炉を用いて BZO ナノ粒子導入線材の開発を行ってきた [4]。本報告では、RTR 焼成炉を用いた BZO ナノ粒子導入 REBCO 線材の開発状況について報告する。

### 2. 長尺線材の作製方法

面内配向した CeO<sub>2</sub> 中間層付き金属基板上に BZO ナノ粒子導入 Y<sub>0.77</sub>Gd<sub>0.23</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YGdBCO) 膜を TFA-MOD 法で作製した。原料溶液には、Y-プロピオン酸、Gd-プロピオン酸、Ba-トリフルオロ酢酸、Cu-オクチル酸、Zr-オクチル酸を 0.77 : 0.23 : 0.16 : 3.00 : 0.10 化学量論比の溶液を用いた。マルチターン焼成炉を用いてディップコート法により、連続的に塗布、仮焼成を行い、仮焼膜を作製した。塗布・仮焼は、所定の膜厚になるまで繰り返した。作製した仮焼膜は、RTR 焼成炉にて中間熱処理及び本焼成を行い、超電導の結晶化を行った。超電導層の形成後、安定化層として DC スパッタリング法により Ag 層で被覆した後、酸素雰囲気中でアニール処理を行い YGdBCO + BZO 線材を作製した。

線材の  $I_c$  特性は直流四端子法により評価を行った。 $I_c$  は、1  $\mu$ V/cm の電界基準で規定した。長尺線材の長手方向における  $I_c$  分布の評価は、THEVA GmbH 社製、超電導線材特性評価装置 (Tapestar™) を用いた磁化法により液体窒素中 (77 K) で行った。

### 3. 長尺線材の作製結果

図 1 に RTR 焼成炉で作製した 115m 長の YGdBCO + BZO 線材の評価結果を示す。線材長手方向に大きな  $I_c$  劣

化は無く、均一な  $I_c$  分布が得られている。平均  $I_c$  は 412.9 A であることが確認された。

図 2 に RTR 焼成炉で作製した YGdBCO + BZO 線材の 70 K, 2.5 T の  $I_c$  の磁場印加角度依存性 ( $I_c$ - $B$ - $\theta$ ) を示す。 $I_{c,min}/I_{c,max} = 0.88$  と当方的な  $I_c$ - $B$ - $\theta$  特性であることが確認された。

発表では、更なる磁場中  $I_c$  の向上に向けて BZO ナノ粒子の添加量を増加させた YGdBCO + BZO 線材の磁場中特性について報告する。

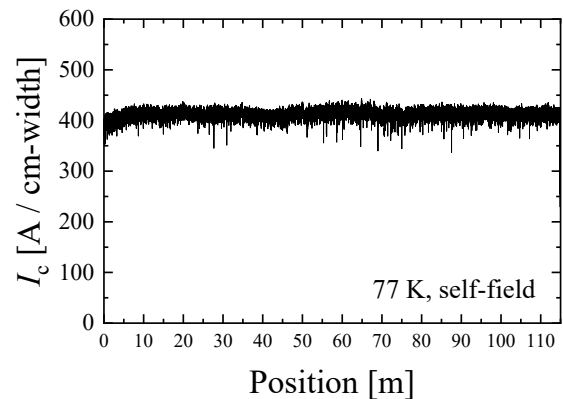


Fig.1 Self-field  $I_c$  distribution of 115 m - YGdBCO + BZO coated conductor [5].

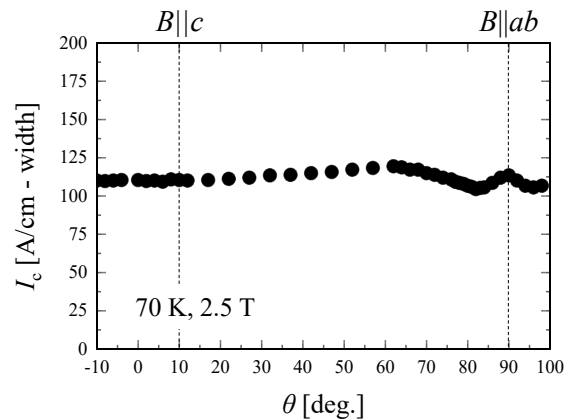


Fig.2  $I_c$ - $B$ - $\theta$  property in YGdBCO + BZO coated conductor at 77 K, 2.5 T [5].

### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP15005) の結果得られたものです。

### 参考文献

1. H. Sasa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 31 (2021)
2. M. Miura, et al.: NPG Asia Mater. Vol. 9 (2017)
3. K. Nakaoka, et al.: J. Phys.: Conf. ser. Vol. 1293 (2019)
4. M. Sato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 20
5. M. Sato, et al.: submitted to Proceeding of EUCAS 2023

# Reel to Reel 式 TFA-MOD 法( $Y_{0.77}Gd_{0.23}$ ) $Ba_2Cu_3O_y+BaZrO_3$ 線材の高 $J_c$ 化 Enhancement of $J_c$ for Reel-to-Reel TFA-MOD ( $Y_{0.77}Gd_{0.23}$ ) $Ba_2Cu_3O_y+BaZrO_3$ CCs

齋藤 隼輝, 青砥 慶典, 鈴木 匠(成蹊大); 佐藤 迪夫, 青木 裕治(SWCC); 三浦 正志(成蹊大, JST-FOREST)

SAITO Shunki, AOTO Keisuke, SUZUKI Takumi (Seikei Univ.); SATO Michio, AOKI Yuji (SWCC);

MIURA Masashi (Seikei Univ., JST-FOREST)

E-mail: us203052@cc.seikei.ac.jp

## 1. はじめに

近年、高い臨界電流密度( $J_c$ )を有する  $REBa_2Cu_3O_y$  (REBCO)を用いた航空機用全超伝導電動機が注目されている[1]。この全超伝導電動機に向けて、REBCO 線材の磁場中  $J_c$  の向上や長尺化が求められている。特に、磁場中  $J_c$  特性を向上させる手段の一つとして、磁束ピン止め点の導入がある。これまで我々は、Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition (TFA-MOD) 法 ( $Y_{0.77}Gd_{0.23}$ ) $Ba_2Cu_3O_y$ ( $(Y,Gd)BCO$ ) 線材に  $BaMO_3$  ( $M = Sn, Zr, Hf$ )ナノ粒子を導入することで磁場中  $J_c$  を向上させてきた[2,3]。更に、磁束ピン止め点導入に加えて、酸素アニール温度制御により  $CuO_2$  面における  $Cu$  あたりのホール濃度( $p$ )を増加させオーバードープにすることで更なる磁場中  $J_c$  特性向上を達成してきた[3]。

本研究では、SWCC 社の Reel to Reel 式電気炉で仮焼成した 8vol.% $BaZrO_3$  添加( $Y,Gd$ )BCO ( $(Y,Gd)BCO+8BZO$ )線材の高特性化に向けて、成蹊大学にて作製条件(中間熱処理・本焼成)および酸素アニール条件を検討した。

## 2. 実験方法

SWCC 社で作製された ( $Y,Gd$ )BCO+8BZO 長尺仮焼線材を、成蹊大学にて中間熱処理及び本焼成プロセスの最適化を行った。その後、ホール濃度  $p$  の制御を目的に酸素アニール条件の最適化を行った。作製した( $Y,Gd$ )BCO+8BZO 線材の結晶性は X 線回折法、超伝導特性は四端子法で評価した。

## 3. 実験結果

Table 1 に酸素アニール温度の異なる( $Y,Gd$ )BCO+8BZO 線材の諸特性を示す。 $T_c$  は  $p = 0.16$  のときに 91.3 K と最も高くなった。一方、77 K における自己磁場  $J_c(J_c^{s.f.})$  は、 $p$  の値が増加するにつれて高くなっており、 $p = 0.17$  で最も高い  $J_c^{s.f.}$  を得た。Fig. 1 に異なるホール濃度  $p$  を有する( $Y,Gd$ )BCO+8BZO 線材の 3 T,  $H||c$  における  $J_c$  の温度依存性を示す。オーバードープ( $p = 0.17$ )の線材がいずれの温度においても高い磁場中  $J_c$  特性を示した。Fig. 2 に最適ドープ( $p = 0.16$ )に対する各  $p$  を有する( $Y,Gd$ )BCO+8BZO 線材の  $J_c$  の比率を示す。図より最適ドープ線材に対するオーバードープ線材の  $J_c$  向上度は、各温度で異なることが分かった。これは、①各温度での量子化磁束のサイズと BZO ナノ粒子のサイズの違いや②オーバードープによる  $T_c$  低下の影響などが考えられる。

当日は、詳細な実験結果をもとに超伝導特性の違いについて報告する。

Table 1 Superconducting properties for ( $Y,Gd$ )BCO+BZO CCs with different  $p$ .

Sample	$T_A$ [°C]	$p$	$T_c^{zero}$ [K]	$J_c^{s.f.}(77 K)$ [MA/cm <sup>2</sup> ]
( $Y,Gd$ )BCO+8vol.%BZO	300	0.17	88.6	3.33
	450	0.16	91.3	3.18
	500	0.15	90.9	2.38

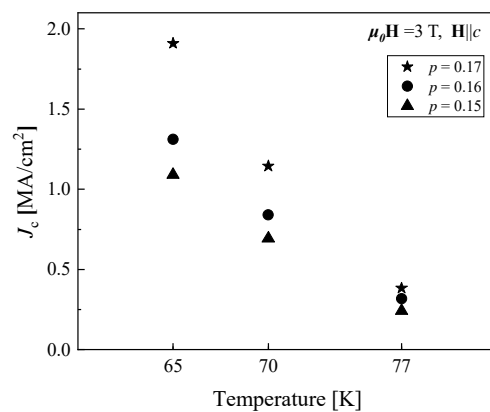


Fig.1 Temperature dependence of  $J_c(3 T||c)$  for ( $Y,Gd$ )BCO+BZO CC with various  $p$ .

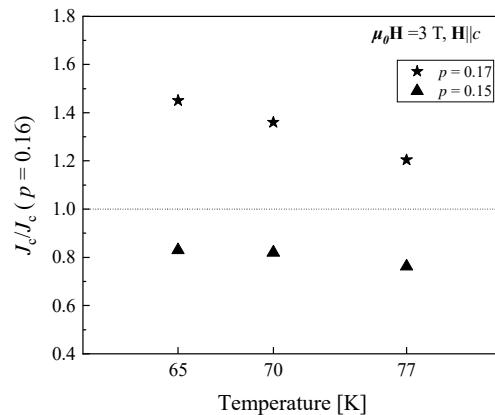


Fig.2 Temperature dependence of  $J_c / J_c (p = 0.16)$  for ( $Y,Gd$ )BCO+BZO CC.

## 謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202G の支援を受けたものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 (23H01453) の助成を受け実施したものである。

## 参考文献

- [1] T. Izumi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33** (2023) 4801304.
- [2] M. Miura *et al.*, NPG Asia Materials **9** (2017) e447.
- [3] M. Miura *et al.*, NPG Asia Materials **14** (2022) 85.

# Lモードガイド波を用いた HTS-SQUID ベースの非接触ガイド波試験技術の開発 —その1—

## Non-Contacting L mode Guided Wave Testing Technique based on HTS-SQUID magnetic sensor -No.1-

廿日出 好, 岡田 亘平, 清水 淳平 (近畿大学)  
 HATSUKADE Yoshimi, OKADA Kohei, SHIMIZU Junpei (Kindai Univ.)  
 E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

### 1. はじめに

化学プラントやコンビナートでは無数の配管があり、多くが断熱材でコートされている。そこに侵入した雨水など環境中の水分により、管表面に腐食が発生する。この腐食を検出するには、足場を作り、断熱材を一旦外して目視やガイド波試験を行う必要があり、莫大な時間とコストがかかる。

そこで、我々は、断熱材を剥がすことなく、STPG370 配管の全体検査を目的とした、磁歪式ガイド波試験技術の開発を行ってきた。これまでに C 字もしくはコの字の鉄心入り電磁石ペアを用いて配管を周方向に磁化して残留磁場を与え、そこに励振磁場を与えて T(0, 1)モードガイド波を非接触で発生させる手法を開発した[1]。しかし、この手法では与えられる残留磁場に限界があり、20 mm 程度の厚さが見込まれる保温材の上から磁化・ガイド波試験を実現することは困難であることがわかってきた。そこで、本研究では、新しい磁化・ガイド波試験方法として、円形電磁石により配管を軸方向に磁化した状態で、Lモードガイド波を主としたガイド波試験技術を開発した。

### 2. 電磁界シミュレータによる静磁場解析

まず、電磁界シミュレータ JMAG を用いて、円筒形電磁石により、STPG370 配管を、これまでに与えていた周方向残留磁場約 0.6 T よりも強い磁化を与えられるかを調べた。Fig. 1 に解析で用いたモデルを示す。初期検討として、配管のモデルは直径 34 mm、厚さ 1 mm とし、測定した STPG370 の磁気特性を与えた。磁化する電磁石は内径 36 mm、外径 46 mm、幅 5 mm の短い円筒形形状 2 個とし、その外側に 100 回巻きコイルを付与した。電磁石を約 20 mm の距離で 2 個配置し、各電磁石に 0~10 A の直流電流を与え、配管磁化をシミュレートした。一例として 6 A を与えた場合の磁場分布を Fig. 1 に示す。両電磁石間の配管は全周において軸方向に約 1.7 T でおよそ均一に磁化された。同様の解析を、断熱材を考慮して配管とコアの最短距離 20 mm で行った。配管とコア間距離が 1 mm および 20 mm の場合の、電磁石間の配管の円周における磁束密度の平均値を求め、Fig. 2 に示した。距離が 1 mm の場合、およそ 6 A で STPG370 の飽和磁束密度に達しているが、距離が 20 mm でも約 8 A で同様の飽和磁束密度に達した。以上より、本手法なら 20 mm の断熱材の上から、これまでの周方向磁場より十分に大きな磁束密度を軸方向に与えられることがわかった。

### 3. 常伝導磁束トランスと HTS-SQUID を組み合わせたガイド波試験装置によるガイド波送受信実験

上記解析の磁化を実現する磁歪式ガイド波試験装置を、常温磁束トランスと HTS-SQUID を結合させた磁気計測技術により実現した。装置概略図を Fig. 3 に示す。送受信部は解析と同じ構成の電磁石をペアで配置して磁化する。送信部では磁化部に励振磁場用コイルを巻き付け、ガ

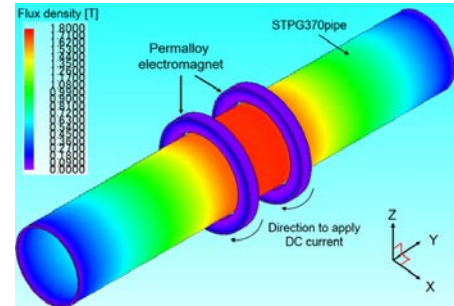


Fig.1 Analysis model and result of magnetization of STPG370 pipe using short cylindrical electromagnets.

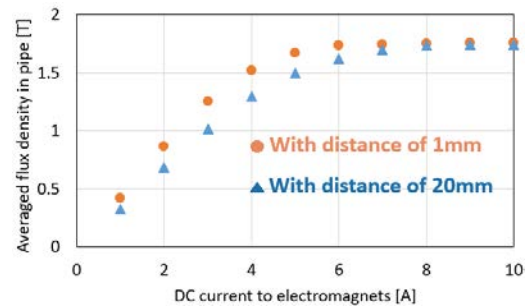


Fig.2 Analysis results of magnetization of STPG370 pipe using short cylindrical electromagnets with different distances between pipe's surface and the electromagnets.

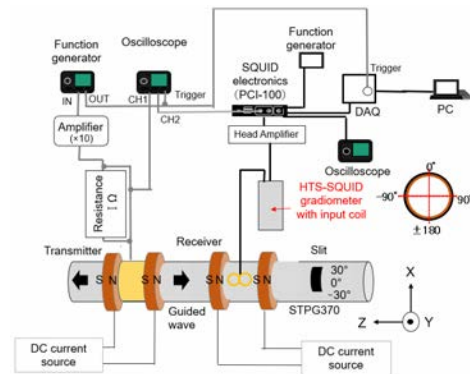


Fig.3 Schematic diagram of guided wave testing system using HTS-SQUID with flux transformer.

イド波を発生させる。受信部では逆磁歪効果により発生する磁気信号を 8 の字型誘導コイルで受信し、常温磁束トランスにより HTS-SQUID に伝達、信号を読み出す。本装置を用いて、欠陥を設けた STPG370 管に対してガイド波試験を行った。測定結果は本学会にて発表する。

### 参考文献

1. K. Watanabe, et al.: J. Phys.: Conf. Ser. 2323 (2022) 012027



# 誘電体フリー超伝導共振器の中空構造に関する研究

## Study on hollow structure of dielectric-free superconducting resonator

中城 悠翔, 小林 達哉, 田井野 徹(埼玉大); 大谷 知行, 亀井 雄斗, 伊藤 凌太(理研); 美馬 寛(NICT); 野口 卓(国立天文台)

NAKAJO Yuto, KOBAYASHI Tatsuya, TAINO Tohru (Saitama Univ.); OTANI Chiko, KAMEI Yuto, ITO Ryota (RIKEN); MIMA Satoru (NICT); NOGUCHI Takashi (NAOJ)  
E-mail: y.nakajo.610@ms.saitama-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導薄膜で構成される超伝導検出器は既存の半導体検出器と比較して、高い感度とエネルギー分解能を特徴とする。近年、力学インダクタンス検出器(KID)に代表される薄膜型超伝導共振器の研究が盛んに行われており[1]、より高い共振Q値が求められている。バルク型超伝導共振器で得られている非常に高いQ値(約 $10^{11}$ )[2]と比較すると、薄膜型超伝導共振器のQ値は5-6桁小さい。その要因として我々は、薄膜型超伝導検出器で用いられるマイクロストリップライン(MSL)やコプレーナ導波線路(CPW)では、超伝導共振器を構成する信号導体と接地導体の間に介在する誘電体部分による損失により共振Q値が制限されていると考えた。それに基づき、2枚の基板(共振器チップ、グランド(GND)チップ)を用いてMSL構造を形成し、共振器とGND間に空隙を設けることで、誘電体部分を取り除いたMSL構造誘電体フリー超伝導共振器を提案、設計、試作した。これまでの結果、従来のMSL構造と比較して、共振Q値が二桁以上向上し、誘電体部分による損失を軽減することが確認されている[3]。

本研究では誘電体フリー超伝導共振器の詳細な特性評価として、共振器とGND間の中空構造の深さと共振周波数の関係性に着目し評価を行う。中空構造の深さを変更したデバイスを複数種類作製し、液体ヘリウム(4.2 K)温度で実験を行った。

### 2. 実験内容

誘電体フリー超伝導共振器を構成する共振器チップとGNDチップにはシリコン(Si)基板を用いた。それぞれの基板にはDCマグネトロンスパッタリング装置を用いて、超伝導材料としてニオブ(Nb)を堆積し、フォトリソグラフィ技術によってデバイスを作製した。共振器チップには、MSLの芯線部分からなるフィードラインと共振器、GNDチップは深掘りエッチング装置を用いて穴構造を作った基板にGND層を形成し、これらの2枚の基板を向かい合わせて固定することで、単一の共振器として機能させている(Fig.1)。共振器チップには、10mm角の基板に共振周波数が4-7GHzの範囲で設計された6個の共振器(Peak1-6)を設置した。また、GNDチップの深掘り穴の深さは2.87  $\mu\text{m}$ 、3.88  $\mu\text{m}$ 、6.61  $\mu\text{m}$ 、7.94  $\mu\text{m}$ 、8.97  $\mu\text{m}$ 、12.34  $\mu\text{m}$ の6種類を作製した。実験時は、無酸素銅製のケースに共振器チップを貼り付け、その上部に深掘りしたGNDチップを向かい合う形で重ね合わせ、板バネで固定することで中空構造を保持している。デバイスを液体ヘリウム温度まで冷却し、共振特性の評価を行った。

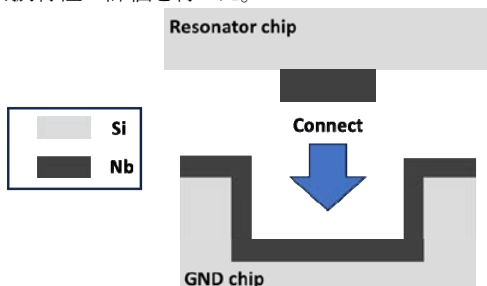


Fig.1 Structure with dielectric removed

### 3. 実験結果

作製した誘電体フリー超伝導共振器の周波数スペクトルの実験結果を Fig.2 に例示する。作製した6種類のデバイス全てでこのような共振特性が確認され、5-6個の共振ピークが得られた。また、中空深さを小さくするほど共振周波数は高周波数側にシフトすることが確認された(Fig.3)。

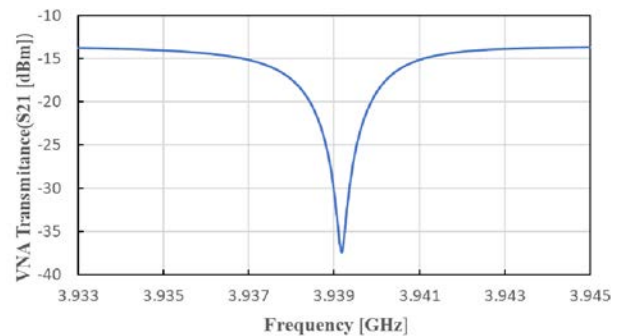


Fig.2 Example of spectral observation of a resonator.

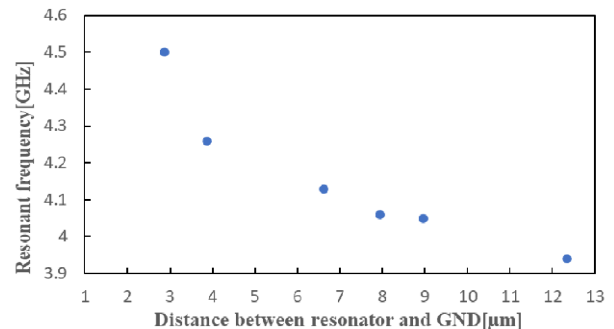


Fig.3 Resonant frequency of peak1 for each device

### 4. まとめ

中空深さと共振周波数の関係性評価のため、2枚の基板を用いて空隙を設けた構造の薄膜超伝導検出器を作製した。中空深さを変更した6種類のデバイスについて、液体ヘリウムによる極低温評価実験を行ったところ、その全てで共振特性を確認することができた。また、中空深さを小さくするほど共振周波数は高周波数側にシフトすることが確認された。

### 5. 謝辞

本研究にて使用したデバイスは、理化学研究所テラヘルツイメージング研究チームのクリーンルームを使用して作製されました。倉門雅彦氏、喜多村卓也氏にはデバイス作製に関するご指導、ご助力を頂き、感謝いたします。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 22K18991、20H01937、19H05809、21K18150の支援を受けたものです。

### 参考文献

1. P.K. Day, et al., Nature 425 2003 817-821
2. A. Romanenko, et al., Appl Phys Lett 234103 2014 105
3. 村山 亮介ほか、超高 Q 値の薄膜超伝導検出器、応用物理学会、2022

# 基板ノイズ低減に向けた STJ 検出器の Buffer 材料選定

## Buffer material selection in STJ detectors to reduce substrate noise

野口 剛志 (産総研, 埼玉大); 藤井 剛, 志岐 成友 (産総研); 田井野 徹 (埼玉大)  
 NOGUCHI Tsuyoshi (AIST, Saitama Univ.); FUJII Go, SHIKI Shigetomo (AIST); TAINO Tohru (Saitama Univ.)  
 E-mail: noguchi.t@aist.go.jp

### 1. はじめに

電気自動車や太陽光・風力発電機などの製品には Si に代表される半導体が主に用いられてきた。しかし、既存の Si 半導体では、今後見込まれる性能要求を満たすことが困難になると考えられている。そこで、Si の代替材料として、SiC などの次世代半導体が注目されている。こうした材料の開発では、元素同定などの材料分析が重要となる。既存の半導体検出器ではエネルギー分解能が不十分であり、微量軽元素の特性 X 線ピークを明確に分離することが困難である。一方で、我々の超伝導トンネル接合 (Superconducting tunnel Junction : STJ) 検出器は優れたエネルギー分解能を有しており、N-K $\alpha$  において半導体検出器ではエネルギー分解能が 70 eV に対し、STJ 検出器では 10 eV を達成している[1]。また、n 型 SiC の N ドープ (300 ppm) の XAFS 分析にも成功している[2]。

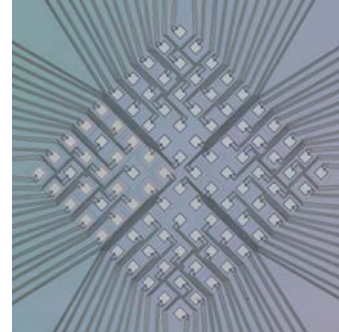


Fig.1 A photograph of 100 array STJs

### 2. 研究背景

通常、STJ 検出器は Si 基板上に直接作製される。STJ の膜厚は合計で数 100 nm と非常に薄く、入射した全ての X 線は STJ で吸収されず、一部は Si 基板に到達する場合がある。基板で吸収された X 線は、基板内で大量のフォノンを発生させる。フォノンは STJ の下部電極に伝達し、信号電荷を生成する。この信号電荷は、超伝導電極に直接吸収された低エネルギー X 線によって生成される信号電荷と同程度であり、微量軽元素の特性 X 線とフォノンによる信号との分離は出来ておらず、更なる微量軽元素分析の大きな課題となっている。

これまでの研究では、STJ と基板の間に酸化膜などの Buffer を配置することで基板由来のノイズの低減を目指してきた[3]。しかしこのノイズ評価は、同一チップ上に作製された素子同士での比較ではなく、厳密な定量評価となっていなかった。

### 3. 実験内容

本研究では、同一チップ上に酸化膜、超伝導膜、金属膜の 3 種類の Buffer を形成し、100 アレイの STJ を作製することで、材料の違いによるノイズ低減効果を検証した。作製した 100 アレイの STJ の全体図を Fig.1 に示す。ここで、酸化膜、超伝導膜、金属膜それぞれの Buffer 材料および膜厚は、SiO<sub>2</sub>(100nm)、Al(100nm)/SiO<sub>2</sub>(100nm)、Ti(10nm)/Au(100nm)/Ti(10nm)/SiO<sub>2</sub>(100 nm)とした。また、比較のため Buffer のない STJ も同一チップ上に作製した。

ノイズの評価方法として、カーボンナノ構造から成る電子源と Al ターゲットから成る X 線管を用いて X 線照射実験を行った。各 Buffer を有する STJ のスペクトルの一例を Fig.2 に示す。Buffer を形成することで、800 eV から 0 eV に渡る大きなノイズを低減できていることが分かる。更に、Buffer として酸化膜、超伝導膜、金属膜の順でノイズの低減効果が高いことが分かった。

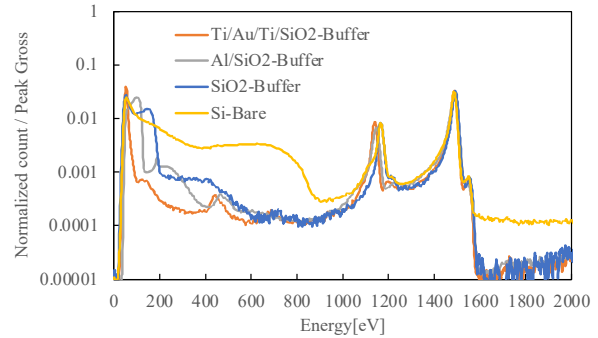


Fig.2 X-ray Spectrum (Al-K $\alpha$ )

### 4. まとめ

同一ウェハの同一チップ上に酸化膜、超伝導膜、金属膜の 3 種類の Buffer を形成し、100 アレイの STJ を作製することで、材料の違いによるノイズ低減効果を検証した。Buffer 材としては、酸化膜、超伝導膜、金属膜の順でノイズの低減効果が高いことが分かった。

今後は最もノイズ低減効果のあった金属膜に着目し、金属材料の変更や層数の変更によるノイズ低減効果を検証する。

### 5. 謝辞

本研究で使用されたデバイスは、国立研究開発法人産業技術総合研究所の超伝導量子回路試作施設 (Qufab) において作製されました。本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (課題番号 JPMXP1222AT5008) の支援を受けました。

### 参考文献

1. G. Fujii, et al.: X-Ray Spec., Vol.46, pp.325-329, 2017
2. S. Shiki, et al.: J. Low Temp. Phys., Vol.167, pp.748-53, 2012
3. H. Sato, et al.: IEEE, Vol.9, pp.4475-4478, 1999

# 再編集可能な超伝導ベイジアンネットワークの設計

## Design of re-editable superconducting Bayesian networks

山中 陸央, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国立大学)  
 YAMANAKA Rikuo, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki(YNU)  
 E-mail: yamanaka-rikuo-nm@ynu.jp

### 1. はじめに

確率を用いたモデリング手法の一つであるベイジアンネットワーク(Bayesian Networks: BN)は、その視覚的容易性から予測や診断など多くの分野で応用されている。BN は事象を表すノードとノード間の因果関係を示すアークで構成され、子ノードには親ノードに依存した条件付き確率表(Conditional Probabilities Table: CPT)が付随する。現在、BN は汎用コンピュータを用いたソフトウェア的な手法を用いて解析されている。しかし、大規模な BN の解析は NP 困難[1]に分類され、膨大な計算時間とパワーを必要とする。そこで本研究では、超伝導回路を用いて CPT の内容を再編集可能な BN の専用プロセッサを提案する。チップ作製後に CPT を再編集できることは BN を用いた解析を円滑にする。本研究では 2 つのノードからなる BN を設計し、設計した BN が外部電流によって CPT の内容を再編集できることを確認した。

### 2. 再編集可能な BN 専用プロセッサ

専用プロセッサの設計において、ノードは超伝導乱数生成器(Superconductive Random Number Generator: SRNG)[2]によって表現する。Fig.1 に SRNG の等価回路図(a)と出力確率特性(b)を示す。SRNG はオフセット電流  $I_{offset}$  によって出力確率を制御することで任意の解析を可能にする。

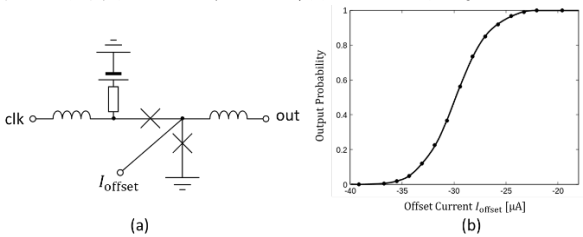


Fig.1 Schematic of SRNG (a), Output Probability Characteristic (b)

親ノードは SRNG 単体で表現する。子ノードは CPT に従った複数の確率を表現する必要がある。単結合の子ノードの場合、親ノードの出力が 0 と 1 の場合でそれぞれ異なる出力確率になるような回路が求められる。さらに実際に解析を行う際は CPT の内容を適宜再編集するため、専用プロセッサの設計において CPT の内容をチップ作製後に再編集できるように必要がある。本研究では、これを実現する子ノード回路の提案・設計を行った。Fig.2 は提案した子ノードの回路図(a)と入力とリセットの信号に対する SRNG 内のインダクタンスに流れる電流の変化(b)である。この回路は Delay Flip-Flop(DFF)と可変結合器(Variable Coupler: VC)、SRNG で構成されている。in から信号が入力され reset が入るまでの間 DFF には SFQ が蓄えられ、蓄えられた SFQ は磁気結合によって SRNG に影響を及ぼす。SRNG は in から信号が入力されたか否かによって異なる出力確率に制御される。これにより親ノードの出力に応じた二つの確率を表現することができる。VC は磁気結合の DFF と SRNG 間の磁気結合を  $I_{ad}$  の大きさによって変化させる役割をもつ。この回路は、 $I_{ad}$  と  $I_{offset}$  を変化させることでチップ作製後であっても CPT を再編集することが可能である。

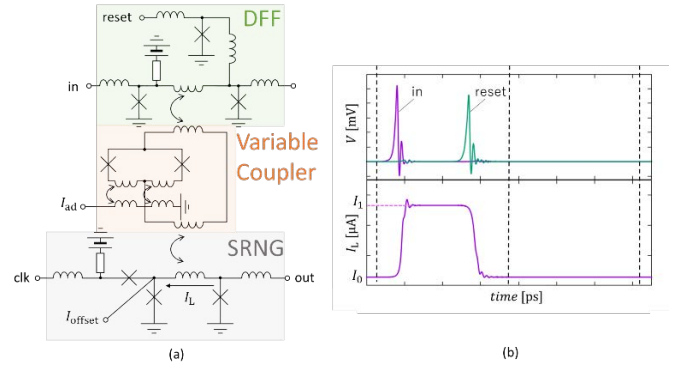


Fig.2 Schematic of child node (a), Variation of current in SRNG response to DFF (b)

提案した回路を用いてノード数が二つのBNを設計し、5つのCPTパターンにおけるシミュレーションを行った。シミュレーションにはアナログ解析シミュレータであるJoSIMを用いて、想定プロセスは1KP(臨界電流密度1 kA/cm<sup>2</sup>のNb3層プロセス)、想定温度は1 Kとした。Fig.3は想定したBN(a)と5つのCPTとそれらを実現するための  $I_{ad}$ 、 $I_{offset}$  をまとめた表(b)、結果と理論値の比較(c)である。どのパターンにおいても理論値と同等の結果を得ることができた。

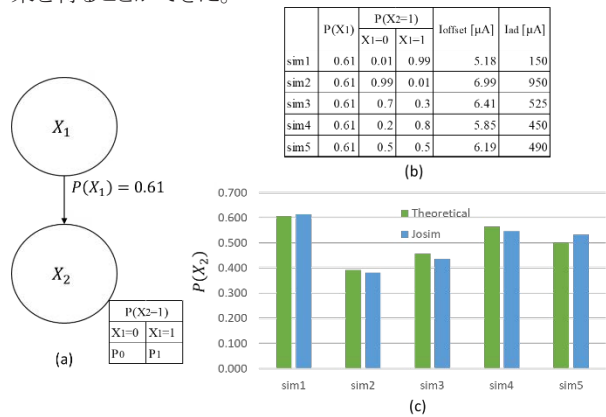


Fig.3 Assumed BN (a), 5 CPTs and each  $I_{ad}$ 、 $I_{offset}$  (b), Comparison of results and theoretical values(c)

### 3. 結論

本研究では、超伝導回路を用いてCPTの内容を再編集可能なBNの専用プロセッサの提案を行い、2ノードのBNにおいて提案した専用プロセッサでは外部電流  $I_{ad}$ 、 $I_{offset}$  によってCPTの内容を再編集することが可能であることを確認した。

### 参考文献

- G. F. Cooper: The Computational Complexity of Probabilistic Inference using Bayesian Belief Networks, Artificial Intelligence, Vol. 42 (1990) pp. 393-405
- Y. Yamanashi, et al.: Superconductive Random Number Generator Using Thermal Noises in SFQ Circuits, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19 No. 3(2009) pp. 630-633

# ネットワーク型侵入検知システムに向けた SFQ ハードウェアアクセラレーションの研究

## Research on Network-based Intrusion Detection System Utilizing SFQ Hardware Acceleration

鈴木 琢也\*, 山梨 祐希, 吉川信行(横浜国大)

TAKUYA Suzuki, YUKI Yamanashi (YNU), NOBUYUKI Yoshikawa (Yokohama Nat. Univ)

\*E-mail: suzuki-takuya-dg@ynu.jp

### 1. はじめに

ネットワーク型侵入検知システム(NIDS)は、ネットワーク上を通信するデータパケットを監視することによってリアルタイムにウイルスを検知するシステムである[1]。NIDS がウイルスを検知する手法としてシグネチャベース検知手法がある。シグネチャベース検知手法では、コンピュータウイルスデータと通信パケットとのパターンマッチングにより検知を行い、最も多くの処理が必要となるパターンマッチング処理を専用ハードウェアにより行う研究が多くなされている[2]。本研究では、単一磁束量子(SFQ)回路[3]を用いた正規表現対応パターンマッチング回路を設計しており、SFQ 回路をネットワークセキュリティに応用する研究が行われている[4][5]。我々の研究チームは、ストリックアレイアルゴリズムを用いたパターンマッチング回路とその動作実証を行った[6]。今回の研究では、使える正規表現の種類を拡張したパターンマッチング回路の動作実証と、ビットパラレルに文字列を比較することによって高スループット、低レイテンシパターンマッチング回路を設計した。

### 2. アーキテクチャの全体構成

Fig. 1 は、アーキテクチャの全体構成を示している。まず、イーサネットよりキャプチャされたパケットはパケットヘッダ情報により分類され、Pre Processor に送られる。Pre Processor では、イベント検出モジュールで扱うことのできるデータ列に変換される。イベント検出モジュールは、文字列の検知を行う String Matching Unit (SMU)と、有限オートマトンに応じた状態遷移を行う State Transition Unit (STU) から構成され、正規表現に対応したパターンマッチングを実現している。その後、パターンマッチングの結果に応じて管理者への警告の有無を決定する。今回の発表では、特に SMU において、SFQ 回路を用いて動作実証を行った結果を示す。

### 3. 正規表現に対応した String Matching Unit の動作実証

SFQ 回路を用いた NIDS に向けて、正規表現に対応したパターンマッチング回路の動作実証を行った。対応している正規表現は、任意の一文字、ある一文字の一回以上の繰り返し、ある一文字以外の任意の一文字(否定)、文字クラスである。

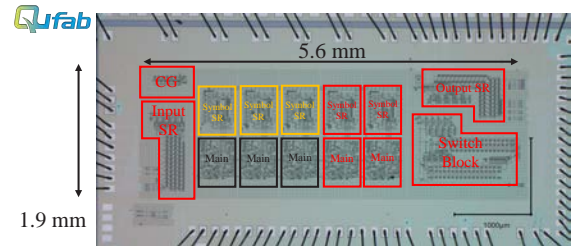


Fig. 2 Chip Photo of demonstration circuit

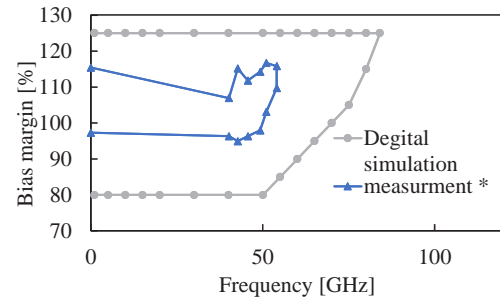


Fig. 3 Frequency dependance of bias margins of demonstration circuits

返し、ある一文字以外の任意の一文字(否定)、文字クラスである。Fig. 2 は動作実証を行った回路であり、5文字(8bit/1文字)の比較を行う回路である。赤枠で囲った部分が完全動作を確認した部分であり、黄色や黒の枠で囲った部分はエラーレートが高く正しい動作を確認することが出来なかった。Fig. 3 は周波数に対するバイアスマージンを示している。全体の Josephson Junction の数は 15108 であり、正しく動作確認できた部分において最高クロック動作周波数 52 GHz での動作を確認した。

### 4. 結論

今回、SFQ 回路を用いた正規表現対応パターンマッチング回路の設計・動作確認を行い、SFQ 回路を用いた NIDS の初歩的な実現が可能となった。今後はさらなる大規模な回路の動作実証を行うとともに小面積で高スループットなパターンマッチングシステムを検討する。

### 参考文献

- [1] J. P. Anderson, Technical Report, James P. Anderson Company, Fort Washington, 1980.
- [2] M. Imran, et al. : Computers & Electrical Engineering, vol. 92, pp. 107169, 2021.
- [3] K. K. Likharev, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 1, no. 1, pp. 3-28, March. 1991.
- [4] K. Takagi, et al. : IEICE Technical Report, vol. 117, no.10, pp.35-39, April 2017.
- [5] M. Dorojevets, et al. : in IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 17, no. 5, pp. 1015-1025, 1 Sept.-Oct. 2020
- [6] T. Suzuki, et al. : in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 33, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2023

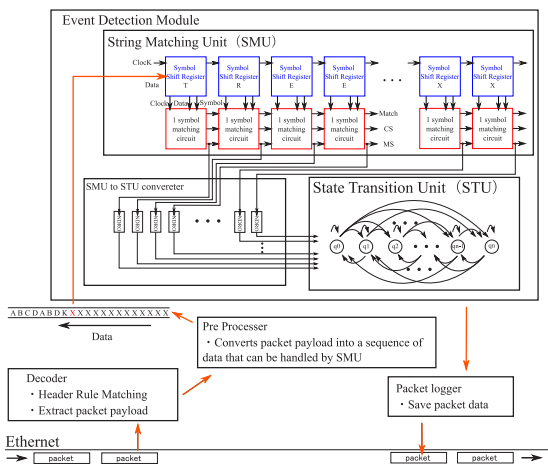


Fig. 1 Overall structure of the proposed Network-based Intrusion Detection System

# 超伝導ストカスティック演算回路における信号分岐回路の性能評価

## Performance evaluation of stochastic number splitter in superconducting stochastic arithmetic circuits

浅香海斗 吉川信行 山梨裕希

Kaito Asaka Nobuyuki Yoshikawa Yuki Yamanashi

E-mail: asaka-kaito-gj@ynu.jp

### 1. はじめに

近年、ストカスティックコンピューティング (Stochastic Computing: SC) は確率的演算の一種として、無線信号処理や画像処理、ディープラーニングなどの様々な分野での応用が検討されている。SC は高いソフトウェア耐性や低消費電力性、面積効率に優れるなど、様々な利点がある一方で、情報表現に時間がかかるという欠点を抱えている。この問題に対し、我々は高速動作性、低消費電力性に優れた単一磁束量子 (Single flux quantum: SFQ) 回路の SC への応用を検討している。

SC において、その演算方式から、同一回路内で同じストカスティック数列 (Stochastic Number Train: SNT) を持つストカスティック数 (Stochastic Number: SN) を複数回用いると、SNT 同士の相関により演算誤差を引き起こす問題がある。そのため、相関の無い SN を使用するために、SNT の bit 列が異なる SN を信号分岐する必要がある。この要件を実現する回路として、超伝導数生成器 (Superconductive Random Number Generator: SRNG) [1] を用いたストカスティック数信号分岐回路 (Stochastic Number Splitter: SNS) [2] を我々は設計した。今回は提案する SNS について、出力 SN を用いた乗算結果の演算精度のインダクタンス依存性および、SN 変化時の動作点調整時間のインダクタンス依存性の評価を定量的に評価した。

### 2. ストカスティック信号分岐回路

設計した SNS のブロック図を Fig.1 に示す。この構成においてジョセフソン伝送路 (Josephson Transmission Line: JTL) と SRNG は共通の電流源で接続され、JTL にはバイアス電流、SRNG には“1”の出力確率を決める制御電流がそれぞれ流れる。JTL と出力側の SRNG は共通の電流源に接続されている。入出力に用いられる SN は SFQ パルス列で表現される。SN は SFQ パルス列の“1”の存在確率に対応している。

SNS の動作を説明する。入力 SN を SFQ パルス列として JTL に入力する。すると、周波数同期現象 [3] により、JTL に入力される SFQ パルス列の平均電圧と SRNG から出力される SFQ パルスの平均電圧が等しくなるように SRNG へ流入する制御電流が調整される。SRNG から出力される SFQ パルス列全体の平均電圧は、出力する SN の“1”の存在確率に対応しているため、その値は clock 周波数を  $f$ 、“1”の存在確率を  $P$  とすると、 $Pf\Phi_0$  で表される。接続した JTL と出力側の SRNG で平均電圧が等しくなるため、出力側の SRNG での出力確率が等しくなり、SNT の bit 列が異なる SN を信号分岐することができる。例として、Clock 周波数を 10 GHz、入力 SN を 0.5 とした時のシミュレーション結果を Fig.2 に示す。このシミュレーションでは産業技術総合研究所の High-speed Standard Process (HSTP) [4] の使用を仮定した。Fig.2 より、入力 SN の“1”の存在確率が動作点調整時間を経て、Clock 周波数と同じ周波数で出力 SN へ複製されていることがわかる。

設計した SNS について、これまでの研究により出力 SN 同士の乗算結果の演算精度および、SN 変化時の動作点調整

時間は Fig.1 における制御電流の流れるインダクタンスで決まる時定数に依存する。

出力 SN 同士の乗算の演算精度とインダクタンスの依存性について、インダクタンスを変化させた際の出力 SN 同士の乗算を行い、理論値との平均二乗誤差を求めることで演算精度の評価を行った。この時、シミュレーションの条件は、Clock 周波数は 10 GHz、SNT の bit 長は 4095 bit、入力 SN の値は 0.0, 0.1, 0.2, … 1.0 の計 11 通り、シミュレーションの試行回数は 1000 回で行った。シミュレーションにより、インダクタンスの値を 1.75 nH から 17.5 nH にすることで平均二乗誤差の値が 1/50 になった。インダクタンスを増加させた時の出力 SN 同士の乗算の演算精度が向上することが定量的に分かった。

SN 変化時に SRNG に流れる制御電流が“1”の出力確率に対応する値まで変化するための動作点調整時間とインダクタンスの依存性について、SN の値を 0.01 から 0.99 へ変化させた際の動作点調整時間を、制御電流の変化の時定数により評価した。シミュレーションにより、動作点調整時間がほぼインダクタンスに比例することが分かった。

発表では回路設計の詳細と測定結果を述べる。

### 3. 謝辞

本研究はJSPS科研費JP22H01542の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, IEEE Trans Appl. Supercond., vol. 19, 2009
- [2] Y. Yamanashi, K. Asaka, and N. Yoshikawa, IEICE, C-8-3, 2023
- [3] Y. Yamanashi, R. Kinoshita, and N. Yoshikawa, Supercond. Sci. Technol., vol. 34, 2021.
- [4] M. Hidaka and S. Nagasawa, IEICE Trans. Electron., vol. E104-C, 2021.

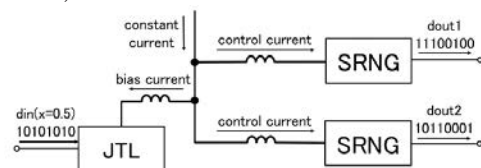


Fig.1 Block diagram of SNS using SRNG

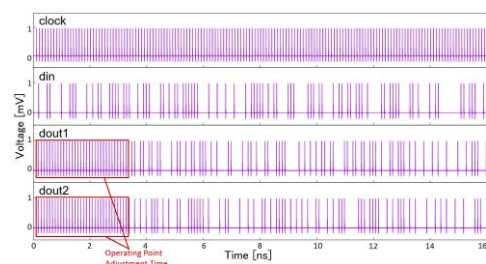


Fig.2 Simulation results at clock frequency : 10 GHz, input SN : 0.5

# 単一磁束量子論理による MKID 用低消費電力デジタル信号処理回路の設計

## Design of low-power digital signal processing circuits for MKID using single-flux quantum

藤江 和輝, 成瀬 雅人, 明連 広昭(埼玉大院)

FUJIE Kazuki, NARUSE Masato, MYOREN Hiroaki(Saitama Univ.)

E-mail: k.fujie.593@ms.saitama-u.ac.jp

### 1. まえがき

半導体検出器では難しい波長の長い電波の検出を行うために超伝導体を用いた検出器であるマイクロ波力学インダクタンス検出器(Microwave Kinetic Inductance Detector: MKID)が、電波天文や放射能の検出に使用されている。現在このMKIDからの信号はアナログ回路やFPGAを用いて信号処理している。[1] これを、高速動作が可能な単一磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)論理回路と、FIR フィルターとデシメーションフィルターで構成されるフィルターバンク構造を用いることによって、高速化、量子化ノイズの低減、高周波数分解能化が可能になる。[2]

本研究では、MKIDからの信号をデジタル SQUID によるデルタ型 A/D 変換回路で処理することを仮定し、得られたデジタル信号(Data 信号)をダウンコンバージョンするためのデジタルミキサーの設計、オーバーサンプリングのためのデシメーションフィルターの設計、FIR フィルターの設計、実装のための検討を行った。

### 2. デジタルミキサーとデシメーションフィルター

Data 信号と LO 信号を掛け合わせることで、周波数のダウンコンバージョンを行う回路がデジタルミキサーである。本研究では、MKID からデジタル SQUID によるデルタ型の A/D 変換した信号を GHz の帯域から MHz の帯域に下げするために、1 bit デジタルミキサーを設計した。[3]

また、アナログからデジタルに変換する際に量子化ノイズが発生するため、本研究では1次 sinc 型のデシメーションフィルターを用いてオーバーサンプリングしたデータに対して量子化ノイズの低減を行った。

CONNECT セルライブラリを用いて設計したデジタルミキサーとデシメーションフィルターのレイアウトを以下の図1に示す。

レイアウトサイズは  $920 \mu\text{m} \times 840 \mu\text{m}$  であり、消費電力は  $0.225 \text{ mW}$  であった。Verilog-XL でシミュレーションを行い、 $32 \text{ GHz}$  で正常に動作することが確認できた。

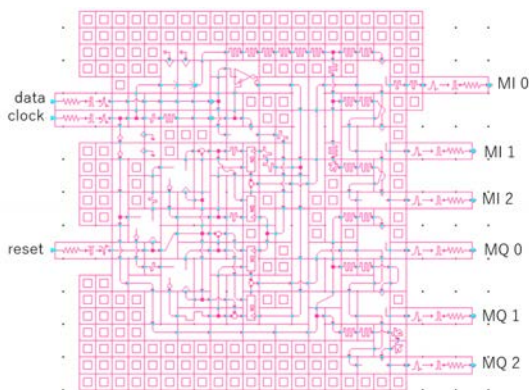


Fig.1 Layout of digital mixer and decimation filter

### 3. FIR フィルターのための乗算器

デシメーションフィルターからの信号を周波数分割するために FIR フィルターを利用します。回路の抵抗値と電源電圧

を  $1/5$  に下げることによって、消費電力を  $1/5$  に下げることができるため、FIR フィルターはこの方法で設計した。[4] FIR フィルターは  $3 \text{ bit} \times 10 \text{ bit}$  の乗算器が必要になり、本研究では、乗算器は AND 回路を用いて部分積を生成し、HA と FA を用いて乗算器を設計した。FIR フィルターに用いる加算器は RCA 方式で設計を行った。

CONNECT セルライブラリを用いて設計した FIR フィルターのレイアウトを以下の図2に示す。

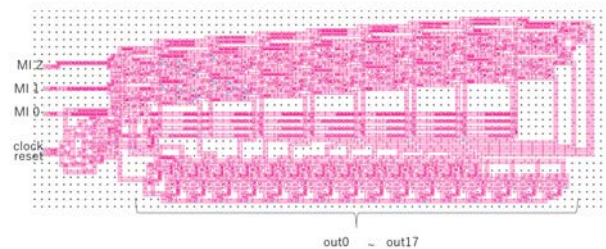


Fig.2 Layout of FIR filter

レイアウトサイズは  $2400 \mu\text{m} \times 6240 \mu\text{m}$ 、消費電力  $1.01 \text{ mW}$  となった。FIR フィルターは同じものを4つ使用するため、バイアス電流を直列に供給することで供給電流を減らす電流リサイクル技術を用いることを検討している。[5]

### 4. まとめ

本研究では、MKID 用のデジタル信号処理回路の設計を行った。デジタルミキサー・デシメーションフィルターのレイアウト設計を行い、デジタルミキサーと同時にシミュレーションを行い、 $32 \text{ GHz}$  で正常に動作することが確認できた。FIR フィルターを設計するために、抵抗と電源電圧を  $1/5$  にした乗算器の設計を行った。シミュレーションを行い、設計した乗算器が  $8 \text{ GHz}$  で正常に動作することが確認できた。今後電流リサイクル技術を用いた回路設計について検討していく。

### 参考文献

- Mazin, B. A., et al: "ARCONS: A 2024 pixel optical through near-IR cryogenic imaging spectrophotometer." Publ. Astro. Soc. Pac., 125.933 (2013) 1348.
- Price, Danny C. "Spectrometers and polyphase filterbanks in radio astronomy." The WSPC Handbook of Astronomical Instrumentation: Volume 1: Radio Astronomical Instrumentation (2021)159-179.
- Filippov, Timur V., et al. "Multi-bit mixers for digital-RF receivers." IEEE Trans. Appl. Supercond., 21.3 (2010): 818-822.
- Tanaka, Masamitsu, et al: "Low-energy consumption RSFQ circuits driven by low voltages." IEEE Trans. Appl. Supercond., 23.3 (2013) 1701104 -1701104.
- Sano, Kyosuke, et al. "Reduction of the supply current of single-flux-quantum time-to-digital converters by current recycling techniques." IEEE Trans. Appl. Supercond., 27.4 (2016): 1-5.

## 蓄冷式冷凍機の 20K 以下における冷凍能力向上(その2)

## Improvement of the cooling performance below 20K (part 2)

安田 仰, 大塚 清見, 金尾 憲一, 恒松 正二, 平塚 善勝(住重); 檜崎 勝弘(新居浜高専)  
 AOGU Yasuda, OTSUKA Kiyomi, KANAO Kenichi, TSUNEMATSU Shoji, HIRATSUKA Yoshikatsu (SHI);  
 NARASAKI Katsuhiko (NIT, Niihama College)  
 E-mail: aogu.yasuda@shi-g.com

## 1. はじめに

住重(SHI)は、人工衛星に搭載する 4K 級冷凍機, 1K 級冷凍機を供給している。4K 級冷凍機, 1K 級冷凍機は予冷機とジュール・トムソン冷凍機で構成されており, 4K, 1K 領域での能力向上には, 予冷機の冷凍能力を向上させ, 予冷温度を下げるのが有効である。

現行機では, 予冷機として 2 段スターリング冷凍機が用いられている。2 段スターリング冷凍機の冷却温度を下げるためには, 蓄冷器の熱損失を低減する必要があり, より高い体積比熱の蓄冷材料に置き換えるのが有効である。また, 低周波数駆動の 2 段スターリング冷凍機と, 高い周波数駆動の 1 段スターリング冷凍機を組み合わせることで高効率の冷凍機システムを検討している。

本稿では, 2 段スターリング冷凍機の冷凍能力向上のため, 2 段蓄冷材を改良し, 冷却性能試験を行った結果について報告する。

## 2. 2 段蓄冷器の改良による冷却性能向上

本開発では予冷機の性能として, 15 K で 200 mW の冷凍能力を目標値として定めている。20 K 以下の冷凍能力を向上するためには, 現在用いている SUS の蓄冷材料では, 動作ガスに対して 20 K 以下の熱容量が不足している。そこで蓄冷式冷凍機の 2 段目の蓄冷材を, SUS と比較して高い体積比熱を持つ材料に置き換える必要がある。また, 現行機と同様の流体状態を再現するために, 現行機と同じメッシュ形状に成型する必要がある。

先行研究[3]では, 2 段スターリング冷凍機の解析モデルを構築し, 候補蓄冷材料の性能予測を行った。本稿では, 計算の結果と加工性を考慮し, 蓄冷材料として金(Au)を選定した。

## 3. 性能試験

Fig.1 に製作した Au のメッシュを示す。従来機である SUS 製のメッシュと同形状のメッシュに成型することができた。

Fig.2 に試験セットアップを示す。冷却試験は冷凍機全体の高効率駆動に効果的な, 低い周波数 15 Hz で駆動する 2 段スターリング冷凍機に, 高い周波数 52 Hz 駆動の 1 段スターリング冷凍機を組み合わせる条件で実施した。従来機は SUS と新たに製作した Au の蓄冷材は, それぞれ 2 段スターリング冷凍機の 2 段蓄冷器に充填し性能比較試験を行った。冷却試験は, 2 段スターリング冷凍機の駆動電力を 90 W とし, 1 段スターリング冷凍機の駆動電力を 0W, 20 W, 40 W, 60 W と変更して実施した。また各ステージにはヒータを用いて, 1 段:1W, 2段:200 mW の模擬負荷を入力した。

冷却性能試験の結果を図 3 に示す。横軸は総消費電力, 縦軸は 2 段スターリング冷凍機の 1 段ステージと 2 段ステージの温度を示している。図より, SUS の蓄冷器では消費電力 110W で 2 段ステージ温度がピークとなるのに対して, 新たに導入した Au の蓄冷器では電力 110 W 以上の範囲で温度が下がり続けることが分かる。これは, SUS の体積比熱が 20K 以下で He ガスの体積比熱より小さくなるのに対して, Au はより低い温度まで, He ガスより高い体積比熱を持つことによると考えられる。

## 4. まとめと今後の予定

4K 級冷凍機, 1K 級冷凍機の冷凍能力の向上のため, 2 段スターリング冷凍機の蓄冷器の改良と試験を行った。試験の結果, 蓄冷材の材質を SUS から Au に変更しただけでは 15K で 200mW の目標値を達成できなかったが, 新たに導入した Au の蓄冷材の有用性を確認することができた。今後は冷凍機の性能計算プログラムと合わせて損失分析を行い, 蓄冷器サイズの変更も考慮して, 目標性能達成のための検討をする。

## 参考文献

1. K. Narasaki, et al., Cryocoolers 19 (2016) 613
2. M. Jakob, "Heat Transfer" Vol. 2, Wiley and Sons, New York (1957) 275
3. 安田ら, 第 104 回 2022 年度春季低温工学・超電導学会概要集, p36.



Fig.1 Photograph of mesh produced with Au.

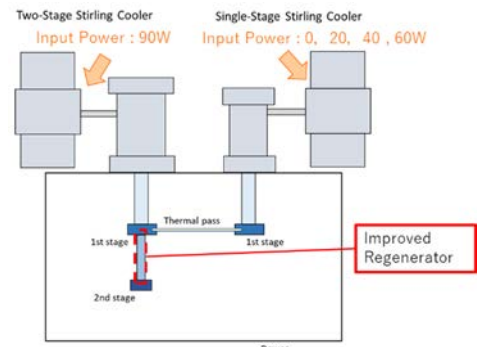


Fig.2 Test configuration for improved regenerator

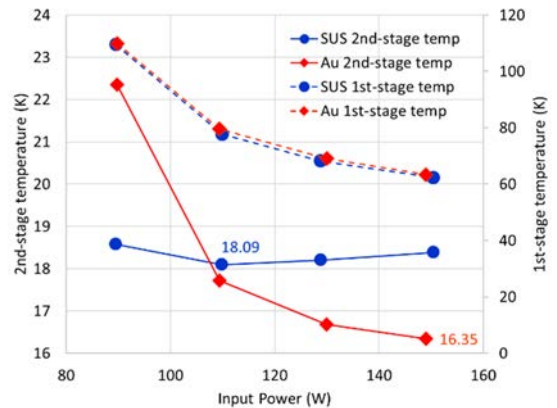


Fig.3 2nd and 1st stage temperature of two-stage Stirling cooler

## 2段スターリング型パルス管冷凍機の開発

### Development of Two-Stage Stirling Type Pulse Tube cryocooler

平塚 善勝, 大塚 清見, 恒松 正二, 安田 昂, 金尾 憲一(住重); 檜崎 勝弘(新居浜高専)

HIRATSUKA Yoshikatsu, OTSUKA Kiyomi, TSUNEMATSU Shoji, YASUDA Aogu, KANAO Kenichi (SHI); NARASAKI Katsuhiko (NIT, Niihama College)

E-mail: yoshikatsu.hiratsuka@shi-g.com

#### 1. はじめに

住友重機械工業株式会社(SHI)は、1982年からこれまで約40年に渡り、人工衛星搭載用の冷凍機開発を宇宙開発事業として携わってきた。その間、地球観測衛星、科学衛星用センサ冷却やシールドクーラ用途として1段、2段スターリング冷凍機およびJT冷凍機を冷却システムとして供給してきた。将来的には、観測能力を向上させるためにセンサを大型化することが計画されており、これに伴い冷凍機の冷却能力(77K, 15K双方ともに)を上げる必要がある。また、冷凍機の寿命に関して、現在の5年から10年に延伸することが求められ、1段スターリング冷凍機やJT冷凍機に関しては、これまでの試験実績から得られた知見から10年寿命の目途は立っているが、2段スターリング冷凍機においては、2段ディスプレイサのクリアランスシールを維持することが難しく10年寿命の達成は厳しい課題となる。この課題を解決するための一つの方策として、膨張器に可動部を持たないパルス管(=以後PT)膨張器を適用することを検討している。本報告は、以前開発した冷凍能力5W at 77Kを有する1段パルス管冷凍機を予冷機とし、2段スターリング冷凍機用圧縮機を使い2段PT膨張器を設計・試作し性能試験を行ったので、その結果について報告する。

#### 2. 試作機概要と性能試験結果

表1には、最終的な冷凍機の目標仕様値が示されている。現状の4K, 1K級冷凍機は、JT+予冷機構成において、それぞれの冷凍能力は、4K級で30mW at 4.5K, 1K級10mW at 1.7Kを有している。この冷凍能力を、それぞれ40mW at 4.5K, 20mW at 1.7Kに増加させるためには、予冷機の2段階の冷凍能力を200mW at 20Kから200mW at 15Kに向上させる必要がある。さらに10年寿命要求の観点から膨張器はPT方式の開発を開始した。10~20Kスターリング型PT冷凍機の冷却方式は、1段と2段の接続方法(ガスカップリング, サーマルカップリング), そして位相制御方法により分類される。ガスカップリング方式は、同じ圧縮機で1, 2段膨張器の性能を最適化するため効率面で不利になると考え、1, 2段膨張器を独立して扱うことが可能となるサーマルカップリング方式で試作した。

図1には、2段パルス管膨張器の構成写真が示されている。予冷機は、以前開発した5W at 77K 1段PT冷凍機を用い電気入力120W一定とし、2段PT用圧縮機は、共振系を無視し、100W電気入力の際に得られるPV仕事(圧縮機効率約75%としたとき75W)を入力基準に性能試験を行った。1段PTと2段PTは2段PTの蓄冷管とパルス管中間部を平編銅線で熱接触されて冷却されている。2段PTの前段蓄冷材には400メッシュを後段には粒径0.1mmのHoCu2を使用した。位相制御は、イナータンス+ダブルインレット方式を採用した。

図2には、性能試験結果が示されている。同図より、冷却性能試験は、2段PT冷凍機圧縮機の運転周波数15Hz、充填圧力

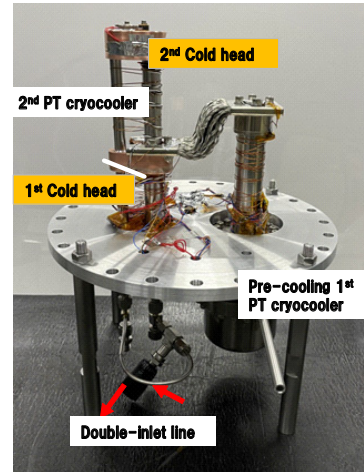


Fig.1 Photograph of 2 stage PT expander.

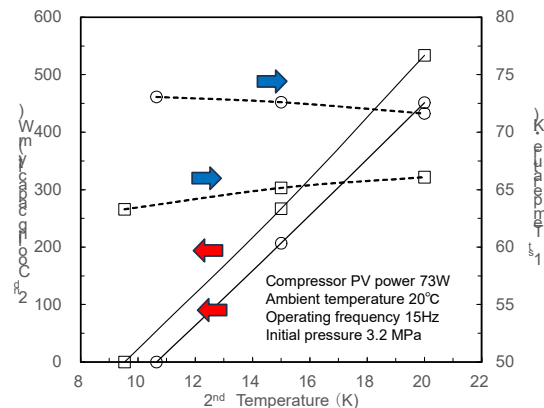


Fig.2 Cooling performance of a 2 stage PT cryocooler.

3.2MPa, 圧縮機PV仕事73W(電気入力185W), 1段PT冷凍機の電気入力120W, 1段1W at 72K 負荷時に2段冷凍能力206mW at 15K, この時の到達温度10.7Kが得られた。

#### 3. まとめと今後の予定

2段PT試作膨張器を設計・試作し2段スターリング冷凍機用圧縮機を使用し性能試験を行った。その結果、冷却性能試験は、2段PT冷凍機の運転周波数15Hz, 圧縮機PV仕事73W, 1段パルス管冷凍機の電気入力120Wで、1段1W at 73K 負荷時に、2段冷凍能力は206mW at 15Kが得られた。

今後は下記の開発を進めて行く予定である。

- ・2段PT膨張器サイズの最適化と新蓄冷材開発による膨張器の効率改善ならびに信頼性検討。
- ・2段パルス管冷凍機用圧縮機の開発とインピーダンスマッチングによる圧縮効率の改善。

#### 参考文献

1. Y. Hiratsuka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 37.

Table 1 The final design target of this cryocooler.

Item	Value
Cooling power	> 200 mW at 15 K
Total electrical input power	< 200W
Cryocooler weight	< 15 Kg



# 磁気遮蔽方式磁気冷凍システムに関する基礎研究

## Basic research on magnetic shielding type magnetic refrigeration system

平野 直樹, 小野寺 優太(NIFS);高澤 拓海, 逢坂 昇汰, 杉原 健心, 岡村 哲至(東工大)  
 HIRANO Naoki, ONODERA Yuta (NIFS);  
 TAKAZAWA Takumi, OSAKA Shota, SUGIHARA Kenshin, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)  
 E-mail: hirano.naoki@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導材料の研究開発の進展と、近年のヘリウム供給問題から、ヘリウムに頼らなくとも極低温を維持できるシステムの研究開発を行っている。その一方式として、高温超伝導コイルから発生する磁場と磁気冷凍技術を組み合わせることでコイル冷却をアシストする技術の研究を進めている。磁気冷凍では磁気作業物質に磁場の変化を与える必要がある。その手法として超伝導コイルを励消磁する方法[1]と磁気遮蔽体を用いる方法[2]を検討している。今回、YBCO バルク体に対して液体窒素を用い、77K と減圧下での約 65K での実験から得た遮蔽効果と、バルク材の臨界電流密度の温度依存性から、20K までの磁気遮蔽能力を解析によって推定し、磁気遮蔽式磁気冷凍システムが液体水素の再液化にも適用が見通せるか検討したので報告する。

### 2. 超伝導バルク体の磁気遮蔽効果

#### ・実験方法

Fig.1 に実験で使用した YBCO バルクの写真を示す。バルク体の冷却には液体窒素を使用し、大気圧下 77 K、と減圧した 65 K で磁気遮蔽効果を測定した。磁気遮蔽効果は、超伝導コイルによって生成される磁場と、2 つの超伝導バルク体間の空間で測定された中心磁場との差として定義した。バルク間の距離は 10 mm とした。実験条件を Table1 に示す。

#### ・解析方法

解析は軸対称 2 次元場 (r-z 平面) で行い、支配方程式には遮蔽電流 (渦電流) を考慮したアンペールの法則を用いた。また、渦電流の大きさを決定する導電率は磁束線に働くピン止め力とローレンツ力が釣り合っていると仮定した。

#### ・実験および解析結果

厚みや形状が異なるバルク体に対し、77 K における磁気遮蔽効果の実験結果と、バルク体の臨界電流密度特性から求めた近似式による磁気遮蔽の解析結果を合わせて Fig.2 に示す。磁気遮蔽効果は、バルク体の厚みが増すほどその遮蔽能力が高くなると考えられるが、今回の実験では 5 mm に対して 2 mm のバルクの方が遮蔽能力が高い結果となった。これは、バルク体の均一性が低いことが影響していると考えている。

実験結果に基づく解析により、温度を変化させた際の磁気遮蔽効果を推定した。Fig.3 にバルク体ならびに比較として YBCO 線材を 50 枚積層した場合の磁気遮蔽効果の温度依存性を示す。20 K では厚さ 2 mm でも 5 T の磁気遮蔽効果が期待できる結果となった。

### 3. まとめ

YBCO バルクを液体窒素を用いて 77 K ならびに 65 K で磁気遮蔽効果を確認した。これらの実験から得られた結果から、バルク材の臨界電流密度の温度依存性を推定し、解析により 20 K までの磁気遮蔽効果を推定した。液体窒素温度レベルでは磁気遮蔽効果は 0.5 T 程度であるが、20 K では 5 T 以上の磁気遮蔽が可能で、水素の再液化にも応用できる高い冷凍性能を有する磁気冷凍システムの実現が示唆される。



Fig.1 Photograph of superconducting bulk material for magnetic shielding  
(Thickness from left to right: 10mm 10mm 5mm 2mm)

Table 1 Experimental Condition

Parameter	Value
Diameter [mm]	28
Shield spacing [mm]	10
Temperature [K]*	65, 77
Thickness [mm]	2, 5, 10
Applied field [T]	3, 5

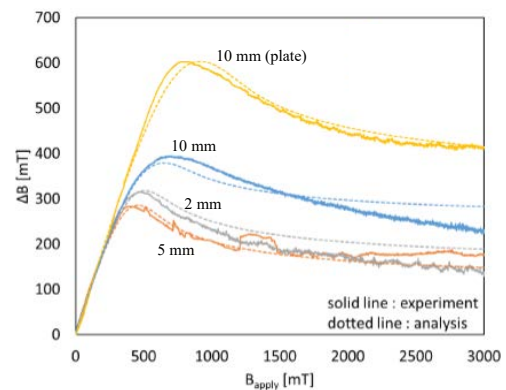


Fig.2 Result of the analysis using the critical current density obtained by fitting the experimental values at 77 K

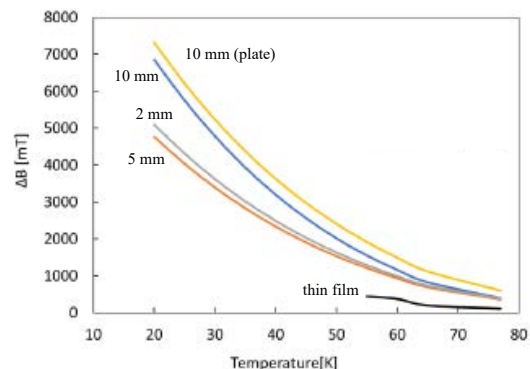


Fig.3 Maximum shielding magnetic field versus temperature

謝辞: 本研究の一部は、NIFS (UFAA018, NIFS21KECA084) の支援を受けて行ったものである。

#### 参考文献

- [1] N. Hirano, et al.: IEEE TAS, Vol.33 No.5 (2023) 4702605  
 [2] N. Hirano, et al.: IEEE TAS, Vol.31 No.5 (2021) 0600104

# 静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討

## Pre-study on Excitation System for Static Magnetic Refrigerator

脇 耕一郎, 恩地 太紀, 坂本 泰明, 富田 優(鉄道総研); 平野 直樹, 小野寺 優太(核融合研)

WAKI Koichiro, ONJI Taiki, SAKAMOTO Yasuaki, TOMITA Masaru (RTRI); HIRANO Naoki, ONODERA Yuta (NIFS)  
E-mail: waki.koichiro.08@rtri.or.jp

### 1. はじめに

液体水素の長期間の貯蔵を果すため、20K 付近の温度域を高効率に冷却する技術が期待されている。この候補に、超電導コイルを用いた磁気冷凍技術がある[1]。この内、静止型磁気冷凍は、磁気冷凍において必要な、磁性材料への磁場変化(励・消磁)の繰返しが、超電導コイルの電流変化の繰返しによるものである[2]。本講演では、静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討として、超電導コイルの電流変化の繰返しが、常温域コンデンサと組合せた電流共振によって得られること、及び共振回路における交流抵抗を確認した。

### 2. 共振回路

共振回路の構成を図1に示す。スイッチ1入りで常温域コンデンサに初期電圧を印加した後、スイッチ1切りとスイッチ2入りで電流共振させる。磁気冷凍として 0.1Hz 程度に低い周波数が必要である[1]が、本講演では手持ちの超電導コイルと常温域コンデンサ(フィルム型で容量 25mF)を供試体とすることにした。超電導コイルの供試体の仕様を表1に示す。

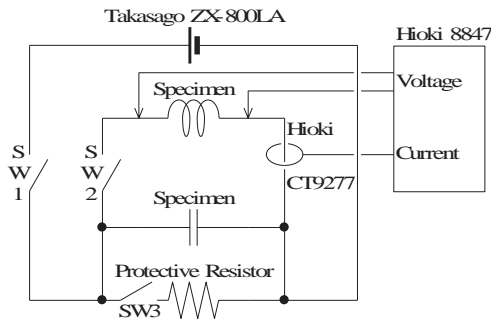


Fig.1 Composition of resonance circuit

Table 1 Specifications of superconducting coil specimen

Wire	4mm wide REBCO
Diameter	outer 78mm and inner 50mm
Winding	turn-insulated and double-layered(116turns each)
Critical current	≥38A@77K
Cooling method	immersing in liquid nitrogen

### 3. 超電導コイルのインピーダンス

超電導コイルの供試体は、インピーダンスが共振の評価に必要なので、共振実験よりも前に交流電圧の実験によって取得した。

交流電源の電圧振幅を1Vとした、周波数100Hzまでの交流電圧の実験において、超電導コイルの供試体のタップ電圧とクランプ電流から算出したインピーダンスを図2に示す。

超電導コイルの供試体のインピーダンスが、周波数依存性の強い抵抗成分と、周波数依存性の弱いインダクタンス成分になった。なお、最低周波数の抵抗成分が負となっているのは、超電導コイルの供試体のタップ電圧とクランプ電流の位相差が90°に近く、上手く計測することができなかったためと考えられる。

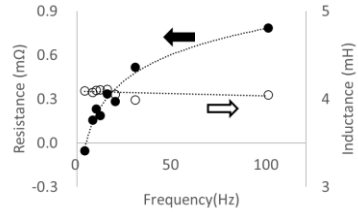


Fig.2 Experimental impedance of superconducting coil specimen

### 4. 超電導コイルの常温域コンデンサとの電流共振

図1の回路において、常温域コンデンサの供試体の初期電圧が0.5Vである実験結果を図3に示す。

共振周波数は16Hzとなり、図2で取得した超電導コイルの供試体のインダクタンス 4mH と、常温域コンデンサの供試体の容量 25mF に符号した。また、電流共振の時間は初期値の3%に減衰するまで9sとなった。そこで、図3に見合うような解析を行うと、抵抗は3mΩとなった。

3mΩという抵抗は、図2の16Hzで取得した超電導コイルの供試体の抵抗 0.3mΩより1桁大きく、常温部の配線の抵抗が多く占めると考えられる。

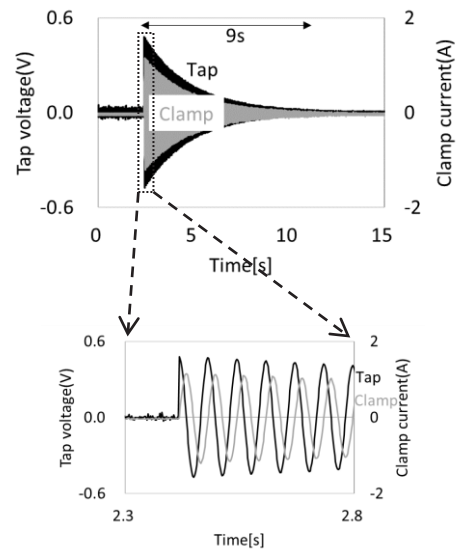


Fig.3 Experimental result for fig.1 circuit regarding 0.5V initial voltage of capacitor specimens at normal temperature (lower: enlarged at beginning)

### 5. おわりに

静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの基本動作を確認することができた。今後は、交流抵抗に伴う損失の補填方法を検討する。

### 参考文献

- K. Kamiya, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 58 No. 2 (2023) 63-68
- N. Hirano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 No. 6 (2022) 0500105

# 超流動ヘリウム 4 の効率的な超低温冷却のための熱交換器表面の構造サイズ

## Structural size of heat exchanger surface for efficient cooling of superfluid $^4\text{He}$ to ultra-low temperatures

中川 久司 (産総研)

NAKAGAWA Hisashi (AIST)

E-mail: hisashi-nakagawa@aist.go.jp

### 1. はじめに

超低温に冷却された超流動  $^4\text{He}$  は、量子流体力学 [1] の検証の場であるとともに、重力波検出 [2] や超冷中性子生成 [3] などに利用されている。本研究では、希釈冷凍機の熱交換器材である銀微粒子の焼結体 (銀焼結体) に着目し、超低温における超流動  $^4\text{He}$  と銀焼結体との熱交換性能を調べた [4]。

### 2. 銀焼結体サンプルと熱抵抗測定

公称粒径  $0.07\ \mu\text{m}$  および  $0.13\ \mu\text{m}$  の銀微粒子から直径  $10\ \text{mm}$  の銀焼結体 (以下、それぞれ  $0.07\ \mu\text{m}$  銀焼結体、 $0.13\ \mu\text{m}$  銀焼結体) を作成し、厚さ  $0.3\ \text{mm}$ 、直径  $20\ \text{mm}$  の銀板上に焼結した。厚さが約  $0.7\ \text{mm}$  の銀焼結体の熱抵抗については、2022 年秋季の講演会にて報告した [5]。しかしこれらの密度はバルクに近く、表面積を見積もることができなかった。そこで今回、比表面積が評価されている焼結条件 [6] を用いて、厚さ  $4\ \text{mm}$  の銀焼結体サンプルを作成した。 $0.07\ \mu\text{m}$ 、 $0.13\ \mu\text{m}$  銀焼結体のそれぞれの表面積の見積り値は、 $0.7\ \text{m}^2$  および  $2.9\ \text{m}^2$  である。希釈冷凍機で冷却した超流動  $^4\text{He}$  中に銀焼結体サンプルを浸漬した [4,5]。既知の熱注入量に対する、銀焼結体と超流動  $^4\text{He}$  間の温度差の変化率として熱抵抗を求めた。熱抵抗の測定値は、カピツァ熱抵抗だけでなく、銀焼結体自身や銀板の熱伝導などを含む、熱抵抗である。超流動  $^4\text{He}$  のフォノンが熱の運び手として支配的となる  $700\ \text{mK}$  以下、 $40\ \text{mK}$  までの温度範囲で熱抵抗を測定した。

### 3. 結果と考察

実験セルから  $^4\text{He}$  を抜いた空セルの熱抵抗 (バックグラウンド熱抵抗) を測定した。バックグラウンド熱抵抗は、各サンプルで得られた熱抵抗値よりも  $1$  桁から  $2$  桁大きい。すべてのサンプルにおいて、最低温度まで温度のべき乗で単調に増加する熱抵抗を観測した。そこで、各サンプルの熱抵抗値からバックグラウンド熱抵抗を差し引いて比較した。図 1 は、 $0.07\ \mu\text{m}$ 、 $0.13\ \mu\text{m}$  銀焼結体および銀板の熱抵抗を温度のべき乗でフィットしたものである。銀焼結体のない銀板サンプルの表面は、サンドペーパーで粗くしている。銀板や銀焼結体表面は、比較的粗いと考えられ、およそ  $100\ \text{mK}$  より高温では、音響不整合理論の予測よりも極めて小さな熱抵抗、異常カピツァ抵抗が期待される [7]。しかし、いずれのサンプルでも異常カピツァ抵抗は観測されなかった。銀板の表面積は、 $10^4\ \text{m}^2$  程度であり、銀焼結体の表面積の方がはるかに大きい。しかし観測した熱抵抗の差は表面積の差を反映するほど大きくはない。以上から、銀焼結体の

微細構造のもつ大きな表面積が、超流動  $^4\text{He}$  との熱交換に有効に働いていないと言える。走査型電子顕微鏡による表面観察から、銀焼結体表面には、大きさが  $0.1\ \mu\text{m}$  から  $1\ \mu\text{m}$  程度の構造が分布していることがわかっている [4,6]。一方、 $1\ \text{K}$  以下になると、超流動  $^4\text{He}$  のフォノンの平均自由行程はミリオオーダー以上まで大きくなる。これらの事実を踏まえると、超流動  $^4\text{He}$  のフォノンにとって、銀焼結体は、もはやバルクのように振る舞うため、その表面の粗さや、微細構造が熱交換に寄与しなくなると考えられる [4]。

### 4. まとめ

現状の銀焼結体では、超流動  $^4\text{He}$  を効率的に超低温に冷却することができないことがわかった。銀焼結体あるいは、熱交換器表面の構造サイズを少なくとも、 $0.13\ \mu\text{m}$  より極めて大きくすることで超流動  $^4\text{He}$  の超低温冷却を効率化できると期待できる。

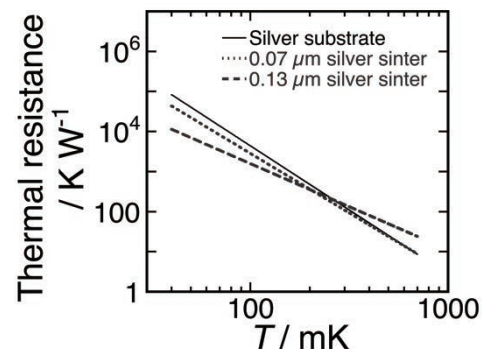


Fig.1 Temperature power-fit data of the thermal resistances of the silver substrate, the  $0.07\ \mu\text{m}$  and  $0.13\ \mu\text{m}$  sinters with a thickness of about  $4\ \text{mm}$  to superfluid  $^4\text{He}$  as a function of liquid  $^4\text{He}$  temperature obtained at a pressure of  $170\ \text{kPa}$ .

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP19K04251 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 坪田誠、笠松健一、小林未知数、竹内宏光、「量子流体力学」(丸善出版、2018)
- V. Vadakkumbatt *et al.*, Rev. Phys. D **104**, (2021) 082001
- W. Schreyer *et al.*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A **959**, (2020) 163525
- H. Nakagawa, Cryogenics **132**, (2023) 103690.
- H. Nakagawa, Abstracts of CSSJ Conference **104**, (2022) 90.
- H. Nakagawa, Y. Miseki and M. Akoshima, Cryogenics **102**, (2019) 1 – 8.
- T. Nakayama, Prog. in Low Temp. Phys. **XII**, (1989) Chap. 3 115 – 194.

# ILC に向けたクライオモジュール RF テストステーションの開発

## Development of the RF test station for ILC cryomodules

中西 功太, 結束 汐織, 清水 洋孝, 仲井 浩孝, 原 和文, 本間輝也(KEK)

NAKANISHI Kota, KESSOKU Shiori, SHIMIZU Hirotaka, NAKAI Hirotaka, HARA Kazufumi, HONMA Teruya(KEK)

E-mail: kota.nakanishi@kek.jp

### 1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC)の実現を目指し、技術開発を進める国際的な取り組み「ILC テクノロジーネットワーク(ITN)」が始まった。国内での取り組みの一つとして、超伝導加速空洞を8台から9台搭載したクライオモジュールが、少なくとも1台製造されテストされることになっている。このテストはクライオモジュールの断熱性能と、超伝導空洞のRF特性について評価する計画となっている。これらの設備のうち、ヘリウム液化冷凍機と断熱配管を含む極低温設備について検討を行った。

### 2. ITN

計画されている ILC は運用開始段階で 20km の長さを持つ大型の直線加速器である。この加速器には約 9000 台の超伝導加速空洞が組み込まれ、地上で 8 台から 9 台の空洞を内蔵した断熱真空容器である全長約 12m クライオモジュールとして組み立てられた後に地下の加速器トンネルに搬入され、トンネル内で接続されて 2.5 km 程度の長さの一体となった構造体になる設計である[1][2]。ITN のテストステーションではクライオモジュール 1 台を冷却して試験することを目的としている。

### 3. 冷凍設備

テストステーションで使用する冷凍機は 2018 年に KEK のつくばキャンパス内の COI 棟に設置された既存のヘリウム液化冷凍機(Linde 社製 LR280)を流用する。Fig.1 に示すように、この冷凍機は液化ヘリウムをデュアーに供給するだけでなく、室温から液化ヘリウム温度までの任意の温度のヘリウムガスを取り出すことができるようになっており、クライオモジュールの冷却開始時に冷却速度を制御することができる。また、第一タービン入り口から、40K のヘリウムガスを抜き取ることができるので、これを輻射シールドを冷却するために利用することもできる。ILC では輻射シールドの冷却に液化窒素を使用せず、ヘリウムガスを利用する計画であることから、テストステーションにおいても、この 40K のヘリウムガスを輻射シールドの冷却に使用することとする。

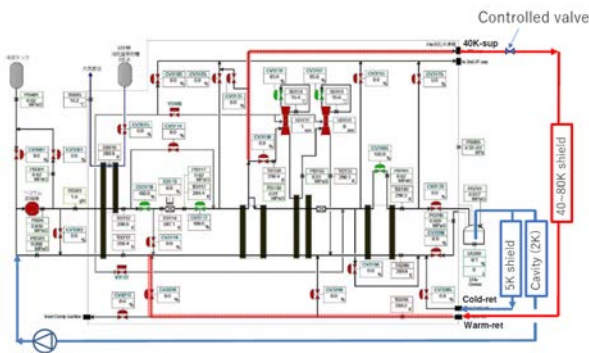


Fig.1 Flow diagram of Helium refrigerator

現段階ではILCの冷凍システムは冷凍保安規則で運用される可能性が高く、ITNで製作されるクライオモジュールは冷凍保安規則に則って製造される。したがって、冷凍設備も冷凍保安規則に対応するべきであるが、既設機器は一般高圧ガ

ス保安規則に則って建設されているので、法的な対応を変更するための手続きも進めていく予定である。

### 4. クライオモジュール

1台のクライオモジュールには8~9台のニオブ製超伝導空洞がインストールされ、飽和超流動ヘリウムにより2Kに冷却される。クライオモジュール内には2K以外にも5Kの温度定点が設けられるほかに、40~80Kの輻射シールドも施工される。これらの温度領域はそれぞれヘリウムの閉ループとして冷却される。それぞれの温度領域に想定される静的な侵入熱は約75W,11W,1.3Wである。高周波電力を投入した際には加えて、59W,5W,10Wの入熱の増加が想定されている[1]。計画通りの性能が得られなかった場合や、定格以上の高周波電力を投入する試験が行われる可能性も考慮し、熱負荷の見積りに対し十分に余裕をもってテストスタンドの冷凍設備を計画する必要がある。

### 5. トランスファーライン

テストスタンドはKEKつくばキャンパス内に設置済みのLR280を流用することをすでに述べた。一方でクライオモジュールは測定中に放射線が出るためにコンクリートシールド内に設置する必要があり、設置場所が確定している。これらの設備間をつなぐために、100m程度の配管が必要である。KEKでは、これまでKEKB、STF、cERLのそれぞれの加速器に液化ヘリウムを供給するために使用してきたトランスファーラインの実績があるが、これまでは液化窒素を輻射シールドに使用する設計であった[3]。40Kのヘリウムを輻射シールドの冷却に使用するため、fig.2のようにシールド冷却用の配管径を大きくしたり、往路をシールドパネルに接触しないようにしたり設計変更を行った。

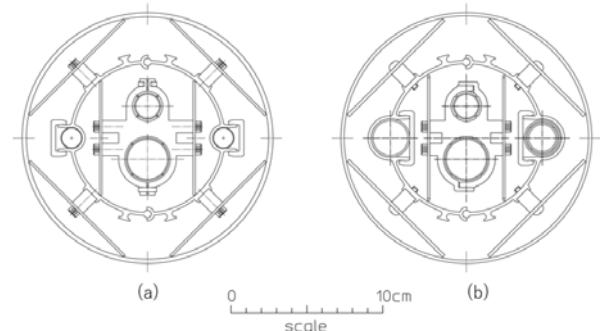


Fig.2 Cross-sectional view of transfer lines. (a) Shield cooling with liquefied nitrogen (b) Shield cooling with helium gas

### 参考文献

1. ILC Technical Design Report (2013). <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
2. Evans Lyn, Michizono Shinichiro.: arXiv:1711.00568
3. K.Hosoyama, et. al., "Development of a High Performance Transfer Line System", Advances in Cryogenic Engineering, Vol 45, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 1395, 2000.

# SuperKEKB QCS クライオスタット断熱真空槽の真空度とリーク試験

## Vacuum and leak test of the thermal insulation vacuum chamber of the SuperKEKB QCS cryostats

宗占国, 大内徳人, 有本靖, 大木俊征, 青木和之, 王旭東(高エネルギー加速器研究機構);  
遠藤友成(株式会社 日立テクノロジーアンドサービス)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, OKI Toshiyuki, AOKI Kazuyuki, WANG Xudong (KEK);  
ENDO Tomonari (Hitachi TS)  
E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

### 1. はじめに

The SuperKEKB final focusing SC magnets (QCS) are cooled at 4.5 K with subcooled liquid helium and accommodated inside two cryostats which employ multilayer insulations (MLI) in their vacuum chambers evacuated to pressures below 10 mPa for an effective thermal performance [1]. The vacuum of the QCS cryostat chambers was maintained below the pressure level with our extensive efforts during the cryostat operations of 28 000 hours in the past 5 years, which will be presented in this paper. However, there was a potential leak of the QCS-R cryostat from the ambient atmosphere. During the accelerator's long shutdown period in 2022 and 2023 (LS1), a comprehensive helium leak test was performed to each O-ring connection part of the cryostats and this paper presents the leak test results.

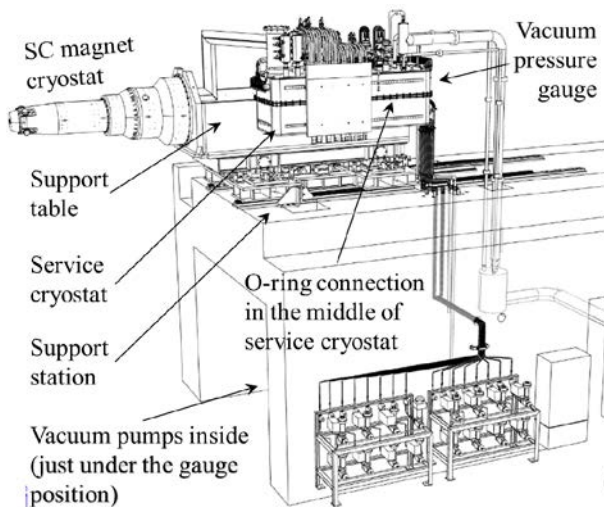


Fig. 1 Set-up of the QCS-L cryostat with the vacuum pressure gauge and pumps.

### 2. 運転中のクライオスタット真空

The QCS sc magnet cryostats were designed to be cantilevered (as indicated for the QCS-L cryostat in Fig. 1) from their own support tables over the inner space of the Belle II detector and the vacuum chambers were evacuated through a port in the service cryostat rear side by pumps just under the accelerator tunnel. A pressure gauge was set up at the port to monitor the vacuum pressure levels, and the vacuum evolutions are depicted in Fig. 2 for each operation period before and after cooling down (at 300 K and 4.5 K). In the normal operation state at 4.5 K, the vacuum levels of both cryostats were below  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa with the aid of the cryo-absorption effect. But at 300 K (just before cooling down), a level below 10 mPa necessitated some additional measurements, such as an enhancement of the pump

capacities for the QCS-R cryostat and baking. Once we analyzed the outgas components from the QCS-R vacuum chamber, which coincided with those of air. A possibility was that in Oct. 2017 just after the commissioning operation, we opened the QCS cryostats at the accelerator tunnel with limited assembling conditions and re-used all the O-rings, which might cause some small leaks somewhere. So, we decided to perform a comprehensive helium leak test to the cryostats in the LS1.

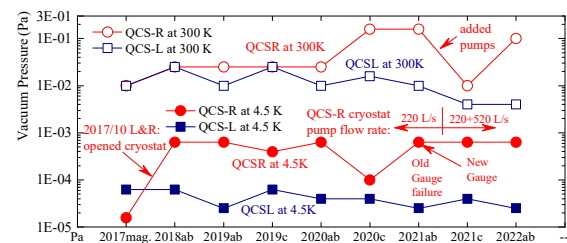


Fig. 2 Evolutions of the QCS cryostats at 300 and 4.5 K.

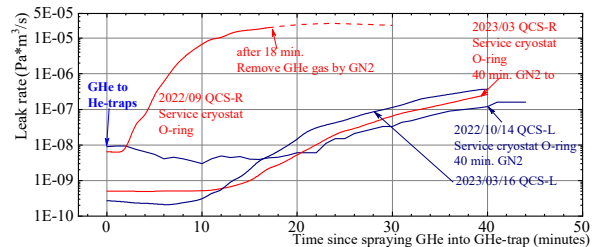


Fig. 3 Leak rates of the O-ring connection in the middle of the QCS service cryostats.

### 3. リーク試験とOリング交換

As the QCS cryostats have a large volume, we made a helium trap (or hood) to cover each O-ring connection for a long time of helium availability (>20 min.) and enhanced the pumping capacity of the helium detector by connecting the pumps in series. Finally, we found that the O-ring connection (length: > 7 m) in the middle of the QCS-R service cryostat had a leak rate of  $2.5 \times 10^{-5}$  Pa $\times$ m<sup>3</sup>/s, which was two orders of magnitude higher than that of the QCS-L side as a reference with the same specifications to distinguish a leakage from permeation, as depicted in Fig. 3. In Spring 2023, we carefully replaced the O-ring and after that the QCS-R side had almost the same detect rate below  $4.0 \times 10^{-7}$  Pa $\times$ m<sup>3</sup>/s with the QCS-L side. All other O-ring connections were also confirmed to have a leak level below the above level.

### 参考文献

- R. F. Barron, et al.: Cryogenic Heat Transfer (2nd ed.). CRC Press (2016) p.47.

