



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.105 (2023)

# 第105回 2023年度春季

## 低温工学・超電導学会

### 講演概要集

2023年  
5月31日，6月1日，2日

タワーホール船堀＋WEB

〒134-0091 東京都江戸川区船堀4-1-1

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

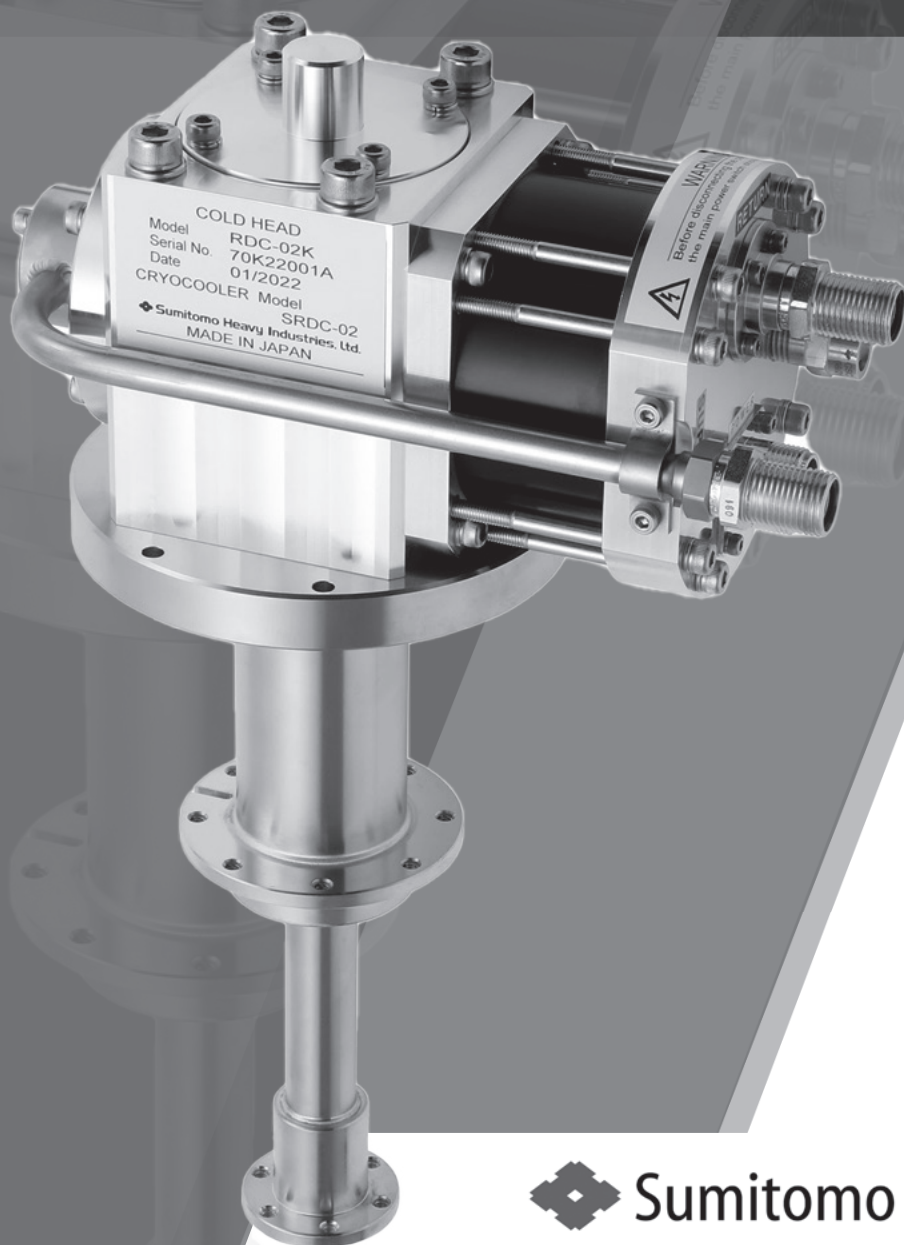
協賛 応用物理学会、日本物理学会、日本機械学会、  
日本冷凍空調学会、電気学会、日本表面真空学会

# 105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



Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

# 2023 年度春季低温工学・超電導学会

2023 年 5 月 31 日 (水) ~ 6 月 2 日 (金)

会 場： タワーホール船堀 + WEB

所在地：〒134-0091 東京都江戸川区船堀 4-1-1

参加費： 今回より参加費が一部改訂になっています。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 (4 月 24 日 (月) ~ 5 月 16 日 (火) 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 (5 月 16 日 (火) 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 2022 年度会員の場合は, 2022 年秋季から 2023 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： 6 月 1 日 (木) 18:15 - 20:15

タワーホール船堀 2F「蓬菜の間」

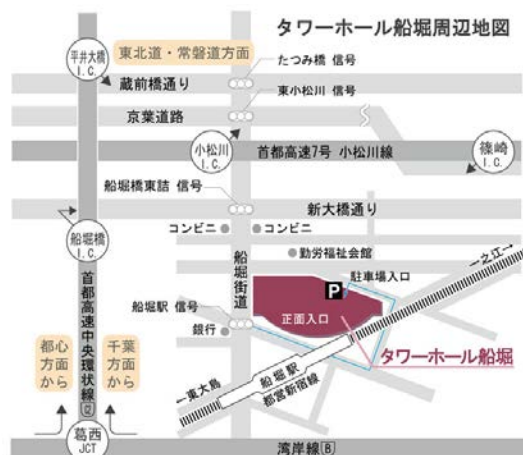
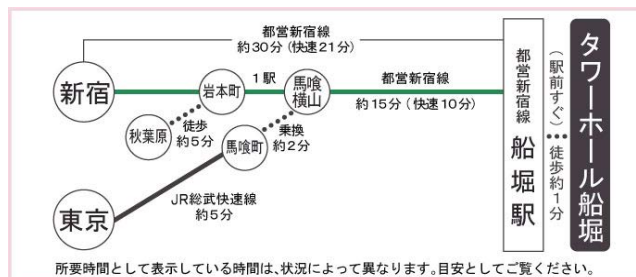
参加費：6,500 円

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

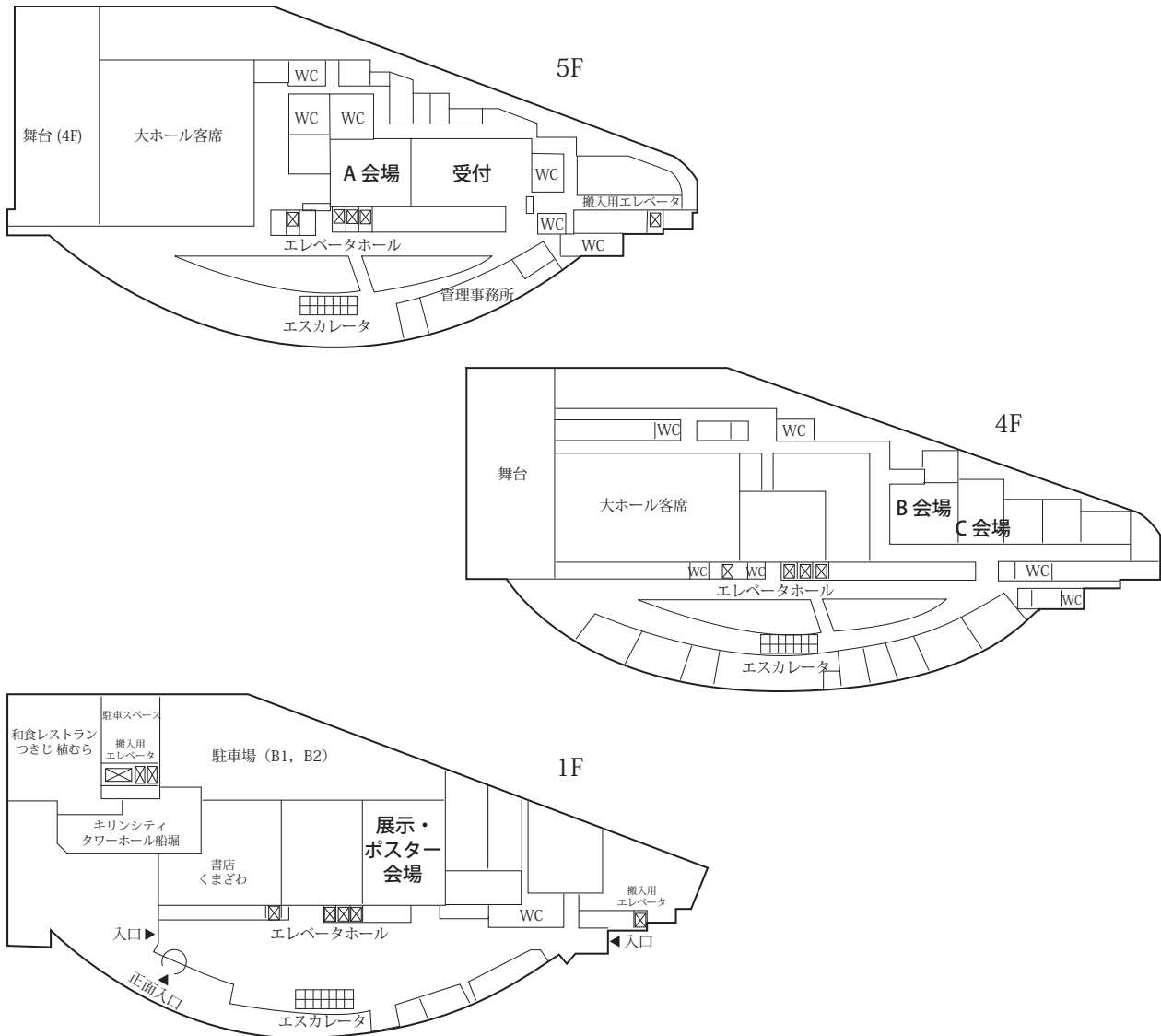
協 賛： 応用物理学会, 電気学会, 日本物理学会, 日本機械学会, 日本表面真空学会, 日本冷凍空調学会

交通案内：都営地下鉄新宿線船堀駅下車徒歩 1 分



タワーホール船堀地下の駐車スペースは限りがありますので、出来る限り公共交通機関をご利用ください。

会場配置図：タワーホール船堀



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/2023s/>

口頭講演：現地口頭発表会場には液晶プロジェクタが用意されます。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を持ち込んでの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(5月31日、6月1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 年度春季低温工学・超電導学会 セッションテーブル