# 超電導・極低温機器の安全と信頼性のアンケート実施に向けた アンケートWGの活動

## Activities of the survey working group towards questionnaire concerning safety and reliability of the superconducting / cryogenic equipment

鷺山 玲子(東大); 伊藤 聡(JASTEC);  
 三戸 利行(NIFS); 榎田 康博(KEK); 平井 寛一(大陽日酸); 池内 正充(前川); 淵野 修一郎(東大)  
 SAGIYAMA Reiko(Tokyo Univ.); ITO Satoshi(JASTEC);  
 MITO Toshiyuki(NIFS); MAKIDA Yasuhiro(KEK); HIRAI Hirokazu(TAIYO NIPPON SAN SO);  
 IKEUCHI Masamitsu(MAYEKAWA); FUCHINO Syuichiro (Tokyo Univ.)  
 E-mail: sagiyama@issp.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

第104回2022年度秋季低温工学・超電導学会で「超電導・極低温機器の安全と信頼性のアンケート実施について」の発表を行った[1]が、その後の活動に関して報告を行う。

### 2. 冷却システム検討会/環境・安全委員会合同検討会議

アンケートは、将来の超電導技術の標準化や安全テキストの作成に寄与するためのものと考えており、具体的な内容検討のため2023年1月30日に環境・安全委員会、及び、つくば超電導応用コンステレーションズ(ASCOT)の二つのグループで共同検討会を実施した。その中で、

- ・安全と信頼性は両立するのか
- ・メーカー、ユーザーの立場で安全と信頼性の認識は異なる
- ・これまで極低温で使われてきたヘリウムや窒素は不活性だが、今後の拡大が望まれる水素は可燃性であり、リスクの認識が異なる

など、アンケートを実施する際の課題が提起された。

### 3. WGの設置

上記の議論、および、当日時間切れで発言できなかった方々にも意見を伺った結果、内容を深めて有用なアンケートを実施するためには集中的に議論をする場が必要、との結論に至り、学会事務局にもアドバイスを得て、環境・安全委員会の下にワーキンググループ(以下WG)を設立し、継続して議論を続けていくこととした。

効率的かつ集中的な議論を進めるため、対面での出席が可能な方からユーザー3名、メーカー3名、中立1名の計7名(うち環境・安全委員3名)の方々に参加を依頼し、環境・安全委員会の承認(5月31日)を得て、WGを設置した。WGの委員長には淵野氏(東大)を選出した。

### 4. WGでの検討内容

#### 4.1 安全と安心と信頼性

第1回のWGでは、認識を統一して議論を進めるため、使用する用語を以下のように明確に定義した。

- ・安全(safety)とは、人への危害又は資(機)材の損傷の危険性が、許容可能な水準に抑えられている状態[2]
- ・信頼性(reliability)とは、アイテムが与えられた条件の下で、与えられた期間、要求機能を遂行できる能力[2]

なお、安心という言葉は日本独自の言葉で、英語でもPeace of mind, Relief, Sense of security など、適切な訳語もないとされる。また、安心は定量的評価になじまず、例えば、機器の安全や信頼性を定量的に向上させても、安心の醸成には必ずしも寄与しないことから明らかである。さらに安全×信頼=安心という説明がなされている文献もある[3]が、必ずしも定量的な説明がなされていない。そのため、安全と信頼性のアンケート実施に関する議論からは除外することが適当であるとの認識に至った。

これらの検討をもとにした安全・信頼性・安心のイメージをFig.1に示す。

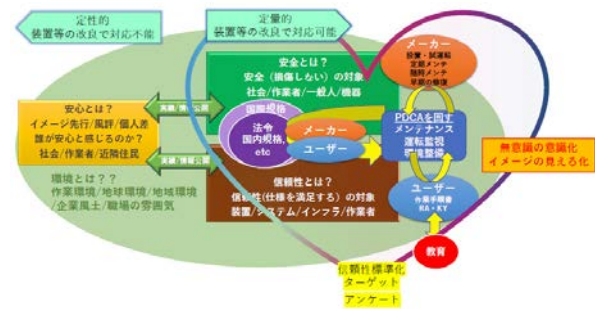


Fig.1 Image of safety, reliability, and peace of mind in the working group

#### 4.2 アンケート検討の前提

以下の前提を踏まえてアンケート項目を考えていくこととしている。

- ・今後実用化が期待される超電導機器の多くは超電導ケーブル、変圧器、交通などインフラ施設への導入がメインとなると考えられる
- ・インフラ設備としての高い安全と信頼性が求められる
- ・超電導機器及び冷凍設備などは、専門知識を有する技術者がユーザーとなり、十分な運転・監視・メンテナンスが行われる
- ・従って、安全と信頼性の向上には、メーカー(機器)とユーザー(作業・メンテ)の両方が協力していくことが必要(Fig.1)

#### 5. 今後の作業予定

- 具体的なアンケート案について検討中である。例えば、
- ・アンケートは、安全と信頼性を分けずに設問し、回収した回答を見てWG内で分類する
- ・回答者の負担を減らすため、具体的な選択肢を設け、不足したキーワードを書いてもらう
- ・安全と信頼性を判断するキーワードを回答者に挙げてもらう
- ・回答者のバックグラウンドを記入してもらうことも、アンケートの回答を判断する上で必要である

などの議論を行っている。

本稿ではこれまでの経緯と検討内容について報告を行う。

#### 参考文献

1. M.Ikeuchi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.93
2. 日本規格協会, JIS ハンドブック ディペンダビリティ用語 JIS Z 8115:2000
3. 日本学術会議 総合工学委員会・機械工学委員会 合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会編, 工学システムに対する安心感と社会, (2020)P.2

Nb<sub>3</sub>Sn を模擬した横圧縮変形におけるひずみ分布の予測Prediction of strain distribution in transverse compressive deformation simulating Nb<sub>3</sub>Sn

片山 翔太(大同大学 院), 町屋 修太郎(大同大学); 菅野 未知央(KEK); 淡路 智(東北大学金材研)  
 KATAYAMA Shota(Daido univ.), MACHIYA Shutaro (Daido univ.); SUGANO Michinaka (KEK);  
 AWAJI Satoshi (Tohoku univ.)  
 E-mail: dmm2303@stumail.daido-it.ac.jp

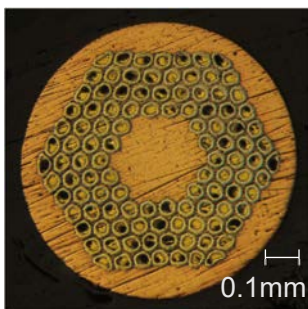
## 1. はじめに

欧州合同原子核研究機関(CERN)における大型ハドロン衝突型加速器(Large Hadron Collider,LHC)加速器では、現行の加速器を周期 100km, 衝突エネルギー100 TeV まで大型化及び高エネルギー化する Future Circular Collider(FCC)が進められている。しかし実現には、双極磁石を 16 T の Nb<sub>3</sub>Sn 双極磁石へと大幅に高磁場化する必要があり、引張のみならず横方向からの大きな圧縮力を受けることが開発の段階で示唆されていた。塑性変形領域まで変形することが予想されるが、そのひずみ分布はよく分かっていない。例えば図 1 に示すのは CERN 向けに開発されていた Nb<sub>3</sub>Sn 線材であるが、上下方向と左右方向に応力を加えた時を考えると、それぞれフィラメントのひずみ分布が異なる。また、中央部や端部でもひずみ分布は異なる。

有限要素法での解析も有用ではあるが、接触部の降伏問題と接触応力解析は複雑であり、難しさがある。そこで、まずは単純なモデルで、圧縮時のひずみ分布を理解することから開始することとした。そこでまずはエラストマー、銅を用いて横圧縮実験を行い、画像によるひずみ解析(DIC)によるひずみ分布の実測を行なったので報告したい。

## 2. DIC および実験方法

DIC とは、試験編表面にスプレー等で塗布したランダムパターンと呼ばれる模様の変化を画像解析することで、変形前後の画像を解析し、表面歪分布の時間変化を可視

Fig. 1 Cross-sectional structure of Nb<sub>3</sub>Sn

化する方法である。直径 0.8 mm の銅線、直径 6.5 mm のエラストマーに、スプレーでランダムパターンを塗布し縦方向から圧縮変形を加え変形させる。変形の様子を都度 DIC によって解析し、ひずみ分布の実測を行った。

## 3. 実験結果および考察

銅線は、表面の研磨、ランダムパターンの塗布は成功したもの、パターンの品質が悪く DIC による解析ができないという結果となった。

図 3 にエラストマーの単軸圧縮ひずみ分布解析結果を示す。図中の値は上下方向の工学ひずみを%で示している。単一材であり Nb<sub>3</sub>Sn とは特性が違うが、応力部の広がりに伴いひずみ分布が変化しており、ひずみの変化が視覚的にわかりやすくなっている。また図(c)では中心にのみ大きな圧縮力がかかっており、これより上下方向のみ応力を加えた場合のひずみ分布が推察できる。

結果から Nb<sub>3</sub>Sn 線材のひずみ分布も同様に、中心線に沿った形で大きな圧縮ひずみが発生すると考えられる。ただ電磁力との兼ね合いもあり、実際の磁場による力は断面に均一でないので一律に比較はできない問題はある。

## 4. まとめ

今後の展望として、Nb<sub>3</sub>Sn 線材のフィラメントそのものをランダムパターンとして解析を行うことで、パターンの品質を保ったまま Nb<sub>3</sub>Sn 線材の DIC による解析を行いたいと考えている。

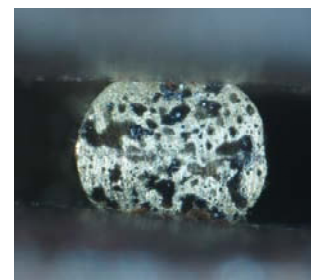


Fig. 2 Strain distribution of copper

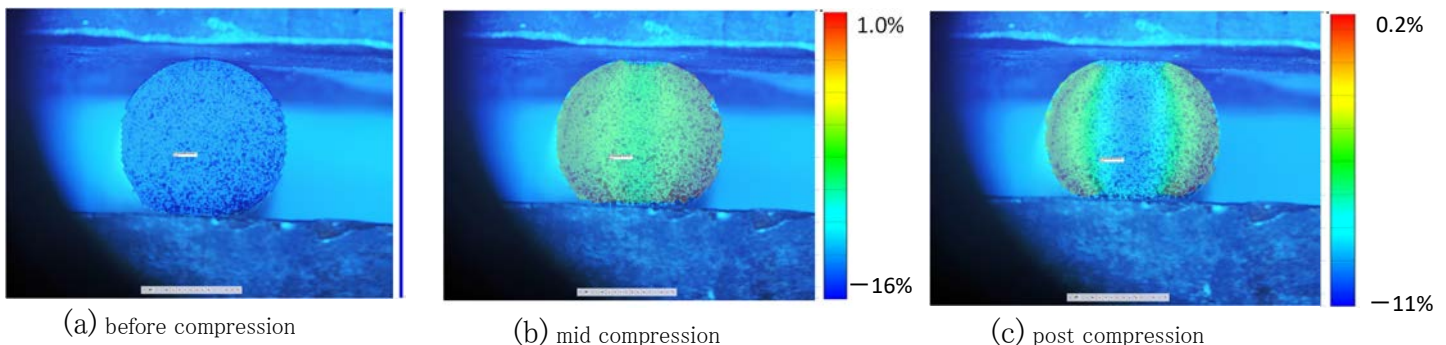


Fig. 3 Strain distribution of elastomer

# マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流 II

## Critical currents of superconducting films in the Meissner state exposed to longitudinal magnetic fields II

(M1) 毛利 誠一, 小田部 荘司(九工大情報工); 馬渡 康徳(産総研)

S. MORI, E. S. Otabe (Kyushu Inst. of Tech); Y. Mawatari (AIST)

E-mail: mouri.seiichi178@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

対破壊電流密度  $J_d$  は、超伝導状態で流すことのできる電流密度の理論限界である。通常観測される臨界電流密度は対破壊電流密度よりも桁違いに小さいことが多いが、厚さが薄くて幅が狭い超伝導ナノストリップにおいて、対破壊電流密度に匹敵する臨界電流密度が実際に観測されている。

我々は、膜面に平行な磁場中の超伝導膜に通電し、Meissner 状態が安定である(すなわち量子化磁束線が発生しない)通電電流の上限として定義した臨界電流について、理論的・数値的に研究を行っている[1]。前回の講演会では、表面磁場に関する考察により、膜厚が磁場侵入長  $\lambda$  より十分厚い超伝導膜における横磁場中  $J_{c\perp}$  および縦磁場中の臨界電流密度  $J_{c\parallel}$  の磁場  $B_a$  依存性は、次のように簡潔に表されることを報告した[1]。

$$J_{c\perp} = J_{c0} \left(1 - \frac{B_a}{B_{sh}}\right) \quad (1)$$

$$J_{c\parallel} = J_{c0} \left[1 - \left(\frac{B_a}{B_{sh}}\right)^2\right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $J_{c0}$  はゼロ磁場中の臨界電流密度および  $B_{sh}$  は過熱磁場である。

本研究では、第二種超伝導膜の膜面に平行に横磁場および縦磁場を印加した場合の Meissner 状態における臨界電流密度  $J_c$  の磁場  $B_a$  および膜厚  $d_s$  依存性について、時間依存 Ginzburg-Landau(GL)方程式に基づく数値シミュレーションにより理論的に考察した。

### 2. 一次元 Ginzburg-Landau モデル

$yz$ 面に平行な無限に広い超伝導薄膜に対し、 $z$ 方向に輸送電流を通電し、かつ $yz$ 面(薄膜面)に平行に外部磁場  $B_a$  を印加する場合を考える。 $B_a$  が $y$ 方向のときは横磁場であり、 $B_a$  が $z$ 方向のときは縦磁場である。

超伝導薄膜内に量子化磁束が存在しない Meissner 状態では、一次元 GL 方程式を満たし、極端な第二種超伝導体の場合、非線形 London 方程式が導かれる[2]。これを通電電流、外部磁場、および磁場角度に関連する境界条件の下で解析して、Meissner 状態が安定である限界として定義される過熱磁場  $B_{sh}$  および臨界電流密度  $J_c$  について考察する。

時間依存 GL 方程式に基づく数値シミュレーションでは、コヒーレンス長  $\xi = 5$  nm、磁場侵入長  $\lambda = 200$  nm、電界基準  $E_c = 1$  mV/m、 $z$  軸に対する磁場の角度  $\theta = 0$  (縦磁場)、 $\pi/2$  (横磁場) などと設定し、磁場  $B_a$  と膜厚  $d_s$  を変化させて  $J_c$  を求めた。

### 3. 計算結果及び考察

縦磁場中における一次元時間依存 GL 方程式を解いた結果を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 では、縦軸は臨界電流密度  $J_c$ 、横軸は磁場  $B_a$  である。また、Fig. 2 では、縦軸はゼロ磁場での臨界電流密度  $J_{c0}$  で規格化した臨界電流密度、横軸は過熱磁場  $B_{sh}$  で規格化した磁場である。

縦磁場中  $J_c$  は、横磁場中  $J_c$  より常に大きい。縦磁場中では、膜厚が薄い場合、臨界電流密度  $J_c$  外部磁場  $B_a$  に対して緩やかに減少し、磁場依存性が弱く、高い磁場まで Meissner 状態が維持される。一方、膜厚が厚い場合、ゼロ磁

場での  $J_c$  は小さく、磁場の増加に対して  $J_c$  が急激に減少する。

ゼロ磁場中の臨界電流密度  $J_{c0}$  と過熱磁場  $B_{sh}$  について、膜厚が薄い( $d_s \leq \lambda$ )場合、 $J_{c0} \sim J_d$ 、 $B_{sh} \sim (\lambda/d_s) B_c$  であり、膜厚が厚い( $d_s \gg \lambda$ )場合、 $J_{c0} \sim (\lambda/d_s) J_d$ 、 $B_{sh} \sim B_c$  である。ここで、 $B_c$  は熱力学的臨界磁場である。

Fig. 2 に示した規格化した  $J_c/J_{c0}$  と  $B_a/B_{sh}$  では、膜厚が薄い( $d_s \leq \lambda$ )場合、 $J_{c\parallel} \sim J_d$ 、 $B_{sh} \sim B_c$  のため磁場依存性は弱い。膜厚が厚い( $d_s \gg \lambda$ )場合、(2)式の理論によく合う。

横磁場中における一次元時間依存 GL 方程式による数値シミュレーション結果との比較は、ポスターで示す。

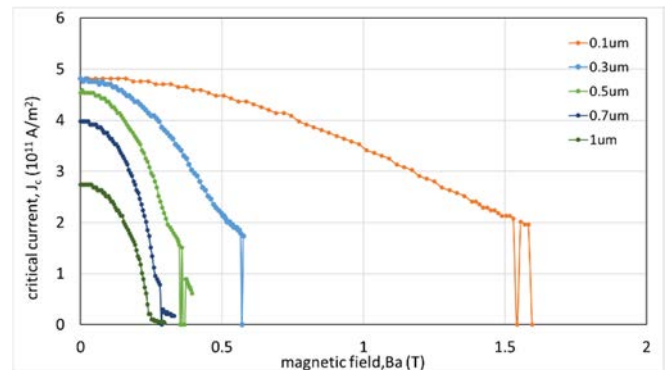


Fig. 1: Critical current density in longitudinal magnetic field

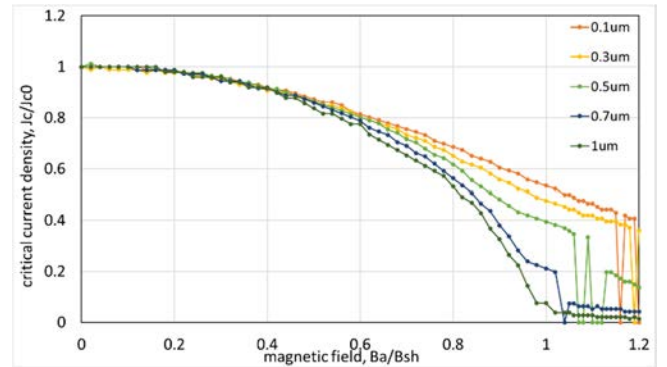


Fig. 2: Normalized critical current density in longitudinal magnetic field

### 4. まとめ

第二種超伝導薄膜に横磁場および縦磁場を印加して通電し、Meissner 状態が安定である限界として定義した臨界電流密度  $J_c$  について、一次元時間依存 GL 方程式による数値計算を行い、臨界電流密度  $J_c$  の磁場  $B_a$  依存性および膜厚  $d_s$  依存性について考察した。

本研究は、JSPS 科研費 20K05314 の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] 馬渡, 2023 年度春季第 105 回低温工学・超伝導学会研究発表会, 1B-a05 (2023).
- [2] P.G. de Gennes, Solid Stat. Commun. 3, 127 (1965).



## 超電導複合導体の流入部の電流分布の解析(3)

## Analysis of current distribution in the inflow section of a superconducting composite cable(3)

高橋 正希, 田中 祥貴(福岡工大); 岩熊 成卓(九大); 井上 昌睦(福岡工大)

TAKAHASHI Masaki, TANAKA Yoshiki (Fukuoka Inst. Tech.);  
IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)

E-mail: mem22104@bene.fit.ac.jp

## 1. はじめに

超電導線材と銅やアルミニウムなどの低抵抗材料から成る複合導体は、超電導回転機などの大電流デバイスや核融合用高磁場磁石用に開発されている。複合導体の開発において、超電導線材への電流流入口付近の局所的な発熱が問題となっている。我々はこれまで、超電導複合導体の接合抵抗による電界発生と電流の流れ込み距離について、電流電界 ( $I-E$ ) 特性の実験及び有限要素解析から評価を行ってきた[1]。今回、REBCO 線材を複数束ね、その上に、安定化材を接合した構造の複合導体の電流分布を実験及び有限要素解析により得ることを試みた。

## 2. 実験

超電導線材には銅安定化材のコーティングが施された Super Power 社製の REBCO 線材(SCS2030-AP)を用いた。幅は 2 mm であり、50 mm の長さに切り出し使用した。この線材 2 枚と厚さ 500  $\mu\text{m}$  の銅板をはんだ接合した積層導体を試料とし、通電測定を行った。REBCO 線材は超電導層側の銅安定化材表面が銅板と向き合うように配置した。その概要図を Fig. 1 に示す。

$I-E$  測定は液体窒素、自己磁場中で行った。電圧端子は銀ペーストを用いて銅板表面に取り付け、電流端子については銅板と電流端子間にインジウムを挟み機械的圧着で形成した。電圧端子間及び電流端子間の距離は、それぞれ 6 mm と 50 mm である。

## 3. 実験結果

複合導体の  $I-E$  特性を Fig. 2 に○で示す。図中に□で示した線材 1 枚の  $I-E$  特性から臨界電流  $I_c$  を求めると 81 A であった。複合導体においては、線材 1 枚の  $I_c$  を超えたあたりから電圧が発生し始めている。その後、 $10^{-3} \text{V/m}$  付近でキック特性を示しながら線材 2 枚分に相当する  $I-E$  特性へと推移していることが分かる。また、 $I_c$  未達の低電界領域で線形抵抗が観察されている。このときのみかけ上の抵抗は  $0.51 \mu\Omega/\text{m}$  であった。この線形抵抗と  $I-E$  特性のキックは、それぞれ銅板と一層目の線材間、一層目と二層目の線材間の接合抵抗によるものと考えられる。すなわち、銅板から流入させた電流は比較的長い距離を経て二層目の REBCO 線材へと流れ込んでいるものと考えられる。

有限要素法による各種パラメータの算出や電流の分流解析についても取り組んでいるので当日発表する。

## 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務、並びに JSPS 科研費 JP22H01928、JP22H02019の結果得られたものである。

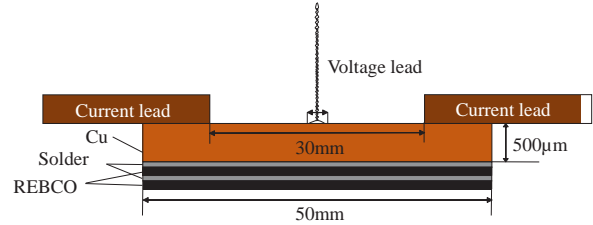


Fig. 1 Schematic of a measurement sample

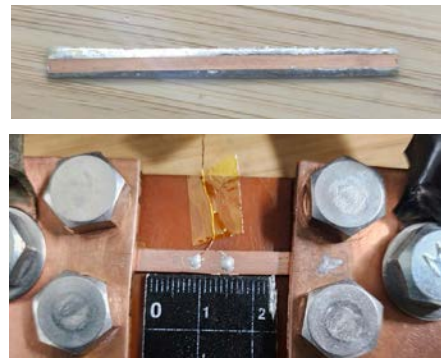
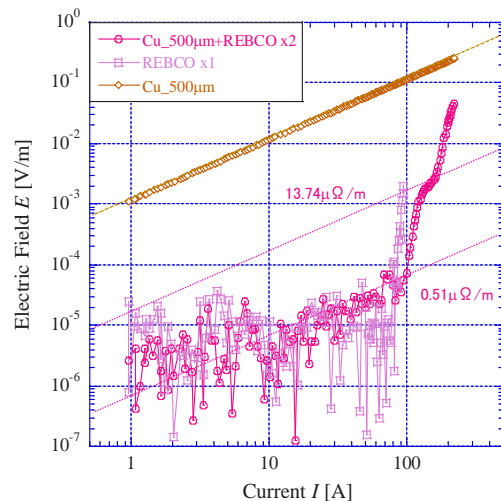


Fig. 2 Photographs of a conductor sample and measurement set-up

Fig. 3  $I-E$  characteristics at 77 K, self-field

## 参考文献

1. M. Takahashi, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol.105 (2023) p. 84

# Zr をパターニングした基板上に形成した REBCO 薄膜の臨界電流特性 (3)

## Critical current properties of REBCO thin films on Zr-patterned substrate (3)

白土 裕一朗, 酒井 秀哉, 田中 祥貴(福岡工大); 松本 明善(NIMS); 井上 昌睦(福岡工大)

SHIRATSUCHI Yuichiro, SAKAI Shuya, TANAKA Yoshiki (Fukuoka Inst. Tech); MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS);  
INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech)

E-mail: mem23111@bene.fit.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超電導線材の電力機器への応用においては、交流損失の低減が重要な課題となっている。我々は、フォトリソグラフィ技術を用いてバンクと呼ぶ線状の金属 (Zr, Nb 等) をパターニングすることで超電導層を分離する細線化手法に取り組んでいる。今回は、試料中央に直線状の Zr バンクを形成した超電導薄膜の面内の捕捉磁場分布を計測し、分離を示唆する結果が得られた[1]。今回は、試料中央のバンク部分にブリッジ加工を施し、通電試験による分離状態の検証を行ったのでその結果について報告する。

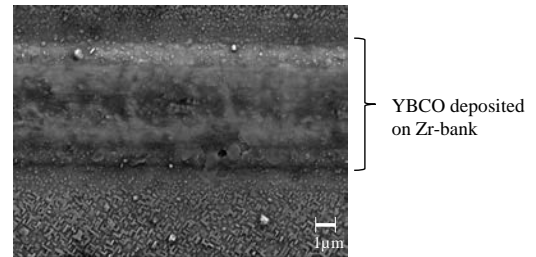


Fig. 1 Scanning electron microscope image near the bank

### 2. 実験方法

REBCO 薄膜を中央で二分割するよう SrTiO<sub>3</sub> 基板上に幅 5 μm のマスクパターンを用いて Zr バンクを形成した。その後、基板上に YBCO 薄膜をパルスレーザー蒸着法にて成膜した。Fig. 1 にバンク付近の SEM 像を示す。バンク上に成膜された YBCO は粒径が大きく、配向が乱れていた。

マイクロブリッジ加工にはフォトリソグラフィ及びエッチング技術を用いた。Fig. 2 に形成したマイクロブリッジの模式図を示す。マイクロブリッジは、幅と長さともに 500 μm であり、バンク上を通るブリッジと超電導面のみを通るブリッジを作製した。電流電圧 ( $I$ - $V$ ) 測定は、物理特性測定システム (PPMS) を用いて行った。300 K の電圧端子間の抵抗は、それぞれ、90 Ω 及び 80 Ω 程度であった。

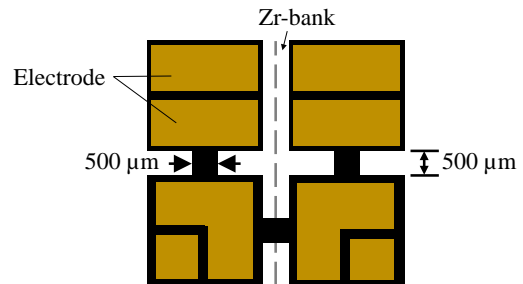


Fig. 2 Schematic of 4-probe measurement pattern

### 3. 結果及び考察

Fig. 3 に  $I$ - $V$  特性の温度依存性を示す。 $T_c$  近傍の 90 K では、いずれも線形に近い特性を示しており、その抵抗値も 10 Ω 程度でほぼ等しかった。温度の低下とともに両ブリッジとも抵抗が急激に小さくなっているが、Zr バンクを有するブリッジの方が抵抗の減少率が小さい。このことは、超電導体の占有率が低いことを示唆している。一方、87.5 K まで冷却すると  $I$ - $V$  特性は上に凸を示しており、バンク領域には完全な非超電導相が形成されていないように見える。これらの結果より、バンク上に形成された YBCO は全面にわたる非超電導相ではなく、局部的に超伝導層が形成されているか、もしくは低傾角粒界によってつながっている可能性が考えられる。

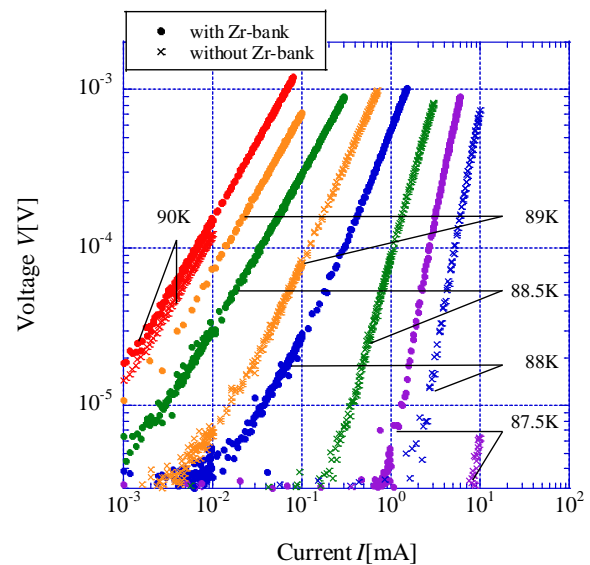


Fig. 3  $I$ - $V$  characteristics of micro-bridges with or w/o Zr-bank in various temperatures

### 謝辞

本研究で作製したデバイスの作製行程の一部は NIMS 並木ファウンドリにて行った。また、本研究の一部は NIMS の Joint Research Hub Program 及び、JSPS 科研費 JP22H02019, JP22H02021 の支援により得られたものである。

### 参考文献

1. Y. SHIRATSUCHI, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 85

# REBCO 線材の臨界電流と層間抵抗率の加熱温度・時間依存性評価

## Evaluation of heating temperature and time duration dependence of critical current and interfacial resistivity in REBCO tapes

伊藤 悟, 阿竹 洋輔, 佐藤 光一, 橋爪 秀利(東北大)

ITO Satoshi, ATAKE Yosuke, SATO Koichi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.ito.e3@tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材を半田付けなどで接合する場合、接合に用いる半田材料自体の抵抗や半田/線材の接合界面抵抗に加えて、REBCO 線材内部の抵抗が接合抵抗として現れる。REBCO 線材内部には銀保護層、銅安定化層のバルク抵抗および REBCO/銀、銀/銅界面の層間抵抗が存在し、特に良好な接合では、線材内部の層間抵抗が接合抵抗に対して支配的になる。銅安定化層付 REBCO 線材は、200°Cを超える温度で臨界電流( $I_c$ )が低下し始めることが知られており、最近の半田付けの研究[1]においては、臨界電流の低下と接合抵抗の上昇に相関があることも示されている。この接合抵抗の上昇が、REBCO 線材内の層間抵抗増加に起因していることを直接示すために、本研究では、REBCO 線材の  $I_c$ 、層間抵抗の加熱温度・加熱時間依存性を実験的に評価した。

### 2. 実験方法

本実験では、SuperPower 社製の 4 mm 幅銅安定化層付き REBCO 線材 (SCS4050-A,  $I_c=115$  A at 77 K, s.f.) をサンプルとして用いた。REBCO 線材は、大気環境でホットプレート上で加熱し、加熱温度 (200°C, 250°C, 300°C)、加熱時間を変化させたサンプルを複数作製した。各サンプルに対して、液体窒素冷却、自己磁場環境にて 4 端子法で  $I_c$  を評価し、同環境で層間抵抗率  $r_b$  (=層間抵抗×界面面積: 単位  $n\Omega\text{cm}^2$ ) を評価した。 $r_b$  の評価には、Fig. 1 に示す Contact-probing CTL 法[2-5]を用いた。これは電流が REBCO 層に転流する部分の表面電位を測定することで、 $r_b$  を求める非破壊評価法である。初期電位から  $1/e$  に減少する距離を転流距離  $\lambda$  とし、別途、数値解析で求めた  $r_b$  と  $\lambda$  の関係から  $r_b$  を算出した。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 に  $I_c$  と  $r_b$  の加熱温度、加熱時間依存性を示す(なお、300°Cの結果は文献[5]でも報告している)。加熱温度、加熱時間の増加とともに、 $I_c$  は単調減少、 $r_b$  は単調増加した。本結果に基づくと、REBCO 線材の半田付けは 250°Cなら数分以内、200°Cなら 10 分程度の作業時間で完了する必要がある(300°Cは不適)。Fig. 3 に  $I_c$  低下( $\Delta I_c=I_{c0}-I_c$ ,  $I_{c0}$ : 加熱なし線材の  $I_c$ )と  $r_b$  上昇( $\Delta r_b=r_b-r_{b0}$ ,  $r_{b0}$ : 加熱なし線材の  $r_b$ )の関係性を示す。 $\Delta I_c$  と  $\Delta r_b$  には正の相関があり、この結果は、加熱温度、加熱時間に関わらず  $I_c$  低下によって  $r_b$  上昇が推測できることを示唆している。 $I_c$  低下は加熱による酸素拡散による REBCO の酸素欠損によって引き起こされていると考えられ、層間抵抗上昇も加熱による界面付近の REBCO の酸素欠損 (REBCO の非超伝導化) が引き起こしていると推測される。

### 4. まとめ

加熱温度・加熱時間の増加にともなう REBCO 線材の  $I_c$  低下と  $r_b$  上昇には正の相関があり、半田付けの加熱プロセスによって  $I_c$  が低下した場合、低下した  $I_c$  以下の電流で用いても、 $r_b$  の増加によって接合抵抗は増加してしまう。 $I_c$  低下と  $r_b$  上昇は REBCO 層の酸素欠損が関係していると考えられるため、今後は、REBCO 層の酸素欠損領域の定量評価に基づき、 $I_c$  低下と  $r_b$  上昇を説明するモデルの構築を目指す予定である。

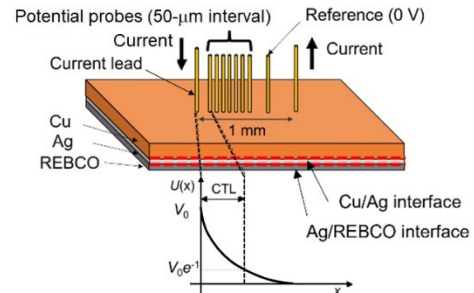


Fig. 1 Contact-probing current transfer length (CTL) method for evaluation of interfacial resistivity inside REBCO tapes.

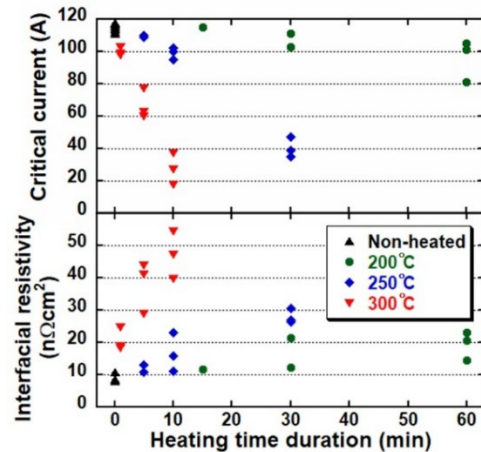


Fig. 2 Critical current and interfacial resistivity as a function of heating time duration.

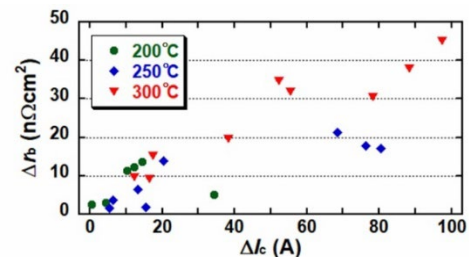


Fig. 3 Relationship between a decrease in critical current ( $\Delta I_c$ ) and an increase in interfacial resistivity ( $\Delta r_b$ ).

### 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 の支援を受けたものです。

### 参考文献

1. J. Lu et al.: Supercond. Sci. Technol., vol. 34 (2021) Art. no. 075004
2. R. Hayasaka et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) Art. no. 9000805
3. S. Ito et al.: Nucl. Fusion, Vol. 61 (2021) Art. no. 115002
4. Y. Atake et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) Art. no. 4803205
5. Y. Atake et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33 (2023) Art. no. 6600604

# 実用 REBCO 線材の断面形状と真応力

## Cross-sectional shape and true stress of practical REBCO wire

佐藤 倅希(大同大学院); 町屋 修太郎(大同大学); 長村 光造(応用科学研); SHIN Hyung-Seop(安東大学)  
 Sato Koki(Daido univ.); Machiya Shutaro (Daido univ.); Osamura Kozo (RIAS); SHIN Hyung-Seop (ANU)  
 E-mail: dmm2305@stumail.daido-it.ac.jp

### 1. はじめに

現在、多くの企業が REBCO 線材の開発を行っているが、SuperPower 社が電氣的に銅を全周にわたってつける技術を開発して以来、他社も追従している。力学特性を把握するうえで構成される金属などの組成比率の評価が重要であるが、一方単純なラミネート構造でないため正確な比率の測定が難しくなっている問題がある。実際、低温引張のラウンドロビンテストで問題となっていたのは REBCO 線材の断面積をどうやって決定するかである。測定者間のマイクロメーターによる測定の誤差が大きいことが起因して、測定者間の応力も大きく変動することとなった。

実際はもっと複雑な問題があり、エッジ部分がやや膨らんだり、理想的な長方形断面になっていない線材も多く、マイクロメーターなどでは正確な断面積を求められていないケースもある。そこで実用線材の各メーカーの実用 REBCO 線材の断面写真の撮影と、寸法計測を画像で行った。また、これにより得られた断面積とマイクロメーターでの計測で求めた断面積の差や、それによって生じる応力の差について議論したい。

### 2. 試料

今回は販売を行っている代表的な線材メーカー、REBCO に関しては 4 社、BSCCO に関しては 1 社を選んで断面観察を行った。使用する試料の詳細は表 1 に示す。表中の寸法は平面型のマイクロメーターを用いて独自計測したものである。最大の厚さの点で測定している。

### 3. 実験方法

REBCO 線材を樹脂に埋め込み、エメリー紙研磨ののちに、バフ研磨を行い、表面の研磨を行った。研磨後に、実体顕微鏡にて断面写真撮影を行った。

### 4. 結果

今回 REBCO 線材 4 社と BSCCO 線材 1 社の断面観察を行い、特徴的な断面であった BSCCO 線材(Sumitomo)を図 1 に REBCO 線材については SuperPower を図 2、Fujikura を図 3

に示す。図 2, 3 では、中央部とエッジ部を拡大した断面写真となっている。BSCCO 線材は、中心部はエッジ部と比べ 139% 大きくなっている。一方で REBCO 線材の方は SuperPower では、エッジ部の厚み最大値は中心部の最薄部に比べ 117% となった。Fujikura も同様の傾向があり、こちらは 128% であった。

### 5. まとめ

何社かの REBCO 線材はダンベル状に両端の寸法が増加しており、長方形形状とは言えないものもあり、誤差は小さくない。BSCCO については、よく知られているように、中央部が盛り上がった形状になっており、ともに正確な断面積の計測には画像処理が必須といえる。このような形状の線材の断面積をマイクロメーターで求めた場合、公称値としては過大評価されており、実質の断面積はもっと小さくなる。 $J_c$  としても実効値としてロスしている可能性もあり、伝熱効率も含めて断面形状の均一化は実用フェーズとして重要な課題といえる。



Fig.1 Sumitomo

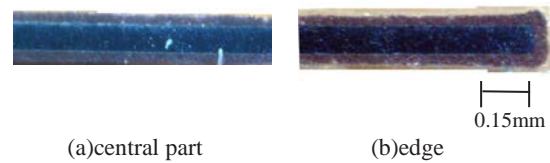


Fig.2 Super Power



Fig.3 Fujikura

Table1 Samples data

System	REBCO	REBCO	REBCO	BSCCO	REBCO
Fabrication Process	IBAD/RCE-DR	IBAD/MOCDV	IBAD/PLD	PT	
SC Material	GdBCO	(Y,Gd)BCO	EuBCO	Bi2223	YBCO
Dimension of SC layer / Filaments	1 μm	1.6 μm	2.2 μm	121 filaments 0.2 x 0.01 mm	
Matrix	LaMnO/IBAD-MgO/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SUS	LaMO Homo-epi MgO/IBAD MgO/Hastelloy	BHO/CeO/IBAD-MgO/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Hastelloy	Ag	
Substrate Thickness (SUS/Hastelloy)	100 μm	100 μm	50 μm	-	40 μm
Barrier	Ag	Ag	Ag	-	Ag
Stabilizer	Cu	Cu	Cu	Ag-Mg	Cu
Reinforcement Material				Ni alloy	
Dimension (t x w)	0.145x4.06 mm <sup>2</sup>	0.085x4.01 mm <sup>2</sup>	0.113x4.06 mm <sup>2</sup>	0.31x4.5 mm <sup>2</sup>	0.058x4.0 mm <sup>2</sup>
Manufacturer	SuNAM	SuperPower	Fujikura	Sumitomo	Faraday

## RE 系コート線材の縦磁界下での電流と磁界の構造

## Current and magnetic field structure of RE coated wire under longitudinal magnetic field

島田 涼平, 木内 勝(九工大)

SHIMADA Ryohei, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.)

E-mail: shimada.ryohei787@mail.kyutech.jp

## 1. はじめに

線材作製技術の向上により高  $J_c$  を有する線材 RE 系コート線材が市販されている。一方で、この RE コート線材においても電流  $I$  の通電方向と外部磁界  $B_e$  が平行な縦磁界下 ( $B_e // I$ ) で、自己磁界を超える  $J_c$  が得られるようになってきた。ただし、作製法や人工ピンの添加等[1]の違いにより縦磁界下で  $J_c$  特性が異なることもわかってきた。従って、縦磁界下での  $J_c$  特性を理解するためにもその決定機構解明が必要であるが、超伝導体内に侵入した磁束線の運動が理解できていない。

酸化物超伝導体は、複雑な結晶構造を有することから、縦磁界下での磁界と電流の構造が金属超伝導体[2]と異なる可能性がある。これまでに RE 系コート線材の縦磁界下の表面電界を一般的に用いられる電界基準の 10 倍の  $1.0 \times 10^3$  V/m までを評価し、電界と磁界の角度差  $\varphi$  を求めたが、自己磁界が大きい低磁界領域では、 $\varphi$  が大きく電流と磁界は平行になっていないことがわかった[3]。この原因として、評価した電界領域では磁束線が完全にフローしていない可能性がある。さらには、電界が線材の形状すなわち線材の長さとの影響を受けている可能性もある。

ここでは RE 系コート線材の測定電界領域と線材のアスペクト比の違いが表面電界構造にどのように影響を与えるのかを直流四端子法を用いた電界  $E$ -電流  $I$  特性の評価から調べた。

## 2. 実験方法

測定に用いたのは市販されている住友電気工業社製の人工ピンなし RE 系コート線材である。自己磁界中の臨界電流  $I_c$  は約 224 A、線材の幅  $w$  は 4 mm で、超伝導層の厚さ  $d$  は 3~4  $\mu\text{m}$  である。線材の長さ  $l$  の影響を調べるために、55 mm と 20 mm の測定を行った。電圧端子は、2.5 mm 間隔の IC コネクターを用いて、低温度はんだで線材に Fig. 1 のように取り付け付けた。55mm に 20 ピン、20mm には 12 ピン取り付け付けた。表面電界及び臨界電流  $I_c$  は、液体窒素中における直流四端子法を用い、電界  $E$ -電流  $I$  特性から評価した。磁界は Bi-2223 超伝導コイルを用いて、線材長手方向と平行に加えた。

線材長手方向の端子から電界  $E_p$ 、幅方向の端子から電界  $E_n$  を測定し、 $\arctan(E_n/E_p)$  から電界の角度  $\alpha$  を求めた。また、外部磁界  $B_e$ 、自己磁界  $B_{\text{self}}$  の合成磁界  $B$  と長手方向の軸となす角から磁界の角度  $\beta$  を求めた。磁界と電界の角度差を  $\varphi = \beta - \alpha$  と定義した。これらの関係を Fig. 2 の挿入図に示す。

## 3. 結果

Fig. 2 に線材長 55 mm の線材中央部の電圧端子 5-6、5-15 における  $\varphi$ - $E$  特性を示す。0.03 T では  $60^\circ$  程度と磁界と電界は大きな角度を示すが、磁界の増加と共に減少し、0.2 T の場合は、 $13^\circ$  と平行に近づく。また、0.03 T では高電界になると、電流量の増加による自己磁界の増加に伴い、 $\varphi$  は 10% 程度増加するが、高電界でもほぼ一定の角度を示す。従って  $1.0 \times 10^3$  V/m の評価においても磁束線はフロー状態であると考えられる。異なる端子でも同様な結果となった。

Fig. 3 に線材長が 55 mm と 20 mm の  $I_c$  と  $\varphi$  の磁界依存性を示す。自己磁界中では 2 つの線材の  $I_c$  は同じ値であるが、磁界の増加と共にわずかに異なるが、20 mm の方が  $I_c$

は大きい。また、磁界の増加と共に線材長 20 mm の方が  $\varphi$  は小さくなっており、平行度は 20 mm の方が高い。すなわち、アスペクト比が小さい方が電流と磁界が平行になりやすく、このために  $I_c$  が大きくなる。更に線材の長さを変えた結果との比較は当日行う。

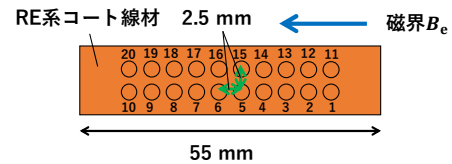
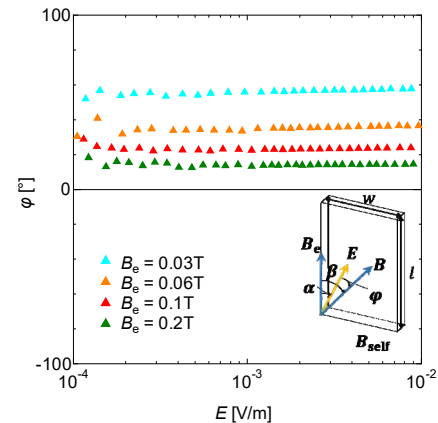
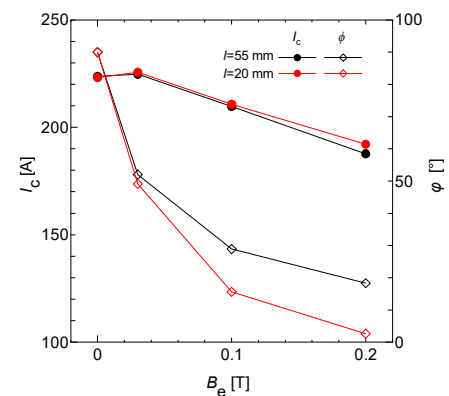


Fig. 1 Schematic diagram of voltage terminal positions.

Fig. 2 Electric field dependence of  $\varphi$  at  $l = 55$  mm. The inset shows the relationship between  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\varphi$ .Fig. 3 Magnetic field dependence of critical current  $I_c$  and  $\varphi$  for sample lengths of 20 mm and 50 mm.

## 謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費 (21H01872) の助成により実施したものである。

## 参考文献

1. A. Tsuruta, *et al.*: JJAP, Vol. 53 (2014), 078003
2. T. Ezaki, *et al.*: JPS, Vol. 40 (1976) p.382
3. 島田涼平, 木内勝, 2022 年度秋季低温工学・超電導学会, 3B-p04

# 低コスト REBCO-CC の中間層に用いる導電性 $\text{LaNiO}_3$ 薄膜の還元スパッタ成膜

## Sputter deposition of $\text{LaNiO}_3$ thin films in reducing atmosphere for conductive intermediate layer of low-cost REBCO-CC

船木 修平, 辻 大佑, 山田 容士(島根大学); 土井 俊哉(京都大学)

FUNAKI Shuhei, TSUJI Daisuke, YAMADA Yasuji (Shimane Univ.); DOI Toshiya (Kyoto Univ.)

E-mail: s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

### 1. はじめに

これまで我々は  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  coated conductor (REBCO-CC)の材料コスト低減を目的とし、Ni/Cu クラッド基材上に導電性中間層を介して REBCO を形成することで、安価な基材でかつ Ag 層を不要とする新規な低コスト REBCO-CC を開発してきた[1]。そして、中間層に用いる材料として Nb-SrTiO<sub>3</sub>, Nb-TiO<sub>2</sub>, La-SrTiO<sub>3</sub> などを検討したが、n 型酸化物であるがゆえに REBCO の成膜及び酸素アニール過程で抵抗率が上昇する課題があった[2, 3]。SrTiO<sub>3</sub> などと同じく、REBCO との格子整合性に優れた材料として  $\text{LaNiO}_3$  が挙げられる。 $\text{LaNiO}_3$  は SNS 接合に向けた研究において、PLD 法で REBCO/ $\text{LaNiO}_3$ /Sub. のエピタキシャル膜作製が可能であることや、REBCO- $\text{LaNiO}_3$  間のオーミックな電気特性が報告されている[4]。さらに、p 型酸化物であることから、REBCO の成膜及び酸素アニール過程での低抵抗率が期待できる。これらのことから、近年我々は工業的な利点の多いスパッタリング法を用いて、Ar ガスにより  $\text{LaNiO}_3$  薄膜を作製し、 $\text{LaAlO}_3$  (LAO) 単結晶基板の上にエピタキシャル成長した  $\text{LaNiO}_3$  膜の抵抗率が、PLD-REBCO の成膜及び酸素アニールを経ることで  $5 \text{ m}\Omega \text{ cm}$  @ R. T. 程度まで低下することを明らかにした[5]。このように、 $\text{LaNiO}_3$  は REBCO-CC の導電性中間層として有用であると考えられるが、実際に金属基材上に導電性中間層を成膜する場合は、基材の酸化を防ぐため還元雰囲気下の成膜が必要となる。そこで本研究では、 $\text{LaNiO}_3$  成膜におけるスパッタガスに  $\text{Ar}+\text{H}_2$  混合ガスを用い、還元雰囲気下で成膜した試料及び、その後 REBCO 形成環境でアニールした試料について、結晶性及び電気特性を評価した。

### 2. 実験方法

$\text{LaNiO}_x$  の焼結体ターゲットを用いた RF マグネトロンスパッタリング法により、LAO (100)単結晶基板の上に  $\text{LaNiO}_3$  薄膜を約 60 nm 厚で作製した。スパッタガスに Ar 及び  $\text{Ar}+\text{H}_2$  (4, 10%) 混合ガスを用い、スパッタ圧力を 1.0 Pa、スパッタ出力を 60 W とし、基板を 86~495°C に加熱し 30 分間成膜した。その後、PLD-REBCO の成膜環境として  $p\text{O}_2=35 \text{ Pa}$ , 760°C, 30 min, 及び酸素アニール環境として  $p\text{O}_2=10^5 \text{ Pa}$ , 450°C, 10 h の熱処理を行った。

結晶相、配向性及び結晶性を XRD で、電気特性を直流 4 端子法で評価した。

### 3. 結果及び考察

図 1 に、Ar 及び  $\text{Ar}+\text{H}_2(10\%)$  ガスを用い各基板温度で成膜した as-grown 試料の XRD 測定結果を示す。いずれの雰囲気においても、基板温度 200°C 以上で明確な  $\text{LaNiO}_3$  ( $h00$ )からの回折ピークが確認された。一方で、基板温度を高くしすぎると異相の影響と思われるピークシフトが確認され、さらに還元雰囲気にすることでピークシフトを生じる温度が低温化した。La-Ni-O 系は高温、もしくは還元雰囲気下において Ni の価数減少に伴い  $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$  ( $n = 3, 2, 1$ )相を成すことから、本研究においても高温下で  $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$  相が形成され、その形成温度が還元雰囲気下で低温化したと考えられる。図 2 に、as-grown 試料、及び PLD-REBCO 成膜環境、酸素アニール環境で熱処理した試料の 77 K における抵抗率を示す。

291°C で成膜した  $\text{LaNiO}_3$  薄膜は、as-grown に比べ PLD-REBCO 形成環境でアニールすることで抵抗率が低下し、約  $0.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}$  @ 77 K を示した。これらの結果から、スパッタリング法を用いることで、還元雰囲気下においても 300°C 程度でエピタキシャル成長した  $\text{LaNiO}_3$  薄膜が得られ、さらに PLD-REBCO 形成環境を経ることで抵抗率が低下することがわかった。

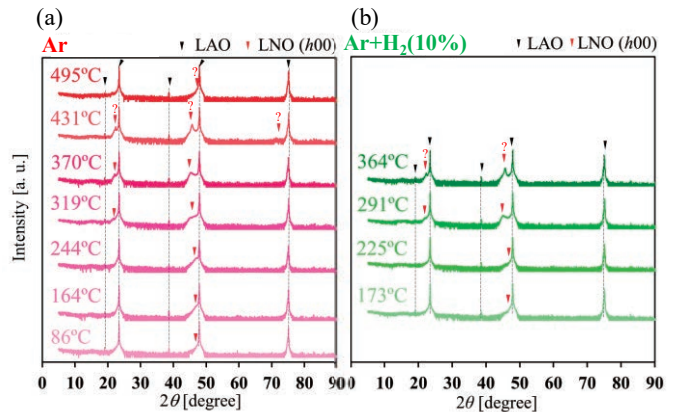


Fig. 1 XRD  $2\theta$ - $\theta$  pattern of samples fabricated by sputtering method using (a) Ar, (b)  $\text{Ar}+\text{H}_2(10\%)$  gas.

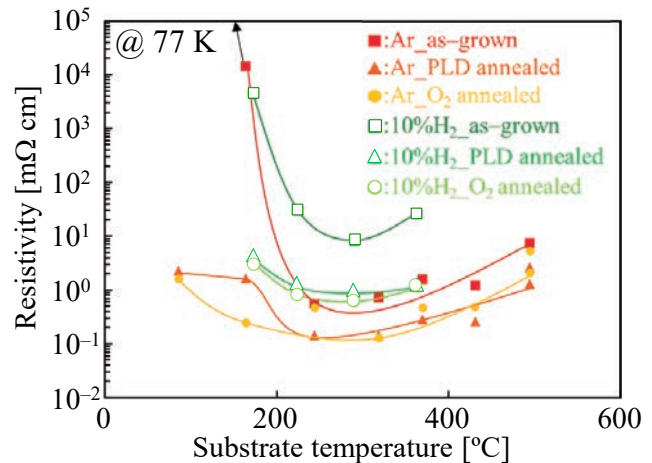


Fig. 2 Resistivity at 77 K of as-grown, PLD annealed,  $\text{O}_2$  annealed samples as a function of substrate temperature (closed: Ar, open:  $\text{Ar}+\text{H}_2(10\%)$ ).

### 参考文献

1. T. Doi, et al.: Materials Transactions, Vol. 58, No. 10 (2017) p.1493
2. T. Doi, et al.: APEX, Vol. 12 (2019) 023010
3. S. Funaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.724
4. K. M. Satyalakshmi, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 62 (1993) p.1233
5. S. Funaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.66

# Zr をパターニングした基板上でフィラメント構造化した MOD-YBCO 薄膜の TEM による微細組織観察

## Microstructure observation of filament-structured MOD-YBCO film on Zr-patterned substrate by TEM

藤本大貴, Guo Zimeng, 波多 聡, 寺西 亮 (九大); 松本明善, 大井修一, 立木 実 (NIMS)  
FUJIMOTO Hiroki, GUO Zimeng, HATA Satoshi, TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.);  
MATSUMOTO Akiyoshi, OOI Shuuichi, TACHIKI Minoru (NIMS)  
E-mail: fujimoto.hiroki.779@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YBCO) 線材の交流損失の低減には、YBCO 層内の幅方向の磁束線の移動範囲を狭めるマルチフィラメント化が有効である[1-5]。我々は新たなマルチフィラメント化の方法として、下地基板を修飾して成膜することによる超伝導層の結晶配列化を検討している[6]。これまでに Zr を細線状にパターニングした SrTiO<sub>3</sub>(STO) 基板上に YBCO を成膜したところ、STO 上では YBCO 膜は配向し、Zr 上では YBCO の配向度が低下していることが分かっている。MO 観察を行ったところ Zr 直上のみで磁束が侵入し、電磁気的な観点から本手法によるマルチフィラメント化の可能性が示されている。しかし、MO での観察結果と内部組織の因果関係は明らかになっていない。

本報告では、Zr 直上における YBCO 膜の断面微細組織を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察し、Zr 直上における YBCO 膜の配向や内部組織を解析し、MO 観察における Zr 直上で磁束が貫通する要因について調査する。

### 2. 実験方法

幅 5-20 μm の Zr を細線状にパターニングした STO (100)基板上に TFA-MOD にて YBCO を成膜した。原料には Y : Ba : Cu = 1 : 1.5 : 3 の溶液を用い、基板上に室温でのスピコートと 703 K での仮焼を 3 回繰り返した後、1053K での 150 分の本焼を施し、熱処理中は水蒸気を導入した。得られた試料について、TEM の走査歳差運動電子回折(SPED)にて結晶相・方位観察を行い、Zr 直上における断面から見た結晶組織について調査した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1(a)は熱処理前における試料の模式図、Fig. 1(b)は TEM-SPED 図形と計算電子回折図形の一致度を明暗で示した試料断面の Image Quality (IQ)マップと YBCO の結晶配向の模式図を示している。IQ マップは 5 μm 幅 Zr 直

上の結晶組織の観察像であり、下から基板の STO、ZrO<sub>2</sub>、膜状の YBCO、粒子状の CuO であると特定された。このことから、Zr は熱処理によって酸化されること、ZrO<sub>2</sub> 内部には空隙、YBCO や CuO の微細な粒子が存在すること、厚みが約 1.3 倍となり表面の凹凸が激しくなることがわかった。また ZrO<sub>2</sub> 直上については、膜状と粒子状の組織が混合していることが示された。

膜状の YBCO は Fig. 1(b)に示す①~③の 3 種類に分類され、模式図に示す結晶配向となっていた。①と③では結晶が c 軸配向し、②では結晶の c 軸配向及び面内配向が乱れていた。このことから、Zr 直上に形成された YBCO 膜は結晶配向が乱れていることがわかった。

以上の結果から Zr 直上の組織について考察する。Zr は熱処理によって酸化され、その直上では粒子状の CuO や配向が乱れた膜状の YBCO が形成されることがわかった。このことから、基板表面に Zr を堆積した上に YBCO を成膜することで、YBCO の結晶配向を意図的に乱せることが明らかになった。MO 観察において Zr 直上部分で磁束が侵入するのは、上述した YBCO の結晶配向の乱れに起因して磁束が遮蔽されないためであることがわかった。

本研究は JSPS 科研費 21K18831 および 22H02019、ならびに (国研) 物質・材料研究機構の Joint Research Hub Program と JST-CREST (JPMJCR18J4) の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] 雨宮 尚之 低温工学, 45, 8 (2010) 376386.
- [2] 町敬人 他, 低温工学, 50, 10 (2015) 476482.
- [3] Y. Shiohara et al., Jpn. J. Appl. Phys., 51 (2012) 010007.
- [4] T. Machi et al., Supercond. Sci. Technol., 26 (2013) 105016.
- [5] X. Cai et al., IEEE TAS., 23, 3 (2013) 6603005.
- [6] A. Matsumoto et al., IEEE TAS., 33, 5 (2023) 7500404.

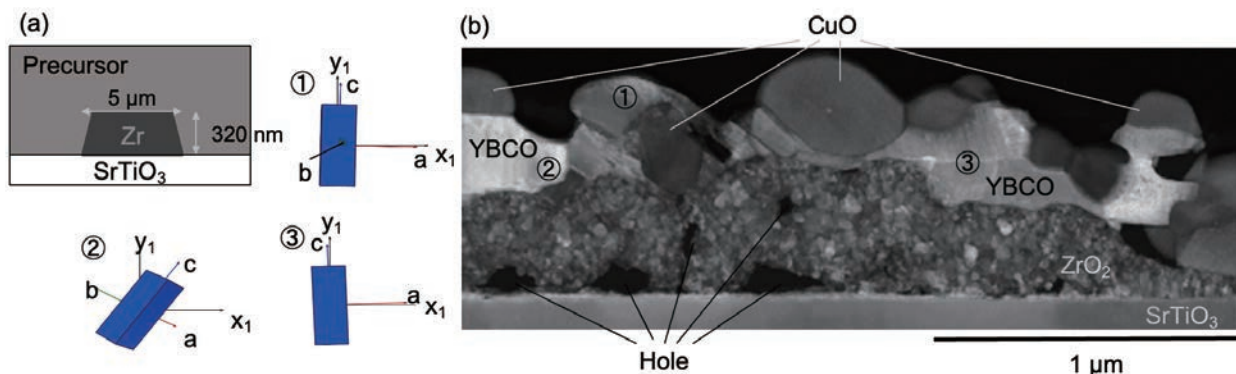


Fig. 1 (a) Schematic image of the sample before heat treatment. (b) Image Quality map and crystal orientation image of YBCO after heat treatment in the cross-sectional direction by TEM at YBCO/Zr/STO.

## 超電導バルクの磁場特性向上に向けた研究

## Research towards improving the magnetic field properties of superconducting bulk

矢野 俊, 赤坂 友幸, 石原 篤, 恩地 太紀, 山本 春海, 富田 優(鉄道総研)

YANO Suguru, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, ONJI Taiki, YAMAMOTO Haruumi, TOMITA Masaru

Railway Technical Research Institute

E-mail: yano.suguru.49@rtri.or.jp

## 1. はじめに

REBCO バルクは強力磁石として各種機器への応用が期待されている[1, 2]。REBCO バルクの作製方法として、Single-Direction Melt Growth (SDMG)法が着目されている。これは、シングルドメインの大型 REBCO バルクを seed plate として、その上に別種の RE'BCO バルクを鉛直上向きに成長させる手法である。従来の Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法では、a-growth 領域と c-growth 領域の 2 つの領域に分かれてしまうのに対し、SDMG 法では、バルク全体が単一結晶成長領域から構成されるという利点がある[3]。しかし、SDMG 法を適用するためには、seed plate として、TSMG 法などの他の方法で作製された大型 REBCO バルクが必要である。この大型 REBCO バルクの作製方法としては TSMG 法の一つである RE 元素組成勾配法がある。

TSMG 法による大型 REBCO バルクの作製では、半溶融成長の際の温度制御が難しく、試料外周部の温度が低くなってしまふ。そのため、試料外周部に種結晶とは異なる結晶方位の核が生成しやすく、試料が多結晶化しやすいという課題がある。RE 元素組成勾配法では、試料の中心から外周に向けて包晶温度が次第に低くなるような RE 元素組成にし、外周部での核生成を抑制することでこの問題に対処している。バルクを同心円で 5 つの層に区切り、RE 組成を試料中心の層は Gd のみに、外周層に向かって順に Dy ドープ量を増やし、外周層で Gd:Dy=8:2 にした (Gd, Dy)BCO バルクで、直径 150 mm 級の大型試料が作製されている[4]。ここで、包晶温度( $T_p$ )は Gd123 が 1030 °C、Dy123 が 1010 °C である[5]。

本研究では他の RE 元素組成として、大型(Y, Er)BCO バルクの作製を試みた。

## 2. 実験方法

$Y_2O_3$ 、 $Er_2O_3$ 、 $BaCO_3$ 、 $CuO$  を化学量論比で混合し、焼成することで Y123 ( $T_p = 1000^\circ C$ )、Er123 ( $T_p = 980^\circ C$ )、Y211 を合成した。そして RE123: Y211 = 7: 3 のモル比で混合した粉末に、Pt を 0.5 wt% 添加し、一軸圧プレスで直径 60 mm の前駆体ペレットを作製した。なお RE123 としは、ペレットの中心から直径 30 mm 以内の中心部は Y123 を、直径 30 mm から 60 mm までの外周部は Y123 と Er123 を混合した(Y, Er)123

を用いた。その後、フラックス法で作製した Nd 単結晶を種結晶とし、TSMG 法により大気中溶融凝固を行い、(Y, Er)BCO バルクを得た。

## 3. 実験結果

RE 元素組成勾配法で作製した (Y, Er)BCO バルクを Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、バルク体表面において、Nd 種結晶を起点とする 4 本のファセットラインが、中心部と外周部の組成境界を超え、試料外周端まで成長していることが確認できる。このことから、(Y, Er)BCO バルクであっても、RE 元素組成勾配法によって試料外周部における核生成を抑制し、大型バルクを作製することが可能であることが分かった。



Fig. 1. (Y, Er)BCO bulk fabricated by RE composition gradient method

## 参考文献

1. M. Tomita, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka, H. Osaki and M. Sekino, *IEEE Transactions of Applied Superconductivity* **26**, 1 (2016).
2. M. Muralidhar, Y. Fukumoto, A. Ishihara, K. Suzuki, M. Tomita, M. R. Koblischka, A. Yamamoto and K. Kishio, *Physica C* **496**, 5 (2014).
3. T. Motoki, Y. Yanai, K. Nunokawa and J. Shimoyama, *Appl. Phys. Express* **13**, 093002 (2020).
4. S. Nariki, H. Teshima and M. Morita, *Supercond. Sci. Technol.* **29**, 034002 (2016).
5. M. Muralidhar, H. S. Chauhan, T. Saitoh, K. Kamada, K. Segawa and M. Murakami, *Supercond. Sci. Technol.* **10**, 663 (1997).



# 電磁力平衡ヘリカルコイル開発のための MgB<sub>2</sub> 素線の 曲げひずみに対する臨界電流特性評価

## Evaluation of Critical Current Characteristics under Bending Strain of MgB<sub>2</sub> Strands for Force-balanced Helical Coils

許航、矢島健大、林大吉、野村新一（明治大）；力石浩孝、平野直樹（NIFS）；新富孝和（KEK）；仁田旦三（東大）  
Hang Xu, Kenta Yajima, Daikichi Hayashi, Shinichi Nomura (Meiji Univ.); Hiroataka Chikaraishi, Naoki Hirano (NIFS);  
Takakazu Shintomi (KEK); Tanzo Nitta (Tokyo Univ.)  
E-mail: wardenxuhang@meiji.ac.jp

### 1 はじめに

本研究では、MgB<sub>2</sub> 超電導線を使用した 1 MJ 級 SMES 用電磁力平衡ヘリカルコイル (FBC: force-balanced coil) 製作の可能性を検討している。超電導コイルの軽量化を実現するために電磁力を大幅に低減させた電磁力平衡ヘリカルコイルを適用し、MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体を用いた冷凍機冷却超電導コイルの研究を進めている。MgB<sub>2</sub> 素線を大電流容量化するため、熱処理する前に素線をラザフォード導体化することを検討している。しかし、撚線成形加工作業により、導体素線に曲げひずみが掛かり、臨界電流の低下が懸念される [1]。したがって、ラザフォード導体の仕様を決定するため、熱処理する前に MgB<sub>2</sub> 素線に印加された曲げひずみは線材の臨界電流に対する影響の確認が必要になる。本発表では、日立製の直径 0.67 mm の MgB<sub>2</sub> 素線を曲げた状態で熱処理を行い、臨界電流特性を評価する実験研究の進捗状況について報告する。

### 2 MgB<sub>2</sub> 素線の成形・熱処理

MgB<sub>2</sub> 素線上の任意点における曲げひずみ  $\varepsilon$  は、

$$\varepsilon = \frac{r_f}{\rho} \quad (1)$$

となる。ここで、 $r_f$  は素線の半径であり、 $\rho$  は素線の曲げ半径である。そのため、MgB<sub>2</sub> 素線の曲げひずみに対する臨界電流特性を確認するため、素線の曲げ半径の異なるサンプルの製作が必要になる。一方、熱処理した後で MgB<sub>2</sub> 素線に曲げひずみを印加することを防ぐため、MgB<sub>2</sub> 素線をモールドで曲げて熱処理を行い、その後で MgB<sub>2</sub> 素線をモールドに固定するままで冷却・通電実験を行う必要がある。したがって、発表者らは図 1 に示している MgB<sub>2</sub> 素線の銅モールドを設計・開発した。開発したモールドでは、銅板の上に曲げ半径の異なる素線溝を製作し、高温環境対応可能な絶縁塗料を塗り、MgB<sub>2</sub> 素線を溝に固定する方法で、MgB<sub>2</sub> 素線と銅板を絶縁することで、熱処理と冷却が対応できるようになる。

### 3 湾曲の MgB<sub>2</sub> 通電実験

本実験では、二段 GM 冷凍機を利用して熱処理した MgB<sub>2</sub> 素線および銅モールドを 10 K~20 K 程度に冷却する。具体的な冷却環境は図 2 に示す。実験装置全体を真空のクライオスタット中に設置する。輻射熱侵入を減らすため、GM 冷凍機一段目に 30 層の MLI で覆っている断熱二重容器を配置する。GM 冷凍機二段目に冷却ステージを配置し、フィルムヒーターで二段目冷却ステージの温度を制御している。

図 3 に銅モールド上の湾曲 MgB<sub>2</sub> 素線の通電実験の概略図を示す。4 本 MgB<sub>2</sub> 素線を直列接続して通電実験を行っている。銅モールドを二段目冷却ステージに配置し、10 K と 20 K の場合に 4 端子法でそれぞれの MgB<sub>2</sub> 素線の臨界電流を確認する。

各素線サンプルの臨界電流の通電実験結果と MgB<sub>2</sub> 素線の曲げひずみに対する臨界電流特性評価については当日の発表で報告する。

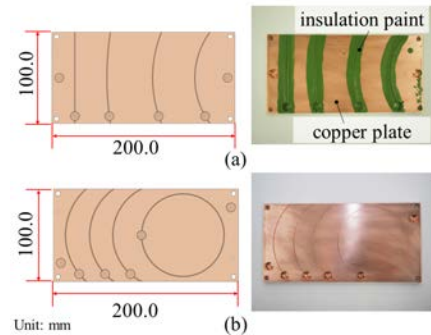


Fig. 1. Schematic illustration of the MgB<sub>2</sub> sample mold that bending strains are 0.0%, 0.2%, 0.5%, 0.8% (a) and 1.0%, 1.1%, 1.2%, 1.5% (b).

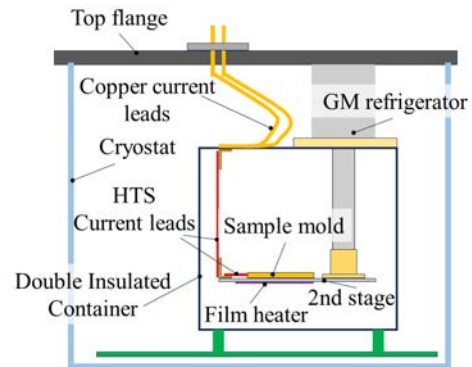


Fig. 2. Schematic illustration of the cooling equipment.

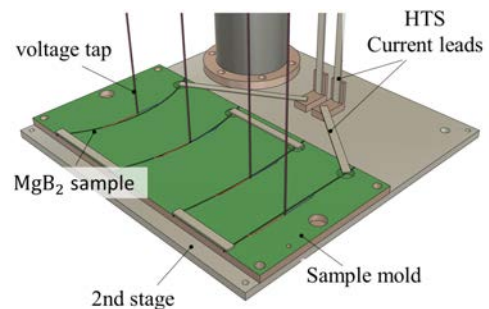


Fig. 3. Schematic illustration of the critical current measurement of MgB<sub>2</sub> samples.

### 参考文献

- [1] 谷貝 剛, 他, 「大型 SMES 磁石応用への大電流容量 MgB<sub>2</sub> 導体開発」, 低温工学, Vol. 56, No. 5, 2021.

# MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体短尺試験のための断熱二重容器の冷凍機冷却試験

## Cryocooler Cooling Test of an Insulated Double Container for Short Sample Test of MgB<sub>2</sub> Rutherford Cables

矢島健大、林大吉、許航、野村新一（明治大）；新富孝和（KEK）；仁田且三（東大）；平野直樹（NIFS）  
YAJIMA Kenta, HAYASHI Daikichi, XU Hang, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); SHINTOMI Takakazu (KEK);  
NITTA Tanzo (Tokyo Univ.); HIRANO Naoki (NIFS)  
E-mail: ee201202@meiji.ac.jp

### 1 はじめに

著者らは、電力システムの固有値測定を目的とした 1 MJ 級可搬型超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) 装置の可能性研究を進めている [1]。超電導コイルの軽量化を実現するために電磁力を大幅に低減させた電磁力平衡ヘリカルコイルの適用を検討している。本研究では、MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体を超電導導体の候補として考えているが、ヘリカル巻線形状によって MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体に印加される曲げひずみに対する臨界電流特性の劣化の有無を評価する必要があり、導体短尺試料試験の実施を計画している。本発表では、MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体短尺試験に向けた断熱二重容器の冷凍機冷却試験結果について報告する。

### 2 実験装置

Fig. 1 にクライオスタットの構成を示す。冷凍機は住友重機械工業製の RDK-415D2 を使用し、カタログ値で 1 段目は 50 K で 35 W、2 段目は 4.2 K で 1.5 W 程度の冷凍能力を有する。断熱二重容器 (HC-40 と名付ける) は冷凍機 1 段目と接続されており、サーマルシールドの役目を果たす。HC-40 は厚さ 3 mm の純アルミニウム板で構成された大きさ 460 mm × 460 mm × 420 mm の直方体形状の箱で、底面に設置した G-FRP の支柱 4 本で支えている。Fig. 1 では HC-40 は MLI (Multi-Layer-Insulation) で覆われていない状態であるが、冷却試験を実施する際には HC-40 各面に 30 層のブランケット状に加工した MLI をプラスチックリベットで固定しているほか、ブランケット間の隙間への対策としてさらに 10 層の MLI を外側に巻いている。一方、冷凍機 2 段目に接続されている MgB<sub>2</sub> 導体短尺試料の冷却ステージは HC-40 内部に設置しており、G-FRP の支柱 3 本で支えている。HC-40 および冷却ステージへの支柱を介した侵入熱は最大でそれぞれ 0.23 W、1.82 mW と概算された。また、HC-40、冷却ステージへの輻射による侵入熱は MLI により大きく抑制されておりそれぞれ 0.582 W、6.96 μW と概算された。

### 3 冷却実験

Fig. 2 は HC-40 の冷却実験で得た冷却ステージまたは冷凍機 2 段目コールドヘッドの温度の時間推移を示している。各部の温度の測定には Cernox 抵抗温度センサを用いた。冷却ステージと電流リードを取り付けない条件 (Exp. 1) で冷却から約 8 時間後の冷凍機 1 段目と 2 段目のコールドヘッドの温度はそれぞれ 34.8 K、2.33 K であった。MgB<sub>2</sub> 導体短尺試料試験のために Cu 電流リードを HC-40 側面まで取り付けた条件 (Exp. 2) および、Cu 電流リードに加えて HTS 電流リードを冷却ステージまでつなげた条件 (Exp. 3) において冷却試験を行った。Fig. 2 の通り電流リードをつけると冷却ステー

ジの冷却に要する時間は長くなるが、最終的な温度は 10 K を下回ることが確認された。

今回製作した冷却実験装置について侵入熱や冷凍能力の評価などについては当日報告する。

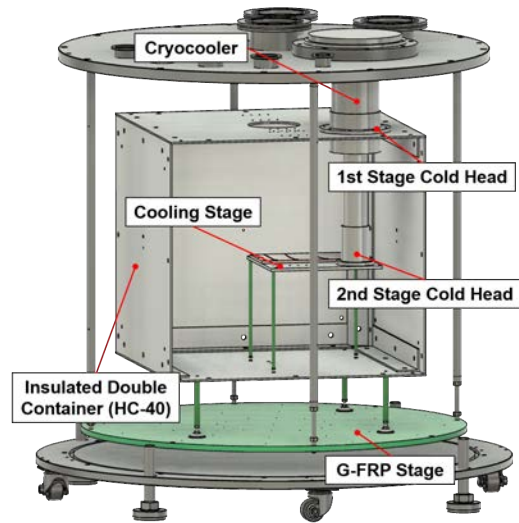


Fig. 1 Installation of the insulated double container in the cryostat.

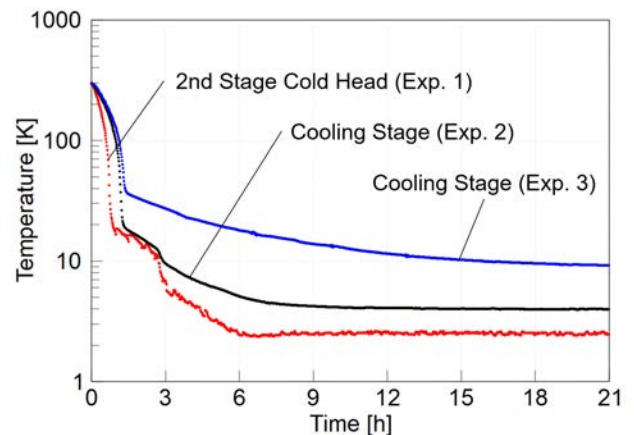


Fig. 2 Cooling experimental results. Exp.1; w/o cooling stage and current leads. Exp. 2; with Cu current leads. Exp. 3; with Cu current leads and HTS current leads.

### 参考文献

- [1] S. Nomura et al., "Scenario of Mobile SMES for Eigenvalue Measurement" IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32, p. 5700706, (2022)

## MgB<sub>2</sub> 線材の中性子散乱によるひずみ測定 Strain measurement of MgB<sub>2</sub> wire by neutron scattering

町屋修太郎 (大同大学); 長村光造 (応用科研); 菱沼良光 (核融合研);  
ステファヌス・ハルヨ (JAEA J-PARC); 川崎卓郎 (JAEA J-PARC)  
MACHIYA Shutaro (Daido Univ); OSAMURA Kozo (RIAS); HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS);  
Stefanus Harjo (JAEA J-PARC); Takuro Kawasaki (JAEA J-PARC)  
E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

### 1. はじめに

我々は様々な実用超電導線材のひずみ測定を行ってきたが、MgB<sub>2</sub> のひずみ測定については、まだ世界的にも測定例がない。線材がやや太いこともあり、放射光ではやや大きすぎることで、粗粒であることから測定が難しかった。一方中性子散乱については、これまで MgB<sub>2</sub> は中性子の吸収断面積が大きいことから中性子での測定は測定が難しいとされてきた。中性子の吸収断面積の大きさのそのものは同位体のうちの、<sup>10</sup>B に起因している。そこで <sup>11</sup>B の同位体に置換した試料を用いて室温の引張荷重下で中性子でのひずみ測定を行ったので報告したい。

### 2. 試料

供試料としたのは NIFS で開発された耐中性能を高めた 11B リッチな MgB<sub>2</sub> 線材<sup>[1]</sup>で断面写真を図 1 に示す。<sup>11</sup>B の純度は 98% の原料も用いた。直径は 1.04 mm であり、長さ 100 mm のものを準備し、引張試験および中性子散乱実験を行った。

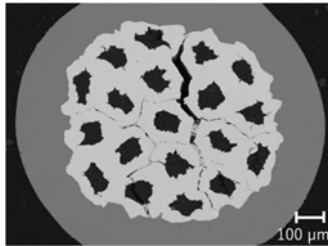


Fig. 1 Cross section of <sup>11</sup>B riched MgB<sub>2</sub> wire

### 3. 実験方法

引張試験データは割愛するが、中性子散乱実験は、東海村にある、J-PARC MLF BL19 にて実験を行った。この施設はパルスニュートロン施設であり特にこのビームラインでは特定の方向の格子面間隔の長さを得ることができるので引張試験のデータの取得が可能である。実験は、引張負荷を段階的に上げながら、その都度測定を繰り返すことで行っている。得られるデータは、引張方向である軸方向の格子面間隔と直径方向の格子面間隔である。一般に引張ることによって軸方向には伸び直径方向は縮むこととなる。この挙動を同時に測定できる。無負荷のときの得られたプロファイルを図2に示す。

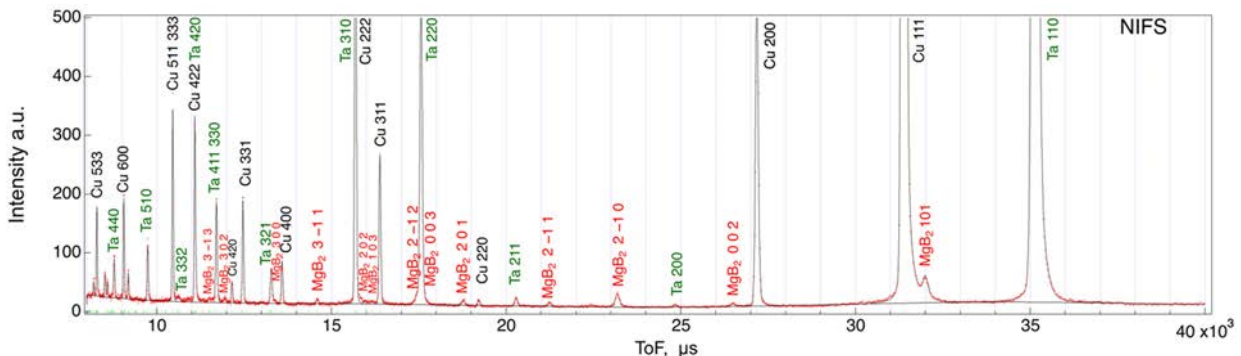


Fig. 2 Diffraction histogram using ToF method

### 4. 実験結果および考察

荷重ごとに、得られたプロファイルはリートベルト解析を用いて、格子定数の精密化を行った。MgB<sub>2</sub> は六方晶であるため、精密化された格子定数は *a* と *c* の二つが得られる。一方他の組成である Ta や Cu は格子定数は *a* のみとなる。得られた格子定数の変化をまとめたものを Fig. 3 に示す。左の図の(a)は *a* 軸の変化について、(b)については *c* 軸の格子定数の変化を示している。Ta と Cu のデータは紙面の制約で割愛するが、MgB<sub>2</sub> の軸方向の格子定数の変化は、シースの金属部分に比べ小さく、応力緩和が発生している可能性が高い。さらに、図からわかるのは、直径方向の勾配と軸方向の勾配がほぼ同じとなっている。通常材料であれば、軸方向にくらべて径方向の変化はポアソン比でできる 1/3 程度になるはずである。これもひずみ緩和の影響と考えられる。また、残留ひずみについても考察を行った。グラフでは、軸方向と直径方向で格子定数に若干の差異がある。原点は 1 つと考えるとこれらの軸を延長することでおおよそその残留ひずみの推定が行える。*a* 軸方向では約 -90N、*c* 軸方向では約 -50N、となっており、MgB<sub>2</sub> フィラメントは圧縮の残留ひずみを有している可能性が高い。

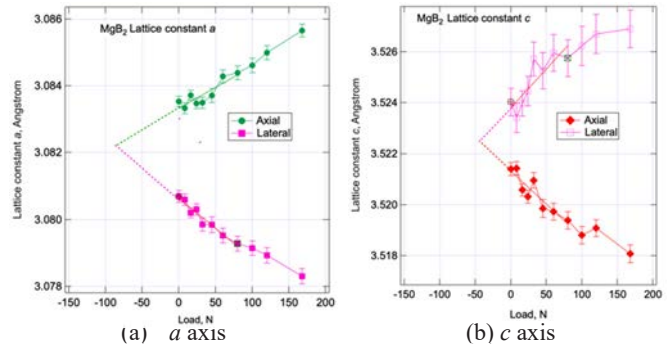


Fig. 3 Relation between the results of lattice constant changes of hexagonal MgB<sub>2</sub> 'a' and applied load (axial and lateral).

### 参考文献

- 菱沼良光ら、「異なるホウ素-11 同位体粉末を用いた Cu 添加低放射化 MgB<sub>2</sub> 多芯線の超伝導特性と微細組織」低温工学 57 巻 1 号、2022.

# 高抵抗 PCS 線を用いた MgB<sub>2</sub> コイルの永久電流運転

## Persistent current operation of conduction-cooled MgB<sub>2</sub> coils using high resistance PCS wires.

青木 学、一木 洋太、児玉 一宗、鈴木 孝明、小瀧 博司、田中 秀樹(日立)

AOKI Manabu, ICHIKI Yota, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi, TANKA Hideki (Hitachi)  
E-mail: manabu.aoki.ek@hitachi.com

### 1. 緒言

MgB<sub>2</sub> コイルは、その臨界温度の高さから伝導冷却による運用が期待されている。一方、無冷媒としたことで冷却速度が遅くなり、永久電流スイッチ(以下、PCS)のオン時間が数10分程度まで長くなることが課題であった[1]。そこで、常電導転移すると高い抵抗を示す NbTi をシース材に適用した高抵抗 PCS 線を開発し、PCS の熱容量を下げることで、オン時間を短縮することを検討した。

### 2. 方法

本研究で開発した PCS 線の断面図を Fig.1 に示す。PCS 線は線径 0.78 mm の単芯 MgB<sub>2</sub> 線材で、MgB<sub>2</sub> の周りに NbTi を配置した断面構造となっている[2]。NbTi は温度 4K では抵抗ゼロの超電導状態となるが、MgB<sub>2</sub> が常電導転移する 39K 近傍ではその比抵抗が銅と比較して 1000 倍以上大きく、オフ抵抗を高められる利点がある。また、同じく高抵抗金属であるモネルと異なり、熱処理時に MgB<sub>2</sub> コアと接触しても臨界電流性能を劣化させないことから PCS 線の材料として選定した。本線材のオフ抵抗は 0.9 Ω/m である。

本研究で試作した MgB<sub>2</sub> コイルはリング状の構造体の内部にコイル巻線、超電導接続、PCS を全て内包した構造をしている。PCS は長さ約 100 mm の PCS 線から構成され、銅製のコイルフランジに設けた溝にヒータとともに設置されている。コイル巻線は直径 120mm、ターン数 719 である。コイル巻線に用いた MgB<sub>2</sub> 線材は線径 0.81 mm の多芯導体である。

永久電流運転試験は Fig.2 に示すように伝導冷却された MgB<sub>2</sub> コイル 2 個を上下に配置したマグネットにて実施した。それぞれのコイル中心軸側にはマグネット中心に磁束を集中させるための鉄芯を設け、上下の鉄芯間には高さ 30 mm のギャップを中心磁場を測定するために設けた。2 個のコイルは直列接続されており、その接続には超電導線ではなく無酸素銅からなる可とう導体を用いた。上記のように本研究の MgB<sub>2</sub> コイルはコイル巻線 1 つに対し PCS 1 つの構成となっており、コイル間の接続に常電導線を用いても、それぞれの PCS とコイル巻線とで閉回路を構成して永久電流運転が可能である。本マグネットに 35A 通電すると、上記ギャップには約 1T の磁場が生成される。なお、試験中はコイル温度が 10~15K に保たれるように GM 冷凍機に設けたヒータにて温度制御した。

### 3. 結果

Fig.3 に永久電流運転試験の一例を示す。最初に、PCS ヒータに通電して PCS をオフ(常電導状態)にしてからコイル巻線に通電を開始する。PCS ヒータの出力は 0.3W である。目標電流 35A に到達した後は、PCS ヒータへの通電を停止し PCS をオン(超電導状態)にし、励磁電源からの供給電流を減少させる。供給電流がゼロとなってもギャップ間の磁場は 1T に保たれており、永久電流運転できていることが分かる。

本試験体系における PCS のオン時間は約 2 分であった。Fig.3 に示すように、PCS ヒータを OFF にした後 PCS を内包するコイルフランジの温度が約 2 分かけて下がり切っていることが分かる。

### 4. 結言

永久電流にて運用する MgB<sub>2</sub> コイルの PCS オン時間を短縮することを目的に、NbTi をシース材に採用した高抵抗 PCS 線を開発した。高抵抗 PCS 線の効果で熱容量を低減した PCS のオン時間は約 2 分だった。また、MgB<sub>2</sub> コイル 2 個からなる伝導冷却マグネットにおいて中心磁場 1T の永久電流運転が可能であることを確認した。

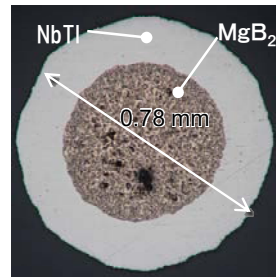


Fig.1 Cross-section of PCS wire



Fig.2 Test Magnet

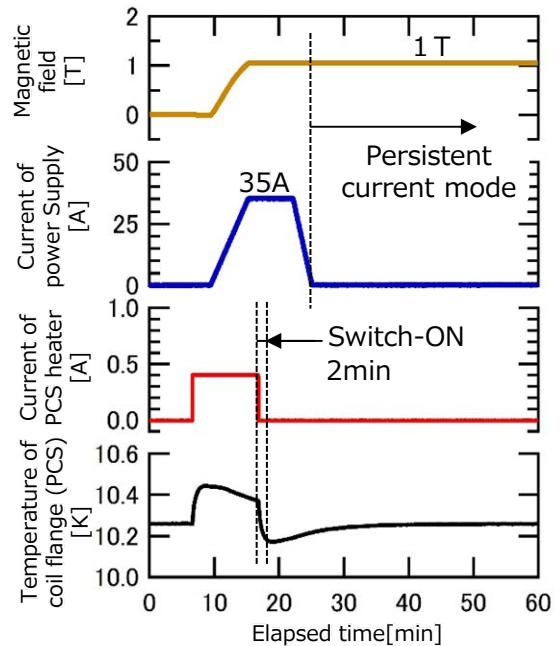


Fig.3 Persistent current mode test (10K)

### 参考文献

- Jiayin Ling *et al* 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 024011
- Motomune Kodama *et al* 2021 *Supercond. Sci. Technol.* **34** 074003

## 2 T 小径 MgB<sub>2</sub> 超電導コイルの製作 Manufacture of 2 T Small MgB<sub>2</sub> Superconducting Coil

古賀 智之, 安藤 竜弥, 坂本 和也 (日立); 山本 明保 (東京農工大)

KOGA Tomoyuki, ANDO Ryuya, SAKAMOTO Kazuya (Hitachi); YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)

E-mail: tomoyuki.koga.gs@hitachi.com

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub> 超電導体は  $T_c = 39$  K の高い臨界温度を示すことから、10 K 前後の温度領域において、液体ヘリウムを必要としない伝導冷却下でのマグネット応用が期待されている。本研究では、我々がこれまでに製作してきた実用 MgB<sub>2</sub> 超電導コイル [1][2] の中で最も高い定格中心磁場 2 T の小径コイルを製作し、励磁試験によりその性能を確認した。本コイルでは、冷却促進とクエンチ保護のために、コイル巻線間に冷却銅板を挿入する従来の冷却構造を踏襲した。励磁試験では 0.3 A/s での高速励磁や定格励磁中のクエンチ試験も実施し、実用上の利便性と健全性を確認した。

### 2. コイル構造

Table. 1 にコイルの諸元を、Fig. 1 にコイルの外観写真を示す。本コイルは巻線部が内径 80 mm、外径約 170 mm、軸長約 80 mm の小径コイルであり、電流値 112 A で定格中心磁場 2 T を生成するよう設計されている。導体には直径 0.81 mm の丸線材を使用し、コイルは Wind & React 法により製作した。また定常冷却時の冷却促進とクエンチ時の熱拡散によるクエンチ保護のため、コイル巻線の各層間には厚さ 0.5 mm の冷却銅板を挿入した。

### 3. 冷却・励磁試験

製作したコイルをクライオスタットに設置し、伝導冷却にて 10 K まで冷却した。冷却状態において、初回は 0.1 A/s の低速で、次に 0.3 A/s の高速で、各々定格電流まで励磁した。Fig. 2 に高速励磁における各計測点の電圧データを示す。励磁時のコイル両端の誘導電圧は約 100 mV であり、コイルのインダクタンス 0.34 H とよく一致している。また低電流におけるインダクタンスの上昇は、MgB<sub>2</sub> 線材内部の鉄の磁化による。

冷却構造の妥当性を検証するため、定格励磁状態で昇温し、コイルを意図的にクエンチさせるクエンチ試験を実施した。Fig. 3 にクエンチ試験時の電圧データを示す。尚、励磁回路には 200 mV のコイル両端電圧でクエンチを検出し、電源を遮断するクエンチ保護システムを組み込んだ。本試験においてコイルは巻線表面温度約 19 K でクエンチしたが、その後の再冷却及び再励磁により、コイルの超電導性能に劣化が無いことを確認した。

### 4. まとめ

小径 MgB<sub>2</sub> 超電導コイルにおいて中心磁場 2 T を達成した。また高速励磁やクエンチ試験により、マグネットとしての利便性と健全性を確認した。

### 謝辞

本研究は、JST CREST(JPMJCR18J4)の支援を受けたものです。

### 参考文献

1. H. Watanabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30, no. 4, Jun. 2020, Art no. 4601206.
2. T. Koga, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no. 5, Aug. 2023, Art no. 4600705.

Table. 1 Specifications of the MgB<sub>2</sub> coil

Item	Specifications
Rated current	112 A
Central field	2.0 T
Maximum field in winding	2.3 T
Operational temperature	10 K
Winding turns	2080
Outer/Inner diameter	168mm/80 mm
Axial length	82 mm
Inductance	0.34 H
Stored energy	2.1 kJ

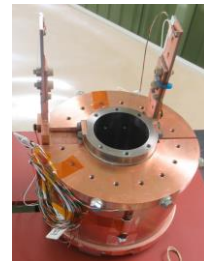


Fig. 1 Photograph of the MgB<sub>2</sub> coil

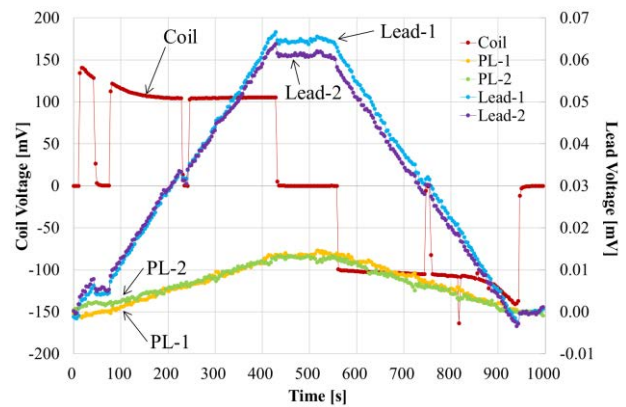


Fig. 2 Coil and lead voltages during fast excitation

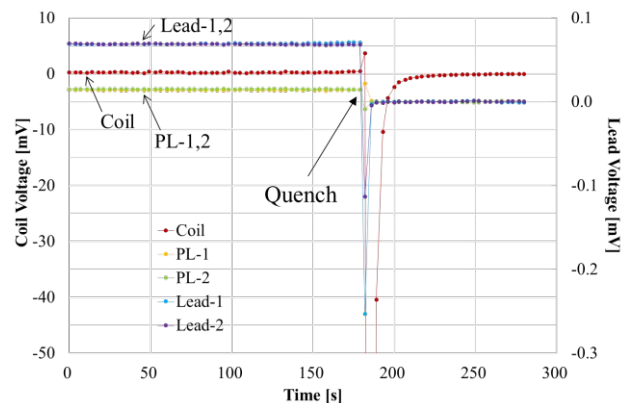


Fig. 3 Coil and lead voltages during quench test

# 液体水素ポンプに適用する超電導同期モータの電磁特性

## Electromagnetic Characteristics of Superconducting Synchronous Motors for Liquid Hydrogen Pump

河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)

KAWANO Ryosuke, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: kawano.ryosuke23@ae.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、近年液体水素燃料の利用が注目されている。すなわち燃焼時に温室効果ガスを排出しないという水素の利点に加え、液化することで体積エネルギー密度を高めることができる。さらに、液体水素は 20 K という極低温であり、冷媒としての特性にも優れている。液体水素タンク内において超電導モータでポンプを構成することで、低発熱低損失な燃料供給システムが構築できる可能性がある。

本発表では自動車に搭載するサブマージドモータポンプを念頭に置き、液体水素浸漬冷却下で運転する超電導同期モータの検討を行う。液体水素の潜熱・顕熱を元に許容発熱量を推算し、その条件下でのモータ仕様の提案や有限要素法を用いた二次元電磁界解析の結果について報告する。

### 2. 液体水素の許容発熱量

液体水素が沸点付近でタンクに保管される場合、状態変化に必要な熱量である潜熱のみを考えれば十分であり、その値が大きい方が有利である。Fig. 1 に示す通り、液体水素は圧力に応じて潜熱が単調減少する [1]。今回は昇降圧の必要がない 1 atm で議論を行う。この時の潜熱は 448.7 kJ/kg である。例として、トヨタ自動車の液体水素自動車である GR Corolla H2 concept の場合を考えると 148 L の自動車用燃料タンクで 10% の蒸発を許容する場合、その許容発熱量は 470.2 kJ である。この値を電磁界解析によって求められるモータの発熱量で除することで、運転継続可能時間の観点から議論ができるようになる。

### 3. モータ構成・仕様と電磁界解析

回転子構造が簡便で発熱源を減らせるため、本研究では永久磁石を界磁に用いる。電機子巻線は MgB<sub>2</sub> 線材を用い、液体水素を冷媒に用いて 20 K まで冷却する。出力と回転数は液体水素自動車の先行研究[2]を参考にし、Table 1 のような仕様としている。この仕様を達成するモータ構造として積厚や外径を変化させた数パターンを比較検討し、二次元モデルを作成して電磁界解析を行う。例として、外径と積厚の比が 2:5 の時のモータ構成を Fig. 2 に示す。

解析から鉄損や交流損失を求め、液体水素の許容発熱量を元に運転継続可能時間を概算した。外径と積厚の比が 2:5 の時には鉄損が 9.27 W、この時の周波数が 32 Hz で交流損失が 12.3 W であった。これらの和がモータの発熱量となり、自動車の例で運転継続可能時間、すなわち液体水素を補給してから再度補給するまでの時間を計算すると 6.05 時間となる。

### 4. まとめと今後の課題

今回の研究では液体水素ポンプ用として永久磁石と超電導電機子巻線を用いた同期モータを構成し、電磁界解析を行った。また、その結果と許容発熱量から、運転継続可能時間の面で考察を行った。今後は許容発熱量を元に、各部品の詳細な損失の検討や更なる設計の最適化を行っていく必要がある。

### 参考文献

1. Thermophysical Properties of Fluid Systems, <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
2. 野瀬貴志ほか、液体水素ポンプの性能向上に関する研究、水素エネルギーシステム, 22 巻, 1 号, pp. 39-45, 1997.