	A 会場	B 会場	C 会場
5 月 31 日 (水)	受付 9:30 ~		
	10:30 - 11:45 回転機 (1) p. 1	10:30 - 11:45 ピンニング p. 16	10:45 - 11:45 冷却システム p. 31
	昼食		
	ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 13:45 (A 会場)		
	ポスターセッション I 13:45 - 15:00 (Poster 会場) 計測システム p. 44, 磁性材料 p. 46, HTS コイル解析 p. 47, 送電ケーブル p. 51, 超電導応用 (1) p. 53		
	15:15 - 16:45 SCSC ケーブル p. 6	15:15 - 16:45 産業応用 p. 21	15:30 - 16:45 小型冷凍機 p. 35
17:00 - 18:00 臨界電流測定・機械負荷 p. 12	17:00 - 18:00 デバイス応用 p. 27	17:00 - 18:00 液体水素 p. 40	
6 月 1 日 (木)	9:30 - 11:00 医療用加速器 p. 56	9:45 - 10:45 REBCO 薄膜・バルク作製 (1) p. 65	9:45 - 11:00 計測・基礎 p. 73
	11:15 - 12:00 HTS コイル・解析 (1) p. 62	11:00 - 12:00 バルク作製 (2)・バルク着磁 p. 69	11:15 - 12:00 低温超電導化合物 p. 78
	昼食		
	ポスター手短紹介 13:00 - 13:15 (A 会場)		
	ポスターセッション II 13:15 - 14:30 (Poster 会場) MgB <sub>2</sub> (1) p. 81, バルク作製 (3) p. 82, HTS 電流分布・解析 (2) p. 83, 回転機 (2)・磁気軸受 (1) p. 88		
	論文賞受賞記念講演 p. 93 14:45 - 15:45 (A 会場)		
	特別セッション 16:00 - 16:45 (A 会場) フェロー塾「ピンチを乗り切れエンジニア」		
	社員総会 17:00 - 18:00 (A 会場)		
懇親会 (タワーホール船堀 2F「蓬菜の間」) 18:15 - 20:15			
6 月 2 日 (金)	9:15 - 10:15 回転機 (3)・磁気軸受 (2) p. 95	9:15 - 10:30 超電導・低抵抗接続 p. 108	9:30 - 10:30 安定性・保護 p. 117
	10:30 - 11:45 核融合 p. 99	10:45 - 11:45 HTS 長尺・導体化 p. 113	10:45 - 11:45 MgB <sub>2</sub> (2) p. 121
	昼食		
	12:45 - 13:45 超電導応用 (2) p. 104		12:45 - 13:45 加速器用 HTS マグネット p. 125

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

2023 年度春季低温工学・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	坂井 直道	芝浦工業大学
委員	横山 和哉	足利大学
	井田 徹哉	東京海洋大学
	飯田 和昌	日本大学

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	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	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
--	-------	-----------

5月31日(水)  
受付開始 9:30～

※一般講演の発表時間はすべて10分、質疑応答5分です。  
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。

5月31日(水) A会場 10:30-18:00

回転機(1) 10:30-11:45 座長: 寺尾悠

- 1A-a01 輸送機器用 REBCO バルクバーを用いた高温超伝導誘導同期モータの実験的研究----- 1  
GAO Yunfei, 中村 武恒 (京大)
- 1A-a02 高効率・高出力密度・安定制御性を同時に実現する実用的高温超伝導誘導同期モータに関する基礎検討----- 2  
中村 武恒, 小野 友輝 (京大); 菊池 章弘 (NIMS)
- 1A-a03 6 kW 級高温超伝導誘導同期モータのパルス電流注入法を用いた始動電流低減法に関する解析的検討----- 3  
中村 武恒 (京大); 桜井 貴夫, 犬塚 俊康, 舟山 智歌子 (三菱重工)
- 1A-a04 移動平均法によって生成した PWM 電圧波形による高温超伝導誘導同期モータの駆動特性----- 4  
中村 武恒, 後藤 芳隆 (京大)
- 1A-a05 無絶縁高温超伝導コイルを界磁巻線に適用した大型同期電動機の回転機特性の解析----- 5  
福井 聡, 塩澤 勇太郎, 吉田 偲生, 小川 純 (新潟大); 石山 敦士 (早大)

昼食 11:45-13:00

SCSC ケーブル 15:15-16:45 座長: 王旭東

- 1A-p01 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (1):  
概要とリール・トゥ・リール式ケーブル作製機によるケーブル作製----- 6  
雨宮 尚之, 曾我部 友輔, 高橋 明, 藤野 正人 (京大); 中崎 竜介, 山野 聡士 (古河電工);  
坂本 久樹 (SuperPower Inc.)
- 1A-p02 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (2): SCSC ケーブル応用の概念検討----- 7  
雨宮 尚之, 曾我部 友輔 (京大); 福井 聡 (新潟大); 山野 聡士 (古河電工)
- 1A-p03 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (3): 結合時定数の温度依存性----- 8  
曾我部 友輔, 藤田 寛和, 祖父江 卓哉, 重政 茉於, 李 陽, 高橋 明, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p04 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (4): 線材の重なりと磁化損失特性----- 9  
重政 茉於, 曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p05 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (5):  
熱暴走過程におけるフィラメント間の電流分流の測定----- 10  
許 光燁, 李 陽, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p06 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (6): ケーブルクエンチ解析手法の構築----- 11  
曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)

休憩 16:45-17:00

臨界電流測定・機械負荷 17:00-18:00 座長: 金沢新哲

- 1A-p07 1kA 級パルス電流を用いた REBCO 線材における  $I_c$  の磁場・温度依存性の測定----- 12  
土屋 雄司 (東北大); 水野 謙一郎 (MTL); 小濱 芳允 (東大); ALEXANDRE Zampa, 岡田 達典,  
淡路 智 (東北大)
- 1A-p08 磁気計測による積層 REBCO テープの  $E-J$  特性評価----- 13

呉澤宇, 鄭依城, 東川甲平, 木須隆暢 (九大)

- 1A-p09 ねじりにより臨界電流が低下した REBCO 線材の面内臨界電流密度分布----- 14  
井上昌睦, 久我響暉, 古賀大揮, 塚原柊弥, 中山泰輔 (福岡工大); 山田穰 (中部大)
- 1A-p10 REBCO テープの縦曲げにおける曲げ歪分布と破断挙動----- 15  
長村光造 (応用科学研); 町屋修太郎 (大同大)

5月31日(水) B会場 10:30 - 18:00

ピンニング 10:30 - 11:45 座長: 木内勝

- 1B-a01 Bi2223 線材における臨界電流特性と不定比化学組成----- 16  
下山淳一, 宮本能伸, 公平龍之介, 元木貴則 (青学大); 武田宗一郎, 中島隆芳,  
山崎浩平 (住友電工)
- 1B-a02 BaHfO<sub>3</sub> ナノ粒子を用いたフッ素フリー MOD REBCO 線材の作製----- 17  
吉原健彦, 本田元気, 永石竜起, 小林慎一 (住友電工); 蟹江澄志, 岡田達典, 淡路智 (東北大)
- 1B-a03 形状の異なる BMO を導入した高 J<sub>c</sub>YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 薄膜の最適アニール条件の検討----- 18  
山本拓実, 吉田隆 (名大)
- 1B-a04 強磁場マグネットの電磁場分布に基づく人工ピンによる I<sub>c</sub> の角度依存性の考察----- 19  
岡田達典, 淡路智 (東北大)
- 1B-a05 マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流----- 20  
馬渡康徳 (産総研)

昼食 11:45 - 13:00

産業応用 15:15 - 16:45 座長: 野村新一

- 1B-p01 多段式淘汰管を用いた常磁性物質の磁気分離法に関する基礎的研究----- 21  
三島史人, 長濱葵, 野村直希, 西嶋茂宏 (福井工大)
- 1B-p02 磁気力と旋回流を組み合わせたマイクロプラスチックファイバーの除去に関する研究----- 22  
秋山庸子 (阪大); 藤井里至 (元阪大); 真鍋勇一郎, 佐藤文信 (阪大)
- 1B-p03 急速充電を実現する超伝導非接触給電システムに適した共振回路方式の検討----- 23  
井上良太, 岩本貴大, 薦田遥暉, 植田浩史, 金錫範 (岡山大)
- 1B-p04 高温超電導マグネットを用いたアルミ押出成形用 400 kW 級直流誘導加熱装置の開発  
ー 連続繰り返し加熱試験と高温超電導マグネットの健全性評価 ー----- 24  
伊東徹也 (テラル); 福井聡 (新潟大); 河島裕, 緒方康博, 正孝幸 (テラル);  
古瀬充穂 (産総研); 渡部智則 (中部電力); 長屋重夫 (阪大); 小川純 (新潟大); 森下勇樹,  
長岡孝, 府山伸行, 縄稚典生 (広島総技研)
- 1B-p05 SmBCO 系バルク超伝導体の高磁場勾配を利用した片側開放 NMR による自己拡散係数の測定----- 25  
坂藤正樹, 菊池翔 (芝浦工大); 高橋雅人, 仲村高志 (理研); 竹村賢人, 岡徹雄,  
坂井直道 (芝浦工大); 山本航輝, 岡村哲至 (東工大); 横山和哉 (足利大)
- 1B-p06 2次元平面内における MDDS 用磁性薬剤の磁気誘導に適した HTS コイルと HTS バルク体の配置方法----- 26  
野島渉平, 長崎陽, 津田理 (東北大)

休憩 16:45 - 17:00

デバイス応用 17:00 - 18:00 座長: 山梨裕希

- 1B-p07 メンブレンを用いた STJ 検出器での GaN の評価----- 27  
野口剛志, 柴崎大我 (埼玉大); 藤井剛, 志岐成友, 中島昭, 菊地貴大 (産総研);  
田井野徹 (埼玉大)



1B-p08	低臨界電流密度ニオブ集積デバイスの 0.3 K における特性評価-----	28
	田中 雅光 (名大); 北川 佳廣, 佐藤 哲朗, 山本 剛 (日本電気)	
1B-p09	集束イオンビーム法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ プローブの作製と評価-----	29
	大西 漢, 江畑 敦志, 大西 理志, 林 幹二, 田中 三郎 (豊橋技科大); 宮戸 祐治 (龍谷大); 廣芝 伸哉 (大工大); 有吉 誠一郎 (豊橋技科大)	
1B-p10	高 $J_c$ - $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜を用いた高耐電力超伝導アンテナの検討-----	30
	武田 航太郎, 作間 啓太, 關谷 尚人 (山梨大)	

## 5月31日(水) C会場 10:45 - 18:00

### 冷却システム 10:45 - 11:45 座長: 仲井 浩孝

1C-a01	小型超電導機器の並列ガス循環冷却技術の開発(1) - 並列流路の温度制御 - -----	31
	高木 紀和, 高橋 政彦, 栗山 透, 上野 航生, 福島 武人, 上田 紘司, 金谷 和長 (東芝 ESS)	
1C-a02	小型超電導機器の並列ガス循環冷却技術の開発(2) - 極低温ガス流量計の特性評価 - -----	32
	高橋 政彦, 高木 紀和, 栗山 透, 上野 航生, 福島 武人, 上田 紘司, 金谷 和長 (東芝 ESS)	
1C-a03	NMR マグネット向け冷媒蒸発抑制装置-----	33
	松本 拓也, 永濱 秀明, 福山 和宏, 谷 直俊, 横山 彰一, 伊藤 聡 (JASTEC); 宮本 哲雄, 濱津 順平, 廣瀬 政宣, 小松 功典, 末松 浩人 (日本電子)	
1C-a04	多層断熱材の巻き付け強さの違いによる熱侵入量への影響-----	34
	渡邊 裕文, 小林 東矢, 神田 昌枝, 山口 作太郎 (中部大)	