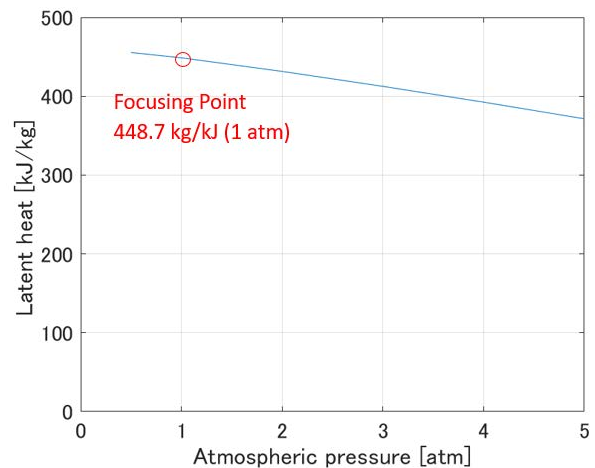


Fig. 1. Relationship between latent heat of liquid hydrogen and atmospheric pressure

Table 1. Motor Specifications

Rated output	0.75 kW
Rotation speed	960 rpm
Number of poles	4
Line to line voltage	24 V
Cooling temperature	20 K
Armature winding	MgB <sub>2</sub> wire
Field magnet	NdFeB

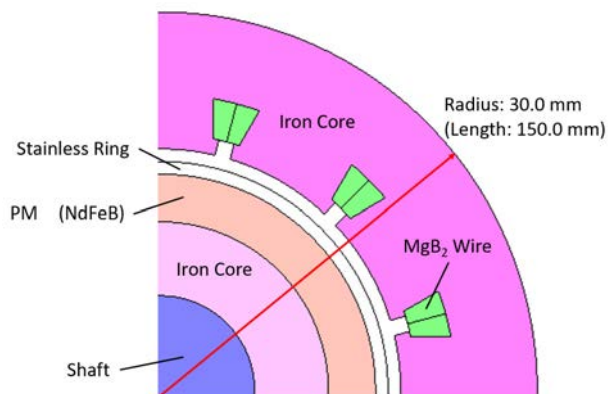


Fig. 2. Motor configuration (example)

## 超電導発電機向け高温超電導コイルの液体水素供給停止模擬試験

## Simulation test of liquid hydrogen supply interruption for high-temperature superconducting coils for superconducting generators

石田 悠人, 山川 友瑚, 中西 啓太, 嶋田 健, 大屋 正義(関学);

白井 康之(京大); 小林 弘明(JAXA); 三浦 英明, 小畑 慶人(三菱電機)

ISHIDA Yuto, YAMAKAWA Yugo, NAKANISHI Keita, SHIMADA Ken, OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.);

SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); KOBAYASHI Hiroaki (JAXA); MIURA Hideaki, OBATA Keito (Mitsubishi Electric)

E-mail: [htn04302@kwansei.ac.jp](mailto:htn04302@kwansei.ac.jp)

## 1. はじめに

NEDO 先導研究において、液体水素冷却高温超電導発電機の研究開発を行っている。液体水素で超電導界磁コイルを冷却し、蒸発したガスは常電導電機子を冷却した後に水素ガスタービンに送って発電するシステムを構築することで、液体水素の冷熱を活用したゼロエミッションな発電システムの実現を目指す[1]。実際の運用時には、冷媒である液体水素の供給が停止するトラブルが想定されるが、液体水素冷却高温超電導コイルは温度マージンが大きく、運転温度における比熱も大きいので、冷媒の供給が停止しても通電を継続できる可能性がある。本報では、試作した超電導界磁コイルを液体水素で浸漬冷却し、通電を継続した状態で熱暴走を開始するまで液面を下げっていく試験を実施した結果について報告する。

## 2. 実験

本試験は JAXA の能代ロケット試験場に整備した液体水素冷却通電試験装置を用いて実施した。クライオスタットの内径は 309 mm、液体水素の貯液量は 50 L、電流リードの通電容量は 500 A である。試験コイルはインサート下部に取り付け、試験コイルの下部には最大容量 500 W のヒーターを取り付けた。液体水素試験装置には 2 個 (T1、T2)、試験コイルには 3 個 (Ts1、Ts2、Ts3) の Cernox 温度計を取り付けた。各温度計の位置を図 1 に示す。試験コイルは、レーストラック型のダブルパンケーキコイル 2 個を離隔 100 mm で一体化させた 2 極コイルであり、Faraday Factory Japan 社製の REBCO 線材を用いた。コイルの諸元を表 1 に示す。

まず、20 K の大気圧飽和液体水素で試験コイルを浸漬冷却した状態で励磁試験を行い、コイルの電圧が急激に上昇して熱暴走を開始する電流値を検証した。本報では、この電流値を限界電流と呼ぶ。次に、限界電流の 80% までコイルを励磁した状態で、ヒーターを ON にして液面を下げいき、コイルが熱暴走を開始するまでの現象を観測した。

## 3. 結果・まとめ

20 K の大気圧飽和液体水素中で、掃引速度 0.2 A/s で試験コイルを励磁した。240 A から 250 A まで励磁中に熱暴走し、クエンチ検出器が動作して電源を遮断した。再び同条件で 240 A まで励磁してコイルが劣化していないことを確認した。限界電流値として定めた 240 A の 80% である 192 A まで電流を下げ、ヒーターを ON にして 125 W の入熱を開始して液面を下げた。温度変化の様子と電源遮断時刻を図 2 に示す。Ts1 の温度が液温 20 K から上昇し始めた 62 分後に Ts2 の温度上昇が確認された。さらに 10 分後には Ts3 の温度上昇が確認され、その 4 分後にコイルが熱暴走し、クエンチ検出器が動作して電源を遮断した。

以上の結果から、冷媒である液体水素の供給が停止してコイルが完全に液面から露出しても、しばらくは通電を継続できる可能性があることが明らかになった。引き続き、実際のコイルの冷却条件や発電機の運用条件も考慮した検証試験を行い、液体水素冷却高温超電導コイルの冷却安定性について

知見を深める。

Table.1 Specifications of double pancake coil (1 pole)

Width of REBCO wire	4 mm
Thickness of REBCO wire	66 $\mu$ m
Effective length of double pancake coil	200 mm
Width of double pancake coil	120 mm
Thickness of double pancake coil	9.3 mm
Number of turns in double pancake coil	100

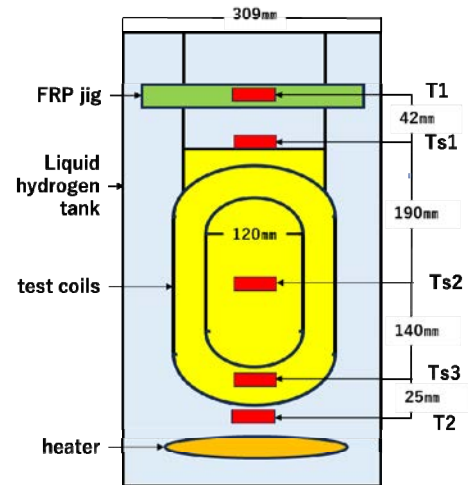


Fig.1 Schematic diagram of the test sample

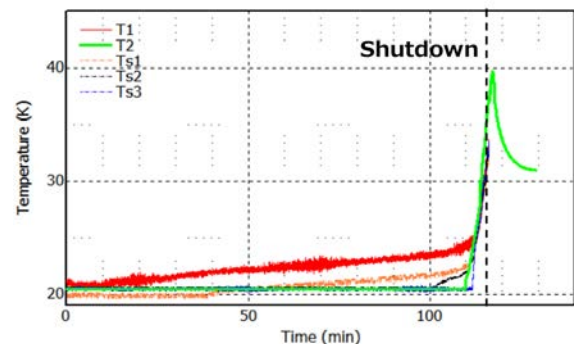


Fig.2 Temperature measurement results and current shutdown time

## 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業 (JPNP14004) の結果得られたものです。

## 参考文献

1. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104 (2022) 1A-p02

# 高温超電導回転機を構成するパンケーキコイル の着磁特性評価

## Evaluation of magnetization characteristics of pancake coils for high-temperature superconducting rotating machines

井浦 康佳, 古賀 太陽, 窪田 涼介(福岡工大); 岩熊 成卓(九大); 井上 昌睦(福岡工大)  
 IURA Yasunobu, KOGA Taiyo, KUBOTA Ryosuke (Fukuoka Inst. Tech.); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);  
 INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)  
 E-mail: mem22101@bene.fit.ac.jp

### 1. はじめに

超電導回転機の構造としては、かご型回転機のローターバーを超電導の積層導体に置き換えたものや、レーストラックコイルを用いるものなどがある。レーストラックコイルは、固定子と回転子のそれぞれでの使用が考案されているが、利用形態によって線材内部の電流分布や磁場分布が異なることとなる。我々はそこで、レーストラック型のダブルパンケーキコイルの磁場特性及び電流分布特性を実験と有限要素解析により調べている。

### 2. レーストラックコイルの着磁シミュレーション

作製するレーストラックコイルの概要図を Fig.1 に示す。レーストラックコイルの巻棒 1 つに対し 2 mm 幅線材を 2 列配置するダブルパンケーキ形の構造としている。最小半径は 40 mm、長辺の長さは 83 mm である。

まず、レーストラックコイルに巻く超電導線材の  $I$ - $V$  特性を調べた。用いた超電導線材は Super Power 社製の REBCO 線材 (SCS2030-AP) で、幅は 2 mm、長さ 120 mm である。これを直線の状態 (Fig.2(a)) と、想定している半径よりも一回り小さい直径 30 mm の円形の状態 (Fig.2(b)) の 2 通りとして、 $I$ - $V$  測定を行った。2 つの測定を連続して行うために、直線の状態での測定では電流端子をインジウムを用いて接続している。また REBCO 線材に取り付けた電圧端子間距離はいずれも 20 mm である。 $I$ - $V$  測定は、液体窒素、自己磁場中で行った。その結果を Fig.3 に示す。超電導線材を巻く前の  $I_c$  は 85.2 A、巻いた状態での  $I_c$  は 85.4 A であり、最小半径 30 mm での超電導線材の劣化はないことが確認できた。

次に、着磁を模擬した有限要素解析を行った。解析には JMAG-Designer を使用し、Fig.1 に示すレーストラックコイルの 3 次元モデルを作成した。着磁に用いた磁石は大きさ 20 mm×50 mm、磁場強度は 500 mT である。磁石との距離 5 mm で 1 秒間着磁を行いその後 100 mm 磁石を持ち上げた。その時の電流密度分布のコンタ図を Fig.4 に示す。磁石は Fig.4 の上部に設置しているので、磁場の強い線材上部に電流が多く流れることになるが、その様子が確認できている。発表当日は、作製したレーストラックコイルの着磁特性も併せて報告する予定である。

### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務、並びに JSPS 科研費 JP22H01928, JP22H02019 の結果得られたものである。

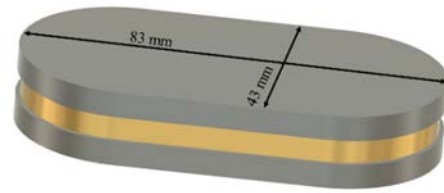


Fig.1 Schematic of racetrack coil

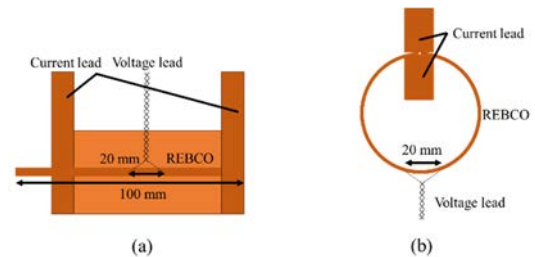


Fig.2 Schematic diagram of  $I$ - $V$  measurements

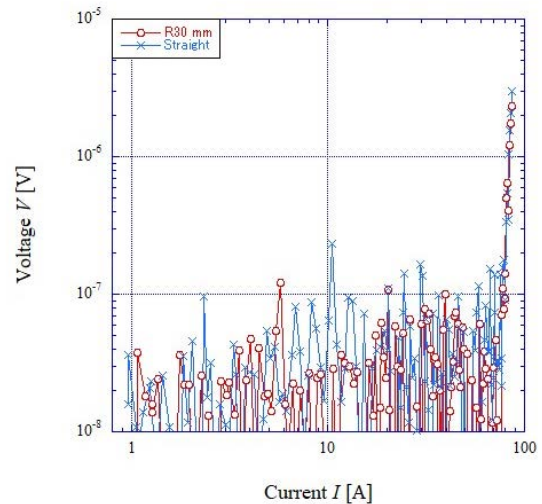


Fig.3  $I$ - $V$  characteristics at 77K, self-field

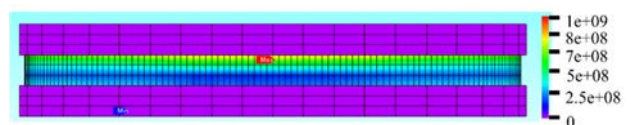


Fig.4 Current density contour diagram



# MgB<sub>2</sub> 多芯線の高調波成分を含む回転磁界下での交流損失の数値解析

## Numerical analysis of AC losses in MgB<sub>2</sub> multifilament wires under a rotating magnetic field containing harmonic components

奥村 隼月, 河野 亮介, 中村 大翔, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

OKUMURA Satsuki, KAWANO Ryosuke, NAKAMURA Haruka, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: satsuki-okumura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量削減に向けて航空機の電動化の研究が盛んに行われている。特に従来の回転機に比べて高効率・高出力密度の超電導回転機の適用が検討されている。超電導回転機には界磁巻線、電機子巻線の両方が超電導線材を使用している全超電導回転機と界磁巻線のみ超電導線材を使用している界磁超電導回転機の2種類がある。我々は全超電導回転機に着目して研究を進めている。

全超電導回転機の電機子巻線に回転磁界が印加されると交流損失が発生するため、回転機的设计において電機子巻線の交流損失特性を評価することが重要である。交流損失はヒステリシス損失、結合損失、渦電流損失の3つに分けられる。本研究では MgB<sub>2</sub> コイルを対象に回転磁界を印加した場合の交流損失、主に結合損失とヒステリシス損失を数値解析により評価した。また、印加回転磁界に高調波成分が重畳した場合の電磁特性について議論する。

### 2. 解析手法とモデル

$H$ - $\phi$ 法を使用して MgB<sub>2</sub> 線材に回転磁界を印加した場合について3次元数値解析を行った。超電導領域と銅領域を  $H$  法で計算し、その他の空気領域を  $\phi$  法で計算している。解析モデル形状を Fig. 1 に示し、解析モデルの寸法及び解析条件のパラメータを Table 1 に示す。解析には COMSOL Multiphysics を用いた。印加回転磁界の振幅磁束密度が 1.2 T の場合を解析し、3次高調波成分を重畳した場合の影響を確認した。

また、理論式からヒステリシス損失及び結合損失を求めた。ヒステリシス損失及び結合損失の理論式は以下の式で与えられる<sup>[2]</sup>。

$$W_h = \frac{16}{3\pi} f \lambda B_m J_c D_o \Omega(\eta) \quad (1)$$

$$W_c = \frac{1}{2\rho_e} (f B_m l_p)^2 (1 + \eta^2) \quad (2)$$

ここで  $f$  [Hz],  $\lambda$ ,  $B_m$  [T],  $J_c$  [A/m<sup>2</sup>],  $D_o$  [m],  $\rho_e$  [ $\Omega$ m],  $l_p$  [m] はそれぞれ周波数, 超電導フィラメントの占積率, 最大印加磁束密度, 超電導フィラメントの臨界電流密度, 超電導フィラメント半径, 横方向抵抗率, ツイストピッチである。 $\Omega(\eta)$  は回転磁界の周波数楕円率である。

### 3. 解析結果と考察

基本波成分のみの場合 ( $k_3=0$ ) と 3次高調波を 1% 重畳させた場合 ( $k_3=0.01$ ) を計算した。Fig. 2 に高調波を重畳していない場合の磁束密度分布を示す。また、ヒステリシス損失及び結合損失について、高調波成分が重畳されていない場合と重畳されている場合を比較し Table 2 にまとめた。ヒステリシス損失, 結合損失ともに高調波成分が重畳されると損失が減少した。高調波成分が重畳されると損失が時間とともに振動するが 1 周期分計算することができなかったことが原因だと考えられる。

### 4. まとめと今後の展望

MgB<sub>2</sub> コイルを対象として 3次元モデルを構築し、交流損失解析を行った。考察で述べた通り、理論値と違いが出る原因

は線材が有限長であることに起因していると考えられる。したがって、今後は周期境界条件を付与したモデルを構築する。また、コイル形状になった場合の結合損失についても検討する。

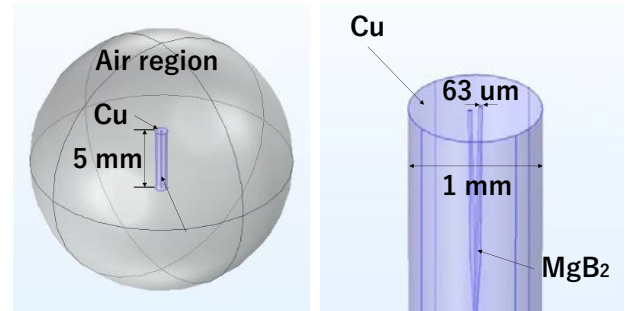


Fig. 1 MgB<sub>2</sub> multifilament wire model built in COMSOL.

Table 1 Analysis conditions

Number of filaments	2
Filament diameter $D_o$	63 [ $\mu$ m]
Wire diameter $D_{wire}$	1.0 [mm]
Packing factor $\lambda$	2
Twist pitch $l_p$	10.0 [mm]
Total wire length	10.0 [mm]
Air region diameter	10 [mm]
Frequency $f$	0.312 [Hz]
Applied magnetic flux density $B_m$	1.2 [T]
Critical current density $J_c$	$3.3 \times 10^8$ [A/m <sup>2</sup> ]
$\Omega(\eta)$	$\pi/4$

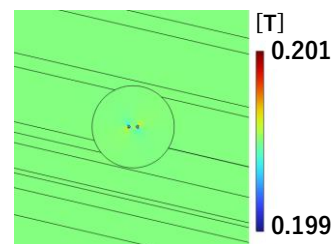


Fig. 2 Magnetic flux density distribution 0.9 seconds after the application of a rotating magnetic field.

Table 2 AC losses

	$k_3=0$	$k_3=0.01$
Hysteresis loss	$2.55 \times 10^{-8}$	$2.53 \times 10^{-8}$
Coupling loss	$7.37 \times 10^{-8}$	$7.27 \times 10^{-8}$

### 参考文献

- 雨宮尚之, “高温超電導体の交流損失,” *低温工学*, Vol. 45, No. 8, pp. 376-386, 2010.
- 野田稔 *et al.*, “楕円状回転横磁界中の超電導多芯線の交流損失,” *低温工学*, Vol. 21, No. 6, pp. 348-353, 1986.

# 無絶縁高温超伝導界磁巻線を有する大型同期電動機のベクトル制御特性の解析 Analysis of Vector Control Characteristics of Large Scale HTS Synchronous Motor Using No-insulation Field Winding

◎吉田 偲生, 原山 亨介, 小川 純, 福井 聡(新潟大学);石山 敦士(早稲田大学)

YOSHIDA Saiki, HARAYAMA Kyosuke, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi (Niigata Univ); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ)

E-mail : f22c089a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

## 1. はじめに

大型 HTS 電動機の頑健性を担保するために NI コイルを界磁巻線に適用することが検討されている。同期機の界磁巻線に NI コイルを適用する場合、ターン間の横断電流が回転機特性や制御性に与える影響を評価する必要がある。本研究では、船舶用 20 MW 級 HTS 同期電動機の電気設計を行い、3 次元有限要素解析により、NI 界磁コイルを考慮したモータモデルを作成した。このモデルに基づき、ベクトル制御による制御特性について検討した。

## 2. モータモデル

本研究では、大型船舶への適用を想定した出力 20 MW/回転数 90 rpm の HTS 同期電動機を対象とする。界磁コイルは、12 mm 幅の REBCO 線コイルを用いて、空隙磁界 3.2 T 程度が発生できるように界磁電流を 500 A (最大垂直磁界 4.74 T)とする設計とした。電気装荷を 200 kA/m, 定格電圧を 4.5 kVrms (線間電圧)として、90 rpm で最大出力 21 MW 程度(負荷角 $\pi/2$ )が得られるように固定子巻線を設計した。設計諸元及び断面構造図を Tab. 1 及び Fig. 1 に示す。このモデルについて、3 次元有限要素解析によりインダクタンスを解析し、dq 等価回路を導出した。ここで、各極の NI 界磁コイルはそれぞれが簡易的にインダクタンスとターン間接触抵抗から決定される等価抵抗との並列回路で表すことができることを踏まえ、界磁インダクタンスに並列抵抗を挿入するように d 軸回路を修正する。dq 等価回路を Fig. 2 に示す。この等価回路に基づく、電圧及び運動方程式は以下のように表せる。ここで、 $v_d, v_q, i_d$  及び  $i_q$  は、それぞれ d 軸及び q 軸の電圧及び電流、 $i_{fL}$  は界磁電流の d 軸成分、 $R_a$  は電機子抵抗、 $L_d$  及び  $L_q$  は d 軸及び q 軸の自己インダクタンス、 $M_{af}$  は電機子-界磁間の相互インダクタンス、 $\omega_e$  及び  $\omega_m$  は電気及び機械角速度、 $J_m$  及び  $D_m$  は機械系の慣性モーメント及び減衰係数、 $P$  は極数、 $T_L$  は負荷トルクである。なお、 $p$  は時間に関する微分演算子、 $k$  は絶対変換に付随する係数である。

$$\begin{aligned} v_d &= (R_a + L_d p)i_d - \omega_e L_q i_q + kM_{af} p i_{fL} \\ v_q &= (R_a + \omega_e L_d)i_q + L_q p i_q - kM_{af} i_{fL} \quad \dots (1) \\ J_m p \omega_m + D_m \omega_m &= P(kM_{af} p i_{fL} i_q) - T_L \end{aligned}$$

## 3. 速度制御シミュレーション

速度制御特性への影響を評価するために、Fig. 2 に示す dq 等価回路に基づいてベクトル制御則を導出した。電流及び速度制御器は PI 制御で構成する。Fig. 3 に駆動及び制御ブロック図を示す。Fig. 3 のブロック図に基づき、界磁電源電流を定格値で一定に保ち、速度指令値を一定の掃引率で変化させる基本的な解析を行った結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示すように、電機子側からの電流ベクトル制御による速度制御は十分に可能であることが分かった。詳細な解析結果は当日報告する。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(22H01464 及び 22K01478)により実施した。

## 参考文献

(1) U. Bong et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 31, No. 5, 5200505, 2021.

Tab. 1 HTS Synchronous Motor Model Specification.

基本諸元		界磁	
定格出力 [MW]	20	定格電流 [A]	500
定格電圧 [V]	4503	電流密度 [A/mm <sup>2</sup> ]	167
定格電流 [A]	2700	ターン数	3400
回転数 [rpm]	90	線材間横断抵抗 [ $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	100
回転数 [Hz]	6	電機子	
極数	8	電流密度 [A/mm <sup>2</sup> ]	4
		スロット数/極・相	4
		導体数/スロット	4

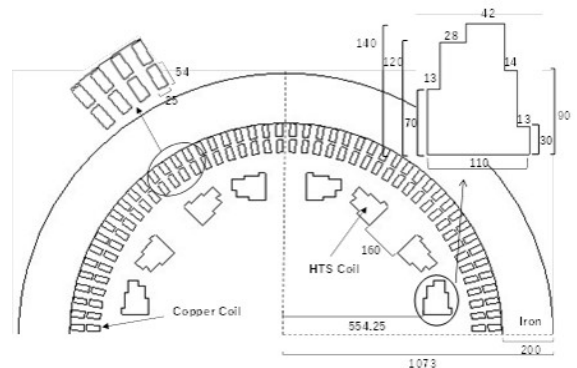


Fig. 1 Schematic cross section of numerical model.

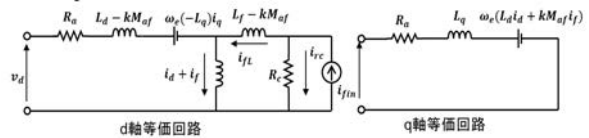


Fig. 2 dq equivalent circuit for synchronous motor with NI HTS field coils.

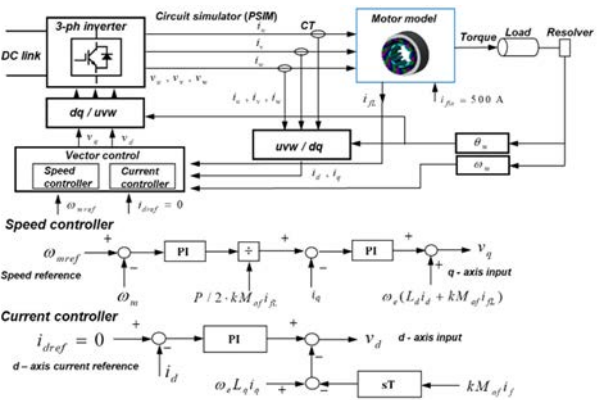


Fig. 3 Diagram of vector control and excitation circuit.

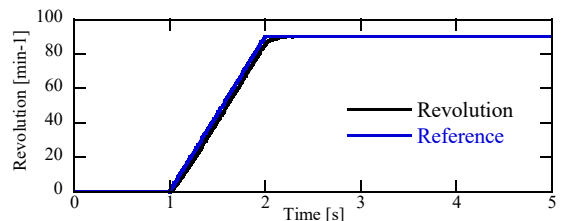


Fig. 4 Example of simulation result of speed control.

# アキシアルギャップ型高温超伝導誘導電動機の実験用モデル機の電気設計及び特性解析

## Electric Design of Experimental Model for Axial Gap Induction Motor and Analysis of Its Motor Characteristic

額田 このみ, 鈴木 優輔, 市橋 駿, 小川 純, 福井 聡 (新潟大学)

KIKUTOJI Konomi, SUZUKI Yusuke, ICHIHASHI Shun, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi (Niigata University)  
E-mail : f22c058a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

回転子に高温超伝導(HTS)を適用したカゴ型誘導機は、準同期(超極小すべり)運転が可能であることや超伝導 2 次導体の電流容量により(1 次側の入力可能範囲内で)同期出力が設計可能など、従来の誘導機にはない特徴を有する。これらの特徴は、原理的には励磁周波数や定格容量に依存しないため、種々の分野への適用が期待できる。HTS 誘導機の一層の高出力密度化には、固定子巻線の HTS 化が有効である。しかしながら、固定子巻線の HTS 化を考えた場合、現用機で用いられる複雑なコイルエンド構造は採用できないため、HTS 導体に適したコイル構造を用いる必要がある。我々は、単純なコイル構造で一般の分布巻と同様な正弦波起磁力分布が得られるトロイダル巻固定子と固定子を 2 つの回転子で挟み込むダブルロータ構造のアキシアルギャップ型の HTS 誘導電動機(HTS-AGIM)を考案し、その基礎特性を評価するための小型モデル機の開発を進めている。本研究では、モデル機の 3 次元有限要素解析による電気設計と HTS の電磁的・熱的特性を考慮した等価回路解析による特性解析を行った。

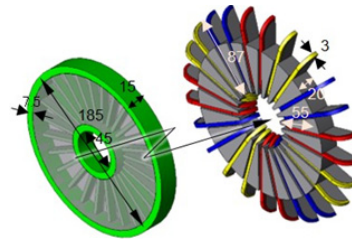


Fig. 1 Schematic illustration of experimental model.

Tab. 1 Design specification of experimental model.

目標出力	2 kW 以上	固定子	
定格電圧	50 V	電気装荷	32.4 kA/m
定格電流	30 A	コイル数/極/相	2
同期回転数	1500 rpm	ターン数/コイル	15
周波数	50 Hz	巻線部電流密度	56 A/mm <sup>2</sup>
極数	4	回転子	
外直径	299 mm	スロット数	27
軸長	100 mm	導体部臨界電流	800 A

### 2. 電気設計

まず、小型モデル機製作のための基礎設計と特性解析に必要な等価回路定数の算出を行った。電気設計ではまず、HTS 化のベースとなるパラメータを設計する。FEM 解析により、固定子は HTS コイルを用いた場合の電流値とし、回転子導体を全て銅とした場合、すべり 0.05 付近で 600 W 程度以上の出力が得られ、かつ、使用可能な材料の寸法や加工制限を考慮し、詳細な諸元を決定した。Fig. 1 及び Tab. 1 に、設計した小型モデル機の構造及び諸元を示す。FEM 解析により、このモデルにおいて、すべり 0.02~0.05 の範囲でトルクを解析した。一例として、すべり 0.02 及び 0.05 のときの解析結果を Fig. 2 に示す。この結果より、回転子が銅導体の場合、すべり 0.05 のときに 792 W 程度の出力が得られることが分かった。次に、本モデルについて、FEM 解析で無負荷試験及び拘束試験を行い、等価回路定数を求めた。求めた等価回路定数を Tab. 2 に纏める。

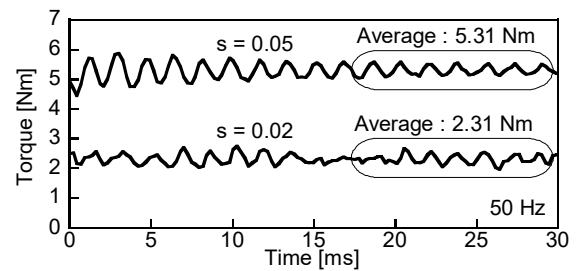


Fig. 2 Analytical results of torque in case of Cu secondary.

Tab. 2. Equivalent circuit constants (one side of rotor)

$X_m$	0.7771 $\Omega$
$R_m$	0.03052 $\Omega$
$X_1+X_2'$	0.1987 $\Omega$

### 3. 等価回路モデルによる特性解析

Tab. 2 に示す等価回路定数に基づき、回路・熱・運動の連成解析を行い、HTS 化した場合の性能を確認する。HTS 2 次導体の臨界電流を 800 A とし、HTS 化した場合のトルク及び 1 次電流の特性を解析した。更に、2 次導体温度を 77 K 以上で固定した場合のすべりモードの特性についても解析を行った。これらの結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 に示すように、高温超伝導化により、1 次電流 30 A 以下で準同期出力 2 kW 以上が得られることが確認できた。

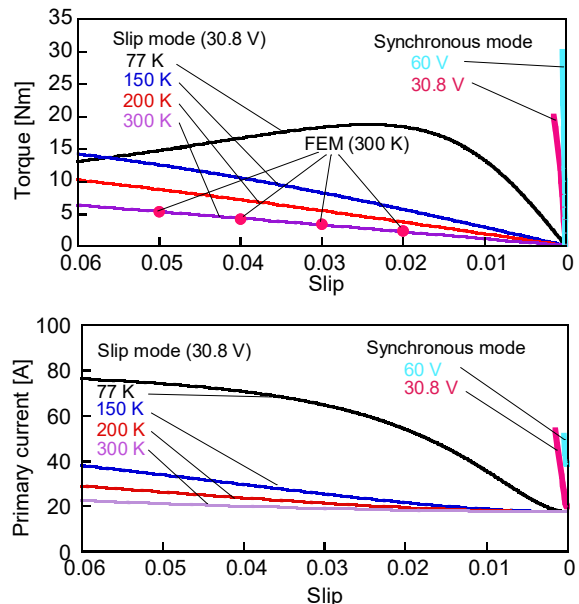


Fig.3 Analytical results of torque-slip and primary current-slip characteristics of experimental model

### 4. まとめ

本研究では、HTS-AGIM の基礎特性を評価するための実験用モデル機の電気設計及び予想される特性を理論的に検討した。実験用モデル機の設計過程の詳細及びその他の解析結果は当日報告する。

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号 22H01464)により実施した。

# 超電導磁気軸受における分割構造と損失特性との関係に関する数値解析 Numerical Analysis of the Relationship between Segmented Structure and Loss Characteristics in Superconducting Magnetic Bearings

原島 郁弥, 奥村 皐月, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大); 桜井 雄基 (岡山大); 松村 知岳, 片山 伸彦 (東大)  
HARASHIMA Fumiya, OKUMURA Satsuki, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo);  
SAKURAI Yuki (Okayama Univ.); MATSUMURA Tomotake, KATAYAMA Nobuhiko (Univ. of Tokyo)  
E-mail: harashima238@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

超電導磁気軸受(SMB)は、通常、固定子側のバルク超電導体と回転子側の永久磁石および鉄ヨークから構成される。超電導体のピン止め効果によって機械的に非接触な浮上・回転運動が可能であり、低損失、長寿命、省メンテナンス性という特長を持つ[1]ことから、フライホイールや人工衛星搭載用軸受[2]への応用が検討されてきた。しかし、人工衛星搭載用軸受のように大きな直径をもつSMBの場合、Fig. 1(a)に示すようにSMBが固定子・回転子ともに分割された構造にせざるを得ないが、分割構造と回転損失を含む電磁的特性の関係はまだ詳細に判明しておらず、解析により明らかにする必要がある。本研究では特に分割固定子の構造及び特性に着目し、回転損失とその原因の1つである磁界の不均一性( $\Delta B$ )との関係について、3次元電磁界数値解析によって評価した結果を報告する。

## 2. モデルの構成と解析手法

解析に用いたSMBの1/24モデルの構造をFig. 1(b)に示し、モデルのパラメータをTable 1に示す。永久磁石は径方向平行着磁となっており、鉄ヨークとともに磁気回路を構成する。固定子と回転子間の初期ギャップは5 mmであり、重力による沈み込み過程を、0.2 s かけて沈み込みが完了するように与えている。

また、解析手法には  $H$ 法と  $\phi$ 法を組み合わせた  $H$ - $\phi$ 法を用いた。超電導体を含む領域の磁界および超電導電流の計算に  $H$ 法を用い、それ以外の領域の磁界の計算に  $\phi$ 法を用いた。超電導体の電流電圧特性として  $n$  値モデルを導入し、臨界電流密度の磁界依存性として Kim モデルを用いた。以上の条件のもと、有限要素法解析ソフトウェア COMSOL Multiphysics を使用して解析を行った。

## 3. 解析結果

臨界電流密度を変化させた場合について、浮上力が500 N で一致するように沈み込み距離を調整して得られた解析結果をFig. 2に示す。この図は内側鉄ヨークの底面中央において固定子の超電導電流から生じる誘導磁界の分布を表しており、縦軸は磁束密度、横軸はSMBモデルの周方向角度となっている。磁束密度の変化の大きさを  $\Delta B$  と定義すると、その値はどの臨界電流密度でも約 40 mT となった。このことから、回転子側の底面にあらわれる磁界の不均一性は、浮上体重量が変わらない限り、臨界電流密度にほとんど依存しないことが分かった。今後は引き続き固定子のパラメータと  $\Delta B$  との関係解析により明らかにし、軸受構造の最適化を行っていく予定である。

### 参考文献

- John R Hull.: Supercond. Sci. Technol., Vol.13, No.2 (2000)
- Y. Sakurai, et al.: Proc. SPIE 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX; 107080E (2018)

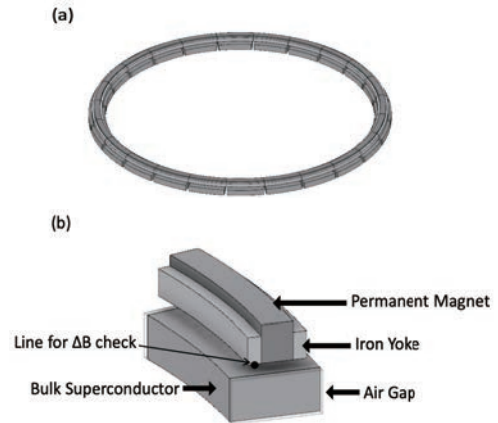


Fig. 1 (a) Basic structure of the SMB, (b) 1/24 model of the SMB for numerical analysis.

Table 1. Main parameters of the SMB components for numerical analysis.

Rotor (PM)	
Width × Height	12 mm × 14 mm
Angle	15 deg.
Remanence	1.2 T
Rotor (Iron yoke)	
Width × Height	5 mm × 10 mm
Angle	15 deg.
Relative magnetic permeability	$1.00 \times 10^2$
Stator (YBCO)	
Width × Height	34 mm × 16 mm
Distance from rotation axis	294 mm
Critical current criterion $E_c$	$1.00 \times 10^4$ V/m
$n$ index	21
Constant of Kim model $B_0$	0.35

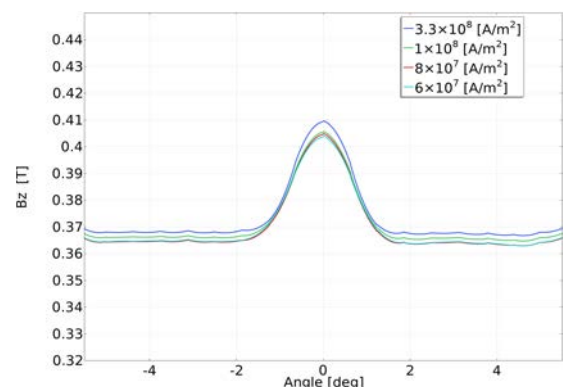


Fig. 2 Distribution of  $B_z$  for different critical current densities.

## 縮小版 FAIR 導体の交流損失評価

### Evaluation of AC Losses in Reduced-Size FAIR Conductor

摺木 惇人, 川越 明史(鹿児島大学); 平野 直樹, 小野寺 優太, 三戸 利行 (NIFS)

ATSUTO Suruki, AKIFUMI Kawagoe(Kagoshima University); NAOKI Hirano, YUTA Onodera, TOSHIYUKI Mito(NIFS)  
E-mail: k3261878@kadai.jp

#### 1. はじめに

FAIR 導体は、REBCO 線とアルミニウムシートを交互に積層し、アルミニウム合金のジャケットに入れ、蓋部を摩擦攪拌接合した大容量 HTS 導体である。今回用いたサンプルは直径 6mm、長さ 100mm の縮小版 FAIR 導体である。核融合装置や SMES、磁気冷凍機などへの応用が期待できる。この導体は変動磁界にさらされるため、超伝導積層部分でヒステリシス損失と結合損失が発生し、アルミジャケットで渦電流損失が発生すると考えられる。最適な導体を設計するためには、このような交流損失を定量的に把握する必要がある。

縮小版 FAIR 導体 3 本の短尺サンプルを用意し、液体窒素中で交流磁界を印加したときの交流損失を測定した。今回はツイストを施していない直線サンプルであるものの、サンプル長に対応する結合損失が発生すると考えられる。3 本のサンプルでそれぞれ角度を変えて測定し、その特性を評価した。

#### 2. 実験方法

測定に用いた 3 つのサンプルをそれぞれ sample A,B,C とする。この導体では幅 4mm の REBCO 線材( $J_c = 475 \text{ A/cm-w at } 77 \text{ K s.f.}$ ) 15 枚とアルミニウムシートが用いられている。3 つのサンプルの製法は同じであるものの、製作時のばらつきによって特性に差が観測される可能性がある。

交流損失はピックアップコイル法を用いて測定した。サンプルに印加する交流磁界は、銅マグネットを用いて発生させた。サンプル全長をループとする結合損失特性を評価するために、ピックアップコイルはサンプルよりも長くした。印加磁界とテープ幅広面とのなす角が 0 度と 90 度で測定した。印加磁界振幅は 3.2~78.0mT、周波数は 3~1000Hz とした。また、損失の内容を考察するために内部導体が入っていないアルミジャケットのみの測定も行った。

#### 3. 実験結果と考察

Fig.1 にテープ面に平行磁界を印加したときの各 FAIR 導体の損失と中に積層導体が入っていないアルミジャケットの損失の測定結果を示す。測定した交流損失値は、サンプル単位体積あたり、印加磁界一周期あたりの損失エネルギー密度 [ $\text{J/m}^3$ ] である。□, △, ○, ◇ は、それぞれ sample A, B, C, そしてアルミジャケットの結果である。縦軸は、測定値を  $\mu_0 H_m^2$  で割って規格化した値である。  $H_m$  は印加磁界振幅である。横軸は周波数である。複数の磁界振幅で測定したところ、すべて同じ結果になったので、得られた測定値は結合損失と渦電流損失の和であると考えられる。

低周波領域では、アルミジャケットのみの損失が FAIR 導体の 10 分の 1 程度なので、FAIR 導体の損失のほとんどが内部導体の結合損失であると考えられる。一方、高周波領域では、結合電流による磁界遮蔽効果が強まるため、アルミジャケットの渦電流損失を下回る結果になったと考えられる。

A, B, C の結合損失特性はサンプルごとに違いがあった。B の特性は、典型的なデバイ型曲線に近い。A と C は、ピークが複数ある特性となっている。この原因は、内部導体の歪みと考えられる。歪みがあると、導体全体の 1 つのループだけでなく、別のループも形成され、複数のピークが生じ得る。導体製作方法の最適化が十分でないために、サンプル製作時にばらつきが発生し、特に、REBCO 線材の積層構造の乱れが、

局所的に発生した可能性がある。

次に、テープ面に対して垂直磁界を印加したときの測定結果を Fig.2 に示す。縦軸は測定した損失値である。横軸は磁界振幅である。この測定では、測定装置のエラーの影響のため、23Hz 以上の高周波数領域のデータが正確に得られなかった。そのため、22Hz までの結果を示している。この領域では、周波数依存性がほとんど観測されなかった。また、測定値は磁界の 3 乗に比例している。したがってこの損失は、ヒステリシス損失だと考えられる。ヒステリシス損失には、サンプルごとに差はない。このことから、内部の歪みは比較的局所的なものであると考えられる。

#### 4. まとめ

縮小版 FAIR 導体の交流損失を実験的に評価した。テープ面に対して平行磁界を印加したとき結合損失、垂直磁界を印加したときヒステリシス損失の発生が観測された。結合損失特性には、同じ製法のサンプルでも差があったことから、REBCO 線材の積層構造が局所的に乱れていることが示唆された。今後は、特性がより一定の導体制法の確立と交流損失の最適化を同時に進めていく必要がある。

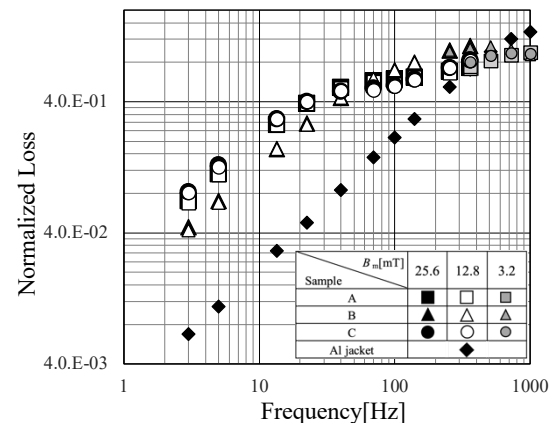


Fig.1 Measured AC losses in each sample under parallel magnetic field.

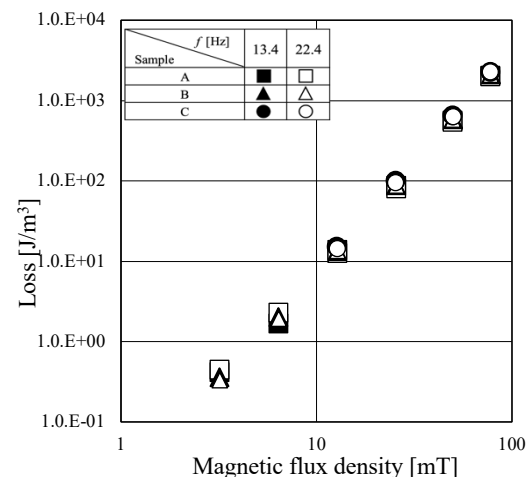


Fig.2 Measured AC losses in each sample under perpendicular magnetic field.

## 20kA級高温超電導STARS導体の開発進展と大型マグネット適用検討 Development of 20-kA-class HTS STARS conductor and application to large magnets

柳 長門, 成嶋吉朗 (NIFS); Diego Garfias-Dávalos (総研大); 小野寺優太, 濱口真司, 力石 浩孝, 平野直樹, 高畑一也 (NIFS); 伊藤 悟 (東北大)

YANAGI Nagato, NARUSHIMA Yoshiro (NIFS); GARFIAS-DÁVALOS Diego (SOKENDAI); ONODERA Yuta, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hiroataka, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya (NIFS); ITO Satoshi (Tohoku Univ.)  
E-mail: yanagi.nagato@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所 (NIFS) では将来の核融合炉と次世代のプラズマ核融合実験装置の大型マグネットへの適用をめざし、内部構造の異なる3種類の大電流高温超伝導 (HTS) 導体 STARS、FAIR、WISE の開発を行っている。このうち、STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体は多数枚の REBCO 線材を単純に積層して安定化銅ケーシングに収納、外側をステンレスジャケットで覆うことで耐電磁力特性に優れた仕様となっている。特に、ステンレスジャケットにはレーザービーム溶接を施している。また、銅とステンレスの間に電気絶縁を仕込んだ内部絶縁方式という他にない特徴も持っている。ヘリカル型核融合炉 FFHR への適用をめざして 2005 年から開発を始め、2014 年には 100 kA 級模擬試験体 (全長 ~3 m) で、温度 20 K、磁場 5.3 T (いずれも ~300 mm 区間) において電流値 100 kA を達成した [1, 2]。2019 年からは 20 kA 級で実用となる導体の開発を進めており、12 mm 幅 REBCO 線材 15 枚を積層して用いている。 [3, 4]。

### 2. 20 kA 級 STARS 導体 6 m 長サンプルの励磁試験

20 kA 級 STARS 導体について直径 600 mm、3 ターンのソレノイドコイル形状で巻線したサンプルを製作し、冷却励磁試験を行った。巻線した導体の端部は電流リード延長部と機械的に接続し、これを大口径高磁場導体試験装置に取り付けた。導体の全長は約 6 m であり、導体に沿って取り付けられた銅チューブにヘリウムガスを流して間接冷却を行った。試験装置はボア径 700 mm の超伝導ソレノイドマグネットを有し、サンプル導体の全長に渡って一様磁場を印加した。第 1 回の試験では、外部磁場 8 T、温度 20 K で定格電流 18 kA まで安定に通電できることを確認するとともに、1 kA/s の電流掃引速度で高速通電 100 回を行い、導体の健全性が保たれていることを確認した。また、導体近くで測定した磁場の波形がサンプル電流の波形に対して遅れ、特に通電電流がゼロになった後の残留磁場が数十秒続くことを観測し、テープ線材間を渡る循環電流によるものと考えた。単純に積層した線材間にはコイル形状によってインダクタンスの差が生じ、これによる循環電流が誘起される、あるいは、等価的に非一様電流分布が生じると解釈できる。第 2 回の冷却励磁試験では外部磁場ゼロの条件で同様の測定を行ったところ、残留磁場の時定数がさらに長く、絶対値も大きくなることが認められた。この結果を定量的に説明すべく、数値シミュレーションを行っている。現状は 15 枚のテープ線材を 5 枚で代用するとともに、線材間の接続抵抗は 1 nΩ と仮定している。この条件において、Fig. 1 に示すとおり、1 kA/s の高速励磁では線材間に極めて大きな電流分布がつくことが示された。これをもとに導体直上に取り付けたホール素子における磁場を計算したところ、観測された波形にかなり近い結果が得られている。ただし、まだ完全なシミュレートには至っておらず、サンプルの形状や接続抵抗など、詳しい吟味を行っている。

### 3. 単純積層型 HTS 導体の大型マグネットへの適用可能性

単純積層 HTS 導体で長尺導体を構成し大型マグネットに適用することを考えると、線材間のインダクタンスの差によって循環電流が過大となることで一部の線材が担う電流が臨界に達しクエンチを引き起こすことが懸念される。これは、低温超伝導 (LTS) 導体における Ramp Rate Limitation (RRL) の観測などをもとにした一般的な見解である。これに対して HTS 導体の場合は温度マージンが大きいために簡単にはクエンチせず、各線材の電流が適宜再配分されることで安定に通電できるのではないかと考えたのが単純積層導体の当初からの提案であった。STARS 導体の実験と解析はこのことを示唆するものである。現在 STARS 導体を ITER のトロイダル磁場コイルの 1 ダブルパンケーキ相当に適用する検討を行っており、ある程度的高速通電において臨界に達する現象が見られるものの、電流がそこで制限されることでクエンチしない可能性が見い出されている。詳しい議論について報告する。

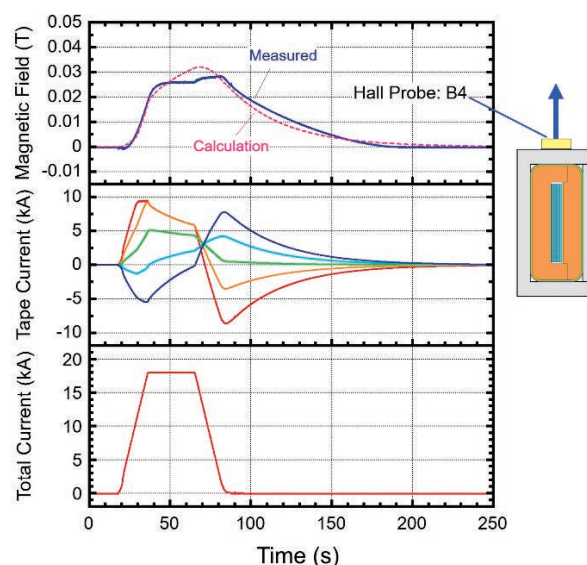


Fig. 1 Comparison between the measured and calculated magnetic field on the STARS conductor sample. For the numerical calculation, the 15 tapes are modeled by five tapes. The waveforms of the calculated currents in each tape are shown in the middle, and the sample current with a trapezoidal excitation is shown at the bottom.

### 参考文献

- [1] N. Yanagi et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 053021.
- [2] Y. Terazaki et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4602905.
- [3] N. Yanagi et al., Plasma Fusion Res. **17** (2022) 2405076.
- [4] N. Yanagi et al., Journal of Physics Conference Series **2545.1** (2023) 012008.

# 回転磁化法を用いた積層 REBCO 線材中の劣化位置の評価と解析

## Evaluation and analysis of degradation location in stacked REBCO conductor using rotational magnetization method

小野寺 優太, 平野 直樹, 三戸 利行 (NIFS)  
 ONODERA Yuta, HIRANO Naoki, MITO Toshiyuki (NIFS)  
 E-mail: onodera.yuta@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所では、次世代の核融合実験装置に高温超伝導を適用するために、大電流容量の高温超伝導導体およびコイル技術の研究開発を進めている。素線となる高温超伝導線材を集合させ機械的な補強材を被覆した導体を巻線して用いることを想定しており、候補となる導体の試作開発を進めているが、導体の製作過程で臨界電流特性の劣化が観測され、健全性の評価および製作プロセスへのフィードバックのためにも劣化位置の検出手法の確立が求められる。しかし、導体製作技術が未だ研究開発段階であり、劣化位置及び劣化程度を定量的に評価する手法は確立されていない。本研究では、回転磁化法を用いて積層した REBCO 線材を着磁し、REBCO 線材中に意図的に導入した劣化位置及び劣化程度の評価精度の検討を行うとともに、有限要素法を用いた解析との比較検討を行った。本手法はツイストされた導体での着磁も想定し、従来の外部磁場掃引による着磁方式に代えて、試料を静磁場中で回転させて着磁するものである。

### 2. 実験

実験には、Fig. 1 に示す幅 4 mm の REBCO 線材 ( $I_c = 350$  A/cm-w at 77 K s.f. 上海超導社製) を 5 枚用いた。1 層目から 3 層目にあたる線材にそれぞれ幅方向に約 2 mm の欠陥を意図的に導入し、厚さ 1 mm のスペーサーを各層間に挟みつつ積層させて測定用試料とした。液体窒素中にて、永久磁石による静磁場空間で本試料を回転させつつ搬送し、磁場の法線方向に配置したホール素子によって長手方向に亘る磁化信号を取得した。

### 3. 実験結果および解析

Fig. 2 に回転磁化法により着磁させて取得した磁化信号の強度分布を示す。REBCO 線材はテープ形状をしているため磁化の向きは膜面に対して垂直方向が主となる。そのため、1 回転させることで 2 つのピーク信号が得られる。(Fig. 2 実線部(a), 破線部(b)) それぞれのピーク信号値を長手方向に亘ってグラフ化したものを Fig. 3 に示す。導入した欠陥の位置は Fig. 1 に対応しており、Fig. 3 (a) では、1 層目から 3 層目に導入した欠陥によって、計測した磁化信号が減少している振る舞いが確認できる。また、Fig. 3 (b) では磁化信号の変化はほとんど観測されていない。この結果に対して、有限要素法解析ソフトウェア (PHOTO-Series, (株)フォトン) を用いて同等の劣化がある場合の磁場分布解析を行った。解析により得られた結果 (Fig. 3 赤線) は実験結果の振る舞いと一致しており、劣化位置の深さによる信号強度の変化であることが確認できた。従って、本手法によりピーク値の比較を行うことで劣化部分の深度まで把握可能であることが示された。また、線材端まで横断する劣化でなくとも計測可能であることが示された。

### 謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費 (23K13086) の助成を得て行ったものである。

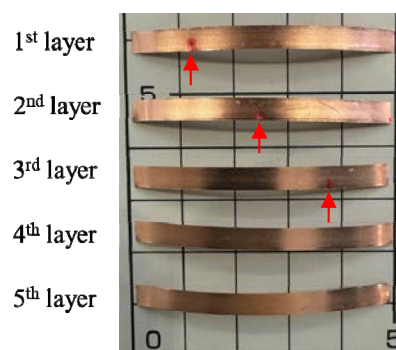


Fig. 1 Picture of REBCO tapes before stacked. The defects have been intentionally introduced (red points). These tapes were stacked from top to bottom while aluminum spacers interlaid in each gap.

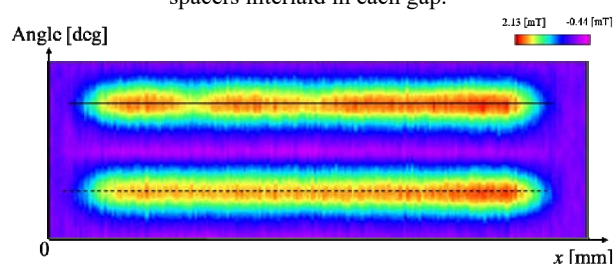


Fig. 2 Measurement result of magnetization distribution over the entire length of stacked REBCO tapes.

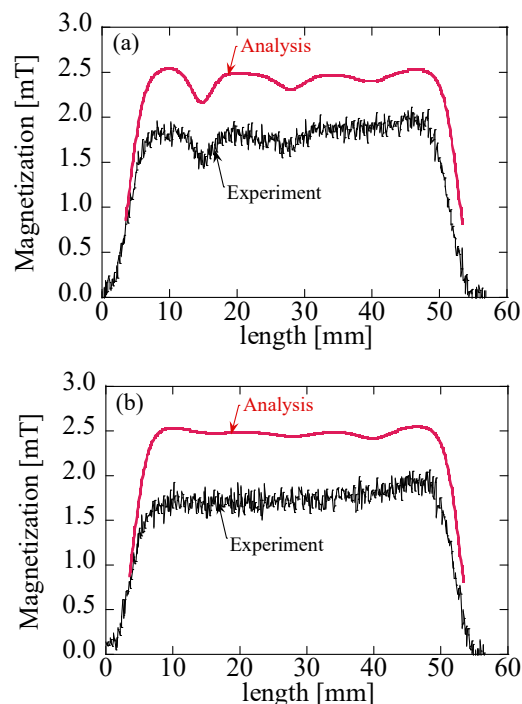


Fig. 3 Peak magnetization signals over the longitudinal direction. (a) defects closer to the surface, (b) the other side.

# ヘリカル型核融合炉 HESTIA 用候補超伝導導体の機械的挙動解析

## Analysis of the Mechanical Behavior of a Candidate Superconductor for the Helical Fusion Reactor HESTIA

田村 仁(核融合研);宮澤 順一, 後藤 拓也(Helical Fusion)  
 TAMURA Hitoshi (NIFS); MIYAZAWA Junichi, GOTO Takuya (Helical Fusion)  
 E-mail: tamura@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

早期の核融合反応実証を目指したヘリカル型核融合炉 HESTIA の設計検討が進められている。HESTIA は“HELical reactor with the surface flow of TiIn alloy”の略称で、LHD の実験成果と FFHR シリーズで培われた炉設計研究の成果を元に進められている[1]。超伝導ヘリカルコイルを構成する超伝導導体として、積層した高温超伝導(HTS)テープ線材と低融点金属含侵を用いた新型複合導体構造である WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes [2])が候補となっている。この候補導体を対象に、マルチスケールによる導体部の等価物性と、ヘリカルコイルに作用する電磁力によって、導体自体がどのような機械的挙動を示すかを解析した。

### 2. WISE 導体の等価物性

WISE 導体は積層した HTS 線材をフレキシブルチューブに内包させた状態で巻線し、巻線完了後に低融点金属でコイル全体を含浸する。含浸前の HTS 線材はチューブ内で可動できるため、巻き線途中の曲げやねじりに対して自ら最も抵抗が小さくなる姿勢に収まろうとする。そのため、ヘリカルコイルのような3次元的に複雑な形状での巻線が容易なることが期待されている。ヘリカルコイルへの適用を目指した導体構造では、コイル断面での導体の位置が正確になるようにフレキシブルチューブの周りをチタン製の固定部材で囲んでおり、この部材は同時に含侵後のコイル剛性を高めるためのアーマータ部材にもなっている。WISE 導体の等価物性を求めるために作成した解析モデルを Fig.1 に示す。このモデルは主要部材のみで構成しており、実際の導体とは詳細が異なる。導体の冷却は積層したHTS線材とともにフレキシブルチューブ内に収められた Cooling channel からの伝導で行われる。フレキシブルチューブ内は U-alloy 等の低融点金属で隙間なく含侵されている。冷却管は銅製、U-alloy とフレキシブルチューブは等方性でそれぞれヤング率 20GPa/ポアソン比 0.3、ヤング率 100GPa/ポアソン比 0.3 と仮定した。このような基本形状がコイルの巻線方向、高さ方向、および幅方向に連続して配置されているものとして、等価剛性を求める均質化解析を行った。均質化物性はモデルの各方向(x,y,z の軸及び xy,yz,xz 平面のせん断方向)にそれぞれ単位ひずみを与えた時の応力分布との関係から算出される。Table 1 に解析結果を示す。導体断面形状は x および y 方向に対称ではないが、等価物性はほぼ同等となった。得られた均質化物性値をヘリカルコイル全体モデルでの物性値として割り当てることで全体の構造解析を行い、さらに局所的に注目したい部分の結果を導体モデルに適用することで、導体構成部材の詳細な機械的挙動を知ることができる。

### 3. 電磁力によるコイルの応力・ひずみ

全体モデルとして、磁場強度が最も高い、すなわち電磁力が最も大きい装置である FFHR-c1(主半径 10.92m、小半径 2.8m、中心磁場 7.3T)を元にした。全体解析の結果の中でコイル巻き線分に注目すると、巻き線方向のひずみ分布として Fig. 2(a)に示すように最大 0.4%作用する結果となった。また、巻き線断面内のせん断応力は Fig. 2(b)に示すように±50GPa 程度となり、最も大きなせん断応力が発生している要素のひ

ずみ成分を導体モデルに与えて導体内部の様子を Fig. 3. のように得ることができ、より健全な導体設計を進める指針となる。導体の詳細仕様の変更があっても均質化モデルの再構築により均質化物性値を求めれば、全体モデルでは物性値を変更するだけで対応が可能である。また、WISE 導体では HTS 線材のコイル断面の高さ・幅方向と姿勢が必ずしも一致しないと予想されるため、この違いが機械的挙動にどの程度影響するかを検証した結果についても報告する。

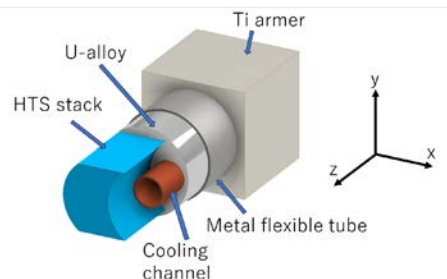


Fig.1 Schematic of analytic model for WISE conductor.

Table 1 Homogenized equivalent physical property

Young's moduli (GPa)	$E_x, E_y, E_z$	31.5, 31.5, 102
Shear moduli (GPa)	$G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}$	3.2 11.8, 11.8
Poisson's ratios	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	0.15, 0.1, 0.1

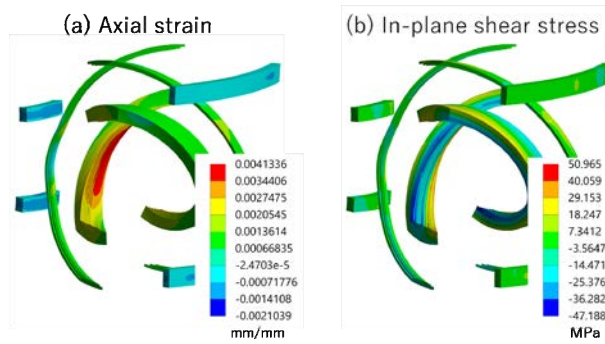


Fig.2 (a) axial strain distribution through the coil winding direction, (b) in-plane shear stress at coil cross-section.

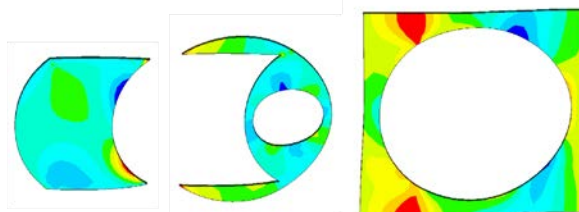


Fig.3 Von Mises stress distribution in components of WISE conductor (qualitative contour map).

### 参考文献

1. J. Miyazawa and T. Goto: Phys. Plasmas 30 (2023) 050601
2. S. Matsunaga, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 30 (2020) 4601405



# 単純積層 REBCO 導体を用いた 3 次元巻線マグネットのエッジ方向歪みの定量評価とその最小化

## Quantitative Evaluation and Minimization of Edgewise Strain in 3D Winding Magnet with Simple Stacked REBCO Conductors

成嶋 吉朗、柳 長門(核融合研、総研大); Diego GARFIAS-DAVALOS (総研大)  
 NARUSHIMA Yoshiro, YANAGI Nagato (NIFS, SOKENDAI); GARFIAS-DAVALOS Diego (SOKENDAI)  
 E-mail: narushima.yoshiro@nifs.ac.jp

### 1. Introduction

Our research is focused on the application of High-Temperature Superconducting (HTS) conductors to magnets within nuclear fusion reactors. Tape-shaped REBCO conductor exhibits flexibility in the plane direction, yet display limited bendability in the edge direction. Consequently, when constructing a three-dimensional magnet using a conductor that is simply stacked with tape, there exists a constraint due to the limited degree of freedom in the tape's bending direction. In this study, we explore the quantitative evaluation and minimization of edge distortion in three-dimensional winding magnets using simply stacked REBCO conductors. This investigation is conducted with the application of WISE conductors [1], which are classified as simply stacked conductors.

### 2. Edge Distortion of Single Tape Conductor

Consider the scenario in which a singular tape conductor is configured to circulate in the toroidal direction within a three-dimensional structure, as shown in Fig. 1. The edgewise strain, both prior to and after the optimization process (with and without the twisting of the tape), is demonstrated in Fig. 2(a). The optimization procedure, which is fundamentally based on the principle of least action, implements an iterative process that mitigates a particular Fourier amplitude of the edge strain. It can be observed that the edgewise strain, initially quantified at 0.65% before optimization, is almost eliminated through the optimization process. Furthermore, it has been found that the maximum twist angle achieved through optimization is 20 degrees, as shown in Fig. 2(b) [2].

### 3. Distortion of Stacked Tape Conductor

In practical magnet applications, it is imperative to augment current density by stacking tapes. Consequently, we conducted calculations to ascertain whether it is feasible to reduce the edgewise strain due to twisting, without causing interference between adjacent tapes, even within a stacked structure. Our findings revealed that the maximum twist angle remains a constant 20 degrees, irrespective of the distance ' $d$ ' in the stacking direction, as shown in Fig. 3. This suggests that there is no interference between adjacent tapes within a stacked structure, and the characteristic of reduced edgewise strain exhibited by a single tape is preserved.

### 4. Conclusion

Our findings indicate that by winding simply stacked REBCO tapes into three-dimensional windings prior to impregnation, it is possible to reduce edge distortion through spontaneous twisting. This characteristic can be fully leveraged with WISE conductors and has the potential to be applied to other simply stacked conductors, provided that impregnation can be performed post-winding.

This research was conducted with the budget of the Institute for Fusion Science No. 10201010ASU014 and 3520001482.

### Reference

- [1] Y. Narushima et al. "Test of 10 kA-Class HTS WISE Conductor in High Magnetic Field Facility", Plasma and Fusion Research, **17** (2022), 2405006  
 [2] Y. Narushima, et. al., "Edgewise-strain-free helical winding using high-temperature superconducting tape conductor", Plasma and Fusion Research, **15**, (2020), 1405076

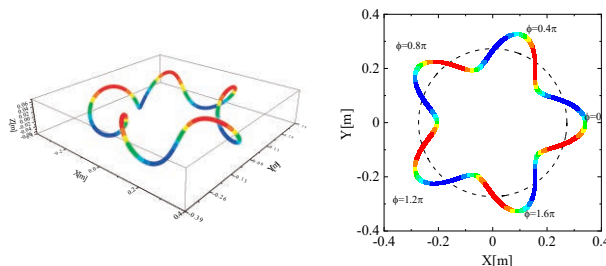


Fig.1 Trajectory of helical coil. Bird's eye view of helical coil (left). Top view of helical coil (right).

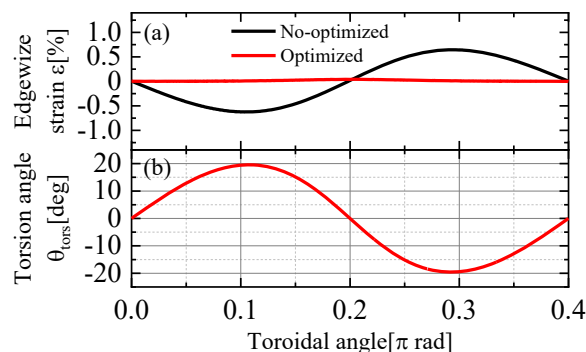


Fig. 2 Fig. 7 Toroidal profile of (a) edgewise strain and (b) torsion angle. Black and red lines indicate the no-optimization case and optimization case, respectively.

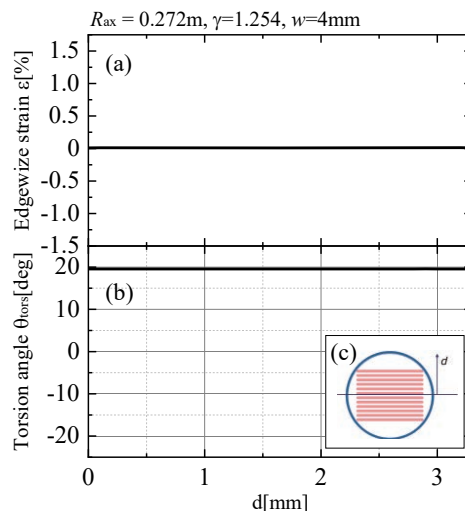


Fig. 3 Dependence of (a) edgewise strain and (b) torsion angle on stacked direction distance. Sketch of stacked tapes with the definition of  $d$  is shown in (c).

# ITER 中心ソレノイド導体の内部ひずみに対する短ツイストピッチの効果の解明

## Effect of Short Twist Pitch on Internal Strain of ITER Central Solenoid Conductor

諏訪 友音, 磯野 高明(量研機構); ハルヨ ステファヌス, 川崎 卓郎, 相澤 一也(原子力機構)  
 SUWA Tomone, ISONO Takaaki(QST); Stefanus HARJO, KAWASAKI Takuro, AIZAWA Kazuya(JAEA)  
 E-mail: suwa.tomone@qst.go.jp

### 1. はじめに

量研機構は核融合実験炉 ITER の国内機関として、中心ソレノイド(CS)導体の製作を行った。CS の運転では最大 13 T における 40 kA 通電が 6 万回行われるため、電磁力が繰返し印可された後の分流開始温度( $T_{cs}$ )が一定以上維持されることを要求されている。しかし、初期の CS 導体では繰返し電磁力による Nb<sub>3</sub>Sn 素線の曲げ変形により、 $T_{cs}$  が劣化した[1]。曲げ変形を抑制するために撚線のツイストピッチを短したことにより、 $T_{cs}$  の劣化は改善されたが、繰返し電磁力による  $T_{cs}$  の上昇も確認されている[2]。明確な曲げ変形が生じていないことは目視で確認しているが、目視では微小な曲げ変形を評価することができないため、中性子回折により内部ひずみに対する短ツイストピッチの効果の評価した。

### 2. CS 導体の内部ひずみ評価

CS 導体(Fig. 1)は Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導素線を使用した撚線とステンレス管から構成されるため、透過力が高く、ひずみを非破壊で直接測定できる J-PARC の工学材料回折装置「匠」を用いて、ひずみ測定を実施した。導体中の Nb<sub>3</sub>Sn の面間隔と無ひずみ(Nb<sub>3</sub>Sn フィラメント単体)の面間隔を比較することにより、Nb<sub>3</sub>Sn のひずみを決定した。測定サンプルは、スイスの SULTAN 試験装置で繰返し電磁力試験を行った後の長ツイストピッチと短ツイストピッチの CS 導体とした。導体長は 3.6m で、長手方向の測定箇所は磁場中心から 0 mm(高磁場部) - 1150 mm(低磁場部)の範囲とし、断面内の測定箇所は長ツイストピッチ導体で曲げ変形が確認された位置とした。繰返し電磁力後のひずみ状態をなるべく維持するために導体を切断せずに室温で測定した。

2 つの導体の構造は異なるため、回折プロファイルを直接比較することはできないため、それぞれの導体におけるひずみ分布を以下に示す方法で計算し、内部ひずみ状態を比較した。導体の回折プロファイル  $c$  は、(1)式に示すようにひずみ分布  $f$  と無ひずみ(Nb<sub>3</sub>Sn フィラメント)の回折プロファイル  $g$  の畳み込みで表すことができると仮定した。

$$c(x) = \int f(m)g(x-m)dm \quad (1)$$

$c$  と  $g$  を測定結果とし、(1)を逆畳み込みすることにより、導体中の Nb<sub>3</sub>Sn のひずみ分布  $f$  を計算することができる。低磁場部ではほぼ電磁力が発生していないため、それぞれの導体における低磁場部と高磁場部の  $f$  を比較することにより、繰返し電磁力による影響を評価した。

### 3. CS 導体の内部ひずみ評価

面積が 1 となるように規格化した長ツイストピッチ導体と短ツイストピッチ導体の  $f$  を Fig 2 に示す。短ツイストピッチ導体における低磁場部と高磁場部の  $f$  を比較すると、ブロードニングが発生していないことから、短ツイストピッチ導体では繰返し電磁力による曲げ変形が抑制されていることが明らかとなった。また、高磁場部において長ツイストピッチ導体では +0.16%、短ツイストピッチ導体では +0.15% のピークシフトが発生している。この結果は、短ツイストピッチと長ツイストピッチの導体の両方において、導体を構成するジャケットや銅線と Nb<sub>3</sub>Sn 素線の熱収縮差に起因する圧縮ひずみが繰返し電磁力によって緩和していることを示す。従って、短ツイストピッチ導体では、

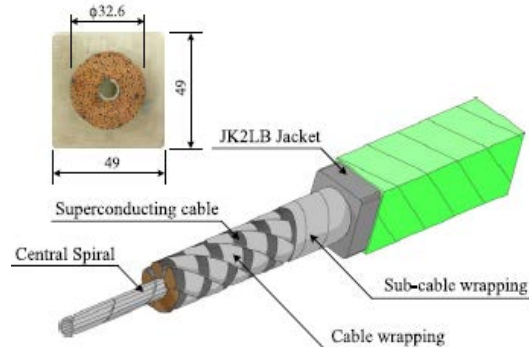


Fig.1 Cable in conduit conductor for ITER Central Solenoid.

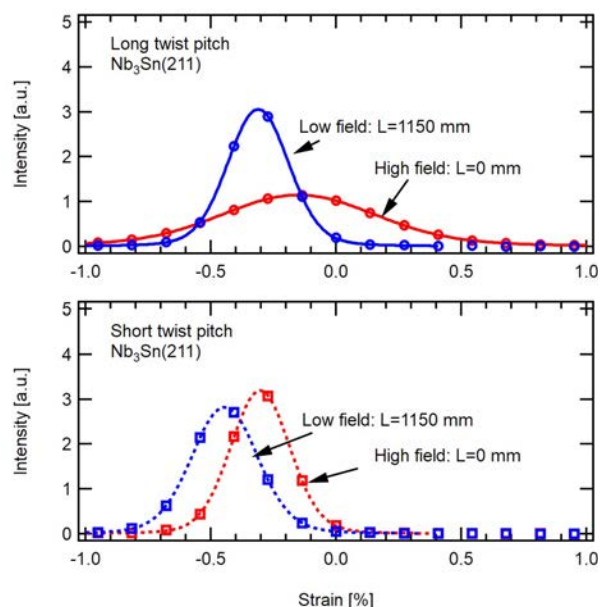


Fig.2 Calculated strain distribution from deconvolution of peak profiles of Nb<sub>3</sub>Sn(211) in long and short twist pitch conductors.  $L$  is distance from field center of SULTAN test.

曲げ変形の抑制により  $T_{cs}$  の劣化が改善され、圧縮ひずみの緩和により  $T_{cs}$  が上昇していることが明らかとなった。

### 4. まとめ

繰返し電磁力後の長ツイストピッチと短ツイストピッチの CS 導体における内部ひずみ測定を行い、それぞれの導体におけるひずみ分布を評価した。短ツイストピッチによって、繰返し電磁力による Nb<sub>3</sub>Sn 素線の曲げ変形が抑制されることで  $T_{cs}$  の劣化が改善できる一方、圧縮ひずみの緩和による  $T_{cs}$  の上昇が発生することが解明された。

### 参考文献

1. T. HEMMI, et al.: Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 084002
2. Y. Nabara, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond. vol 24, No. 3, 4200705, June 2014

# JA-DEMO 候補強化 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の交差接触応力下での I<sub>c</sub> および材料組織 I<sub>c</sub> and microstructure of JA-DEMO candidate reinforced Nb<sub>3</sub>Sn wires under crossover contact stress

伴野信哉, 浅野稔久 (NIMS); 谷貝 剛 (上智大学); 川嶋慎也 (神戸製鋼); 杉本昌弘 (古河電工); 淡路 智 (東北大); 宇藤裕康, 坂本宜照 (QST)

BANNO Nobuya, ASANO Toshihisa (NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); KAWASHIMA Shinya (Kobe); SUGIMOTO Masahiro (Furukawa); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); UTOH Hiroyasu, SAKAMOTO Yoshiteru (QST)  
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

## 1. はじめに

ITER をはるかに超える規模の DEMO 炉において、電磁力対策は非常に大きな課題である。コンジット内で複雑に撚られた Nb<sub>3</sub>Sn 導体の性能は、冷却時の熱収縮ひずみ、運転時の曲げひずみ、横圧縮ひずみ、軸方向ひずみなどが複雑に重なり合って決定される。DEMO 炉のコイル設計では、実験的に導体の実効ひずみを軽減できるとされる短ピッチ撚りで導体設計が進められているが、大容量化する（素線数が増大する）導体での実現性に対してはまだ確証は得られていない。仮に短ピッチ撚りが実現しても、横圧縮応力の影響は排除できない。したがってその保障として、撚りピッチに余裕を持たせ、線材の高強度化で応力・ひずみ劣化をカバーする設計案も同時に進めておかなければならない。本研究では、こうした背景から 2 種類の高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 線材に対し、交差接触応力下での I<sub>c</sub> 測定を行った。得られた結果は高強度化の高い有効性を示している。

## 2. 実験方法

Fig. 1 に新しく製作した交差接触応力下での I<sub>c</sub> 測定プロブの概略を示す。DEMO 炉の場合、最大の平均横圧縮応力は粗計算で  $I \times B / \text{導体幅}$  として 22.9 MPa と想定される（フープ応力は計算に入れず）。素線間は基本的には点接触と考えられ、局所的には相当大きな負荷が加わることも想定される。本プロブでは、最大 50 kg 負荷（1 mm 径で 500 MPa）用のロードセルを配置し、ステッピングモーターによる負荷を計測する。接触応力は、本試料とダミー試料の投影面積（線径の 2 乗）で換算した。線材印加応力を計測する際、芯棒自重・摩擦力等のオフセットは除去した。印加応力は 1% 以下で逐次自動制御する。測定試料長は約 4 cm で、電圧タップ間距離は 1 cm とした。電流トランスファー等の影響で若干抵抗成分が生じるため、I<sub>c</sub> は 2 もしくは 3  $\mu\text{V}/\text{cm}$  で定義した。

強化線材は古河電工製 CuNb 強化 Nb<sub>3</sub>Sn 線材 (LK288) [1] と神戸製鋼製 DT 法プラス母材 Nb<sub>3</sub>Sn 線材 (Z-DT2017) [2] である。古河線材はフィラメント領域周囲が強化され、神戸線材はフィラメント領域のマトリクスが強化されていることが特徴である。参考試料として各構造の無補強の線材も準備した。

## 3. 実験結果と考察

Fig. 2 に (a) 古河線材、(b) 神戸線材の規格化 I<sub>c</sub>-接触応力特性を示す。神戸線材は 14 T でクエンチが頻発したため、17 T で測定した。各試料の最大 I<sub>c</sub> は古河線材補強有り無しで 167、166A、神戸線材補強有り無しで 66、59A でほぼ定格である。いずれの線材の場合にも、高強度化により耐応力特性が大きく向上することが確認された。

**謝辞** 本研究は QST 原型炉研究開発共同研究の助成を受けた (04K067)。

## 参考文献

- [1] Sugimoto et al. IEEE TAS, v33, 2023, 8400805  
[2] Banno et al. IEEE TAS, v30, 2020, 6000705

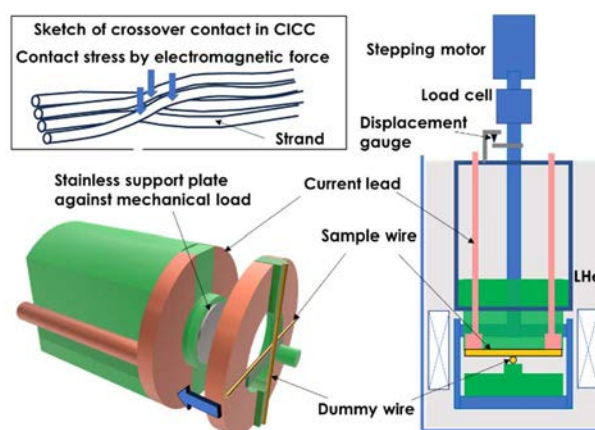


Fig.1. Schematic view of I<sub>c</sub> measurement set-up under crossover contact stress in magnetic field.

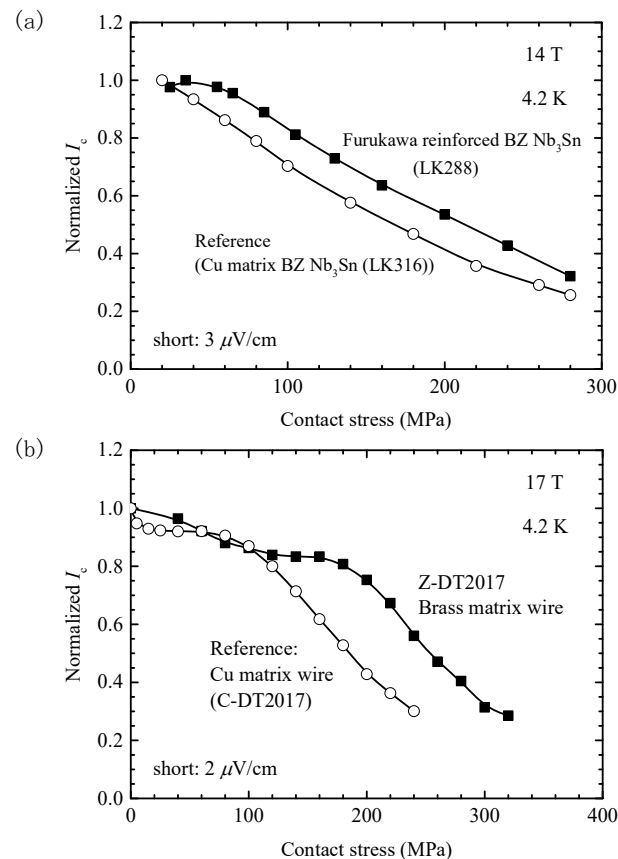


Fig.2. Normalized I<sub>c</sub> as a function of contact stress of (a) Furukawa bronze-route Nb<sub>3</sub>Sn and (b) Kobe DT method Nb<sub>3</sub>Sn strands.

# MgB<sub>2</sub> 線材の印加ひずみ-I<sub>c</sub> 特性に対する断面構成率および評価温度の影響

## Strain-I<sub>c</sub> characteristics of MgB<sub>2</sub> wires on various cross-sectional composition ratio and evaluation temperature.

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立); 菅野 未知央, ダカルワル ムケシュ, 荻津 透(KEK); 寺尾 悠(東大)  
 TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi);  
 SUGANO Michinaka, Mukesh DHAKARWAL, OGITSU Toru (KEK); TERA0 Yutaka (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub> 線材は、長さ数キロメートルの線材を用いて Wind & React 法で磁石が作製されるなど実用化に近づいている。一方で巻線位置の精度向上や MgB<sub>2</sub> 磁石の用途拡大のために React & Wind で使用可能な線材が期待されており、その実現のためにはまず、コイル巻線時の印加ひずみによる I<sub>c</sub> 劣化を防ぐ必要がある。これまでに、MgB<sub>2</sub> 部に加えられた残留圧縮ひずみを増やすことで、室温におけるひずみ耐性が強化できることを示してきた。I<sub>c</sub> 劣化なくコイルを作製した後は、励磁の電磁力による劣化を防ぐ必要があるため、極低温におけるひずみ耐性も重要である。本報告では、線材断面構成の異なる MgB<sub>2</sub> 線材を対象に、室温と極低温におけるひずみ耐性を定量的に比較した結果を報告する。

### 2. 実験方法

Fig.1に評価の対象としたMgB<sub>2</sub>線材の断面写真を、Table 1に断面構成比と熱処理条件を示す。これらの線材に対し、室温および液体ヘリウム温度でのひずみ耐性を評価した。

室温でのひずみ耐性は、直線状に熱処理した複数のサンプル線材に対して異なる最大ひずみを加えた後に、液体ヘリウム温度でのI<sub>c</sub>を測定することで評価した。Wire AおよびWire Bには曲げによるひずみ印加を、Wire Cには引張りによるひずみ印加を用いた。曲げ負荷におけるフィラメント部の最大引張りひずみはフィラメント束領域半径/曲げ半径で求め、引張り負荷においては伸び計によるひずみ測定値を用いた。

極低温でのひずみ耐性は、液体ヘリウム中での引張りひずみ-I<sub>c</sub>特性を測定して評価した。一般的に採用されている評価方法であり、一本のサンプル線材に対しI<sub>c</sub>を測定しつつ段階的に引張り負荷を加える方法である。

### 3. 結果

Fig.2に、室温で加えたひずみへの耐性評価結果を示す。横軸はMgB<sub>2</sub>フィラメント部に加えられた最大印加ひずみ、縦軸は負荷なしサンプルのI<sub>c</sub>で規格化したI<sub>c</sub>の値である。Wire(B), (C)は同一印加ひずみで2本ずつ測定したため、図中では点線で各ひずみの平均I<sub>c</sub>を結んでいる。室温におけるWire(A), (B), (C)におけるひずみ耐性はおよそ0.20%[1], 0.42%[2], 0.65%~0.86%であった。

Fig.3に、液体ヘリウム中で加えたひずみへの耐性評価結果を示す。Wire(A), (B)におけるひずみ耐性はそれぞれ0.40%~0.44%[3], 0.50%~0.55%であり、室温でのひずみ耐性からそれぞれ0.2%, 0.1%程度強い結果が得られた。

### 謝辞

本研究の一部はTIAの連携プログラム探索推進事業「2023年度かけはし」の支援を受けて実施した。

### 参考文献

1. H. Tanaka, et al. : IEEE TAS. 28 (2018) 8400605
2. M. Kodama, et al. : SuST. 35 (2022) 094007
3. M. Dhakarwal, et al. : IEEE TAS. 29 (2019) 4802404

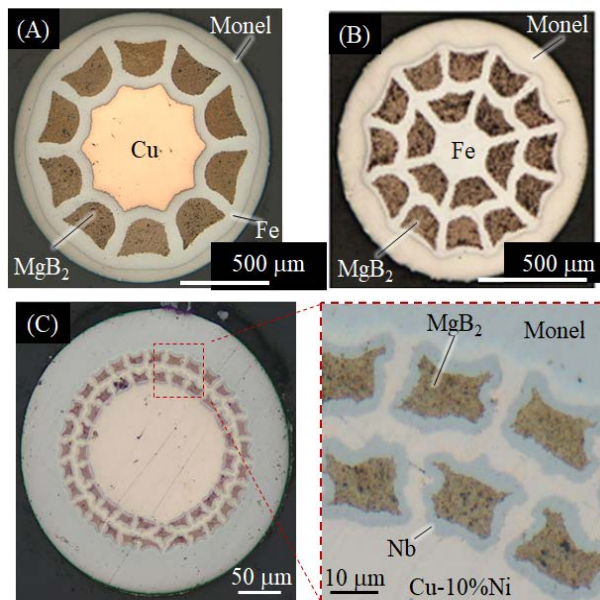


Fig.1 Cross-sections of MgB<sub>2</sub> wires.

Table 1 Specifications of MgB<sub>2</sub> wires.

	Wire (A)	Wire (B)	Wire (C)
Diameter	1.5 mm	1.16 mm	0.31 mm
MgB <sub>2</sub>	24%	31%	8%
Fe	37%	33%	-
Monel	18%	36%	47%
Cu	21%	-	-
Nb	-	-	11%
Cu-10%Ni	-	-	34%
Annealing	600°C, 12hr	600°C, 24hr	600°C, 12hr

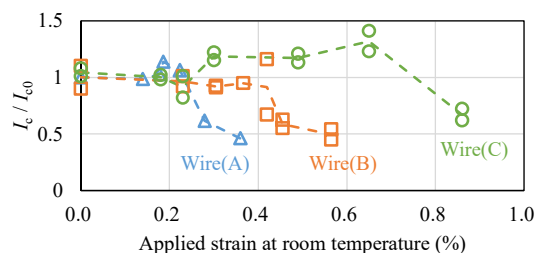


Fig.2 Strain tolerances applied at room temperature.

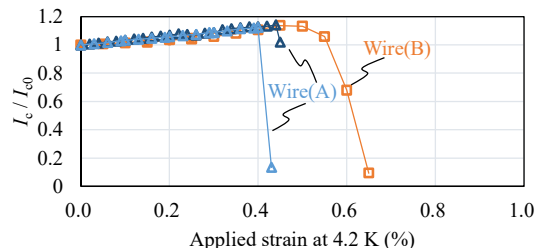


Fig.3 Strain tolerances applied at 4.2 K.

MgB<sub>2</sub> 多芯線の結合損失特性の実験的評価Experimental study of coupling loss characteristics of MgB<sub>2</sub> multifilament wires

祖父江 卓哉, 上垣 終季, 高橋 明, 曾我部 友輔(京大); Zhenan Jiang (VUW); Matt Rindfleisch (Hyper Tech Research); 雨宮 尚之(京大)

SOBUE Takuya, UEGAKI Hiiragi, TAKAHASHI Akira, SOGABE Yusuke (Kyoto Univ.); JIANG Zhenan (VUW); RINDFLEISCH Matt (Hyper Tech Research); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)  
Email: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>は臨界温度が39 Kと比較的高く、液体水素温度(20 K)で超伝導を示すため、液体水素を燃料とする航空機に搭載されるモータ・発電機の電機子巻線などへの応用が期待されている。これらは交流で用いられるため MgB<sub>2</sub>を交流巻線へ適用するには交流損失の低減が重要である。交流磁化損失はヒステリシス損失と結合損失で構成されている。結合損失は結合時定数・結合損失の形状因子という量に支配されており、その評価が重要である。本研究では MgB<sub>2</sub>多芯線の結合時定数・結合損失の形状因子を実験的に評価した。

## 2. 測定試料と実験方法

表面を電気絶縁した Hyper Tech Research, Inc.製の MgB<sub>2</sub>多芯線を19本束ねたものを測定対象の試料とした。多芯線の諸元を Table 1 に示す。試料に磁界振幅  $\mu_0 H_m = 0.15$  mT の横方向交流磁界を印加し、周波数  $f$  を変化させながらピックアップコイルで磁化損失  $Q_m$  (J/m/cycle) を測定した。周波数の範囲は 100 Hz – 10 kHz または 1 kHz – 20 kHz とした。小振幅磁界下では結合損失が支配的であるため、損失の測定値に対して結合損失の理論式

$$Q_c = A_c' \frac{\mu_0 H_m^2}{2} \frac{2\pi f \tau_c}{1 + (2\pi f \tau_c)^2} \quad (1)$$

を最小二乗法でフィッティングし、結合時定数  $\tau_c$  と結合損失の形状因子  $A_c'$  を求めた。

試料は最初、液体ヘリウム中に浸漬され、その後ヘリウムが気化し、試料は自然昇温する気体ヘリウム中に置かれる。このような過程で測定を繰り返すことによって、結合時定数と結合損失の形状因子の温度依存性を求めることができる。

## 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に各試料のフィッティングにより得られた  $\tau_c$  並びに  $A_c'$  を線材数  $n_s$  で除した線材一本あたりの結合損失の形状因子  $A_c'/n_s$  を温度に対してプロットした。 $\tau_c$ ,  $A_c'/n_s$  ともに 10 K 付近で急激に変化し、他の温度領域ではほとんど一定値となった。Table 2 に  $\tau_c$ ,  $A_c'/n_s$  の 4.2 K と約 20 K における値の変化率を示す。 $\tau_c$ ,  $A_c'/n_s$  はともに温度上昇に伴い増加しており、その変化率には大きな差がなかった。この理由について考察する。

多芯線における  $\tau_c$  は、等価横断導電率  $\sigma_{\text{eff}}$ 、等価横断透磁率  $\mu_{\text{eff}}$ 、ツイストピッチ  $L_p$  を用いて  $\tau_c = \mu_{\text{eff}} \sigma_{\text{eff}} (L_p/2\pi)^2/2$  で与えられる。多芯線内部の  $\mu_{\text{eff}}$  は  $H_m \leq H_{c1}$  において  $\mu_{\text{eff}} = \mu_0(1 - \lambda)/(1 + \lambda)$  と表される。ここで  $H_{c1}$  は下部臨界磁界、 $\lambda$  は超伝導体が占める体積率である。また、測定結果に対して式(1)をフィッティングして得られる  $A_c'/n_s$  は、式(1)中に  $\mu_{\text{eff}}$  が含まれないため、 $(1 - \lambda)/(1 + \lambda)$  の項を内包しており、これに比例する。以上のことから、フィッティングによって得られる  $\tau_c$ ,  $A_c'/n_s$  ともに  $(1 - \lambda)/(1 + \lambda)$  に比例し、 $\mu_{\text{eff}}$  が温度上昇によって変化する影響は、 $\tau_c$ ,  $A_c'/n_s$  に存在する係数  $(1 - \lambda)/(1 + \lambda)$  の変化として表れる。

次に等価横断導電率  $\sigma_{\text{eff}}$  の影響について考える。フィラメントの周囲にバリアが存在しない場合の  $\sigma_{\text{eff}}$  は常伝導金属母材の導電率  $\sigma_m$  と  $\lambda$  を用いて

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{(1 + \lambda)}{(1 - \lambda)} \sigma_m \quad (2)$$

と表され  $\lambda$  に依存する。またフィラメントの周囲にバリアが存在する場合はフィラメントとバリアを合わせた体積率  $\lambda_0$ 、バリアの厚み  $t_b$ 、バリアの導電率  $\sigma_b$ 、フィラメント半径  $r_f$  を用いて

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{(1 - \lambda_0)\sigma_m + (1 + \lambda_0)\{\sigma_b/(t_b/r_f)\}}{(1 + \lambda_0)\sigma_m + (1 - \lambda_0)\{\sigma_b/(t_b/r_f)\}} \sigma_m \leq \frac{1 + \lambda_0}{1 - \lambda_0} \sigma_m \quad (3)$$

と表される。4.2 K において  $\sigma_{\text{eff}}$  は式(2)で与えられ、20 K においては式(3)で与えられる。本試料において 4.2 K における  $\lambda$  と 20 K における  $\lambda_0$  は同一であり、かつ 4.2 K と 20 K で母材 (Cu30Ni) の導電率  $\sigma_m$  はほとんど変化しないと考えられるため、式(3)より 20 K における  $\sigma_{\text{eff}}$  は 4.2 K における  $\sigma_{\text{eff}}$  以下となる。 $\sigma_{\text{eff}}$  は  $\tau_c$  にのみ影響することから考えると、4.2 K と約 20 K における  $\tau_c$  と  $A_c'/n_s$  の変化率の差は  $\sigma_{\text{eff}}$  の変化に起因すると考えられ、かつ  $\sigma_{\text{eff}}$  の影響は  $\mu_{\text{eff}}$  の影響よりも小さいといえる。

## 謝辞

本研究は二国間交流事業 JPJSBP120221002 とニュージーランド Royal Society の Catalyst: Seeding New Zealand – Japan Joint Research Project Programme の支援を受けたものである。

Table 1. Specifications of MgB<sub>2</sub> wires.

MgB <sub>2</sub> / Nb / Cu30Ni / Cu30Zn	14.9 / 28.1 / 28.3 / 28.7
Length of wire	100 mm
Twist pitch $L_p$	10 mm / 30 mm
Radius of strand $r_s$	0.24 mm
Radius of central core $r_c$	68.5 $\mu\text{m}$
Radius of bundle region $r_b$	0.203 mm
Number of filaments $n_f$	54
Radius of filament $r_f$	12.5 $\mu\text{m}$
Thickness of Nb barrier $t_{\text{Nb}}$	9 $\mu\text{m}$
Number of strands $n_s$	19

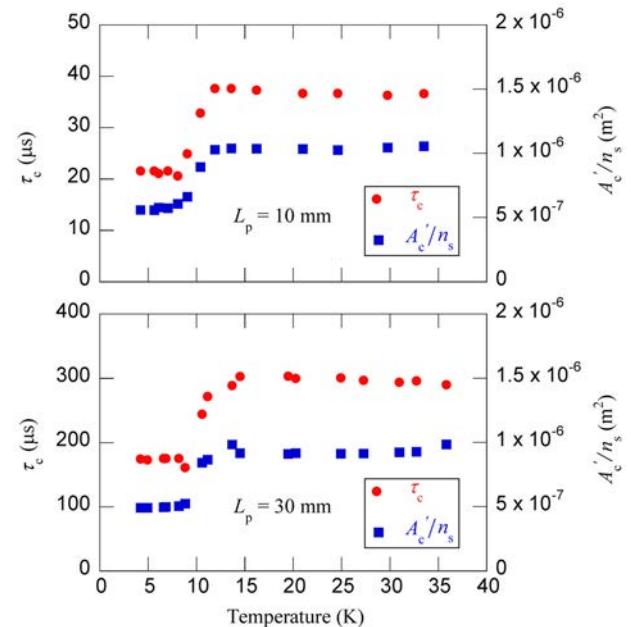


Fig. 1 Coupling time constant  $\tau_c$  and geometry factor per strand  $A_c'/n_s$  of MgB<sub>2</sub> wires whose twist pitches are 10 mm and 30 mm are plotted against temperature.

Table 2. Ratio of  $\tau_c$  and  $A_c'/n_s$  at around 20 K and at 4.2 K.

Sample	$\tau_c$	$A_c'/n_s$
$L_p = 10$ mm	1.70	1.85
$L_p = 30$ mm	1.72	1.87

## 超極細 PIT 法 MgB<sub>2</sub> 線材及びフレキシブルケーブルの開発 Development of the ultrafine PIT processed MgB<sub>2</sub> wires and flexible cables

菊池 章弘, 飯嶋 安男, 熊倉 浩明(NIMS); 山本 優, 河野 雅俊, 大坪 正人(JSA); 田邊 豪, 根岸 伸行(潤工社)  
KIKUCHI Akihiro, IJIMA Yasuo, KUMAKURA Hiroaki (NIMS);  
YAMAMOTO Masaru, KAWANO Masatoshi, OTSUBO Masato (Japan Superconductivity Application Development Inc.);  
TANABE Suguru, NEGISHI Nobuyuki (Junkosha)  
E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub> 超電導線材は、臨界温度が 39K と高く[1]、超電導異方性が小さく[2]、弱結合の問題がなく[3]、軽量且つ化学組成も単純で、丸線化が可能で[4]、さらに低コスト製造も期待できるため、液体水素温度 (20K) での実用導体として有望である。現在、MgB<sub>2</sub> 多芯線はすでに数社により開発・販売されているが[5, 6]、液体水素とともに広く実用化するにはまだまだ研究開発の課題が残されている。

我々は髪の毛よりもはるかに小さい直径を持つ極細の MgB<sub>2</sub> 超電導線材の研究開発に取り組んでいる[7-9]。これまでのところ、外径 15 ミクロンの世界最細径をもつ超極細 MgB<sub>2</sub> 単芯線の試作に成功している。線材外径の縮径により臨界電流値は小さくなるが、それらを束ねて撚り線ケーブルに加工すれば容易に電流量を増やすことができる。さらに原理的には線径が小さくなるほど曲げひずみも小さくなり、ヒステリシス損失も小さくなる。これらの超極細 MgB<sub>2</sub> 超電導線を束ねた撚り線ケーブルは非常に柔軟な機械的性能を備えているため、リアクト&ワインド法によるコイル化が可能になる。さらに、撚り線ケーブルの結合損失は、素線の表面処理により表面抵抗と接触抵抗を比較的容易に増加させることができ、例えば素線 1 本 1 本を絶縁樹脂でコーティングできれば、理論上、結合損失はゼロとなる。従って、我々が開発している超極細 MgB<sub>2</sub> 超電導撚り線は、液体水素の冷熱を利用する交流応用への展開が強く期待される。

### 2. 実験方法

マグネシウム(Mg)粉末とボロン(B)粉末を混合して金属管に充填する、所謂、In-situ PIT 法により MgB<sub>2</sub> 超伝導線材の作製に取り組んでいる。Mg 粉末は純度が 99.8%で-325 メッシュの市販品、B 粉末はアモルファスでナノサイズの市販品を使用した。外皮の金属管には無酸素銅やモネルなどを用い、その内側には純ニオブの拡散バリアを設けた。粉末の充填作業は不活性ガスで満たされたグローブボックス内で実施した。伸線加工は、基本的には引抜加工で行い、物質・材料研究機構及び JSA 超電導ラボの設備を利用して行った。作製した線材は素線の状態で超伝導特性や組織を評価した。その他、極細線を集合化した撚り線を作製し、同様に超伝導特性と組織観察を実施した。

### 3. 実験結果

最外皮の金属シースとしてモネルを適用すると、極細伸線加工性が格段に向上し、50 ミクロン径で 4km、33 ミクロンで 3km の長尺線の試作に成功し、さらには世界最細の 15 ミクロン径でも 135m の試作に成功した。15 ミクロン径まで超極細になると、Fig. 1 の写真に示すように、熱処理後でも直径 300 ミクロンの小さな結び目を作れるほどにフレキシブルとなる。今回、この外径が 15 ミクロンの世界最細素線を使って、7 本撚り、19 本撚り、37 本撚りの極細ケーブルを試作した。さらに、熱処理後の 50 ミクロン径の MgB<sub>2</sub> 細線に対して、一般的な絶縁樹脂を 80m ほど連続被覆することにも成功したので合わせて報告する。

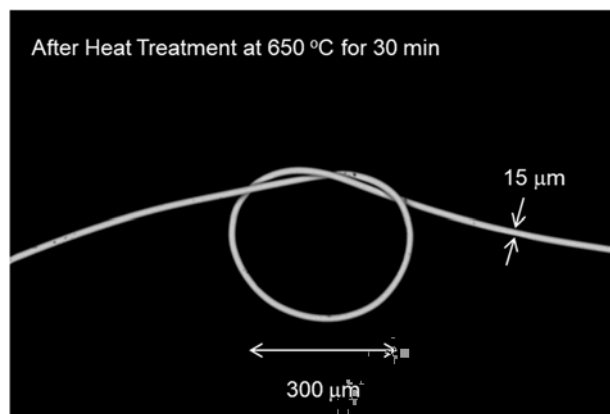


Fig. 1. MgB<sub>2</sub> ultrafine superconducting wire 15 microns in diameter.

### 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)として実施された。

### 参考文献

1. J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 410, 2001, p.p. 63-64
2. M. Xu, H. Kitazawa, Y. Takano, J. Ye, K. Nishida, H. Abe, A. Matsushita, N. Tsujii, and G. Kido, "Anisotropy of superconductivity from MgB<sub>2</sub> single crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 17, 2001, p.p. 2779-2781.
3. S. B. Samanta, H. Narayan, A. Gupta, and A. V. Narlikar, "Grain boundaries as weak links: The case of MgB<sub>2</sub> with reference to YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C," *Phys. Rev. B*, vol. 65, 2002, Art. no. 092510.
4. B. A. Glowacki, M. Majoros, M. Vickers, J. E. Evetts, Y. Shi, and I. McDougall, "Superconductivity of powder-in-tube MgB<sub>2</sub> wires," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, 2001, p.p. 193-199.
5. Hyper Tech Research, Inc. "MgB<sub>2</sub> Wire." [Online]. Available: <http://www.hypertechresearch.com/mgb2%20wire.htm>, Accessed on: Oct. 29, 2023.
6. Sam Dong Co., Ltd. "MgB<sub>2</sub> Superconducting Wire." [Online]. Available: <https://samdongamerica.com/products/mgb2-superconducting-wire/>, Accessed on: Oct. 29, 2023.
7. A. Kikuchi, "Development of the ultrafine MgB<sub>2</sub> superconducting wires and stranded cables", presented at ISS 2022 (Invited Oral Talk: WB5-2-INV).
8. 菊池 章弘, 飯嶋 安男, 熊倉 浩明, 山本 優, 河野 雅俊, 大坪 正人, "超極細 MgB<sub>2</sub> 超伝導線材及びケーブルの開発", 低温工学・超電導学会 2022 年秋季講演会 (2B-a02).
9. A. Kikuchi, "The critical current and critical current density of MgB<sub>2</sub> ultrafine superconducting wires and cables", presented at CEC/ICMC2023 (Invited Oral Talk: M3Or3H-02).

# データ駆動型アプローチによるプレミックス IMD 法 MgB<sub>2</sub> 線材の開発

## Development of premixed IMD MgB<sub>2</sub> wire using a data-driven approach

松本 明善、石井 秋光(NIMS); 川崎 玲、山本 明保(農工大)

MATSUMOTO Akiyoshi, ISHI Akimitsu (NIMS); KAWASAKI Rei, YAMAMOTO Akiyasu(TUAT)

E-mail: matsumoto.akiyoshi@nims.go.jp

### 1. はじめに

我々はプロセスインフォマティクス(PI)を利用した超伝導線材の開発を目指している[1]。超伝導線材においては、新超伝導物質発見から材料化・応用化に時間を要することが課題の一つである。その大きな要因の一つに、線材作製プロセスにおいては多くのパラメータが存在し、その広大な探索領域から最適な特性を持った線材開発には多くの時間を要していることが挙げられる。また、一方で、昨今の資源価格高騰の影響にとともに、実験を行う上で制約が生じるケースがある。このような状況下において、最適化の速度を速め、効率よく実験を行うことが重要になりつつあり、データを利用した研究が今後重要になってくる。その一例として MgB<sub>2</sub> 線材の開発に取り組んでいる。今回、MgB<sub>2</sub> 線材の新たな作製手法を開発し、その最適化のためにベイズ最適化手法を用いた熱処理条件探索を行ったので報告する。

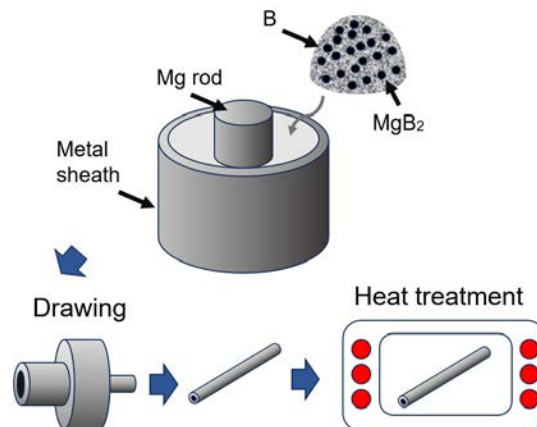


Fig.1 Manufacturing process of premix IMD MgB<sub>2</sub> wires

### 2. 実験

プレミックス内部マグネシウム拡散(IMD)法 MgB<sub>2</sub> 線材の作製のために PI を使った線材作製方法の検討を行う。プレミックス IMD 法の作製方法は Fig.1 に示した。外径 6 mm、内径 4 mm の鉄シースを用意し、その中心部に直径 2 mm の Mg 棒を挿入する。その後、鉄パイプと Mg 棒の間に B + x%MgB<sub>2</sub> の混合粉末を充填する。今回は x を 0、10、30 とした。得られた金属管を溝ロールやカセットローラーダイス、ダイス等で線引き加工を行い、最終線径 0.8 mm の線材を作製した。得られた線材は短尺に加工した後、PI を用いた最適化法の探索を行う。収集されたデータセットをもとに、石井らによって開発されたベイズ最適化及び可視化プログラム BOXVIA[2]を用いて最適条件探索を行う。次に PI として必要となるパラメータ=「特徴量」として熱処理時間  $t_{\text{hold}}$  と熱処理温度  $T_{\text{max}}$  の 2 つの特徴量を用いた。熱処理後の試料線材は 4.2 K、磁場中で臨界電流を測定し、評価した。目的変数は 4.2 K、7 T の磁場中  $J_c$  として、最大値が得られるように探索を行う。

### 3. 結果

IMD 法はパウダー・イン・チューブ法に比べて高い臨界電流密度を有しており、これまでも多くの成果が発表されてきている。前回、我々は 0%MgB<sub>2</sub> 線材、つまりは従来の IMD 法線材に対して PI を用いて最適化を行うとともに従来ではできていなかった探索空間を広げたデータの取得ができた。今回はプレミックス IMD 法の新作製手法に対して同様に PI 手法を用いた最適化を目指した。1 つのデータが出れば、その次の探索空間を提案して行くのが一般的なベイズ最適化手法である。一方、我々の手法では実験効率化のため、1 回当たり 5 点の提案を行い、それぞれの熱処理を行い、線材評価を行った後、さらに提案点を探索するバッチ処理型アルゴリズムを採用した。

Fig.2 は BOXVIA を用いた最適条件探索によって得られた、熱処理温度と時間の 2 次元空間における  $J_c$  分布を表している。上部の表は各組成における 4 回目の提案点である。3 回目までの測定を行った結果が中段の 2 次元マップおよび下段の 3 次元マップになる。これらの結果からは各組成においては  $J_c$  の最大値が出る領域が異なっていることがわかる。通常の IMD (組成 0%) では熱処理時間が短い領域で 700°C 近傍におい

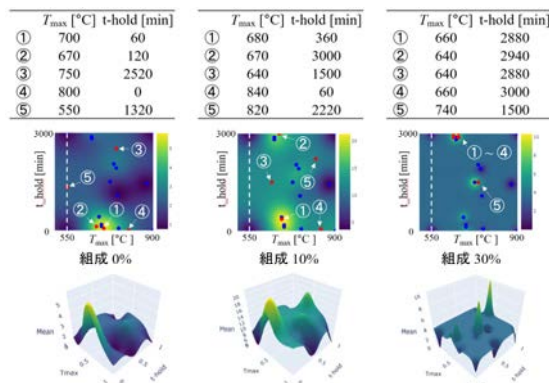


Fig.2 Proposal points by Bayesian optimization and 2D/3D heatmaps of  $J_c$  on  $T_{\text{max}}$  and  $t_{\text{hold}}$

て最大値が得られている。一方、組成 10% では最大値は 0% 組成と同じであるが、第 2 ピークが同じ温度域で長時間熱処理でも得られていることがわかる。さらに組成 30% では短時間熱処理領域で最大値は見られず、長時間熱処理において最大値が得られることがわかった。

### 4. 結言

本研究ではプレミックス IMD-MgB<sub>2</sub> 線材作製方法において PI を適用した。ベイズ最適化を熱処理温度と時間についてベイズ最適化によって次の実験提案を行いながら特性向上を目指した。条件最適化を使った PI によって予期しない条件での最適化を見つげられる可能性を示すことが出来た。

### 参考文献

- [1] A. Matsumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 102 (2021) p.6
- [2] A. Ishii, et al.: SoftwareX 18(2022), 101019.