### 昼食 11:45 - 13:00

### 小型冷凍機 15:30 - 16:45 座長: 根塚 隼人

1C-p01	$\text{Gd}_2\text{CuO}_4$ の反強磁性転移温度と比熱に対する Ni, Zn 置換効果-----	35
	松本 圭介, 柏原 優樹 (愛媛大); 上床 美也 (東大); 平岡 耕一 (愛媛大)	
1C-p02	低速動作 4 K 冷凍機の蓄冷器性能の数値解析-----	36
	増山 新二 (大島商船高専); 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)	
1C-p03	液体水素温度における予冷式 2 段シリーズ型パルス管冷凍機の数値シミュレーション-----	37
	胡 榮沢, 朱 紹偉 (同済大)	
1C-p04	ダブルインレットとイナータンスチューブを備えたシリーズ型パルス管冷凍機-----	38
	許 爽, 朱 紹偉 (同済大)	
1C-p05	パルスチューブ冷凍機の初期設計方法の検討-----	39
	保川 幸雄, 松本 伸, 溝口 義則, 柴田 将史 (富士電機)	

### 休憩 16:45 - 17:00

### 液体水素 17:00 - 18:00 座長: 島崎 毅

1C-p06	極低温温度計セルノックスの熱線流速計としての使用可能性-----	40
	高田 卓 (NIFS); 神谷 宏治 (NIMS)	
1C-p07	振動ワイヤ法を利用した低温領域における水素脆化現象の検出-----	41
	太子周, 芳賀 雄仁, 宮川 一慶, 志賀 雅亘 (九大); 稲垣 祐次 (岡山理科大); 河江 達也 (九大)	
1C-p08	ヘリカル型液体水素用流量計に関する基礎研究-----	42
	章 誠豫, 武田 実, 佐藤 更, 前川 一真 (神戸大)	
1C-p09	光学クライオスタットによる非超電導線材を追加した液体水素用外部加熱型 MgB <sub>2</sub> 液面センサーの性能評価-----	43
	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); 熊倉 浩明, 松本 明善 (NIMS)	

ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 13:45 (A会場)

5月31日(水) ポスターセッションI Poster会場 13:45 - 15:00

計測システム 13:45 - 15:00 座長:高畑 一也

- 1P-p01 EPICSに基づく Belle 超伝導ソレノイド用歪みゲージ計測系の開発 ----- 44  
青木 香苗, 近藤 良也, 榎田 康博, 川井 正徳 (KEK)
- 1P-p02 パルス電流による REBCO 線材の  $I_c$  測定に向けた電流振動の抑制 ----- 45  
土屋 雄司 (東北大); 坂井 巖 (名大); 小濱 芳允 (東大); 吉田 隆 (名大)

磁性材料 13:45 - 15:00 座長:沼澤 健則

- 1P-p03 Er 粉末の比熱へのミリング効果 ----- 46  
小椋 隆平, 松本 圭介, 平岡 耕一 (愛媛大)

HTS コイル解析 13:45 - 15:00 座長:馬渡 康徳

- 1P-p04 無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける局所劣化の監視法 ----- 47  
大石 崇史, 石山 敦士 (早大)
- 1P-p05 等価回路モデルのみに基づく無絶縁 REBCO コイルの遮蔽電流解析 ----- 48  
吉藤 夢来, 内山 誠士郎, 太田 海斗, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)
- 1P-p06 簡単な解析式による NI HTS マグネットの熱的安定性評価 ----- 49  
間藤 昂允, 野口 聡 (北大)
- 1P-p07 「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムを想定した熱的安定性評価 ----- 50  
日浦 琢言, 中村 太郎, 天野 一樹, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)

送電ケーブル 13:45 - 15:00 座長:山口 作太郎

- 1P-p08 3芯一括型高温超伝導ケーブル 1 相分の交流損失解析 ----- 51  
野地 英樹 (都城高専)
- 1P-p09 故障・事故時の超伝導ケーブルの電磁場と熱伝導場の連成解析 ----- 52  
呂 高泰, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)
- 1P-p10 (取り消し)

超伝導応用(1) 13:45 - 15:00 座長:川越 明史

- 1P-p11 電磁誘導型超伝導磁気シールドの遮蔽性能向上に適した構成方法 ----- 53  
長 史典, 塚田 耀太, 長崎 陽, 津田 理 (東北大)
- 1P-p12 高勾配型超伝導バルク磁石を用いた卓上型磁気浮上装置の着磁運用と微小重力環境の応用展開 ----- 54  
高橋 圭太, 小泉 結, 大久保 明希, 渡邊 匡人 (学習院大)
- 1P-p13 磁気アルキメデス法を用いたレアアース泥の選鉱に関する基礎的研究 ----- 55  
西川 怜志, 秋山 庸子, 真鍋 勇一郎, 佐藤 文信 (阪大)

6月1日(木) A会場 9:30 - 18:00

医療用加速器 9:30 - 11:00 座長:曾我部 友輔

- 2A-a01 「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 年春):(その 1)  
全体概要 ----- 56  
石山 敦士, 熊谷 塁 (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); 長屋 重夫, 福田 光宏 (阪大)
- 2A-a02 「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 年春):(その 2)  
1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの冷却・励磁特性試験 ----- 57  
折原 菜月, 熊谷 塁 (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)

2A-a03	「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 年春): (その 3) 無絶縁 REBCO コイル励磁時のコイル両端電圧波形-----	58
	島田 垂緒, 熊谷 塁 (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)	
2A-a04	「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 年春): (その 4) 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムのひずみ評価-----	59
	植田 浩史, 山下 葵, 小前 諒太, 井上 良太, 金 諒太 (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)	
2A-a05	「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 年春): (その 5) ECR イオン源用無絶縁 REBCO コイルの開発-----	60
	荘 俊謙, 福田 光宏 (阪大); 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北大); 福井 聡 (新潟大); 吉田 潤 (住重); 渡部 智則 (中部電力)	
2A-a06	陽子線治療向け 230 MeV サイクロトロンにおける超伝導マグネットの励磁試験-----	61
	吉田 潤, 橋本 篤, 森江 孝明, 荒川 慶彦, 鶴留 武尚, 宮下 拓也 (住重)	

休憩 11:00 - 11:15

HTS コイル・解析 (1) 11:15 - 12:00 座長: 東川 甲平

2A-a07	液体水素冷却発電デモ機向け高強度 REBCO コイルの検討-----	62
	小畑 慶人, 三浦 英明, 殿岡 俊 (三菱電機); 大屋 正義 (関西学院大)	
2A-a08	大口径 10T 級 REBCO マグネット開発 (3) 10T 級テストコイルのクエンチ試験-----	63
	藤田 真司, 武藤 翔吾, 飯島 康裕, 大保 雅載 (フジクラ)	
2A-a09	人工ピン入り EuBCO スプリット線コイルの液体窒素蒸発法による交流損失の測定評価-----	64
	金沢 新哲, 関根 ちひろ, 川口 秀樹 (室蘭工大)	

昼食 12:00 - 13:00

ポスター手短紹介 13:00 - 13:15 (A 会場)

6月1日 (木) B 会場 9:45 - 12:00

REBCO 薄膜・バルク作製 (1) 9:45 - 10:45 座長: 内藤 智之

2B-a01	Zr をパターンニングした基板上でマルチフィラメント構造化した MOD-YBCO 薄膜の組織観察-----	65
	藤本 大貴, GUO Zimeng, 波多 聡, 寺西 亮 (九大); 松本 明善, 大井 修一 (NIMS)	
2B-a02	一方向溶融成長 (SDMG) 法による大型リング状 REBCO 溶融凝固バルクの直接育成-----	66
	元木 貴則, 仙波 実怜, 下山 淳一 (青学大)	
2B-a03	結晶成長方位の異なる RE123 溶融凝固バルクの臨界電流特性-----	67
	仙波 実怜, 元木 貴則, 三輪 将也, 近藤 莉帆, 下山 淳一 (青学大)	
2B-a04	Mg 気相輸送 (MVT) 法により作製した MgB <sub>2</sub> バルクの金属添加効果-----	68
	川崎 玲, 白旗 知暉, 山本 明保 (東京農工大)	

休憩 10:45 - 11:00

バルク作製 (2)・バルク着磁 11:00 - 12:00 座長: 元木 貴則

2B-a05	Ag 添加 GdBCO バルクの捕捉磁場に対するステンレス材でボールミルされた前駆体粉末の効果-----	69
	箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)	

2B-a06	波形制御パルス着磁による 40 K での GdBCO バルクの捕捉磁場特性-----	70
	今道 颯人, 土屋 美月, CAUNES Antomne, 和泉 充, 井田 徹哉 (海洋大)	
2B-a07	REBCO バルク磁石における上下面のパルス着磁特性の比較-----	71
	横山 和哉, TENDONGAFAC Regobert, SHANG Jiahao (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)	
2B-a08	REBCO バルク磁石の c 軸方向の不均一性を考慮したパルス着磁シミュレーション-----	72
	SHANG Jiahao, TENDONGAFAC Regobert, 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)	

**6月1日(木) C会場 9:45 - 12:00**

**計測・基礎 9:45 - 11:00 座長: 横田 康博**

2C-a01	低温用箔ひずみゲージを用いた GFRP 管のヤング率測定-----	73
	杉原 弥悠加, 佐藤 更, 武田 実, 前川 一真 (神戸大)	
2C-a02	歪ゲージによる低温での色々な材料の高感度測定-----	74
	神田 昌枝, 山本 実奈 (中部大); 岩田 暢祐, 鯉沼 秀臣 (SCT 社); 山口 作太郎 (中部大)	
2C-a03	極低温における真空中金属界面の接触熱抵抗の温度・圧力依存性-----	75
	上野 航生, 栗山 透, 高橋 政彦, 高木 紀和 (東芝 ESS)	
2C-a04	フッ素樹脂コーティングを用いた極低温機器の予冷時間短縮～液体窒素による急冷実験-----	76
	高畑 一也 (NIFS)	
2C-a05	15 K 下におけるステッピングモーターの発熱量の実験的見積もり-----	77
	飯田 光人 (たすく); 松村 知岳 (東大); 桜井 雄基 (岡山大); GHIGNA Tommaso (KEK); 長谷部 孝, HOANG Thuong Du, 片山 伸彦, 高久 諒太 (東大); 中川 潤 (三菱電機)	

**休憩 11:00 - 11:15**

**低温超電導化合物 11:15 - 12:00 座長: 杉本 昌弘**

2C-a06	Nb <sub>3</sub> Sn 層形成に与える Hf-Ta と Hf-Ti の添加効果-----	78
	伴野 信哉, 諸永 拓, 原 徹 (NIMS); 浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大)	
2C-a07	Sn 高拡散駆動力下での Nb <sub>3</sub> Sn 層形成-----	79
	浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大); 伴野 信哉 (NIMS)	
2C-a08	硬脆性材料 PbMo <sub>6</sub> S <sub>8</sub> 超伝導体のバルク磁石としての可能性-----	80
	金本 大祐, 内藤 智之 (岩手大)	