## 混合 B 原料を用いて作製した MgB<sub>2</sub> バルクの超伝導特性 Superconducting properties of MgB<sub>2</sub> bulks prepared from mixed B reagent

岩崎 響, 芝崎 奏, 関口 直希, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 末本 祐也, 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー(株))  
IWASAKI Hibiki, SHIBASAKI Sou, SEKIGUCHI Naoki, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);  
SUEMOTO Yuya, AKIHIKE Ryo, MESUDA Masami (Tosoh Corporation)  
E-mail: c5623056@aoyama.jp

### 1. 緒言

MgB<sub>2</sub> は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度  $T_c \sim 39$  K を有し、化学的に安定で合成が容易、かつ原料が比較的安価であることから、液体ヘリウムフリーの冷凍機冷却による 10-20 K 付近での応用が期待されている。しかし、MgB<sub>2</sub> は磁場の増大とともに臨界電流密度  $J_c$  が急激に低下する問題があり、これが改善できれば医療用高分解能 MRI など広範な応用が可能になる。MgB<sub>2</sub> 材料の磁場中  $J_c$  の改善には MgB<sub>2</sub> の主なピンニングセンターである粒界密度の高密度化が有効な指針の一つである。MgB<sub>2</sub> は B の粒子内に Mg が拡散することによって生成することから、原料となる B 粉末が高純度かつ粒径の小さいものであるほど微細な MgB<sub>2</sub> 結晶が生成しやすく、粒界密度が向上することが報告されている<sup>[1]</sup>。しかし、このような B 粉末は高価であり材料普及の障害になっている。そこで本研究では、東ソー社で開発中の B 原料を用い、高臨界電流特性を有する MgB<sub>2</sub> バルクの作製を目指した。また、東ソー製ホウ素は粒径が非常に小さいことから、市販されている安価で比較的粒径の大きい B と東ソー製 B の混合粉末を用いた MgB<sub>2</sub> バルクの合成も行った。

### 2. 実験方法

MgB<sub>2</sub> 多結晶バルクの作製には MgB<sub>2</sub> 粉末(フルウチ化学社製)と B 粉末(フルウチ化学社製、粒径 $\sim 48\mu\text{m}$  もしくは東ソー社製、粒径 $\sim 100\text{nm}$ )の混合粉末に外部から Mg 粉末(100#)を拡散させる Premix PICT 拡散法を用いた。本研究で用いた東ソー製 B はフルウチ社製 B と比較して小さいが、酸素含有量が大きく、Al, Mn など微量の金属不純物を含んでいる。試料作製の際には Mg : B : MgB<sub>2</sub> = 1.2 : 2 : 1 のモル比となるようそれぞれの原料粉末を秤量し、SUS316 管に封入、 $\sim 1.5$  GPa の中間一軸プレスを施し、さらに石英管封管内で、800°C、24 h 焼成した。Premix した MgB<sub>2</sub> はフルウチ製の試薬である。構成相の同定は XRD 回折測定、微細組織は SEM 観察、超伝導特性評価は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。 $J_c$  は磁化ヒステリシス幅から拡張 Bean モデルを用いて算出した。

### 3. 結果と考察

Fig.1 にフルウチ社製 B のみを用いた試料と混合 B 粉末を用いて作製した MgB<sub>2</sub> バルクの研磨面の二次電子像を示した。粒径の大きいフルウチ社製 B のみを用いた試料では表面に空隙が存在しているのに対し、東ソー製 B を 30% 混合した試料では空隙の少ない緻密な組織を形成していることがわかる。これは、フルウチ社製 B 由来の MgB<sub>2</sub> 結晶の空隙を埋めるように東ソー製 B 由来の MgB<sub>2</sub> 結晶が存在しているためだと考えられる。Fig.2 に MgB<sub>2</sub> バルクの 15 K における  $J_c$  の磁場依存性を示す。フルウチ製 B のみ、もしくは東ソー製 B のみを用いた試料と比較して混合 B 粉末を用いた試料は低磁場、高磁場ともに高い  $J_c$  を示した。これは緻密な組織を有することに伴う電流パスの増加と、粒界密度の向上によるものであると考えられる。発表では、東ソー製 B の混合比率を系統的に変えた混合粉末を用いて作製した試料や、不純物金属含有量の低減を試みた東ソー製 B を用いて作製した試料の微細組織と超伝導特性についても報告する。

### 参考文献

[1] Y. Katsura et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **43** (2006) 119-122

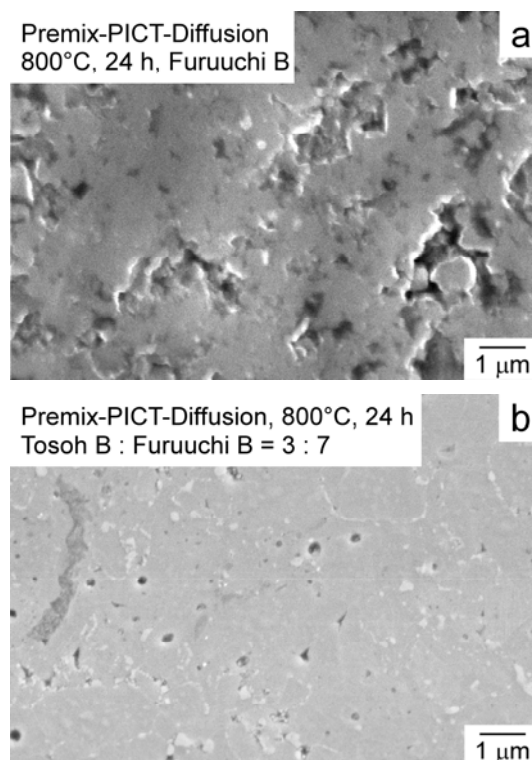


Fig.1 Premix PICT 拡散法で作製した MgB<sub>2</sub> バルクの研磨面二次電子像。B 原料(a)フルウチ社製 B、(b)フルウチ社製と東ソー製の混合 B 粉末

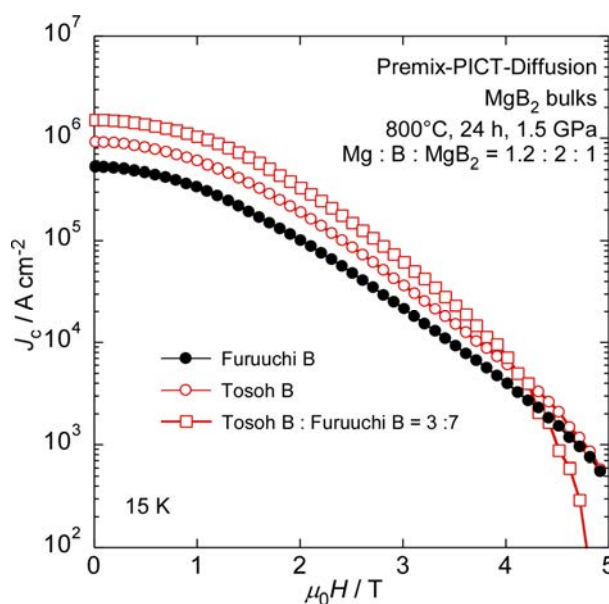


Fig.2 市販 B 原料、東ソー製 B およびその混合 B 粉末より作製した Premix PICT 拡散法 MgB<sub>2</sub> バルクの 15 K における  $J_c$  の磁場依存性



## 過剰 B 組成を制御した MgB<sub>2</sub> を原料とした MgB<sub>2</sub> 多結晶体の合成

### Synthesis of MgB<sub>2</sub> polycrystalline bulks starting from B-rich MgB<sub>2</sub> powder with controlled B composition

関口 直希, 芝崎 奏, 岩崎 響, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

SEKIGUCHI Naoki, SHIBASAKI Sou, IWASAKI Hibiki, MOTOKI Takatori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5622071@aoyama.jp

#### 1. 緒言

MgB<sub>2</sub> は金属系超伝導体の中で最高の  $T_c \sim 39$  K を有し、化学的に安定、合成が比較的容易で粒間の結合に優れているなど材料物質としての長所を持ち、冷凍機冷却による医療用 MRI 磁石や液体水素冷却による送電ケーブルなどへの応用が期待されている。しかし、 $H_{c2}$  と  $H_{irr}$  が比較的 low、 $J_c$  が磁場中で急激に低下することにより応用可能な温度、磁場条件が制限されている。ピンニングセンターである粒界の高密度化は磁場中臨界電流特性の有効な改善指針の一つである。一般に、粒界の高密度化の実現には、粒径の小さい B 原料を用いることが有効<sup>[1]</sup>であるが、高純度の B 原料は粒径が小さいほど著しく高価になり材料コストを高める要因となる。また、高純度化、高密度化も  $J_c$  の改善に重要な指針であり、これには MgB<sub>2</sub> と B の混合粉末に Mg を拡散させて反応させる Premix-PICT 拡散法<sup>[2]</sup>が有効である。我々は前回、粒径の細かい Pavezyum 社製 B 粉末を用いて、結晶粒径の小さい MgB<sub>2</sub> 結晶を含む前駆体粉末を作製し、これを用いて Premix-PICT 拡散法により作製した MgB<sub>2</sub> 多結晶体が、粒径の大きい Furuuchi 社製 B 粉末を用いて作製した試料より磁場中での  $J_c$  が高いことを報告した<sup>[3]</sup>。さらに前駆体 MgB<sub>2</sub> 原料の作製における過剰 B 量および焼成条件の最適化を進めており、今回は過剰 B の割合をさらに増やすことで MgB<sub>3</sub>(MgB<sub>2+1</sub>) 前駆体粉末を作製し、これを用いて MgB<sub>2</sub> バルクを作製した。

#### 2. 実験方法

前駆体である B 過剰 MgB<sub>2</sub> 粉末は *in-situ* 法により合成した。Mg(#100)とB(Pavezyum 社製、粒径 $\sim$ 300 nm)を Mg : B = 1 : 2.5 または 1 : 3 のモル比で混合したものをそれぞれ SUS316 管に充填後、石英封管内で 650°C、12 h または 850°C、3 h 焼成した。MgB<sub>2</sub> 多結晶体の合成は、前駆体粉末が含む未反応 B に対して Mg を拡散させ MgB<sub>2</sub> とする Premix-PICT 拡散法で行った。具体的には、一端をプレスした SUS316 管に Mg(#100)、MgB<sub>2.5</sub> 粉末、Mg(粒径 1 mm)の順に充填し、もう一端をプレスして封じた後、 $\sim$ 2 GPa の高圧一軸プレスとロール圧延を施した。高圧一軸プレス後の SUS316 管込みの試料厚さ  $d_r$  は $\sim$ 1.03 mm であり、ロール圧延により、試料厚さ  $d_r$  を最も薄い試料で $\sim$ 0.85 mm まで加工した。得られた試料の微細組織は SEM、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。 $J_c$  は磁化ヒステリシスの幅から拡張 Bean モデルを用いて算出した。

#### 3. 結果と考察

Fig. 1 に 850°C、3 h の焼成で作製した前駆体粉末を用いて、Premix-PICT 拡散法で 800°C、3 h の熱処理により Mg を拡散させた試料の 20 K における  $J_c - H$  特性を示す。過剰 B の割合を増やすことで低磁場下での  $J_c$  が低くなったが、4 T 付近での  $J_c$  を比較すると高くなっている傾向にあった。これは、粒界密度が高くなっているためだと考えられる。Fig. 2 に焼成条件の異なる前駆体粉末を用いて、Premix-PICT 拡散法で 800°C、3 h の熱処理により Mg を拡散させた試料の 20 K における  $J_c - H$  特性を示す。前駆体粉末の焼成温度を低くして、長時間焼成することで低磁場下での  $J_c$  が低くなった。この結果は、低い温度での焼成では前駆体粉末の粒径が微細にな

り、プレスによる緻密な組織を形成しにくくなったため密度が低く、MgB<sub>2</sub> 結晶間の結合が弱くなったためと考えている。

当日は、様々な焼成条件で作製した Pavezyum 社製 B 粉末を前駆体原料とした MgB<sub>2</sub> バルクの物性について報告する。

#### 参考文献

- [1] Y. Katsura *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **43** (2006) 119-122.
- [2] I. Iwayama *et al.*, *Physica C* **460-462** (2007) 581-582.
- [3] N. Sekiguchi *et al.*, *Abstract of CSSJ Meeting 105* (2023) 122.

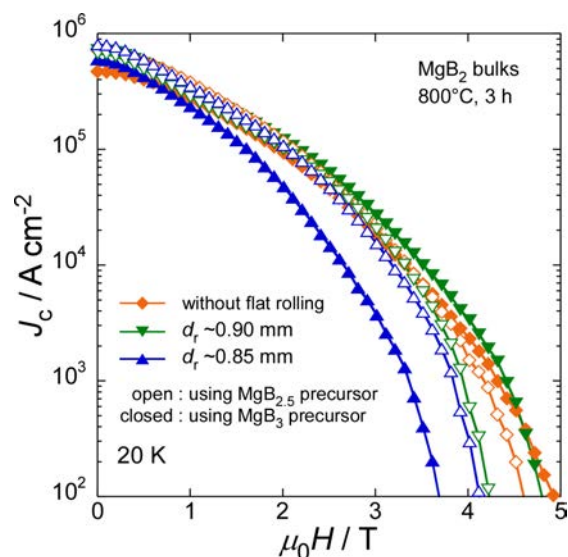


Fig. 1  $J_c - H$  curves at 20 K of MgB<sub>2</sub> bulks prepared by Premix-PICT-Diffusion method sintering at 850°C for 3 h using B-rich precursors.

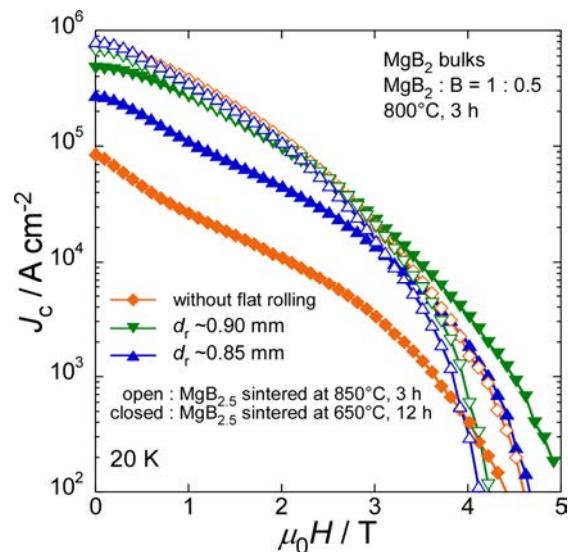


Fig. 2  $J_c - H$  curves at 20 K of MgB<sub>2</sub> bulks synthesized by Premix-PICT-Diffusion method using B-rich precursor (MgB<sub>2.5</sub>) prepared under different calcination conditions.

# 超伝導 MgB<sub>2</sub> 線材を用いた液体水素用液面センサーの研究開発

## Research and development of liquid hydrogen level sensor using superconducting MgB<sub>2</sub> wires

大島 冬真, 武田 実, 前川 一真 (神戸大); 福本 祥一, 高田 芳宏 (山本電機製作所)  
 OSHIMA Toma, TAKADA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.);  
 FUKUMOTO Shoichi, TAKADA Yoshihiro (Yamamoto Electric Works)  
 E-mail:227w601w@cloud.kobe-u.jp

### 1. はじめに

化石燃料や原子力に替わるクリーンなエネルギーとして、近年水素が注目されている。水素エネルギー社会実現のためには水素を大量に輸送・貯蔵する必要があり、これには気体水素の800分の1の体積となる液体水素(沸点20 K)が適している。しかし現在、液体水素用に開発された液面センサーは存在せず、測定精度や応答性に優れた液面センサーが求められている。そこで我々は、超伝導MgB<sub>2</sub>(二ホウ化マグネシウム)液面センサーに着目し、株式会社山本電機製作所の協力を得て、液体水素用液面センサーの高性能化に関する研究開発を行ってきたので報告する。

### 2. 超伝導MgB<sub>2</sub>液面センサー

超伝導MgB<sub>2</sub>液面センサーの原理は、以下の通りである。液体水素中のMgB<sub>2</sub>線材は超伝導状態となり電気抵抗がゼロになる。一方で、液面より上部は常伝導状態のため任意の抵抗値を示す。よって液面の高さによりセンサー全体の抵抗値が変化し、液面位置の測定が可能となる。液面センサーとして高精度に働くためには、液面直上で速やかに超伝導状態から常伝導状態にシフトしなければならず、MgB<sub>2</sub>線材の超伝導転移温度  $T_c$  が液体水素温度に近くなくてはならない。過去の研究[1]で、MgB<sub>2</sub>線材の  $T_c$  を下げるため、様々な条件でMgB<sub>2</sub>線材を作製し、その超伝導特性を検証した。その中で、ホウ素の粒径を変えて作製したMgB<sub>2</sub>線材の  $T_c$  が低下する傾向があった。そこで本研究では、様々な粒径のホウ素でMgB<sub>2</sub>線材を作製し、 $T_c$  が低下する要因を調べることにした。

### 3. MgB<sub>2</sub>線材作製とその超伝導特性試験

本研究で作製したMgB<sub>2</sub>線材の組成と作製条件を Table 1 に示す。線材は Powder-in-tube 法で作製し、1 mm 角線、数十 cm に伸線した。熱処理は 1 時間・600 °C で行なった。  $T_c$  を下げるための添加物として SiC を添加した。シース材には Cu-Ni 合金(7:3)を使用した。さらに各条件で作製した線材から 30 mm のショートサンプルを切り出し、超伝導特性試験を行った。結果を Fig.1 に示す。結果よりホウ素の粒径が  $T_c$  に影響を及ぼしていると考えられる。最も低い  $T_c$  は約 33.57 K であった。

### 4. 粒度分布測定とXRD(X線回折)試験

ホウ素の粒径が超伝導特性に及ぼす影響の詳細を調べるため、本研究で線材作製に使用したホウ素の粒度分布測定と作製した線材のXRD(X線回折)試験を行った。粒度分布測定の結果を Table 2 に示す。ホウ素粉末の大小関係は購入先メーカーの記載通りであったが、どの値も記載値と乖離していた。XRD試験の結果を Fig.2 に示す。シース材の Cu や Ni などの重い元素が SiC や B などの軽い元素のピークと重なり、結晶相を正しく同定する結果は得られなかったが、Fig.2 に見られるようにピークの違いが見られた。

### 5. まとめと今後の課題

最も低い  $T_c$  は 33.57 K であったが、より液体水素温度に近い  $T_c$  を持つ MgB<sub>2</sub> 線材を作製する必要がある。ホウ素の粒径と MgB<sub>2</sub> 線材の超伝導特性の関係の詳細を調べるため、粒度分布測定や XRD 試験を引き続き実施する。粒度分布測定結果を確認するため、電子顕微鏡を用い、実際のホウ素の粒径を見てみる。また、液体水素のような低温では熱応力により、

線材が収縮する。しかし、MgB<sub>2</sub> 線材の力学的特性は明らかにされていないので、MgB<sub>2</sub> 線材に働く引張応力とその超伝導特性の関係について調べる必要がある。

Table 1 Composition and fabrication conditions.

Series	A	B	C	D	E	F
Boron particle size [ $\mu$ m]	0.7	1.0	10	44	40	40
Additive SiC amount [%]	10					
Heat treatment temp [°C] and time [h]	600 and 1					

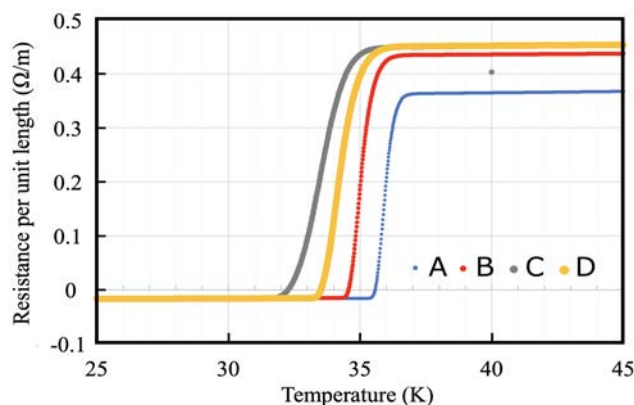


Fig.1 Relationship between resistances per unit length and temperature of the 20-mm-long MgB<sub>2</sub> wires.

Table 2 Measurement results of particle size distribution.

Series	A	B	C	D
Boron particle size [ $\mu$ m]	0.7	1.0	10	44
Experimental result [ $\mu$ m]	1.512	1.633	2.668	6.098
Standard deviation [ $\mu$ m]	0.356	0.391	0.42	0.548

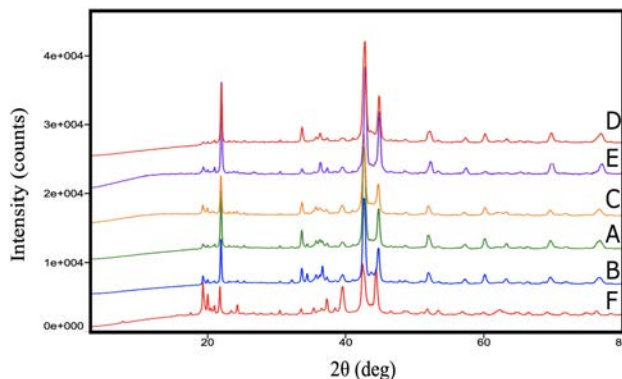


Fig.2 XRD test results.

### 参考文献

1. S. Fukumoto et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) p.48

# JST 未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」 ステージ2における開発状況

Development of advanced hydrogen liquefaction system by using magnetic refrigeration technology for JST-MIRAI large-scale project – status of stage 2

沼澤 健則, 神谷 宏治, 夏目 恭平, 齋藤 明子, 武田 良彦, 北澤 英明, 清水 禎, 西宮 伸幸 (NIMS);  
松本 宏一 (金沢大)

NUMAZAWA Takenori, KAMIYA Koji, NATSUME Kyohei, SAITO Akiko, TAKEDA Yoshihiko, KITAZAWA Hideaki,  
SHIMIZU Tadashi, NISHIMIYA Nobuyuki (NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University)  
E-mail: Numazawa.takenori@nims.go.jp

## 1. はじめに

水素ガスの 1/800 の体積をもつ液体水素は高密度な輸送・貯蔵が可能であることが広く知られている。水素エネルギーの利活用は低炭素のみならず経済安全保障の立場からも必須と考えられており、一刻も早い実用化が求められている。本研究開発では高性能磁気冷凍材料および高効率磁気冷凍サイクルの開発により、高効率水素液化機や液化水素ゼロボイルオフを目指した小型・省電力な冷凍機を実現し、我が国における水素社会の実現を大きく加速させることを目的としている。

## 2. プロジェクトの概要

本研究開発は、2018 年度から JST 未来社会創造事業・大規模プロジェクト革新的水素液化技術として進行中である[1]。ここでは、高効率な磁気冷凍技術をコアとして、2つの実証研究 (POC) を設定している。

- ・ POC1: 液化効率 50%、液化量 100kg/day 以上を実現する中・大型高効率水素液化機
- ・ POC2: 液化水素ゼロボイルオフを目指した小型・省電力な冷凍機

各 POC の特徴やマイルストーンについて Fig. 1 に示した。本プロジェクトで想定されている研究期間は 10 年間で、ステージ 1 要素研究、ステージ 2 試作機の実証研究、ステージ 3 実際の水素プラントでの実証という 3 ステージから構成される。現在はステージ 2 の 2 年目にあたる。

これまでのいくつかの成果を Fig. 2 と Fig. 3 にまとめた。磁気冷凍材料では従来の磁気熱量効果を大幅に上回る  $\text{HoB}_2$  や  $\text{Er-Co}$  系磁性材料が見出され、熱交換に適した粒状加工技術が開発中である。実機では数 10kg オーダーの磁性材料が必要となるため、大量生産技術の開発も行われている。磁気冷凍システムでは 2 つのプロトタイプの開発が進行している。POC1 では大型化を目指し超電導磁石を使用した上下駆動型磁気冷凍機、POC2 では小型軽量化を目指し永久磁石を使用した回転型磁気冷凍機である。すでに水素液化が実証されており[2]、現在、冷凍性能の向上を目指した開発が行われている。

## 3. まとめ

本プロジェクトは、基盤研究、装置開発、材料開発、さらにインフラの分野までをカバーする多数の国研、大学、企業の参画を得ながら進行中である。完成したプロトタイプは、メガソーラー等を利用した水素製造プラントにおいて、液化実証を試みる予定である。また、多様な社会実装を目指しハードウェアのみならず経済性を見据えた不断の検討も進められている。

本研究は、JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術 (JPMJMI18A3) によって実施されている。

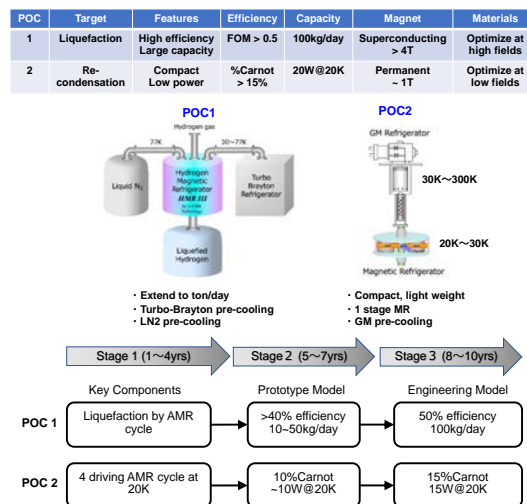


Fig. 1 Details of POC1 and POC2

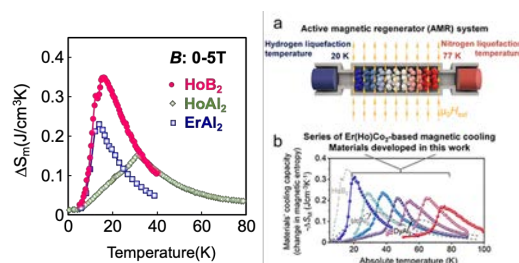


Fig. 2 Magnetocaloric effects (left:  $\text{HoB}_2$ , right:  $\text{Er-Co}$ )

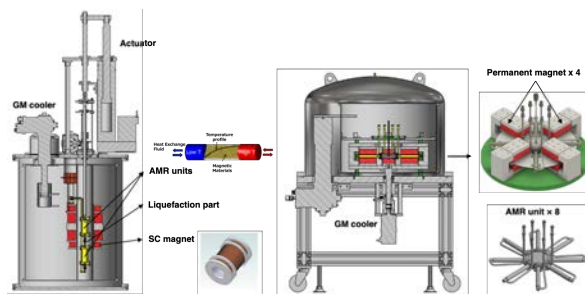


Fig. 3 Prototypes (left: POC1, right: POC2)

## 参考文献

1. www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/saitaku2018/JPMJMI18A3\_nishimiya.pdf
2. Koji Kamiya, et al., Applied Physics Express, 15(5) 053001 (2022)

## 磁気冷凍用磁性体 $\text{HoB}_2$ の輸送特性

### Transport properties of magnetic refrigerant $\text{HoB}_2$

長谷川 博紀, 堀江 征生, 松本 宏一 (金沢大);  
北澤 英明, 斎藤 明子, 沼澤 健則 (NIMS)

HASEGAWA Hironori, HORIE Masaki, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University);  
KITAZAWA Hideaki, SAITO Akiko, NUMAZAWA Takenori (NIMS)  
E-mail: hironori1135@gmail.com

#### 1. はじめに

JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術により磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍の研究、開発が進められている。最近、磁性材料として  $\text{HoAl}_2$  を用いた能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMRR) による水素液化に成功した[1]。

磁気熱量効果は転移温度近傍で大きくなるため、その温度領域に適した磁性体が必要となる。水素液化磁気冷凍用の磁性材料として、 $\text{HoB}_2$  が報告された。 $\text{HoB}_2$  は 0 T と 5 T の磁場で  $-\Delta S_{\text{mag}} = 0.35(\text{J}/\text{cm}^3 \text{K})$  という大きな磁気熱量効果を持ち、キュリー温度  $T_c=15 \text{ K}$ 、スピン再配列温度  $T_2=11 \text{ K}$  であることが知られている[2]。磁性体の熱伝導率や電気抵抗率を知ることは冷凍機のサイクルの設計や材料サイズ、さらに磁場変化による渦電流発熱による損失を検討する上で重要である。一方で、 $\text{HoB}_2$  の熱伝導率、電気抵抗率についての報告はほとんどない。

本研究では  $\text{HoB}_2$  の磁場中熱伝導率・電気抵抗率を評価した。

#### 2. $\text{HoB}_2$ 試料

今回の測定で使用した多結晶  $\text{HoB}_2$  はアーク溶解で合成後、ダイヤモンドカッターでカットし、その後機械研磨した直方体である。試料は熱処理をしていない As cast であった。測定試料はサンプル A ( $1.20 \times 1.15 \times 5.94 \text{ mm}^3$ ) とサンプル B ( $0.67 \times 1.50 \times 6.40 \text{ mm}^3$ ) の二つを作成した。原料のホウ素は中性子散乱実験用に用意した同位体の  $^{11}\text{B}$  を使用した。Fig.1 に Cu-XRD による結晶相の解析結果を示す。 $\text{HoB}_2$  の単相を得ることができず、容積比で  $\text{HoB}_2$  が 94%、 $\text{HoB}_4$  が 6% の複相であった。

#### 3. 測定法

電気抵抗率は交流 4 端子法により測定した。測定は最大電流 5 mA、0T の磁場では 300~4 K、1,3,5 T の磁場中では 100~4 K の温度範囲で行った。また、熱伝導率は Quantum Design 社 PPMS の熱輸送オプションを用いて測定した。0 T の磁場では 300~4 K、1,3,5 T の磁場中では 50~4 K の温度範囲で行った。

#### 4.1. 電気抵抗率

Fig.2 に  $\text{HoB}_2$  の 0,5 T における電気抵抗率を示す。0 T の転移温度付近で急激に電気抵抗率が減少している。一方、磁場 5 T 印加した場合、転移温度付近の電気抵抗率の変化は緩やかになっている。これは磁場によって相転移による磁気散乱が抑制されたためである。このようなふるまいは  $RT_2$  系金属間化合物 ( $R$ =希土類、 $T$ =Ni,Al) [3] や  $\text{ErB}_2$ [4] と同様であった。また、残留抵抗比 (RRR) は 10 程度であった。

渦電流発熱は磁性体が球 (半径  $R$ ) のとき以下の式によって表される。

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right) = \frac{2\pi R^5}{3\rho} \left(\frac{dH}{dt}\right)^2$$

AMRR を参考に、 $R$ (粒子半径)=0.25 [mm]、 $dH=5$  [T]、 $dt=5$  [s] とし、20 K での電気抵抗率の値から渦電流発熱を見積もると、 $10^{-11} \text{ W}$  程度と極めて小さい。AMR 中に  $10^4$  個程度の磁性体球が充填された場合でも冷凍出力が 10 W 程度であることを考えると、渦電流発熱の AMRR 冷凍機での冷凍性能への影響はほとんどないといえる。

#### 4.2. 熱伝導率

熱伝導率は SUS304 と同程度で他の  $RT_2$  系金属間化合物と同程度であった[3]。磁場中では熱伝導率が増加することが観測されたが、その効果はそれほど大きくなかった。

講演では実験結果と解析の詳細について報告する。

本研究は JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術 (JPMJMI18A3) によって実施された。

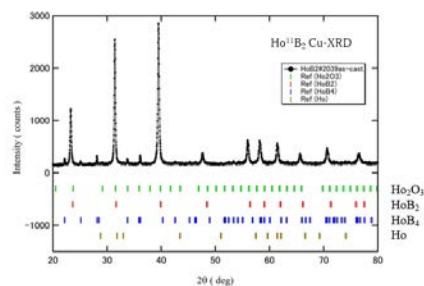


Fig.1 XRD pattern of  $\text{HoB}_2$  sample

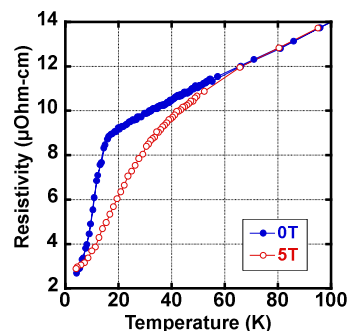


Fig.2 Temperature dependence of resistivity of  $\text{HoB}_2$  (sample A) at 0 and 5 T

#### 5. 参考文献

- [1] K. Kamiya, et al. :Appl. Phys. Express 15 (2022) 053001
- [2] Noriki Takada, et al. :PHYSICAL REVIEW B 102, 094435 (2020)
- [3] A. Lopatina, et al. :Cryogenics 126 (2022) 103519
- [4] G. A. Benka: Preparation and Investigation of Intermetallic Magnetic Compounda with Disorder. p76

# 能動的蓄冷式磁気冷凍(AMR)におけるアクチュエータ負荷低減方法の検討

## Study of method for reducing actuator load in Active Magnetic Regenerative Refrigeration

大前 聡, 白井 毅, 石田 政義(筑波大); 神谷 宏治, 夏目 恭平, 内田 公,  
齋藤 明子, 竹屋 浩幸, 沼澤 健則(物材機構); 松本 宏一(金沢大)

OMAE Satoshi, SHIRAI Tsuyoshi, ISHIDA Masayoshi(Tsukuba Univ.); KAMIYA Koji, NATSUME Kyohei, UCHIDA Akira,  
SAITO Akiko, TAKEYA Masanori, NUMAZAWA Takenori(NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa university)

E-mail: s2220829@s.tsukuba.ac.jp

### 1. はじめに

脱炭素社会の実現に向け水素の活用注目が集まっている。水素の効率的な運搬利用を可能にする技術の1つとして、我々のグループは能動的蓄冷式磁気冷凍(AMR)の研究を進めている。AMRは、アクチュエータが磁性体を超伝導コイル内部に出し入れすることで磁気熱量効果を得ている。アクチュエータの上下動時の負荷変動に焦点を当て、仕事を低減させる方法について報告する。

### 2. 概要

本装置では Fig. 1 のように、上下2つの磁性体とその間に挟まれた液化槽が一体となり、超伝導コイル内外を往復する。磁性体とコイル中心が引き合う磁気力は、磁場  $B$  と磁場勾配  $dB/dx$  に比例して生じる。磁性体が往復運動する時、この電磁力がアクチュエータの負荷となる。アクチュエータ負荷は消費電力と正の相関があり、この低減は液化機全体の効率改善とコスト削減につながる。まずは磁性体の上昇時を例に磁気力の推移について Fig. 1 を用いて説明する。移動開始時(a)やその直後(b)は、下側磁性体とコイルよりも上側磁性体とコイルの方が近接しているため、上側磁性体とコイルが引き合う力の方が強い ( $L_U > L_L$ )。磁気力の合力は下向きになり、磁性体の上昇を妨げる。この時、アクチュエータは上向きの力を必要とする。一方で移動終了直前(c)や終了時(d)は、下側磁性体とコイルがより強く引き合うため ( $L_U < L_L$ )、磁気力の合力は上向きで、上昇を促進する。しかしこの時、アクチュエータは減速・停止のために下向きの力を必要とする。本来、電磁力は保存力である。このように力と移動方向が逆の場合、電気エネルギーを回生することができれば、往復運動での理想的な消費電力は磁気熱量効果分のみである。しかし、費用面から回生機構の導入は進まず、変動分は抵抗器で消費されることが一般的で、液化システムの効率を低下させる原因となっている。

本研究では電気とは異なる回生機構の導入を目指し、磁気力と外部から力を加えたい方向が逆であることに注目した。磁気力をばねの弾性力として蓄積・再利用することを検討する。Fig. 1 を用いて原理について、まずは上昇中を例に説明する。移動開始時(a)やその直後(b)は、下側のばねが圧縮されている。この時弾性力は上向きの力を発揮し上昇を補助する。一方で移動終了直前(c)や到着時(d)は、上側のばねが圧縮され、弾性力は下向きの力を発揮する。ばねは磁性体のブレーキとしてアクチュエータによる減速を代替しながらエネルギーを蓄える。次に下降では、上のばねの圧縮が下向きの力を補助する。以上のように、サイクル全体を通して、ばねの弾性力による回生が消費電力を低減する。本発表では、ばねを移動中心 100 mm 地点が自然長となるように導入した場合を仮定し、ばね定数  $K$  を変化させた時、1 サイクルの仕事量を計算した。

### 3. 結果と考察

仕事量は各変位での負荷[N]と移動距離[m]の積分により計算できる。Fig. 2 に 1 サイクルでのアクチュエータの仕事量とばね定数  $K$  との関係を示す。ばね定数を 11000 N/m とした時、仕事量は従来から約 16%低減できる可能性を確認できた。

この計算結果から、アクチュエータ負荷低減方法としてばねを導入する有効性を示せたと考えている。ただし、ばね定数は運転条件によって最適値が異なるため、仕事量低減には詳細なばねと配置位置の設計が必要となる。

当日の講演では、ばねの有無によるアクチュエータ負荷の変化を図示し、ばね定数を変数として負荷の最大値と最小値の差の計算結果を表すことで、低減できる仕事量を検討した過程を報告する。

### 4. まとめと今後の方針

ばねの弾性力を用いた磁気力の蓄積と再利用により、アクチュエータ負荷と仕事量を削減できる可能性が計算から求められた。今後は、最適条件についてさらに考察を進め、機械的・構造的な課題などについても検討する。また、ばねを実装した実験を行い、計算との比較も実施したい。

本研究は、JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術(JPMJMI18A3)によって実施されている。

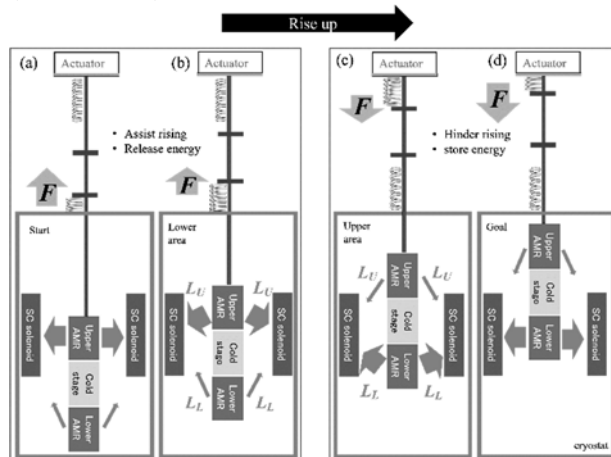


Fig. 1 Principle of method for reducing actuator load by springs in AMR is shown. Springs assist the actuator pulling the magnetic materials at the position (a) to (b) and stopping them at the position (c) and (d).

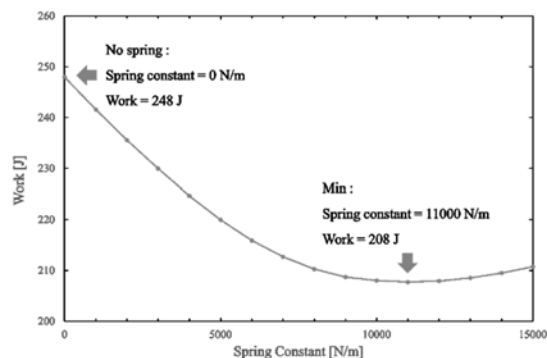


Fig. 2 One-cycle work of the actuator as a function of the spring constant in AMR.

### 参考文献

1. K. Kamiya, et al.: *Appl. Phys. Express* **15** 053001(2022)

## 能動的蓄冷式磁気冷凍(AMR)における水素凝縮熱交換器の開発

### Development of hydrogen exchanger in Active Magnetic Regenerative Refrigeration (AMR)

白井 毅, 大前 聡, 石田 政義(筑波大学); 沼澤 健則, 神谷 宏治, 夏目 恭平, 内田 公, 齋藤 明子, 竹屋 浩幸(物材機構); 松本 宏一(金沢大学)

SHIRAI Tsuyoshi, OMAE Satoshi, ISHIDA Masayoshi (Tsukuba University); NUMAZAWA Takenori, KAMIYA Koji, NATSUME Kyohei, UCHIDA Akira, SAITO T. Akiko, TAKEYA Hiroyuki (NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University)

E-mail: s2320865@u.tsukuba.ac.jp

#### 1. はじめに

NIMS では、原理的に高い液化効率が期待される磁気冷凍による水素液化に着目し、研究を行っている[1]。我々が開発している能動的蓄冷式磁気冷凍(以下「AMR」という。)による水素液化では、磁気熱量効果を用いてヘリウムガスを冷却し、水素ガスとの熱交換を行う。AMR での高効率な水素液化を実現するためには、ヘリウムガスと水素の熱交換を担う水素凝縮熱交換器の性能向上が不可欠である。本講演では、異なる形状の凝縮熱交換器について熱特性を計算によって比較した結果を報告する。

#### 2. 実験装置と課題

磁気冷凍は、磁性体の磁気熱量効果を利用した冷凍サイクルであり、磁性体に磁場をかける(励磁)とばらばらだった磁性体の磁気モーメントが揃うことでエントロピーが小さくなり放熱する。反対に磁性体から磁場を取り去る(消磁)と磁気モーメントがばらばらの方向を向くことでエントロピーが大きくなり吸熱するという効果を利用したものである。AMRは、蓄冷効果の大きな磁性体に励消磁に合わせて熱交換ガスを流すことで冷却温度幅を広げる動作方式である。Fig. 1にAMRにおけるヘリウムガスと水素ガスの流れと熱交換の概略図を示す。磁性体の発熱は、ヘリウムガスを介してGM冷凍機と接続した熱交換器(HEX2)によって室温へ排熱される。磁性体への吸熱によって生じた冷熱は、ヘリウムガスを介して凝縮熱交換器(HEX3)にて水素を凝縮させる。現状の水素凝縮熱交換器は、液化した水素を貯める液化槽と一体化され、室温にある水素タンクからクライオポンプ効果で受動的に水素を吸入する。凝縮熱交換器における伝熱過程を、①ヘリウムから熱交換器外面、②熱交換器外面から熱交換器の内面、③熱交換器内面から水素とすると、水素の流速が低いことから③の熱伝達率がボトルネックになっている。

#### 3. 凝縮熱交換器の設計要件と形状

磁気冷凍機に要求される水素液化量によって、凝縮熱交換器に必要な伝熱量(熱流束)が決まる。最適な設計指針を得るため、まずは一般的な二重管を用いた形状から検討を始めた。AMRの熱交換ガス(He)の流れは間欠的な往復流であることと、凝縮熱交換器の寸法が超電導コイルのボア径によって制限されることから、最終的には小型で伝熱面積を大きくすることができるハンプソン式熱交換器を採用した。

#### 4. ハンプソン式熱交換器

Fig. 2に検討したハンプソン式熱交換器のモデルを示す。Shellの内側にInner pipeとCoil pipeがある。Shell内にはヘリウムが上下方向に流れる。Inner pipeとCoil pipeは下部で接続され、水素が導入される。ヘリウムと水素はInner pipeとCoil pipeの内外表面を通して熱交換する。液化された水素はpipe内の底部から貯まっていく。

#### 5. 計算方法と結果

本凝縮熱交換器では、冷媒(ヘリウム)と被冷却物(水素)が固体壁を介して熱交換される。ガスの物性と流速及び、

配管の形状と材質から総括熱伝達率を計算し、それと伝熱面積と対数平均温度差によって熱流束を見積もった。Coil pipe外径やInner pipe外径を変化させたときの熱交換器の熱流束の計算結果をFig.3に示す。現状では、Coil pipe外径が6.35 mm、Inner pipe外径が70 mmの時に熱流束が最大になることが分かった。講演では計算方法の詳細や他の計算結果及び考察を発表する。今後は、計算結果をもとに凝縮熱交換器の製作を行い、計算との比較を行う。

本研究は、JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術(JPMJMI18A3)によって実施されている。

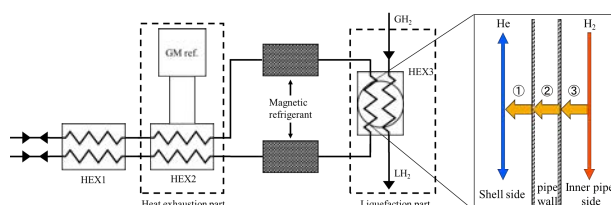


Fig. 1 Schematic diagram of heat flow in AMR

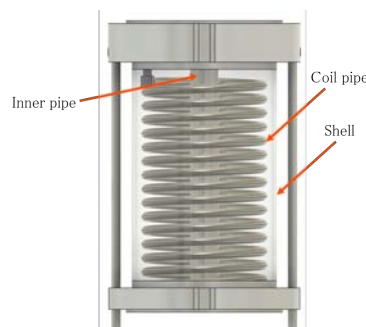


Fig. 2 Hampson heat exchanger model  
(The shell was made transparent.)

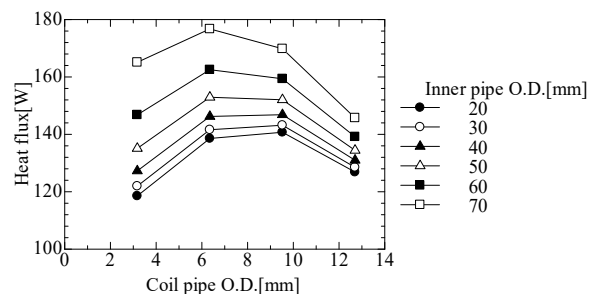


Fig.3 Calculation results of heat flux by heat exchanger geometry

#### 参考文献

1. Koji Kamiya, et al.: Appl. Phys. Express 053001 (2022) p. 15
2. 尾花 英朗:熱交換器ハンドブック(増訂版) (1974) p.949-972
3. Kamiya et al.: Proc. Int. Cong. Refrigeration (2023) p.46-60

## 低温磁気冷凍機の効率向上に向けた低温ポンプの開発

Development of low temperature pump to improve efficiency of magnetic refrigeration system

西岡 颯太郎, 神谷 宏治, 沼澤 健則, 齋藤 明子 (物材機構); 松本 宏一 (金沢大); 白井 毅, 内田 公 (物材機構)  
 NISHIOKA Sotaro, KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori, SAITO T. Akiko (NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University);  
 SHIRAI Tsuyoshi, UCHIDA Akira (NIMS)  
 E-mail: nishioka.sotaro@nims.go.jp

### 1. はじめに

近年, 脱炭素社会の実現に向けて様々な取り組みが進められており, その中に使用時に CO<sub>2</sub> を排出しない水素エネルギーの活用がある. しかし, 化石燃料に比べて液化, 輸送などの供給コストが高く, 水素エネルギー活用の大きな課題となっている. 現在 NIMS において JST 未来社会創造事業によるプロジェクト「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」が進行中である[1]. 本プロジェクトでは, 高効率な水素液化を目指して能動的蓄冷式磁気冷凍機 (AMRR) の研究開発を行っている. AMRR の冷凍サイクルは低温での冷媒の往復輸送を必要としている. 本公演では, 極低温冷凍機用コンプレッサーに代わる低温ポンプを使った高効率な冷媒輸送方式の開発状況について報告する.

### 2. ベローズ式低温ポンプ

水素液化が目的のため AMRR は水素の沸点である 20 K 付近での動作を想定している. また, 冷媒ガスとして用いるヘリウムガスの密度を高めることで, 1 冷凍サイクル内での熱輸送量が大きくなり, 冷凍性能向上に繋がる. 以上の理由から, 低温かつ高圧のヘリウムガスの輸送が必要となる. そこで我々は低温で動作するベローズ式の低温ポンプの開発を行っている (Fig. 1). 一般的な金属ベローズは内部から加圧した場合, 1 気圧程度の耐圧しか持たない. しかし, ベローズの外部から圧力を印加した場合, 数気圧以上の耐圧を持つことが経験的に知られており, 高圧ヘリウムガスを扱うことが可能である. また, このベローズ式低温ポンプは低温での閉鎖系で動作するため, コンプレッサーを用いた輸送のように室温のヘリウムガスを低温高圧まで圧縮する必要がなく, 大幅な消費電力の削減が期待できる.

### 3. 動作実験

製作した低温ポンプを GM 冷凍機により 20 K 付近まで冷却し, 様々なガス圧力, 輸送速度での動作確認を行った. 蓄冷器には磁性材料の代わりに鉛球 ( $\phi$  600–700  $\mu$ m) を充填し流体抵抗を生じさせている. また, 蓄冷器の両端には圧力計が取り付けられており, 輸送時の圧力変化を測定することが可能である. 低温ポンプ動作時の消費電力はパワーロガー (HIOKI 製, PW3360-10) により測定された.

### 4. 実験結果

Fig. 2 はヘリウムガス (20 K, 0.4 MPa) を流量  $Q = 400$  cm<sup>3</sup>/sec でベローズ式低温ポンプにより押し出したときに蓄冷器両端に発生する圧力差  $\Delta P$  を示したものである. この圧力差は, ヘリウムガスの物性値や蓄冷材の粒径から Ergun の式を用いて計算される値と近い. また, 繰り返しの動作にも耐え, ベローズの破損は認められなかった. Fig. 3 に室温と 20 K 付近での上記の流量で連続動作時の平均消費電力を示す. 両者でガス圧力とともに消費電力が上昇する傾向がみられるが, その値は 6 W 未満と非常に小さいことが分かった. これは極低温冷凍機用コンプレッサーの 1000 分の 1 以下である.

### 5. まとめ

本研究からベローズ式低温ポンプの消費電力が非常に小さく, AMRR の高効率化に有用であることが分かった. さらに, ベローズの大型化や高耐圧化によりヘリウムガスの輸送量を増やすことが可能であり, より大きな磁気冷凍機にも対応できると考えられる.

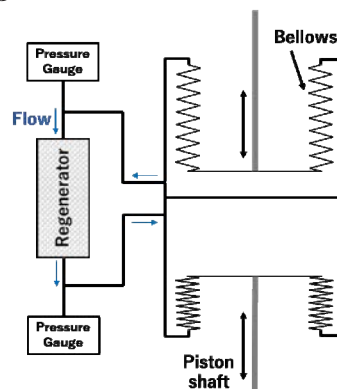


Fig. 1 Schematic diagram of bellows type cryogenic pump.

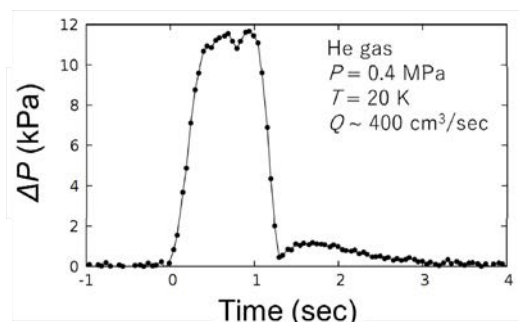


Fig. 2 Pressure loss during operation.

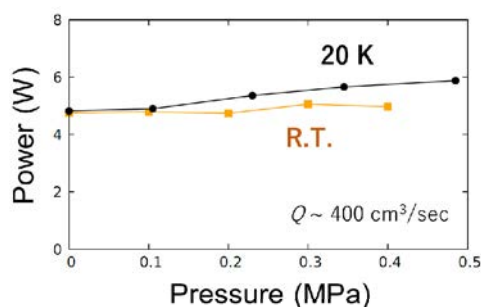


Fig. 3 Power consumption under various pressures at room temperature and 20 K.

### 謝辞

本研究は, JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術 (JPMJMI18A3) によって実施されている.

### 参考文献

1. Koji Kamiya *et al.*, Appl. Phys. Express **15**, 053001 (2022).

# 高効率を目指した2台の1段 GM コールドヘッドの同相運転

## In-phase operation of two single-stage GM cold heads for high efficiency

増山 新二 (大島商船高専); 夏目 恭平, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)  
 MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College); NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)  
 E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

### 1. はじめに

磁気冷凍機が有する性能を活用し、水素の液化・貯蔵を目指す本プロジェクト (JST 未来社会創造事業 磁気冷凍技術による革新的液化水素システムの開発[1]) において、磁気冷凍機の前冷却などに GM 冷凍機が使用されている。そのため、GM 冷凍機の効率はシステム全体の効率に直結してくる。そこで本研究では、1 段 GM 冷凍機の高効率化を目指し、2 台の GM コールドヘッドの同相運転を試みた。本報では、そのシステム概要と実験結果を報告する。

### 2. 同相運転の概要と実験セットアップ

まず、本研究で用いる「同相」を定義する。図 1 に実験装置の概略図を示す。1 段 GM コールドヘッド (以後、Head とする) は RD-125D (住友重機械工業) をベースとしており、これを 2 台、圧縮機は消費電力が 2 kW クラスの SSC-1100 (鈴木商館) を 1 台準備した。これら二つの Head に、圧縮機のフレキシブルホース (以後、フレキとする) 接続口付近で T 字治具を介して分岐されたフレキが接続される。Head 内のディスプレイサは駆動モータ (図 1 では省略) により上下運動するが、ここで、図 1 の状態に配置される二つのディスプレイサが同時刻で上死点、または下死点に位置する場合を「同相」とする。逆に、同時刻に一方のディスプレイサが上死点、もう一方が下死点に位置する場合を「逆相」とする。

今回、2 台の Head は、それぞれ個別の真空容器内に挿入され、冷却ステージに温度計とヒータがセットされている。そのため、冷却温度は 2 台の平均値、冷凍能力は 2 台の合算値 (実験ではそれぞれの Head に同じ熱負荷を加えた) とした。また、フレキ上の 6 カ所に圧力センサ、2 本の低圧ラインに個別に流量計を配置し、AD 変換器 (PCD-430A, KYOWA) で同時サンプリングした。なお、流量計は Head から圧縮機へ流れる向きを正方向としてある。

### 3. 実験方法・結果

#### 3.1 同相運転方法

二つのディスプレイサ (駆動モータ) は、別途設置した個別のインバータで駆動され、それらの位置確認には、高・低圧フレキの脈流を利用した。そのため、今回の実験では相対的位置の検出となっている。図 2 に 72 rpm の運転速度での到達温度時の二対のフレキの高・低圧を質量流量とともに示す。二対のフレキの脈流が一致していることが見て取れる。ここで、位置の制御は、外部からは一切行っていない。つまり、高圧ヘリウムガスの力により自動的に位相が揃い、同相運転が実現できている。流量の結果は、低圧が上昇する時お互いに反対方向の流れが一時的に生じ、その後、同方向にピークが現れるが、これらは時間的に一致していない。

#### 3.2 冷凍能力試験結果

図 3 に冷凍能力試験結果を示す。One-head が単体運転、Two-head が同相運転であり、それぞれ 72 と 96 rpm の運転速度で行った。ここで、単体運転において 2 台の head の冷凍能力の差は、測定温度内で 7% 以下であった。図 3 の結果は、これらのうちの 1 台である。結果から、同相運転をすることで到達温度は上昇するものの、約 50 K 以上の温度領域において、One-head の能力よりも大幅に向上している。80 K に注目すると、96 rpm の Two-head において 120 W を発揮しており、この時の COP は 0.58、パーセントカルノーは 16% であると見積も

られた。したがって、この温度領域において、同相運転は高効率化への有効な手段の一つであることが実証されたと思う。

### 4. まとめ

1 段 GM 冷凍機の高効率化を目指し、2 台の Head の同相運転を試みた。ディスプレイサの位置制御は、ヘリウムガスの力によって行われるため、自動で同相運転をすることができた。同相運転の冷凍能力は、約 50 K 以上において単体運転を大きく上回った。したがって、これらの温度領域において、本方式を活用できる可能性が実証されたと考えられる。

今後は、変位センサの設置、逆相運転、ならびに、より大きな Head での試験を計画している。

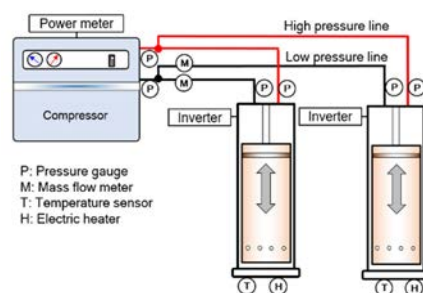


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up for in-phase operation by two GM cold heads and one compressor.

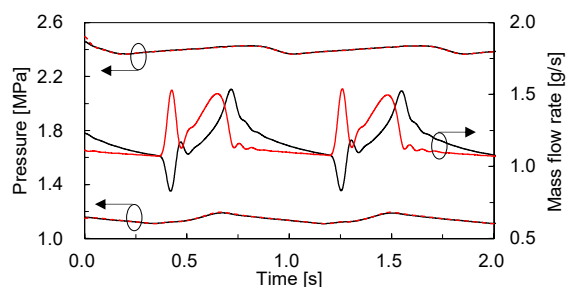


Fig. 2. Time variation of two high and low pressure lines and mass flow rate at the lowest temperature with the reciprocating speed at 72 rpm.

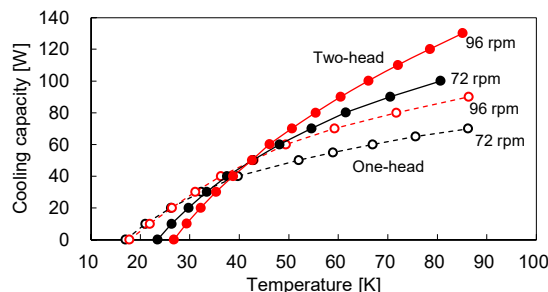


Fig. 3. Reciprocating speed dependence of cooling capacity for single (One-head) and in-phase (Two-head) operation.

#### 【参考文献】

- <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme06.html>

#### 【謝辞】

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI18A3 の支援、ならびに住友重機械工業からの冷凍機部品の提供を受け実施された。ここに感謝する。



## 2023 年度低温技術夏合宿～オリフィス開度の影響～ Summer Seminar for Cryogenic Technology 2023 –Effect of Orifice Opening–

結束 汐織(KEK); 田中 寛人(JAXA); 増田 大誠(住友重機械工業)  
KESSOKU Shiori (KEK); TANAKA Hiroto (JAXA); MASUDA Taisei (SHI)  
E-mail: shiorik@post.kek.jp

### 1. はじめに

低温技術夏合宿は、若手研究者や技術者を対象に超伝導および低温技術の理解および技術向上を目的として開催されている。今年度は諸般の事情により4年ぶりの開催となった。物質・材料研究機構(NIMS)にて2023年7月31日から1週間、「77K 小型冷凍機を作ろう」をテーマに講義と実習が行われた。実習で行った、外付け圧縮機を持つGM型パルス管冷凍機の実験について製作及び試験の過程、結果について報告する。

### 2. パルス管冷凍機の構造

Fig. 1 に実習で使用したGM型パルス管冷凍機について概略図を示す[1][3]。

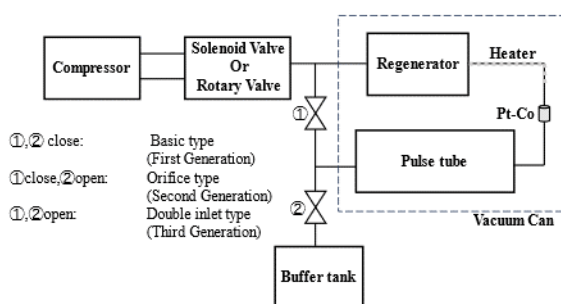


Fig. 1 Structure of Pulse Tube Cryocooler

### 3. 実習内容

初めにそれぞれの過去の講習時に組み立てられたパルス管冷凍機について、寸法測定および蓄冷材の確認を行い、冷凍機の構造を理解した。その後パルス管および銅管に巻かれているヒーター、白金コバルト測温抵抗体温度計について断線の有無を確認した。次に組み立てたパルス管冷凍機にて、管路においてバッファタンクのない第1世代 (Basic type)、管路をバッファタンクにつないだ第2世代 (Orifice type)、管路とバッファタンクをつなぎ、かつオリフィスバルブをパルス管と蓄冷管の間に設け、開度を調整できる第3世代 (Double inlet type) で各運転を行い、冷凍性能の変化を見た。

また蓄冷管とパルス管の間のバルブは (Fig.1①)、2つ付いており、第3世代の測定時は、1つのバルブの開度を4回転開けた 8.89 mCv で固定をし、もう1つのバルブを開けることで開度を変化させていった。バルブの Cv 値は各社の資料より読み取った。

### 4. 冷却試験および試験結果

まず MLI(多層断熱材)を巻きつけずに、組み立てたパルス管冷凍機の温度測定を行った。第1世代では 169 K まで冷やすことが出来、第2世代では 142 K まで冷やすことが出来た。

また第3世代での測定結果をオリフィスバルブの開度とともに Fig. 2 で示す。オリフィスバルブは 8.89 mCv から徐々に

開けていき 20 mCv を最大とし、再度そこから徐々に閉めていった。

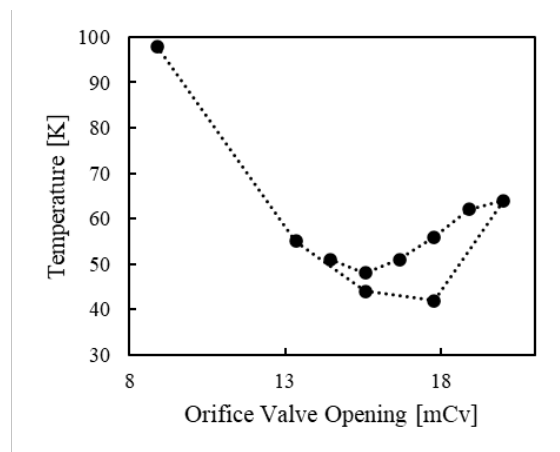


Fig. 2 Orifice valve opening and Temperature

測定結果から、10分ごとに条件を変更し開度を変えていった結果、定常状態より前に条件を変更してしまった可能性があることから、同じ開度でも到達温度が異なる結果が得られた。

この結果を参考に最適値は2つのバルブの合計が 7.5 回転 (16.67 mCv) 付近であると考え、最適値を決定した。

その後パルス管と蓄冷管に MLI を巻き、オリフィスバルブの開度を、実験より得られた 16.67 mCv として冷却を行った。最低到達温度は 36.4 K が得られた。

### 5. まとめ

パルス管冷凍機において最低到達温度はオリフィスバルブの開度に影響されることがわかった。またオリフィスバルブの開度による影響を調べる際には、蓄冷材等が充分冷却され定常状態になるまで時間を置かなければならず[2]、今回の試験では時間不足であったと言える。また合宿を通して座学や実習を行い冷却原理やパルス管冷凍機の構造、パルス管冷凍機の世代ごとの冷却性能、温度測定方法などの理解を深めることができた。

### 6. 謝辞

低温技術夏合宿の開催にあたり講師を務めてくださった、物質・材料研究機構 西島元氏、産業技術総合研究所 吉田茂氏、明星大学 星野勉氏、住友重機械工業 森江孝明氏、クライオウェア 藤岡耕治氏、東京大学 淵野修一郎氏に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

1. T. Kanayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.106. 2P-p02 (2023)
2. T. Matsumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.90. 2D-a07 (2014) p.130
3. K. Oda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.106 2P-p03(2023)

## 2023 年度 低温技術夏合宿～温度測定～

## Summer Seminar for Cryogenic Technology 2023 – Temperature measurement –

金山 高大(KEK); 関 孝峻(NIMS); 渡辺 奈生巳(東陽テクニカ)

KANAYAMA Takahiro (KEK); SEKI Takatoshi (NIMS); WATANABE Naomi (TOYO)

E-mail: takahi@post.kek.jp

## 1. はじめに

低温技術夏合宿では、参加者の低温技術向上を主な目的としており、極低温冷凍機を用いた講義や実習が行われる。今年度は7月31日から5日間、物質・材料研究機構(NIMS)にて開催された。「77 K 小型冷凍機を作ろう」というテーマを掲げ、3つの班に各1台の冷凍機で実習を行った[1][2]。

私たちの班では、パルス管冷凍機(GM型)を用いた実験で、冷却温度を測定する Pt1000 型測温抵抗体(以下 Pt1000)と、熱電対温度センサの温度差  $\Delta T$  が、はじめは 28K であったが、センサ付け直しや MLI を工夫して巻くことで、 $\Delta T$  を 1K 程度まで改善できたので、これに焦点を当てて報告する。

## 2. 実験概要

夏合宿5日間のうち、1日目は低温技術の座学、2日目は冷凍機の分解や蓄冷材充填、3~5日目は冷却試験を行った。

パルス管冷凍機の座学では、圧力振動を伴う冷媒ガスが管壁との熱交換により熱輸送効果を生じる冷却メカニズムや、第1世代から第3世代まで改良された歴史を学んだ。

実習では、第3世代ダブルインレット方式を用いて実験を行った。Fig.1に実験装置の構成を示す。

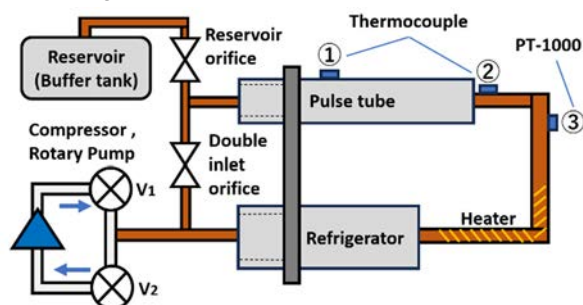


Fig. 1 Structure of Pulse Tube Cryocooler.

圧縮機に接続された  $V_1$ 、 $V_2$  を交互に開閉させることにより、パルス管に必要な圧力振動を発生させて冷える方式である。最低温度の測定は、銅管部②の熱電対と、近くに③Pt1000が付けられていたため、その値を採用した。測定した Pt1000 の抵抗値  $R$  から温度  $T$  への換算は以下の式で行い、係数  $K0 \sim K7$  は校正表を元に多項式フィッティングにて求めた。

$$\log T = K0 + K1 \times (\log R)^1 \dots + K7 \times (\log R)^7 \quad (1)$$

$$T = \exp(\log T) \quad (2)$$

3日目は1回目の冷却試験を行った。リザーバーオリフィスやダブルインレットオリフィスを調整することで世代ごとの冷却性能向上を学びながら目標の 77K を達成することができた。この時、②熱電対と③Pt1000 の  $\Delta T$  が 28K だったことから、温度が高い②熱電対の温度測定が正しくないと考えられた。

4日目は熱電対を銅管に直接貼り直した。少しの浮き上がり温度測定に大きく影響することを学んだ。MLI の巻き方も、輻射が少なくなるよう工夫し、2回目の冷却試験を行った。すると、Pt1000 は 60.64K、熱電対は 61.95K となり、温度差  $\Delta T$  は 1.3K まで縮めることができた。

5日目は、3回目の冷却試験を行った。前日の圧縮機での設定ミスを改善し、最低到達温度は 56.67K となった。最後に、ヒーターで熱負荷を与え、冷却能力を測定して実習を終えた。

## 3. 実験結果

3~5日目に行った冷却試験結果を Table. 1 に示す。

Table. 1 Pulse tube type and reached temperature.

Date	Generation	Platinum Resistor (Pt1000) [K]	Thermo couple [K]	$\Delta T$ [K]
Day3	1st(Basic)	186.98	195.65	8.67
Day3	2nd(Orifice)	90.04	110.75	20.71
Day3	3rd(Doubleinlet)	62.64	90.95	28.31
Day4	3rd(Doubleinlet)	60.64	61.95	1.31
Day5	3rd(Doubleinlet)	56.67	57.95	1.28

はじめは大きかった  $\Delta T$  が 4日目の改良で大きく改善されたことが分かる。また、Fig.2 に 5日目に行ったヒーターを用いた冷却能力の測定結果を示す。

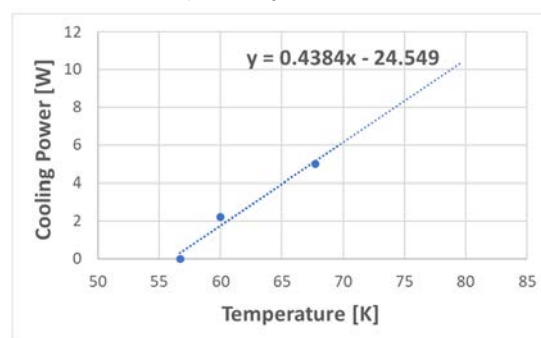


Fig. 2 Cooling capacity of pulse tube cryocooler.

ヒーターの不具合で途中でしかデータが取れなかったため、予測値を求め、77Kでの冷却能力は 9.2W となった。

不具合の原因としては、ヒーターの出力を 5W から 10W に変更したタイミングで熱負荷が与えられなくなったため、電熱線が焼き切れた故障等が考えられる。

## 4. 考察・まとめ

Pt1000 と熱電対の温度差  $\Delta T$  を、センサの付け直しや MLI の工夫で 1K 程度まで改善することができた。

他班では、 $\Delta T$  が 5K 程度であったため、私たちの班では高い精度で温度測定できたとと言える。一方で、冷却性能では他班に及ばず、改善点も多いと考えられる[1]。

高い冷却性能が出せていても、正確に温度を測定できていなければ値を有効活用できないため、温度測定の方法や、測定精度を向上させる技術は重要であることを学んだ。

## 5. 謝辞

低温技術夏合宿において、実習の講師を務めてくださり、冷凍機について丁寧に教えて下さった、森江孝明さん(住重)、藤岡耕治さん(クライオウェア)、星野勉さん(明星大)、淵野修一郎さん(東大)、吉田茂さん(NIFS)、西島元さん(NIMS)に深く感謝を申し上げます。

## 参考文献

- S. Kessoku, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106, 2P-p01 (2023)
- K. Oda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106, 2P-p03 (2023)

2023 年度低温技術夏合宿～蓄冷材の材料特性による効果～

Summer Seminar for Cryogenic Technology 2023 – Effect of Material Properties of Regenerator –

小田 航大(KEK);石井 輝(明星大);永井 敏也(住重)  
 ODA Kodai (KEK); ISHII Hikaru (Meisei Univ.); NAGAI Toshiya (SHI)  
 E-mail: odakoda@post.kek.jp

1. はじめに

低温技術夏合宿では、若手研究者・技術者を対象とし、超伝導や低温技術の理解・技術力の向上を目的とする。諸般の事情により4年ぶりの開催となる今年度は7/31～8/4の5日間で行われた。本講習では、各チームでパルス管冷凍機を製作し、液体窒素温度77K付近まで冷却可能な性能を出すことを目標とした。本発表では小型冷凍機の製作・試験の過程、性能評価試験の結果について報告する。

2. 実習内容

まず、過去の講習時に組み立てられたパルスチューブ(PT)冷凍機において、寸法測定・蓄冷材の取り出しを行い、冷凍機の構造を理解した。次に、パルス管の冷端部と中間部に取り付けてあった熱電対と配管に巻かれたヒーターの導通チェックを行い、どちらも地絡していることが判明したため、全て付け直した。また、輻射熱を防ぐためMLIを巻いた。

蓄冷材には SUS316 金網(#300 メッシュ、素線径 0.04mm)を使用し、Fig.1 左図のように充填した。組み立てたPT冷凍機にて第 1・2・3 世代の各運転を行い、冷凍性能の変化も見ながら冷凍性能評価試験を行った。また、第 3 世代であるダブルインレット型において、オリフィス開度を調整しながら最適条件を調べ、ヒーターによる熱負荷に対する冷却能力を測定した。なお、本実習では、ロータリー弁方式と電磁弁方式で分かれて行っており、本測定はロータリー弁方式で行った。

3. 冷凍性能評価試験結果(蓄冷材:SUS316)

Fig.2 に測定結果をバッファタンクオリフィス(BO)・ダブルインレットオリフィス(DO)の開度とともに時系列で示す。運転方式の世代ごとの冷凍性能向上を体感しながら、オリフィス開度を調整し最低到達温度は94Kとなった。

4. 蓄冷材の検討

蓄冷材の効率を決めるパラメータの中に比熱と熱伝導率がある。比熱と熱伝導率がともに高い材料を選定することが望ましい一方、いずれも温度依存性を持つ。そこで、蓄冷材の材質を変更し、蓄冷材の比熱・熱伝導率が冷凍能力に与える影響を調査した。比較対象としてリン青銅金網(#250 メッシュ、素線径 0.04mm)を使用し、SUS316 金網とリン青銅金網をFig.1 右図のような配分構成で再充填した。熱伝導率はどの温度域においても銅の方が高い。一方比熱においては、高温域でステンレスの方が高く、低温域で銅の方が高いことから、各温度域で有利に熱交換ができるよう高音域に SUS316 を配置し、低温域にリン青銅を配置した。

以上の改良を施し、再び冷凍性能評価試験を行った。オリフィス開度は一度目の試験時に得た最適条件に合わせた。ただし、本測定直前にロータリー弁駆動系が故障し、電磁弁方式で代用し測定する形となったため、完全な対照実験を行うことが出来なかった。本稿では、電磁弁方式とロータリー弁方式の違いによる性能の差異はないとして議論を進める。

5. 冷凍性能評価試験結果(蓄冷材:SUS316+リン青銅)

測定結果をFig.3に示す。最低温度は77Kまで到達した。SUS316 のみを充填した時に比べ冷凍性能は向上し、蓄冷材の構成変更による効果を確認することができた。今回は各温

度域における比熱の大小関係により各材料の配置を決定した。しかし、銅は熱伝導率が高く、温度勾配が大きい域ほど短時間で蓄冷材内部へ熱移動するため、低温域より高温域に配置した方がより蓄冷材として機能した可能性がある。リン青銅とSUS316の配置を逆にする、材料比率や蓄冷材形状の変更等、選定を重ねることで、さらなる冷凍性能の向上が見込まれると考える。

6. おわりに

ベーシック型 PT 冷凍機から、各オリフィスの開度を調整し、冷凍性能の変化を体感できた。また、ダブルインレット型 PT 冷凍機において、蓄冷材の内部比率の変更による冷凍性能の変化を見ることができ、蓄冷材選定の重要性を学んだ。

7. 謝辞

低温技術夏合宿の開催にあたり、講師を務めてくださった森江孝明氏(住重)、藤岡耕治氏(クライオウェア)、星野勉氏(明星大)、淵野修一郎氏(東大)、吉田茂氏(NIFS)、西島元氏(NIMS)に深く感謝する。

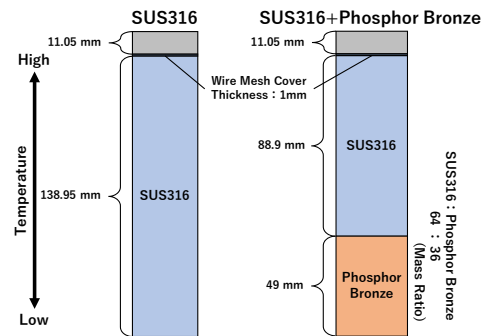


Fig.1 Regenerator Configurations

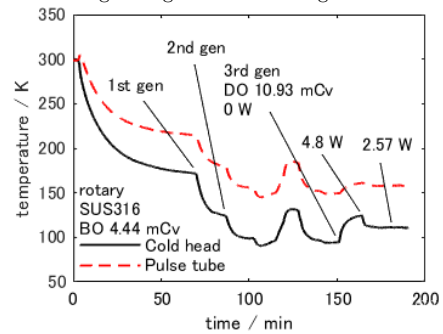


Fig.2 Reached Temperature (SUS316)

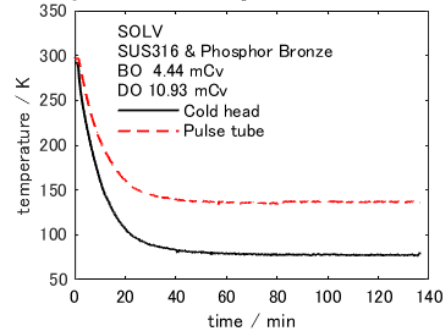


Fig.3 Reached Temperature (SUS316+Phosphor Bronze)

# 物理嫌を減らす試み —大学初年次科目「自然を読みとく」の事例から—

An attempt to reduce dislike of physics

—A Case Study of the First Year Subject: “Introduction to natural sciences” —

重松 利信, 稲垣 祐次 (岡山理大)

SHGEMATSU Toshinobu, INAGAKI Yuji (Okayama Univ. of Sci.)

E-mail: shigematsu@ous.ac.jp

## 1. はじめに

岡山理科大学では2017年度、これからの10年を見据えた中長期の行動指針「岡山理科大学ビジョン2026」を定め「学生の成長に主眼をおく人材育成拠点」となることを宣言した。そしてその実現のために、3つの改革(新研究科構想、基盤教育の改革、入試改革)に着手している。その中で基盤教育の改革は「人間形成のための教育」と位置づけて、基盤教育の体系化として『こころ豊かに生きる』『知性を磨く』『技能を活かす』の3つの成長の観点のもと、12の教育目標を定めた教育[1]を2020年度から開始しており、学生全員が基盤教育の3つの目的を涵養し、社会で活躍できる能力を身につけることを目指した教育を行っている。

さて、本稿で取上げる「自然を読みとく」は、筆者が担当している初年次導入科目の一つであり、学ぶ意義を再確認し、好奇心と探求心を持ち続けてほしいとの思いから導入した科目である。講演では講義内容を紹介すると共に、受講生のアンケート結果をもとに教育効果を考察する。さらに効果的な演示実験について議論したい。

## 2. 「自然を読みとく」の実施方法とその内容

「自然を読みとく」は半期2単位の授業として開講しており、5講座、10クラスを開講している。学生は1つの講座、1つのクラスを選び、履修する。筆者が担当したのは、物理学・数学・地球科学の教員3名がオムニバス形式で教授するもので、その講座の物理学編5回を担当した。Table 1に筆者が担当した「自然を読みとく(物理学編)」の5回の授業内容を示す。

Table 1 Contents of the lecture given by the author[2]

1回目	演示実験を通して、自然の不思議を体験する ・頭の体操問題・一筆書きの発想 ・長短ろうそくの演示実験 など
2回目	課題実験1にチャレンジする 空気抵抗と質量保存則の講義の後に ・傘袋ロケット・びっくり蝶々の製作・発表
3回目	自然現象の豆知識の演示実験 ・直線運動と円運動のふしぎ・角柱と円柱のふしぎ・回転運動のふしぎ など
4回目	グループで課題実験2の準備をする 落下と力積の講義の後に ・エッグドロップ実験準備
5回目	課題実験2の成果を発表し、他者の発想から学ぶ

自然不思議さを感じる演示実験と対話型講義を中心とした回(1回、3回)と、チャレンジ実験と称した学生自身が行う体験実験(2回、4回、5回)の2本立ての授業構成とした。また、学生自身の体験実験には、それぞれ発表の場を設け、学生自身が相互に採点できるようにし、その結果を成績に反映させるようにした。

## 3. 学生評価(アンケート調査)とその結果

2021年度から2023年度の受講生358人に対してアンケートを実施し、全員から有効な回答を得られた。本稿ではアンケートの内、2つの項目について議論する。

アンケートの質問項目「自然科学に対する好奇心や探究心が高まったか(5段階評価)」に対する回答がFig.1である。

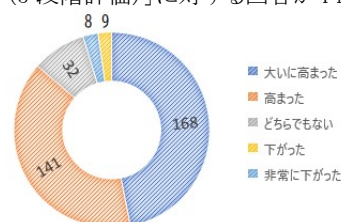


Fig.1 Answers to the question “Did your curiosity and inquisitiveness increase?” (on a 5-point scale)

有効回答数358の内「大いに高まった」「高まった」と答えた率は86.3%であり、ほとんどの履修学生に対して講義目的の知的な好奇心や探求心を高めることができていると思われる。

アンケートの質問項目「物理学編を受講して、あなたが変わったことがあれば自由に記入してください」に対する回答をテキストマイニング分析した結果をFig.2に示す。自由記述は、授業に対する好印象を記述する傾向にあるが、それでも学ぶ意義を想起できるポジティブワードが多い。このことから、授業目的の学ぶ意義を確認できているのではないかとと思われる。

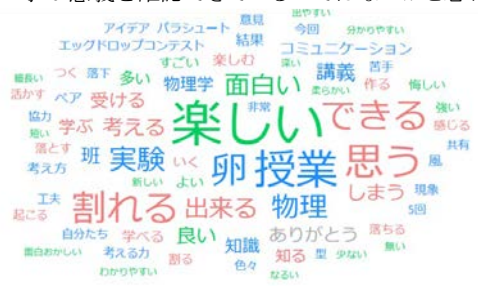


Fig.2 Results of text mining analysis of free descriptions

In this method, words with high frequency are selected and shown in sizes according to their values, and the difference in color indicates the type of part of speech.

## 4. まとめ

初年次導入科目「自然を読みとく」の筆者担当部分の達成度を学生のアンケート結果を中心に議論した。アンケートの結果から、期待される教育効果が得られているように考えている。しかしながら、授業がおもしろ実験のような側面もあり、より一層の授業計画が必要であると再認識した。

## 参考文献

- 岡山理科大学の将来構想/基盤教育の改革  
<https://www.ous.ac.jp/outline/vision/be/> (参照 2023-10-26)
- Y. Inagaki, et al.: Abstracts of JSEE Conference Vol. 70 (2022) 214-215 (in Japanese)

# 高純度アルミニウムの接合による伝導特性への影響

## Effect of Bonding on Conductive Properties of High Purity Aluminium

秋山 柚貴, 久保田 侑治, 小林 拓矢, 星河 浩介 (住友化学(株))

AKIYAMA Yuki, KUBOTA Yuji, KOBAYASHI Takuya, HOSHIKAWA Hiroaki (Sumitomo Chemical. Co., LTD.)

E-mail: akiyamay4@sc.sumitomo-chem.co.jp

### 1. はじめに

純度 99.999% (5N)～99.9999% (6N) の高純度アルミニウムは低温下での電気・熱伝導特性に優れ、超電導マグネット周辺等の熱伝達材や遮蔽材として用いられる。高純度アルミニウム単体の技術データをこれまで報告してきたが、接合(溶接やネジ止め等)の影響に関する報告は少ない。そこで、TIG 溶接等の各種接合材を試作し、電気伝導特性の測定および熱伝導特性の考察を試みた。

### 2. 実験方法

純度 99.999% のアルミニウム (5N-Al) の圧延材 (厚さ 0.5 mm～3 mm) に対して、430℃にて焼鈍し、母材として試験に供した。母材の残留抵抗比 (以下 RRR: Residual Resistivity Ratio、(=室温比抵抗/4.2K 比抵抗)) は 4000～6500 であった。

母材どうしを TIG 溶接、レーザー溶接、ネジ止め (前処理なし、金メッキ前処理) して接合材を試作した。TIG 溶接およびレーザー溶接では、溶接棒ありとなしの 2 種類で試作した。溶接棒には 5N 相当の高純度アルミニウム線材を使用した。

また、金メッキ処理では、母材の酸化被膜除去のため事前に NiP メッキする方法と、母材に直接金メッキする方法 (ダイレクト金メッキ) の 2 種類を試作した。

これら試料に対し、電圧端子間距離 100 mm にて室温と 4.2K における電気伝導特性を測定し、RRR にて評価した。

### 2. RRR の測定結果

結果を Fig.1 に示す。なお、今回 RRR の異なる複数の 5N-Al を用いたため、比較のため素材の RRR が 5000 に揃うように換算した。

5N-Al 母材の RRR 5000 に対し、溶接棒なしの TIG 溶接、レーザー溶接では RRR 4300 以上であり、母材とほぼ同等 (8 割～9 割) の低温電気伝導特性を持つことが分かった。TIG 溶接断面の SEM 観察 [1] では、母材どうしが完全に溶け合っている様子が認められ、接合部における電気特性の低下量は小さいと考えられる。また、今回の試作評価では溶接棒ありより溶接棒なしが高い RRR を示した。溶接時の不純物混入などの影響が考えられる。

また、ネジ止めのみでは RRR 10 以下と母材より大幅に低下してしまうが、金メッキ処理のうえでネジ止めを行うと 4000 程度の高い RRR を示した。素材表面の酸化被膜の影響を大幅に軽減できると考えられる。以上より、ネジ止めの場合は金メッキが有効と考えられる。

なお、本評価は端子間距離 100 mm であり、長尺を用いる場合には接合部による影響は相対的に小さくなる。

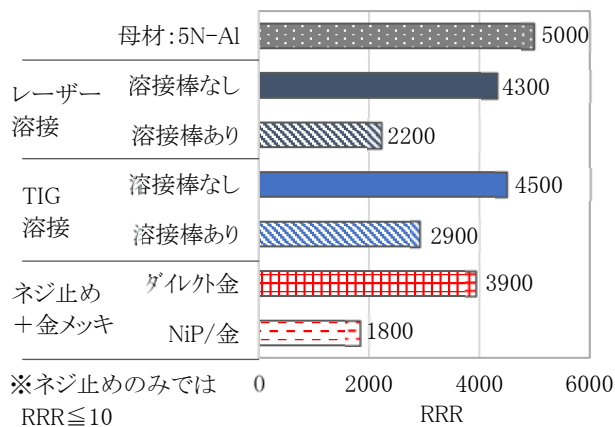


Fig.1 Measured residual resistivity ratio for bonded 5N-Al specimens.

### 3. 熱伝導特性の考察

極低温での伝熱特性の測定は困難である。そこで、測定した電気伝導特性 (RRR) や熱抵抗を用いて、各接合材の 4.2K における熱伝導特性を見積もり、考察した。

高純度アルミニウム単体では、40K 以下にて、RRR と温度  $T$  を用いて下記式より熱伝導率を概算できる [2]。TIG、レーザー溶接材では下記式で近似できると仮定して計算した。

$$\text{熱伝導率 } \kappa [\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}] = \frac{1}{1.8 \times 10^{-7} T^2 + 1.1 / \text{RRR} / T}$$

一方で、ネジ止めの場合、母材間の酸化被膜や金の影響が大きく、上記式での近似は不適と考えられる。そこで、ネジ止め材に関しては、母材と酸化被膜等の熱抵抗を計算し、その和から接合材全体の熱伝導率を見積もった。

計算した結果は、5N-Al 母材では熱伝導率 (4.2K) が 18000 に対し、溶接棒なしの TIG、レーザー溶接では母材熱伝導率の 8 割以上であった。また、ネジ止めの場合、電気特性は母材 1%未満まで低下したが、熱伝導特性は母材 2 割以上と計算された。酸化被膜と高純度アルミニウムの電気伝導率は大きく異なるのに対し、熱伝導率の差はそれより小さいことが原因と考えられる。

### 参考文献

- [1] H. Yamamoto, et. al., Friction stir welding of ultrahigh-purity aluminum thin sheets never to lower high conductivity at ultra-low temperature, Q. J. Jpn. Weld. Soc., Vol.38 No.4 (2020) p.253-262
- [2] T. Tomaru, et. al., Conduction Cooling Using Ultra-pure Fine Metal Wire 1 -Pure Aluminum-, J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol.46 No.7(2011) p.415-420

## 薄板組立型熱スイッチの試作と性能評価

## Prototype test of a thin-metal-sheet-assembled type heat switch

竹内 文哉, 市川 慧, 小田 靖久 (摂南大学); 夏目 恭平, 内田 公, 神谷 宏治 (NIMS)

TAKEUCHI Fumiya, ICHIKAWA Kei, ODA Yasuhisa (Setsunan Univ); NATUME Kohei, UCHIDA Akira, KAMIYA Kouji (NIMS)

## 1. はじめに

熱スイッチは主に地上の機械や人工衛星などに使用される断熱消磁冷凍機などに使用される<sup>1,2)</sup>。従来のガスギャップ式熱スイッチは製作難易度が高いため低コストで製作するための方法を提案する。方法は薄板を1枚1枚組み立てる製作方法(以下組み立て型とする)である。また、振動環境下などでも使用されることを想定して薄板を折り曲げることで断面係数を上げ熱スイッチの強度を上げることを行った。

## 2. 熱スイッチの構成

フィン、土台、銅棒、ギャップの4つの部品を組み立てることで、スイッチを製作する。フィンは折り曲げて使用するので、できるだけ薄くかつ強度を保てる厚みが好ましいことから、0.1mmの銅板を使用する。土台は、フライス盤を使用して凹のような形にする。ギャップとはフィンどうしの間に挟むパーツのことであり銅のワッシャーを使用する。

組み立ての方法はフィンとギャップとを土台上にグリスを塗った状態で交互に並べ銅棒を挿して固定する。最後にフィンを2液性エポキシ樹脂と銅粉を混合させた接着剤で固定する。また伝熱を上げるために銅粉を混ぜている。混合率はエポキシ樹脂が7割、銅粉が3割である。完成した熱スイッチがFig1である。最後に熱スイッチをICF114フランジにとりつけ、φ60mmの円筒容器に封入している。

組み立て型のスペックは、伝熱面積:420(cm<sup>2</sup>),ギャップ幅:1.55(mm)である。また、次の実験結果の比較に使用するワイヤー放電加工機で製作した熱スイッチ(以下切り出し型と呼ぶ)のスペックは、伝熱面積:672(cm<sup>2</sup>),ギャップ幅:0.5(mm)である。また、それぞれの熱通過率の設計値は次の通りである。組立型のON時が0.1(W/K)~0.27(W/K)、OFF時が0.03(W/K)~0.04(W/K)である。また、切り出し型のON時が0.24(W/K)~0.47(W/K)、OFF時が0.02(W/K)~0.06(W/K)である。それぞれの熱通過率の設計値に開きがある理由として、極低温下(今回の実験では、10K~26K)での銅とステンレスとヘリウムの熱伝導率の変化が影響しているためである。ここで、組み立て型の設計値はスイッチを一つの銅として計算している。

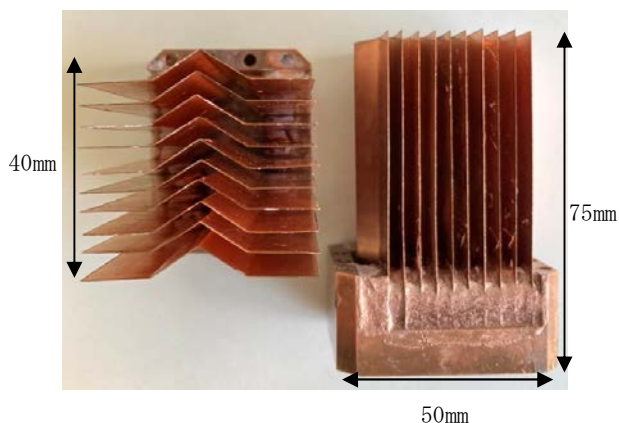


Fig.1 Assembly heat switch

## 3. 極低温実験結果

今回製作した熱スイッチの性能を確認するために国立研究開発法人 物質・材料研究機構(NIMS) /磁気冷凍システムグループ様のGM冷凍機(ULVAC:HE05)をお借りして極低温実験を行った。製作した熱スイッチを市販のステンレス配管に入れフランジで封を閉じる。その後フランジ上部にマンガニン線ヒーターを取付ける。実験条件はヒーター出力を0.1W~1.8Wの範囲とした。実験結果をまとめたグラフがFig2である。Fig2より今回製作した熱スイッチの性能はON/OFF比が約4倍~約5倍である。このことから、組み立て型の熱スイッチがしっかりと動作することを確認することができた。また、Fig2では組み立て型と切り出しとの比較を行っている。Fig2のそれぞれのON時に差が出ている理由として、スイッチの性能が異なることも起因している。次にそれぞれの熱スイッチの熱通過率の設計値を実験結果と比較する。組み立て型の設計値と実験値とを比較した結果、設計値が実験値の4~7倍となった。また、切り出しの設計値と組み立て型の設計値とを比較した結果、切り出しが組み立て型に対して約2.5倍となった。

次にFig2よりON時に切り出しが組み立て型の約3~4倍である。このことから、二つの実験値の差から二つの設計値の差を除いた値が切り出しと組み立て型の性能差であると考えられる。

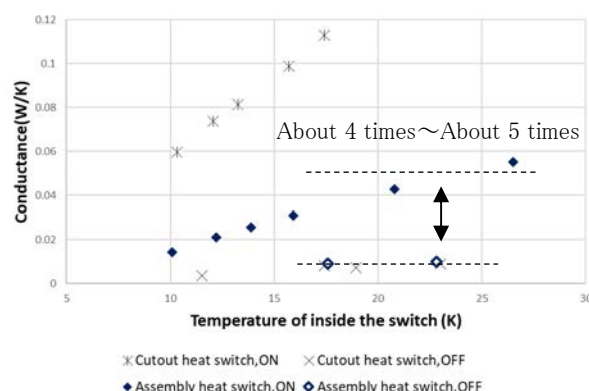


Fig.2 Graph of ON/OFF ratio of assembly heat switch and comparison of two type heat switch

## 4. まとめ

実験結果よりON/OFF時で差が出たので、組立型のガスギャップ式熱スイッチが製作可能であることを確認できた。また、今回は熱スイッチを封入するために市販のフランジと円筒容器を使用したため、より薄肉の円筒容器などを自作すれば、より性能が上がると思われる。

## 参考文献

1. 神門剛、伊藤総、濱田衛、林征治、川手剛雄、渋谷和幸、「伝導冷却型超電導マグネットの永久電流スイッチと熱スイッチ」、低温工学 34 巻 5 号 P230 (1999)
2. 沼澤建則、神谷宏治、李晶、中込秀樹、Peter SHIRRON、「連続型断熱消磁冷凍機」、低温工学 50 巻 2 号 96P (2015)

# 冷媒循環冷却システムの熱流体解析

## Thermo-fluid analysis of circulation cooling systems

杉原 健心, 逢坂 昇汰, 岡村 哲至 (東工大); 平野 直樹 (NIFS)

SUGIHARA Kenshin, OKAMURA Tetsuji, OSAKA Shota(Tokyo Tech); HIRANO Naoki (NIFS)

E-mail: sugihara.k.ae@m.titech.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では複数の超電導コイルを効率的に冷却する目的として循環冷却システムについて検討を行っている。本発表では本実験装置から得られた結果や、実験結果と数値解析との相違の原因、クライオファンの形状による出口流速に与える影響について報告する。

### 2. 冷媒循環冷却実験

実験装置の概略図を Fig1 に示す。冷媒は初めコンプレッサーから吐出圧を測る圧力計及び流量計を通りクライオスタット内へ入っていく。クライオスタット内で予冷熱交換器を通りあらかじめ冷却された冷媒から冷却された後、GM 冷凍機周りのコールドヘッド熱交換器を通してさらに冷却される。その後コイルからの熱負荷を模したマイクロヒーターで熱入力を受けた後、予冷熱交換器でクライオスタットに入ってくる冷媒から熱を受ける。クライオスタットを出た後バッファタンクを通り吸込圧を測る圧力計の後コンプレッサーへと戻っていく。実験では 2 か所の圧力計での読みと流量計での読みを記録した。また温度はロガーを用いて記録した。温度計は主に GM 冷凍機のコールドヘッドの上部、中部の他、コールドヘッド熱交換機の入口側、出口側の管壁、またヒーター前後の配管内部に設置した。

### 3. マイクロヒーターの熱流体解析

先行研究において、上述の冷媒循環冷却実験と数値解析の結果に差異が生じており、マイクロヒーターの温度が、数値解析の結果よりも実験から得られた結果の方が高くなっている。この相違の原因として考えられるのが、マイクロヒーターのヒーター部分と外管の内壁が接触している可能性である。ヒーター部分はコイル状になっており、外径が 8.0mm であるのに対し、外管の内径が 8.2mm であるため、その差は 0.1mm となっている。マイクロヒーターの長さは 100mm で、線径は 1mm となっている。Autodesk 社の 3DCAD ソフト Autodesk Inventer によってヒーター部分が外管に接触したモデルと接触していないモデルの 2 つを用意し、同じ解析条件下で同社の熱流体解析ソフト Autodesk CFD を用いて熱流体解析を行った。質量流量は 0.1g/s、0.5g/s、1g/s、熱入力は 0W、10W、20W、30W という条件で解析を行った。質量流量が 0.1g/s での解析結果を Fig2 に示す。すべての質量流量に関して、マイクロヒーターが外管に接触しているモデルの方が接触していないモデルよりも壁面温度が高いという結果になった。特に、0.5g/s と 1g/s の条件では、接触しているモデルの壁面温度が実験結果と同程度上昇していたので、実験装置内でヒーター部分と外管の内壁が一部接触している可能性が高いと考えられる。また、0.1g/s の質量流量が低い条件では、熱流体解析の結果よりも実験結果のほうが高くなっており、その差は熱入力が大きいくほど増加傾向にあるということが分かった。

### 4. クライオファンの熱流体解析

クライオファンとは羽根車と渦巻室の 2 つの主要部品からなる極低温で作動する遠心ポンプで、極低温のヘリウムを循環させることができる。従来冷媒であるヘリウムを循環させるために使われているコンプレッサーは、極低温の冷媒を扱うことができないため常温まで戻す必要があり、現在の流路の 80% 以

上を占めている熱交換器を必要とする。コンプレッサーをクライオファンに置き換えることによって、流路短縮により圧力損失を抑えることができるほか、冷媒が断熱容器の外に出る必要が無くなるため、外気からの熱侵入を抑えることができると考えられる。

本研究では、クライオファンを冷媒循環システムに適応するための第一ステップとして、クライオファンの羽根車の形状や、羽根車の回転数によって、低温ヘリウムの出口流速がどのように変化するかを、Autodesk CFD を用いて解析を行った。解析では、クライオファンの性能を評価するため最大流速の計測を行った。解析条件として、入口と出口の圧力を 0MPa に設定し、冷媒であるヘリウムの温度は 50K とした。羽根が 8 枚の羽根車と羽根が 4 枚の羽根車の、各回転数における出口流速の解析結果を Fig3 に示す。流体が低温ヘリウムの場合も、羽根車の形状によってポンプの性能は大きく変化し、その差は回転数が大きいほど増加するということが分かった。

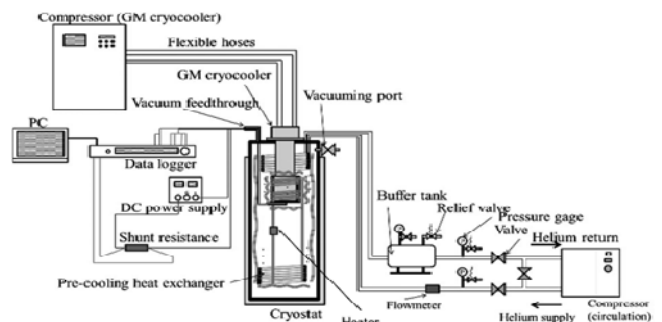


Fig1. Experimental equipment diagram

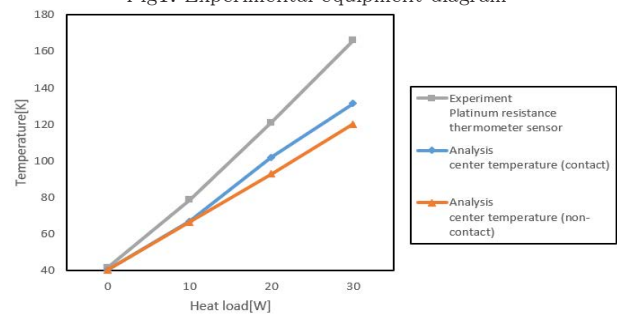


Fig.2 The central temperature of the microheater outer tube under each condition at a mass flow rate of 0.1 g/s.