**ポスター手短紹介 13:00 - 13:15 (A 会場)**

**6月1日(木) ポスターセッションII Poster会場 13:15 - 14:30**

**MgB<sub>2</sub>(1) 13:15 - 14:30 座長: 下山 淳一**

2P-p01	(取り消し)	
2P-p02	MgB <sub>2</sub> ハイブリッド線材の微細組織と通電特性-----	81
	小黒 英俊, 大橋 克也, 吉澤 侑希 (東海大); 淡路 智 (東北大)	

**バルク作製(3) 13:15 - 14:30 座長: 山本 明保**

2P-p03	Er-Ba-Cu-O 超伝導接合材を用いた Gd-Ba-Cu-O 接合バルク超伝導体の接合部特性の制御-----	82
	竹村 賢人, 須藤 正照, 坂藤 正樹 (芝浦工大); 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄, 坂井 直道 (芝浦工大)	

**HTS 電流分布・解析(2) 13:15 - 14:30 座長: 土屋 雄司**

2P-p04	短尺の直流超電導ケーブルの特性評価-----	83
	山口 柊平, 濱本 拓郎, 木内 勝 (九工大)	
2P-p05	超電導複合導体の流入部の電流分布の解析(2)-----	84

	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)	
2P-p06	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 (2) -----	85
	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)	
2P-p07	溶融した BaCu <sub>2</sub> O <sub>2</sub> を利用した YBCO 丸線材作製方法の基礎検討 -----	86
	耿 智輝, 小黒 英俊 (東海大)	
2P-p08	AFI 数値積分法を用いた 2 次元の超伝導体内の 量子化磁束線の可逆運動の研究 -----	87
	温 謙, 上田 天馬, 小田部 荘司 (九工大); 松野 哲也 (有明高専)	

#### 回転機 (2)・磁気軸受 (1) 13:15 - 14:30 座長: 福井 聡

2P-p09	MgB <sub>2</sub> 線材における高調波磁界成分を重畳した外部印加回転磁界による交流損失の解析 -----	88
	河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	
2P-p10	MgB <sub>2</sub> 多芯線で巻いた超伝導コイルの回転磁界下での交流損失の数値解析 -----	89
	奥村 皐月, 河野 亮介, 中村 大翔, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	
2P-p11	大小 2 種類の REBCO ダブルパンケーキコイルを組み合わせた電機子コイルの電流分流通特性 -----	90
	高島 敦史, 宮崎 寛史 (九大); 川越 明史 (鹿児島大); 三浦 峻, 吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓 (九大)	
2P-p12	積層超伝導体と永久磁石による磁気軸受の電磁特性 -----	91
	寺尾 悠, 淵野 修一郎 (東大); 大屋 正義 (関西学院大)	
2P-p13	超伝導磁気軸受における分割固定子リングのモデリングと損失特性への影響 -----	92
	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)	

休憩 14:30 - 14:45

#### 論文賞受賞記念講演 14:45 - 15:45 座長: 三戸 利行 (A 会場)

2S-p01	大型 SMES 磁石応用への大電流容量 MgB <sub>2</sub> 導体開発 -----	93
	谷貝 剛, 高橋 雅史, 高尾 智明 (上智大); 新富 孝和, 槇田 康博 (KEK); 駒込 敏弘 (前川); 平野 直樹 (NIFS); 濱島 高太郎 (東北大); 菊池 章弘, 西島 元, 松本 明善 (NIMS)	

休憩 15:45 - 16:00

#### 特別セッション 16:00 - 16:45 (A 会場)

フェロー塾「ピンチを乗り越えエンジニア」(基盤強化委員会)  
濱島 高太郎 (東北大学名誉教授)

社員総会 17:00 - 18:00 (A 会場)

懇親会 18:15 - 20:15 (タワーホール船堀 2F「蓬菜の間」)

#### 6月2日 (金) A 会場 9:15 - 13:45

##### 回転機 (3)・磁気軸受 (2) 9:15 - 10:15 座長: 平野 直樹

3A-a01	液体水素浸漬冷却下における REBCO 界磁コイルの励磁試験結果 -----	95
	大屋 正義 (関西学院大); 殿岡 俊, 三浦 英明, 小畑 慶人 (三菱電機); 寺尾 悠 (東大); 白井 康之 (京大); 小林 弘明, 岡井 敬一 (JAXA)	
3A-a02	空芯型 REBCO 誘導電動機用回転子の特性評価 -----	96
	鳥居 龍ノ介, 中川 心平, 川越 明史 (鹿児島大); 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)	

3A-a03	電機子コイルにおける $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 並列導体の素線間電流分岐の簡易解析手法	97
	三浦 峻, 公文 麻人, 増田 陽平, 中村 一稀, 宮崎 寛史 (九大), 川越 明史 (鹿児島大); 吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓 (九大)	
3A-a04	高温超電導バルク / コイルで構成される超電導磁気軸受の希薄ガスヘリウムによる冷却特性: 数値解析による熱負荷評価	98
	宮崎 佳樹, 山下 知久, 坂本 泰明, 富田 優 (鉄道総研)	