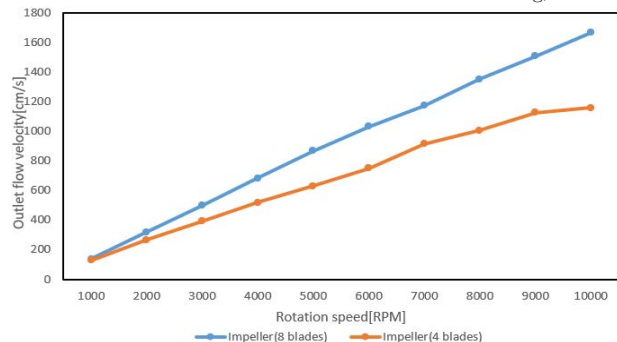


Fig.3 The outlet flow velocity at each rotational speed of the cryofan.

## カム機構を用いた室温磁気冷凍装置の冷凍性能

## The performance of a room-temperature rotary magnetic refrigerator using Cam-Mechanism

濱岡 遼真, 安部 勇汰, 岡村 哲至(東工大)

HAMAOKA Ryoma, ABE Yuta, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Institute of Technology)

E-mail: hamaoka.r.aa@m.titech.ac.jp

## 1. はじめに

冷凍空調機器のノンフロン化を実現するため、室温磁気冷凍機の研究が行われている。先行研究における回転式磁気再生器(Active Magnetic Regenerator; AMR)を用いた実験では、励消磁を行うための動力と、作動流体である水を駆動させ流れ方向を制御するための動力が必要あり、複数の動力源を使用する場合が多い。本研究では、装置の省電力化・省スペース化を図るため、カム機構を用いた新たな流体駆動装置を製作し、1つの動力源で上記の動作を行う実験装置を製作した。その性能とカム機構の課題を検討するために、無負荷状態におけるAMR両端での温度差の測定実験を行った。

## 2. 実験装置

本研究で用いた実験装置の外観を Fig.1 に示す。主要部品は磁性材料が充填されている AMR ダクトと、ネオジウム(Nd)系の永久磁石、磁石を回転させるモーター、流体を駆動させるためのカム機構、冷やされた水がたまる冷却部である。モーターが回転することによって、永久磁石が回転し、またカップリングと傘歯車を介して、流体駆動装置の垂直シャフトが回転する構造となっている。シャフトの先には楕円型のカムが取り付けられており、カムが回転することで周囲の8つの単動エアシリンダのピストンロッドがカム上を摺動する。それによってシリンダのエア排気側に取り付けられた流路内の作動流体が往復運動する構造になっている。なお Fig.1 ではカム部と AMR ダクトは1本のチューブしか接続されていない。

## 3. 実験条件

内径 8mm, 長さ 80mm の AMR ダクトに、20.6°Cをキュリー温度にもつ直径 0.45mm のガドリニウム球を 41%の充填率で充填した。また励磁時には平均 0.62T が印加される。本実験では1本の AMRダクトのみを使用し、そのダクトの両端に熱電対を設置し、外部からの熱侵入を防ぐため、両端に断熱材を巻いた。初期温度を 20°C, 22°Cに、モーターの回転数は 15rpm, 30rpm, 45rpm にそれぞれ設定して、定常状態になるまで AMR ダクト両端の水温を測定した。

## 4. 実験結果

Fig.2 に 22°C, 30rpm において AMRダクトの高温側のみエアシリンダに接続した場合(a)と、両側をエアシリンダに接続した場合(b)におけるダクト両端温度の時間変化を示す。なお本実験では冷却部に貯水をせず、ダクト低温側は (a)ではチューブ内の水が外部に漏れないよう、水の往復距離に対して十分長いチューブを介して冷却部へ接続し、その先端を大気圧に開放しており、(b)では高温側シリンダの周期運動の位相の逆位相となる 90° ずれた位置のシリンダに直接接続している。どちらも時間経過につれて初期温度を境に温度差が発生し、約 1000 秒で定常状態になった。またダクト温度差は(a)約 2.5°C, (b)約 5.0°Cとなり、全ての条件において(b)における温度差は(a)よりも大きくなった。

## 5. 考察とまとめ

(a)と(b)における温度差の違いは、作動流体の移動距離の違いによる水と磁性材料の熱交換量の変化に起因している。Table 1 は(a)と(b)における、各回転数において AMR ダクト内

を作動流体が往復した距離を示す表である。Fig.3 に一つのシリンダを用いた(a)の場合の概略図を示す。本実験装置ではエアシリンダ内のバネによって水の吸込を行う。そのため回転数が増えることによる流速の増加による、ダクト内の圧力損失の増加がバネの弾性力を上回る程、ピストンロッドの移動距離は短くなる。また吐出はカムによるピストンロッドの押込によって行うため、ダクト両端にピストンを配置した(b)の方が移動距離は長くなっている。圧力損失がゼロの状態での水移動距離は 120 mmであることから、より大きな圧力損失にも対応できるための機構の改良が必要である。

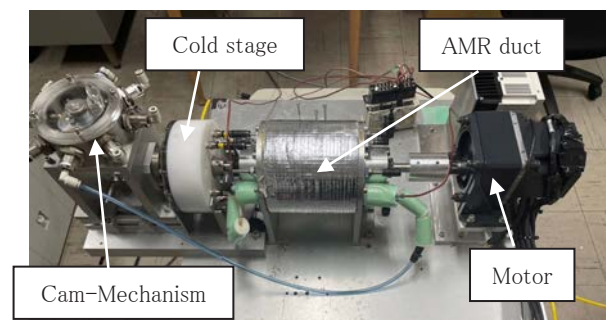


Fig.1 Photograph of the experimental equipment for AMR

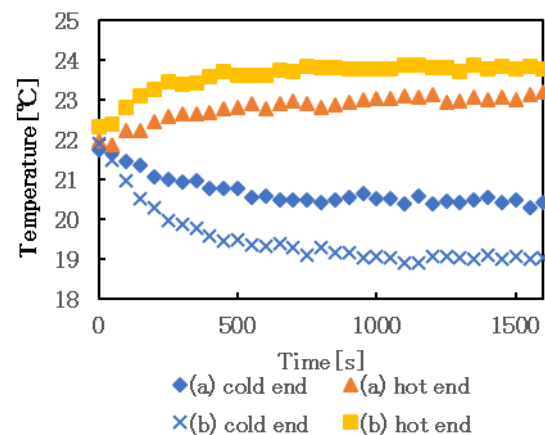


Fig.2 Temperature distributions as a function of time

Table1 Distance traveled by water in AMR duct

	15 rpm	30 rpm	45 rpm
(a)	50 mm	27 mm	18 mm
(b)	75 mm	44 mm	30 mm

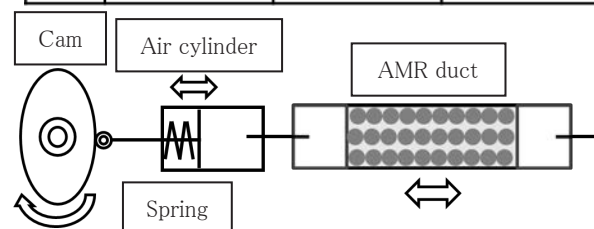


Fig.3 Schematic diagram of experiment



# 外部磁界印加用マグネット内の磁場分布対称性の改善による ピックアップコイル法におけるキャンセル残りの低減

Reduction of background losses in a pick-up coil method  
by improving the symmetry of field distributions in the magnet for applying external field

近森 希望, 永山 悟志, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

CHIKAMORI Nozomi, NAGAYAMA Satoshi, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma

E-mail: K8132251@kadai.jp

## 1. はじめに

高温超伝導 (HTS) 線材の交流損失特性の高感度測定は、低損失 HTS 線材を開発する上で重要である。本研究では、ピックアップコイル法による交流横磁界印加時の短尺直線状 HTS 線材の交流損失測定システムの高感度化を図ることを目的としている。そのために本研究では、測定サンプルがないときに発生する見かけの損失 (キャンセル残り) の低減方法についての検討を行ってきた [1, 2]。本発表では、外部磁界印加用マグネットを構成する 7 つのコイル配置位置の設計値からのずれや各コイルの巻き乱れなどにより生じるマグネット内の磁場分布の対称性の乱れを、補正コイルにより改善することで、どの程度キャンセル残りの低減を図れるかを検討したので、その結果について報告する。

## 2. 交流損失の測定方法

本研究では交流損失測定法としてピックアップコイル法を採用している。Fig. 1 は外部磁界印加用マグネットの外観図である。このマグネットは中央のコイルとその両側の 3 対のコイルから成る。同図からわかるように、設計上はこのマグネット内でピックアップコイルとキャンセルコイルをマグネット中心に対して対称な位置に配置することができ、2つの検出コイルの形状を極力近づけられるので、測定二次回路での位相誤差を小さくでき、キャンセル残りの低減を図れる。

## 3. 外部磁界印加用マグネット内の磁場分布

Fig. 2 の●印のプロットはマグネット内  $z$  軸上の磁場分布の測定結果である。この磁場分布測定に用いたコイル形状は、縦 20.4 mm、横 10.8 mm の矩形コイルで、ターン数は 5 である。この図から、実際に作製されたマグネット内では、2つの検出コイルが配置される空間の磁場分布はマグネット中心に対して完全には対称ではないことがわかる。これは、マグネットを構成する 7 つのコイルを組み立てる際の配置位置の設計値からのずれや各コイルの巻き乱れなどが原因であると考えられる。マグネットの作製後の形状寸法をもとに磁場分布を計算した結果、各コイルの中心位置の設計値からのずれが、磁場分布の対称性の乱れに最も影響を及ぼすことがわかった。

## 4. マグネット内磁場分布の対称性改善とキャンセル残りの低減

マグネット内  $z$  軸上の磁場分布のマグネット中心に対する対称性を改善するための補正コイルの設計・作製し、Fig. 2 の挿図に示す 2 箇所にも補正コイルを設置した。補正コイル設置後のマグネット内磁場分布の測定結果を Fig. 2 の○印のプロットで示した。同図からわかるように、補正コイルの設置により、マグネット内磁場分布の対称性の改善を図ることができた。

次に、補正コイルによる磁場分布の対称性の改善で、どの程度キャンセル残りの低減を図れるかを調べるために、補正コイルの設置前後でのキャンセル残りの測定を行った。測定結果を Fig. 3 に示す。補正コイルの設置により、キャンセル残りが低減する結果が得られた。すなわち、磁場分布の対称性の改善が交流損失測定の高感度化に寄与する結果となった。現在、マグネット内の磁場分布をより詳細に測定し、その結果をもとに、より精度よく磁場分布対称性の改善を図り、更なるキャンセル残りの低減に繋がるかについて検討を進めている。

## 参考文献

1. R. Tomisaki, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p. 37.
2. S. Nagayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.47.

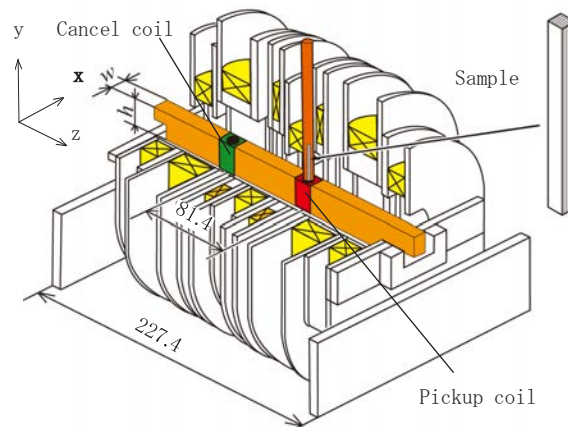


Fig. 1 Schematic view of magnet for applying external field.

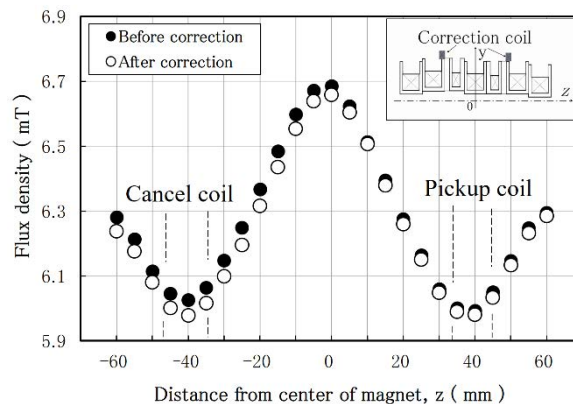


Fig. 2 Measured field distributions in the magnet.

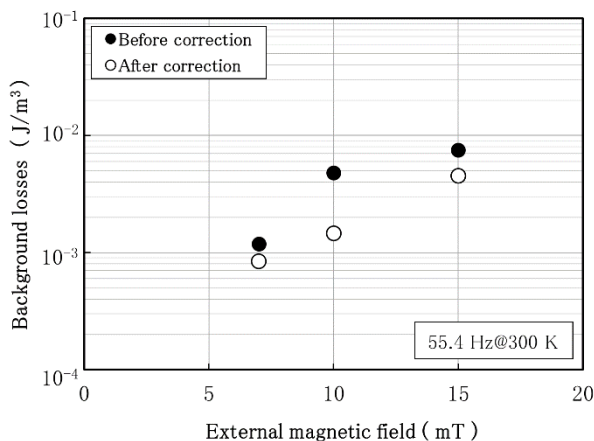


Fig. 3 Measured background losses.

## 鉄心スロット内に配置した高温超電導テープ巻線の交流損失解析

## AC Loss Analysis of High Temperature Superconductor Windings Located inside Iron Core Slots

柳澤 隼輔, 椛川 一弘 (山理大); 中村 武恒 (京大)

YANAGISAWA Shunsuke, KAJIKAWA Kazuhiro (Sanyo-Onoda City Univ.); NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

E-mail: fl23630@ed.socu.ac.jp

## 1. はじめに

回転機の電機子巻線などに適用された REBCO 高温超電導線材を対象に、交流環境下で発生する交流損失が議論されている。従来は REBCO 線材をストリップ近似して電流ベクトルポテンシャル( $T$ 法)で有限要素解析されていた[1]。しかし、近年 $T$ 法と磁気ベクトルポテンシャル( $A$ 法)を組み合わせた $T-A$ 法による数値解析方法が提案された[2]。本研究では、鉄心スロット内に配置した REBCO 巻線で発生する交流損失を評価するために、 $T-A$ 法を用いた数値解析方法を構築する。また、従来法と同等の条件下で数値解析し、構築した手法の妥当性を検証する。

## 2. 数値解析モデル

REBCO 線材を鉄心スロット内に配置した場合の数値解析モデルを Fig. 1 に示す。数値解析モデルは、磁界分布の対称性を考慮してすべて $1/2$ モデルで作成する。回転子鉄心とギャップで隔てられた固定子鉄心に設けられた半閉スロット1つの断面を2次元解析モデルとする[3]。鉄心スロット内に配置した REBCO 巻線は、厚さが無限小の超電導ストリップを等間隔で積層したものとみなす。超電導体の輸送特性として、臨界電流密度が局所磁界に依存しない臨界状態モデルを仮定する[4]。 $z$ 軸はストリップの長手方向と平行とし、モデルに対して水平方向を $x$ 軸、鉛直方向を $y$ 軸と設定する。また、超電導ストリップに対して平行方向を $X$ 軸、垂直方向を $Y$ 軸とする。超電導ストリップには下から上に順に番号を付け、輸送電流 $I_k$ が $k$ 番目のストリップに流れる。

## 3. 数値解析方法

超電導ストリップに交流電流を通電した際に発生する交流損失を有限要素法により数値計算する。構築した手法では超電導ストリップを $T$ 法により定式化し、真空部は $A$ 法により定式化する。 $T$ 法の支配方程式は次で表される。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = -\frac{\mu_0 d}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^N \int_{C_k} \frac{[\nabla \times \mathbf{T}(X')] \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2} dX' \mathbf{n} - \frac{\partial B_{ey}}{\partial t} \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は抵抗率、 $d$ は超電導層の厚さ、 $N$ は超電導ストリップの積層枚数、 $C_k$ は $k$ 本目のストリップに沿った線路、 $\mathbf{r}$ は電流源 $X'$ からの位置ベクトル、 $\mathbf{n}$ は超電導ストリップの単位法線ベクトルである。電流ベクトルポテンシャル $T$ は垂直成分 $T_y$ のみを持ち、固定境界条件 $T_y(0) = 0$ および $T_y(2a) = I_k/d$ を両端に適用する。ここで、 $2a$ はストリップ幅である。また、 $A$ 法の支配方程式は次で表される。

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{J}$ は電流密度である。鉄心の表面は自然境界条件 $\partial A_z / \partial n = 0$ 、回転子との間のギャップ部分には固定境界条件 $A_z = 0$ を設定する。超電導ストリップに関しては非線形方程式となるため、Newton-Raphson 法により収束計算する。また、 $A$ 法から得られた $Y$ 方向の外部磁界 $B_{ey}$ と、 $T$ 法から得られた $z$ 方向の電流密度 $J_z$ を互いに情報交換し合うため、過小緩和法によって収束計算する。

## 4. 数値解析結果

数値解析パラメータを Table 1 に示す。構築した $T-A$ 法の妥当性を検証するために、真空中に複数枚超電導ストリッ

プを積層した場合を対象に、従来の $T$ 法と比較した。その結果、数値解析結果がよく一致した。

鉄心スロットモデルの数値解析結果の一例として、交流損失の積層枚数依存性を Fig. 2 に示す。交流損失には周波数依存性がないことがわかった。また、線材間距離は交流損失にほとんど影響を与えず、線材枚数を増やすほど交流損失は増加することがわかった。

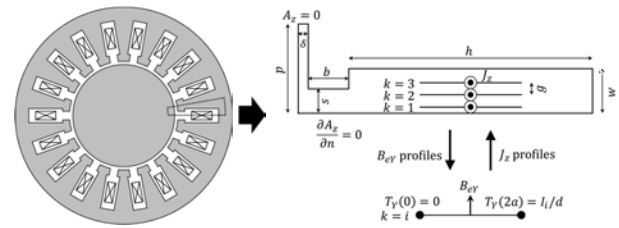


Fig. 1 Numerical model of HTS windings located inside iron core slot.

Table 1 Parameters for numerical analysis.

Strip width, $2a$	5 mm
Thickness of SC layer, $d$	1 $\mu\text{m}$
Critical current density, $J_c$	2 MA/cm <sup>2</sup>
Critical current, $I_c$	100 A
Number of stacked strips, $N$	2, 4, 6
Gap between strips, $g$	0.25–0.75 mm
Amplitude of transport current, $I_m$	10–90 A
Frequency, $f$	30–100 Hz
Width of iron core slot, $2w$	4.4 mm
Depth of iron core slot, $h$	12 mm
Width of opening in iron core slot, $2s$	2.4 mm
Depth of opening in iron core slot, $b$	2 mm
Gap length between iron cores, $\delta$	0.5 mm
Pitch of iron core slots, $2p$	8.8 mm

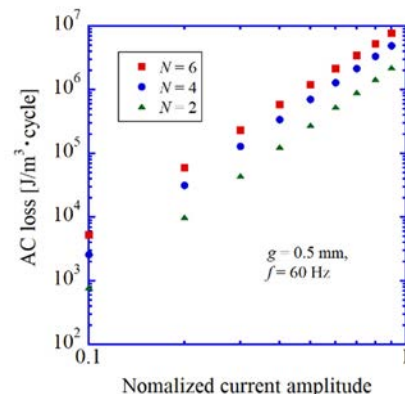


Fig. 2 Numerical results of AC losses in HTS windings located inside iron core slot for different numbers of strips.

## 参考文献

1. K.Kajikawa, et al.: Physica C 445-448 (2006) 1058.
2. H.Zhang, et al.: Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 024005.
3. K.Kajikawa, et al.: J. Supercond. Nov. Magn. 24 (2011) 987.
4. C.P.Bean: Phys. Rev. Lett. 8 (1962) 250.

# REBCO スパイラル導体の基礎検討

## Basic Study of REBCO Spiral Conductors

藤田 真司, 中台 優希, 武藤 翔吾, 中村 直識, 大保 雅載 (フジクラ)

FUJITA Shinji, NAKADAI Yuki, MUTO Shogo, NAKAMURA Naonori, DAIBO Masanori (FUJIKURA)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

### 1. はじめに

核融合や加速器等の大型コイルアプリケーションでは、大電流容量の導体が求められており、REBCO 線材を用いた様々な導体が提案されている[1]。今回、円形断面のコアの外周に複数の REBCO 線材をスパイラル状に巻いた導体(スパイラル導体)について基礎検討を行ったので報告する。

### 2. 実験方法および実験結果

今回使用した REBCO 線材はフジクラ製のタイプ FESC-SCH04(人工ピンタイプ:4 mm 幅, 基板厚 50  $\mu\text{m}$ , 銅めっき厚 20  $\mu\text{m}$ )である。最初に、劣化無く作製できるコア径を調べるため、 $\phi$  6~2 mm の固い銅丸棒に REBCO 線材を超電導層を内側にしてスパイラル状に巻付けた状態で、LN<sub>2</sub> 中で  $I_c$  を評価した。比較として REBCO 線材単体のフラットワイズ曲げ特性も評価した。曲げ試験は REBCO 線材の超電導層を内側にして GFRP の円筒に沿わせて室温で曲げ、曲げた状態で LN<sub>2</sub> で冷却して  $I_c$  を評価した。それらの結果を Fig. 1 に示す。縦軸は巻付け前あるいは曲げる前の  $I_c$  で規格化している。どちらの場合も  $I_c$  劣化する径は  $\phi$  5 mm 未満であった。なお、 $\phi$  5 mm に曲げた場合の超電導層の曲げ歪は -1% 程度である。

次に外径  $\phi$  4.8 mm の軟銅撚線をコアとして、巻付ける REBCO 線材を増やして  $I_c$  を評価した。1 層あたりの巻付け本数を 2 本とし、総数を 1, 2, 3 層とした。導体の外観を Fig. 2 に、LN<sub>2</sub> 中での  $I_c$  測定結果を Fig. 3 に示す。 $I_c$  は巻付ける線材の本数に概ね比例する結果であり、顕著な劣化は無いと考えられる。

導体の機械特性評価として、1 層あたり 2 枚×2 層の軟銅撚線コア導体を用いて室温での曲げ試験を実施した。曲げ試験は所定の外径の円筒に導体を 1 周巻付け、LN<sub>2</sub> で冷却して  $I_c$  を測定 ( $I_{c1}$ ) し、その後室温で直線状に戻して再度 LN<sub>2</sub> 中で  $I_c$  を測定 ( $I_{c2}$ )、という工程を徐々に曲げ径を小さくしながら  $I_c$  が劣化するまで行った。曲げ試験の結果を Fig. 4 に示す。縦軸は試験前の  $I_c$  ( $I_{c0}$ ) で規格化している。曲げ直径が大きい場合、曲げた際の  $I_c$  はやや低下するが、直線状に戻すと  $I_c$  はほぼ  $I_{c0}$  に戻った。これは、導体を 1 周巻き付けているため、発生した磁場により  $I_c$  が低下したと考えられる。直線に戻した際に  $I_c$  が 5% 以上低下する曲げ直径は 20 mm であった。

### 3. まとめ

REBCO スパイラル導体の基礎検討として、巻付けコア径による劣化特性を調査し、 $\phi$  5 mm 程度まで劣化がないことを確認した。 $\phi$  4.8 mm のフレキシブルな銅撚り線をコアとして、巻付けける REBCO 線材の枚数を増加させ、6 枚まで顕著な劣化がないことを確認した。導体の曲げ試験を実施し、 $\phi$  20 mm 程度まで劣化がないことを確認した。

### 参考文献

[1] N. Yanagi *et al.*, *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, 54 (2019) p.10-22.

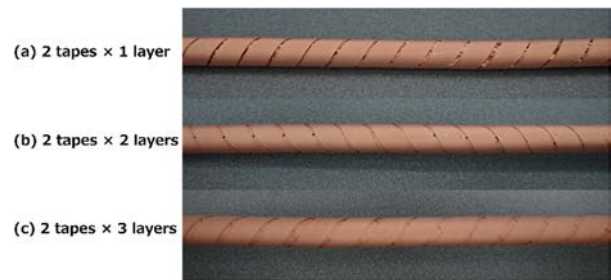


Fig. 2 Appearance of REBCO spiral conductor samples.

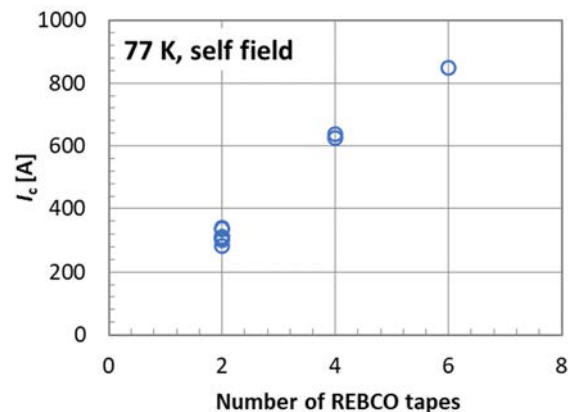


Fig. 3 Wound tape number dependence of conductor  $I_c$ .

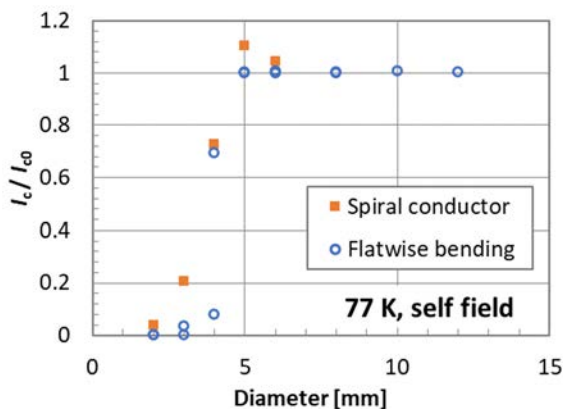


Fig. 1 Core diameter dependence of  $I_c$  for REBCO spiral conductors and flatwise bending test results of REBCO tapes.

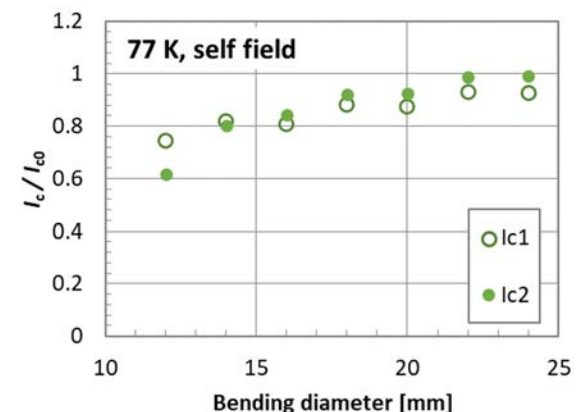


Fig. 4 Bending test results of the 2 tapes × 2 layers REBCO spiral conductor.

# HTS 大電流導体における電流分布に対するインダクタンス効果のシミュレーション

## Simulation of Inductance Effect in Current Distribution for Simple-Stacking HTS Cables

GARFIAS-DÁVALOS Diego (総研大); 成嶋 吉朗, 柳 長門 (核融合研、総研大)  
 GARFIAS-DÁVALOS Diego (SOKENDAI); NARUSHIMA Yoshiro, YANAGI Nagato (NIFS, SOKENDAI)  
 E-mail: diego.garfiasdavalos@nifs.ac.jp

### 1. Introduction

To develop a High-Temperature Superconducting (HTS) large-current cable, twisting and transposition are generally applied to HTS tapes to obtain a uniform current distribution and stable operation, especially for AC-operated magnets. Non-twisting or simple-stacking HTS cable designs have been explored in NIFS for DC operation, on the contrary [1,2], as it is possible to make a mechanically robust and easy-to-manufacture cable.

The higher cryogenic stability of HTS suggests that simple-stacking configuration may be stable due to the larger heat capacity of the materials at an operation temperature of 20 K compared to 4 K for Low-Temperature Superconductors (LTS) [3].

### 2. Circulation currents in STARS and L-RAISER samples

Experimental results for the 20-kA-class “STARS” [4] conductor sample under trapezoidal current input, confirm stable operation on a coil configuration with simple stacking, even with the presence of inductance difference between tapes, up to the nominal current of 18 kA with a high ramp rate of 2 kA/s. The “L-RAISER” with 5 HTS tapes for a simple-stacking cable and a 60% larger inductance than the STARS conductor can also operate stably up to 2000 A/s.

For both 20-kA-class STARS and L-RAISER experiments, circulation currents were confirmed by detecting a residual magnetic field via Hall sensors after the input current had become zero.

Additionally, the L-RAISER experiment allowed us to observe the voltage decay in each tape by installing voltage taps on the superconducting side of each of the five REBCO tapes used in the experiment, as shown in Fig. 1.

### 3. Numerical Model

As a follow-up from a straight HTS cable experiment and analysis [5, 6], a numerical simulation was developed accounting for the superconducting properties of HTS and the inductance difference between tapes, to understand better how the current distributes in a simple-stacking configuration, assuming constant temperature. Fig 2 shows a numerical calculation for a 5 HTS tapes model and the geometry values for the 20-kA-class STARS conductor.

Through these analyses, we have obtained insights into the role of joint resistance, stabilizer resistance, and mutual inductance in the current distribution and circulation currents formation. This may indicate how the current variation between tapes occur for large HTS magnets based on the simple-stacking of REBCO tapes and whether they remain within a safe margin from the critical current threshold. It becomes available to compare with experimental results to keep clarifying stability margins, especially with thermal analysis, which is our future work.

### References

- [1] N. Yanagi et al., Cryogenics 80 (2016), p. 243-249.
- [2] Y. Narushima et al., Plasma and Fusion Research 17 (2022) 2405006.
- [3] D. Uglietti et al., Cryogenics 110 (2020) 103118.
- [4] N. Yanagi et al., Journal of Physics: Conference Series 2545.1 (2023) 012008.
- [5] T.A.J. Meulenbroeks et al., Journal of Physics Conference Series 1293 (2019) 012065.
- [6] D. Garfias-Dávalos et al., Plasma and Fusion Research 17 (2022) 2405066.

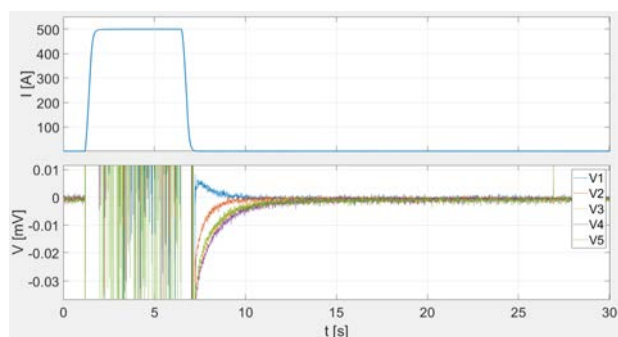


Fig. 1 Voltage tap signals observed in the L-RAISER experiment after a ramp-down of the input current. The residual magnetic field was observed for a couple of seconds.

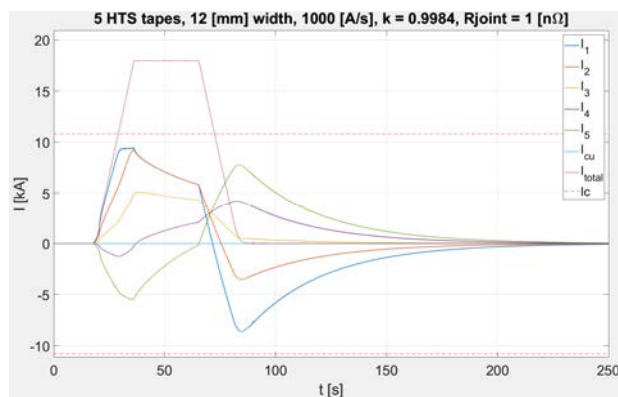


Fig. 2 Numerical calculation for individual currents of a 5 HTS tapes model for the 20-kA-class STARS sample geometry with an 18-kA input current as used in the experiment. A high mutual inductance (meaning a high coupling factor) among the tapes enables the current transfer between them. The critical current is assumed to be independent of the sample current. No contact resistance is considered in the longitudinal direction of the tapes, and only the joint resistance is assumed in the terminals.

## 等価回路モデルのみに基づく無絶縁 REBCO コイルの励磁特性評価

Evaluation of excitation characteristics of no-insulation REBCO coils based only on the equivalent circuit model

島田 亜緒, 太田 海斗, 石山敦士(早大); 野口 聡(北大); 植田 浩史(岡山大); 渡部 智則(中部電力); 福田 光宏(阪大)  
SHIMADA Ao, OTA Kaito, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.);  
WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Grid Co.,Inc.); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.)  
E-mail:ao3104@ruri.waseda.jp

### 1. はじめに

無絶縁コイルは励磁時に周方向と径方向の両方に電流が流れるため、無絶縁コイルの両端電圧は絶縁コイルと異なる波形になる。我々は、無絶縁コイル特有の励磁遅れを考慮した遮蔽電流解析法の開発を行ってきた[1]。今回は、計算時間の短縮を目的として回路解析のみに基づく無絶縁 REBCO コイルの遮蔽電流磁場解析プログラムを新たに開発した。ここでは、開発したプログラムを用いて、コイル両端電圧に着目した計算結果と、コイル内の径方向および周方向に流れる電流の時間変化を計算した結果について報告する。

### 2. 解析対象

解析対象は、先行研究[2]で試作・実験されたコイルシステムである。概略図を Fig.1 に、コイル諸元を Table.1 に示す。

### 3. 解析手法

#### 3.1 先行研究で提案した詳細解析手法

詳細解析手法[1]は、PEEC モデルに基づく電流分布解析と式(1)の支配方程式に基づいた、有限要素法と高速多重極法による 3 次元非線形過渡電磁場解析[3]の併用法である。式(2)に示す回路方程式から周方向電流を求め、これによる磁場を式(1)に代入することによって遮蔽電流磁場を算出する。

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times n)\} \cdot n + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times n') \times R}{R^3} \cdot ndS' = -\frac{\partial B_0}{\partial t} \cdot n \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} (I_{op} - I_{\theta j}) \quad (2)$$

#### 3.2 提案する解析手法

今回新たに開発・提案した「双方向分割回路型解析手法」では、Fig.2 に示すようにパンケーキコイルを半径方向に分割し、さらに REBCO テープ幅方向に分割する。今回の解析 (Fig.2, Fig.3) では、コイル半径方向に 7 分割、REBCO テープ幅方向に 10 分割した。そして Fig.3 に示すように各要素に等価回路を割り当て、各要素について成り立つ式(3)~(5)を全要素について連立することで周方向電流を算出し、ピオ・サバールの法則より磁場を求める。ただし、式(3)は等価回路間で成り立つ式、式(4)は径方向分割要素内での運転電流の分布の式、式(5)は幅方向分割要素内で成り立つ電圧の式である。本解析手法では、コイルをテープ幅方向に分割することで遮蔽電流と磁束侵入を考慮できるようにしている。

$$\sum_{j=1}^{total\_num} M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} I_{cti} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{div\_z} (I_{\theta i} + I_{cti}) = I_{op} \quad (4)$$

$$I_{cti} R_{cti} - I_{ct(i+1)} R_{ct(i+1)} = 0 \quad (5)$$

### 4. 解析結果

径方向電流の解析結果を Fig.4 に示す。ただし Div1 がコイル巻線最内側、Div7 が最も外側である。コイル内側から外側へ向かうほど径方向電流が増え、Div5 より外側ではコイルの外側へ向かうほど径方向電流が減少していることが分かる。また運転電流が一定になると次第に径方向電流は減少し、0 に近づくことが読み取れる(励磁遅れ現象)。なお、詳細解析手法の結果においても同様の傾向がみられた。

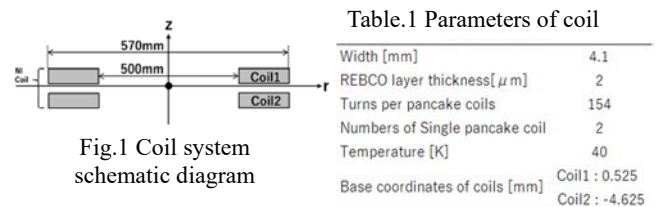


Fig.1 Coil system schematic diagram

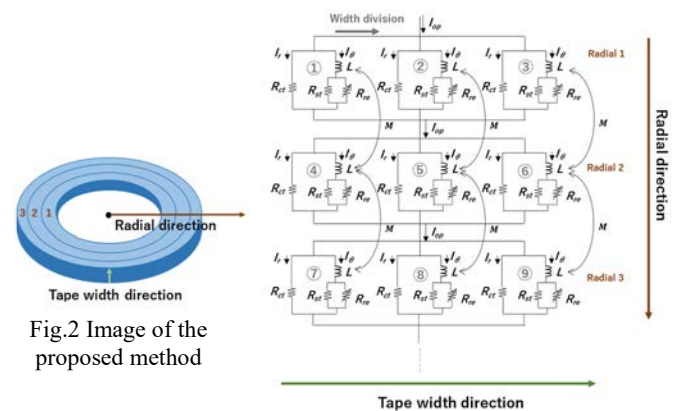


Fig.2 Image of the proposed method

Fig.3 Equivalent circuit of NI coil in the proposed method

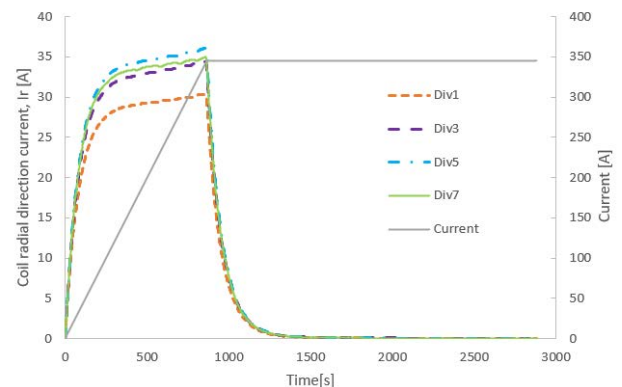


Fig.4 Analysis result

本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244)と基盤 B(22H01478)によった。

### 参考文献

- S.Ueda, et al., IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.31, 4601405, 2021
- 宮崎寛史他, 2018 年度春季低温工学・超電導学会概要集, 3B-a03, p150, 2018.
- H.Ueda et al. IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.26 4701205, 2016
- 野口聡他, 低温工学, Vol.54, No.2, 103-110, 2019.

# 層間接触不良領域を持つ無絶縁 REBCO コイルにおける保護方式の検討

## Examination of protection method for no-insulation REBCO coils with local noncontact area between turns

日浦 琢言, 寺内 和, 中村 太郎, 天野 一樹, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大);渡辺智則(中部電力)  
 HIURA Takuto, TERAUCHI Nodoka, NAKAMURA Taro, AMANO Kazuki, ISHIYAMA Atsushi(Waseda Univ.);  
 NOGUUCHI So(Hokkaido Univ.);WATANABE Tomonori(Chubu Electric Power Co., Inc.)  
 E-mail: takufish208@fuji.waseda.jp

### 1. はじめに

MRI や医療用加速器への応用を目指し、無絶縁 REBCO コイルの応用開発が進められているが、劣化や欠陥、常電導転移時のコイル保護技術は確立されていない。先行研究では、コイルの両端の開放で外部保護抵抗を接続しない場合、層間接触抵抗で蓄積エネルギーを消費でき、コイル全体で発熱を分担できる可能性が示された[1]。しかし、実際のコイルでは層間接触不良領域が存在し、転流できず、局所的な発熱の可能性がある。本研究では無絶縁 REBCO コイルを対象として、外部保護抵抗を接続せず、層間接触不良領域がある場合の熱的振る舞いを数値解析・評価した。本発表ではその結果を報告する。

### 2. 解析方法

解析は、PEEC(部分要素等価回路)モデルによる電流分布解析と、二次元有限要素法による熱解析を組合わせたモデルを用いた[1][2]。コイルの諸元を Table 1 に示す。対象のコイルの口径は 1000mm、ターン数は 60、層間接触抵抗を  $2.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$  とし、冷凍機による伝導冷却(30K)を想定した。以下の 3 つの場合について解析を行った。

- Case(a): NI コイルに層間接触不良領域と劣化がない場合
- Case(b): NI コイルの中間層(30 ターン目)に半周分の層間接触不良領域がある場合
- Case(c): NI コイルの中間層(30 ターン目)に 1/8 周分の劣化がある場合

Table 1 Parameter and values

Parameters	Values
<b>REBCO conductor</b>	
Overall width[mm]	4.0
Copper stabilizer thickness[ $\mu\text{m}/\text{side}$ ]	20
Tape $I_c@77\text{K}$ , self-field[A]	115
<b>Coil</b>	
Inner diameter[mm]	1000
Turn-to-turn contact resistance[ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	$2.00 \times 10^{-3}$
Number of Turns	60
$I_{op}$ [A]	300
Cooling condition	Conduction Cooling(30K)

### 3. 解析結果

例として、層間接触不良領域のある Case(b)の径方向電流  $I_r$  の時間変化を Fig.1 に、発熱の時間変化を Fig.2 に示す。Fig.1, Fig.2 より、層間接触不良領域がある場合でも、径方向電流  $I_r$  は不良領域のない場合とほぼ同様に減少し、発熱もコイル内の転流による発熱  $Q_{pass}$  が支配的で、時間とともに減少した。また、Case(a)~(c)の最大温度の時間変化を Fig.3 に表す。Fig.3 より、層間接触不良領域、劣化の有無にかかわらず、最大温度の差は大きくない。つまり、どの場合でもコイル全体で発熱を分担している。これは、NI コイルには電流ループが無数にあり、互いが磁気的な影響を及ぼしながら電流が減少したためだと考えられる。

以上より今回の対象コイルにおいては、層間接触不良領域、劣化が存在する場合でも、層間接触抵抗で蓄積エネルギーを消費でき、コイル全体で発熱を分担できる可能性が示された。

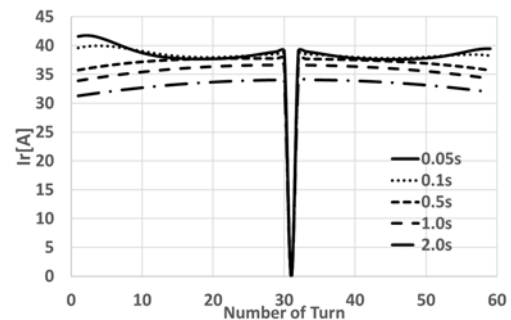


Fig.1 Radial current  $I_r$ [case(b)]

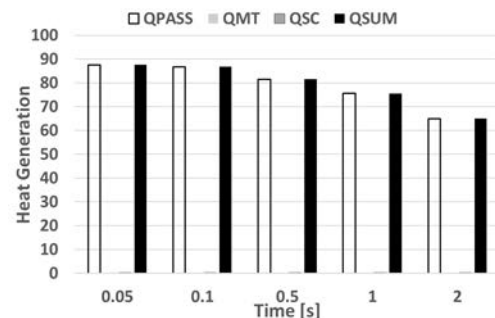


Fig.2 Heat generation[case(b)]

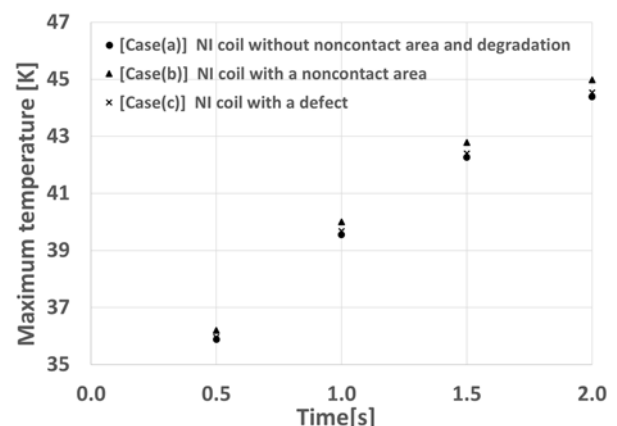


Fig.3 Maximum temperature

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 B(22H01478)に依ったことを付記する。

### 参考文献

- [1] T.Oki, et al.: IEEE Trans. on Applied Supercond., 26, 4, (2016) 4702905
- [2] T.Wang, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 25 (2015) 7010920

# ピックアップコイルを用いた無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける局所劣化の監視技術

## Monitoring Technology for Local Degradation in No-Insulation REBCO Pancake Coils Using Pickup Coils

大石 崇史, 石山 敦士(早大)

OISHI Takashi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)

E-mail: bixtukuristone@ruri.waseda.jp

### 1. はじめに

無絶縁巻線コイル (NI コイル) における劣化のモニタリング技術を開発している。従来の両端電圧に加えピックアップコイルによる監視法を検討しているが、先行研究により、ピックアップコイルでは両端電圧に比べ高感度かつ高速に劣化を検知できる可能性が示唆された[1]。今回はピックアップコイルに焦点を当て、ピックアップコイルの電圧波形による劣化位置の推定可能性について検討したので報告する。

### 2. 解析手法・解析条件

解析手法には先行研究と同様、PEEC による電流分布解析と FEM による熱解析の連成モデル[2]に加え、ビオ・サバールの法則を用いた内部磁場計算プログラムを用いた。

内径 60mm の 50 ターン巻シングルパンケーキコイルに z 方向磁場 10T を加え、伝導冷却により温度を 30K に保つと仮定した。通電電流は 395A (負荷率 70%) で一定とし、線材間の層間電気抵抗率は  $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  である。先行研究では劣化箇所をコイル 10 ターン目のみと仮定しているが、今回はそれに加え 20, 30, 40 ターン目に劣化が生じた場合も検討した。ピックアップコイルはコイル内部または外部にコイルと同一平面上に設置したもの (Fig.1(a),(b)), コイル巻線部直上に設置したもの (Fig.1(c)) の 3 種類について検討した。

### 3. 解析結果

Fig.1(a), (b), (c) のピックアップコイルによる結果を Fig.2, Fig.3, Fig.4 にそれぞれ示した。横軸は時刻、縦軸は電圧である。Fig.2 では、劣化部がコイル中心から遠ざかるにつれて電圧のピーク値が小さくなり、ピークを示す時刻も遅くなっている。このことを利用すればピックアップコイルを用いて劣化箇所を特定できる可能性があるが、劣化箇所によっては立ち上がる電圧が低いために劣化を検知できない恐れもある。

一方で Fig.3 では劣化部が外側であるほど電圧が高い。このことから、Fig.1(a), (b) のピックアップコイルを併用することで位置に関わらず劣化を検知できることが期待できる。

Fig.4 によれば Fig.1(c) のピックアップコイルを用いた場合、パンケーキの内側に近い劣化は負のピックアップコイル電圧を、外側に近い劣化は正のピックアップコイル電圧を誘導する。電圧の絶対値は Fig.2 や Fig.3 と比べて低いものの、電圧の符号のみで劣化位置を推定できる可能性が示された。

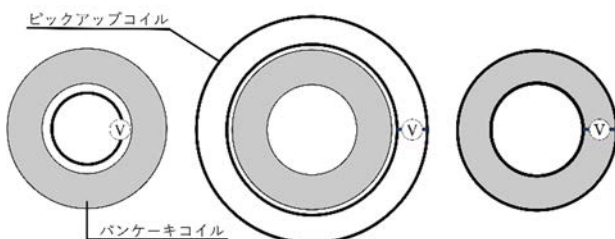


Fig.1 Single pancake coil with pickup coil. (a) Pickup coil inside pancake; (b) Pickup coil outside pancake; (c) Pickup coil above pancake.

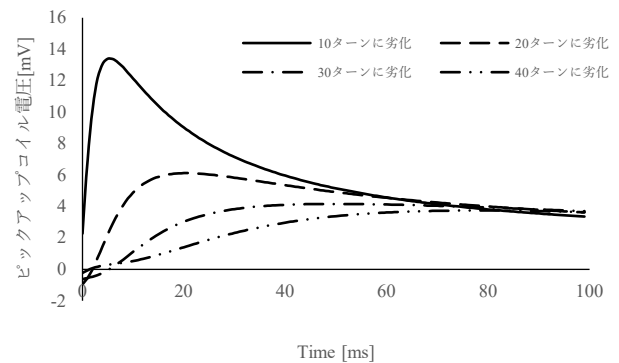


Fig.2 Pickup coil voltage immediately after degradation under constant current in case of Fig.1(a)

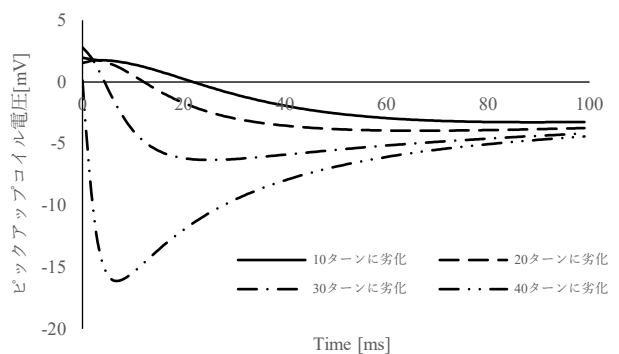


Fig.3 Pickup coil voltage immediately after degradation under constant current in case of Fig.1(b)

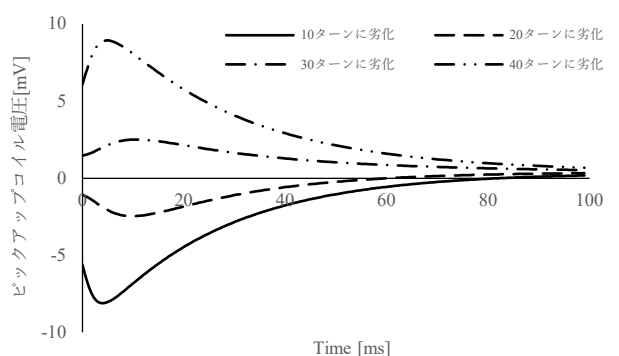


Fig.3 Pickup coil voltage immediately after degradation under constant current in case of Fig.1(c)

### 参考文献

1. T. Oishi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.47
2. T.Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 27, no. 4(2017), Art. no. 0601206

「スケルトン・サイクロトロン」REBCO コイルシステムの開発(2023 年秋):  
 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの励磁特性試験  
 Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2023):  
 Excitation characteristics tests of 1/2 scale demonstration REBCO coil system

折原 菜月, 熊谷 塁, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大);植田 浩史(岡山大);渡部 智則(中部電力);吉田 潤(住重);  
 福田 光宏(阪大)

ORIHARA Natsuki, KUMAGAI Rui, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); NOGUCHI So (Hokkaido University); UEDA Hiroshi (Okayama University); WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Grid Co.,Inc.); YOSHIDA Jun(Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);  
 HUKUDA Mitsuhiro(Osaka University)  
 E-mail: no\_n2k10@akane.waseda.jp

## 1. はじめに

我々は、進行がんへの効果が期待されている $\alpha$ 線核医学治療に用いる $\alpha$ 線放出 RI( $^{211}\text{At}$ )を安定して製造できる超小型かつ高強度な加速器として、高温超伝導スケルトン・サイクロトロン(HTS-SC)を提案した[1]。そして HTS-SC を実現させるため、5-High 基盤技術(高磁場化・小型化、高磁場精度化、高機械強度化、高熱的安定化、高電流密度化)を統合した革新的な超伝導コイル化技術の開発に取り組んできた。本研究では、物理的挙動を評価することを目的とし、1/2 スケール小型実証モデル「Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron (UBSC) 用無絶縁 REBCO コイルシステム」を設計[2]・製作した(Fig.1)。このシステムには、高機械強度化を可能とする YOROI コイル補強構造[3]と高熱的安定化と高電流密度化の両立を可能とする無絶縁(NI)コイル巻線技術[4]を適用している。

## 2. UBSC 用無絶縁 REBCO コイルシステムの励磁試験

製作した UBSC 用無絶縁 REBCO コイルシステム(Fig.1)に、測定系として、温度計(34 か所)、電圧タップ(26 対)、ホール素子(18 か所)、ひずみ計(80 か所)を設置した。Fig.1 における M は主コイル、C はセンターコイル、S はセクターコイル、U は上側コイルを表している。図に示していないが下側コイルは L と表記する。本研究では、30K(全コイル内の温度差は $\pm 1\text{K}$ 以内に温調)伝導冷却下で励磁試験を行っている。今回は、励磁速度  $0.083\text{A/s}$  で  $160\text{A}$ (設計定格電流: $540\text{A}$ )までの励磁試験を実施したので報告する。

### 2-1. コイル両端電圧の時間変化

台形状に励磁し、上段コイルシステムのFig.1の測定か所における各両端電圧の測定結果をFig.2に示す。無絶縁コイルであるため、電流変化時にコイル径方向にも電流が流れる。また、電流を一定にしたあとしばらく径方向電流が残るため、「励磁遅れ」が観測された。

### 2-2. 粒子加速面の磁場分布の時間変化

台形状に励磁し、Fig.3の位置に設置された粒子加速面回転板上のホール素子で測定された磁場分布の時間変化をFig.4に示す。両端電圧波形と同様に、無絶縁コイル特有の「励磁遅れ」が発生している。

以上の結果と $0.07\text{A/s}$ で $160\text{A}$ まで階段状に励磁した際の電圧・磁場波形を比較して当日報告する。

本研究の一部は、科研費基盤研究S(18H05244)および基盤研究B(22H01478)に依ったことを付記する。

## 参考文献

1. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.29, No.5, 4101105 (2019)
2. T. Ogata, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.31, No.5, 4400105 (2021)
3. T. Watanabe et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, No.3, 8400204 (2015)
4. S. Hahn et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.21, No.3, pp.1592-1595 (2011)

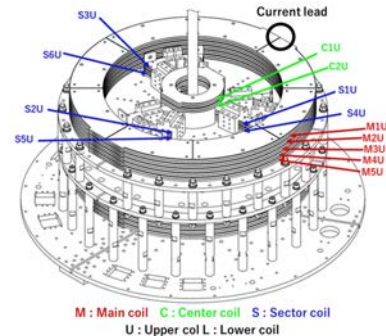


Fig.1 NI-REBCO Coil System for UBSC

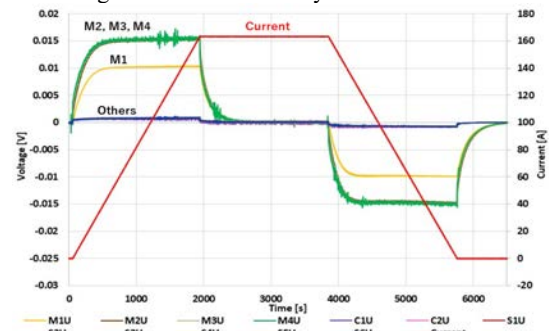


Fig.2 Voltage of the upper coils

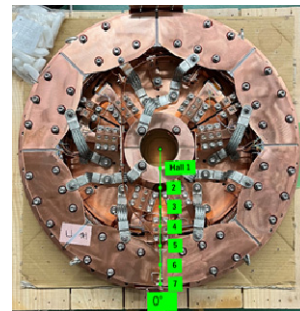


Fig.3 Position of Hall probes

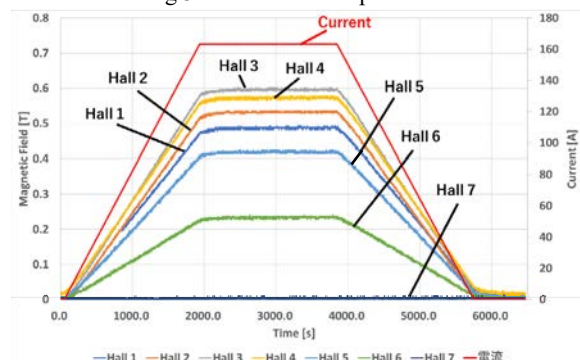


Fig.4 Magnetic field on beam acceleration plane



# 液体水素浸漬冷却高温超電導コイルの過通電試験

## Over current testing of high temperature superconducting coil with liquid hydrogen immersion cooling

中西 啓太, 大屋 正義(関学); 松本 郁哉, 白井 康之(京大); 今川 信作(NIFS); 小林 弘明(JAXA)  
 NAKANISHI Keita, OHYA Masayoshi (Kwansei Gakuin Univ.); MATSUMOTO Fumiya, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.);  
 IMAGAWA Shinsaku (NIFS); KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)  
 E-mail: hbl06325@kwansei.ac.jp

### 1. はじめに

液体水素社会構築に向けて、液体水素の冷熱を高温超電導機器の冷却に活用することを検討している[1, 2]。しかしながら、液体水素の防爆の問題から、液体水素を冷媒とした高温超電導コイルの研究開発は不十分であり、外部磁場下における高温超電導コイルの冷却安定性の解明が必要不可欠である。そこで、液体水素浸漬冷却下・外部磁場下で様々な高温超電導コイルの通電試験を行うため、REBCO 外部磁場コイルを設計・製作した。本報では、外部磁場コイルの液体水素浸漬冷却下における通電試験結果について報告する。

### 2. 試験設備

JAXA 能代ロケット試験場に整備した液体水素冷却通電試験装置を用いて通電試験を実施した。本試験装置は、容量 50 L のメインタンク、50 L のサブタンクで構成されており、メインタンクには電流容量 500 A の電流リードが 4 本備わっている。実験条件として、圧力は大気圧 $\sim$ 2 MPaG、温度は 20 $\sim$ 32 K が設定可能である。

### 3. REBCO 外部磁場コイル

試験コイルに外部磁場を印加するため、図 1 に示す外部磁場コイルを製作した。使用線材は臨界電流値 120 A@(77.3 K、線材幅 4 mm、線材厚 0.1mm、基板厚 50  $\mu$ m、銀厚 5.2  $\mu$ m、銅メッキ厚 20  $\mu$ m)である。内径 130 mm、外径 206 mm、約 220 ターンのダブルパンケーキコイルをステンレス製のケースに挿入して補強した。上部 2 組と下部 2 組のダブルパンケーキコイルの通電方向が逆向きになるように電流リードを接続した。ホール素子は中心空間(24 mm)の半径 90 mm の位置に取り付けた。図 2 に示すように、本位置において、150 A 通電時に 1.6 T の磁場が発生する設計である。

### 4. 外部磁場印試験

30 K、0.85 MPaG の液体水素中において、スイープ速度 0.2 A/s で外部磁場コイルに 150 A まで通電を実施した結果を図 3 に示す。150 A ホールド時に電圧の発生は確認されなかった。図 4 に示すように、150 A 通電時に設計通り 1.6 T の磁場発生を確認し、外部磁場コイルの励磁試験を完了した。本外部磁場コイルを用いることで、液体水素浸漬冷却下において、最大 1.6 T の外部磁場を印加した状態で様々な試験コイルの通電試験が可能となった。

当日は、外部磁場コイルの中心空間に設置した試験コイルの外部磁場下における通電結果についても報告する。

### 謝辞

本成果は、核融合科学研究所の LDH 共同研究(NIFS20K0BA032)の結果得られたものです。

### 参考文献

1. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104 (2022) 1A-p02
2. Y Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol 55, no. 1 (2020) pp. 44-52

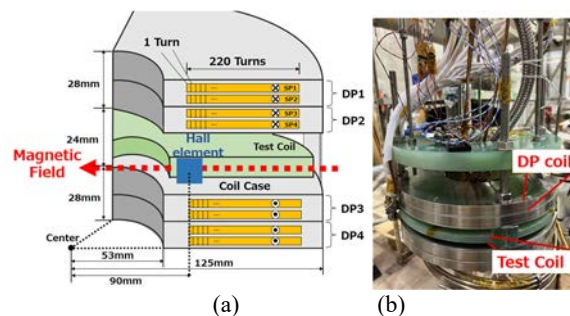


Fig.1 (a) Cross section of the REBCO field coil, (b) Overall view of the REBCO field coil.

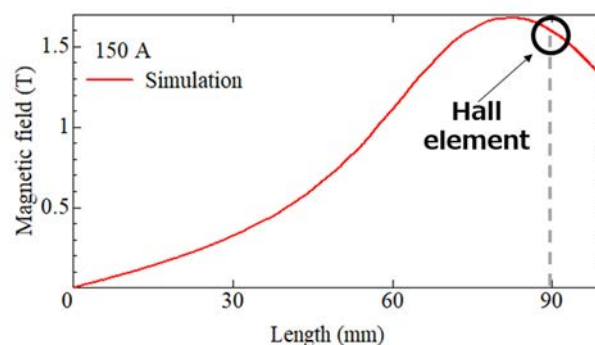


Fig.2 Simulated magnetic flux density of the REBCO field coil at 150 A.

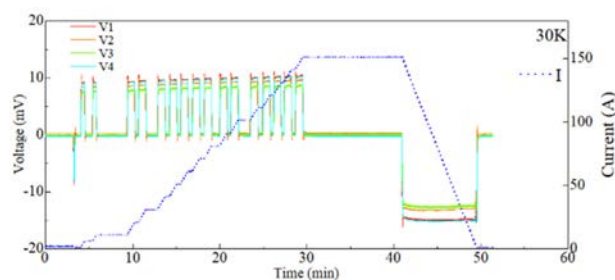


Fig.3 Measured voltage and current of the REBCO field coil in liquid hydrogen.

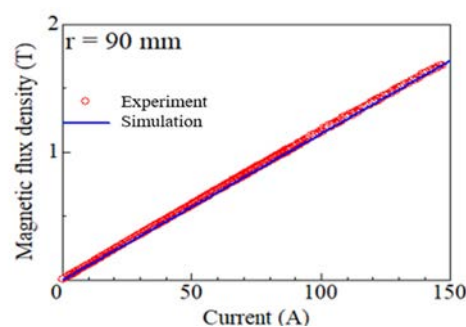


Fig.4 Measured and simulated magnetic flux density of the REBCO field coil in liquid hydrogen.

# レーストラック型無絶縁 HTS コイルの通電特性の基礎検討

## Basic Investigation of Transport Characteristics of No-insulation HTS Racetrack Coil

栗賀 勇輔, 藤田 悠斗, 高桑 天通希, 小川 純, 福井 聡 (新潟大学)

KURIGA Yusuke, FUJITA Yuto, TAKAKUWA Tetsuki, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi (Niigata University)

E-mail: f22c062k@mail.cc.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

NI コイルは、高電流密度化・高熱的安定化・保護容易性を同時に満足するコイル設計が期待できることから、種々のマグネットへの応用のための研究が活発に行われている。我々はこれまでに、NI コイルを用いた実用規模のアルミビレット誘導加熱装置用マグネットの開発や NI コイルを回転機の界磁巻線に適用するための研究を行ってきている。本研究では、NI コイルを一般産業機器用のマグネットへ適用することを踏まえ、直線部のある非円形の HTS-NI コイルの基礎的な研究を行うことを目的としている。本稿では、レーストラック型の NI コイルの等価回路モデルを構築し、局所的常伝導転移発生時の電磁現象を解析するとともに、小型の試験コイルを用いてヒータクエンチ試験を行い、通電特性を実験的に評価した結果を報告する。

### 2. 解析方法

レーストラック型 NI コイルの等価回路を Fig.1 に示す。

電流分布は、各閉ループの電圧則、各節点における電流則を連立して求める。温度分布は、各回路要素間の熱伝導方程式を解くことにより求める。なお、特定の回路要素に熱擾乱項を加えることによりヒータクエンチを模擬する。

### 3. 測定方法

測定用コイルとして、4mm 幅の YBCO 線材を 10 ターン巻いた小型レーストラック型 NI コイルを作製した。使用した線材の臨界電流は 107 A(@sf, 77 K)である。測定用コイルの寸法を Fig. 2 に示す。図に示すように、R 部分の 4-5 ターン間にヒータを設置し、隣接線材部分に熱電対を取付けて温度分布を測定できるようにした。実験では、電源電流を直線掃引し、十分に時間が経過した後に、ヒータにパルス電流を通電して、線材の温度変化などを測定した。

### 4. 測定・解析結果

Fig. 3 に、通電電流 90 A、ヒータパルス 6.2 W のときのヒータ近傍の各ターンの温度分布の測定結果、また、Fig. 4 には、測定条件に対応した温度及び電流分布の解析結果を示す。ヒータ入熱中の  $t = 1 - 3$  s において、温度変化は実験・解析ともに概ね同様の波形になっていることから、実験・解析ともにリズナブルな結果と考えられる。また、Fig. 4(c) に示す  $t = 3$  s での 3-6 ターンの全回路要素の線材方向電流分布の変化から、90 A という  $I_c$  に近い電流領域でも、ヒータ近傍の R 部分における電流転流のみになっているがわかるが、これはコイルの自己インダクタンスが小さいためである。通電電流及びヒータ入熱時間を変化させた場合の結果は当日報告する。今後は、直線部分にヒータを設置した場合の測定を進める。

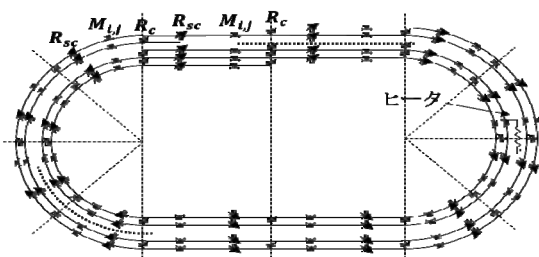


Fig. 1 Equivalent circuit model of NI racetrack coil.

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号 22H01464)により実施した。

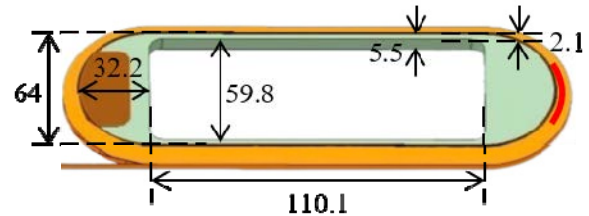


Fig. 2 Schematic illustration of measurement coil.

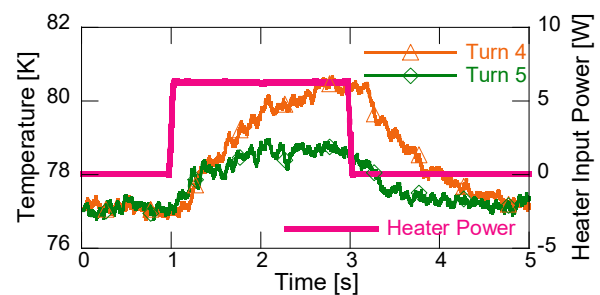


Fig. 3 Measured wire temperatures adjacent to heater.

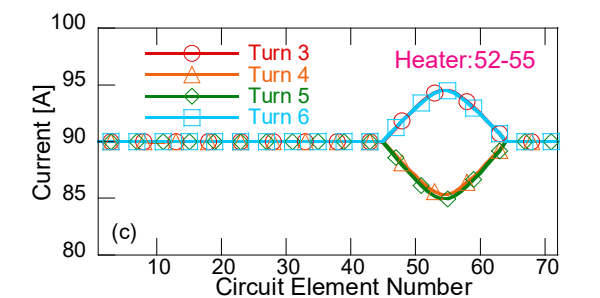
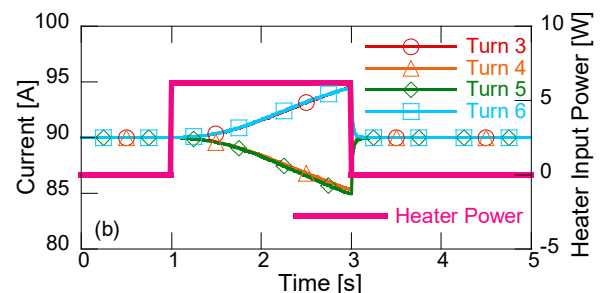
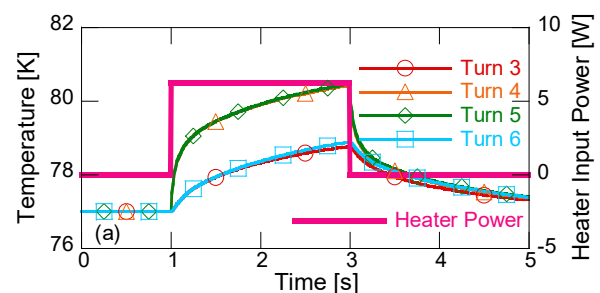


Fig. 4 Calculated temperature and current distribution.

## トロイダル型消磁コイルが作る漏洩磁界の数値解析

## Numerical analysis of leakage magnetic fields generated by toroidal shaking coils

白石 和輝, 加納 佳祐, 柁川 一弘(山理大)

SHIRAISHI Kazuki, KANO Keisuke, KAJIKAWA Kazuhiro (Sanyo-Onoda City Univ.)

E-mail: fl22610@ed.socu.ac.jp

## 1. はじめに

MRI 装置用超電導マグネットには高い磁界均一度が必要であり、現在低温超電導(LTS)多芯線が用いられている。一方、希土類系高温超電導(HTS)線はテープ形状であるために幅広面に遮蔽電流が誘起されて垂直方向に大きく磁化し、それを巻いたコイルは遮蔽電流が作る磁界(遮蔽電流磁界)により磁界均一度が著しく低下する。そこで、異常横磁界効果により遮蔽電流磁界を低減する方法が提案されている[1,2]。また、消磁用の銅コイルを同軸配置、あるいはトロイダル配置し、微小な交流磁界を HTS コイルに印加することにより、遮蔽電流磁界を低減可能であることも実証されている[1-3]。本研究では、トロイダル型消磁コイルの巻線精度が与える漏洩磁界への影響を数値解析し、MRI 装置内の他の要素コイルに与える磁気的影響を評価した。

## 2. 漏洩磁界の評価方法

トロイダルコイルを構成する 1 ターンを 4 つの線分をもつ四角形として近似し、有限の長さをもつ複数の直線電流が作る磁界を重ね合わせることで、隙間やずれが生じたトロイダルコイルの発生磁界を数値解析することができる。このとき線分上もしくは、その延長線上の磁界は計算結果が発散するため解析することはできない。

## 3. 解析モデル

モデル化したトロイダルコイルの概略図を Fig. 1 に示す。すべてのモデルにおいて、内径 50 mm、外径 100 mm、高さ 50 mm、ターン数 360、通電電流 30 A とし、隙間やずれが生じる本数の最小単位を 2 本とした。ここで、Fig. 1(a)のように 360 ターン均一に巻線されたものをモデル A、Fig. 1(b)のように隙間が生じたものをモデル B( $P$ )[360+ $n$ ]- $n$  とした。[]内の数値は隙間を形成する前の周方向に均等配置するターン数、 $P$ は一箇所あたり抜き出す巻線の本数、 $n$  は抜き出した巻線の総数を表している。例えば、Fig. 1(b)のように 368 ターンの均等配置されたトロイダルコイルから一箇所あたり 2 本の巻線が抜け、計 4 箇所 8 本の隙間が生じたモデルを B(2)[360+8]-8 と表す。また、Fig. 1(c)のように巻線にずれが生じたものをモデル C( $P$ )[(360)- $n$ ]+ $n$  とした。ここで、 $P$ 、[]内の数値はモデル B と同様の意味を表しているが、 $n$  はモデル B の場合と異なり、ずれた巻線の総数を表している。 $k$  番目のターンにずれが生まれ、隣接する  $k+1$  番目のターン上に重なることで等価的に  $k$  番目の電流値は 0 A となり、隣接した  $k+1$  番目の電流値が 60 A となった状態を想定している。例えば、C(2)[(360)-8]+8 は 360 ターン均等配置したトロイダルコイルから 1 箇所あたり 2 本、計 4 箇所 8 本の巻線がずれているものとする。

## 4. 数値解析結果

モデル B における漏洩磁界を数値解析した結果を Fig. 2 に示す。ここで横軸はトロイダルコイルの外側面を基準とする  $x$  軸正の方向の距離、縦軸は漏洩磁界の  $y$  成分を表している。また、 $x$  軸正の方向に最も漏洩磁界が大きくなるよう隙間を形成した。数値解析結果から、隙間箇所には偏りのあるほど漏れが大きく、満遍なく隙間が存在するほど漏れが小さくなること分かった。同様にモデル C における漏洩磁界を数値解析

した結果を Fig. 3 に示す。モデル B と同じく複数箇所になずれが生じるほど漏洩磁界は小さくなること分かる。

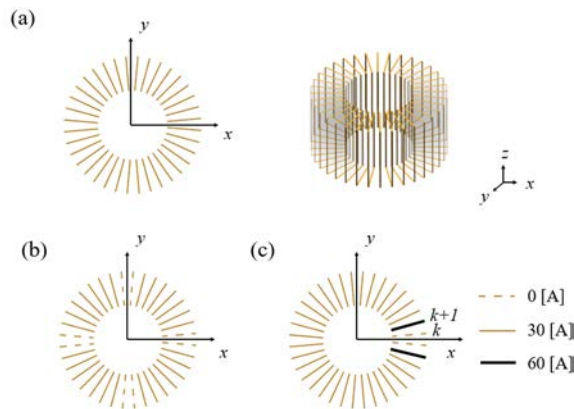


Fig. 1 Toroidal coils for (a) model A, (b) B and (c) C.

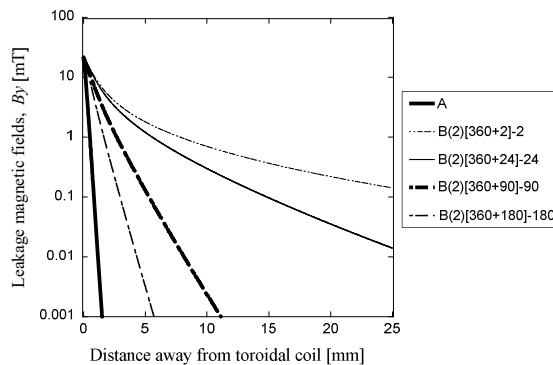


Fig. 2 Numerical results of leakage magnetic fields in model B.

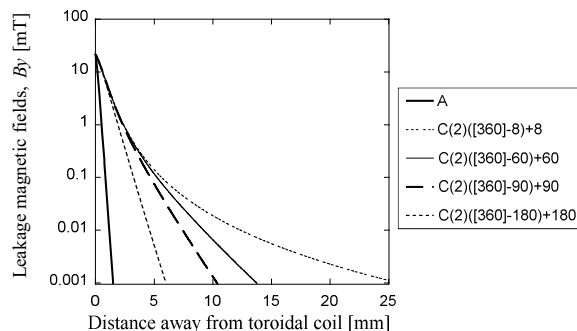


Fig. 3 Numerical results of leakage magnetic fields in model C.

## 参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 125005
2. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 22 (2012) 4400404
3. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 4400504

# 高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイル用小型巻線機の連続巻モジュールの開発

## Development of Continuous Winding Module for Small-Scale Coiling Machine for High Temperature Superconducting Force-balanced Helical Coils

橋本 博正, 許 航, 野村 新一 (明治大学); 仁田 且三 (東京大学); 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS)  
 Hiromasa Hashimoto, Hang Xu, Shinichi Nomura (Meiji University); Tanzo Nitta (The University of Tokyo);  
 Takakazu Shintomi (KEK); Naoki Hirano (NIFS)  
 E-mail: ee201044@meiji.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では、REBCO 線材を用いた電磁力平衡ヘリカルコイル (FBC) の製作実現性を検討するために、図 1 に示すトロイダル半径 120 mm、ポロイダル半径 30 mm の 1 T 級モデルコイル用小型巻線機開発を進めている。FBC は電磁力を大幅に低減させ、コイルの軽量化が期待されるコイルである。これまで、REBCO 線材収納ボビンと巻線ヘッドを一体化した試作機を開発し、巻線機のゼロ点ならびに巻線位置の検出と補正制御に成功している[1]。しかし、目標としている 13 層巻線の連続巻きについて十分な対応ができていない。本稿では、その問題点を解決するため連続巻に対応した線材収納ボビンと巻線ヘッドの改良状況について報告する。

### 2. 開発中の小型巻線機

図 2 は REBCO 線材に適応した FBC の小型巻線機の外観写真図である。REBCO 線材によるヘリカルコイル巻線には、トロイダル角  $\phi$ 、ヨー角  $\beta$ 、ピッチ角  $\gamma$ 、そしてロール角  $\alpha$  の 4 方向回転角の同時制御が可能な機構が要求される。したがって、この巻線機は 4 つの回転軸を設け、それぞれの回転軸の駆動にはステッピングモータを用いている。4 軸回転制御としては、各制御角 ( $\phi$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ) はポロイダル角  $\theta$  の関数で与えられるため、このポロイダル角を基準として各制御角のステッピングモータにパルス間隔を変調させて送信し、各制御角の回転速度を変調することで正規の動作を実現している。

### 3. 連続巻線モジュールの開発

これまで REBCO 線材収納ボビンと巻線ヘッドを一体化した試作機でテープ状の高温超電導線材を模擬した 5 mm 幅のステンレス線を用いて試験巻線作業を実施した。しかし、線材収納ボビン半径とコイルのポロイダル半径の違いによって線材が巻線ヘッドから供給される際に線材は徐々に巻線機の内側に向かって収縮し始める。この収縮により、線材は線材収納ボビン内壁にゼンマイばねのように押し当てられてしまい連続巻線が困難であった。そこで、連続巻線を実現するため REBCO 線材収納ボビンと巻線ヘッドを分離して改良を加え、巻線位置に応じて必要な分だけの REBCO 線材を収納ボビンから巻線ヘッドへ供給できるような連続巻線モジュール設計を行った。

図 3 は REBCO 線材収納ボビンと巻線ヘッドを分離した試作ボビンの概略図である。REBCO 線材収納ボビン(A)の上にあるレールは巻線ボビン(B)に固定されたローラーに接触しており、収納ボビンが巻線ボビンに対して自由に回転できるようになっている。これにより、巻線位置に応じて必要な分だけの REBCO 線材を収納ボビンから巻線ヘッドに供給することができる。REBCO 線材に曲げひずみを加えないように線材収納ボビンから巻線ヘッドまでの線材供給経路を螺旋状に設計している。REBCO 線材収納ボビンと巻線ヘッドを分離させた試作機で 5 mm 幅のステンレス線を用いて円柱状のボビンに単純ソレノイド巻を実施した。その結果、線材収納ボビンにステンレス線が引っかかることなく連続巻線が可能に

なることが確認された。当日は、小型巻線機に連続巻線モジュールを組み込み FBC の試験巻線を報告する。

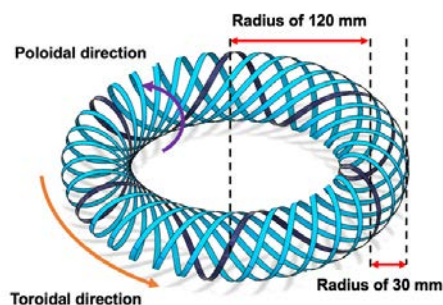


Fig. 1 Superconducting force-balanced helical coil.

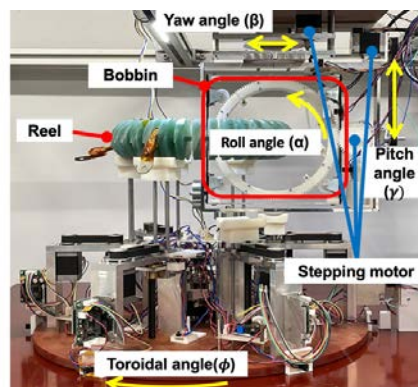


Fig. 2 Small-scale coiling machine for high temperature superconducting force-balanced helical coils.

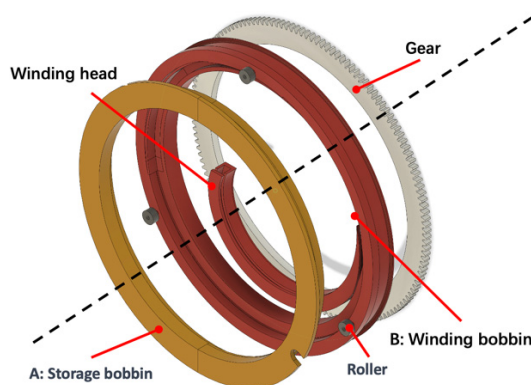


Fig. 3 Schematic illustration of a REBCO wire storage bobbin (A) separated from a winding head (B).

### 4. 参考文献

- [1] Hoshina et al.: in Proc. 2023 Annual Meeting IEEJ, pp. 253-254.

## 超電導ケーブルの鉄道き電線への適合試験

### Compatibility test of superconducting cable for railway feeder

福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研)

Fukumoto Yusuke, Ishihara Atsushi, Akasaka Tomoyuki, Onji Taiki, Tomita Masaru (RTRI)

E-mail: fukumoto.yusuke.68@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

直流電気鉄道では、車両運転に必要な電力を 1500 V、750 V、600 V といった電圧で送電するため、電流は数 kA と大電流となり、都市圏の過密線区では特にその傾向が顕著である。そのため、送電回路における電圧降下や、これに伴う送電損失が大きくなるという課題を有する。これらの課題は、電気抵抗ゼロで送電が可能な超電導ケーブルを適用することで、大きく改善できる[1]。電圧降下を抑制することで変電所の集約化や変電所間の負荷平準化、回生電力の利用効率向上といった効果が期待され、特に変電所が削減できれば、その保守管理も含めて廃止できることから、設備削減の効果が大きい。

超電導ケーブルを直流電気鉄道のき電線へ適用した際には、短絡故障などによる過電流が印加される可能性がある。これにより絶縁破壊や焼損、性能劣化が生じてはならず、銅保護層が設計されている[2]。しかしながら、実際に超電導き電ケーブルを用いた確認試験はこれまでに実施されていない。本発表では、短尺サンプルを用いて、鉄道故障を模擬した短絡電流通電試験を実施したので報告する。

#### 2. 短絡電流通電試験

超電導き電システムと既設設備との接続には保護のため直流高速度遮断器を介する。遮断器の性能上、直流遮断の限度は推定短絡電流: 50 kA、実遮断電流: 25 kA、突進率:  $3 \times 10^6$  A/s と定められている。よって、実遮断電流 25 kA 以上を目標として超電導き電ケーブルの短絡電流通電試験を実施し、超電導および絶縁の性能について確認した。

整流器で直流 1500 V に整流した電力を、直流高速度遮断器、抵抗および空心リアクトルを介して 2.7 m 程度の超電導き電ケーブルサンプルに通電した(図 1)。抵抗とリアクトルにより短絡電流値および突進率を調整し、短絡電流は直流高速度遮断器により遮断した。なお、超電導き電ケーブルは、液体窒素により浸漬冷却した。短絡電流通電中は、実通電電流値を測定し、短絡電流通電後に、超電導き電ケーブルの臨界電流測定および絶縁抵抗測定(メガチェック)を実施し、超電導および絶縁性能を比較した。

短絡電流通電試験の結果、超電導き電ケーブルに通電された最大電流値は 27.94 kA であった(図 2)。短絡電流通電前後で超電導き電ケーブルの絶縁抵抗および臨界電流値に変化がない(図 3)ことから、短絡電流通電による発熱、およびそれに伴う電磁力による性能の低下はないといえる。

#### 4. まとめ

超電導き電ケーブルを鉄道システムへ導入した際の短絡故障等による過電流への対応を確認するため、短尺サンプルに対し短絡電流通電試験を実施し、最大 27.94 kA の短絡電流を通電した。その結果、絶縁抵抗や超電導特性の低下がみられなかったことから、鉄道環境にて想定される異常状態に耐えられる見通しを得た。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「未来社会創造事業(JPMJMI17A2)」の助成を受けて実施した。

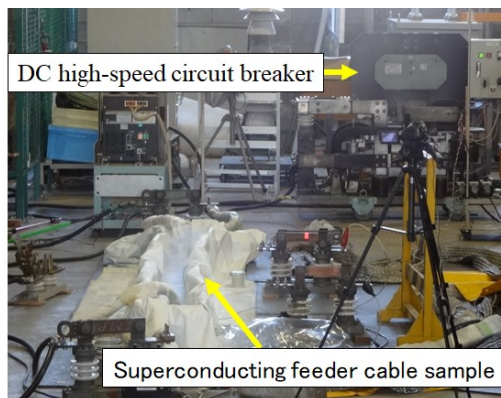


Fig.1 Short circuit current test

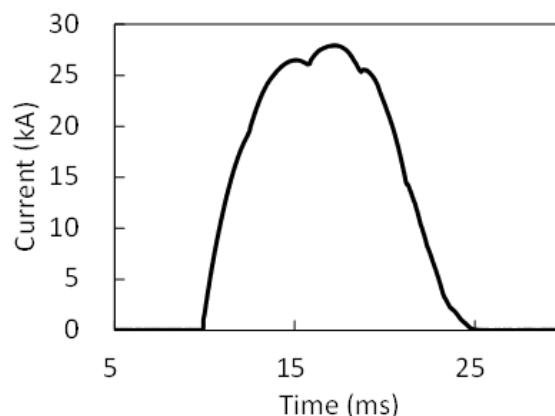


Fig.2 Short circuit current waveform

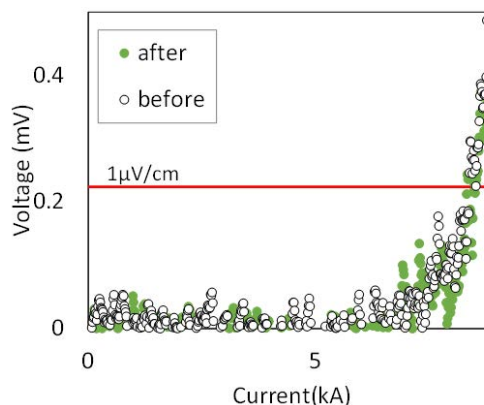


Fig.3  $I$ - $V$  characteristics before and after applying short-circuit current

#### 参考文献

- Masaru Tomita, *et al.*: Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission, *Energy*, 122, pp.579-587, 2017
- M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, A. Ishihara, M. Miryala: Abstracts of CSJ Conference, VVol83 (2010) p.138

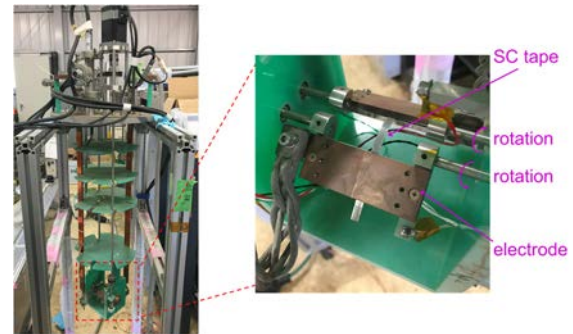
## 超電導き電ケーブルに向けた線材接合手法の実験的評価

### Experimental evaluation of tape joint technologies for superconducting feeder cables

石原 篤, 恩地 太紀, 赤坂 友幸, 山本 春海, 矢野 俊, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研)  
 ISHIHARA Atsushi, ONJI Taiki, AKASAKA Tomoyuki, YAMAMOTO Haruumi,  
 YANO Suguru, FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)  
 E-mail: ishiharai.atsushi.70@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

超電導ケーブルを鉄道き電線などへ適用すると、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化、電圧低下抑制による変電所の集約化などが期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、超電導き電ケーブルの開発を進めている[1-3]。本講演では、超電導き電ケーブルの長距離化を目的として開発を進めている接合技術について、実験により確認をしたので報告する。



#### 2. 液体窒素浸漬中連続曲げ試験装置の開発

鉄道現場での施工した線材接続部については、室温の引張・曲げ張力は印加されず、運用時の液体窒素温度における電氣的・機能的特性が極めて重要となる。そこで曲げ特性を液体窒素中で連続的に評価する装置として、Goldacker 型曲げ試験装置を開発した(図 1)。さらに高温超電導マグネットとの組み合わせで最大 0.1 T の垂直磁場が、低温超電導マグネットの組み合わせで最大 5.5 T 垂直磁場が印加できるようになっている。

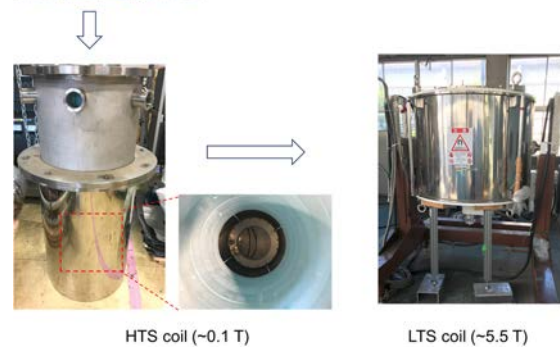


Fig.1 Continuous bending apparatus under liquid nitrogen

#### 3. 液体窒素浸漬中連続曲げ試験

Bi 系超電導線材 (Type HT-CA) を用い、低融点合金により接合長 20 mm にてラップ接合を行った試料に対し、直線から連続的に曲げ歪みを印加した。図 2 に線材の  $I_c$  の曲げ直径依存性をまとめた図を示す。 $I_c$  の 95% までの低下を許容すると、接合無しの試料は曲げ直径 40 mm まで、接合長 20 mm の試料は 75 mm まで  $I_c$  に劣化がみられなかった。当日は接合長を変化させた試料の曲げ特性や引張特性についても報告する予定である。

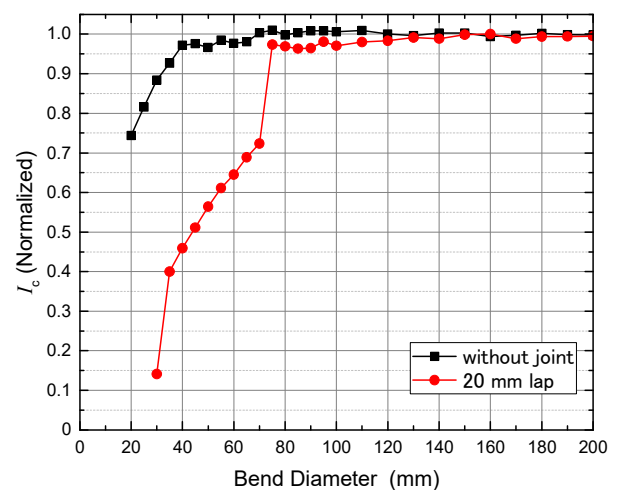


Fig. 2 Bending strain dependence of the  $I_c$  in superconducting tapes under liquid nitrogen

#### 4. 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の「未来社会創造事業 (JPMJMI17A2)」の助成を受けて実施した。

#### 参考文献

1. M. Tomita *et al.*, Development of prototype DC superconducting cable for railway system, *Physica C*, **470** S. 1007-1008 (2010).
2. M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
3. Superconductors drive trains, *Nature* **542** (2017) 275.

## 超電導き電ケーブルに向けた線材接合手法の解析評価

### Analysis evaluation of tape joint technologies for superconducting feeder cables

赤坂 友幸, 石原 篤, 恩地 太紀, 矢野 俊, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研)  
 AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, ONJI Taiki, YANO Suguru,  
 FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)  
 E-mail: akasaka.tomoyuki.65@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

超電導材料は、ゼロ抵抗による送電や磁場分野での応用など幅広い範囲で期待されている。超電導材料を鉄道き電線用にケーブル化することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下抑制による変電所の集約化が可能となる。超電導き電ケーブルの鉄道応用を目指し、我々はこれまで、ケーブルの試作や冷却、通電試験等の検証試験を行ってきた。[1-3]。

実用化に向けた課題一つに、超電導き電ケーブルの接合技術があげられる。断熱管に収納された超電導き電ケーブルを鉄道現場へ輸送するには、道路輸送の制限から 500 m 程度が限界である。そのため、数 km 間隔で設置されている変電所間への導入を想定した場合、超電導き電ケーブル同士を接合する必要があり、鉄道の営業運転に支障が出ず、鉄道現場で実施できる簡易な接合技術の構築が必要不可欠である。

本発表では長尺の超電導き電ケーブルに向け、低融点合金を用いた線材の接合条件について解析により検討したため、その結果について報告する。

#### 2. 実験方法

2 枚の超電導線材を低融点合金で接合した際の、最適な接合条件の見通しを得るため、有限要素法による電磁解析を行った。本解析では、JSOL 社製の JMAG-Designer を用いて電磁気特性シミュレーションを行った。Bi 系超電導線材を想定し、超電導線材の断面形状は、4.2 mm×0.23 mm、臨界電流値は 77 K で 180 A 級とした。図 1 に二枚の超電導線材を低融点合金で接合する形状モデルを示す。解析においては、超電導線材長を 50 mm、接合長は 3~80 mm、低融点合金の接合厚みは 50 $\mu$ m とし、モデルの左側断面から右側断面に電流を流し、線材接合部の電磁気特性を評価した。

#### 3. 実験結果

図 2 に、線材間でのラップ長を変えた電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性の解析した結果を示す。ラップ長によらず、臨界電流値がほぼ同等であることを確認した。また、 $I$ - $V$  特性の傾きから接合抵抗を評価した結果を図 2 の内挿図に示す。接合抵抗とラップ長の対数に逆比例の関係があり、ラップ長が

3 mm 以上において接合抵抗値  $10^{-7}$   $\Omega$  台、ラップ長が 20 mm 以上において接合抵抗値  $10^{-8}$   $\Omega$  台が得られるということが分かる。

当日は、低融点合金の接合厚みについて検討した結果についても報告を行う。

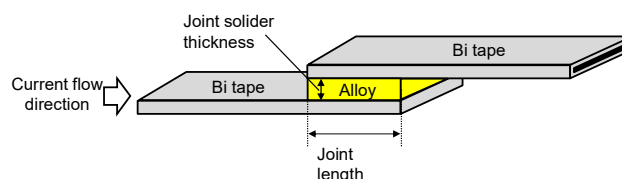


Fig. 1 Model of a joined superconducting tape

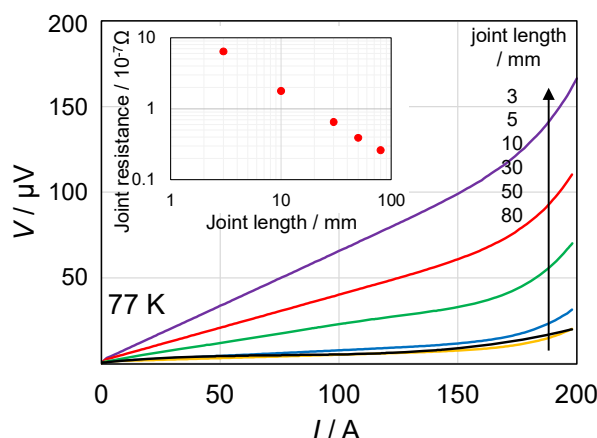


Fig. 2 Analysis results of critical current for joined superconducting tapes with various joint length

#### 3. 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の「未来社会創造事業 (JPMJMI17A2)」の助成を受けて実施した。

#### 参考文献

1. M. Tomita *et al.*, Development of prototype DC superconducting cable for railway system, *Physica C*, **470** S. 1007-1008 (2010).
2. M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
3. Superconductors drive trains, *Nature* **542** (2017) 275.

## 電磁力型海水・油分離装置における整流板の分離性能への影響

### Evaluation of the effect of rectifier plates on separation performance in MHD type seawater/oil separators

橋本 祐希, アモリン ケンジラファエル, 浅野 晃平, 白石 浩貴, 後藤 駿介, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹 (神戸大)  
 HASHIMOTO Yuki, AMORIM Kenjirafael, ASANO Kohei, SHIRAISHI Koki, GOTO Syunsuke, AKAZAWA Teruhiko,  
 IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki (Kobe Univ.)  
 E-mail: 223w522w@stu.kobe-u.ac.jp

#### 1 分離原理と目的

電磁力型海水・油分離装置の原理について説明する。海水流路に対向する一組の電極板を取り付け、海水に通電を行う。磁場を海水流れの向きに印可する。海水はローレンツ体積力( $F_L$ )を受けるが、油は不導体であるため、 $F_L$ が作用せず海水から反力を受ける。分離区間後方の流路を2つに区切ることで、浄化された海水流れAと、油が濃縮された流れBに分けることが出来る。これまでの研究から、直径1mmの不導体を用いた分離実験では、海水に印可する $F_L$ を上げていくと、分離は顕著に起こるが、 $F_L$ を大きくしても分離率は9割程度で頭打ちになることがわかっている。これは海水に印可される $F_L$ の効果により、分離空間に渦のように海水流れを乱す流れが生じていると考えられる。本研究では、この海水流れの乱れを分離空間に整流板を設置することで抑制出来るかどうかを実験的に検証した。

#### 2 実験方法

本研究では、整流板の効果を見るために分離区間電極長200mm、電極間距離28mm、電極幅28mmの正方形流路断面を持つ分離器を2つ作製した。1つの分離器は、整流板の効果を見るための比較対象として、Fig.1に示す分離空間内に整流板を設けていないもの(#1)、もう1つは、分離空間に海水流れに平行で電極板に対し直交する向きに整流板を設け分離空間の流路を分割したもの(#2)の2つの分離器を作製した。電極板に垂直な方向から見た#2の整流板の配置図をFig.2に示す。流路は、整流板により分離区間入口から50mmおきに2分割、3分割を繰り返す構造となっている。電極間に流れる電流を1A、分離器入口での平均海水流速を0.1m/sとして、磁場を変化させることで海水に作用する $F_L$ を変化させ分離器の特性を調べた。

#### 3 実験結果と考察

海水だけを分離器に流し、海水出口A、Bから排水海水量 $Q_A$ 、 $Q_B$ をそれぞれ計測した。分離器出口での海水の偏りを示す流量比 $R_W=Q_B/(Q_A+Q_B)$ を用いて評価した。Fig.3に2つの分離器における $R_W$ の磁場依存性を示す。印可磁場を増大していくと、2つの分離器共に $R_W$ が直線的に減少していることがわかる。これは磁場増大と共にA側流路の海水がB側に比べて早く流れることを意味しており、分離空間の海水に作用する $F_L$ に起因した歪んだ流れが生じていることが原因である。#1における近似直線の傾きは約-0.32/T、#2では約-0.17/Tであり、傾きに約2倍の違いがあることがわかる。整流板を設置することで、水の偏りは大きく抑制される。整流板の設置は、分離空間内に生じる歪んだ流れを抑制する効果があることが強く示唆された。次に、分離対象物としてとびこ(粒径約1.5mm)を海水に混ぜ、分離実験を行った。海水排出口A、Bから排出された卵の個数を $N_A$ 、 $N_B$ とし、分離率を $S=N_B/(N_A+N_B)$ で評価した。この結果をFig.4に示す。#1では、先行研究での結果と同様に、磁場を大きくしていくと約3テラで分離率の上昇が止まり、ほぼ一定値になる。一方、#2では、印可磁場を増大させると、分離率は磁場増大と共に単調増加し8Tまで飽和すること無く上昇し#1よりも高い分離率

94%を示した。低磁場において#2の分離率には、#1で見られた磁場増大に伴う $S$ の急激な上昇は観測されなかった。分離率の低磁場中での振る舞いは、整流板の設置が単純に海水流れの歪を抑制しているだけでないことを示している。本講演会では、分離器内部の海水流れについての数値シミュレーション結果と合わせ、この原因の考察を行う予定である。

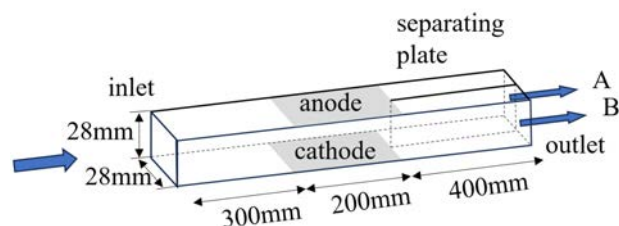


Fig.1 Schematic diagram of the separation section in the #1 seawater/oil separator.

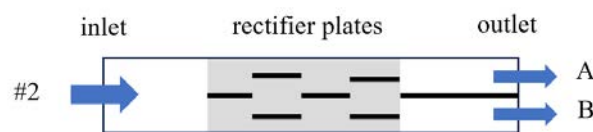


Fig.2 Plan view of the #2 separator.

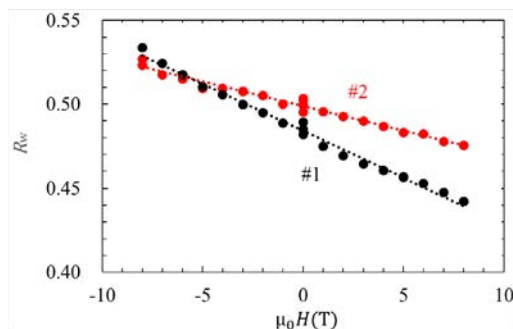


Fig.3  $\mu_0H$  dependence of  $R_W$ .

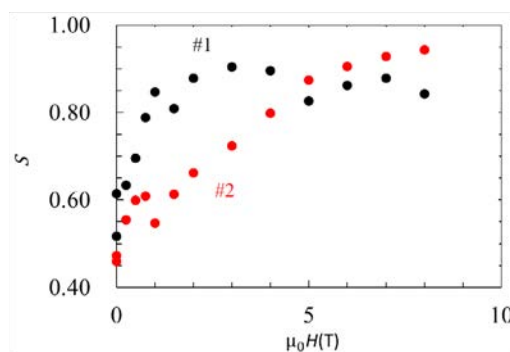


Fig.4  $\mu_0H$  dependence of  $S$ .



# SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (1): リール・トゥ・リール式ケーブル作製機による長尺実ケーブル作製を含めた 進捗概要

## Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2023 (1): Overview and long real cable fabrication using reel-to-reel cabling machine

雨宮 尚之, 曾我部 友輔, 高橋 明, 藤野 正人(京大); 手嶋 雄太, 山野 聡士(古河電工); 坂本 久樹(SuperPower Inc.)  
 AMEMIYA Naoyuki, SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, FUJINO Masato (Kyoto U.);  
 TEJIMA Yuta, YAMANO Satoshi (Furukawa Electric); SAKAMOTO Hisaki (SuperPower)  
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、低交流損失でロバストな高温超伝導集合導体である SCSC cable (double “SC” cable; Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable)の研究開発を進めている。本発表では、2023 年秋時点における進捗の概要を、リール・トゥ・リール式ケーブル作製機による実ケーブル作製と同機を用いて作製したケーブルの評価結果を中心に報告する。

### 2. リール・トゥ・リール式ケーブル作製機による実ケーブル作製と作製したケーブルの評価

現時点においては、幅 2 mm、フィラメント数 10、銅メッキ厚さ 10  $\mu\text{m}$  (片面あたり)の銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線を標準的に用いている。これまでに、総長 1.6 km 以上のこの仕様の超伝導線が作製されている。

この超伝導線を用いて、リール・トゥ・リール式ケーブル作製機にて多層 SCSC ケーブルを作製している。Fig. 1 に 5.2 m 長の 4 層 SCSC ケーブルの写真をケーブル作製機の外観と共に示す。コア直径は 3 mm で各層 3 本 4 層で合計 12 本の超伝導線から構成されている。ケーブルリング速度は、1 層あたり約 5 m/h であり、4-5 日で 30 m の 4 層ケーブルを作製できる計算となり、当面の研究開発には十分な速さである。使用条件に応じて各種の金属コアを用いることができる。

交流損失特性に関しては、別途作製した同仕様の 100 mm 長サンプルを用いて、標準的な幅 4 mm のモノフィラメント薄膜高温超伝導線単線との比較で 10 分の 1 以下の交流損失低減を達成した(単位長のケーブルは単位長の約 1.6 倍の超伝導線から構成されることも考慮)。

通電特性に関しては、電流容量を大きくするために層数を 6 に増やした 0.4 m 長サンプルを用いて、液体窒素中にて、素線の臨界電流を上回る約 500 A の直流臨界電流を得、ピーク値 1 kA の 50 Hz 交流通電にも成功している。

また、超伝導線 1 本、銅テープ 2 本から構成される単純化した単層ケーブルを、直線から直径 100 mm から 40 mm まで順次曲げて、電界-電流特性を測定した結果の一例を Fig. 3 に示す。ケーブルを直径 40 mm まで曲げても、素線 1 本自体では、大きな劣化は生じないことがわかる。今後、層数を増やし、他の層による機械的拘束の影響などを調べる予定である。

### 3. その他

本発表のほか、実験結果が困難な様々な条件における交流損失の評価法の検討 (3A-a02)、液体窒素温度より低い温度での応用を意識した 4.2 – 70 K の温度領域での結合時定数測定と銅層の抵抗率の測定 (3A-a03)、フィラメント間分流の熱暴走と保護に与える影響の実験的検討 (3A-a04)、交流クエンチ試験 (3A-a05)、保護特性の数値解析による評価 (3A-a06)、交流損失の数値解析 (3A-a07) などを進めている。これらについては、本報告のあとに個別に報告する。

### 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJMI19E1 の支援を受けたものである。

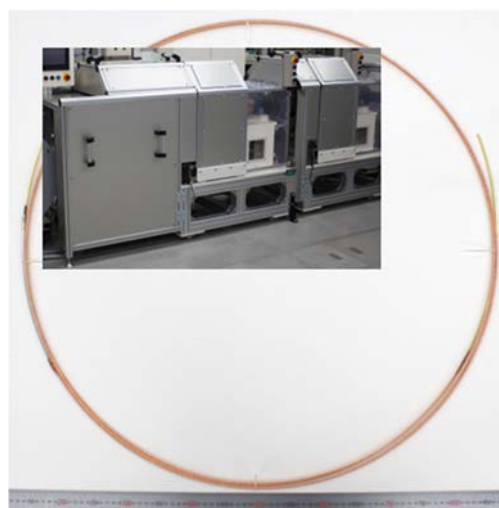


Fig. 1 5.2 m-long four-layer SCSC cable.

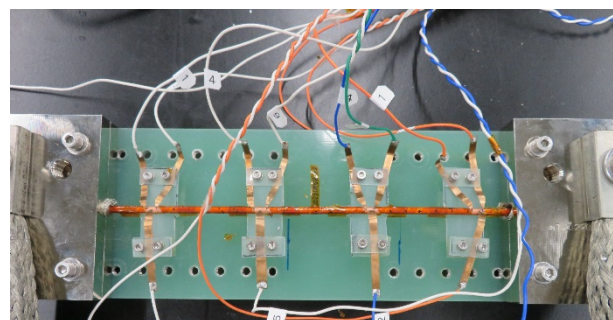


Fig. 2 0.4 m-long six-layer SCSC cable.

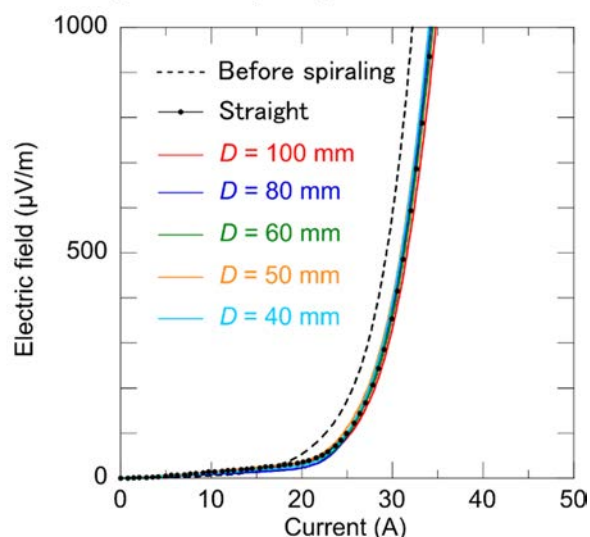


Fig. 3 An example of set of voltage – current curves of a spiral cable consisting of one superconductor tape and two copper tapes, which was bended with various bending radius step by step.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年秋)(2): 様々な条件における交流損失の実験則に基づく評価

## Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2023 (2): Evaluation of ac losses at various conditions using empirical formulae

重政 茉於, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)

SHIGEMASA Mao, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、低交流損失でかつロバスト性に優れた高温超伝導ケーブルである、SCSC ケーブルの研究開発を進めている。SCSC ケーブルでは、Fig. 1 に示すように銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線をスパイラル状に巻き付けることで、結合電流をスパイラル半ピッチに閉じ込めることで結合時定数を小さくし、フィラメントの結合を抑制している[1]。我々はこれまでに、SCSC ケーブルを模擬した様々な試料の、温度 77 K、磁界振幅 0.1 T 以下における磁化損失を測定してきた[2]–[4]。一方、実際に SCSC ケーブルを発電機等の機器へ応用する際、温度 77 K 以下、磁界振幅 0.1 T 以上を含めた様々な条件下での交流損失を評価する必要がある。そこで我々は、温度 77 K、磁界振幅 0.1 T 以下における磁化損失の測定結果を用いて、異なる条件下での磁化損失を評価する方法を検討している。

### 2. ヒステリシス損失と結合損失の分離

磁界変化一周あたりのヒステリシス損失  $Q_h$  は周波数に依存しない一方、結合損失  $Q_c$  は以下のような式で表され、周波数  $f$  に依存する。

$$Q_c = A_c' \cdot \frac{(\mu_0 H_m)^2}{2\mu_0} \cdot \frac{2\pi\tau_c f}{1+(2\pi\tau_c f)^2} \quad (1)$$

$A_c'$  は形状因子係数、 $\tau_c$  は結合時定数、 $\mu_0 H_m$  は磁界振幅である。周波数が  $1/(2\pi\tau_c)$  より十分低く、フィラメントがほとんど結合していない場合、式(1)より結合損失は周波数に比例するとみなすことができる。このとき、磁化損失  $Q_m$  は次式で表すことができる。

$$Q_m = Q_h + Q_c = Q_h + kf \quad (2)$$

複数の周波数で測定された磁化損失  $Q_m$  を、最小二乗法を用いて式(2)にフィッティングすることにより、ヒステリシス損失  $Q_h$  と結合損失  $Q_c$  に分離することができる。

### 3. ヒステリシス損失の評価

Fig. 2 に、過去に測定した[2]SCSC ケーブルを模擬した試料の一つにおける磁化損失から、式(2)を用いて導出した、線材一本あたり、ケーブル単位長さあたりのヒステリシス損失  $Q_h/n$  を丸印で示す。Fig. 2 には、以下の式で与えられるヒステリシス損失理論値  $\beta(2/\pi)n_f Q_{BM,f}'$  も併せて曲線で示している。

$$\beta \frac{2}{\pi} n_f Q_{BM,f}' = \beta \frac{2}{\pi} \{Q_{BI,f}' + (n_f - 1)Q_{M,f}'\} \quad (3)$$

$$Q_{M,f}' = \frac{4\mu_0(w_f + w_s)^2}{\pi} \int_0^{H_m} (2H_a - H_m) \ln \left[ 1 - \frac{\sin^2 \left\{ \frac{\pi w_f}{2(w_f + w_s)} \right\}}{\cosh^2(H_a/H_c)} \right] dH_a \quad (4)$$

$$Q_{BI,f}' = \frac{(\mu_0 H_m)^2 \pi w_f^2}{\mu_0} \cdot \frac{g(H_m/H_c)}{(H_m/H_c)} \quad (5)$$

$$g(x) = \frac{2}{x} \ln(\cosh x) - \tanh x \quad (6)$$

$$H_c = \frac{I_c}{\pi w_t} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (8)$$

$w_t$  は線材の幅、 $w_f$  はフィラメントの幅、 $n_f$  はフィラメント数、 $w_s$  はフィラメント間の常伝導部の幅、 $I_c$  は線材の臨界電流、 $\alpha$  はコア軸に対する線材の角度、 $\mu_0 H_m$  は磁界振幅である。 $Q_{BI,f}'$  は E. H. Brandt の理論に基づいた単一フィラメントにおける損失であり[3]、 $Q_{M,f}'$  は Y. Mawatari の理論に基づき、フィラメント

が隣接している際の磁束分布を考慮した上での各フィラメントにおける損失である[4]。

### 4. 結合損失の評価

磁界振幅が十分小さく、周波数が高ければ、磁化損失において結合損失が支配的であるとみなすことができる。この条件下で測定された結合損失を式(1)にフィッティングすることで、形状因子係数  $A_c'$  および結合時定数  $\tau_c$  を抽出することができる。これらは線材やフィラメントの幅、コアの直径、コア軸に対する線材の角度、スパイラルの層数といった、マルチフィラメント線の形状に依存する。また、結合時定数  $\tau_c$  に関しては、銅層厚さと銅の抵抗率にも依存し、従って温度にも依存する。これらのパラメータに対する依存性を利用し、異なる条件下での  $A_c'$  と  $\tau_c$  を導出し、それらを式(1)に外挿することにより、様々な条件下での結合損失を評価することができる。

### 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJMI19E1 の支援を受けたものである。

### 参考文献

- [1] N. Amemiya et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 35, no.2 (2022), Art. no. 025003, doi: 10.1088/1361-6668/ac3f9c
- [2] M. Shigemasa, Y. Sogabe, A. Takahashi, S. Yamano, H. Sakamoto and N. Amemiya, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, no. 6 (2022), Art. no. 8200806, doi: 10.1109/TASC.2022.3170865
- [3] E. H. Brandt and M. Indenbom, Physical Review B, vol. 48, no. 17, pp. 12 893–12 906 (1993)
- [4] Y. Mawatari, Phys. Rev. B, vol. 54, pp. 113 215–113 221 (1996)

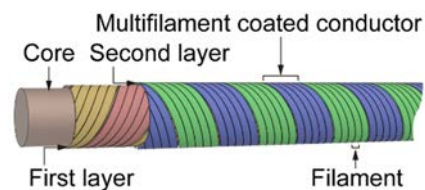


Fig. 1 Schematic view of the SCSC cable [1].

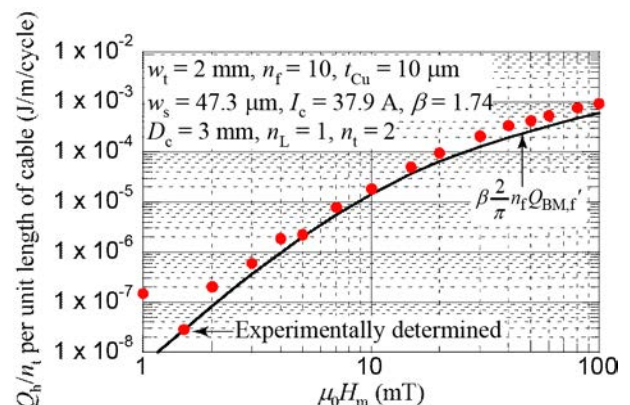


Fig. 2 Example of experimentally determined hysteresis loss (symbols) and the theoretical value (line).

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年秋)(3): スパイラル銅複合マルチフィラメント薄膜線材における 銅メッキ層抵抗率と結合時定数の温度依存性

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (3):

Temperature dependance of coupling time constants and resistivity of copper layer of spiral copper-plated multifilament coated conductors

上垣 柊季, 祖父江 卓哉, 高橋 明, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)

UEGAKI Hiiragi, SOBUE Takuya, TAKAHASHI Akira, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

SCSC ケーブルは 4.2 K ~ 77 K の幅広い温度で使用される可能性があるため、そのような広い温度領域における電磁特性について知ることは重要である。SCSC ケーブルの電磁特性の1つに、外部変動磁界によってフィラメント間の常伝導部を跨って誘導される結合電流の減衰時定数(結合時定数)がある。結合時定数は結合損失の大きさに影響を及ぼすため、交流損失の評価には欠かせないパラメータである。SCSC ケーブルにおいて、結合電流はフィラメント群の上にメッキされた銅メッキ層を通して流れるので、銅メッキ層の抵抗率の温度依存性に起因して、結合時定数も温度依存性を持つと考えられる。

今回、我々は、SCSC ケーブルのもっとも基本的な形態である銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線材を GFRP コアの周りにスパイラル状に巻き付けた試料の磁化損失と銅メッキ層の抵抗率を、4.2 K から 77 K の範囲で測定し、それらの温度依存性の関係について検討した。

## 2. 測定試料及び測定方法

銅メッキ層厚さ 10  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、40  $\mu\text{m}$ 、線材幅 4 mm、5 フィラメントのマルチフィラメント薄膜高温超伝導線を、直径 3 mm の GFRP コアに、巻き角度を 55°でスパイラル状に巻き付けた試料に 0.15 mT、周波数 500 Hz ~ 20 kHz の交流磁界を印加し、磁化損失の周波数依存性をピックアップコイルで測定した。その結果を結合損失の理論式に最小二乗法でフィッティングし、デバイクカーブのピーク値から結合時定数を求めた。測定は、試料を液体ヘリウムで浸漬冷却した状態(4.2 K)から、ヘリウムが気化し自然昇温する過程で繰り返し行い、結合時定数の温度依存性を求めた。

銅メッキ層の抵抗率の測定には、磁化損失を測定した線材と同種の線材を使用した。テープ線材から、超伝導層を除去し、 Hastelloy 基板、銀層、銅メッキ層が残存する試料を作製し、4 端子法で抵抗を測定した。結合時定数の温度依存性を求めた実験と同様な方法で、抵抗の温度依存性を求めた。

## 3. 測定結果

Fig. 1 に測定した結合時定数の温度依存性を示す。結合時定数は低温になるほど長くなり、銅メッキ層の厚さが厚くなるほど長くなることから分かる。Fig. 2 に測定した銅メッキ層の抵抗率の温度依存性を示す。20 K 以下の温度では、抵抗率はほとんど変化しない。このことから、結合時定数が 20 K 以下で変化しないのは銅メッキ層の抵抗率が変化しないためであると考えられる。また、銅メッキ層が薄くなるほど 4.2 K における抵抗率は大きくなることから分かる。銅メッキの厚さによって結晶構造が変化し、抵抗率が変化した可能性がある。Fig. 3 に測定した銅メッキ層抵抗と、結合時定数の逆数である結合電流の特性周波数の関係を示す。特性周波数は銅メッキ層抵抗の大きさに比例していない。また、銅メッキ層が薄くなるほど傾きが急になることが分かる。これらは銀層による抵抗率の変化

や、フィラメント間の三次元的な構造による結合電流ループの変化が影響している可能性が考えられる。

## 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJMI19E1 の支援を受けたものである。

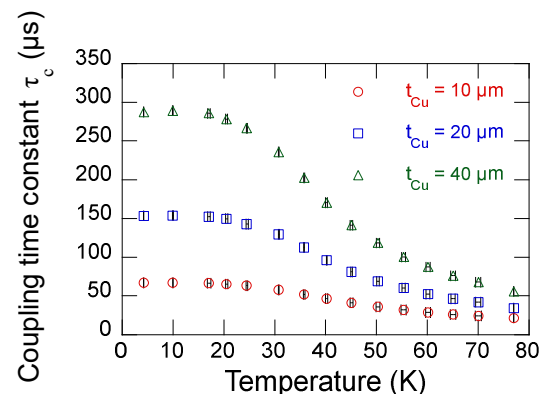


Fig. 1 Temperature dependence of coupling time constants with different thickness of copper plate.

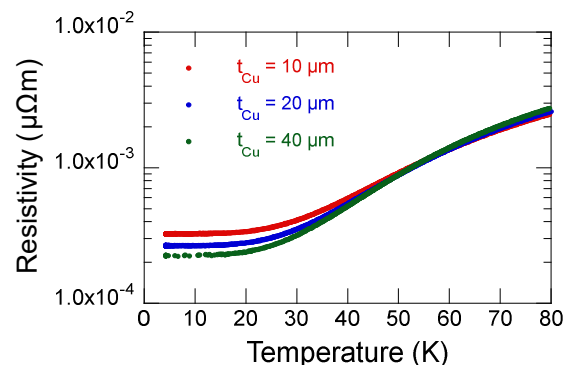


Fig. 2 Temperature dependence of copper plate resistivity with different thickness of copper plate.

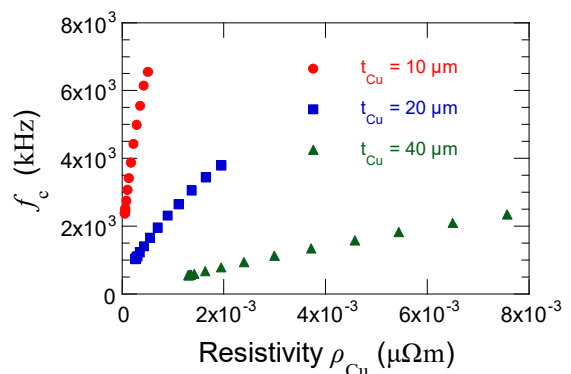


Fig. 3 Relation between measured resistivity and  $f_c$  with different thickness of copper plate.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年秋) (4): スパイラル銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線材の フィラメント間分流と熱暴走に対する保護

Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2023 (4):

Current sharing among filaments and thermal-runaway protection of spiral copper-plated multifilament coated conductors

小山 湧也, 許 光煒, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之  
 KOYAMA Yuya, XU Guangwei, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki  
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

薄膜高温超伝導線材を製造する際には局所的な欠陥を完全になくすことは現実的には不可能である。銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線材においては、銅層を介してフィラメント間で分流することで欠陥を迂回し安定して通電できると考えられるが、この分流により銅層ではジュール熱が発生する。このジュール熱が熱暴走の発生と熱暴走に対する線材の保護に及ぼす影響を実験的に検討した。

## 2. 実験方法の概要

ドリルビットで銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線材の幅方向片端に直径 1 mm の穴を開け、人工的な欠陥を作った。これを GFRP コアにスパイラル状に巻き付け、線材幅方向の両端に一端あたり6か所の電圧タップを取り付けた。その様子を Fig. 1 に示す。温度 50 K における熱暴走及びそれに対する線材保護過程における線材の長手方向と幅方向の電圧を測定した。フィラメント間の分流がない場合との比較のためマルチフィラメントをモノフィラメントに替えたものに対しても同様の測定を行った。

熱暴走実験を行う際はマルチフィラメントには 1.3 T の外部磁場を印加し、モノフィラメントには 1.6 T の磁場を印加して線材劣化前臨界電流が 275 A にそろえるように調整した。高い電界において 1.3 T の磁界を印可した劣化後のマルチフィラメント線材と 1.6 T の磁界を印可した劣化後のモノフィラメント線材には概ね近い値の電流が流れたため両者に人工的に与えた欠陥はほとんど同様のものと判断した。

熱暴走に対する線材保護の実験を行う際はマルチフィラメント線材に 1.3 T の外部磁界を印加し、モノフィラメントには 2.0 T の磁界を印加した。これによりそれぞれの線材における熱暴走電流を 200 A にそろえて実験した。

## 3. 実験結果

### 3.1 熱暴走実験

マルチフィラメント線材を使用した熱暴走過程における長手方向と幅方向の電圧値と電流値を Fig. 2 に、モノフィラメント線材を使用した電圧値と電流値を Fig. 3 に示す。マルチフィラメント線材とモノフィラメント線材の結果を比較したところ概ね近い熱暴走電流値を示した。フィラメント間の分流により発生するジュール熱の熱暴走電流値に対する影響は顕著ではない。

### 3.2 熱暴走に対する線材保護の実験

熱暴走に対するマルチフィラメント、モノフィラメント線材の保護が可能な時定数は Fig. 4 に示す。線材保護と時定数との関係においても分流により発生するジュール熱の影響は顕著ではない。

## 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJMI19E1 の支援および JSPS 科研費 JP22H00142 の助成を受けたものである。

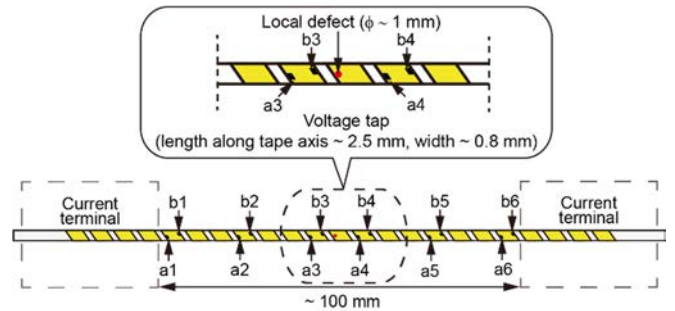


Fig. 1 Positions of voltage taps set on sample (a1, 2 ...: voltage taps on edge with local defect; b1, 2 ...: voltage taps on edge without local defect).

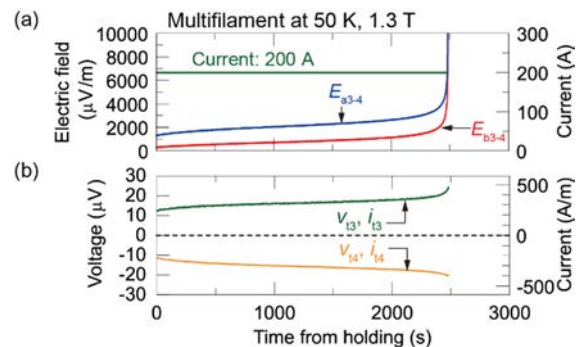


Fig. 2 Electric fields, voltages, and currents of multifilament sample with local defect. (a) Longitudinal direction. (b) Transverse direction.

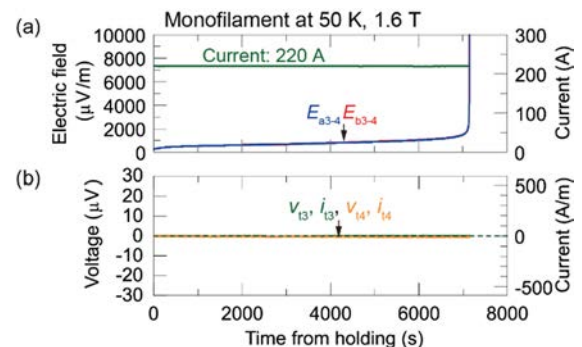


Fig. 3 Electric fields, voltages, and currents of monofilament sample with local defect. (a) Longitudinal direction. (b) Transverse direction.

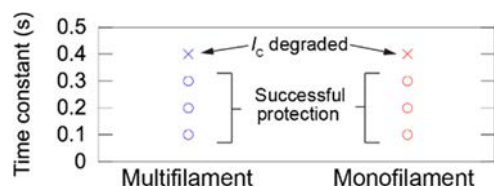


Fig. 4 Thermal runaway protection results of multifilament and monofilament samples.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年秋)(5): 交流クエンチ試験

## Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2023 (5): AC quench measurements

曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

SCSC ケーブルに交流電流を通电している場合のクエンチ検出及び保護の可能性について検討するため、SCSC ケーブルにケーブル臨界電流を上回る交流電流を通电した場合の電圧波形を測定し、クエンチ特性を実験的に評価した。

### 2. 測定試料の諸元及び電界-電流特性

測定試料の SCSC ケーブルの諸元を Table 1 に示す。交流通电前に測定した電界  $E$ -電流  $I$  特性は Fig. 1 に示す通りであった。ここで、VT@tape4- $n$  は、4 層の  $n$  本目 ( $n = 1 - 3$ ) のテープ線にそれぞれ取り付けられた電圧タップを意味する。4 層目の 3 本のテープ線位置で測定された電界は大きくばらついていた。これは、電極部分での接続抵抗、及びテープ線の  $E$ - $J$  特性のばらつきによってテープ線間の分流が生じたことが原因と考えられる。

### 3. 交流クエンチ試験

交流クエンチ試験においては、所望の電流振幅  $I_t$  まで交流電流の振幅を掃引した。周波数は 50 Hz とし、0 A から目標振幅までの掃引時間を 5 s とした。保持中に電圧が上昇しなければ、50 s 後に 0 A まで振幅を掃引した。電圧が上昇した場合、VT@tape4- $n$  での測定電圧が 1 V を超えるまで保持し、1 V を超えたことを目視してから電源出力を遮断した。

Fig. 2 に  $I_t = 750$  A の場合の電流及び VT@tape4-1 で測定された電圧波形の掃引開始時から遮断までの全波形を示す。ここで、掃引開始時刻を  $t = 0$  s とし、掃引完了は  $t = 5$  s である。 $t = 4.5$  s 付近で電圧が微増した後、 $t = 7.5$  s 付近でテープ線での測定電圧が急激に上昇し、 $t = 16$  s 付近で 1 V の電圧発生を観測したため遮断した。

Fig. 3 に  $t = 3$  s,  $t = 4$  s,  $t = 5$  s,  $t = 15$  s 付近での電流・電圧波形の拡大図を示す。電流振幅が約 450 A であった  $t = 3$  s 付近ではほぼインダクタンス成分の電圧のみ観測されていたが、電流振幅がテープ線の臨界電流を大きく超える約 600 A であった  $t = 4$  s 付近では抵抗成分の電圧が生じ、電圧波形が歪んでいることがわかる。この抵抗成分の電圧は、掃引が完了した  $t = 5$  s 付近ではインダクタンス成分の電圧よりも大きくなっている。クエンチが発生して以降はこの抵抗成分の電圧が大きく上昇し、 $t = 15$  s 付近では通電電流と発生電圧はほぼ同相となった。

### 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJMI19E1 の支援を受けたものである。

Table 1 Specifications of measured SCSC cable.

Number of layers	4
Number of tapes per layer	3
Core material	Brass
Effective cable length (between terminals)	170 mm
Width of tape	2 mm
Number of filaments	10
Thickness of plated copper	10 $\mu\text{m}$ (one side)
Thickness of substrate	30 $\mu\text{m}$
Distance between voltage taps on tapes (tape longitudinal direction)	206 mm

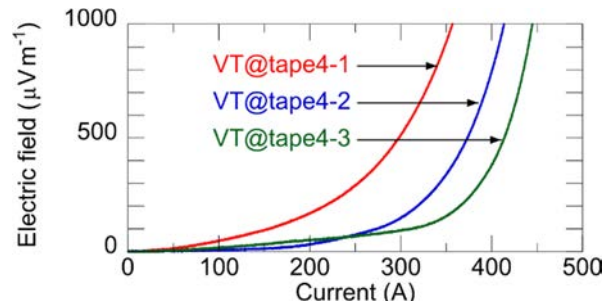


Fig. 1 Measured  $E$ - $I$  curves before ac quench measurements.

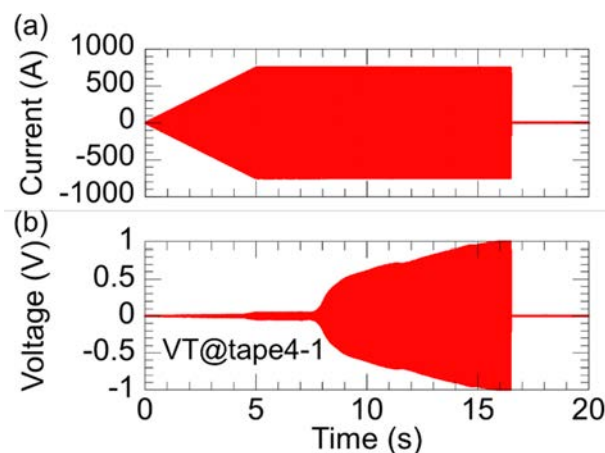


Fig. 2 Entire waveform of transport current and voltage.

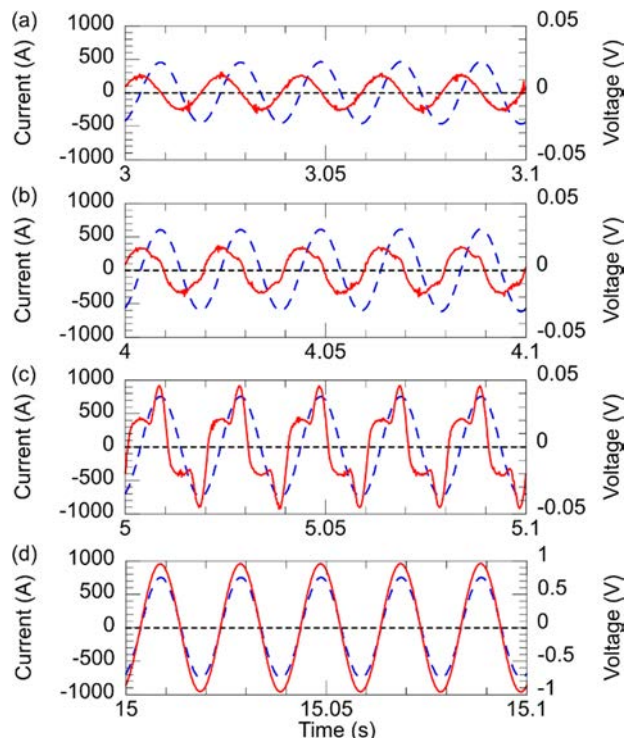


Fig. 3 Enlarged waveform of transport current and voltage; (a)  $t = 3$  s - 3.1 s, (b)  $t = 4$  s - 4.1 s, (c)  $t = 5$  s - 5.1 s, and (d)  $t = 15$  s - 15.1 s.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年秋)(6): 数値解析による SCSC ケーブルの保護特性の基礎的評価

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (6):  
Evaluation of protection characteristics of SCSC cables by numerical analyses

曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)  
SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

SCSC ケーブルは、導電性の円断面コアの周りにスパイラル状に複数の銅分流層複合マルチフィラメント高温超伝導線を多層に巻き付けた複雑な形状をもつ (Fig. 1) [1]。我々はこれまでに、超伝導線及びコアをそれぞれ長手方向の温度分布のみ考慮するとし、ケーブル構造を反映した層間及びコアと超伝導線間の電気的・熱的接触抵抗を考慮した SCSC ケーブルのクエンチ解析手法を構築した。このクエンチ解析手法を用い、SCSC ケーブルの電圧によるクエンチ検出・保護を模擬した数値解析を行ったので、これを報告する。

## 2. SCSC ケーブルのクエンチ解析手法

SCSC ケーブルのクエンチ・熱暴走に対する保護特性を議論するために、超伝導線及びコアをそれぞれ一次元線要素の集合としてモデル化した[2]。この手法では、コア並びにそれぞれの超伝導線における長手方向温度分布を一次元熱伝導方程式によって求め、超伝導線及びコア間の電流分布を回路方程式によって計算する。また、スパイラル構造による超伝導線間の接触領域を考慮していることが特徴であり、コア-超伝導線間、及び超伝導線間の接触電気抵抗及び接触熱抵抗、また電極と超伝導線及びコア間の接続抵抗を解析におけるパラメータとしている。

## 3. 2 層 SCSC ケーブルのクエンチ解析及び保護特性解析

ここでは、1 層あたり 2 本、2 層からなる SCSC ケーブルを対象としてクエンチ解析及び保護特性解析を行った。ここで、クエンチ解析においては通電電流を常時一定とし、熱暴走が発生するまで解析したが、保護特性解析では、検出電圧を設定し、それを越えた後に一定の遅延時間の後に通電電流を指数的に低下させ、電圧及びコイルの振舞いを解析した。解析対象とする SCSC ケーブルの諸元及び解析条件を Table 1 に示す。本解析では、最外層の超伝導線一本の長手方向中心位置に局所的な低臨界電流箇所を設定し、熱暴走を発生させた。

Fig. 2 にクエンチ解析及び保護特性解析によって得られた電圧及び温度の時間変化を示す。クエンチ解析では、電流を常時 100 A としているため熱暴走に至った。一方、保護特性解析では、ケーブル全長の電圧が検出電圧 1 mV に到達した後に電流が指数的に低下したため、電圧が急速に低下した。ただし、本解析では伝導冷却に相当する断熱条件を仮定しており、冷媒による冷却を考慮に入れていないため、温度の低下速度は電圧の低下速度に比べて非常に遅くなった。

発表では、各種パラメータを変えた場合に保護特性がどのように変化するかについても議論する。

## 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJI19E1 の支援を受けたものである。

## 参考文献

1. N. Amemiya, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 35 (2022) 025003
2. Y. Sogabe, et al., Abstract of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 11

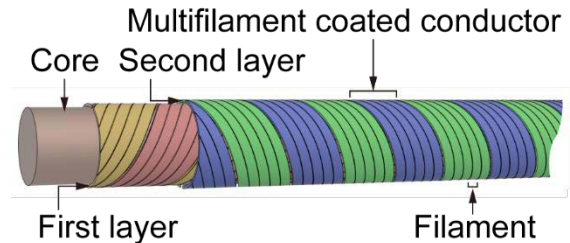


Fig. 1 Schematic of a multilayered SCSC cable [1]

Table 1 Specifications of analyzed SCSC cable and analysis conditions.

Number of layers	2	Number of tapes per layer	2
Spiral pitch	10 mm	Cable length	100 mm
Core diameter	3 mm	Tape width	2 mm
Thickness of Cu layer (one side)	10 $\mu\text{m}$	Thickness of Ag layer	2 $\mu\text{m}$
Thickness of SC layer	1 $\mu\text{m}$	Thickness of substrate	30 $\mu\text{m}$
Initial temp.	77 K	Tape $I_c$ @ 77 K	30 A
Current	100 A	n value	20
Terminal resistances at tapes	$10^{-5} \Omega$	Terminal resistances at core	1 $\Omega$
Contact resistivity	$10^{-4} \Omega\text{-mm}^2$	Heat transfer coefficient at contacts	$1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{-K}$
Location of $I_c$ degradation area	Longitudinal center of L2-T2	Detection voltage	1 mV
Delay after detection	0.1 s	Decay constant	0.5 s

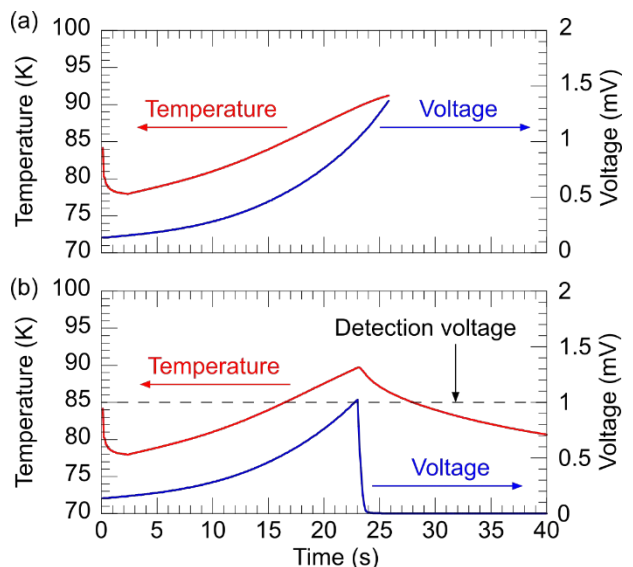


Fig. 2 Typical analysis results of temperature and voltage; (a) quench analysis and (b) protection analysis.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年秋)(7): 機器環境下での交流損失のケーブル形状依存性

Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2023 (7): Cable geometry dependence of ac losses in SCSC cables carrying ac current under ac magnetic field

江崎 友哉, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)

EZAKI Yuya, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

Email: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々は、交流マグネットやモータなど、交流磁界下で交流電流を流す応用を想定して、SCSC ケーブルの研究開発を行っている。SCSC ケーブルの形状を表すパラメータには交流損失に影響を与えると予測されるものがあり、この影響を把握することは適切なケーブル設計を行う上で非常に重要である。本稿では、SCSC ケーブルの形状を表すパラメータが交流損失に与える影響を数値解析に基づいて評価した。

## 2. 解析手法

T 法による SCSC ケーブルの電磁界解析モデルを使用した全損失解析を行った。薄膜高温超伝導線材の厚さ方向の電界分布を無視する薄板近似を適用している。また、各層のインピーダンスの差に起因する層間偏流を考慮するため、各層の自己インダクタンスおよび層間の相互インダクタンス、超伝導層の等価抵抗および端末部の接続抵抗を考慮した回路モデルを構築した。この回路モデルによって、ケーブルに通電する全電流および外部磁界の時間変化から、各時刻における各層の電流の時間変化を計算する[1]。得られた各層の通電電流の時間変化を上述の SCSC ケーブルの電磁界解析モデルにおける境界条件として与えている。

この解析においては、電界-電流密度特性としてn値モデルを採用し、臨界電流密度の磁場依存性を考慮するために Kim モデルを用いた。

## 3. 交流損失の層数依存性

ここでは、各層 2 素線、2 層の SCSC ケーブル Cable 1 と各層 2 素線、4 層の Cable 2 を対象として解析を行った。ケーブルの形状および解析条件を Table 1 に示す。素線の巻付け方向は奇数層と偶数層で逆にしていく。ケーブル電流  $I_{t,cable}$  は、外部磁界が最大となるときのケーブルの臨界電流  $I_{c,cable}$  を基準として、電流負荷率  $I_{t,cable} / I_{c,cable} = 0, 0.33, 0.67$  となるように決定した。外部磁界の振幅  $B_{ext}$  を  $B_{ext} = 0.05 - 0.5$  T の範囲で変化させ、全損失の外部磁界振幅依存性を調べた。

交流損失の負荷率および磁界振幅依存性を Fig. 1 に示す。交流損失は外部磁界の増加とともに増加しており、磁化損失が支配的な高磁界領域 ( $B_{ext} > 0.1$  T) において、交流損失の  $I_{t,cable}$  による顕著な差は生じなかった。このことから、高磁界下において、通電電流が交流損失に与える影響は小さいと言える。加えて、本解析では層間偏流による層間の不均一な電流分布を考慮していることから、層間偏流が発生することによって全損失が増大することはないことが確認された。また、高磁界領域において、Cable 1, 2 の交流損失に顕著な差が見られないことから、層数はテープあたりの磁化損失に影響しないと考えられる。

## 4. 交流損失の 1 層あたりの素線数依存性

ここでは、12 本の素線で構成される SCSC ケーブルとして、各層 3 素線、4 層の Cable 3 と各層 2 素線、6 層の Cable 4 を対象として解析を行った。前項より、 $B_{ext} > 0.1$  T の条件では磁化損失が支配的となることから簡単のため、 $I_{t,cable} = 0$  A、 $B_{ext} = 0.5$  T として交流損失解析を行った。交流損失の解析結果を Fig. 2 に示す。Cable 3, 4 間において、ヒステリシス損失、結合損失ともに顕著な差は見られなかった。このことから、Cable 3, 4 の磁化損失は、磁化損失が支配的な領域では同程度であ

り、ケーブル断面積が小さい Cable 3 のほうが電流密度の観点で有利であると言える。

発表では、より実用的な SCSC ケーブルを対象とした解析結果を示し、大電流輸送に適したケーブル形状について検討する。

## 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJI19E1 と JSPS 科研費 Grant 番号 JP20H00245 の支援を受けたものである。

## 参考文献

1. Y.Sogabe, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 33 (2023) 590005

Table 1 Specifications of geometry of SCSC cables and analysis conditions.

Cable length	10 m
Core diameter	3 mm
Width of tape	2 mm
Thickness of superconductor layer	2 $\mu$ m
Number of filaments	10
Winding angle	55°
Terminal resistance $R_t$	100 n $\Omega$
Critical current density at 0 T $J_{c0}$	$2.0 \times 10^{10}$ A/m <sup>2</sup>
$B_0$	0.150 T
$n$	20
Frequencies of $B_{ext}$ and $I_{t,cable}$	50 Hz

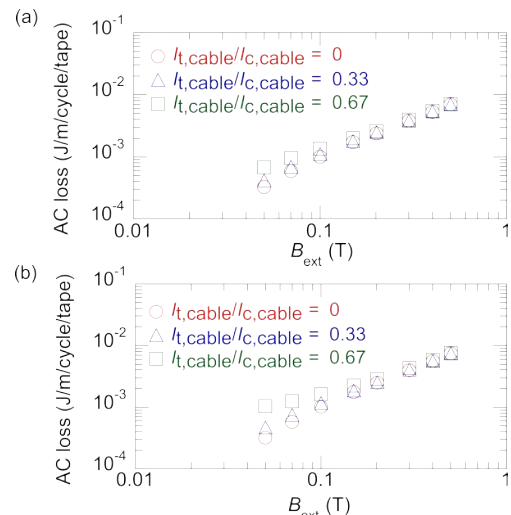


Fig. 1 AC loss vs.  $B_{ext}$  characteristics of SCSC cables in various  $I_{t,cable} / I_{c,cable}$  of (a) Cable 1 and (b) Cable 2.

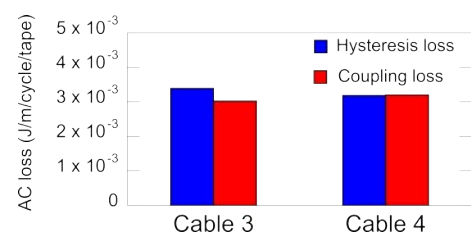


Fig. 2 Dependence of ac loss on cable geometry.

# 陽子線治療向け超電導サイクロトロンにおける 等時性磁場形成と遮蔽電流誘起磁場の影響

Adjustment of magnetic field distribution

in a superconducting isochronous cyclotron for proton therapy

江原 悠太, 吉田 潤, 筒井 裕士, 中島 秀, 鶴留 武尚, 宮下 拓也 (住重)

Yuta Ebara, Jun Yoshida, Hiroshi Tsutsui, Shu Nakajima, Takehisa Tsurudome, Takuya Miyashita (SHI)

E-mail: yuta.ebara@shi-g.com

## 1. はじめに

近年、陽子線治療向け加速器として、超電導 AVF サイクロトロン SC230 が開発された。このサイクロトロンは、小型、省エネルギー、大電流ビームという特徴をもつ。比較的高い磁場分布精度が要求され、事前の調整が実施された。また、遮蔽電流誘起磁場の影響も検討された。本発表では、SC230 における磁場分布形成の様子と遮蔽電流誤差磁場の影響について、試験結果と併せて報告する。

## 2. 陽子線治療向け超電導サイクロトロン SC230

陽子線治療は、ブラッグピークをもつ特徴的な深度線量分布により正常細胞へのダメージを低く抑えられるという特徴をもつがん治療である。日常生活を送りながら通院治療を受けることができるなど、患者に優しいがん治療として注目されている。その一方で、陽子線治療の導入は大型病院に限られており、中小規模の病院への導入は進んでいない。これは、陽子線治療装置が大型であり、建屋のための用地確保や建屋建設コストが障壁の一つとなっているためである。このような背景のもと、陽子線治療システムにおける装置の小型化が求められている。

近年、超電導マグネットを用いた超電導 AVF サイクロトロン SC230 が住友重機械によって開発された。[1] SC230 の写真を Fig.1 に示す。このサイクロトロンでは、超電導マグネットを用いて 3-5 T の高磁場を発生させることで小型化が実現されている。引出軌道における平均磁場は約 3.9 T、引出半径は 0.6 m である。また、小型化と同時に、ビームの大電流化、システムの省エネ化も実現された。

## 3. 磁場分布の形成

SC230は4セクターのスパイラルセクター型AVFサイクロトロンである。古典的なサイクロトロンでは、粒子エネルギー上昇に伴い相対論的効果によって等時性が満たされなくなるため、加速エネルギーには限界がある。この上限を超える際に、シンクロトロンやシンクロサイクロトロンでは周波数を変調するが、ローレンツ因子に比例する磁場(等時性磁場)によって等時性を補償するのが等時性サイクロトロンである。すなわち、等時性サイクロトロンにおける軸方向磁場の周平均磁場(0次)  $B_{z0}$ は、以下のようにかける。

$$B_{z0} = \gamma B_0$$

ここで、 $B_0$  は加速電場の周波数と荷電粒子の電荷と質量によって決定される。また、 $\gamma$  はローレンツ因子であり、粒子の速度  $v$  と光速  $c$  を用いて、以下のように定義される。

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

この等時性サイクロトロンでは、等時性磁場によってサイクロトロン軸方向(z方向)のベータトロン振動が不安定になることに注意が必要である。特に、小型化を狙い磁場を高くするほど、この振動が発散しやすくなる。このとき、周方向に変動す

る磁場(azimuthally varying field; AVF)を用いた強集束の効果を利用してビームの安定を実現した等時性サイクロトロンが、AVFサイクロトロンである。また、磁極を螺旋状にしてエッジ集束の効果を利用し、ビーム安定性をさらに向上させたものが、スパイラルセクター型AVFサイクロトロンである。SC230では、ヒル部の磁極間距離は広い範囲で±10 mm、最近接部では±6 mm、さらに最大約70度となる大きなスパイラル角をもつ磁極形状が採用された。Fig.2にSC230の周平均磁場の径方向分布の概念図を示す。このとき、等時性磁場からのずれがあると、ビームの周回と加速電場との間に位相差を生む。SC230では、許容される周平均磁場の不確かさは、50 ppm以下である。磁極は0.01 mmオーダーの精密加工によって製作されたうえ、磁場分布の測定と調整が実施された。磁場分布の調整は、磁極の機械加工、シミング、コイル位置の調整によって実現された。[2]

## 4. 遮蔽電流誘起磁場の影響

前述のとおり、許容される磁場の不確かさは僅かであり、超電導コイルにおける遮蔽電流がつくる磁場の影響も無視できない。遮蔽電流誘起磁場(screening current-induced field; SCIF)とそれによる積分位相差が見積もられた。この見積もりにより、コイル電流調整によって、積分位相差を調整できることが確認された。引出しビーム電流のコイル電流依存性について、コイル電流の掃引履歴による差異を確認することで、検討の妥当性が確認された。

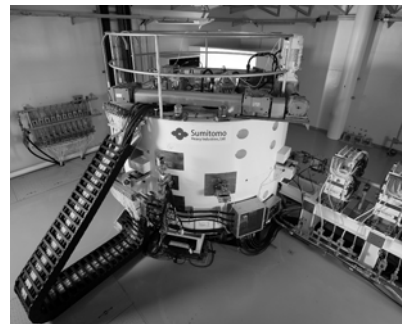


Fig.1 Photograph of superconducting AVF cyclotron SC230

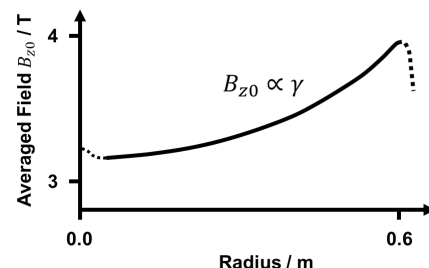


Fig.2 Schematic of averaged field distribution in SC230

## 参考文献

1. Y. Ebara, et al., NIM A (2023)
2. Y. Ebara, et al., NIM A (2020)



# 「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(2023 年秋) : 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムにおける 遮蔽電流磁場の数値解析・評価

Development of REBCO coil system for Skelton Cyclotron (Autumn 2023) :  
Numerical analysis and evaluation of screening current-induced magnetic field  
in 1/2 scale demonstration no-insulation REBCO coil system

吉藤 夢来, 太田 海斗, 石山 敦士(早大), 野口 聡(北大), 植田浩史(岡山大)  
Muku YOSHIFUJI, Kaito OTA, Atsushi ISHIYAMA, So NOGUCHI, Hiroshi UEDA  
E-mail: yshfjmk@fuji.waseda.jp

## 1. はじめに

我々は  $\alpha$  線核医学治療のための  $\alpha$  線放出 RI ( $^{211}\text{At}$ ) 製造用「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を目指し、無絶縁 REBCO 超伝導コイルに関する研究を行っている。REBCO 線材はテープ形状をしているため、磁場変動に伴う遮蔽電流が誘導され、自己磁場を低減させる遮蔽電流磁場が発生する。一方で無絶縁 (NI) 巻線技術を適用すると、絶縁層がなくなることで径方向にも電流が流れ、励磁遅れが発生する。この両者は同時に発生し、磁場精度を乱すため、両者を同時に考慮できる遮蔽電流磁場解析手法が必要となる。本研究では、円形・非円形の空芯無絶縁 REBCO コイルシステムの特性を調べるために、回路解析のみによる新しい解析手法を用いて、実験結果との比較・評価を行った。

## 2. 双方向分割回路型遮蔽電流磁場解析手法

REBCO テープ線材への磁束侵入を考慮した遮蔽電流磁場解析が可能となるように、コイル径方向に加えてテープ線材幅方向も分割する 2 方向 (双方向) 分割等価回路 (Fig.1) を作成し、これを解く「双方向分割回路型遮蔽電流磁場解析手法」を適用する。各要素で成立する以下の回路方程式(1),(2),(3)を連立して解くことで NI コイルの励磁遅れを考慮する。そして各要素に鎖交する磁束と磁束侵入は、相互インダクタンス  $M$  と超電導層抵抗  $R_{Fe}$  ((4)式:  $n$  値モデル) により表現することで、励磁遅れと磁束侵入の影響を同時に考慮することができる。

$$\sum_{j=1}^{\text{totalnum}} M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} - I_{cti} R_{cti} = 0 \quad (1)$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^{\text{div}_z} (I_{\theta i} + I_{cti}) \right\} - I_{op} = 0 \quad (2)$$

$$I_{cti} R_{cti} - I_{ct(i+1)} R_{ct(i+1)} = 0 \quad (1 \leq i \leq \text{div}_z - 1) \quad (3)$$

$$R_{rei} = \frac{E_c}{I_{ci}} \left( \frac{I_{\theta i}}{I_{ci}} \right)^{n-1} \times I_i \quad (4)$$

## 3. 解析例

今回は、円形・非円形の空芯無絶縁 REBCO コイルシステムの特性を評価するため、製作した 1/2 スケールの小型実証モデル (Fig.2) を対象に励磁特性評価試験を行い、回路解析のみに基づく本解析手法を用いた計算結果と実験結果を比較した。Fig.3 に励磁特性の比較として、メインコイルによる両端電圧の時間変化の解析結果を実験結果と比較したものを示す。新たな解析手法でも実験結果と定性的に一致していることが確認できた。

## 参考文献

[1] S. Noguchi *et al.*, “A Screening Current Simulation Method Based on Circuit Model with Short Simulation Time for REBCO Pancake Coils,” to be submitted.  
[2] 折原菜月, 秋季低温工学・超電導学会, 2P-p16

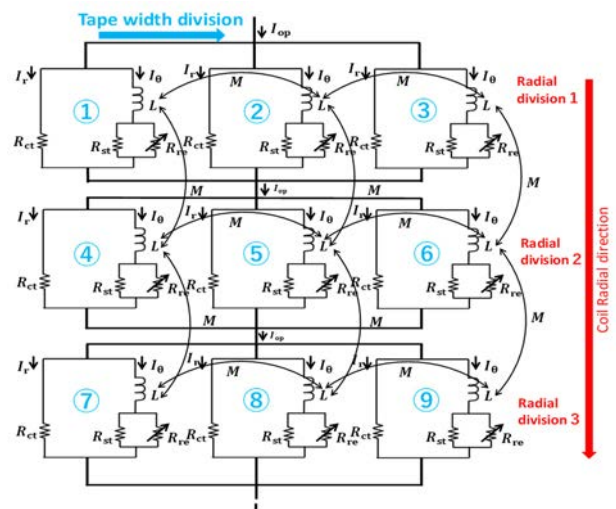


Fig.1 Proposed bidirectional split circuit

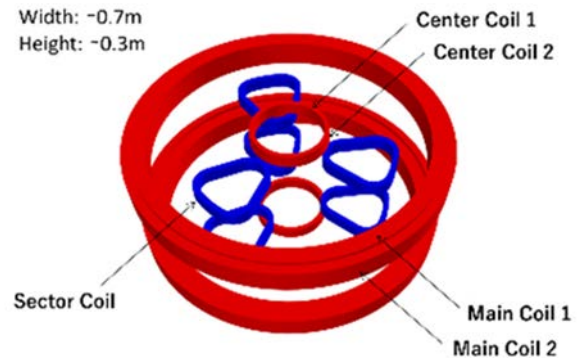


Fig.2 Schematic of Ultra-Baby Skeleton Cyclotron

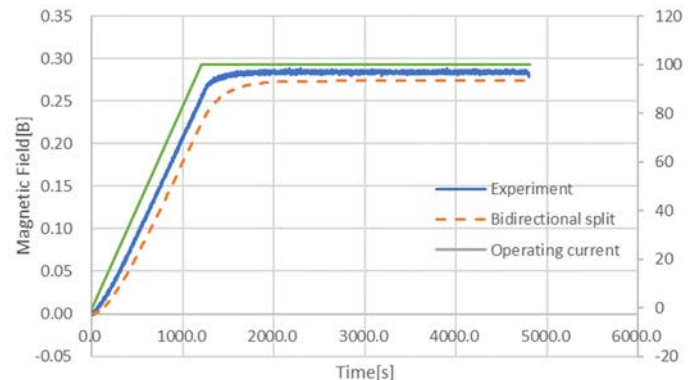


Fig.3 Time variation of voltage in main coils

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 B(22H01478)によったことを付記する。

## 「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(2023 年秋)

## — 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの機械特性評価 —

## Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2023)

## : Mechanical properties of 1/2 scale demonstration REBCO coil system

植田 浩史, 山下 葵, 小前 諒太, 井上 良太, 金 錫範(岡山大); 石山 敦士, 熊谷 墨(早大); 野口 聡(北大);  
渡部 智則(中部電力); 吉田 潤(住重); 福田 光宏(阪大); 西島 元(NIMS)

UEDA Hiroshi, YAMASHITA Aoi, KOMAE Ryota, INOUE Ryota, KIM SeokBeom (Okayama Univ.);

ISHIYAMA Atsushi, KUMAGAI Rui (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);

WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power); YOSHIDA Jun (SHI); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); NISHIJIMA Gen (NIMS)

E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC) の実現に向けて、無絶縁コイル巻線技術と YOROI コイル補強構造を適用した 1/2 スケールの実証モデル「UBSC (Ultra-Baby Skeleton Cyclotron) 用 REBCO コイルシステム」を製作し、特性評価実験を行っている[1]。春季学会では第一報として最初の試験結果を報告[2][3]したが、その後も継続して試験を実施している。今回は、その続報、特にひずみゲージで測定したコイル変形の結果を数値解析と併せて報告する。

## 2. ひずみ測定結果

図 1(a)に示す REBCO コイルシステムが経験する電磁力によって生じるひずみをコイル巻線表面にひずみゲージを設置して測定した。コイルは SUS 製巻棒の REBCO パンケーキコイルで、SUS テープ(厚さ 0.1 mm)を伴巻きしている。また、SUS 製の YOROI 補強構造が施されている。ひずみゲージの配置を図 1(b)に示す。図中の“SU”は上セクターコイルを意味し、図には載せていないが、同様に下セクターコイルは“SL”と結果では表記する。春季学会では、30 K まで冷却後、210A まで励磁した際、セクターコイルで、1) コイル毎に変形が異なる、2) 一部でひずみが 0.2%、3) 変形が非対称であることを報告した[3]。測定の果の一例として 0.4%のひずみが観測されたセクターコイルの結果を図 2 に示す。その後、配線などを見直したが、同様の傾向が観測された。そこで、1) 外棒と巻線間のギャップの影響、2) 遮蔽電流による電磁力、3) 非含浸非円形コイルのため一体変形していない(電流リードが固定端となって巻線長手方向に周回するように変形が伝播)、などの要因を考えた。これらの検証のため、解析を実施した。

## 3. 解析結果

コイルシステム全体が励磁したとき各コイルが経験する磁場分布より電磁力を計算し、三次元有限要素法による応力解析を行った。解析では、いわゆる複合測による一体弾性モデルではなく、SUS テープ、REBCO 線材の巻線構造を考慮した離散化モデルを用いた。ただし、REBCO 線材の積層構造(幅 6 mm, 基板, Hastelloy 50  $\mu\text{m}$ , 超電導層 1  $\mu\text{m}$ , 安定化層 Copper 40  $\mu\text{m}$ )については複合則で考慮した。解析条件としては、(a) YOROI 構造あり+遮蔽電流なし、(b) YOROI 構造あり+遮蔽電流あり、(c) YOROI 構造なし+遮蔽電流なし、(d) YOROI 構造なし+遮蔽電流あり、の 4 通りを考えた。解析結果を図 3 に示す。(a)(b)と(c)(d)を比較すると、YOROI 補強は遮蔽電流磁場の有無に関わらず変形を抑えていることがわかる。その結果、(a)(b)では、最内層の曲線部でひずみが最大となっている。一方、(c)(d)では、再外層の変形が大きく、YOROI の効果がなく、遮蔽電流磁場による応力を考慮すると、0.017%のひずみが生じている。実験結果に近づくものの、まだ 10 倍程度の差がある。非含浸非円形コイルの巻線長手方向の変形の伝播については当日報告する。

## 参考文献

- 2023 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a01 (2023)
- 2023 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a02 (2023)
- 2023 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a04 (2023)

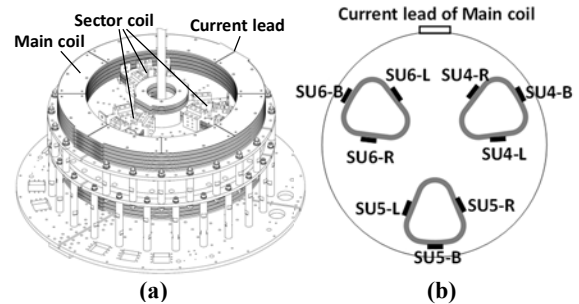


Fig.1 Drawing of Ultra-Baby Cyclotron and (b) Top view of sector coils and arrangement of strain gauges. “SU” means upper sector coil.

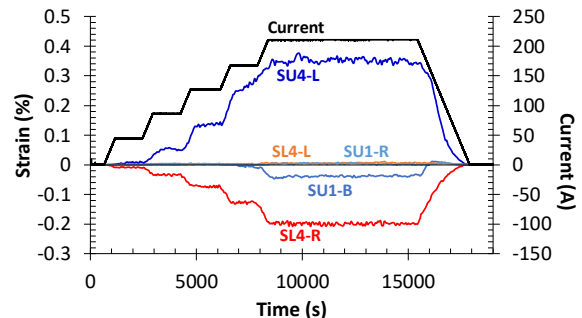


Fig. 2 Experimental results of strain in Sector coils of SU and SL.

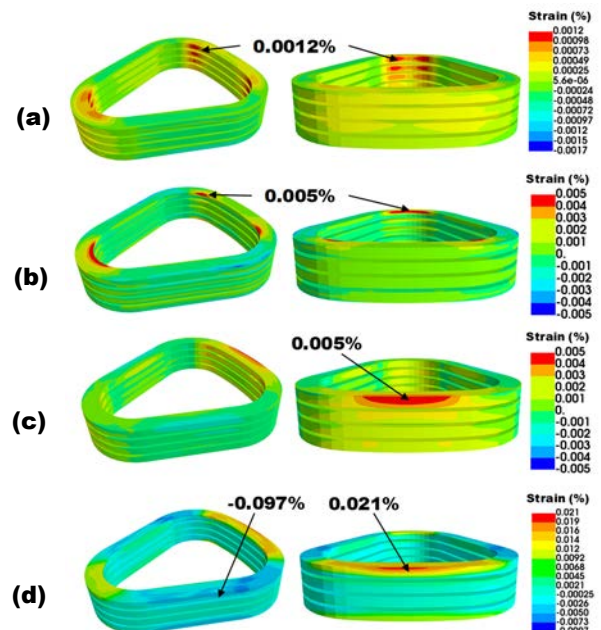


Fig. 3 Numerical results of strain distribution in winding of Sector coils considering (a) YOROI structure without screening current, (b) YOROI structure with screening current, (c) no YOROI structure without screening current, (d) no YOROI structure with screening current.

# 量産評価用ジョイントテスト装置の開発

## Development of joint test equipment for mass production evaluation

横山 彰一, 永濱 秀明, 福山 和宏 (JASTEC)

YOKOYAMA Shoichi, NAGAMAHA Hideaki, FUKUYAMA Kazuhiro (JASTEC);

E-mail: Yokoyama.shoichi@kobelco.com

### 1. はじめに

NMR 超電導マグネットには多くの種類の超電導線が用いられており、それぞれに超電導接続を施している。現在の超電導接続には Pb 合金ハンダを用いているが今後、環境負荷低減の観点から新たな超電導接続が開発、適用されることが想定され、今後、マグネットの超電導接続全種類を相当数評価することが予想される。そこで、試料ホルダーを工夫することで複数同時かつ短時間で超電導接続(ジョイント)テストが行える装置を開発した。本装置は、試料ホルダーは最大 4 個設置でき、1 条件を 10 分で  $10^{-13} \Omega$  オーダーが判定できる。また、試料の印加磁場として並行と垂直磁場で評価できるコイルを用意し、実装条件に合わせた評価ができる。

### 2. 量産評価用ジョイントテスト装置の構成

従来使用してきたジョイントテスト装置 (Magnex Scientific 製) は、高精度磁場測定の NMR プローブを用いジョイント試料を取り付けた超電導コイルの磁場変化を測定し接続抵抗を算出している。本開発では短時間で複数測定するために、市販のホール素子を用いた電流センサとインダクタンス  $10^{-7} \text{H}$  オーダーの 1 ターンループを組み合わせ同等以上感度でかつ、試料ホルダーを小型で非対称形にすることで複数同時測定を可能とした。Table 1 に従来装置と開発装置の諸元を比較した。ジョイント試料に並行もしくは垂直磁場を印加できる超電導コイルが用意され、最大印加磁場はそれぞれ 4T および 3T である。Fig.1 は開発したジョイントテスト装置(並行磁場)の断面構成と外観写真である。永久電流スイッチ (PCS) 部の両端に電流端子に線材をハンダ付けしループに直接通電する。線材の電流変化は純鉄とホール素子による電流センサで測定し、バイアスコイル磁場が影響しないよう配置した。

### 3. ハンダジョイント試料の評価結果

開発したジョイントテスト装置は、最大 4 個のジョイント性能が同時評価できた。なお、2 種線接続の場合、1 試料につき 2 個が直列ジョイントとなるが、2 個とも同じ磁場中に置くことで 2 個同時の合否評価ができ、最大 8 個の合否判定が同時に可能である。装置の測定感度は、10 分で  $10^{-13} \Omega$  が評価でき、初期クリープもほとんど観察されず永久電流状態直後から電流値は安定している。また、1 時間かけて測定した結果、 $10^{-15} \Omega$  以下を測定評価することができた。

更に、並行磁場と垂直磁場の評価ができるため、同じ試料における磁場異方性を測定した。Fig.2 に 2 種類の NbTi 線を Pb 合金でハンダジョイントした代表的な試料の並行と垂直磁場のジョイント抵抗の磁場依存性測定結果を示した。この結果から分かるように、電流 100A での  $10^{-12} \Omega$  の臨界磁場は、いずれも 1.45T 程度であり、顕著な磁場異方性は見られなかった。この結果、ハンダの超電導特性において磁束ピンニングに異方性が無く、ハンダ内の電流路が 3 次元的に形成されていることが分かる。

Table 1 Specifications of conventional and developed joint test equipment.

Item	Conventional	Development
Measurement Sensor	NMR probe	Hall sensor
Sensor Sensitivity $\beta$	$10^{-7}(0.1\text{ppm})$	$<10^{-3}(0.1\%)$
Joint loop inductance	0.07H*	$3 \times 10^{-7} \text{H}$
Sensitivity (per hour)	$1 \times 10^{-12} \Omega$	$1 \times 10^{-15} \Omega$
Measurement time ( $1 \times 10^{-13} \Omega$ )	10 hours	10 minutes
Number of samples	1	4 (2) *
Sample energization method	Direct energization	

\*Numbers in parentheses are for vertical magnetic field measurement.

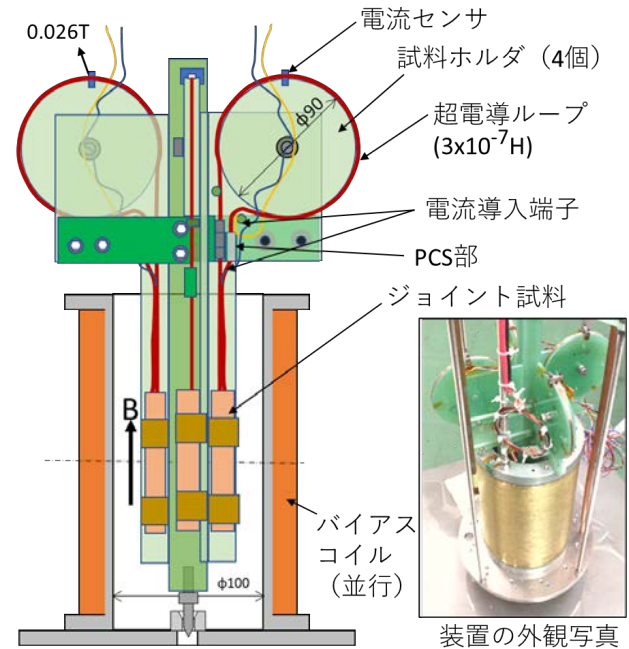


Fig.1 Cross-sectional diagram and photo of the developed joint test equipment.

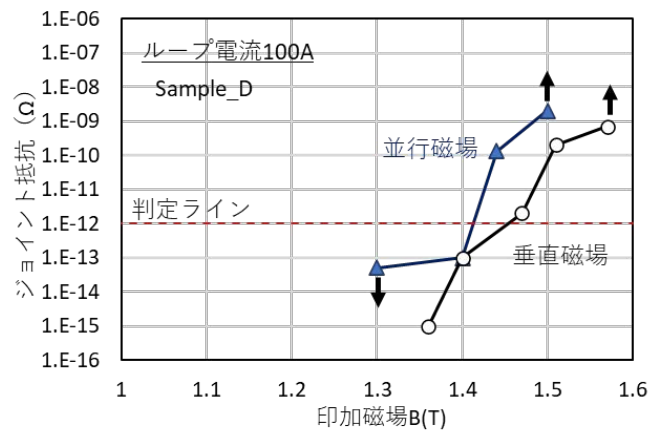


Fig.2 Measurement results of magnetic field dependence of joint resistance of solder joint sample. Comparison between parallel and perpendicular magnetic fields.

# 超伝導 Nb<sub>3</sub>Al ペーストの作製と接続技術

## Nb<sub>3</sub>Al Paste for Superconducting Connections

高島 浩、吉田 良行、古瀬 充穂(産総研)

TAKASHIMA Hiroshi, YOSHIDA Yoshiyuki, FURUSE Mitsuho (AIST)

E-mail: h-takashima@aist.go.jp

### 1. はじめに

銀ペーストは最も広く知られた有機/無機ハイブリッド化合物であり、熱硬化は空气中で 100~200 °C、保持時間は数 10 分程度で行われる。熱硬化後のペーストは、優れた機械的柔軟性、電気的・機械的接続性、ハンドリング性を示すことが知られている。我々は、その簡便さに着目し、銀を化学的に安定な超伝導 NbN に置き換えた超伝導ペーストの開発を行い、線材の接続や超伝導の自立膜の作製に成功した[1]。本報告では、Nb<sub>3</sub>Al を用いた超伝導ペーストの作製について述べる。Nb<sub>3</sub>Al の超伝導転移温度は 18.8 K であり、β-タングステン構造の単相二元合金として知られている中で最も高い転移温度である[2, 3]。最適条件で熱硬化させた後、結晶性、粒子配列、抵抗率の温度依存性を調べた。さらに、このペーストを 1 mm 間隔の 2 つの薄膜 NbTi パッドの接続に適用し抵抗の温度依存性を調べたので報告する。

### 2. 実験

Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ペーストは、平均粒子径 40 μm の Nb<sub>3</sub>Al 金属粉、エポキシ樹脂、溶剤、硬化剤、印刷促進剤を秤量し、遊星遠心ミキサーで予備混合し、ロールミルで混練して均一に分散させた。また、電気抵抗は物理特性測定装置 (Quantum Design, PPMS) を用いて、4 端子法により温度 2 K から 300 K の間で測定した。

### 3. 結果と考察

#### ① Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ペーストによる厚膜作製

Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ペーストを、厚さ 200 μm のメタルマスクを用いて、スクリーン印刷法により SrTiO<sub>3</sub> (001) 単結晶基板に塗布した。大気中 180 °C、20 分の加熱硬化後のペーストの厚さは、150 μm であった。Nb<sub>3</sub>Al ペーストの収縮率は約 25 % であることが分かった。また、XRD 測定の結果、SrTiO<sub>3</sub> (001) 単結晶基板の (001)、(002) 回折ピークと Nb<sub>3</sub>Al の (110)、(200)、(210)、(211) の回折ピークを確認した (Fig. 1)。また、固化後のペーストの断面 SEM を観測し SrTiO<sub>3</sub> (001) 単結晶基板の上に Nb<sub>3</sub>Al ペーストが固化し、立方体の Nb<sub>3</sub>Al フィラーが密に充填され、多くのフィラーが隣接するフィラーと接触していることを確認した。Fig. 2 に厚さ 200 μm のメタルマスクを用いて SrTiO<sub>3</sub> (001) 単結晶基板の上にスクリーン印刷後固化した Nb<sub>3</sub>Al ペースト膜 (膜厚 150 μm) の抵抗率の温度依存性を示す。室温から低温まで金属的な電気伝導性を示し、約 15 K で抵抗率の減少が見られ、約 9 K で抵抗率がゼロになり、超伝導を示すことが分かる[4]。

#### ② NbTi 薄膜パッド/Nb<sub>3</sub>Al ペースト/NbTi 薄膜パッド接続

気相成長法およびスクリーン印刷法により NbTi 薄膜パッド/Nb<sub>3</sub>Al ペースト/NbTi 薄膜パッド接続構造を作製し、PPMS を用いて抵抗値の温度依存性を測定した。その結果を Fig. 3 に示す。15 K から 10 K の領域で抵抗値が緩やかに低下するのは Nb<sub>3</sub>Al ペースト膜に、6.5 K で急激に低下するのは NbTi 薄膜の超伝導転移に起因する 2 つの超伝導転移が確認された。これらの結果は、超伝導薄膜デバイス間集積回路技術において、超伝導線材、超伝導クロスオーバー、超伝導コンタクトからなる 3 つの要素技術の課題克服[5]に繋がる技術と考える。

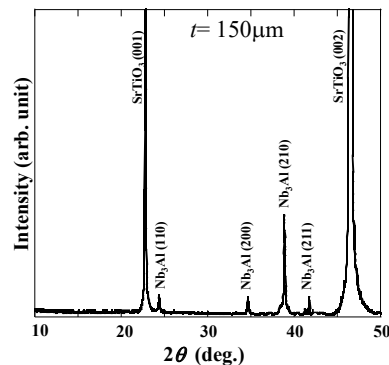


Fig.1 X-ray diffraction (XRD).

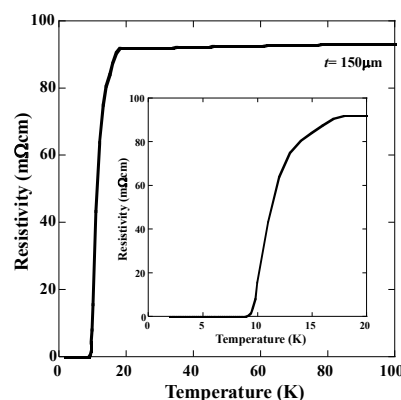


Fig.2 Temperature dependence of resistivity of Nb<sub>3</sub>Al paste ( $t = 150\mu\text{m}$ ).

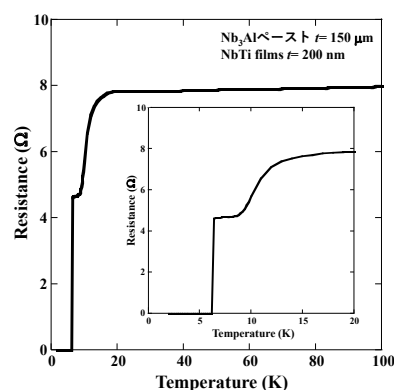


Fig.3 Temperature dependence of joint resistance of NbTi film/ Nb<sub>3</sub>Al paste / NbTi film.

謝辞 本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の援助により行われた。

#### 参考文献

1. Takashima H, Yoshida Y, Furuse M, ACS Omega. 7 (2022) 47405-47410.
2. Wood E. A., Compton V. B., Matthias B. T., Corenzwit E, Acta Cryst.11 (1958) 604-606.
3. Matthias B. T., Geballe T. H., Longinotti L. D., Corenzwit E, Hull G. W., Willens R. H., Maita J. P., Science. 156 (1967) 645-646.
4. Takashima H, Yoshida Y, Furuse M, Cryogenics. 132 (2023) 103689.
5. Wellstood F. C., Kingston J. J., Clarke J., J. Appl. Phys. 75 (1994) 683-702.

## REBCO 線材の低抵抗接合技術と臨界電流特性評価

## Critical current evaluation of low resistance joint between REBCO tapes

江口 朋子, アルベサル 恵子, 萩原 将也, 服部 靖(東芝)

EGUCHI Tomoko, ALBESSARD Keiko, HAGIWARA Masaya, HATTORI Yasushi (Toshiba Corporation)

E-mail: tomoko.eguchi@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

REBCO 線材は磁場中での臨界電流密度が高く、高磁場マグネットへの適用と実用化が期待されている。特に MRI や NMR 向けのマグネットでは、高い磁場安定性を得るために永久電流運転が必要であり、REBCO 線材同士の接合抵抗を  $1 \times 10^{-12} \Omega$  以下とし、超電導接合することが求められる。これまで住友電工と古河電工は、各自社製 REBCO 線材上に液相法にて線材と同組成の接合層を形成し、超電導接合を実現している[1,2]。さらにこれらの線材接合部を組み込んだ超電導コイルにおいて、永久電流運転が可能であることも実証されている[3,4]。

本報告では、長尺安定性に優れながらも接合事例の少ないフジクラ製 REBCO 線材を用い、固定治具なしのコンパクトな接合構造で接合強度を確保すること、超電導接合実証に必要な 10 A 以上の臨界電流値を得ることを目的として、固相と液相を併用した新規接合構造を考案し通電特性を検証した。

## 2. 実験方法

フジクラ製 GdBCO 線材 (銅コート層なし、FYSC-S04, FYSC-S12) を用い、2 本並べた 4 mm 幅線にまたがるように 12 mm 幅線でブリッジするコの字型の接合構造を作製した (Fig. 1)。4 mm 幅線の接合部分およびブリッジは銀コート層を剥離し、超電導層を露出している。まずブリッジの超電導層表面に、接合層として、GdBCO 粒子と Gd/Ba/Cu を含む MOD 溶液とを混合したスラリーを塗布し、仮焼した。次に接合層と 4 mm 幅線とを対向させ加圧治具に挟み、800–840 °C で本焼後、酸素アニールをおこなった。加圧治具をはずして接合試料を液体窒素に浸漬し、四端子法にて電流電圧特性を評価した。また接合層の表面/断面を SEM にて観察、EPMA (電子プローブマイクロアナライザ) にて元素分析した。

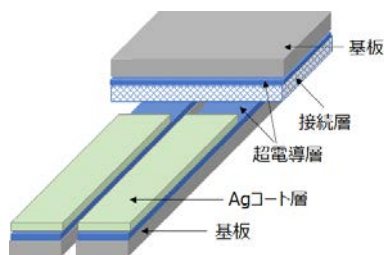


Fig. 1 Structure of a joint sample

## 3. 実験結果・考察

接合層に用いている GdBCO 粒子は、結晶性が高く超電導性に優れているが、粒子同士を焼結して電流パスを形成するには 900 °C 以上の焼成温度が必要であり、超電導線材が劣化する。一方 MOD 溶液を用いた接合は、800 °C 程度で MOD 溶液から GdBCO が生成し線材の特性を維持できるが[1]、接合層厚さが数百 nm と薄く接合強度を得にくい。

本報告の接合層は両者を組み合わせることで、MOD 溶液から生成した GdBCO 微粒子を介して GdBCO 粒子同士が焼結、かつ接合層と線材が接合し、固定治具なしで液体窒素に

浸漬しても剥離しない接合強度を得た。接合層厚さはスラリー粘度や塗布方法により 5–20  $\mu\text{m}$  程度となり、MOD 溶液のみを用いた場合よりも厚膜化している。

Fig. 2 に、仮焼後接合層の表面 SEM 観察像を示す。接合層の超電導性を向上するには酸素数制御が重要であるが、接合層内に適度な空隙が分散しているため、接合層内部まで短時間で酸素アニールができる構造と考えられる。接合試料を本焼、酸素アニールしたあと、接合層断面において、Gd, Ba, Cu, O の EPMA 元素分析をおこなった。接合層の元素比は線材超電導層の元素比と同等であり、すなわち接合層全体が GdBCO 超電導体で構成されていることを確認した。

作製した接合試料の電流電圧特性を Fig. 3 に示す。電圧 1  $\mu\text{V}$  の電流値を臨界電流値  $I_c$  として、 $I_c = 31 \text{ A}$  であった。接合試料の  $I_c$  は、GdBCO 粒子の粒径や結晶性、接合層厚さ、焼成条件等に依存するが、複数の試料で 20 A 以上の  $I_c$  が得られている。このように、固相と液相を併用した新規接合構造にて、数十 A の  $I_c$  が得られることを見出した。今後はさらなる  $I_c$  の向上と、磁場減衰測定法による超電導接合実証に取り組む予定である。

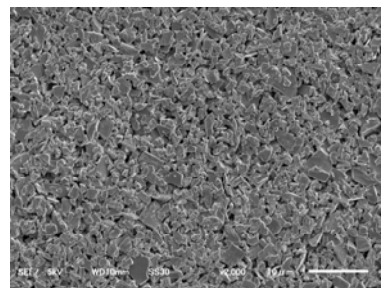


Fig. 2 A surface SEM image of a joint layer

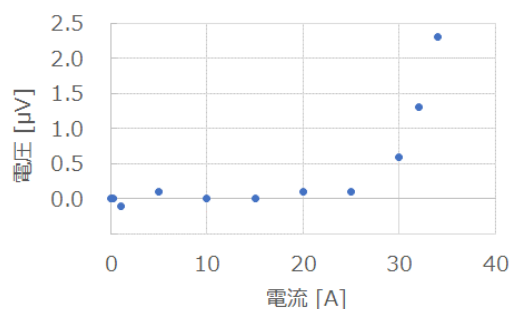


Fig. 3 IV characteristics of a joint sample

## 参考文献

1. K. Ohki, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 30 (2017) 115017
2. S. Mukoyama, et al.: J.Phys. Conf. Ser. Vol. 1054 (2018) 012038
3. Y. Yanagisawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 34 (2021) 115006
4. K. Takahashi, et al.: 低温工学 Vol.55 No.4 (2020) p.268

## Bi-2223 超伝導接合の抵抗と臨界電流の磁場角度依存性

## Angular dependence of resistance and critical current for Bi-2223 superconducting joint

武田 泰明, 西島 元 (NIMS); 中井 優亨, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 北口 仁 (NIMS)

TAKEDA Yasuaki, NISHIJIMA Gen (NIMS); NAKAI Ukyo, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: TAKEDA.Yasuaki@nims.go.jp

## 1. はじめに

我々は Ag シース(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (Bi-2223) 多芯線材 (住友電工 DI-BSCCO®) の超伝導接合の研究開発に取り組んできた[1,2]。これまでに無補強線材の超伝導接合で高い接合臨界電流 ( $I_{cj}$ ) と低い接合抵抗 ( $R_j$ ) を実現した。前回は、1 本の Ni 合金補強線材 (DI-BSCCO® Type HT-NX [3]) の両端を超伝導接合した閉ループ試料の  $R_j$  を、我々が開発した接合抵抗評価装置[4]を用いて調べた結果を報告した[5]。我々は最近、接合に水平磁場を印加できるスプリットマグネットをこの装置に導入した。試料を回転させることで、接合に印加する磁場の方向を変化させることができる (Fig. 1(a))。本講演では、この装置を用いて電流減衰測定により評価した Bi-2223 超伝導接合の  $R_j$  と  $I_{cj}$  の角度依存性[6]を報告する。

## 2. 実験方法

前回の報告[5]の通り、DI-BSCCO® Type HT-NX (長さ 1.6 m) の両端を超伝導接合し、3 回巻きの Bi-2223 閉ループ試料 (直径 100 mm, 自己インダクタンス ( $L$ ) 1.4  $\mu$ H) を作製した。我々が開発した接合抵抗評価装置[4]を用いて、4 K における電流減衰測定を行った。ループの中心に配置した銅コイルを用いてループ電流 ( $I_{loop}$ ) を試料に誘導し、 $I_{loop}$  の時間依存性 ( $I_{loop}-t$ ) を調べた。 $I_{loop} \propto \exp(-R_j t/L)$  に  $I_{loop}-t$  曲線をフィッティングすることで、 $R_j$  を見積もった。さらに  $I_{loop}-t$  から電圧  $V = -L(\Delta I_{loop}/\Delta t)$  を計算し、電圧基準  $V_c = 10^{-8}$  V で  $I_{cj}$  を調べた。磁場印加角度  $\theta$  は Fig. 1(b) に示すように定義し、90°から  $\theta$  が減少するように試料を回転させて、接合に  $\theta = 90^\circ, 85^\circ, 80^\circ, \dots, 5^\circ, 0^\circ$  の磁場 ( $B$ ) を印加した。

## 3. 結果と考察

Figure 2 に 4 K, 0.15–0.28 T での  $R_j$  および  $I_{cj}$  の角度依存性を示す。 $I_{cj}$  は 90°で初期誘導した  $I_{loop}$  (220 A) より低い値をプロットした。高角度ほど  $I_{cj}$  が高く、典型的な Bi-2223 線材と同様の結果であった。 $R_j$  は、(i)低抵抗 (ii)転移 (iii)高抵抗の 3 つの領域に分けられた。90°近傍では  $I_{cj} > I_{loop}$  のため低  $R_j$  の領域(i)が見られた。 $\theta$  が 0 に近付くと  $I_{cj}$  が低くなり、 $I_{loop}$  の  $I_{cj}$  に対する負荷率 ( $I_{loop}/I_{cj}$ ) が増加したため、高  $R_j$  の領域 (iii)が確認できた。領域(ii)では、約 3 桁の  $R_j$  の転移が観察された。 $R_j$  が転移する角度は磁場によって異なるが、接合に対する磁場の垂直成分  $B_x = B \cos \theta$  は  $6\text{--}11 \times 10^{-2}$  T で磁場によらず等しかった。試料の回転により  $B_x$  が増加し、 $I_{cj}$  が低下したことで、負荷率  $I_{loop}/I_{cj}$  が増加し、 $R_j$  が上昇したと考えられる。

## 謝辞

本研究はJST未来社会創造事業JPMJMI17A2およびJSPS 科研費JP22K14482の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Y. Takeda *et al.*, *APEX* **12** (2019) 023003. [2] Y. Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 02LT02. [3] T. Nakashima *et al.*, *IEEE TAS* **25** (2015) 6400705. [4] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30** (2020) 9000204. [5] Y. Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **105** (2023) 110. [6] Y. Takeda *et al.*, *SuST* (in press).

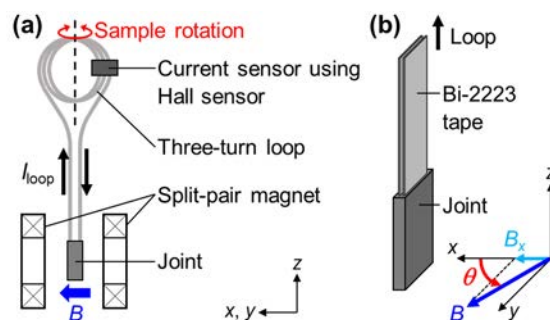


Fig. 1 Schematic illustration of (a) the experimental setup and (b) the angle of the magnetic field,  $\theta$  [6].

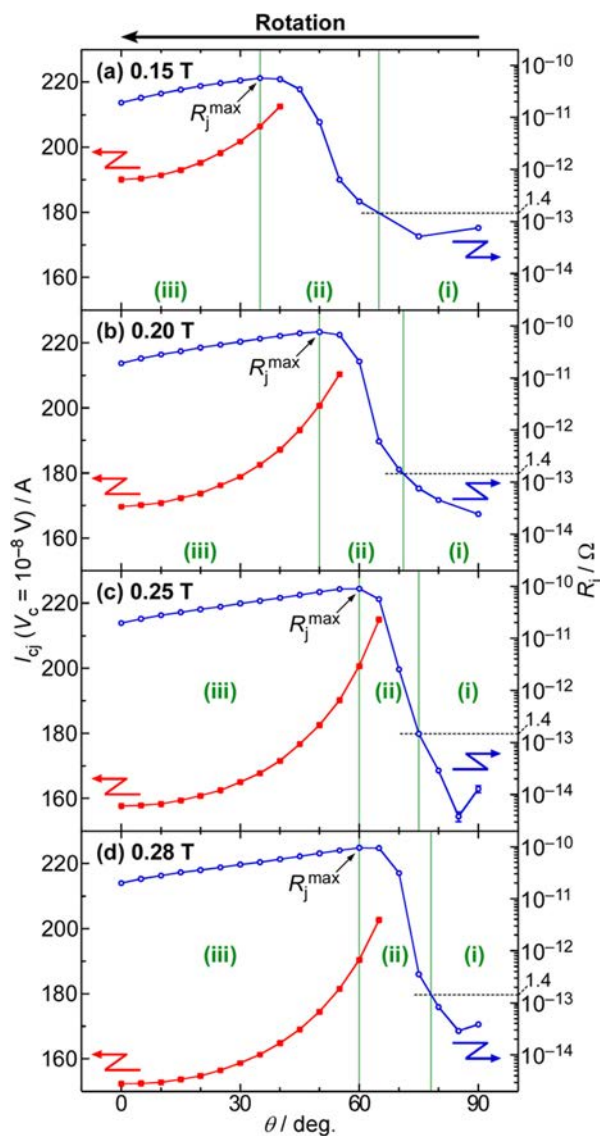


Fig. 2 Angular dependence of  $R_j$  and  $I_{cj}$  at 4 K for (a) 0.15 T, (b) 0.20 T, (c) 0.25 T, and (d) 0.28 T [6].

## Bi2223 線材の小型コイルの永久電流測定 Persistent current measurement of a compact size of a Bi2223 coil

奥村 太一(室工大), 西山 凌平, 影山 彰, 山崎 隼, 上坂 稜, 津川 大輝, 金沢 新哲  
Okumura Taichi (Muroran Institute of Technology), Nisiyama Ryohei, Kageyama Akira, Yamazaki Hayato, Uesaka Ryo,  
Tsugawa Taiki, Kanazawa Shintetsu  
E-mail: 20025056@muroran-it.ac.jp

### 1. はじめに

NMRや超電導リニアでは大きな磁場を発生させるために大電流を流している。永久電流は半永久的に電流が流れるため、消費電力の節約が期待されている。

しかし、Bi2223 線材における接合はまだ開発中であり、Bi2223 線材において永久電流コイルは実用化されていない。接合の例では JIM 法[1]による接合は臨界電流が 50A 前後となっている。

このような研究背景のもとに、本研究では Bi2223 線材によって作製した永久電流コイルの抵抗を測定・評価したので、学会当日で報告する予定である。

### 2. 実験方法

線材は住友電工製の Ni 合金補強 Bi2223 多芯テープ線で、線材とコイルの仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specifications of coil sample

Tape type	DI-BSCCO Type HT-NX
Critical current of tape at 77 K (A)	>170
Filament number of tape	121
Length of tape for coil (m)	4
Inner/outer diameter of coil (mm)	50/53
Self-inductance (mH)	0.1
Insulating material between turns	Kapton tape

永久電流の測定方法は Fig. 1 と Fig. 2 に示し、永久電流スイッチを導入していない。まず、コイル本体を液体窒素に浸して電流を流した (Fig. 1)。次に接合部を超電導状態にして電流源を切り離れた (Fig. 2)。最後にコイルに流れたループ電流をコイル中心に搭載したホール素子によって測定した。

### 3. 実験結果

Fig. 3 に測定したコイルの時間電流特性を示した。最初の 2 時間で電流の値が急激に低下した。その後、電流は時間経過と共に徐々に低下し、24 時間後には 21.2A となった。このような結果から、Bi2223 コイルでは 77K で 20A 程度の永久電流を流すことが出来た。Fig. 3 の挿入図に示したように永久電流開始から 15~30h の間をフィッティングした結果、特性抵抗は  $3.5 \times 10^{-11} \Omega$  であった。このような値は NMR などの応用に可能な値であると考えられる。

### 4. まとめ

作製したコイルについて、ループ電流での通電特性を測定した結果、特性抵抗は十分に低い値が得られた。また、流れた永久電流の値は 20A 以上であったが、接合体の臨界電流が 50A 前後であることを考慮すると今後向上させる必要がある。

### 5. 参考文献

[1] 金 新哲, 柳澤吉紀, 朴任中, 末富, 「高温超伝導線材の接続体および接続方法」, 特願 2018-184184, 2018.09.30

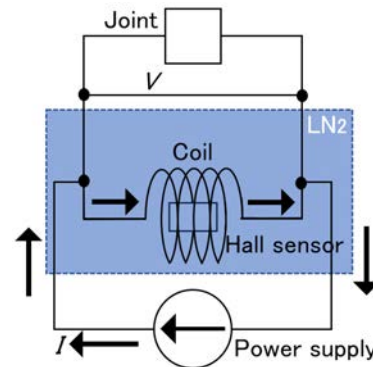


Fig. 1 The first step of the measurement method of persistent current.

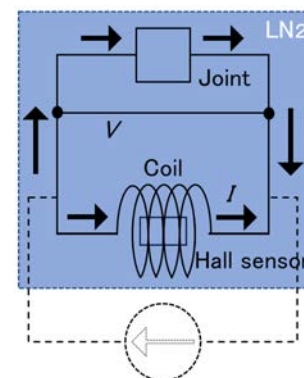


Fig. 2 The second step of the measurement method of persistent current.

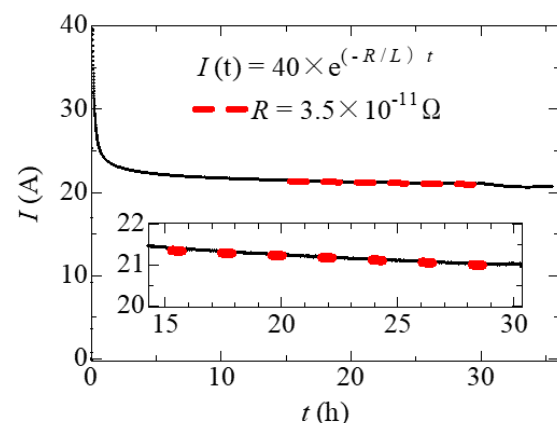


Fig. 3  $I-t$  characteristics of a persistent current coil.

# リール式磁気顕微計測と機械学習による REBCO 長尺線材の電流障害領域の解析: 物体分類と物体検出の比較

## Analysis of obstacle for REBCO long-length coated conductor based on reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy and machine learning: comparison between classification and object detection algorithm

呉 澤宇, Somjaiaroen Natthawiro, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)

WU Zeyu, SOMJAIAROEN Natthawiro, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

E-mail: z.wu@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO高温超伝導テープ線材の空間均一性は実用性能を決めつけるパラメータの一つである。線幅に対してわずか数%の欠陥においても、顕著な局所電界集中が生じることが指摘されている[1]。長尺線材の均一性評価法として現在広く用いられている、Tapestar™に代表される線材の連続磁化測定では、幅方向の空間解像度の不足によって局所的な臨界電流低下領域を十分に検出できない。我々は先行研究において、テープ面内の磁化電流密度( $J$ )の分布を高解像度に計測できるリール式走査型ホール素子磁気顕微法を開発すると共に、その解析に機械学習を導入することで高性能な自動検出に成功した[2, 3]。具体的には、 $J$ 画像に局所不均一性の有無を判断できる物体分類 (Classification) モデルと、電流低下領域 (ドメイン) の位置と大きさを認識する物体検出 (Object detection) モデルを開発した。本研究では、両者の解析モデルの解析結果を比較することで、それぞれの妥当性について議論すると共に、線材内に内包される局所不均一性が線材の臨界電流 $I_c$ に及ぼす影響について考察する。

### 2. 実験方法

Pulse laser deposition (PLD)法による200 m長の商用線材を用いたリール式磁気顕微鏡観察結果に対して、Classificationでは、 $J_c$ 低下ドメインのサイズに応じて、Large、Medium、Smallの欠陥領域と、健全領域の合わせて4つのカテゴリーを設け、分類を行った。この時、教師データの $J_c$ 低下ドメインサイズの統計分布を用い、検出画像にその統計分布が反映されると仮定して、各カテゴリーの検出結果より、 $J_c$ 低下ドメインのサイズ分布を推定した。Fig. 1にClassificationの教師データにおけるそれぞれのカテゴリーでの $J_c$ 低下ドメインのサイズ分布を示す。一方、Object detectionでは、 $J_c$ 低下ドメインそのものの座標位置とサイズを特定できることからより高解像度にかつ詳細な情報を取得できる。 $J_c$ 低下ドメインの特徴に着目し、独立に存在する領域 (Isolate)と複数のドメインが複合的に存在する領域 (Cluster)の2種類のラベルを定義した。

### 3. 結果と考察

ClassificationモデルとObject detectionモデルの解析結果を比較してFig. 2に示す。Classificationでは、200 m全長の計測結果より5 cmごとの区間に分けた $J$ 分布の画像に対して、1757枚のNormal, 1594枚のSmall, 501枚のMediumおよび195枚のLargeの判定結果を得た。教師データの統計分布が反映されると仮定して、各カテゴリーの $J_c$ 低下ドメインのサイズ分布を推定した。Object detectionの検出結果と比較すると、ClassificationによるLargeとMediumのクラスは、Object detectionによる"Cluster"とよく一致することが分かる。また、SmallのクラスはObject detectionによる"Isolate"とよく対応していることが分かる。Fig. 3にObject detectionによる"Isolate"と"Cluster"の検出例を示す。当日はこれらの $J_c$ 低下領域のサ

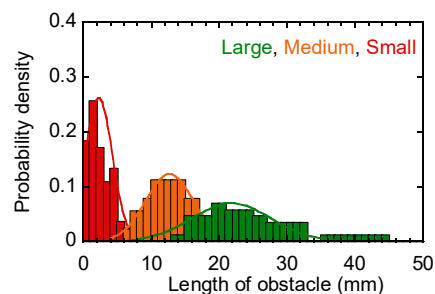


Fig. 1. Statistical distributions of teaching data set for training classification model.

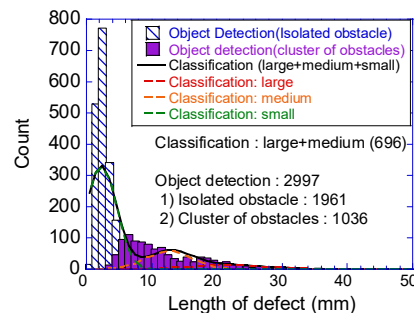


Fig. 2. Statistical distributions comparison between results of 200-m-long  $J$ -map by classification model, and object detection model.

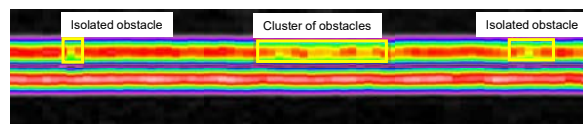


Fig. 3. An example of  $J$ -map with several obstacle regions. The  $J$ -map was categorized as large by classification, and 3 obstacles were detected by object detection.

イズと局所的な $I_c$ 低下に及ぼす影響についても考察する。

一般的には Classification は 100~300 frame/s と Object detection (5~7 fps) に比べて高速な解析が可能で、accuracy も 90% に及ぶのに対し、Object detection は  $J_c$  低下ドメインの場所とサイズなどの情報を抽出できる利点を有する。用途によってそれぞれのアドバンテージを發揮した適用が可能であるといえる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617, JP23K13368 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] M. Friesen and A. Gurevich, *Physical Review B* 63, 064521 (2001).
- [2] N. Somjaiaroen *et al.*, *IEEE TAS*. 32 6601504 (2022).
- [3] N. Somjaiaroen *et al.*, 低温春予稿集(2022), 1A-a05.



## REBCO テープ線を集合させた大容量導体の新しい健全性診断方法の開発

Development of a new soundness diagnostic method for  
conductors with large current capacity assembled REBCO tapes

永田 秀輝, 宮原 誉, 川越 明史(鹿児島大学); 平野 直樹(NIFS)

SHUKI Nagata, MIYAHARA Homare, AKIFUMI Kawagoe(Kagoshima University); HIRANO Naoki (NIFS)

E-mail: k0294201@kadai.jp

## 1. はじめに

高温超伝導線材である REBCO 線材を数本から数十本ほど集合させ、大電流容量化した導体の応用が期待されている。しかしながら、REBCO 集合導体では、機械的な要因による特性劣化の危険性がある。このため、この導体の健全性を数 km にわたって簡便に評価できるシステムが必要である。

我々は、鉄心を用いた磁化測定による新しい健全性診断方法を提案した。その有効性を、数値解析と試作した装置による実験によって確かめた結果について報告する。

## 2. 測定原理

本提案方法では、ギャップのある同じ寸法の鉄心を 2 個用いる。鉄心を用いることにより、比較的小容量の電源で磁界を印加できる。Fig. 1 に本提案方法のシステムを示す。2 つの鉄心に同じ寸法・巻数の通電用コイルとピックアップコイルをそれぞれセットする。2 つの鉄心マグネットは直列接続して運転する。片方の鉄心のギャップ間に被診断導体を入れ、もう一方の鉄心のギャップ間には何も入れない。ピックアップコイルには、サンプルの磁化と鉄損に対応する信号と、発生磁界による誘導電圧が観測される。2 つのピックアップコイルの信号差を測定することによって、被診断導体の状態をより高感度に測定できると考えられる。ピックアップコイル法で交流損失を測定する場合には、信号差を測定するキャンセリングの際に、キャンセル用信号を抵抗分圧などの方法で調節する。今回は、簡便に測定するために、抵抗分圧しないで測定することを想定している。

## 3. 予備実験

一般的に超伝導線材や導体の交流損失を測定する際には、印加磁界の乱れが測定結果に及ぼす影響を低減するために、空芯マグネットが用いられる。本研究では、正常値と異常時の信号差が観測できることが重要であるので、鉄心マグネットでも十分な観測が可能であると考えている。そこで今回はまず、鉄心一個を用いて、原理検証としての予備実験を行った。この予備実験では、Fig.1 の左側のみ使用して、キャンセルなしの実験とした。

正常時と異常時を模擬したサンプルを準備した。臨界電流の異なる YBCO 線材 2 種類を準備した。それぞれの臨界電流は、130A と 117A である。線材 10 本を絶縁して積層した 100mm 長の導体とした。導体の断面寸法は、幅 4mm、厚み

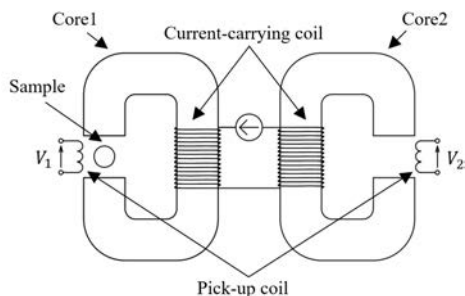


Fig. 1 The setup of the system to diagnose soundness of the large REBCO conductors by the proposed method. In the primary experiment, only left side iron magnet has been used, no cancelling has been carried out.

2mm である。すなわち、臨界電流が約 10% 低下した異常を模擬した。液体窒素中で、サンプルなし・Sample 1 ( $I_c=130A$ )・Sample 2 ( $I_c=117A$ ) のそれぞれで測定を行った。ただし、周波数を 50Hz、通電電流を実効値で 12A とした。このとき、サンプルに印加される磁界振幅は平均的に約 91mT である。

## 4. 実験結果

測定された結果のリサージュ図を Fig.2 に示す。横軸はマグネット電流、縦軸は、ピックアップコイル電圧から得られる平均の磁束密度である。いわゆる  $B-H$  曲線に相当する。サンプルなし、Sample 1,2 のいずれもほぼ一直線となっている。

サンプルごとの違いを詳細に調べるために、原点付近を拡大したものを Fig.3 に示す。□と○、△は、それぞれサンプルなし、サンプル 1 と 2 である。サンプルなしとサンプル 1, 2 に差があるだけでなく、サンプル 1 と 2 にも差があることがわかる。 $I_c$  の異なるサンプル同士でも測定結果に差が観測できていることから、鉄心付きマグネットでも、超伝導導体の磁化の測定が可能であること、臨界電流の差の検出も可能であることが示された。もう一つの鉄心セットを使ってサンプルなしの信号を使えば、測定感度の向上が期待できる。

## 5. まとめ

本研究では、鉄心を用いた磁化測定による新しい健全性診断方法を提案した。その有効性を確かめるために、まず予備実験を行った。その結果、キャンセルなしの状態でも、臨界電流が 10% 程度異なることを十分に観測可能であることを示された。今後は、鉄心を 2 個用いた実験を行う予定である。

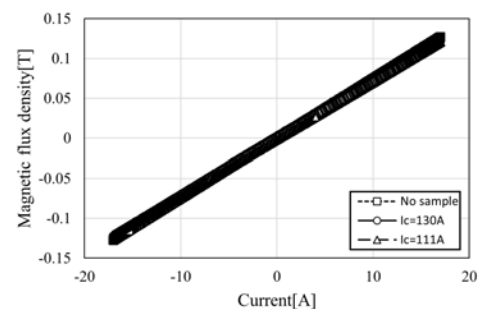


Fig. 2 Measured Lissajous diagrams corresponding to  $B-H$  curve of samples.

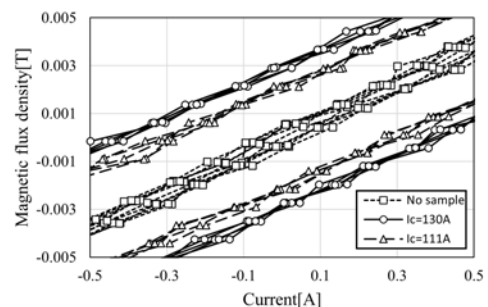


Fig. 3 Magnified measured Lissajous diagrams of samples at the origin. The differences between samples 1 and 2 were observed.

# HTS 線材の $I_c$ 測定に向けたスーパーキャパシタを用いた 2 kA パルス電源の開発 Development of 2 kA pulsed power supply using supercapacitors for $I_c$ measurement in HTS tapes

土屋 雄司、淡路 智 (東北大); 水野 謙一郎 (MTL); 小濱 芳允 (東大)

TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); MIZUNO Kenichiro (MTL); KOHAMA Yoshimitsu (Univ. Tokyo)  
E-mail: tsuchiya@tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

RE 系および Bi 系高温超伝導線材は近年、NMR などの応用に向けて 4.2 K、20 T 以上の低温超強磁場や、20 K 程度の中温領域での高パフォーマンス運用が注目されている。さらに、想定運転領域での線材の臨界電流  $I_c$  が向上しており、超伝導マグネットの設計に向けて 2 kA 超の大電流通電試験が必要である。低温強磁場での限られた空間・冷却能力での 2 kA 級の大電流通電測定には、液体 He 浸漬冷却[1]や精密温調[2]などの手法が報告されている。

これまで我々のグループでは、500 A 級のパルス電源を開発し、超伝導マグネットと組み合わせた低温強磁場中パルス通電による  $I_c$  評価装置を開発してきたが、さらなる電流量の増強が必要であった[3]。

本研究では、ロングパルス磁場の発生などで注目されているスーパーキャパシタ(または電気二重層コンデンサ) [4]を用いて電流量 2 kA のパルス電源を開発し、REBCO 線材における  $I_c$  の磁場・温度依存性を測定した。

## 2. 実験方法

図 1 にパルス電流発生回路の模式図を示す。定格電流 85 A の直流電源、定格電圧 16 V、定格電流 2 kA のスーパーキャパシタ、定格電流 2 kA の電流レギュレータ、及び低インダクタンス測定プローブ[3]を用いて、パルス電流発生回路を作製した。パルス電流波形のパルス幅は 2-5 ms、電流掃引速度は 0.5-1.0 MA/s とした。

プローブにおける電流端子は圧着により接続し、電圧端子はプリント基板の圧着により接続し、電圧端子間距離は 6 mm とした。試料には、フジクラ社製の REBCO 線材(FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、Cu 安定化層厚 40  $\mu$ m)を用いた。

20 T 無冷媒超伝導マグネットおよび He フロー型クライオスタットを用いて低温強磁場(4.2-77 K、0-19 T)の環境でパルス電流を用いた  $I_c$  測定を行なった。

## 3. 実験結果及び考察

図 2(a)に、20 K におけるパルス通電時の電流およびレギュレータ電圧波形を示す。0.5 MA/s の掃引速度にて 2 kA の詳細に波形制御したパルス電流の発生に成功した。また、誘導性電圧および抵抗性電圧から、回路の寄生インダクタンス及び寄生抵抗は、7  $\mu$ H 及び 6 m $\Omega$  と見積もられた。この値は、電流リード等の断面積及び長さから妥当な値であった。

図 2(b)に、20 K、1 T におけるパルス電流発生時の試料電圧及び電流の波形を示す。電流掃引時に誘導電圧が発生したため、電流一定時間の終端 1 ms の間の電圧を平均した。電圧は電流の増加に対して非線形に増加し、電流-電圧特性の  $n$  値フィッティングから  $I_c$  は 1,500 A、 $n$  値は 25.5 と見積もられた。電圧ノイズは、0.8  $\mu$ V (1.3  $\mu$ V/cm)程度であり、 $I_c$  を決定するのに十分な電圧分解能を示した。

当日は、 $I_c$  の磁場・温度依存性の測定結果や、さらなる電流量増強の手法についても報告する予定である。

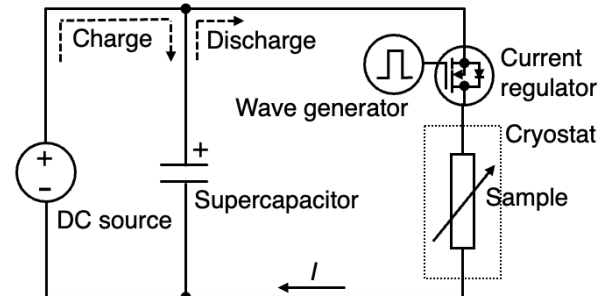


Fig. 1 Circuit diagram of the pulse current source using supercapacitor and current regulator for critical current measurement.

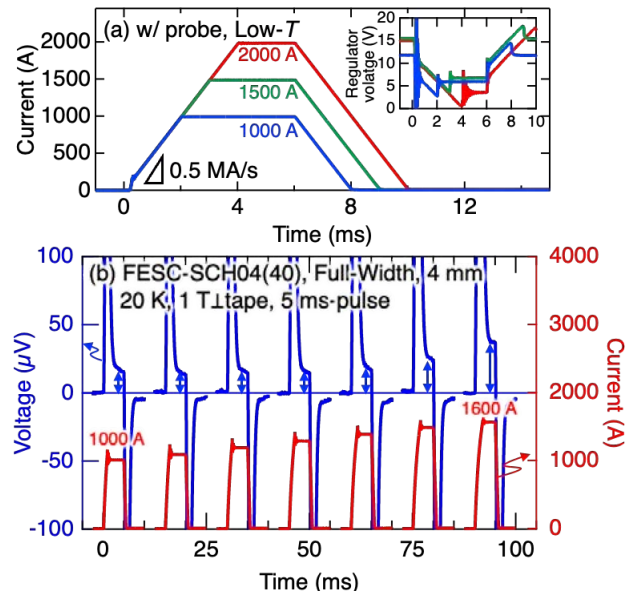


Fig. 2 (a) Wave forms of current and regulator voltage during pulsed currents from 1000-1500 A. (b) Wave forms of current and voltage in a REBCO tape at 20 K and 1 T from 1000 A to 1600 A.

## 謝辞

本研究の一部は、科研費 (22H00104, 22H01522)、NEDO の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。A. Badel 博士及び F. Sirois 博士には有益な議論をいただきました。

## 参考文献

- [1] Y. Miyoshi *et al.*, Physica C 516 (2015) 31.
- [2] C. Barth *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 28 (2018) 9500206.
- [3] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 33 (2023) 8001105.
- [4] K. Matsui *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 92 (2021) 024711.

# 過電流条件における高温超電導線の交流損失特性の解析的検討

## Analytical Study of AC Loss Characteristics in HTS tapes under Overcurrent Conditions

小川 純, 福井 聡, 山田 有宇斗, 伊藤 俊輔, 野口 陽平, 鍋谷 知廣, 荒川 稜太(新潟大学)  
 OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, YAMADA Yuto, ITO Shunsuke, NOGUCHI Yohei, NABEYA Tomohiro, ARAKAWA Ryota(Niigata University)  
 E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超電導線における臨界電流値以下での交流損失特性は十分に知られており、ヒステリシス損失が支配的であるため、周波数に対し比例して交流損失が増加することが実験的にも解析的にも報告されている。これに対し、臨界電流値以上の特性に関しては直流条件において検討されているが、交流条件における損失特性について検討が十分に行われていない。本研究グループでは、ReBCO 線、Bi2223/Ag 線の臨界電流値以上の交流損失特性の通電実験を行い、臨界電流値以上でも交流通電を行うことができることを示している。ReBCO 線、Bi2223/Ag 線の場合、保護層の厚さが臨界電流値以上の許容する電流値が明確に異なり、Bi2223/Ag 線では臨界電流値に対し 100A 以上の通電が可能であることが示された。この実験条件では液体窒素中における浸漬冷却であるため、コイルなどの冷却条件が悪くなる場合には、通電可能条件が異なるが十分な冷却があれば臨界電流値以上でも通電可能であることが示された。本研究では、電磁界解析により ReBCO 線における保護層の厚さと交流損失の関係について検討を行った。

### 2. 数値解析モデル

図1のように ReBCO 線は ReBCO 層、ハステロイ層、銀層で構成されていると仮定し、有限要素法により各層における通電電流と損失の導出を行った。解析に使用した ReBCO 線の特性は、表1に示すように、幅 4mm, n 値 40, 臨界電流値 200A の ReBCO 線を模擬し、100Hz で 300A 通電したときの各層における電流値と損失を銀層の厚さを 1~20 $\mu$ m に変化させたときの特性について調査を実施した。

### 3. 各層における電流密度と交流損失特性

図2に銀層の厚さを 20  $\mu$ m としたときの半サイクルにおける各層における電流分布を示す。電流が臨界電流値以上である 240A を超えると ReBCO 層から銀層に電流が乗り移って流れており、明らかに分流していることが示されている。また、乗り移りのところが若干滑らかになっていることが確認できる。この理由について n 値モデルで考えると過電流状態で超電導

層に発生する電圧と銀の抵抗値を比較すると、臨界電流値を超えたとしても 240A までは超電導層の抵抗のほうが小さいためであり、n 値が変わることによりこの特性が変わることが想像でき、臨界状態モデルであれば完全に 200A のところが閾値となる。

図3に銀層の厚さを変化させたときの各層における電流値と損失特性について示す。銀層が増えることにより銀層が負担する電流は若干増加することがわかる。本グラフの場合、瞬時電流の積分値で表記しており、図2で示したようなわずかな時間の通電であるため小さい電流として取り扱われるが、銀層の厚さが増加することにより抵抗値が下がるので銀層に流れる電流値は増加する。損失は銀層が増加することにより顕著に減少しており、特に超電導層と銀層ともに損失が減少する結果が観測できる。

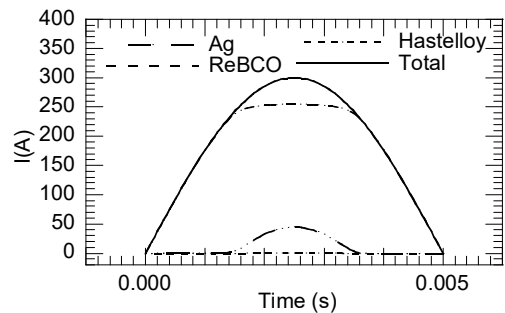
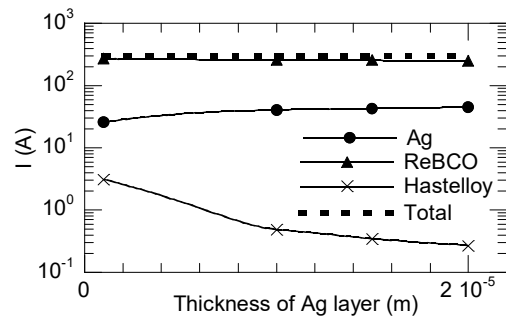
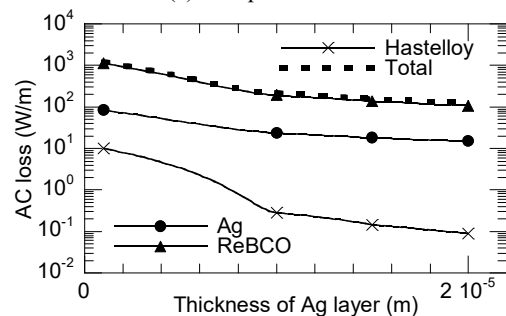


Fig.2 Transport current balance of each layer under overcurrent conditions



(a) Transport current



(b) AC loss

Fig.3 Influence of silver layer thickness on current balance and AC loss characteristics

Table I Specification of ReBCO tape

Critical current (A)	200
n value	40
Thickness of Ag layer ( $\mu$ m)	1~20
Thickness of ReBCO layer ( $\mu$ m)	1
Thickness of Hastelloy layer ( $\mu$ m)	50
Conductivity of Ag layer at 77K (S/m)	$3.46 \times 10^8$
Conductivity of Hastelloy layer at 77K (S/m)	$8.3 \times 10^5$



Fig.1 Numerical model of ReBCO tape

# 1 サファイア-マルチモード円柱共振器法を用いた高温超伝導薄膜の表面抵抗測定の国際標準化に向けた研究開発(1)

## Research and development of surface resistivity measurement of high-temperature superconducting films using one sapphire multimode cylindrical resonator for international standardization (1)

作間 啓太; 山下星穂、關谷尚人(山梨大)、大嶋重利(山形大)

KEITA Sakuma; RION Yamashita; NAOTO Sekiya (University of Yamanashi); OSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)

E-mail: ksakuma@yamanashi.ac.jp

### 1. はじめに

銅酸化物高温超伝導体を用いた高周波デバイス(高温超伝導-高周波デバイス)は常電導体では実現できない性能や機能を実現できる。これは、高温超伝導体が常電導体に比べて数桁低い表面抵抗( $R_s$ )を有しているためである。そのため、高温超伝導-高周波デバイスを設計する際に  $R_s$  は非常に重要なパラメータになり、 $R_s$  の温度および周波数依存性を高精度に評価する手法が求められている。2001年、2誘電体-円柱共振器法が  $R_s$  の測定方法として IEC 国際標準に採用された。しかし、この方法は誘電体の誘電特性やサイズのばらつきなどにより測定精度に問題が生じる可能性がある。そこで、新たな  $R_s$  測定方法の国際標準化に向け、1つの誘電体(サファイア)のみを用いたマルチモード円柱共振器法の開発を試みる。本研究では、1つのサファイア円柱を用いたマルチモード円柱共振器の設計およびシミュレーション結果を報告する。

### 2. 1 サファイア-マルチモード円柱共振器の設計

1 サファイア-マルチモード円柱共振器法では、円柱共振器内に励起される  $TE_{012}$  および  $TE_{021}$  モードを用いて  $R_s$  の測定を行う。そのため、 $TE_{012}$  および  $TE_{021}$  モードが他モードと重ならず、かつ、両モードの共振周波数が近い円柱共振器が求められる。円柱共振器のモードチャートから、円柱共振器の寸法[キャビティ高さ( $h$ ), キャビティ直径( $L$ ), サファイアロッド直径( $l$ )]が  $(l/h)^2 = 3$ ,  $L/l = 3$  となることがわかった。共振周波数を 17 GHz、サファイアの比誘電率を 9.27 とすると、共振器寸法は、 $h = 6.81$  mm,  $L = 35.4$  mm,  $l = 11.8$  mm となる。Fig. 1 に 3次元電磁界シミュレーションを使用し設計したマルチモード円柱共振器を示す。設計の詳細については当日に述べる。

### 3. 1 サファイア-マルチモード円柱共振器の解析結果

Fig. 2 に 3次元電磁界シミュレーションから得られたマルチモード円柱共振器の周波数特性を示す。16.99 GHz および 17.04 GHz にのみ共振ピークが見られた。それぞれの共振ピークの  $Q$  値は数百万と非常に高い値を示した。これは、設計したマルチモード円柱共振器ではサファイアの誘電体損失や銅キャビティの導体損失を無視でき、超伝導薄膜の  $R_s$  を測定できることを示唆している。各共振ピークのモードを確認するため、電磁界分布を解析した。Fig. 3 に 16.99 GHz および 17.04 GHz における電磁界分布を示す。電磁界分布から、16.99 GHz の共振は  $TE_{012}$  モード、17.04 GHz の共振は  $TE_{021}$  モードであることが分かった。以上から、他モードと重ならず、測定に必要なマルチモードが励起できることを明らかにした。

### 4. まとめ

1 サファイア-マルチモード円柱共振器の設計を行い、マルチモード [ $TE_{012}$  モード(16.99 GHz)、 $TE_{021}$  モード(17.04 GHz)] の励起ができることを明らかにした。今後は実際に 1 サファイア-マルチモード円柱共振器を作製し、高温超伝導薄膜 ( $REBa_2Cu_3O_7$ ) の  $R_s$  の測定を試みる。

### Acknowledgement

本研究はVAMASから支援を受けています。

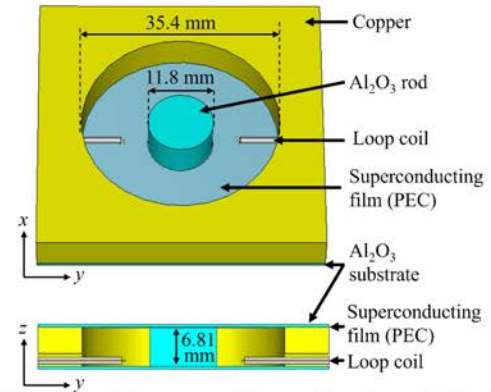


Fig.1 Schematic of the one sapphire multimode cylindrical resonator. The upper film is omitted from x-y plane.

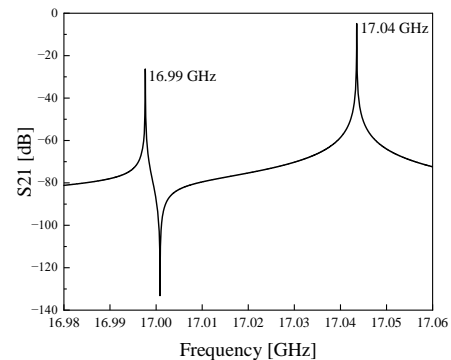


Fig.2 Simulated frequency response of the one sapphire multimode cylindrical resonator.

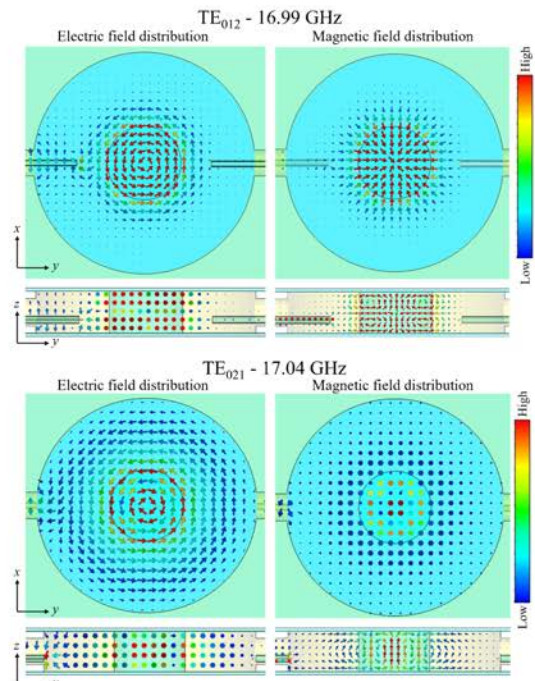


Fig.3 Simulated electromagnetic field distribution of the one sapphire multimode cylindrical resonator.

# BSCCO テープにおける縦曲げ歪と臨界電流の関係

## Influence of edgewise bending to critical current of BSCCO tape

長村光造 (応用科研); 町屋修太郎 (大同大); 武田宗一郎, 山崎浩平 (住友電工)  
 OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ); TAKEDA Soichiro, YAMAZAKI Kohei (SEI)  
 E-mail: kozo\_osamura@rias.or.jp

### 1. はじめに

超電導マグネット等の応用機器に必要な spiral コイルや pancake コイルの設計には臨界電流の定量的な曲げ歪依存性の知見が不可欠である。コイル半径、曲げピッチには下限があり、それを過ぎて半径を小さくする、ピッチ距離を短くすると臨界電流は低下する。REBCO テープにおけるこれらの現象については今年春の学会で報告した[1]。そこで今回は BSCCO テープにおける臨界電流の縦曲げ歪依存性の試験結果について報告する。

現象は BSCCO と REBCO では同じではない。その由来は超電導層の構造的差に強く依存する。REBCO では1層の薄い連続した面的な超電導層が分布する。BSCCO では面的ではあるが多数の超電導層に別れて Ag 相中に分布している。その差異は特に縦曲げを加えたときに顕著になる。その歪が破断歪を越えたとき、超電導層は歪が大きいところから順次破断する。REBCO では1層の超電導層の中で連続的に破断が進行する。一方 BSCCO では層状の超電導層が離散的に分布するので破断の進行はマトリックスの Ag 相を経由して不連続に起こるものと推定される。

そこで本報告では BSCCO テープに特有な現象が縦曲げ歪による臨界電流の変化にどのように現れるかに注目して研究を行った。

### 2. 実験方法

縦曲げの治具を図1に示す。薄いテープを単独で縦曲げすることは出来ないので、図1に示すように brass のサポーターにテープを貼り付けて曲げ歪を付加した。テープには最大の引張曲げ歪( $\epsilon_t$ )から最大圧縮曲げ歪( $-\epsilon_b$ )まで連続に歪が変化して分布することになる。

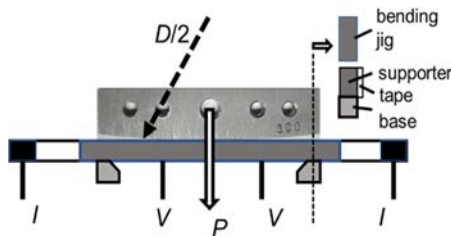


Fig. 1 Edgewise bending jig

曲げ半径(D/2)が異なる幾つかの治具を用いて実験を行い、縦曲げの歪分布とその臨界電流への影響を検討した。まず多層構造のテープを直径 D まで曲げた時に内部の各層に生ずる 応力・歪状態を解析的に求め、実験的には直径 D まで曲げた状態で臨界電流測定を行った。これにより BSCCO テープを縦曲げたときに圧縮破断するか、引張破断するかを判定することを試みた。

### 3. 実験結果と考察

図2に1000mm から500mm の範囲の曲げ半径を持つ治具を用いて臨界電流測定を行った結果を示す。たとえば半径 571mm の治具を押し当て、荷重 P を増加させると、最初は臨界電流の減少はわずかであるが、200mm を越えると急激に臨界電流は減少する。半径1000mm の場合はほぼ減少しないが、それより小さい、いずれの半径でも同様の傾向を示す。この変化は図1に示す荷重が低い時には曲げ治具がまだ試料に当たっていないが、荷重が増加するにつれて臨界電流は減

少し、一定になった時に試料が曲げ治具に全体わたって均質に曲げられたと考えられる。曲げ半径が1000mm の時はその現象は僅かであり、超電導層の破断が起こっていないが、臨界電流が著しく減少するところでは超電導層が破断されていて、その減少量は破断した割合を示す。

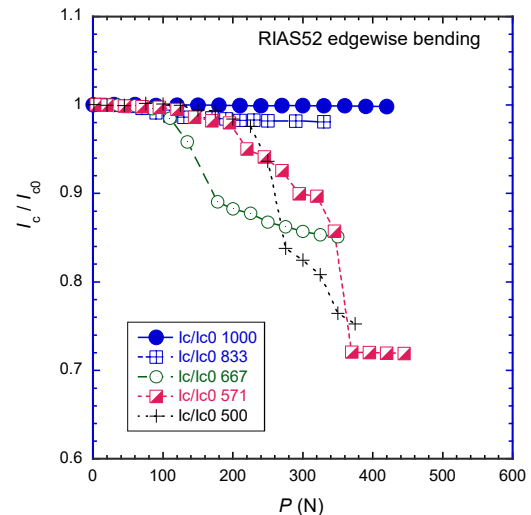


Fig. 2 Bending load dependence of critical current

超電導状態から常伝導への遷移の鋭さを示す n-値の曲げ荷重依存性を図3に示す。このデータは図2の臨界電流測定と時に得られた値である。全体に曲げ半径に対する変化は臨界電流の変化と同様である。n-値の減少は超電導/常伝導遷移は曲げ歪・曲げ応力からの複雑な影響があることを示唆するものである。縦曲げでは圧縮曲げ歪から引張曲げ歪まで連続に内部歪は変化しているため、その解析のため数値解析を行ったので報告したい。

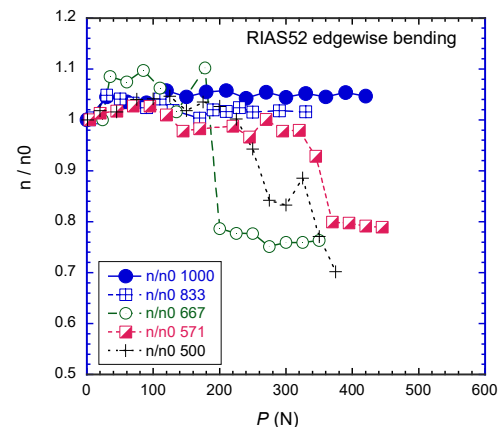


Fig. 3 Bending load dependence of n-value

### 参考文献

[1] K. Osamura, and S. Machiya: Abstracts of CSSJ Conference Vol 105 (2023) 15

# 一方向溶融成長(SDMG)法による様々な内外径のリング状 REBCO 溶融凝固バルクの育成 Fabrication of ring-shaped REBCO melt-textured bulks with various inner and outer diameters by the Single-Direction Melt Growth (SDMG) method

元木 貴則, 仙波 実怜, 遠藤 淳, 國本 慧太, 下山 淳一(青学大)

MOTOKI Takanori, SEMBA Mirei, ENDO Jun, KUNIMOTO Keita, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

## 1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。溶融凝固バルクは通常、Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法に代表されるバルク上面に設置した種結晶を起点として徐冷による溶融凝固で育成されており、卓上 NMR 応用等に適するリング形状のバルクは育成後の円柱状バルクの中心部を機械的に加工して作製されてきた。これまで我々は、鉛直一方向のみに結晶成長が進行し、全体が単一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの育成が可能なる Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた<sup>[1]</sup>。本手法は、バルクが鉛直方向に一次元的に結晶成長するため、原理的にリング形状のような複雑形状であっても直接育成が可能である。これまでに小型の SDMG 法 DyBCO リングバルクにおいて TSMG 法に比べて高いリング内磁場 ~1.8 T (77 K) を報告している<sup>[2]</sup>。今回は、内径の異なる大型リングバルク育成を試みたので結果を報告する。

## 2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO 溶融凝固バルクを [001] 方位が鉛直方向になるよう切り出した平板を seed plate とし、その上に外径 50 mm, 内径 25–15 mm のリング形状に成型した DyBCO もしくは YBCO 焼結体ペレット (厚さ 10–20 mm) を設置し、seed plate の  $T_p$  以下で結晶成長させることでバルク全体が  $c$ -growth 領域からなるリングバルクを直接育成した。なお、REBCO ペレットには、TEP 社製混合粉 (RE123:RE211 = 7:3) に 10 wt% の  $Ag_2O$  および 0.5 wt% の  $CeO_2$  をそれぞれ混合したものを用いている。すべてのバルクについて、seed plate から切り離した後、弱い還元アニールと長時間の酸素アニールを行った。液体窒素浸漬下で 2.5 T までの磁場中冷却後、リング表面およびリング内部の捕捉磁場分布を評価した。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 に外径 50 mm で異なる内径のリングペレットから直接育成したバルクの外観を示す。いずれのバルクも溶融凝固後に成型時より 15–20% 収縮したが、リング形状を維持しており様々な内径のリングバルクの直接育成に成功した。内径、外径、厚さの異なるリングバルクの特徴を比較するため、内部に一樣な電流密度 ( $10^4 \text{ A cm}^{-2}$ ) が周回すると仮定した場合のリング中心の捕捉磁場  $B_{T,calc}$  を計算し、作製したリングバルクの 77 K におけるリング内最大捕捉磁場  $B_{T,max}$  と比較した。Fig. 2 に内径 (ID), 外径 (OD), 厚さの異なるバルクにおける  $B_{T,calc}$  を示す。また、この値を用いて、実際に作製したリングバルクのサイズから見積もった  $B_{T,calc}$  に対する  $B_{T,max}$  を Fig. 3 に示す。点線は  $B_{T,calc}$  と  $B_{T,max}$  が等しい、すなわち平均的なリング内の電流密度が  $10^4 \text{ A cm}^{-2}$  程度であることを示す。作製したいずれのバルクも  $B_{T,calc}$  と同等かそれを上回る捕捉磁場を示しており、SDMG 法が様々な内外径のリングバルクの直接育成に有用であることを示している。

クも  $B_{T,calc}$  と同等かそれを上回る捕捉磁場を示しており、SDMG 法が様々な内外径のリングバルクの直接育成に有用であることを示している。

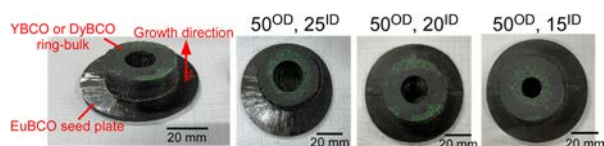


Fig. 1. Appearance of SDMG-processed DyBCO and YBCO melt-textured ring-bulks fabricated using ring-shaped dies with outer and inner diameters of 50 mm and 25–15 mm, respectively.

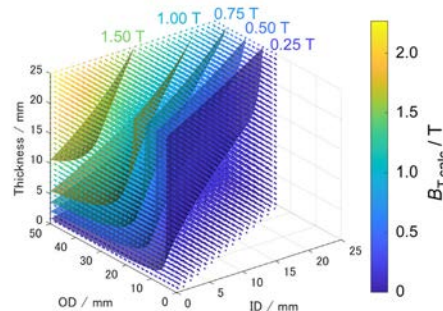


Fig. 2. Calculated trapped field,  $B_{T,calc}$ , at the center of the ring-bulks for various bulk sizes assuming uniform current density of  $10^4 \text{ A cm}^{-2}$ .

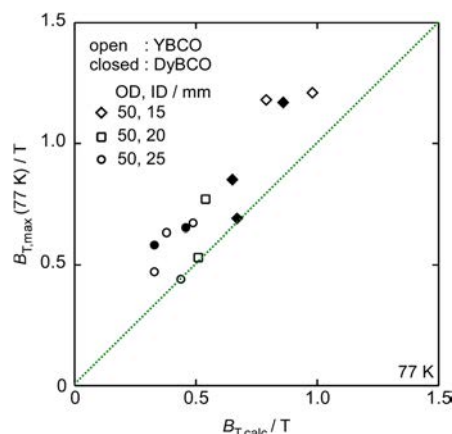


Fig. 3. Relationship between maximum trapped field at 77 K inside the ring of the prepared bulks and  $B_{T,calc}$ .

[1] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** 094003 (2022)

[2] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **16** 095501 (2023)

## 謝辞

本研究は、NEDO 未踏チャレンジ 2050 の委託業務 (22M1C01Y) の結果得られたものである。

# SDMG バルクを種板とした単一ドメイン REBCO 溶融凝固バルクの作製 Fabrication of single-domain REBCO melt-textured bulks on SDMG seed plates

仙波 実倫、元木 貴則、國本 慧太、遠藤 淳、下山 淳一 (青学大)

SEMBA Mirei, MOTOKI Takanori, KUNIMOTO Keita, ENDO Jun, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5622072@aoyama.jp

## 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123, RE: 希土類元素)は液体窒素温度 77 K を超える高い  $T_c$  を有し、磁場下においても高い  $J_c$  を示す。RE123 溶融凝固バルクは内部を周回する永久電流により永久磁石を超える高磁場の捕捉が可能であり、磁気浮上システムや卓上 NMR などへの応用が期待されている[1]。一般的な作製法である Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法で作製した RE123 溶融凝固バルクは種結晶からの成長方向によって、微細組織と超伝導特性が異なる *a*-growth 領域と *c*-growth 領域が共存する。一方、Fig. 1 に示すようにバルクより包晶温度 ( $T_p$ ) の高い既製の TSMG 法 RE123 溶融凝固バルクを seed plate に用い一方方向に結晶成長させる Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法[2][3]は、成長するバルクが単一の結晶成長領域のみからなり、形やサイズに依らず均質なバルクを再現性良く育成できることが特徴である。本研究では、SDMG 法で作製した GdBCO 溶融凝固バルクを種板とし、その上に再度 SDMG 法により単一ドメイン YBCO 溶融凝固バルクの育成を試み、その超伝導特性や捕捉磁場特性、微細組織、結晶性を評価した。

## 2. 実験方法

RE に Y を選択し、TEP 社製の Ag および CeO<sub>2</sub> を適量添加した Y123-Y211 混合粉末を 100 MPa の一軸プレスにより 30 mm $\phi$  にペレット成型し、バルクの緻密化のため短時間の事前溶融を行った。続いて、TSMG 法 Eu123 バルク上に SDMG 法で育成した Gd123 を seed plate とし、*ab* 研磨面上に Y123 前駆体ペレットを置き、Y123 のみが部分溶融状態になるように最高保持温度を設定し、徐冷過程を加えた温度パターンで結晶成長を行った。得られた溶融凝固バルクを種板から切り出した後、Y/Ba 固溶を低減するため適当な還元雰囲気下でポストアニールを行い、最後に O<sub>2</sub> 気流中、400 $^{\circ}$ C での長時間の酸素アニールによりキャリアドープ状態を制御した。得られた試料の液体窒素浸漬の磁場中冷却での捕捉磁場分布を調べた後、*ac* 研磨面の微細組織観察とバルク中央部から鉛直方向に切り出した小片試料の SQUID 磁束計による磁化特性、XRD による結晶性の評価を行った。

## 3. 結果と考察

Fig. 2 に SDMG 法で作製した板状の Gd123 溶融凝固バルク(seed plate)上に再度 SDMG 法で育成した all *c*-growth Y123 溶融凝固バルクの外観写真を示す。Gd123 バルクを溶融させることなく Y123 バルク上面まで溶融凝固バルク特有の光沢がみられ、上面まで均一に結晶成長することがわかった。Fig. 3 に 1.5 T 着磁後の all *c*-growth Y123 溶融凝固バルクの、捕捉磁場分布を示す。極めて円形度の高い捕捉磁場分布を示し、最大捕捉磁場 0.74 T を記録した。SDMG 法で育成した all *c*-growth バルクを種板とすることでより高均質なバルク育成が可能であることを示唆している。講演では、育成した Y123 バルクの結晶性、微細組織、臨界電流特性なども併せて報告する。

## 参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, *J. Magn. Reson.* **259** (2015) 68.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13** (2020) 093002
- [3] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003

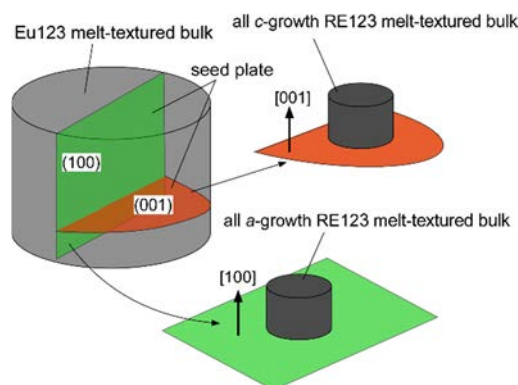


Fig. 1. Schematic illustration of the SDMG-processed RE123 bulks with entirely *a*- or *c*-grown regions prepared on Eu123 seed plates.

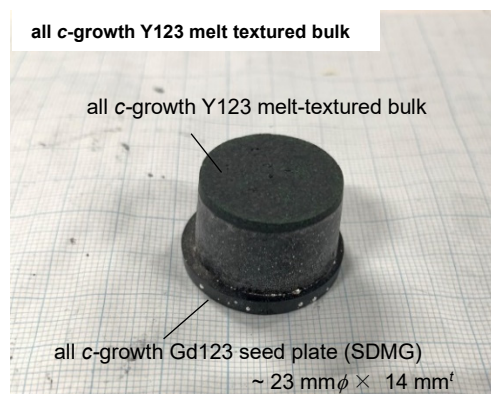


Fig. 2. Photograph of a SDMG-processed all *c*-growth Y123 melt-textured bulk grown on a Gd123 seed plate which was also prepared by the SDMG method.

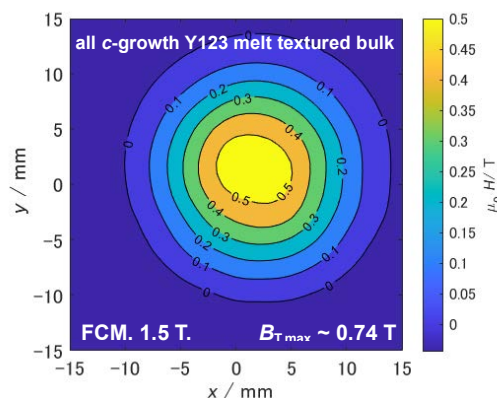


Fig. 3. Trapped field distribution at 77 K of all *c*-growth Y123 (23 mm $\phi$   $\times$  14 mm $f$ ) melt-textured bulk grown on SDMG-processed Gd123 bulk.

# Kドーピング Ba122 多結晶バルクの捕捉磁場特性評価

## Evaluation of trapped field characteristics of K doped Ba122 polycrystalline bulk

菊池 慎次郎, 石渡 翔大, 徳田 進之介, 山本 明保(東京農工大学)

KIKUCHI Shinjiro, ISHIWATA Shota, TOKUTA Shinnosuke, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)

E-mail: s222750q@st.go.tuat.ac.jp

### 1. はじめに

鉄系高温超伝導体[1]の一種である  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  (Ba122) は元素置換等によって超伝導が発現し、 $T_c$  と  $H_{c2}$  が高く、銅酸化物系と比較し粒界特性に優れている[1]ことが知られている。そのため多結晶材料形態での強力磁石応用が期待されており、2015 年には 1 T を捕捉する K ドープ Ba122 バルク磁石 [2] が報告されている。一方、バルク磁石の応用として期待される NMR 等には優れた磁場均一性および時間的安定性が求められる。これまで我々のグループでは、Co ドープ Ba122 多結晶バルクの構造特性・超伝導特性に対する高エネルギー混合の効果[3,4]や、K ドープ Ba122 多結晶バルクの放電プラズマ焼結法による合成[5]について報告している。本研究では、放電プラズマ焼結法によって K ドープ Ba122 多結晶バルクを合成し、その捕捉磁場特性を評価した。

### 2. 実験方法

不活性雰囲気グローブボックス内で、 $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  の組成となるように単体金属を秤量し、ボールミル混合をすることで K ドープ Ba122 前駆体粉末をメカノケミカル合成した。この前駆体粉末を内径 30 mm  $\phi$  のグラファイトダイに詰め、40 MPa の一軸加圧下にて、 $+50^\circ\text{C}/\text{min}$  のレートで  $600^\circ\text{C}$  まで昇温し、10 min 保持した後、室温まで冷却することで、直径 30 mm、厚み 5 mm の円盤状、K ドープ Ba122 多結晶バルク体を得た。捕捉磁場特性の評価は、バルク表面の上面と下面の中心に設置した 2 つのホール素子(Hall-1, Hall-2)を用いて行った。40 K で 3 T の外部磁場を印加し、5 K まで磁場中で GM 冷凍機により冷却した後、約 1 T/h のレートで外部磁場を取り除くことで着磁を行った(磁場中冷却着磁)。着磁後、0.1 K/min のレートで昇温し、5-40 K における捕捉磁場の温度依存性を測定した。

### 3. 結果・考察

同等の熱処理条件で合成した直径 10 mm の小型バルク試料の粉末 XRD 回折パターンを Fig.1 に示す。不純物ピークがみられないことから、ほぼ単相の K ドープ Ba122 試料が得られたと断定した。軸長は  $a = 3.9135(8)\text{\AA}$ 、 $c = 13.3313(4)\text{\AA}$  であり、単結晶[6]の軸長との比較から見積もられる K ドープ量は約 38% であり、報告されているオプティマルドープ量と比較すると若干アンダードープとなった。次に、やや大型の直径 30 mm のバルク試料を試作した。Fig.2 にバルク試料の捕捉磁場の温度依存性を示す。着磁後、5 K においてバルクの上面で 1.92 T、下面で 1.90 T の捕捉磁場が得られた。この値は、先行研究(バルク表面: 0.68 T) [2]と比較して 2 倍以上の捕捉磁場に相当する。また、バルクの上面と下面で同等な捕捉磁場が得られたことは試料内の超伝導特性の均一性を示唆する。着磁後、昇温するにしたがって捕捉磁場は徐々に減少し、10 K で 1.54 T、20 K で 0.75 T となり、33 K でゼロとなった。この温度は同等の熱処理条件で合成した直径 10 mm の小型バルク試料の  $T_c^{\text{mag}}$  (33 K) と一致した。

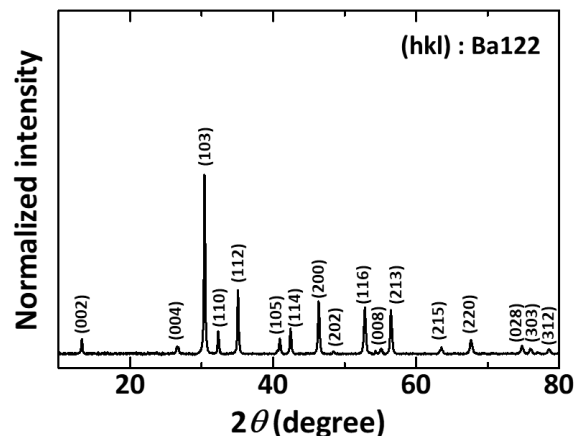


Fig.1 Powder X-ray diffraction pattern.

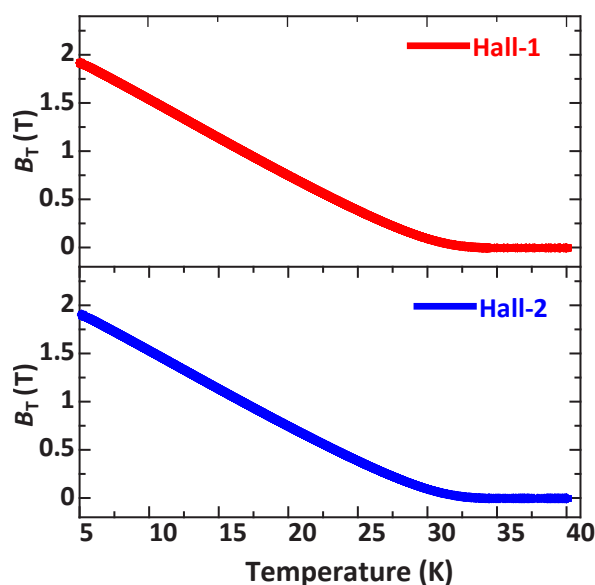


Fig.2 The temperature dependence of trapped field.

### 謝辞

本研究の一部は JST CREST (JPMJCR18J4), JSPS 科研費 (JP21H01615) の支援を受けたものである。

### 参考文献

1. H. Hosono, et al.: Mat. Today, Vol. 21 (2013) 278
2. J. D. Weiss, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 28 (2015) 112001
3. S. Tokuta and A. Yamamoto: APL Mater., Vol. 7 (2019) 111107
4. S. Tokuta, Y. Shimada and Y. Yamamoto: Supercond. Sci. Technol., Vol.33 (2020) 094010
5. S. Tokuta et al.: iScience, Vol. 25 (2022) 103992
6. S. Kasahara et al.: Phys. Rev. B., Vol. 81 (2010) 184519



# 形状変更した軟鉄ヨークを用いた REBCO バルク磁石のパルス着磁特性の評価

## Evaluation of pulse-field magnetization characteristics of REBCO bulk magnets with shape-modified soft-iron yoke

SHANG Jiahao, 横山 和哉(足利大); 岡 徹雄(芝浦工大)

SHANG Jiahao, YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: g22608@g.ashikaga.ac.jp

### 1. はじめに

近年問題となっている温室効果ガス削減のために、大型洋上風力発電の導入や、航空機や大型船舶の電気推進装置への転換が期待されている。これらの装置においては、発電機や電動機の小型・軽量化が重要な課題であり、磁場発生装置としてバルク磁石が検討されている。バルク磁石は REBCO バルク体を小型冷凍機で冷却し、着磁することにより、従来の永久磁石や電磁石よりも大きな磁場を発生させることができる。着磁手法には磁場中冷却法 (FCM) やパルス磁化法 (PFM) 等があり、後者はオンサイトにおいてリアルタイムで着磁できる利点があるため、産業応用には有効な手法である。一方で、PFM による捕捉磁場は FCM のその半分程度であり、捕捉磁場を向上させる様々な手法が提案されている。著者らは、PFM においてパルス幅を延ばすことで捕捉磁場を向上させる目的で用いられている軟鉄ヨークに注目し、大きさや形状を変更することで捕捉磁場の向上と着磁効率の改善について検討している。これまでに、一般的な円柱型のほかにリング型やクロス型ヨークについてパルス着磁特性を評価してきた。本文は、更なる着磁効率の改善を目指して、特殊形状の軟鉄ヨークを考案し、着磁特性を評価する。

### 2. 実験方法

Fig. 1(a)に着磁コイルを取り付けたバルク PFM システムの概要を示す。REBCO バルク体を2つの軟鉄ヨークで挟む形になっており、バルク体と冷凍機のコールドヘッドに接続されたサンプルステージの間にパーメンジュール製の円柱型のヨークを配置している。もう一方は、Fig. 1(b)に示す形状や大きさの異なる軟鉄ヨークを用い、着磁コイルのフランジに固定されている。

実験は、 $\phi 60 \times 20$  mm の GdBCO バルク体(日本製鉄製)を、2 段 GM 冷凍機 (RM20, アルバック製)で冷却し、温度調整器を用いて 20~50 K に調整する。各温度において 3.9~6.2 T のパルス磁場(立上時間: 10 ms, 全パルス幅: 100 ms)を1回印加し、試料表面の中央部に貼りつけたホールセンサ及びセルノックス抵抗温度計により、着磁中の磁束密度及び温度の時間変化を測定する。着磁後、コイルを取り外し、3D ホールセンサを用いて磁極表面(試料表面から約 4 mm)の磁束密度分布を測定する。また、実測データから総磁束量を算出した。

### 3. ヨーク形状の検討

Fig. 2 に、クロス型ヨークをバルク体の GSB または GSR に配置した場合の総磁束量の比較を示す。いずれの配置でも総磁束量に大きな差異がない結果となった。このことから、GSB

と GSR の両方、又はどちらかににヨークを配置する形状を実現するために、Fig. 3 に示す軟鉄ヨークを考案した。

### 4. まとめ

REBCO バルク磁石の実用化においては、捕捉磁場の向上と同時に着磁効率の改善が求められている。本文は、軟鉄ヨークとバルク体の GSB/GSR 配置の関係を考慮して、特殊形状の軟鉄ヨークを考案した。発表では、これらのヨークを用いた場合の着磁特性を報告する。

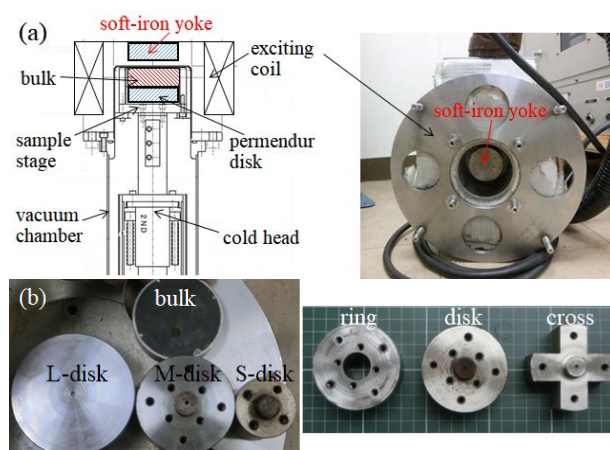


Fig. 1 (a) Schematic of bulk PFM system and (b) soft-iron yokes

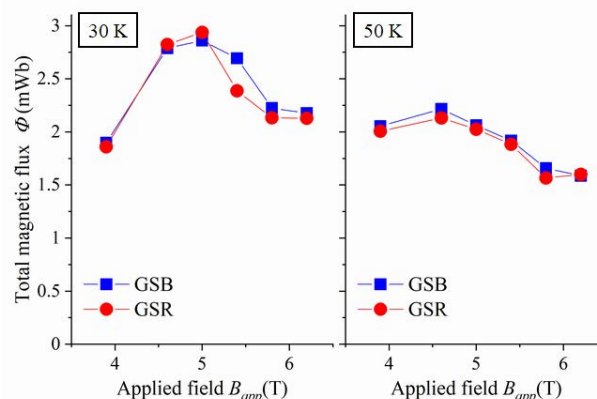


Fig. 2 Comparison of total flux between GSB and GSR arrangements when using a cross-shaped yoke

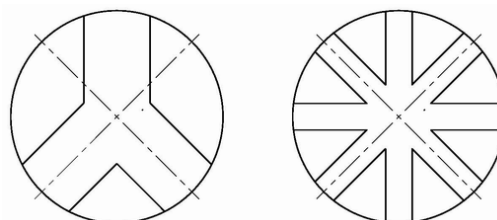


Fig. 3 Schematics of the newly designed soft-iron yokes

## 細孔加工したバルク磁石のパルス着磁特性の数値解析

### Numerical analysis of pulsed-field magnetization characteristics of a holed bulk magnet

横山 和哉, Shang Jiahao (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)

YOKOYAMA Kazuya, Shang Jiahao (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: yokoyama.kazuya@g.ashikaga.ac.jp

#### 1. はじめに

REBCO バルク磁石の実用化において、捕捉磁場の向上と着磁効率の改善が重要な課題である。バルク磁石のパルス着磁においては、冷却された試料にパルス磁場を印加するため、ピン止め損失や粘性損失に伴う温度上昇により、捕捉磁場が減少する問題がある。これまでに、試料の一部に細孔を加工することで意図的に超伝導特性を低下させ、そこから優先的に磁束を侵入させることで、発熱を抑制させて捕捉磁場の改善を試みている。これまでに、Fig. 1 に示す GdBCO バルク体の端部に細孔を加工した試料を用いてパルス着磁実験を行い、提案手法の有効性を確認した。本文では、細孔加工したバルク体の数値解析モデルを作成し、実験と同条件で数値解析を行った結果を報告する。

#### 2. 解析モデル

Fig. 2 に本研究室のバルク PFM システム及び細孔加工したバルク体の三次元解析モデルを示す。バルク体の端部に直径 2mm の細孔があり、そこに低融点ハンダ (U アロイ) を充填している。

解析において、バルク体の非線形電気特性には  $n$  値モデルを、臨界電流の磁場依存性には Kim-Anderson モデルをそれぞれ用いた。さらに、バルクの熱解析には熱伝導方程式を用いた。なお、解析ソフトには有限要素法による動磁場及び温度の過渡応答解析ソフト Photo-Eddy/Thermo (PHOTON 社) を用いた。

#### 3. 結果及び考察

Fig. 3 に 30 K・印加磁場 5.8 T における (a) 細孔がある場合、及び (b) 細孔がないバルク体の三次元磁場分布を示す。以前のパルス着磁実験では細孔部分において、大きなフラックスフローが観察されたが、解析結果においてはそれらは観察されなかった。

Fig. 4 に 30 K・印加磁場 5.8 T における試料中央、細孔部分、細孔近傍における磁束密度の時間応答を示す。細孔の有無で大きな差異はなかった。

#### 4. まとめ

本文は、REBCO バルク磁石の捕捉磁場の向上と着磁効率の改善を目的として、試料に細孔を加工する手法について数値解析により有効性を検証した。これまでの実験結果では、細孔近傍で大きな磁束密度の変化を確認したが、今回の解析ではそれらは確認できなかった。また、捕捉磁場に関しても細孔の有無で大きな差がなかった。現在、様々な条件で解析を継続中であり、発表当日にはそれらのデータを報告する予定である。

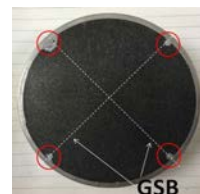


Fig. 1. Photograph of top and bottom surfaces of GdBCO bulk

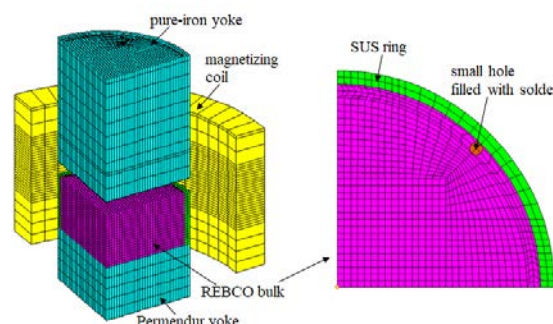


Fig. 2. Comparison of total magnetic flux between top and bottom surfaces

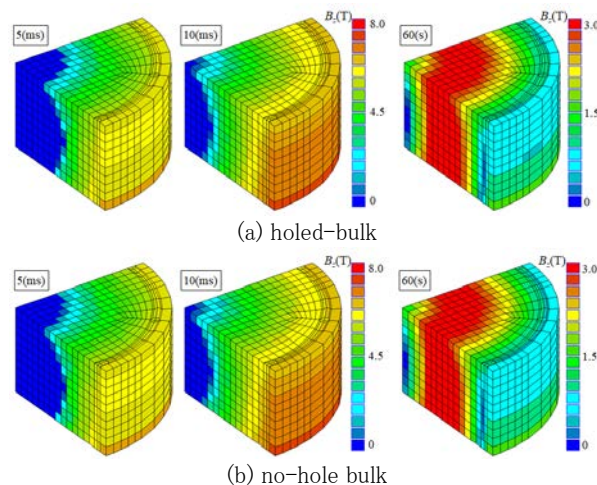


Fig. 3. Comparison of three-dimensional trapped field distributions between holed-bulk and no-hole bulk

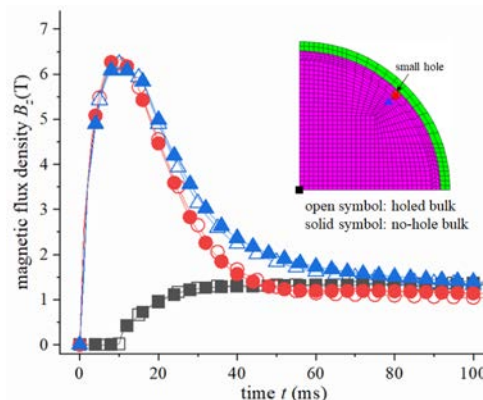


Fig. 4. Comparison of time responses of magnetic flux density between holed-bulk and no-hole bulk

# 有限要素法を用いた超伝導ケーブル臨界電流及び表面磁場の評価

## Evaluation of Critical Current and Surface Magnetic Field of Superconducting Cable using Finite Element Method

張 宇威, 今泉 圭佑, 小田部 荘司, 鐘 宇軒(九工大); 赤坂 友幸, 富田 優(鉄道総研)  
 ZHANG Yuwei, IMAIZUMI Keisuke, OTABE Edmund Soji, ZHONG Yuxuan (Kyushu Inst. of Tech.);  
 AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (RTRI)  
 E-mail: zhang.yuwei584@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

近年の超伝導応用は、エネルギーや環境など多くの分野において、従来の技術では実現できない革新的機器の実現が可能となる。超伝導ケーブルを鉄道用電線へ応用すると、電気抵抗がゼロである性質から、損失なく電気を遠方まで運ぶことができるため、変電所数を減らし、回生効率が上昇することが期待できる。また、レールに流れる帰線電流を超伝導ケーブルに流すことで大地への漏れ電流もなくなり電食の問題も解決できる[1]。本研究では、超伝導ケーブルにおいてトラブルが発生する時、超伝導線材の臨界電流特性と表面磁場を調査する。有限要素法を用いてケーブルの通電状態を数値シミュレーションし、超伝導線材内層、あるいは外層の素線を壊した状態下で、臨界電流と表面磁場はどのように変化するかを調査した。

### 2. 計算方法

本研究では、電気特性に対する有限要素法計算のために、JSOL 社製 JMAG を使用した [2]。Fig. 1 と Fig. 2 のように外層素線 8 本と内層素線 8 本、螺旋状に巻き線をして、外層と内層の巻き方向は逆になっている。外層直径 20 mm、内層直径 18.9 mm、線材巻きピッチは 200 mm の線材モデルを作り、有限要素法を用いて、JMAG で超伝導線材を数値シミュレーションする。数値解析対象のモデリングはベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  と、スカラーポテンシャル  $\phi$  を用いた  $\mathbf{A}-\phi$  法に基づいて行う。電流を流して、線材の表面磁場と臨界電流を調査した。

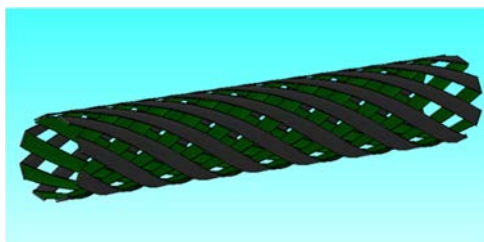


Fig. 1: Superconducting Cable Model.

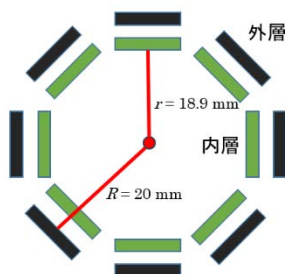


Fig. 2: Cross section of superconducting cable

### 3. 結果

Fig. 3 は、素線を壊す本数を一つずつ増やす時の、素線一本あたりの臨界電流である。外層の壊した素線本数が増えると、素線一本あたりの臨界電流はどんどん減っていき、減る幅は大きくなっていく。

内層を壊した素線本数が増えると、素線一本あたりの臨界電流はどんどん増えていき、増える幅は小さくなっていく。

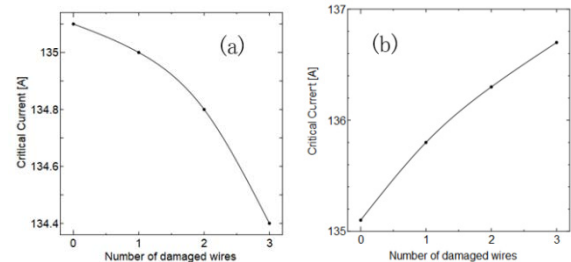


Fig. 3: Critical current as a function of the number of broken strands, (a) destroying the outer layer (b) destroying the inner layer.

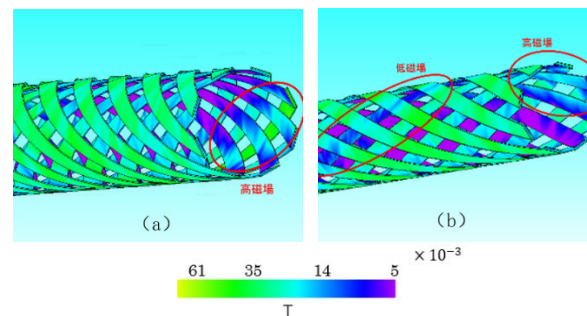


Fig. 4: Surface magnetic field generated by flowing current in damaged superconductor cable, (a) destroying the outer layer (b) destroying the inner layer.

Fig. 4 は、素線を一本壊している超伝導ケーブルに電流を流すと発生する表面磁場、外層の素線を壊している付近に高磁場が発生している。それが一本あたりの臨界電流値が小さくなる原因と考えられる。内層の素線を壊している付近には高磁場と低磁場が同時に発生している、内層では壊した素線の周りの磁場が高くなり、外層では壊した素線の周りの磁場が低くなる。

### 4. まとめ

本研究では有限要素法を用いてケーブルの通電状態を数値シミュレーションし、超伝導線材の内層と外層の素線を壊した状態下で、臨界電流と表面磁場はどのような変化をするのかを調査した。

外層の素線を壊した場では一本あたりの臨界電流値が小さくなる。内層の素線を壊した場では一本あたりの臨界電流値が大きくなる。磁場を観察し、外層の素線を壊した場の付近では高磁場が発生している。内層の素線を壊した場では高磁場と低磁場が同時に発生している。

### 参考文献

- M. Tomita: Railway Research Review 70 No. 10 (2013).
- 本庄 昇一: 「超伝導ケーブルに生じる交流損失の数値解析」 JMAG Users Conference (2001).

# 超電導を用いた航空機用高効率・高出力電気推進システム -航空機用超電導ケーブル接続部の開発-

## High Efficiency and High Power Electric Propulsion System for Airplane by Superconductivity -Development of Superconducting Cable Connection for Airplane-

金山 諄志,塩原 敬,佐藤 迪夫,中西 達尚,高橋 保夫,青木 裕治,三堂 信博,足立 和久(SWCC);  
和泉 輝郎(AIST); 岩熊 成卓(九大)

Atsushi KANAYAMA, Kei SHIOHARA, Michio SATO, Tatsuhisa NAKANISHI, Yasuo TAKAHASHI, Yuji AOKI, Nobuhiro MIDO, Kazuhisa ADACHI (SWCC); Teruo IZUMI (AIST); Masataka IWAKUMA (Kyusyu Univ.)  
E-mail: a.kanayama022@swcc-g.com

### 1. はじめに

世界中で CO<sub>2</sub> 排出量の削減が求められている。航空機業界においても同様で、旅客機需要の増大により今後も CO<sub>2</sub> 排出量は増大すると考えられている。一方、国際航空運送協会は 2050 年には CO<sub>2</sub> 排出量をゼロにする目標を打ち出している[1]。CO<sub>2</sub> 排出量を削減するには新たな技術革新が必要であり、その一つに航空機の電動化が挙げられる。我々は産総研や九州大学などと一緒に NEDO プロジェクトにて航空機用超電導推進システムの開発に参画している。本プロジェクトは超電動発電機と超電導回転機を超電導ケーブルで接続した全超電導化システムを開発している(Fig.1)。航空機用の超電導ケーブルには電力の安定した供給のみではなく、接続する機器への安定した冷媒の供給も要求される。この超電導ケーブルおよび接続部の要求性能として以下の項目が挙げられる。

- ・交流で 1110 A<sub>rms</sub> の通電が可能であること
- ・定格線間電圧 700 V に耐える耐電圧性能を有すること
- ・液体窒素の輸送が可能であること(液体窒素流量 70 L/min.)
- ・小型・軽量であること
- ・組み立て作業性が容易であること

我々は上記の要求性能を達成する超電導ケーブルと各超電導機器を接続する接続部の開発を行った。

これまで SWCC(旧昭和電線ケーブルシステム)では三相同軸超電導ケーブルの開発および実証実験を行ってきた[2], [3]。三相同軸超電導ケーブルには超電導ケーブル導体を気中にて接続する気中終端接続部を用いた。本開発では気中終端構造とは異なる、機器直結型の接続部の開発を行った。機器直結型構造により、接続部の小型・軽量化、さらには熱侵入量の低減が期待される。本発表では機器直結型の接続部の開発について報告する。

### 2. 開発概要

要求性能の一つの組み立て作業性が容易であることに着目し、プラグイン構造の Multi-Contact (MC)接続の接続部を開発した。また、ボルト締結接続による、更なる小型・軽量化接続部を開発し、MC 接続との比較を実施した。使用した超電導線材は、SWCC 製線材を用いた[4]。

### 3. 開発結果

MC 接続の接続部を試作し、直流通電試験を実施した。MC 部における抵抗値が接続部全体の抵抗値に占める割合の 60% 以上を示した。発熱量を低減させるために MC ではなくボルト締結による接続を検討した。さらに、MC 構造の接続部よりも小型・軽量化を図るため、接続部の端子の大きさについては外径 Φ30 mm から外径 Φ15 mm に変更し、端子と超電導ケーブルとの半田による接続長を 150 mm から 30 mm へと変更を実施した。三相一括で端子を配置した接続部の比較をしたところ、1/5 程度の軽量化を達成した(table1)。上記の小型端子を採用したボルト締結構造の接続部を開発し、オープンバスの液体窒素中で通電性能試験を実施した。SWCC 製線材を 30 枚積層させた超電導ケーブルの両端に小型の端子を取り付け、直流での四端子法による端子を含めた超電導ケーブルの臨界電流  $I_c$ (critical

current)値を測定した。測定より得られた  $I_c$  値は約 2400 A であった。その後、電源を交流電源に切り替え、51Hz の交流電圧試験を実施した。交流電圧試験においては、運転電流  $I_{op}$ (operation current)値が要求性能である 1110 A<sub>rms</sub> まで通電が可能であることが確認された。交流の 1110 A<sub>rms</sub> に相当する直流約 1570 A 通電時(交流運転電流値の波高値換算)における小型端子の発熱量を算出した結果、小型端子一つ当たり約 9.1 W で、三相合計で約 27 W と算出された。この値は MC 構造を有する接続部の直流 1570A における三相合計の発熱量約 20 W と比較し大きいものの、接続部と取り合う超電導機器での発熱量に対して無視できるほど小さいと考えられる。航空機システムでは小型軽量化が必須であるため小型接続部の方が優位である。

当日の発表では、他の要求性能に関する項目についても発表を行う。

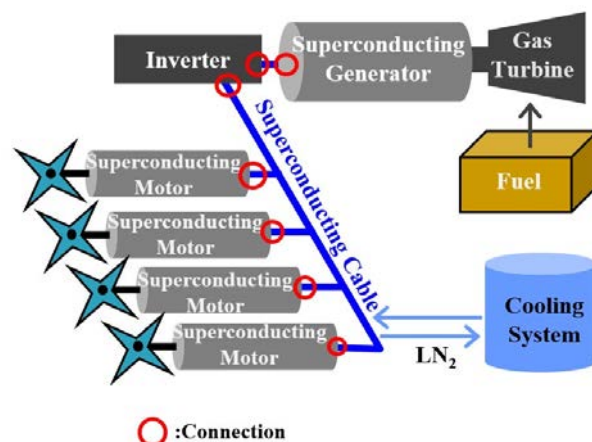


Fig.1 Concept of All Superconducting Electric Propulsion System for Airplane

Table 1 Comparison between MC and Bolted connections

	Multi-contact connection	Bolted connection
Size (Outer diameter × Length)	118mm × 581mm	70mm × 176mm
Weight	25kg	4kg
Caloric value (when direct current 1570A)	20W	27W

### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP15005)の結果得られたものです。

### 参考文献

1. 令和3年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2022)
2. K. Shiohara, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 31 (2021) 5
3. K. Shiohara, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33 (2023) 5
4. M. Sato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 20

# RE 系超電導線材を用いた単層縦磁界直流超電導ケーブルの過冷却状態における通電特性

## Current-carrying properties of single-layer longitudinal magnetic field DC superconducting cable by RE-based coated tape in undercooled conditions.

山口 悠平, 濱本 拓郎, 西島 太一, 木内 勝 (九工大)

YAMAGUCHI Shuhei, HAMAMOTO Takuro, NISHIJIMA Taichi, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.)

E-mail: yamaguchi.syuhei889@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

超電導線材の電流  $I$  通電方向と平行に磁界  $B$  が加わる縦磁界下 ( $B//I$ ) では、横磁界 ( $B \perp I$ ) と比べて臨界電流密度  $J_c$  が増加することが知られており[1]、この高い  $J_c$  特性を利用した縦磁界ケーブルの開発が進められている[2]。一般にこのような超電導ケーブルは、地中に埋設された断熱二重層の管路内に敷設して運用され[3]、この管路内は減圧されているため、ケーブルは減圧された過冷却液体窒素下での運用になる。

そこで本研究では、縦磁界下で  $J_c$  の増加が確認できる市販の RE 系超電導線材を用いて、単層の縦磁界直流超電導ケーブルを設計及び作製し、過冷却液体窒素下でそれぞれ通電特性評価を行ない、このケーブルの有効性を調べた。

### 2. ケーブルの設計・作製

縦磁界直流超電導ケーブル作製には、市販されているフジクラ社製人工ピンなし RE 系超電導線材で、幅 4 mm で 77 K で自己磁界中の  $I_c$  は 230 A 程度の線材を用いた。この線材の縦磁界特性をケーブルに考慮するために、液体窒素下 (77 K) と過冷却下 (67 K) で線材の  $J_c$  の磁界依存性を、直流四端子法を用いて測定した。縦磁界下及び横磁界下の  $J_c$  の磁界依存性を Fig. 1 に示す。自己磁界下、67 K の  $J_c$  は自己磁界下、77 K の  $J_c$  のおよそ 2 倍である。また、縦磁界の増加と共に  $J_c$  が増加するような振る舞いは今回の測定では得られなかったが、0.15 T までは  $J_c$  はほぼ一定の値で、横磁界に比べて、大きな  $J_c$  である。この特性をケーブルに考慮するために 5 次のフィッティングを行い、磁界依存性を評価した。図中の実線が近似曲線である。

今回は全長が 660 mm、ケーブル部が 300 mm、直径 10 mm の単層内側ケーブルを設計した。縦磁界特性を考慮して、縦磁界が加わった際に電流容量が最大になるように巻き角度を  $\theta = 5^\circ$  とした[2]。コート線材は 4 mm 幅線材を 8 枚用いた。外観を Fig. 2 に示す。この場合の電流容量  $I_{ct}$  は、自己磁界下、77 K で 1840 A、67 K で 3720 A となる。温度履歴によりケーブルが劣化することが予想されるために、同様のケーブルを 2 本作製し、同様な測定を実施した。

### 3. 実験及び検討

ケーブルの通電試験は、液体窒素中の直流四端子法で行った。さらに窒素容器内を減圧し、過冷却状態にすることで 67 K の測定を行った。ケーブルへの電流のスweepレートは 10 A/s である。また、ケーブルの電流容量  $I_{ct}$  の決定には  $E = 1.0 \times 10^{-4}$  V/m の電界基準を用いた。帰りの電流が流れるシールド層が作る縦磁界は Bi2223 超電導マグネットを加えた。

1 本目のケーブルの自己磁界下での  $I_{ct}$  は 77 K では 938 A、67 K では 1735 A となり、設計値よりも大幅に劣化した。この原因は、通電試験を行う前に室温-液体窒素温度の熱サイクルを計 5 回与えたことにより、線材に歪みが生じ、 $I_c$  が劣化した可能性がある。また今回の評価では、電流容量がピークを持つような特性は得られなかった。ただし、温度低下による  $I_{ct}$  値の増加は 1.85 倍と線材の増加率に近い値が得られた。Fig.3 に単層縦磁界直流超電導ケーブルの磁界下  $I_{ct}$  を自己磁界下  $I_{ct}(0)$  で規格化した特性を示すが、縦磁界依存性は設計値と概ね一致した。熱サイクルを変化させた 2 本目の

ケーブルの通電特性評価は発表当日に報告する。

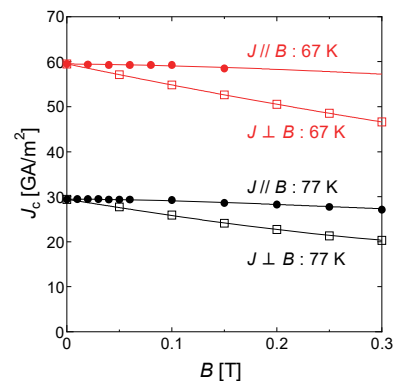


Fig.1 Magnetic field dependence of critical current density at 77 K and 67 K. Symbols show experimental results, and lines show approximate curves.



Fig.2 Photograph of single longitudinal magnetic field DC superconducting cable.

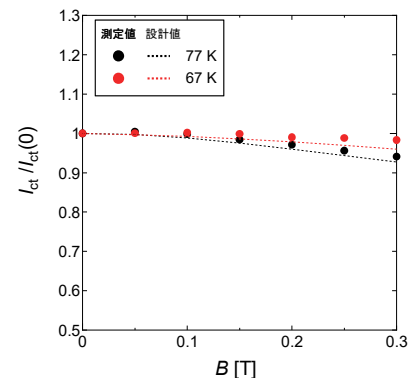


Fig.3 Magnetic field dependence of normalized current-carrying capacity at 77 K and 67 K. Symbols show experimental results, and lines show designed values.

### 謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(21H01872)の助成により実施したものである。

### 参考文献

- 1 K. Sugihara et al.: Supercond. Sci. Technol. 28, 104004 (2015) (6pp).
- 2 V. S. Vyatkin et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 25, 6606207 (2015) (7pp).
- 3 大熊 武: 電気設備学会誌, Vol. 32, No. 12, (2012)

# 鉄道用超電導ケーブルの営業運転に至るまで

## Commercial operation of superconducting cables for railways

富田 優 (鉄道総研)

TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)

E-mail: [tomita.masaru.19@rtri.or.jp](mailto:tomita.masaru.19@rtri.or.jp)

### 1. 鉄道路線導入を目指した超電導ケーブルの研究開発

鉄道総研では、2007年から直流区間用超電導送電の研究開発に着手し、2009年に当時の独立行政法人科学技術振興機構(JST)の長期の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の研究課題である「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」が始動した[1]。本研究課題では、まず超電導線材の基礎特性評価、ケーブル化技術、など各種基礎試験からスタートし、その後、対向流循環方式を採用した超電導き電システムを製作した。そして通電、冷却、課電試験などの各種検証試験を経て、構内試験線において実車両による走行実験に初めて成功した[2]。次に営業路線の鉄道設備への接続や超電導き電としての動作確認など、実用化に向けた基礎的な技術検証を目的として、鉄道現場における検証試験に着手し、まず営業路線を用いた夜間の走行試験を実施した。き電回路へ組み込んだ超電導ケーブルを介し、営業線を走行する実車両への送電に成功し、超電導ケーブルが直流電気鉄道へ適用できることを確認した[3]。2016年からNEDOの「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」を受け、宮崎実験線を用いた検証試験を行い、長距離超電導送電の冷却システム技術を確立した。2017年よりJST 未来社会創造事業の「高温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への社会実装」を受け、超電導ケーブルの接合技術を開発している。

### 2. 鉄道技術基準に向けた各種試験

国交省鉄道技術開発費補助金により、技術基準の新技術策定と各種実験を行うとともに、鉄道路線における実証試験を進めた(表 1)。まず、超電導ケーブルを用いたき電回路の確認を行うため、駿豆線にて走行試験を行った[4]。次に、実車両を走行させたシステム切り離し試験を荒川線にて実施し、システムに異常が生じた際は既設のき電線に切り替えて列車が走行できることを確認した。また、大容量送電と回生電流の試験を実施し、丸ノ内線にて、大容量通電とブレーキ時に超電導き電ケーブルを介して車両基地内の留置車両へ送電できたことを確認した[5]。さらに、中央線にて超電導による電圧降下の抑制効果を測定し、超電導き電の距離に応じて電圧降下が抑えられることを確認した[6]。

Table 1 Specification of the superconducting cable system

Railway Line	Voltage	Cable length	Feeding system	Year
Test line (RTRI)	1500	31	Trolley line	2013
Test line (RTRI)	1500	310	Trolley line	2014
Sunzu Line (Izuhakone Railway)	1500	6	Trolley line	2015
Arakawa Line (Toden)	600	30	Trolley line	2018
Marunouchi Line (Tokyo Metro)	600	55	Third rail	2018
Chuo Line (JR East)	1500	408	Trolley line	2019

### 3. 超電導ケーブルの営業認可

前項の各種実験及び鉄道路線における実証試験より、実用化水準の技術改良を重ねた。超電導がき電線の鉄道事業化技術の基準を満たすことを確認し、国交省より営業運用(客乗車)が許可され、認可書が発行された。今年、第一号路線において、世界初の営業線(客乗車)実用運転を開始となった。

### 4. 謝辞

本研究の一部は、国土交通省補助金、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベJPMJSV0921)」および「未来社会創造事業(JPMJMI17A2)」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託・助成事業により実施した。

### 参考文献

1. M. Tomita *et al.*, Development of prototype DC superconducting cable for railway system, *Physica C*, **470** S. 1007-1008 (2010).
2. M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
3. Superconductors drive trains, *Nature* **542** (2017) 275.
4. 鉄道総研ニュースリリース 2015年4月30日
5. 鉄道総研ニュースリリース 2019年7月3日
6. 鉄道総研ニュースリリース 2019年8月6日

# 接続部のある HTS テープ線材の短絡電流試験 - 1

## Short-circuit experiment of solder-connected HTS tapes for Superconducting DC power transmission (SCDC) - 1

山口 作太郎, 江口 実穂, イワノフ ユーリ, 神田 昌枝, ニノ宮 晃(中部大)  
 YAMAGUCHI Sataro, EGUCHI Miho, IVANOV Yury, KANDA Masae, NINOMIYA Akira (Chubu Univ.),  
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導ケーブルの短絡電流特性評価のために、テープ線材の短絡電流実験を継続してきた<sup>1)</sup>。今までに用いた線材は住友電工の銅合金強化 Bi2223 線材と SuNAM の銅メッキ厚両側で 40ミクロン RE123 線材であった。臨界電流は 190 A ~ 200 A 級である。流した電流はピーク値で~2.5 kA (RE123), ~7.0kA(Bi2223)であり、通電時間は~8 ms (Bi2223), ~40 ms (RE123)であった。したがって、臨界電流( $I_c$ )の 10 倍から 20 倍以上の電流を短時間流した。その結果、RE123 では臨界電流の~8 倍まで、Bi2223 では~16 倍弱までは、短絡電流後の臨界電流測定では、 $I_c$  は劣化しなかった。しかし、これを超すと、RE123 では  $I_c$  は悪化や電極接続部付近で焼損・破断が生じた。また、Bi2223 では  $I_c$  は悪化が観測されたが、焼損は生じなかった。しかし、温度上昇による線材膨張によって、塑性変形が生じ、常温に戻しても線材長は長くなっていた。

短絡電流通電中では線材温度が共に 300 °C を超した。これは半田部が熔融し、接続した電圧タップ線が離れ落ちたことや、通電中のテープ線材の実時間抵抗を回路方程式から見積り、これから温度を求めることで確認してきた。

この半田接続が熔融して電圧タップ線が剥がれ落ちたことは重大事項と考えている。電圧タップ線はテープ線材表面に接合され、直接液体窒素と接触している。更に、抵抗率が高い半田には必ずしも全短絡電流が流れるとは限らない。一方、テープ線材接合には短絡電流が半田に直接流れると考えられ、更に液体窒素とは接触しない。これはどれも電圧タップ線の半田接合部温度よりテープ線材接合部温度がより高くなる要因になると思われるからである

超伝導ケーブルは半田接合した複数の長尺テープ線材から構成され、多くの半田接合部が必要になると考えられる。このため、線材  $I_c$  悪化が生じる電流より低い電流で半田接合部が剥がれるなら、それがケーブル健全性維持のための上限電流となる。このため、半田接合したテープ線材の短絡電流試験を開始した。Bi2223 線材は表裏対称構造であるが、RE123 は非対象のため、接合方法が異なるため、最初に Bi2223 線材を用いて実験を行った。

### 2. Bi2223 線材の接合部構造と接続抵抗

Bi2223 線材の半田接合部の構造を Fig. 1 に示す。これは住友電工によって接合された製品であり、接合部面積は~55 mm<sup>2</sup> である。A, B, C, D は電圧タップ線の設置位置を示し、距離は 100 mm であり、表裏両面に取り付けられた。銅電極に圧着している。

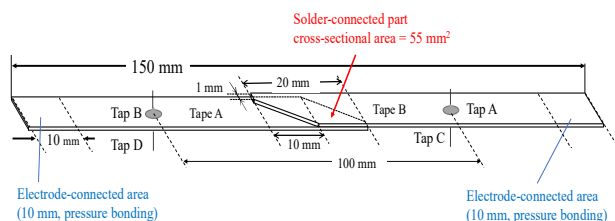


Fig. 1 HTS tapes and their solder connection part for the short-circuit experiment

Fig. 2 に  $I_c$  測定結果を示す。横軸が電流、縦軸が電場の強さである。半田部のため、通常の臨界電流測定と一定抵抗値に電流を流したときの波形が重畳された波形になっている。計測は三回行って、それらのデータが全てプロットされている。臨界電流,  $n$  値, 接続抵抗値を図中に示した。これらは最小二乗法によって求められ、再現性良く、誤差も少なく、良い近似値を与えている。

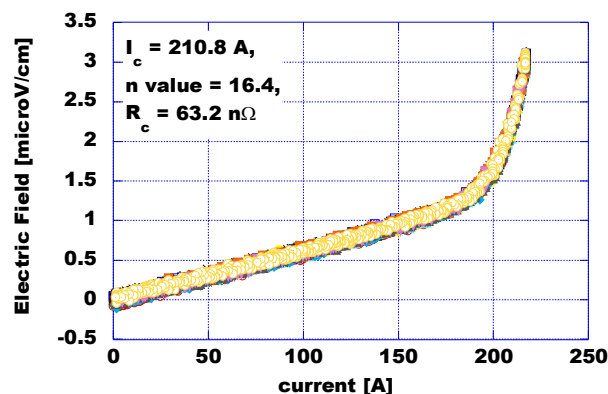


Fig. 2 Critical current and connection resistance measurements of the solder connected HTS tapes

このような短絡電流実験を複数回行い、 $I_c$  測定を行っている。

### 3. 短絡電流波形と実験結果(速報)

Fig. 3 に短絡電流波形の一例を示す。コンデンサ充電電圧に対する電流・電圧波形は接続部がないサンプルと殆ど変わりなく、臨界電流もピーク電流が 5 kA を超しても臨界電流劣化は観測されなく、半田接合部も健全であった。現在、実験を継続すると同時に解析を進めているところである。

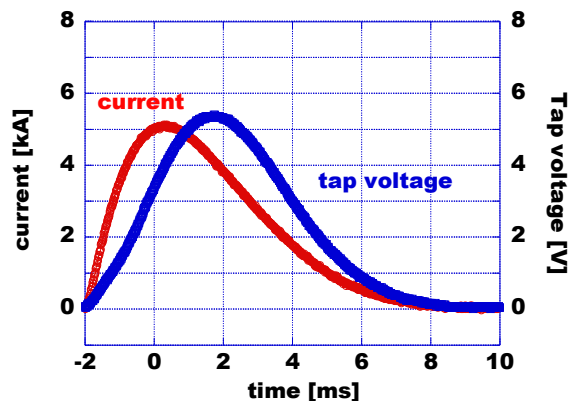


Fig. 3 Current and Voltage waveforms of short-circuit current experiment for the solder connected HTS tapes

### 参考文献

- 山口、江口、川合、イワノフ、神田、斎藤、ニノ宮、「HTS テープ線材の短絡電流試験-IV」2023 年度春期低温工学・超伝導学会講演概要集, 3A-p01.

# 新型ヘリカル式液体水素用流量計の試作と流量計表面のひずみ測定

## Manufacture trial of new helical flowmeter for liquid hydrogen and measurement of strain on the flowmeter surface

佐藤 更, 章 誠豫, 杉原 弥悠加, 武田 実, 前川 一真(神戸大)

SATO Sara, ZHANG Chengyu, SUGIHARA Miyuka, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)

E-mail: sato.sara@maritime.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

今日、地球温暖化をはじめとする環境問題や化石燃料の枯渇が懸念されている中、代替エネルギーとして水素エネルギーが注目されている。水素を大量輸送する場合、気体の状態ではなく液体水素（沸点 20 K）の状態、大型タンクを用いて海上輸送するのが効率的である。水素を媒体とするエネルギー社会に向けて、国際水素サプライチェーン [1] を構築するためには、液体水素の海上輸送技術のみならず、荷役技術も確立しなければならない。そのため、液体水素の温度でも使用可能な流量計の開発が必要である。そこで、新たな液体水素用流量計として、ひずみゲージを用いた流量計を考案した。原理としては、ヘリカル流の液体を通す GFRP 管の表面にひずみゲージを取り付け、液体を通した際の管内の圧力の変化により生じる配管のひずみを検知すれば、その大きさから管内の圧力を測定し、流量を算出することができるというものである。

本研究室では以前、汎用解析ソフト ANSYS を用いて、本流量計に液体水素及び液体窒素を流した際の数値シミュレーションを行った [2]。その結果、ヘリカル流路を内蔵した GFRP 管は内圧の変化に伴って発生するひずみが著しく小さくなることが分かった。本研究では 3D プリンターを用いて流量計の試作を行い、ヘリカル流路を内蔵した GFRP 管の圧力と表面ひずみの関係を調べた。

### 2. 実験装置

#### 2.1 低温用箔ひずみゲージ

本実験で使用した低温用箔ひずみゲージ（以下、ひずみゲージ）には、共和電業 KFL-5-120-C1-11F3M3 [3] を使用した。ひずみゲージの使用温度範囲は $-269^{\circ}\text{C}$ ~ $150^{\circ}\text{C}$ 、自己温度補償範囲は $-196^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$ である。

#### 2.2 試験サンプル

試験サンプルの写真を Fig. 1 に示す。試験サンプルは、外径 26 mm、厚さ 1 mm の GFRP 管に 3D プリンターで作製したヘリカル流路を組み込み、スタイキャストで接着した。ヘリカル流路は PP GF30 を材料として FDM 方式で造形し、表面にレジンを塗った。GFRP 管の両端は真鍮でキャップをし、加圧用ガスボンベと接続できるようにステンレス製の継手を取り付けた。また、GFRP 管の表面にはひずみゲージ 2 枚を直交させるように貼り付けた。

ひずみの測定には、2 枚共に 1 アクティブゲージ 3 線式法を用いた。試験サンプルは窒素ガスを用いて加圧した。計測用ソフトウェアとして、圧力の計測には LabVIEW、ひずみ計測には DCS-100A を使用した。

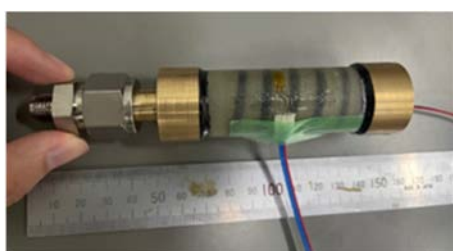


Fig. 1 Photograph of a test sample.

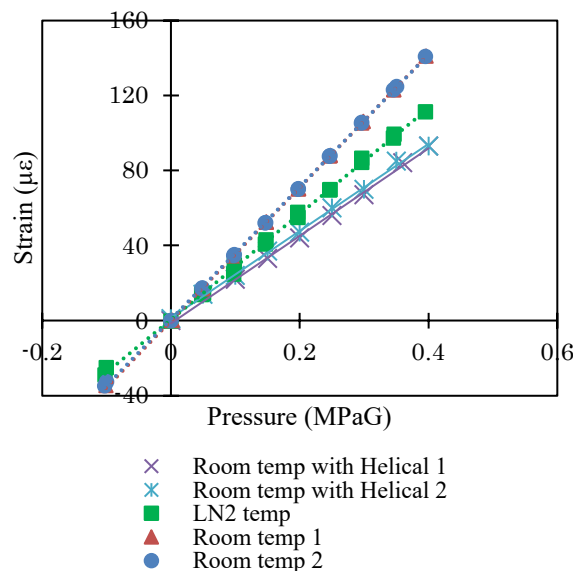


Fig. 2 Relationship between pressure and strain of a test sample.

### 3. 実験結果と考察

Fig. 2 は、室温におけるヘリカル流路付き GFRP 管の管内圧力とひずみの関係及び過去 [4] に実験した GFRP 管の室温と液体窒素温度における管内圧力とひずみの関係を描いたものである。これらの関係より、以下のことが分かった。

- ・室温において、GFRP 管内の圧力とひずみの関係は、ヘリカル流路を内蔵した場合においても非常に直線性が高かった。また、ひずみの測定値の安定性及び再現性も高かった。

- ・室温において、ヘリカル流路がある場合の GFRP 管のひずみは 0.4 MPaG において 93  $\mu\text{e}$  であった。ヘリカル流路がない場合が 140  $\mu\text{e}$  であることと比較すると、約 2/3 に減少した。

過去の実験より、ヘリカル流路のない GFRP 管の液体窒素温度におけるひずみは、0.4 MPaG で 111  $\mu\text{e}$  であった。その 2/3 の大きさは 74  $\mu\text{e}$  であるが、ANSYS でのシミュレーションによると、液体窒素温度では管内圧力 0.4 MPaG における GFRP 管表面に発生するひずみは約 31  $\mu\text{e}$  となる。今後、同様の実験を液体窒素温度やそれ以下の温度領域でも行い、ヘリカル流路を内蔵した GFRP 管の管内圧力とひずみの関係をより詳細に調べていく予定である。

#### 参考文献

- [1] S. Kamiya et al. : Physics Procedia 67 (2015) 11-19
- [2] C. Zhang et al. : Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 42
- [3] 株式会社共和電業 計測機器総合カタログ 2019 ひずみゲージ 1-41
- [4] M. Sugihara et al. : Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 73



# 極低温二相流による静電容量式ボイドメーターの評価

## Evaluation of capacitance void meter with cryogenic two-phase flow

國本 直希, 辻上 博司(岩谷産業); 中村 勝美(京セラ)

KUNIMOTO Naoki, TSUJIGAMI Hiroshi (Iwatani Corporation); NAKAMURA Katsumi (KYOCERA Corporation)

E-mail: kunimoto@iwatani.co.jp

### 1. はじめに

カーボンニュートラル社会実現のため、クリーンエネルギーである水素の活用が様々な分野で進められている。今後、水素源としての液化水素の需要及び取引量の増大が予想され、それに伴い流量計測のニーズが出てくるものと考えられる。

液化水素は蒸発潜熱が小さく、容易に気化して気液二相流の状態を流通するため、流量を測定するには気相/液相の混合割合を正確に把握することが必要になる。

そこで我々は、静電容量式ボイドメーターを用いて極低温流体の気相/液相の混合割合を把握することを目的として、極低温二相流によるボイドメーターの精度検証を行っている。また、極低温二相流の流動状態は、伝熱・圧力損失特性に大きな影響を与えることが知られている[1]。そこで可視化配管を用いた液化窒素/水素ガスの二相流の流動状態分析も実施した。今回は、これらの内容について報告する。

### 2. 実験方法

極低温二相流流通試験装置の構成を Fig. 1 に示す。液化窒素と水素ガスを任意の量で混合させて、液化窒素/水素ガス二相流を生成して、ボイドメーターに流通させる。液化窒素の流量は 3 L/min で一定とし、気液混合割合が 0%~50% になるように水素ガスの流量を制御した。

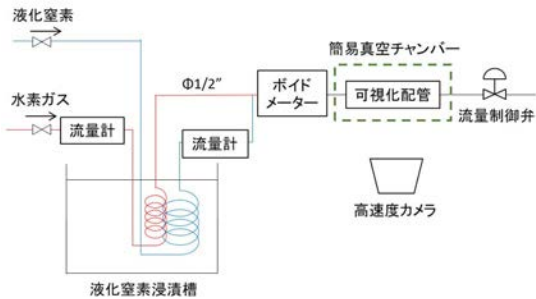


Fig. 1 Configuration of the two-phase flow test equipment.

ボイドメーターで測定したボイド率  $\alpha$  および実際に流通させた二相流の気液混合比  $\beta$  は、それぞれ式(1)および式(2)で算出する。

$$\alpha = \frac{C_L - C_M}{C_L - C_G} \dots \text{式(1)} \quad \beta = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G} \dots \text{式(2)}$$

$C_L$ : 液相静電容量  $C_G$ : 気相静電容量  $C_M$ : 測定静電容量  
 $Q_L$ : 液相体積流量  $Q_G$ : 気相体積流量

液化窒素/水素ガス二相流の流動状態は、ガラス製可視化配管と高速度カメラを用いて観察する(Fig. 2)。ガラス製可視化配管は、簡易真空チャンバーに格納されているため断熱されている。なお、ガラス製可視化配管は、流体を水平・鉛直上向き・鉛直下向きでも流通できるよう、回転できる構造とした。



Fig. 2 Observation of two-phase flow with the visible pipe.

### 3. 実験結果

Fig. 3 に液单相および気单相での静電容量を示す。液单相の静電容量は安定した値を示した( $C_L=110.8$  fF)。

気单相の静電容量について、液化窒素を流通させてボイドメーターを冷却した後、水素ガスのみを流通させることでデータを取得した。残留した液化窒素によるスパイクが観察されたものの、最下点を気单相の静電容量とした( $C_G=96.1$  fF)。

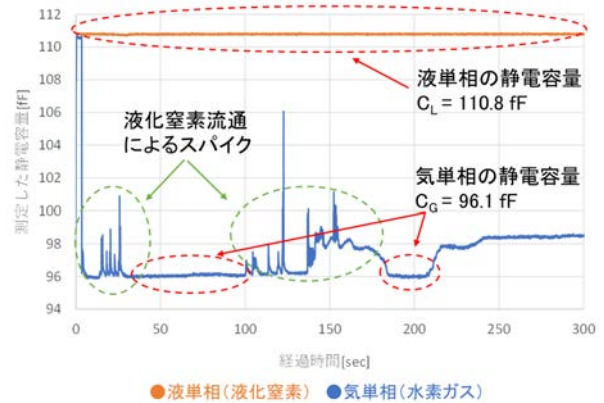


Fig. 3 Capacitance of liquid and gas single-phase.

Fig. 4 に、水平、鉛直上向き、鉛直下向きの流通条件における、ボイドメーター性能評価試験結果を示す。鉛直下向きでは比較的大きな誤差を示すものの、測定誤差は  $\pm 10\%$  以内に概ね収まっている。誤差の要因として、気相と液相の流速差により、気液混合比とボイド率に差が生じた可能性がある。

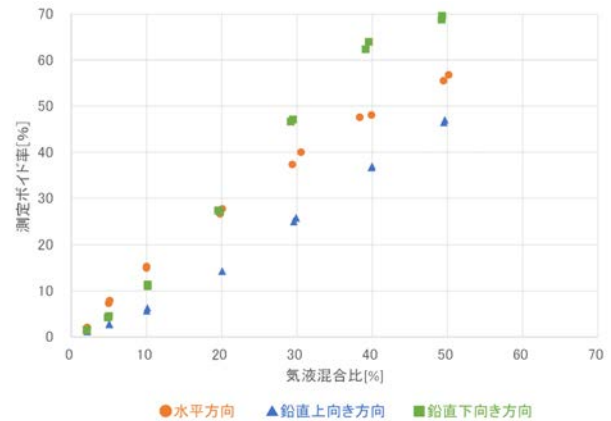


Fig. 4 Comparison of the void measurement among horizontal, upward and downward flow.

### 4. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙探査イノベーションハブ第6回研究提案募集(RFP)採択案件として JAXA との共同により実施したものである。

### 参考文献

1. K. Ohira *et al.*, *Physics Procedia*, **67** (2015) p.681.

# 超伝導体内部に侵入した水素が引き起こす量子現象の観測

## Quantum phenomena induced by hydrogen trapped in superconductor

河江 達也, 太子周, 芳賀 雄仁, 宮川 一慶, 志賀 雅亘 (九州大学工学部)

KAWAE Tatsuya, TAI Zizhou, HAGA Yuto, MIYAKAWA Kazuyoshi, SHIGA Masanobu

(Dept. of Applied Quantum Physics, Kyushu University)

E-mail: t.kawae.122@m.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

水素は質量が最も小さいためヘリウムと並んで量子性が強い。そのため金属内に侵入した水素は、離散的エネルギー準位の形成やトンネル拡散などの量子的振る舞いを示す。一方、母金属が超伝導転移するとフェルミ面に超伝導ギャップが出現するため、水素が周囲の電子系より受ける相互作用は大きく変化する [1,2]。これにより超伝導体中の水素が示す離散的エネルギー準位やトンネル効果などの量子的振る舞いも、常伝導状態から大きく変化することが予想される。しかし、超伝導転移後の水素の量子的振る舞いは全く研究されていなかった。そこでこの解明を目的に研究を行っている。

我々はこれまでの研究で、液体水素に浸した金属ナノ接合に数十 mV 程度の電圧を印加すると高濃度の水素化合物が生成されることを明らかにした[3,4]。さらに、この現象は  $T \sim 20\text{K}$  の温度で出現するため、水素トンネルに起因すると考えられる。上記実験は常伝導ナノ電極で行った。そこでナノ電極材料を超伝導体に変更し同様の実験を行うことで、超伝導金属内で出現する水素の量子現象を調べた。

### 2. 実験装置および実験手順

図1に実験装置の概略図を示す。装置は外部断熱管と、高真空の試料部である内部断熱管から成る二重断熱管構造である。密閉された内部断熱管内に水素・重水素を導入することで、試料を水素に晒して実験を行うことができる。さらに試料ホルダーには、ナノ接点を形成・制御するための Mechanically Controllable Break Junction (MCBJ) 機構が取り付けられている。

具体的実験手順としては、まず  $T \sim 20\text{K}$  まで装置を冷却し内部断熱管に水素を導入する。次に水素が装置内に残った状態で  $T \sim 4\text{K}$  まで冷却し、MCBJ 機構およびピエゾ素子を用いて試料である Nb 細線(0.2mm)を引き伸ばしていき、超伝導-常伝導-超伝導型のジョセフソン接合 (SNS-JJ) を作製する。この状態で、電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性およびロックイン法を用いた微分伝導度  $dI/dV$  信号を測定することで、水素による SNS-JJ の特性変化を追跡する。

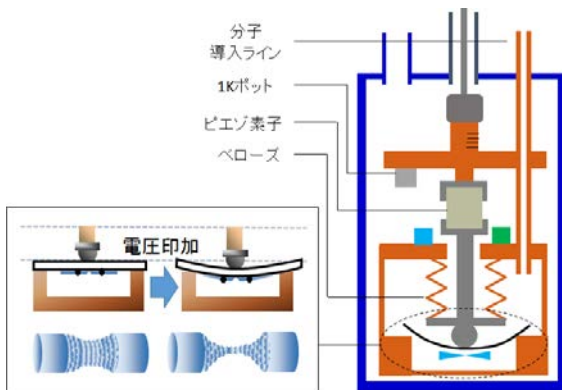


図1: MCBJ法の原理(左図)と本実験で用いるペローズ付き MCBJ 実験装置の模式図(右図)。

### 3. 実験結果

図2は  $T \sim 4.4\text{K}$  で上の手順で作成した Nb 製 SNS-JJ 表面に水素を吸着させた状態の微分伝導度 ( $dI/dV$ ) の電圧依存性を示す[5]。  $V \sim 2.5\text{mV}$  のピークは Nb の超伝導ギャップに対応する。それに加え、超伝導ギャップ以下の電圧でも丸で囲むように信号に複数のスパイク状のピークが出現する。一方、超伝導転移温度以上になるとこのスパイク構造は消失する。各スパイク状ピークの間隔は挿入図上に示すように  $\sim 0.1\text{mV}$  であり、温度変化してもその間隔は変化しない。測定に利用している点接合分光実験で得られる微分伝導信号は、電圧印加により加速された電子が非弾性散乱する際のエネルギーを反映する。つまり図2は、水素が超伝導体に捕捉されると超伝導ギャップ内に  $\sim 0.1\text{meV}$  のエネルギー幅を持つ離散準位が存在すると考えることができる。そしてジョセフソン接合に電圧印可することで加速されたクーパー対準粒子と衝突して、水素が基底状態から励起状態に遷移するためスパイク状ピークが出現したと理解することができる。実験結果の詳細については当日講演で報告する。

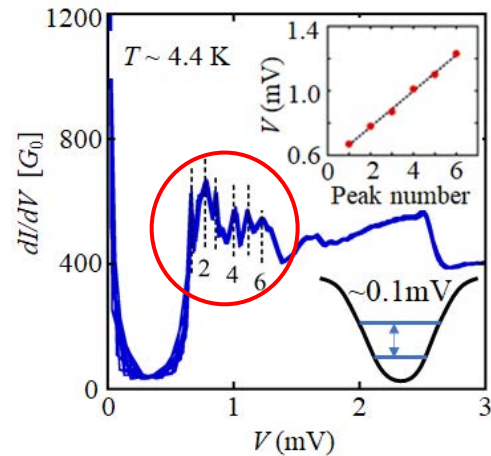


図2: Nb 製 SNS-JJ に水素吸着した  $dI/dV$  の電圧依存性。水素侵入で多数ピークが出現する(○印)。挿入図上はピーク位置の電圧依存性。下はピークの起源として予想される離散準位の模式図

### 参考文献

- [1] M. Matsumoto and Y. Ohashi, J. Phys. Soc. Jpn. 62, 2088 (1993).
- [2] Y. Ohashi and M. Matsumoto, J. Phys. Soc. Jpn. 62, 3532-3538 (1993).
- [3] K. Ienaga, H. Takata, Y. Onishi, Y. Inagaki, H. Tsujii, T. Kimura, and T. Kawae, Appl. Phys. Lett. 106, 021605 (2015).
- [4] 家永紘一郎, 高田弘樹, 河江達也, 固体物理 53, 317 (2018).
- [5] K. Miyakawa, H. Takata, T. Yamaguchi, Y. Inagaki, K. Makise, T. Kawae, Appl. Phys. Exp. 15, 013002 (2022).

# 液体窒素との違いよりみた液体水素タンク内部の状態変化予測に関する研究

## Estimation study on change of state inside liquid hydrogen tank from the viewpoint of difference with liquid nitrogen

幡井 翔悟, 武中 悠一郎, 山下 陽也, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実(神戸大学)

HATAI Shogo, TAKENAKA Yuichiro, YAMASHITA Haruya, MAEKAWA Kazuma, FUJIKAWA Shizuichi, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)

E-mail: 1887085w@gmail.com

### 1. はじめに

今日、地球温暖化が深刻化しており、環境に優しい水素エネルギーが注目されている。そのため現在、オーストラリアの褐炭から作られた水素を液化し、船舶で輸送する計画が進行している。しかし、水素は爆発範囲が広く、スロッシングしやすいなどの特性があり、安全な運用のためには、タンク内での時間変化に伴う圧力や温度変化などを詳細に把握する必要がある。現在運航している「すいそふろんていあ」は 1250 m<sup>3</sup> のタンクを備えているのに対し、今後竣工予定の液体水素運搬船は 40,000 m<sup>3</sup> のタンクを保有している。また、長距離用燃料電池トラックの液体水素タンクも大型化する傾向にある。そのため、大型タンク内部の液体水素の状態変化を詳しく研究する必要がある。しかし、大量の液体水素を用いて研究を行うことは、経済性や安全性の観点から難しく、代替物質による研究が望ましい。

そこで本研究では、液体水素(LH<sub>2</sub>:沸点 20 K)の代替物質として液体窒素(LN<sub>2</sub>:沸点 77 K)を用いて、液体水素タンク内部の状態変化を実験的に明らかにすることを目的とした。本研究では、充填率をパラメーターとして貯蔵・輸送に関する蓄圧実験を行った。

### 2. 実験装置と実験方法

Fig.1 に実験装置概略図を示す。本実験では、光学観測窓付 LH<sub>2</sub> 用クライオスタット、圧力計、熱陰極電離真空計、CCS 温度計(T1~T6)を用いた[1]。

次に、実験方法を述べる。LN<sub>2</sub>または LH<sub>2</sub>をクライオスタット内の LH<sub>2</sub> 槽へ移送後、クライオスタットを静止させて放出弁を開けておく。その後、充填率が設定の値になるとクライオスタットの放出弁を閉じ計測を開始する。蓄圧時はクライオスタットを静止状態で保ち、圧力が 0.4 MPaG に到達次第計測を終了する。今回の実験では、15~85 %までの充填率において実験を行った。その中でも、充填率が 30 %及び 70 %時における結果に特に注目しながら、LN<sub>2</sub>と LH<sub>2</sub>を比較する。

### 3. 実験結果

Fig. 2, 3 に 30 %蓄圧時における LN<sub>2</sub>及び LH<sub>2</sub>の温度と圧力変化を示す。点線は飽和温度を示す曲線であり、その曲線より上部にある T3 ~ T6 は気相部である。一方 T1 及び T2 は液相部である。

初めに温度変化について、説明する。気相部は LN<sub>2</sub> 及び LH<sub>2</sub> で、経過時間に伴って温度が上昇していることが分かる。一方液相部では、サブクール状態になっていることが分かる。

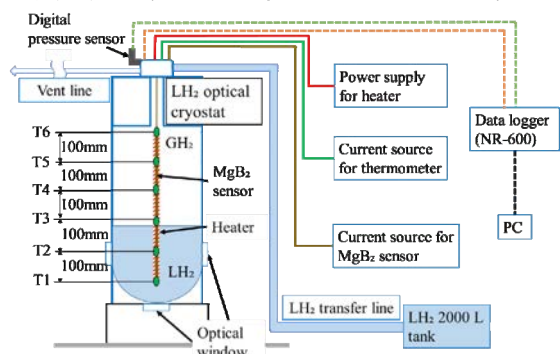


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup.

次に、圧力について説明する。LN<sub>2</sub> の蓄圧時間(0.4 MPaG に到達するまでの時間)は LH<sub>2</sub> に比べて長く、3~5 倍程の違いがあることが分かった。蓄圧時間は外部からの入熱や蒸発潜熱、熱伝導率が関係していると考えられる。これらの関係については、本学会にて詳細に報告する予定である。

### 4. まとめと今後の課題

今回の実験では、クライオスタット内の LN<sub>2</sub> 及び LH<sub>2</sub> の蓄圧実験を行い、それぞれの熱力学的挙動の類似点や相違点を調べた。その結果、気相部の温度上昇は経過時間と共に上昇し、液相部ではサブクール状態になるなど、LN<sub>2</sub> と LH<sub>2</sub> では類似点があることが分かった。一方で、LN<sub>2</sub> は LH<sub>2</sub> に比べて蓄圧時間がかかり長くなり、入熱も液相部に蓄えられやすいなどの相違点があることが分かった。

今後は更にデータの収集に努め、LH<sub>2</sub> の代替物質として LN<sub>2</sub> をどのように使用できるのかを明確化する必要がある。

本研究の成果の一部は、国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果、得られたものです。ここに誠意を表します。

### 参考文献

1. M. Nagahiro et al : abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2021) p.26

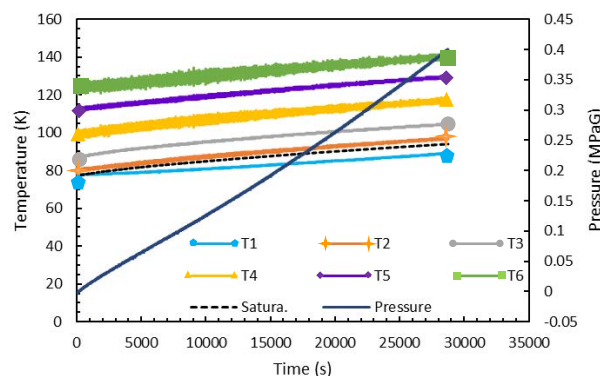


Fig.2 Temperature and pressure under LN<sub>2</sub> storage.

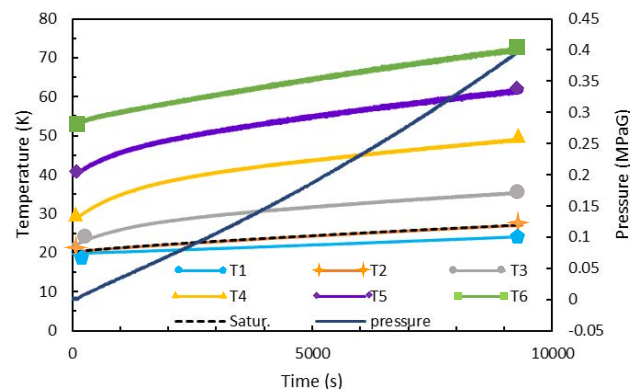


Fig.3 Temperature and pressure under LH<sub>2</sub> storage.

# 横振動時における液体水素の貯蔵・輸送に関する基礎研究

## Fundamental study on storage and transportation of liquid hydrogen under horizontal vibration

武中 悠一郎, 幡井 翔悟, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実(神戸大学)

TAKENAKA Yuichiro, HATAI Shogo, MAEKAWA Kazuma, FUJIKAWA Shizuichi, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)

E-mail: 233w516w@stu.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、環境負荷が少なくクリーンな水素エネルギーが、にわかに注目を集めており、船舶による大量輸送の計画が進められている。船舶輸送の際、水素はその貯蔵効率の観点から液体状態で輸送することが望ましいと考えられている。また、長距離用燃料電池トラックの液体燃料としても搭載することが期待されている。しかし、液体水素は沸点(20 K)が非常に低く、粘性係数も小さくスロッシングしやすいため、輸送中の動揺によって蒸発損失等が生まれる。本研究では蒸発損失低減の足がかりとして、横振動が液体水素の熱流動特性へ与える影響を明らかにすることを目的とする。本研究では、初期充填率をパラメータとしてタンク内の振動蓄圧時における温度と圧力の時間変化を調べた。

### 2. 実験装置及び実験方法

Fig.1 に実験システム[1]の概略図を示す。実験システムは光学観測窓付 LH2 用クライオスタット(LH2 槽 20 L)、横振動試験装置、外部加熱型超伝導 MgB<sub>2</sub>(二ホウ化マグネシウム)液面センサー、CCS 温度センサー(T1~T6)、圧力計、真空計等で構成されている。横振動試験装置は振幅±100 mm、最大加速度±0.1 G に設定した。実験は液体水素の初期充填率を 40%~80% に設定し、0.4 MPaG まで蓄圧を行った。以下に各実験条件を示す。

run1: 0.1 MPaG まで静止蓄圧後、60min の横振動(48.5%)  
 run2: 0.2 MPaG まで静止蓄圧後、60min の横振動(40.6%)  
 run3: 0.1 MPaG まで静止蓄圧後、60min の横振動(76.0%)  
 run4: 0.1 MPaG まで静止蓄圧後、60min の横振動(45.0%)  
 run5: 0.1 MPaG まで静止蓄圧後、60min の横振動(56.1%)  
 run6: 0.2 MPaG まで静止蓄圧後、60min の横振動(47.5%)

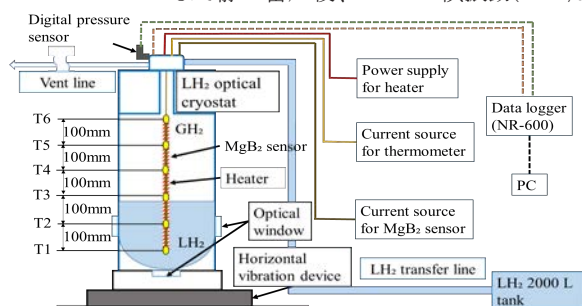


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system.

### 3. 実験結果と考察

run2 における圧力と温度の時間変化を Fig.2 に示す。温度については run1~run6 の全てで振動前、振動後は緩やかに温度が上昇し、振動中は気相部分を示す温度計で振動開始直後に比べて低下していた。反対に、液相部分は緩やかに上昇して飽和温度に近づいて行った。これは液相部分が最初にサブクール状態になっていたことを示しており、CCS 温度センサーが攪拌に伴う入熱による緩やかな温度上昇を計測したと考えられる。

振動開始直後に run1~run6 で最初に気相部の温度と圧力が大きく低下した。これは振動によって気相部分が液相部分と混ざることによって冷されたため、気相部の圧力と温度が低下したと考えられる。この圧力低下は、振動開始時の圧力が同じと

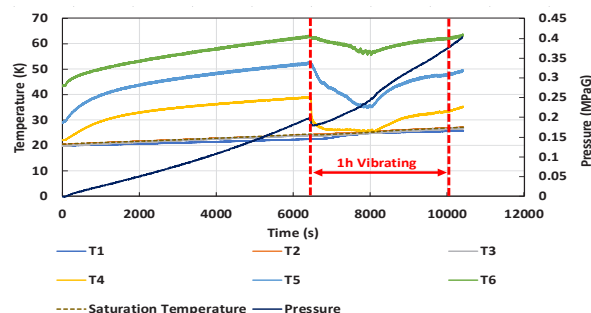


Fig.2 Time chart of temperature and pressure at run2 (40.6% filling ratio).

き、充填率の大きさに比例した。これは充填率が高いほど気相部分の体積が少ないので、振動による温度低下が圧力に影響を与える割合が大きいためであると考えられる。

振動前後と振動中の 3 つに分けて圧力上昇率を比べると、振動前の圧力上昇率に大きな差はなかった。振動中は、振動開始前より圧力上昇率が高くなった。振動後の圧力上昇率は run1~run6 の全てで、振動中の値よりも大きくなった。これは振動によって気相と液相が混ざることによって圧力の上昇を抑制していたのが、静止した瞬間に振動エネルギーが熱エネルギーへと変換したために液体水素の蒸発量が増えたことが原因であると考えられる。

次に、run2 と run6 における圧力と温度の時間変化を考察する。圧力が 0.25 MPaG 付近で気相部の温度は上昇に転じ、液相部の温度は飽和温度に漸近した。これは、0.25 MPaG 付近でガス温度と液温度が近づいたことから気液の境界面における混ざり合いが起こりにくくなり、静止状態に近い状態になったと推察できる。これによって、気相部分では温度上昇に転じ、液相部分では 0.25 MPaG 付近から再びサブクール状態が進んだと考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

横振動実験から明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 振動開始直後は気相部の温度と圧力が大きく低下し、温度に関しては液面に近いほど著しく低下した。
- (2) 振動中は気相部分の温度は低下して行くこと、静止蓄圧中は緩やかに温度上昇することが分かった。
- (3) 液相部分は飽和温度に漸近し、入熱に伴い緩やかに温度上昇した。
- (4) 圧力上昇率は振動中に増加もしくはほとんど変化せず、振動後は振動中よりさらに増加した。

今後はパラメータを変えたデータを収集し、外部入熱や振動エネルギーを算出することで諸現象を定量的に解析していく必要がある。

本研究の成果の一部は、国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果、得られたものです。ここに謝意を表します。

### 参考文献

1. M. Nagahiro et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol.102 (2021) p.26

## 歪ゲージの高感度測定とキャリブレーション法

## High sensitivity measurement of strain gauge and its calibration method

神田 昌枝, 山本 実奈, イワノフ ユーリ, 山口 作太郎 (中部大学)

KANDA Masae, YAMAMOTO Mina, IVANOV Yury, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

## 1. はじめに

材料歪の見積もりは、機器・装置設計において極めて重要であり、多くの機器で歪測定が行われてきた。一方、歪測定は歪ゲージの抵抗変化によって行われるが、抵抗変化が微小であるため、アナログ差分回路により非荷重時の歪ゲージ電圧をゼロ設定し(キャリブレーション、補正)、計測器の感度を上げてから、高精度測定を標準的にを行っている。差分回路にはブリッジ回路が用いられている。そして、ブリッジ回路を構成する一つの抵抗を可変することで歪ゲージの出力を測定前に一度ゼロ設定している。この原理は歪ゲージが発明されてから 80 年以上経つが変わっていない。前回の発表で新しいアナログ差分回路を提案し、感度が 4 倍上がることを報告した[1, 2]。今回は常温とは異なった温度に設置された歪ゲージの補正に付いて発表を行う。

## 2. ブリッジ回路、三線式ブリッジ回路及び新回路との比較

図 1 a), b), c)に液体窒素で 77 K に歪ゲージを冷やしている時のブリッジ回路、三線式ブリッジ回路、新回路の三つを示す。歪ゲージ温度が常温と異なる時に通常のブリッジ回路では、歪ゲージ電圧をゼロ設定する際に常温の温度変化の影響を受け易い。このため、三線を利用してその温度変化の影響を除去している。この原理は電流が流れるリード線の温度変化が電圧測定に影響を受けるが、電圧測定を行うリード線には殆ど電流が流れないので、抵抗変化の影響が無視出来ることによる([https://product.kyowa-ei.com/learn/strain-gages/3\\_wire\\_system](https://product.kyowa-ei.com/learn/strain-gages/3_wire_system))。この回路を図 1 b)に示した。この方法は広く利用され、標準計測法になっている。

しかしながら、三線式ブリッジ回路は三本目の電圧計側線には電流が流れず、常温変化の影響を受けないが、歪ゲージに電流が流れ込むリード線は同時に電圧測定端子に 120  $\Omega$  抵抗を介して直接接続されているため、常温変化の影響を受ける。つまり、三線利用でも温度変化の影響は完全にはゼロにならないことが分かる。著者等の調査ではゼロ設定が困難な場合があることを仄聞している。

さて、温度の精密測定では、温度計は抵抗温度計を利用し、四端子測定することが一般的である。これは電流を流す定電流電源と接続するリード線とは別に電圧測定を行うリード線を別途準備して、内部抵抗の高い電圧計を接続する構成になっている。その結果、常温変化に対してリード線抵抗の

影響を極力下げることができるためである。

図 1 c)にアナログ差分回路として新回路を示しているが、この回路から、可変定電圧電源を除くと通常の四端子測定回路である。したがって、常温変化の影響によるリード線の抵抗変化の影響を基本的には受けない。また、可変定電圧電源は常温部に設置され、温度補正回路が組み込まれているため、定電流電源と同様に常温変化の影響は基本的に受けない。したがって、歪ゲージが常温とは異なった温度に設置されたときの電圧ゼロ設定は常温変化の影響によるリード線の影響を受けない。

## 3. まとめ

現在、電圧計、定電流電源、可変定電圧電源などは温度補正回路が組み込まれ、エレクトロニクス技術の発展によって極めて安定に動作する。実際、この 20 年ほどで安価で汎用の OP アンプの温度ドリフトは 1/4 以下になってきている。このため、可変定電圧電源を追加しても電源系の温度ドリフトは今までより少ないと思われる。

したがって、異なった温度での歪ゲージの高精度測定を行うためには、リード線の温度変化によるドリフトを下げる必要がある。その意味で四端子測定と同等なアナログ差分回路は理想的である。しかも、従来のブリッジ回路より感度が 4 倍になっている。これは回路解析と実験から実証された [3]。実際、室温と 77 K の計測結果から、「みかけの歪」を新回路では共に除去できた。なお、この手法は可変抵抗器で歪ゲージの出力電圧のゼロ設定を行うので、従来法と同等である。今後は、色々な材料について複数の歪ゲージを用いて測定を継続する。

## 参考文献

1. 特願 2022-052746 (特許査定 R5 年 3 月 16 日)
2. 神田 他: 歪ゲージによる低温での色々な材料の高感度測定, 2023 年度春季低温工学超電導学会講演 (2023) 2C-a2
3. 山本 他: 歪ゲージ高感度測定回路でのステンレス板の歪応力測定, 令和五年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 (2023) D1-4

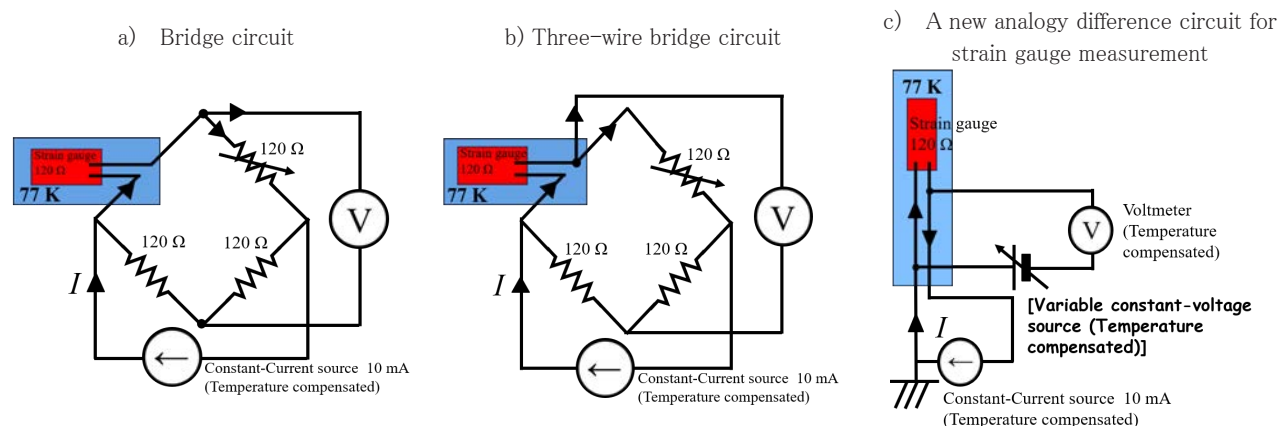


Fig.1 Strain gauge measurement in different circuits

## Nb<sub>3</sub>Sn生成に対するGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加効果 Addition effects of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the creation of Nb<sub>3</sub>Sn.

箱石 裕人, 金木 大祐, 小山田 拓真, 内藤 智之 (岩手大); 菊池 章弘 (NIMS)

HAKOISHI Hiroto, KANEKI Daisuke, OYAMADA Takuma, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: s3123003@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn超電導体は加速器や核融合用超電導コイルなどの高磁場用線材として使用されている。Nb<sub>3</sub>Sn線材の運転温度は液体ヘリウム温度であるため、磁気的不安定性が問題となる。この課題に対し、Nb<sub>3</sub>Sn多芯線材のひとつのフィラメントを高比熱材料Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に置き換えることで安定性が向上することが報告された[1]。本研究では、同様の効果を狙って、内部Sn法の出発原料であるSn粉末にGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末を直接添加してNb<sub>3</sub>Sn線材を作製し、その超伝導特性および微細組織について調べた。

### 2. 実験方法

Nb<sub>3</sub>Sn線材は内部Sn法により作製した。内部のSnソースにはSn 100wt%-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0wt% (0wt%試料)、Sn 95wt%-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5wt% (5wt%試料)、Sn 50wt%-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 50wt% (50wt%試料)の3種類の粉末を用意し、スウェーピング加工・伸線加工を行い、直径1.25mmのNb<sub>3</sub>Sn 単芯線を作製した。その後、単芯線7本を束ねて銅管内に挿入し、さらにスウェーピング加工・伸線加工を行うことで直径0.6mmのNb<sub>3</sub>Sn 7芯線を作製した。SnとGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の理論密度は7.3および7.4g/cm<sup>3</sup>と近いいため、Snソース中のGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の重量比は体積比と考えられる。得られた線材は真空中にて750°C・24 hの熱処理を施し、Nb<sub>3</sub>Snを生成させた。

試料の評価は、18 Tまでの*I*<sub>c</sub>測定、SQUID磁束計を用いた磁化測定、SEM・EDSによる組織観察・組成分析を行った。

### 3. 結果と考察

Fig. 1に作製したNb<sub>3</sub>Sn線材の反射電子像((a) 0、(b) 0.5 および(c) 50wt%試料)と50wt%試料の元素マッピング((d) Cu、(e) Sn、(f) Gdおよび(g) O)を示す。50wt%試料はSn仕込み量が少ないためNb<sub>3</sub>Sn生成層が最も薄かったが、5wt%試料は0wt%試料に比べてNb<sub>3</sub>Snの生成層が厚く、Sn仕込み量と反する結果となった。またEDSより、5wt%、50wt%試料ではSn/Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とCuの界面にCu-Sn-Gd-Oの化合物の生成が確認された。これまでにCuやTi、Hfなどの添加によりNb<sub>3</sub>Sn生成促進が確認されているため、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>にもNb<sub>3</sub>Sn生成促進効果がある可能性がある。

Fig. 2に各種Nb<sub>3</sub>Sn線材の4.2 Kにおける*I*<sub>c</sub>-*B*曲線を示す。50 wt%試料の*I*<sub>c</sub>はSn量が少ないため低下していたが、5wt%試料の*I*<sub>c</sub>は0wt%試料を上回った。この結果は反射電子像で得られたNb<sub>3</sub>Sn生成層の厚みと一致している。

Fig. 3に各種Nb<sub>3</sub>Sn線材の*M*-*T*曲線を示す。*T*<sub>c</sub><sup>mid</sup>は0、5、50wt%試料の順に16.3 K、16.3 K、16.1 Kであり、50 wt%試料の*T*<sub>c</sub>は低下していた。50wt%試料は仕込みSn量が少ないため*T*<sub>c</sub>の低いSn-poorなNb<sub>3</sub>Snが生成されたと考えられる。*I*<sub>c</sub>が向上した5wt%には*T*<sub>c</sub>の変化は見られなかった。

現在、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加によるNb<sub>3</sub>Sn生成促進のメカニズムについて考察を行っている。

### 謝辞

本研究はNIMS連拠点推進制度の支援を受けて実施した。

### 参考文献

1. X. Xu, et al.: *Supercond.Sci.Technol.* **31** (2018) 03LT02.

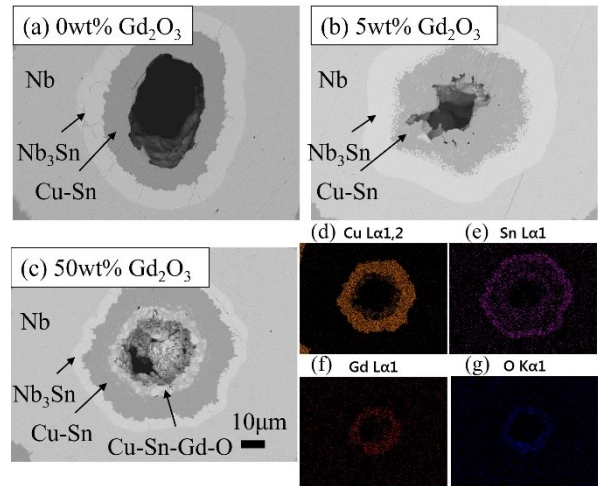


Fig. 1 Backscattered electron images of Nb<sub>3</sub>Sn wires ((a) 0wt%, (b) 5wt%, (c) 50wt% sample) and EDS mapping of 50wt% sample ((d) Cu, (e) Sn, (f) Gd, (g) O).

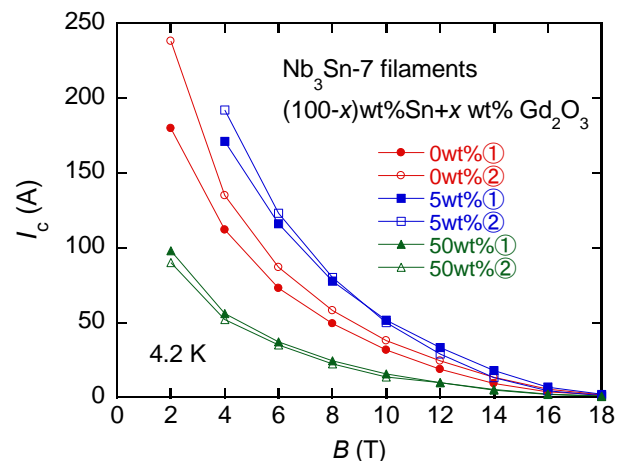


Fig. 2 *I*<sub>c</sub>-*B* curves at 4.2 K for various composition Nb<sub>3</sub>Sn wires.

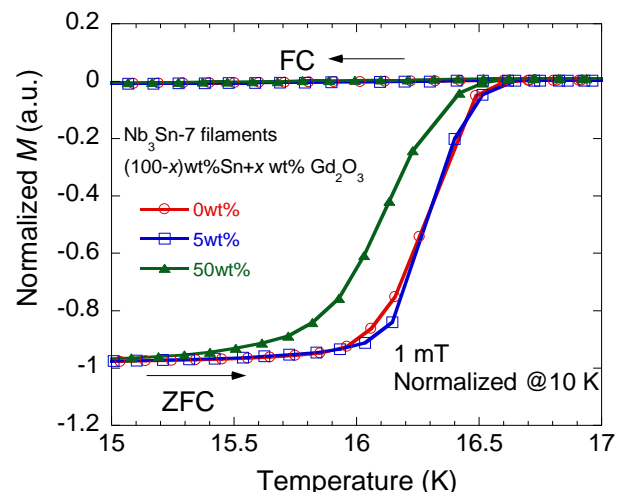


Fig. 3 *M*-*T* curves various composition Nb<sub>3</sub>Sn wires.

# Sn 高拡散駆動力下での Nb 母相への Hf 添加による Nb<sub>3</sub>Sn 結晶粒微細化

## Grain refinement of Nb<sub>3</sub>Sn by Hf doping to Nb parent phase under high Sn diffusion driving force.

浅井 航希(上智大学, NIMS); 谷貝 剛(上智大学); 諸永 拓, 原 徹, 伴野信哉(NIMS)

ASAI Koki (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); MORONAGA Taku, HARA Toru, BANNO Nobuya (NIMS)

E-mail: [kouki0204@eagle.sophia.ac.jp](mailto:kouki0204@eagle.sophia.ac.jp)

### 1. はじめに

粒界が磁束ピンニングサイトとされる Nb<sub>3</sub>Sn 線材の性能向上にとって結晶粒微細化は極めて重要な課題である。最近 Nb 母相への Hf 添加による結晶粒微細化が注目されているが、我々が進めたブロンズ法に対しては Hf 添加による微細化の効果が見られなかった。この要因として Sn 高拡散駆動力の低さが影響しているのではと考えた。本研究では、Sn 高拡散駆動力が高い状態での Hf 添加効果を詳細組織観察によって明らかにした。組織観察として、TEM ベースの結晶方位解析 (ACOM-TEM), STEM-EDS 分析を実施した。その結果 Hf 添加では、結晶粒微細化とともに、Cu 粒界拡散が促進されることが明らかにされた。この Cu 拡散が少なからず粒成長に影響を及ぼしている傾向がみられた。

### 2. 実験方法

本実験では Nb-2at%Ti, Nb-2at%Ti-1at%Hf, Nb-4at%Ta 及び Nb-4at%Ta-1at%Hf の 4 種類の Nb 合金を準備し、Cu シースを付与した複合テープ上に、Sn-75at%Cu となるよう Sn 層をメッキした。これを中間焼鈍 550°C/100-200h の後、685°C/100h の熱処理を行い Nb<sub>3</sub>Sn 層を生成させた。熱処理後、テープ縦断面から集束イオンビーム (FIB) により TEM 試料を切り出し、S/TEM (JEM-ARM300F 加速電圧:300kV) により Nb<sub>3</sub>Sn 層の観察、分析を行った。紙面垂直方向が線材軸方向と一致する。また、ACOM-TEM (JEM-2800 加速電圧 200kV) により結晶方位マップを得ることで結晶粒径の解析を行った。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に、(a)2Ti (b)2Ti-1Hf (c)4Ta (d)4Ta-1Hf 添加試料の Nb 側, 中央, Cu-Sn 側における ACOM-TEM による Nb<sub>3</sub>Sn 結晶方位マップ, Table. 1 に平均粒径測定結果を示す[1]。Hf 添加により Ti 及び Ta 添加試料どちらの場合も反応前線の Nb 側で結晶粒が微細化される傾向が見られた。Ta 添加の場合の方がその傾向は大きかった。STEM-EDS 解析では Nb<sub>3</sub>Sn 層内に酸化物相の形成は見られず、これまで Hf 添加効果の有無について物議があったが、本解析によって高 Sn 拡散駆動力下では純粋な Hf 添加効果があることを確認できた。

一方で、結晶粒微細化の効果は従来考えられていたほどよりは小さいことがわかった。EDS マッピング分析では Ti, Ta 試料どちらでも粒界に Cu-Hf によるナノ化合物の形成が確認でき、粒界において高い Cu 濃度が確認された。Fig. 2 に、さらに Sn 濃度を高めた新たな試料 (Sn-10at%Cu) での、SEM-EDS によって得られた Nb<sub>3</sub>Sn 層中における Cu 含有率を示す[2]。同様に Hf 添加において Cu 濃度の増大が確認された (主として粒界に偏析していると考えられる)。これらの結果から、Hf 添加によって Cu の粒界拡散が促進されることが考えられ、それが結晶粒の成長を促している可能性が示唆される。結晶粒微細化の効果は 10%~20% であり、期待ほどの効果は見られなかった要因としては、Cu 偏析の増加による粒成長が影響していることが考えられる。

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP23K04453 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- N. Banno, et al.: In-depth S/TEM observation of Ti-Hf and Ta-Hf-doped Nb<sub>3</sub>Sn layers submitted to SUST.
- K. Asai et al.: Effect of Hf addition to Nb alloy on Nb<sub>3</sub>Sn Grain Morphology under the High Sn Diffusion Driving Force, presented at MT28.

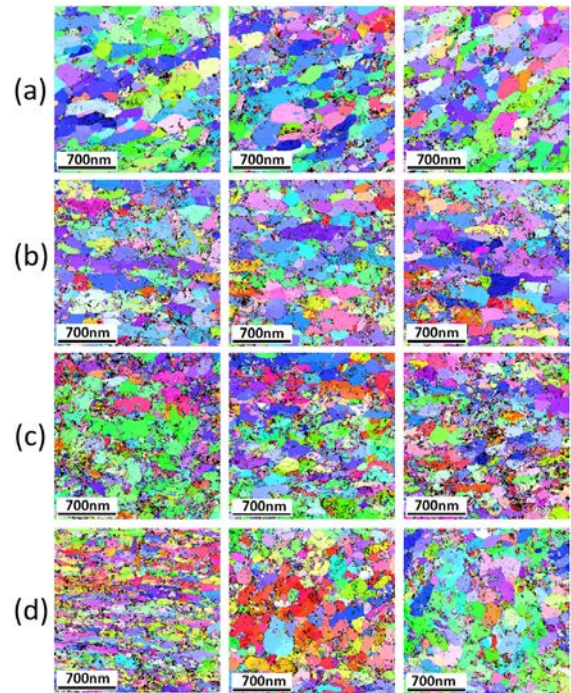


Fig.1 IPF maps of Nb<sub>3</sub>Sn layers in (a) 2Ti, (b) 2Ti-Hf, (c) 4Ta, and (d) 4Ta-Hf addition, taken by ACOM-TEM. The left, center and right denote Nb side, middle, and Cu-Sn sides, respectively.

Table.1 Average grain size of Nb<sub>3</sub>Sn by ACOM-TEM

Sample	(a)	(b)	(c)	(d)
Addition to Nb-alloy	2Ti	2Ti-Hf	4Ta	4Ta-Hf
Grain size [Overall] (nm)	163.3	143.2	103.7	116.8
[Nb-side] (nm)	171.6	145.1	111.0	69.7
[Middle] (nm)	150.6	150.3	101.3	121.8
[Sn-Cu side] (nm)	167.7	134.1	98.7	158.8

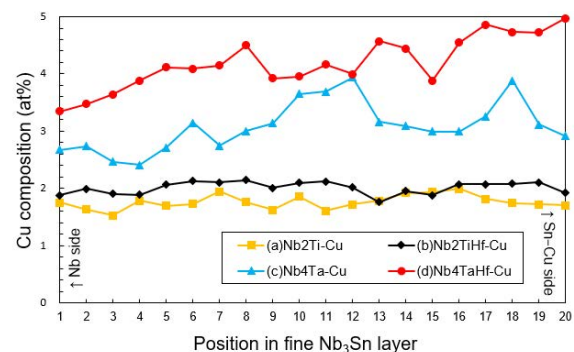


Fig.2 Cu composition (at%) in the fine grains Nb<sub>3</sub>Sn layer measured by SEM-EDS analysis (acceleration voltage: 20kV)

## 超極細ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材及びフレキシブルケーブルの開発 Development of the ultrafine bronze processed Nb<sub>3</sub>Sn wires and flexible cables

菊池 章弘, 飯嶋 安男, 北口 仁 (NIMS); 山本 優, 河野 雅俊, 大坪 正人 (JSA); 王 旭東, 菅野 未知央, 土屋 清澄 (KEK); 菱沼 良光, 高畑 一也 (NIFS); 谷口 博康, 西村 俊則 (大阪合金)

KIKUCHI Akihiro, IJIMA Yasuo, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);

YAMAMOTO Masaru, KAWANO Masatoshi, OTSUBO Masato (Japan Superconductivity Application Development Inc.);

WANG Xudong, SUGANO Michinaka, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); HISHINUMA Yoshimitsu, TAKAHATA Kazuya (NIFS);

TANIGUCHI Hiroyasu, NISHIMURA Toshinori (Osaka Alloying Works, Co., Ltd.)

E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

### 1. はじめに

我々は React & Wind 法の適用に有利な新しい極細線構造の Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線の研究開発を進めている。長年、極細多芯構造ではあるが、超伝導フィラメントと母材が一体化したモノリス構造の線材開発が世界的に行われてきた。超伝導フィラメントの縮径は、交流損失の低下とともに線材にかかるひずみの低減にも貢献する。超伝導フィラメントと線材母材が一体化している場合、ひずみ量は線材中央の中立軸からの距離に支配されるが、もし、超伝導フィラメントが母材に拘束されず自由度をもったなら、ひずみ量は個別の超伝導フィラメントごとに中立軸が変わって格段に小さくなる。

前回、直径 45mm 程度の小型ピレットの熱間押出加工を行って、ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の極細化を試みた。14mass%Sn 濃度のブロンズを母材として、19 芯のニオブフィラメントを含有したブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の極細線加工に取り組んだところ、外径 0.05 mm の極細線を 7, 322 m まで無断線で加工することに成功した。今回、スケールアップのために、量産サイズの外径 200mm 程度の大型ピレットによる試作を行った。

### 2. 実験方法

大阪合金(株)の特殊製法(水田式溶製法)により、化学組成が Cu-13mass%Sn-0.3mass%Ti の高品質ブロンズを作成し、今回の大型押出試作の原料に供した。ドリル加工により 19 芯のサブマルチ構造とし、ニオブ棒(純度 3N)を挿入したニオブ/19 ニオブ複合体の周囲に拡散バリアとしてニオブ層を設け、それを無酸素銅管に挿入した。断面構成/デザインについては前回の小型ピレットと概ね同様である。先端と後端をプラグで蓋をして真空中で脱気し、電子ビーム溶接を行って真空封入した。次に冷間静水圧プレス(CIP)行ってピレット内部の充填密度を高め、その後に直接方式の熱間押し出し加工を行った熱間押し出し後は、650°C前後の温度で中間焼鈍を行いながら、冷間で超硬ダイスによる引き抜き加工を実施した。外径 0.54mm 以下は、JSA 超電導ラボで 100 m/min の引き抜き速度で連続伸線を実施し、外径 0.05 mm を目指した。一部はさらに細く外径 0.03 mm までの極細加工に取り組んだ。試作した 50 ミクロン径の極細線の一部を利用した撚線の試作も実施した。試作した撚線は、拡散反応のための熱処理後に、液体ヘリウム(4.2K)中で外部磁場を印加して臨界電流(I<sub>c</sub>)の測定を行った。各種撚線の I<sub>c</sub> 測定は最大 1,000A までは NIMS が保有する 18T ソレノイドマグネットで行い、それ以上の大電流の通電実験は、NIFS が保有する 8T スプリットマグネットと最大 20kA の電源を利用して行った。

### 3. 実験結果

今回、ブロンズの加工性の観点からブロンズ母材の Sn 濃度を前回と比較して 1%程低くした 13%とした安全設計を採用した。今回、熱間押し出し後に想定外のニオブバリアの異常変形が発

生し、さらにその後の伸線加工で異常変形は著しくなることが認められたが、断線等の伸線加工性には大きな影響はなかった。試作した一部の 50 ミクロン径の極細線を使用して、まずは 36 本を束ねた一次撚線を試作し、さらにそれを 7 本束ねた 252 本(7/36)の二次撚線、さらにそれを 7 本束ねた 1,764 本(7/7/36)の三次撚り線を試作した。Fig. 1 はそれら単線及び各種撚線の断面及び側面の写真である。各種撚線の臨界電流は、概ね、束ねた素線の本数倍の値が得られた。

### 謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(A)課題番号 21H04477、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学分野)13-2023a、核融合科学研究所一般共同研究 NIFS23KIEF050 の一環として実施した。

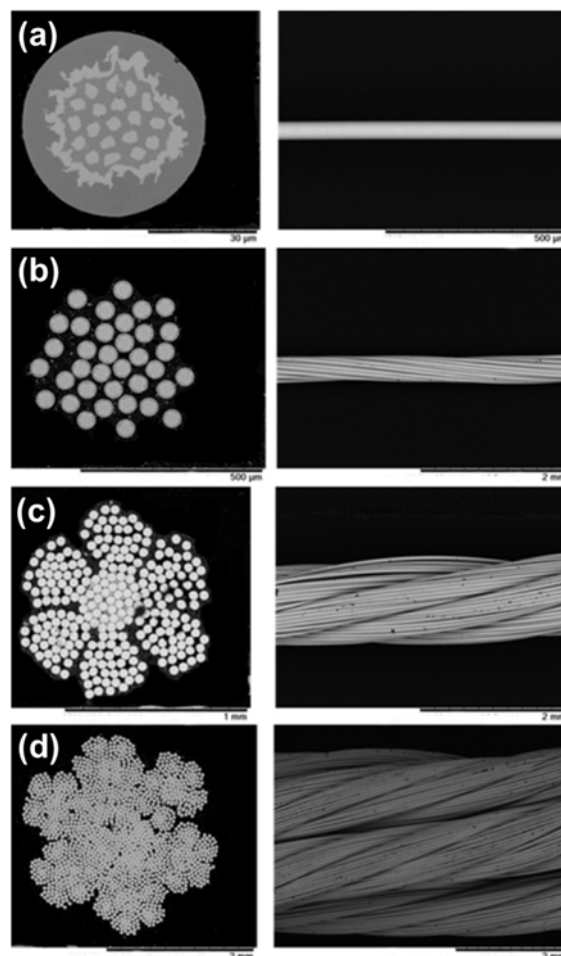


Fig. 1 Cross-sections and transverse appearance views of (a) the bronze-processed Nb<sub>3</sub>Sn ultrafine wire 50 microns in diameter, (b) 36 stranded primary cable, (c) 7/36 stranded secondary cable, and (d) 7/7/36 stranded ternary cable.



# RHQT 法 Nb<sub>3</sub>Al テープ状線材と銅ストリップを複合化した大容量導体の開発 ～安定化材配置の影響

## Development of high-capacity superconductors composed of tape-shaped RHQT-processed Nb<sub>3</sub>Al wires and copper strips —Effect of stabilizer arrangement

高畑 一也, 菱沼良光 (NIFS); 菊池章弘, 飯嶋安男 (NIMS); 土屋清澄, 王旭東, 大内徳人 (KEK); 濱口真司, 今川信作, 三戸利行 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); KIKUCHI Akihiro, IJIMA Yasuo (NIMS); TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xu-Dong, OHUCHI Norihito (KEK); HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)  
E-mail: takahata.kazuya@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合炉用などの巨大なマグネットでは、ワインド&リアクト法を採用すると、同じく巨大な熱処理炉が必要となり現実的ではない。従ってリアクト&ワインド法が必須となる。その場合、Nb<sub>3</sub>Sn に比べてひずみ感受性が小さい Nb<sub>3</sub>Al 線材が有望である。本研究では、急熱急冷・変態 (RHQT) 法 Nb<sub>3</sub>Al 線材の大容量導体への応用を目指し、新しい構造の導体開発に着手し、模擬導体の試験を実施した。

大容量導体では、クエンチ時のホットスポット温度を抑制するために、銅 (またはアルミ) を線材とともに配置しなければならない。かつ、銅と線材間の電氣的接続も確保する必要がある。本研究では、線材をテープ状にすることにより、銅ストリップと面接触させ、必要な界面接触コンダクタンスを確保するという新しい概念を提案する[1]。これにより、銅メッキや半田含浸といった手間を省くことができる。今回は、銅ストリップの配置を変えた2種類の導体について安定性の違いを調べた。

### 2. 試験導体と実験方法

図 1 に試験導体の断面を示す。Type 1 導体では、幅 17 mm, 厚さ 1 mm の銅ストリップの両面に、幅 4.6 mm, 厚さ 0.2 mm の Nb<sub>3</sub>Al テープ状線材[2]を 6 枚 (片面 3 枚) 沿わせた。そして、ボルトで締め付けができる厚さ 1.5 mm のステンレス板 2 枚で挟み込んだ。Type 2 導体では、Nb<sub>3</sub>Al テープ状線材の外側にさらに厚さ 0.5 mm の銅ストリップを 2 枚追加するとともに、ステンレス板を厚さ 3 mm に変更した。図 2 は、積層途中のテープ状線材が見える写真である。

長さ 625 mm (ジョイント部を除く) の導体を、8 T のスプリットコイルに挿入し、外部磁場 3 T から 8 T でのクエンチ電流を測定した。クエンチ電流は、長さ 20 mm のいずれかの電圧タップにおいて 20  $\mu$ V (10  $\mu$ V/cm 相当) を超えた点で定義した。

### 3. 実験結果

図 3 に、外部磁場 8 T におけるクエンチ電流の測定結果を示す。電流掃印速度を 25 A/s から 500 A/s まで変化させて測定した。Type 1 導体では、クエンチ発生点が外部磁場の最も高い位置からずれており、掃印速度の増加に伴ってクエンチ電流が減少した。線材間の電流が不均一な状態から転流によって均一化する過程において、転流が間に合わず早期クエンチを起こしたと考えられる。一方、Type 2 導体においては、外部磁場の最高地点からクエンチが発生し、掃印速度依存性も見られなかった。銅ストリップの追加により、転流パスが増え、素線間の電流均一化が促進されたと考えられる。

### 参考文献

1. K. Takahata, et al: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p. 62.
2. Y. Hishinuma, et al.: Fusion Eng. Des., Vol. 180 (2022) 113169.

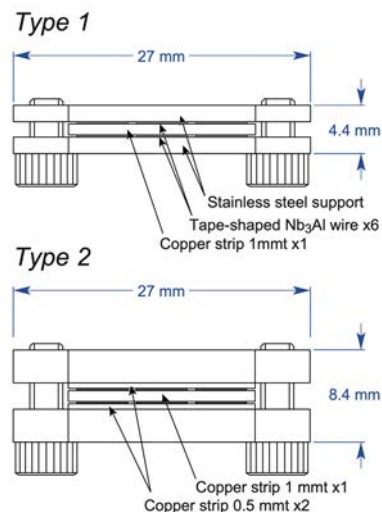


Fig. 1 Schematic diagram of the conductor structure.

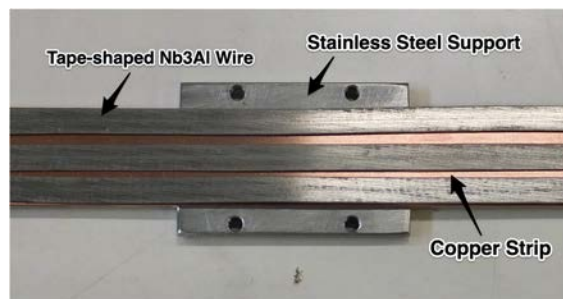


Fig. 2 Photograph of the test conductor before final assembly.

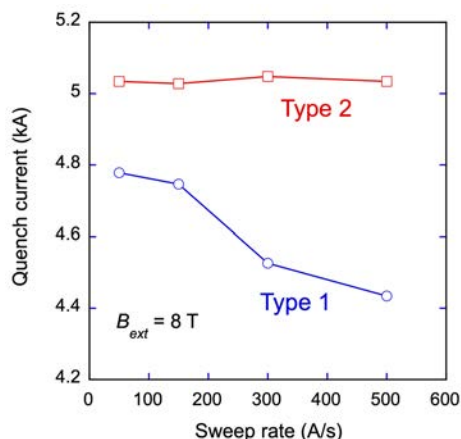


Fig. 3 Quench currents vs. sweep rates.

(太字の頁番号は講演 / ポスター発表)

※所属は講演申し込み時のものです。

	<b>A</b>		土井 俊哉	(京大)	60
安部 勇汰	(東工大)	102			
足立 和久	(昭和電線)	36, 146			<b>E</b>
相澤 一也	(原子力機構)	80	江原 悠太	(住重)	<b>126</b>
赤坂 友幸	(鉄道総研)	62, 115, 116, <b>117</b> , 145	江口 実穂	(中部大)	149
赤澤 輝彦	(神戸大)	118	江口 朋子	(東芝)	6, <b>131</b>
秋池 良	(東ソー)	86	江村 寛	(神戸大)	<b>24</b>
秋山 柚貴	(住友化学)	<b>99</b>	遠藤 淳	(青学大)	140, 141
アルベサル 恵子	(東芝)	131	遠藤 友成	(日立テクノロジーアンドサービス)	51
天野 一樹	(早大)	108	江崎 友哉	(京大)	<b>125</b>
雨宮 尚之	(京大)	17, 83, <b>119</b> , 120, 121, 122, 123, 124, 125			<b>F</b>
AMORIM Kenjirafael	(神戸大)	118	淵野 修一郎	(東大)	10, 52
安藤 竜弥	(日立)	67	藤江 和輝	(埼玉大)	<b>44</b>
青木 和之	(KEK)	51	藤井 剛	(産総研)	40
青木 学	(日立)	<b>66</b>	藤川 静一	(神戸大)	153, 154
青木 裕治	(昭和電線)	36, 37, 146	藤本 大貴	(九大)	<b>61</b>
青砥 慶典	(成蹊大)	<b>34</b> , 37	藤野 正人	(京大)	119
荒川 稜太	(新潟大)	137	藤田 真司	(フジクラ)	<b>105</b>
荒木 猛司	(東芝)	6	藤田 貴紀	(山梨大)	22
有本 靖	(KEK)	51	藤田 悠斗	(新潟大)	112
浅井 航希	(上智大)	<b>157</b>	福田 光宏	(阪大)	107, 110, 128
浅香 海斗	(横浜国大)	<b>43</b>	福井 良磨	(量研機構)	30
浅野 晃平	(神戸大)	118	福井 聡	(新潟大)	17, 72, 73, 112, 137
浅野 稔久	(NIMS)	81	福本 祥一	(山本電機製作所)	88
阿竹 洋輔	(東北大)	57	福本 祐介	(鉄道総研)	<b>115</b>
淡路 智	(東北大)	53, 81, 136	福山 和宏	(JASTEC)	129
	<b>B</b>		船木 修平	(島根大)	<b>60</b>
伴野 信哉	(NIMS)	<b>81</b> , 157	古瀬 充穂	(産総研)	130
BARZI Emanuela	(Fermi Lab.)	18			<b>G</b>
辺 文浩	(九大)	26	GARFIAS Davalos Diego Armando	(総研大)	76, 79, <b>106</b>
	<b>C</b>		後藤 駿介	(神戸大)	118
陳 嘉磊	(九大)	35	後藤 拓也	(Helical Fusion)	78
近森 希望	(鹿児島大)	<b>103</b>	GUO Zimeng	(九大)	61
力石 浩孝	(NIFS)	21, 63, 76			<b>H</b>
	<b>D</b>		芳賀 雄仁	(九大)	152
大保 雅載	(フジクラ)	105	萩原 将也	(東芝)	131
DHAKARWAL Mukesh	(KEK)	82	箱石 裕人	(岩手大)	<b>156</b>
			濱田 一弥	(量研機構)	30

濱口 真司	(NIFS)	15, 20, 76, 159	池本 由希子	(KEK)	27, 28
濱島 高太郎	(東北大)	29	池内 正充	(前川)	52
濱本 拓郎	(九工大)	147	今川 信作	(NIFS)	15, 20, 111, 159
濱岡 遼真	(東工大)	102	今泉 圭佑	(九工大)	145
原 和文	(KEK)	50	稲垣 祐次	(岡山理科大)	98
原 徹	(NIMS)	157	猪俣 涼	(上智大)	29
原島 郁弥	(東大)	74	井上 昌睦	(福岡工大)	55, 56, 70
原山 亨介	(新潟大)	72	井上 良太	(岡山大)	128
HARJO Stefanus (原子力機構)		65, 80	石田 政義	(筑波大)	91, 92
長谷川 博紀	(金沢大)	90	石田 悠人	(関西学院大)	15, 69
橋本 博正	(明治大)	114	石原 篤	(鉄道総研)	62, 115, 116, 117
橋本 祐希	(神戸大)	118	石井 秋光	(NIMS)	85
橋爪 秀利	(東北大)	57	石井 輝	(明星大)	97
波多 聰	(九大)	61	石井 宏尚	(東芝)	6
幡井 翔悟	(神戸大)	153, 154	石渡 翔大	(東京農工大)	142
廿日出 好	(近畿大)	38	石山 敦士	(早大)	72, 107, 108, 109, 110, 127, 128
服部 靖	(東芝)	131	磯野 高明	(量研機構)	80
林 大吉	(明治大)	63, 64	伊藤 凌太	(理研)	39
辺見 努	(量研機構)	31	伊藤 聡	(JASTEC)	52
東川 甲平	(九大)	26, 35, 134	伊藤 悟	(東北大)	57, 76
平井 寛一	(大陽日酸)	52	伊藤 俊輔	(新潟大)	137
平野 直樹	(NIFS)	16, 21, 29, 47, 48, 63, 64, 75, 76, 77, 101, 114, 135	井浦 康伸	(福岡工大)	70
平野 貴之	(京大)	17	IVANOV Yury	(中部大)	149, 155
平田 和人	(NIMS)	18	岩熊 成卓	(九大)	5, 11, 12, 55, 70, 146
平塚 善勝	(住重)	45, 46	岩本 雄二	(神戸大)	118
平山 斉	(鹿児島大)	103	岩崎 響	(青学大)	86, 87
菱沼 良光	(NIFS)	65, 158, 159	和泉 輝郎	(産総研)	36, 146
日浦 琢言	(早大)	108			
本田 敦	(量研機構)	30			<b>K</b>
本田 元気	(住友電工)	3, 33	陰山 彰	(室蘭工大)	7, 133
本間 輝也	(KEK)	50	海谷 真大	(成蹊大)	4
堀出 朋哉	(名大)	2, 32	柁川 一弘	(山理大)	104, 113
堀江 征生	(金沢大)	90	亀井 雄斗	(理研)	39
堀口 佳吾	(青学大)	3, 33	神谷 宏治	(NIMS)	25, 89, 91, 92, 93, 94, 100
星河 浩介	(住友化学)	99	金尾 憲一	(住重)	45, 46
			金山 諄志	(昭和電線)	146
	<b>I</b>		金山 高大	(KEK)	96
市毛 尚志	(量研機構)	30	金沢 新哲	(室蘭工大)	7, 133
市原 直	(フューザック・テクノロジーズ)	27	神田 昌枝	(中部大)	149, 155
市橋 駿	(新潟大)	73	金木 大祐	(岩手大)	156
市川 慧	(摂南大)	100	加納 佳祐	(山理大)	113
一木 洋太	(日立)	66	柏 好敏	(量研機構)	30
井口 将秀	(量研機構)	30	片山 伸彦	(東大)	74
井原 一高	(神戸大)	24	片山 翔太	(大同大)	53
飯嶋 安男	(NIMS)	84, 158, 159	川畑 秋馬	(鹿児島大)	103

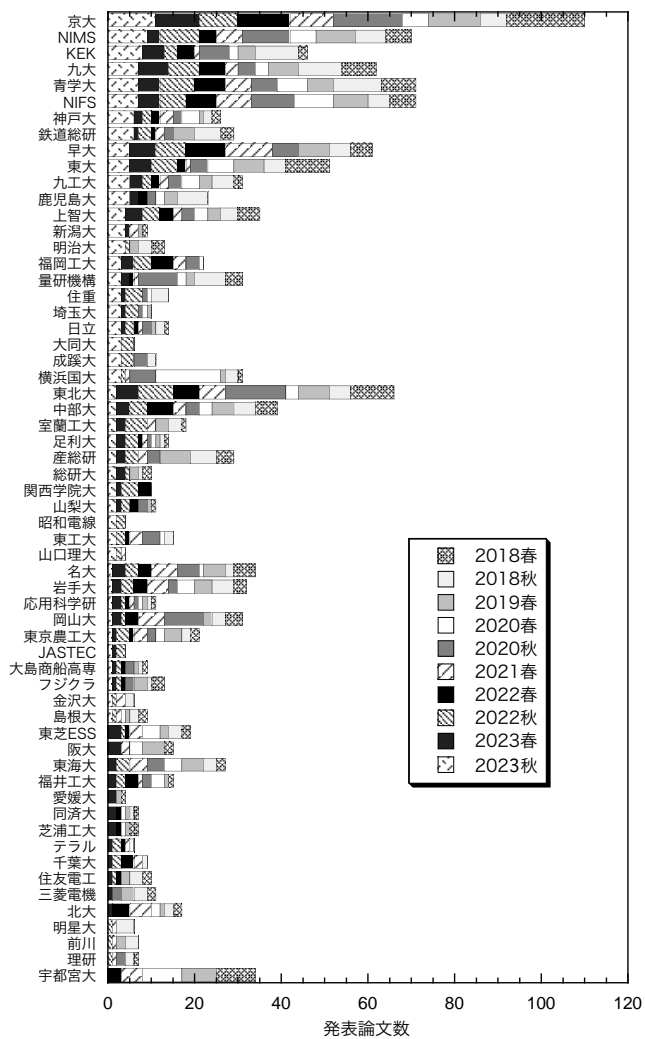
河江 達也	(九大)	<b>152</b>			<b>M</b>
川越 明史	(鹿児島大)	11, 16, 75, 135	町屋 修太郎	(大同大)	53, 58, <b>65</b> , 139
川畑 瑞穂	(上智大)	13, <b>14</b>	前川 一真	(神戸大)	88, 150, 153, 154
川又 弘史	(KEK)	27, 28	槇田 康博	(KEK)	29, 52
河野 勝己	(量研機構)	30	増田 大誠	(住重)	95
河野 雅俊	(JSA)	84, 158	増山 新二	(大島商船高専)	<b>94</b>
河野 亮介	(東大)	<b>68</b> , 71	松本 明善	(NIMS)	56, 61, <b>85</b>
川崎 玲	(東京農工大)	85	松本 郁哉	(京大)	111
川崎 卓郎	(原子力機構)	65, 80	松本 要	(九工大)	<b>32</b>
川嶋 慎也	(神戸製鋼)	81	松本 宏一	(金沢大)	89, 90, 91, 92, 93
KESGIN Ibrahim (Argonne Lab.)		18	松村 知岳	(東大)	74
結束 汐織	(KEK)	50, <b>95</b>	松下 哲哉	(青学大)	1
木戸 修一	(日立)	27	馬渡 康德	(産総研)	54
菊池 章弘	(NIMS)	<b>18</b> , 19, <b>84</b> , 156, <b>158</b> , 159	召田 雅実	(東ソー)	86
菊池 慎次郎	(東京農工大)	<b>142</b>	三堂 信博	(昭和電線)	146
瀧澤 このみ	(新潟大)	<b>73</b>	三浦 英明	(三菱電機)	69
金 錫範	(岡山大)	128	美馬 覚	(NICT)	39
木許 陽登	(九大)	<b>5</b>	三戸 利行	(NIFS)	52, 75, 77, 159
木村 誠宏	(東大)	28	三浦 正志	(成蹊大)	4, 34, 37
木須 隆暢	(九大)	26, <b>35</b> , 134	三浦 峻	(九大)	11, 12
北口 仁	(NIMS)	132, 158	宮原 誉	(鹿児島大)	135
北澤 英明	(NIMS)	89, 90	宮川 一慶	(九大)	152
木内 勝	(九工大)	59, 147	宮下 拓也	(住重)	126
小林 弘明	(JAXA)	15, 69, 111	宮崎 寛史	(九大)	11, 12
小林 賢介	(理研)	13, 14	宮澤 順一	(Helical Fusion)	78
小林 慎一	(住友電工)	3, 33	水野 謙一郎	(MTL)	136
小林 拓矢	(住友化学)	99	毛利 誠一	(九工大)	<b>54</b>
小林 達哉	(埼玉大)	39	諸永 拓	(NIMS)	157
児玉 一宗	(日立)	66, 82	元木 貴則	(青学大)	1, 3, 33, 86, 87, 132, <b>140</b> , 141
古賀 太陽	(福岡工大)	70	元木 悠太	(鹿児島大)	<b>16</b>
古賀 智之	(日立)	<b>67</b>	村上 陽之	(量研機構)	<b>30</b>
小濱 芳允	(東大)	136	武藤 翔吾	(フジクラ)	105
小前 諒太	(岡山大)	128	明連 広昭	(埼玉大)	44
小瀧 博司	(日立)	66, 82			
小山 湧也	(京大)	<b>122</b>			<b>N</b>
窪田 涼介	(福岡工大)	70	鍋谷 知廣	(新潟大)	137
久保田 侑治	(住友化学)	99	永濱 秀明	(JASTEC)	129
熊谷 塁	(早大)	110, 128	永井 敏也	(住重)	97
熊倉 浩明	(NIMS)	84	永田 秀輝	(鹿児島大)	<b>135</b>
國本 慧太	(青学大)	140, 141	永山 悟志	(鹿児島大)	103
國本 直希	(岩谷産業)	<b>151</b>	内藤 智之	(岩手大)	156
栗賀 勇輔	(新潟大)	<b>112</b>	中台 優希	(フジクラ)	105
			中川 久司	(産総研)	<b>49</b>
		<b>L</b>	中川 心平	(鹿児島大)	<b>11</b>
李 祖涵	(名大)	<b>2</b>	仲井 浩孝	(KEK)	50

中井 優亨	(青学大)	132	岡田 亘平	(近畿大)	38
中島 秀	(住重)	126	岡田 尚起	(KEK)	27, 28
中城 悠翔	(埼玉大)	<b>39</b>	岡田 竜太郎	(KEK)	28
中本 建志	(KEK)	18, 19, 27, 28	岡村 哲至	(東工大)	47, 101, 102
中村 大翔	(東大)	71	大木 俊征	(KEK)	51
中村 勝美	(京セラ)	151	奥村 皐月	(東大)	<b>71, 74</b>
中村 一也	(上智大)	14	奥村 太一	(室蘭工大)	7, <b>133</b>
中村 直識	(フジクラ)	105	大前 聡	(筑波大)	<b>91, 92</b>
中村 武恒	(京大)	<b>8, 9, 104</b>	大西 祥広	(量研機構)	30
中村 太郎	(早大)	108	恩地 太紀	(鉄道総研)	48, 62, 115, 116, 117
中西 啓太	(関西学院大)	15, 69, <b>111</b>	小野寺 優太	(NIFS)	47, 48, 75, 76, <b>77</b>
中西 功太	(KEK)	<b>50</b>	大井 修一	(NIMS)	61
中西 達尚	(昭和電線)	146	折原 菜月	(早大)	<b>110</b>
中岡 晃一	(産総研)	36	逢坂 昇汰	(東工大)	47, 101
榎崎 勝弘	(新居浜高専)	45, 46	大崎 瑛介	(青学大)	3, <b>33</b>
成瀬 雅人	(埼玉大)	44	大崎 博之	(東大)	68, 74
成嶋 吉朗	(NIFS)	76, <b>79, 106</b>	長村 光造	(応用科学研)	58, 65, <b>139</b>
夏目 恭平	(NIMS)	89, 91, 92, 94, 100	大嶋 重利	(山形大)	138
根岸 伸行	(潤工社)	84	大島 冬真	(神戸大)	<b>88</b>
新津 遥都	(青学大)	1	押本 夏佳	(山梨大)	<b>22</b>
西島 元	(NIMS)	<b>25, 128, 132</b>	太田 海斗	(早大)	107, 127
西島 太一	(九工大)	147	小田部 荘司	(九工大)	54, 145
西宮 伸幸	(NIMS)	89	大谷 知行	(理研)	39
西村 俊則	(大阪合金)	158	大坪 正人	(JSA)	84, 158
西岡 颯太郎	(NIMS)	<b>93</b>	大塚 清見	(住重)	45, 46
西山 凌平	(室蘭工大)	7, 133	大屋 正義	(関西学院大)	10, 15, 69, 111
仁田 旦三	(東大)	63, 64, 114	小山田 拓真	(岩手大)	156
野口 聡	(北大)	107, 108, 110, 127, 128			
野口 卓	(国立天文台)	39			<b>P</b>
野口 剛志	(埼玉大)	<b>40</b>	PEREZ Juan Carlos (CERN)	27, 28	
野口 陽平	(新潟大)	137	朴 任中	(理研)	13, 14
野村 新一	(明治大)	<b>21, 63, 64, 114</b>	PRIN Herve	(CERN)	27
沼澤 健則	(NIMS)	25, <b>89, 90, 91, 92, 93, 94</b>			
	<b>O</b>				<b>S</b>
尾花 哲浩	(NIFS)	20	鷺山 玲子	(東大)	<b>52</b>
小畑 慶人	(三菱電機)	69	齋藤 明子	(NIMS)	89, 90, 91, 92, 93
小田 航大	(KEK)	<b>97</b>	齋藤 隼輝	(成蹊大)	<b>37</b>
小田 靖久	(撰南大)	<b>100</b>	酒井 秀哉	(福岡工大)	56
小川 純	(新潟大)	72, 73, 112, <b>137</b>	坂本 久樹	(SuperPower Inc.)	119
大木元 勇貫	(成蹊大)	4	坂本 和也	(日立)	67
荻津 透	(KEK)	27, 28, 82	坂本 泰明	(鉄道総研)	48
大崎 博之	(東大)	71	坂本 宜照	(量研機構)	81
大内 徳人	(KEK)	51, 159	作間 啓太	(山梨大)	22, <b>138</b>
大石 崇史	(早大)	<b>109</b>	桜井 雄基	(岡山大)	74
岡 徹雄	(芝浦工大)	143, 144	佐々 滉太	(九大)	<b>12</b>
			佐々木 修平	(福島高専)	<b>23</b>

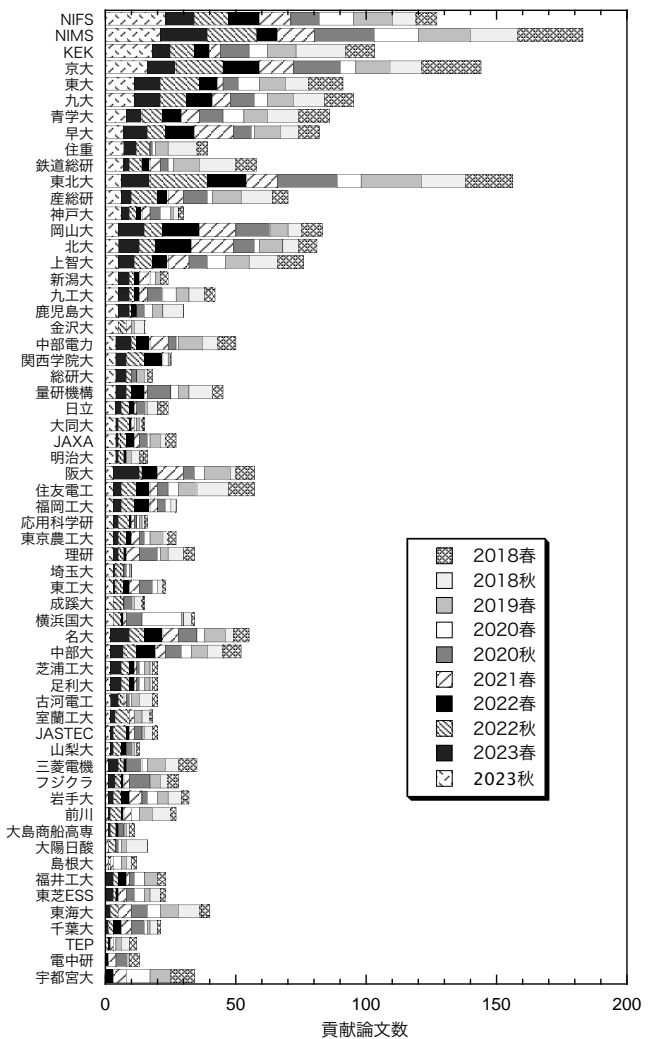
佐藤 光一	(東北大)	57	鈴木 匠	(成蹊大)	4, 34, 37
佐藤 迪夫	(昭和電線)	36, 37, 146	鈴木 琢也	(横浜国大)	42
佐藤 稔	(量研機構)	30	鈴木 優輔	(新潟大)	73
佐藤 更	(神戸大)	150			
佐藤 倅希	(大同大)	58			T
関 孝峻	(NIMS)	96	田原 大夢	(日立)	27
関口 直希	(青学大)	86, 87	太子周	(九大)	152
關谷 尚人	(山梨大)	22, 138	田井野 徹	(埼玉大)	39, 40
仙波 実怜	(青学大)	140, 141	高田 卓	(NIFS)	20
SHANG Jiahao	(足利大)	143, 144	高田 芳宏	(山本電機製作所)	88
芝崎 奏	(青学大)	86, 87	高橋 明	(京大)	83, 119, 121, 123
志賀 雅亘	(九大)	152	高橋 佳佑	(上智大)	13, 14
重政 茉於	(京大)	120	高橋 正希	(福岡工大)	55
重松 利信	(岡山理科大)	98	高橋 直人	(KEK)	28
志岐 成友	(産総研)	40	高橋 保夫	(昭和電線)	36, 146
島田 亜緒	(早大)	107	高畑 一也	(NIFS)	76, 158, 159
嶋田 健	(関西学院大)	15, 69	高桑 天通希	(新潟大)	112
島田 涼平	(九工大)	59	高尾 智明	(上智大)	13, 14
島本 知輝	(総研大)	20	高島 浩	(産総研)	130
清水 洋孝	(KEK)	50	高澤 拓海	(東工大)	47
清水 淳平	(近畿大)	38	武田 実	(神戸大)	88, 150, 153, 154
清水 禎	(NIMS)	89	武田 宗一郎	(住友電工)	139
下山 淳一	(青学大)	1, 3, 33, 86, 87, 132, 140, 141	武田 泰明	(NIMS)	132
SHIN Hyung-Seop (安東大)		58	武田 良彦	(NIMS)	89
新富 孝和	(KEK)	29, 63, 64, 114	武中 悠一郎	(神戸大)	153, 154
塩原 敬	(昭和電線)	146	竹内 文哉	(摂南大)	100
白井 毅	(筑波大)	91, 92, 93	竹内 正基	(RIMTEC)	18, 19
白井 康之	(京大)	15, 69, 111	竹屋 浩幸	(NIMS)	91, 92
白石 和輝	(山理大)	113	田村 仁	(NIFS)	78
白石 浩貴	(神戸大)	118	田邊 豪	(潤工社)	84
白土 裕一朗	(福岡工大)	56	田中 秀樹	(日立)	66, 82
祖父江 卓哉	(京大)	83, 121	田中 寛人	(JAXA)	95
曾我部 友輔	(京大)	17, 83, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125	田中 賢一	(KEK)	28
SOMJAIJAROEN Natthawiro	(九大)	134	田中 祥貴	(福岡工大)	55, 56
末本 祐也	(東ソー)	86	田中 佑斗	(九大)	35
末富 佑	(理研)	13, 14	田中 湧也	(上智大)	13, 14
菅野 未知央	(KEK)	27, 28, 53, 82, 158	谷口 博康	(大阪合金)	158
杉原 健心	(東工大)	47, 101	手嶋 雄太	(古河電工)	119
杉原 弥悠加	(神戸大)	150	寺西 亮	(九大)	5, 61
杉本 昌弘	(古河電工)	81	寺尾 悠	(東大)	10, 68, 71, 74, 82
摺木 惇人	(鹿児島大)	16, 75	寺島 昭男	(KEK)	27
諏訪 友音	(量研機構)	80	寺内 和	(早大)	108
鈴木 研人	(KEK)	27, 28	TODESCO Ezio	(CERN)	27, 28
鈴木 孝明	(日立)	66, 82	徳田 進之介	(東京農工大)	142
			富田 優	(鉄道総研)	48, 62, 115, 116, 117, 145, 148

鳥居 龍ノ介	(鹿児島大)	11	山川 友瑚	(関西学院大)	15, 69
土屋 勝彦	(量研機構)	30, 18, 19, 158, 159	山本 明保	(東京農工大)	67, 85, 142
土屋 清澄	(KEK)	18, 19, 158, 159	山本 春海	(鉄道総研)	62, 116
土屋 雄司	(東北大)	<b>136</b>	山本 優	(JSA)	84, 158
津川 大輝	(室蘭工大)	7, 133	山本 真嘉	(京大)	<b>9</b>
辻 大佑	(島根大)	60	山本 実奈	(中部大)	155
辻上 博司	(岩谷産業)	151	山中 陸央	(横浜国大)	<b>41</b>
恒松 正二	(住重)	45, 46	山梨 裕希	(横浜国大)	41, 42, 43
鶴留 武尚	(住重)	126	山野 聡士	(古河電工)	119
筒井 裕士	(住重)	126	山下 葵	(岡山大)	128
TURRIONI Daniele (Fermi Lab.)		18	山下 星穂	(山梨大)	138
	<b>U</b>		山下 知大	(東芝)	<b>6</b>
内田 公	(NIMS)	91, 92, 93, 100	山下 陽也	(神戸大)	153
植田 浩史	(岡山大)	107, 110, 127, <b>128</b>	山崎 隼	(室蘭工大)	7, 133
上垣 柊季	(京大)	<b>17, 83, 121</b>	山崎 浩平	(住友電工)	139
上坂 稜	(室蘭工大)	7, 133	山崎 俊夫	(理研)	13, 14
梅田 民樹	(神戸大)	118	柳 長門	(NIFS)	<b>76, 79, 106</b>
薄井 勝富	(量研機構)	30	柳澤 隼輔	(山理大)	<b>104</b>
宇藤 裕康	(量研機構)	81	柳澤 吉紀	(理研)	13, 14
	<b>W</b>		矢野 俊	(鉄道総研)	<b>62, 116, 117</b>
脇 耕一郎	(鉄道総研)	<b>48</b>	安田 仰	(住重)	<b>45</b>
王 旭東	(KEK)	18, <b>19</b> , 51, 158, 159	横山 和哉	(足利大)	<b>143, 144</b>
渡辺 奈生巳	(東陽テクニカ)	96	横山 彰一	(JASTEC)	<b>129</b>
渡部 智則	(中部電力)	107, 108, 110, 128	吉田 弦	(神戸大)	24
呉 澤宇	(九大)	35, <b>134</b>	吉田 潤	(住重)	110, 126, 128
	<b>X</b>		吉田 偲生	(新潟大)	<b>72</b>
許 光煒	(京大)	122	吉田 輝弥	(上智大)	29
許 航	(明治大)	21, <b>63</b> , 64, 114	吉田 良行	(産総研)	130
	<b>Y</b>		吉田 隆	(名大)	2
谷貝 剛	(上智大)	<b>29</b> , 81, 157	吉藤 夢来	(早大)	<b>127</b>
矢島 健大	(明治大)	63, <b>64</b>	吉原 健彦	(住友電工)	3, 33
山田 容土	(島根大)	60	吉川 信行	(横浜国大)	41, 42, 43
山田 有字斗	(新潟大)	137		<b>Z</b>	
山口 作太郎	(中部大)	<b>149</b> , 155	章 誠豫	(神戸大)	150
山口 柊平	(九工大)	<b>147</b>	張 宇威	(九工大)	<b>145</b>
			鐘 宇軒	(九工大)	145
			宗 占国	(KEK)	<b>51</b>

所属別発表件数の推移



所属別貢献論文数の推移





### 複 写 を さ れ る 方 に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、公益社団法人 日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人 学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル

TEL 03-3475-5618 FAX 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本学会へご連絡下さい。

本誌に掲載された講演概要の著作権は低温工学・超電導学会が所有しています。

第 106 回 2023 年度秋季

低温工学・超電導学会講演概要集

2023 年 12 月 4 日 発行

発行／公益社団法人 低温工学・超電導学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-12-8 パレドール本郷 302 号

電話 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573

E-mail: cssj@csj.or.jp URL: <http://csj.or.jp/>

銀行口座 みずほ銀行 本郷支店

普通 1012705 公益社団法人 低温工学・超電導学会

郵便振替口座 00140-8-192430 公益社団法人 低温工学・超電導学会

印刷／松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438 番地

未知の極低温技術への挑戦



*Offering Manufacturing High-end Cryogenic Equipment on Your Request in addition to Regular Items*

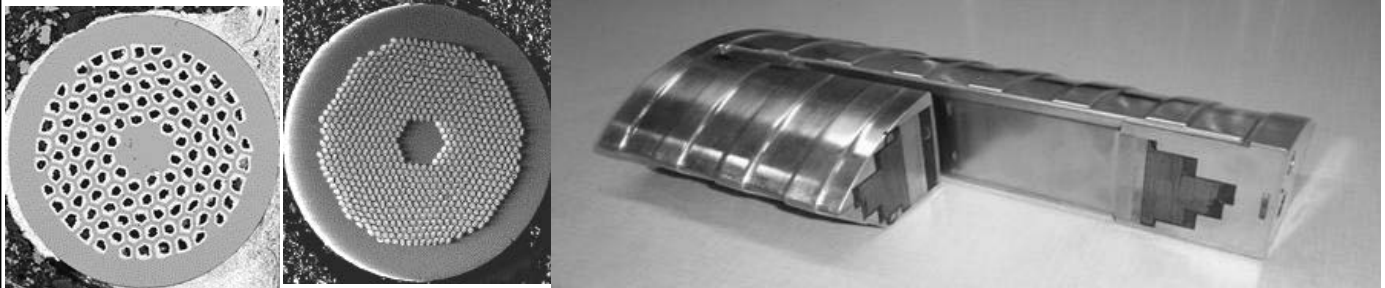


株式会社ジェック東理社

〒350-0833 埼玉県川越市芳野台2丁目8番52号  
URL: <http://www.jecctorisha.co.jp> Email: [U35915@jecctorisha.co.jp](mailto:U35915@jecctorisha.co.jp)



米国Hyper Tech社は、アプリケーションや研究用途に合わせ様々なMgB2線をご提供いたします。またMgB2 マルチフィラメント線を使用したソレノイドコイルを設計及び製作も可能です。NbTi、Nb3Sn、MgB2、BSCCO、(RE)BCO超電導体を用いた伝導冷却超電導コイルもご提供できます。



DC & AC MgB2 wire

High Jc Nb3Sn wire

MgB2 rotor coil for 2 MW high speed, 15000 rpm motor

### スターリング式冷凍機



**SUNPOWERはGe検出器・IR検出器・電波望遠鏡・人工衛星・国際宇宙ステーション・レーザーダイオード冷却等の最先端研究分野で活躍しています**

### CryoTel® DS Mini

Dual-Split Mini Cryocooler



米国 SUNPOWER 社は、フリーピストン スターリング技術の世界的リーダーです。信頼性の高い効率的なスターリングエンジン及び冷凍機を製造しています。サンパワーのエンジニアリングサービスは、フリーピストンスターリングエンジンの試作品の設計、開発及び、製造まで対応します。CryoTel®冷凍機は優れた性能、製造精度、品質を持っています。

	分離型	一体型		
	DS Mini	MT	CT	GT
Nominal Lift @77K	1.8W	5W	11W	16W
Nominal Cooler input power	45W	80W	160W	240W
重量	1.2Kg	2.1kg	3.1kg	
最低到達温度	40K			
平均故障時間 (時間)	120,000(goal)	200,000		



日本代理店  
**仁木工芸株式会社**

URL <http://www.nikiglass.co.jp>

東京支社 〒140-0011 東京都品川区東大井5-26-22  
大阪営業所 〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島3-18-21

TEL : 03-4218-4700 FAX : 03-4212-3423

TEL : 06-6390-3220 FAX : 06-6390-3221

# Fujikura レアース系高温超電導線材

## ■ 特徴

- マグネット応用に適した高機械強度・高臨界電流特性
- フジクラ独自の主要製造技術 IBAD・PLD法
- 人工ピン導入により低温・高磁場での磁場中臨界電流特性を向上



## ■ 線材構造

安定化層[銅めっき] 片側20 $\mu$ m

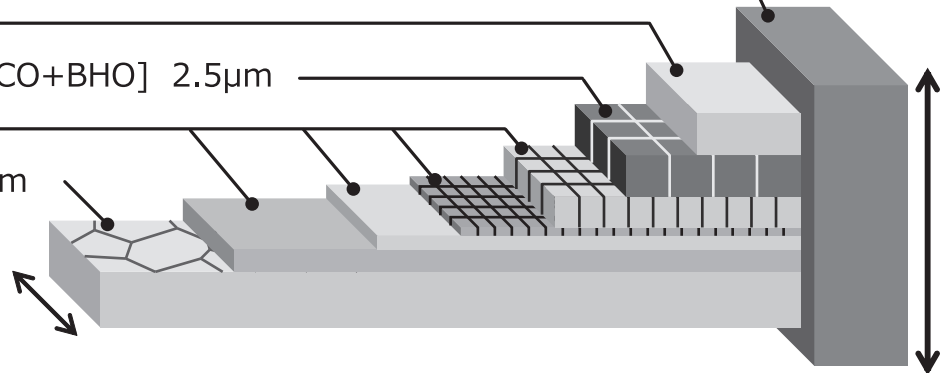
保護層[Ag] 2 $\mu$ m

超電導層 [GdBCO] 2 $\mu$ m / [EuBCO+BHO] 2.5 $\mu$ m

中間層 [MgO, etc.] 0.7 $\mu$ m

金属基板[ハステロイ®] 75/50 $\mu$ m

線材幅 2-12 mm



線材厚さ 0.11-0.13 mm

## ■ 製品ラインナップ

型番	線材幅 [mm]	線材厚さ [mm]	金属基板 [ $\mu$ m]	安定化層 [ $\mu$ m]	臨界電流 [A]		備考
					77K, S.F.	20K, 5T <sup>*3</sup>	
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	$\geq 165$	368	人工ピンなし
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	$\geq 550$	1,104	人工ピンなし
FYSC-S12	12	0.08	75	—	$\geq 550$	—	人工ピンなし
FESC-SCH02	2	0.11	75	20	$\geq 30$	320	銀保護層 <sup>*1</sup>
FESC-SCH03	3	0.11	50	20	$\geq 63$	480	人工ピン <sup>*2</sup>
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	$\geq 85$	640	人工ピン <sup>*2</sup>
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	$\geq 250$	1,280	人工ピン <sup>*2</sup>
FESC-S12	12	0.06	50	—	$\geq 250$	—	銀保護層 <sup>*1</sup>

\*1 銀保護層線材は12mm幅のみ提供しております。

\*2 人工ピン仕様は低温・高磁場におけるマグネットアプリケーション用途でのご使用を推奨しております。

\*3  $I_c@20K, 5T$ は参考値であり、実際の性能を保証するものではありません。

株式会社フジクラ 超電導事業推進室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440

TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472

E-mail ask-sc@jp.fujikura.com

# HELIALは進化しています。

## 忘れてませんか？ AIR LIQUIDEを

フランスの物理学者ジョルジュ・クロードが液体空気の製造に成功し、彼と実業家ポール・デロルムによりエア・リキードが設立されたのが1902年。5年後の1907年には早くも日本での酸素製造事業がスタートして、さまざまな極低温の経験と最先端技術ノウハウを集結して高品質と高効率の製品を生み出しています。



HELIAL	SL	ML	LL	XL
Capacity range with LN2	20 L/h to 85 L/h	100 L/h to 175L /h	200 L/h to 400 L/h	500 L/h to 600 L/h
Comp motor rated power	< 90 kW	< 160 kW	< 315 kW	< 500k W

自社（AIR LIQUIDE社）製のタービンを採用しています。  
 また、液化効率を引き出すためにエア・リキード社は最先端技術を基に研究開発を重ねています。

ガスから液化・冷凍装置まで

技術の小池

# 極低温のトータル・システムサプライヤー

Linde 社製

## ヘリウム液化・冷凍装置

### トータルシステムで 対応します

小池酸素は、1976年にヘリウム液化機を販売して以来、多くの大学・研究機関に種々のヘリウム液化機および関連装置を納入させていただいております。

納入にあたっては、さまざまなニーズに対応できる当社システムエンジニアが、回収・精製・液化のリサイクルシステムの設計・制作・据付けにあたり、トータルに行なっております。



L70、140、280タイプ

- 15～280 ℓ/hの標準液化装置

膨張タービンとスクリーューコンプレッサーの採用、精製器内蔵などによる高効率、高信頼性のシステム

- 標準および特殊仕様の冷凍装置



250L 100L 50L

クライオサーム社製

## 液体ヘリウム容器

- HELIOS 50A

- STRATOS 100SL-J

- IONOS 250

その他必要に応じて御対応いたします。

□その他 取扱品目

ヘリウムガス精製器、各種クライオスタート、各種真空配管  
ヘリウムガス回収用機器（高圧圧縮機、長尺容器、ガスバッグ）

リンデ社ヘリウム液化装置国内販売代理店

**小池酸素工業株式会社**  
**KOIKE SANZO KOGYO CO., LTD.**

<http://www.koikeox.co.jp>

ガス部 極限グループ

〒136-0072 東京都江東区大島9-1-1

TEL03-5875-5045 FAX03-5875-5496

# ULVAC cryocoolers contribute to cryogenic and superconducting technologies.

You can choose from various types of cryocoolers.

GM Cryocooler 77K

Solvay

Pulse-tube

20K Cryocooler 20K

GM Cryocooler 10K

4KGM Cryocoolers

HE05 4K

UHE12

UHE15

[UNDER DEVELOPMENT]  
Fully automatic refrigerant-free dilution refrigerator <10mK

Liquid Nitrogen Generator

Super Trap

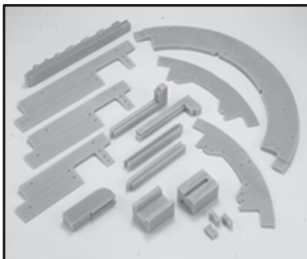
Cryopump

**ULVAC CRYOGENICS INC.**  
www.ulvac-cryo.com  
Head Office and Factory  
1222-1 yabata, Chigasaki, Kanagawa, 253-0085, Japan  
TEL : +81-467-85-8884 (sales)

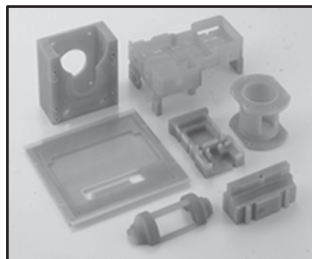
## 低温下で使用する樹脂加工品販売

### GFRP(G10)・プラスチック材料の加工

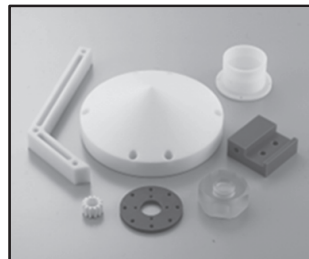
75年以上の歴史とその中で培った加工技術、技術提案力と圧倒的な先端機械設備をフル活用し、切削加工によるモノづくりを行っています。小ロットの合成樹脂、プラスチックの精密機械加工、複雑な3次元形状の製品加工にも対応しています。材料選定からお気軽にご相談下さい。



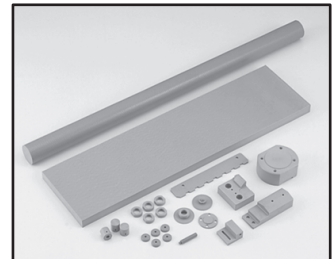
GFRP加工品



GFRP加工品



エンブラ加工品



PEEK加工品



**昌立工業株式会社**

【本社・工場】

〒664-0837 兵庫県伊丹市北河原5丁目3番12号

TEL: 072-771-6132 FAX: 072-771-6112 Email: shoritsu@arion.ocn.ne.jp

【東京営業所】

〒230-0061

神奈川県横浜市鶴見区佃野町1丁目7番

最先端テクノロジーを支える!!



大陽日酸  
The Gas Professionals

## 大陽日酸の極低温機器システム

# ヘリウム液化装置

Helium Liquefier

Linde社製 高効率新型膨張タービンを搭載

### ニーズに応える高性能高信頼性を実現

- コンパクト設計
- ダイナミックガスベアリング式膨張タービン採用
- コンピュータ制御による全自動運転
- 8,000時間以上の連続運転
- 数多くの納入実績
- 万全のメンテナンス体制
- 消費電力が小さく、ランニングコストが低い
- 圧縮機をガス設備とすることが可能

#### 主な仕様

機種		L70	L140	L280
圧力1.0MPaG <sup>※1</sup> 未満時の保証液化能力 <sup>※2</sup> ( )内はLN <sub>2</sub> 予冷なし	周波数 50Hz	32~63L/h (14~29L/h)	79~108L/h (34~50L/h)	153~233L/h (76~115L/h)
	周波数 60Hz	40~63L/h (18~29L/h)	79~107L/h (33~49L/h)	143~216L/h (69~106L/h)
概略寸法(mm)	φ×H	1,100×2,600	1,300×2,600	1,600×2,600
消費電力(kW) (液化用圧縮機)	50Hz	42~76	89~114	141~210
	60Hz	51~75	91~113	133~224

※1: 1.0MPaG以上も可能。

※2: 液化能力は純He使用時のものです。

※標準仕様以外にも、御要望により各種設計・製作致します。

### ■ 大陽日酸株式会社 ■

オンサイト・プラントユニット

プラント事業部 宇宙・低温機器営業部

〒210-0861 川崎市川崎区小島町6-2(京浜事業所)

Tel: 044-288-6937 Fax: 03-6866-0111

写真

Model type L280



# 低温での電気・磁気・熱特性を自動測定 液体ヘリウム不要!

## 完全無冷媒・低温材料物性自動測定システム CFMS



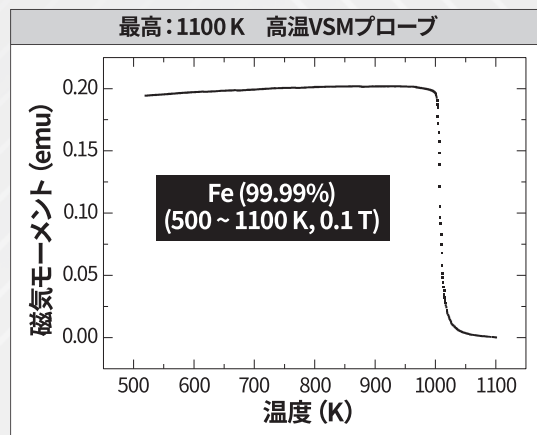
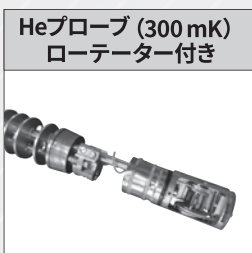
お問い合わせNo: CG01

### 他にない先進機能

- 試料温度1.6 K ~ 高温 (700 K / 1100 K) に対応
- 完全無冷媒超伝導マグネットを5~18 Tから選択可能
- 試料ロードロック室を採用し、簡易で素早い試料交換

### 測定モード(用途)

- 磁気特性
- 電気特性
- 比熱特性
- 熱輸送特性



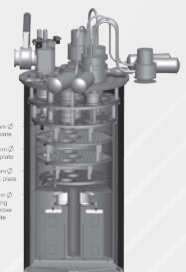
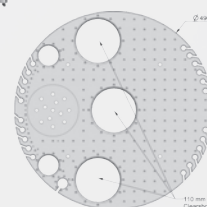
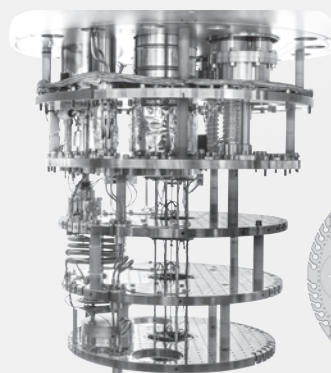
# 高い冷却性能、広い実験空間、低振動 次世代の量子コンピューターに

## 無冷媒希釈冷凍機

お問い合わせNo: LCG01

### 特長

- ミキシングチャンバー: 直径490 mm
- 冷却性能: 2000 μW@120 mK可能
- 様々なカスタマイズに対応  
(重量200 kg以上のベクターマグネットなど)



本社: 〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-18-14 T.I.ビル ☎03-3686-4711  
大阪営業所: 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原4-1-46 新大阪北ビル ☎06-6393-7411  
☑ <https://www.tokyoinst.co.jp> ☒ [sales@tokyoinst.co.jp](mailto:sales@tokyoinst.co.jp)

TII Group Company - グローバルにネットワークを広げ、最先端の科学をお客様に提供 -



超高真空・極低温走査型プローブ顕微鏡  
高速分光測定装置、クライオスタット



Nd:YAGレーザー、Ti:スレーザー  
OPOレーザー



Enviro ESCA (準大気圧XPS)  
ARPESなど

# ヘリウム再凝縮装置

- 既存のクライオスタットへ直接取り付けることによりヘリウムロスの削減が可能です。
- ヘリウムの継ぎ足し作業が不要となり、自動制御による無人運転が可能です。

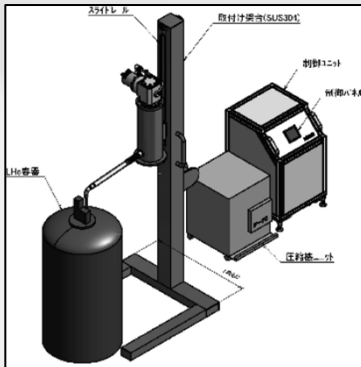
## DSシリーズ

GM冷凍機モデル

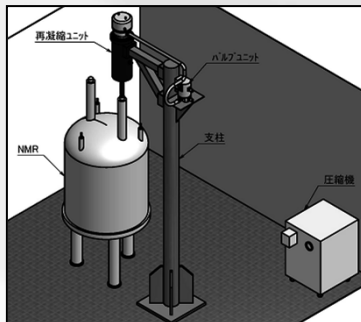


型式	TRG-375DS	TRG-340DS
再凝縮能力 ※1)	18 liter/day	10 liter/day
電源	3相 200V ,50/60 Hz	
電力 ※2)	13.2/15 kW, 50/60 Hz	
冷却水 ※2), ※3)	14-20L/min (28°C)	
メンテナンスサイクル	制御盤 : 10,000時間/毎 冷凍機 : 10,000時間/毎 圧縮機 : 30,000時間/毎	

- ※1) 300Kのヘリウムガスを使用した場合となります。
- ※2) 冷凍機、圧縮機2台分の容量となります。
- ※3) 空冷タイプも対応可能です。
- ※4) 仕様は予告なく変更する場合がございます。



TRG-330PTモデル



TRG-305PTモデル

## PTシリーズ

パルスチューブ冷凍機モデル(低振動)

型式	TRG-330PT	TRG-305PT (NMR用)
再凝縮能力 ※1)	6 liter/day	1 liter/day
電源	3相 200V ,50/60 Hz	
電力	7.7 / 9.1 kW @ 50/60 Hz	6.6 / 7.5 kW @ 50/60 Hz
冷却水 ※2)	7-10L/min (28°C)	
メンテナンスサイクル	制御盤 : 10,000時間/毎 ※3) 冷凍機 : 20,000時間/毎 圧縮機 : 30,000時間/毎	

- ※1) 300Kのヘリウムガスを使用した場合となります。
- ※2) TRG-305PTは空冷タイプも対応可能です。
- ※3) TRG-305PTでは含まれません。
- ※4) 仕様は予告なく変更する場合がございます。

・お問い合わせ・

大陽日酸株式会社 工業ガスユニット ガス事業部 営業開発部

〒142-8558 東京都品川区小山1-3-26

TEL:03-5788-8610 URL <http://www.tn.sanso.co.jp> Email [U04200@tn-sanso.co.jp](mailto:U04200@tn-sanso.co.jp)