休憩 10:15 - 10:30

核融合 10:30 - 11:45 座長: 有本 靖

3A-a05	核融合原型炉の超伝導 TF コイル設計検討の進捗	99
	宇藤 裕康 (量研機構); 三浦 英明, 荒川 仁, 越前谷 大介, 松田 拓也, 長谷川 満, 野元 一宏 (三菱電機); 伴野 信哉 (NIMS); 谷貝 剛 (上智大); 杉本 昌弘 (古河電工); 西嶋 茂宏 (福井工大); 坂本 宜照 (量研機構)	
3A-a06	核融合炉用超電導磁石絶縁材料のせん断応力下絶縁耐圧特性	100
	西嶋 茂宏, 砂川 武義, 野村 直希 (福井工大); 秋山 庸子 (阪大); 山中 淳彦 (名大); 岩本 晃史, 高畑 一也, 今川 信作 (NIFS); 坂本 宜照, 宇藤 裕康 (量研機構); 戸田 良彦, 平井 正明 (有沢製作所); 遠山 喜克 (昌立工業)	
3A-a07	20 kA 級高温超伝導 STARS 導体の通電特性と展望	101
	柳 長門, 成嶋 吉朗 (NIFS); GARFIAS-DÁVALOS 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, 高田 卓, 平野 直樹, 高畑 一也 (NIFS)	
3A-a08	素線断面入熱と高精度温度検出を用いた大型ケーブル・イン・コンジット導体の 素線配置計測システムの構築	102
	谷貝 剛, 星野 壮太, 石田 道由 (上智大); 伴野 信哉 (NIMS); 宇藤 裕康, 坂本 宜照 (量研機構)	
3A-a09	JT-60SA 超電導コイルの現地絶縁補強	103
	村上 陽之, 土屋 勝彦, 梶谷 秀樹, 中本 美緒, 小島 有志, 山本 聡, 大西 祥広, 河野 勝己, 濱田 一弥 (量研機構)	

昼食 11:45 - 12:45

超電導応用 (2) 12:45 - 13:45 座長: 津田 理

3A-p01	HTS テープ線材の短絡電流試験 - 4	104
	山口 作太郎, 江口 実穂, 川合 修平, IVANOV Yury, 神田 昌枝, 斎藤 涼夫 (中部大); 二ノ宮 晃 (明治大)	
3A-p02	SMES ケーブルを用いた直流マイクログリッドによる再生可能エネルギー利用効率の向上	105
	東川 甲平, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)	
3A-p03	スクライビング加工された RE 系コート線材を用いた超電導電流導体の通電特性評価	106
	濱本 拓郎, 木内 勝 (九工大); 山崎 春太郎, 吉田 隆 (名大)	
3A-p04	並列導体を構成する超伝導テープ線幅広面に垂直な外部磁界がテープ間電流分布に及ぼす影響	107
	押川 昌樹, 吉田 尚貴, 川越 明史 (鹿児島大); 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)	

6月2日 (金) B会場 9:15 - 11:45

超電導・低抵抗接続 9:15 - 10:30 座長: 松本 明善

3B-a01	NbN ペースト作製と超伝導接続	108
	高島 浩, 吉田 良行, 古瀬 充穂 (産総研)	
3B-a02	様々な補強線材間の Bi2223 線材間超伝導接合開発	109

山口章, 中井優亨, 稲葉勇人, 元木貴則, 下山淳一 (青学大); 中島隆芳,  
山崎浩平 (住友電工)

- 3B-a03 Ni合金補強 Bi-2223 線材の超伝導接合抵抗評価 ----- 110  
武田泰明, 西島元 (NIMS); 中井優亨, 稲葉勇人, 山口章, 元木貴則, 下山淳一 (青学大);  
北口仁 (NIMS)
- 3B-a04 マルチジャンクション法による Bi2223 線材間の接合の臨界電流とコイルの永久電流の測定評価 ----- 111  
金沢新哲 (室蘭工大)
- 3B-a05 WISE 導体の REBCO テープと電流フィーダーの接続構造に起因する焼損現象の解析 ----- 112  
成嶋吉朗 (NIFS); GARFIAS-DÁVALOS Diego Armando (総研大); 小野寺優太, 濱口真司,  
力石浩孝, 柳長門, 馬場智澄 (NIFS)

休憩 10:30 - 10:45

HTS 長尺・導体化 10:45 - 11:45 座長: 柁川一弘

- 3B-a06 REBCO 長尺線材における局所  $I_c$  不均一性に係る統計性に関する機械学習画像分類を用いた考察 ----- 113  
木須隆暢, 呉澤宇, 寺崎拓也, 今村和孝, 東川甲平 (九大)
- 3B-a07 導電性マイクロパスを設けた REBCO 高温超伝導積層導体の開発 ----- 114  
吉田隆, 長田智樹, 坂井巖, 山崎春太郎, 山田寛之 (名大); 土屋雄司 (東北大);  
小野寺優太, 三戸利行 (NIFS)
- 3B-a08 単純積層 HTS 導体における電流分布へのインダクタンスの影響 ----- 115  
GARFIAS-DÁVALOS Diego Armando (総研大); 成嶋吉朗, 柳長門 (NIFS)
- 3B-a09 国際超電導直流送電プロジェクトと標準化の検討 (1) ----- 116  
長村光造 (応用科学研); 三戸利行 (NIFS); 松下照男 (九工大); 西島元 (NIMS);  
筑本知子 (中部大); 早川直樹 (名大); 富田優 (鉄道総研); 大屋正義 (関西学院大);  
向山晋一 (日本電線工業会)

6月2日 (金) C会場 9:30 - 13:45

安定性・保護 9:30 - 10:30 座長: 西島元

- 3C-a01 導電性エポキシを用いた intra-Layer No-insulation (LNI) REBCO コイルの層間接触抵抗率の安定性 ----- 117  
田中湧也 (上智大); 末富佑 (理研); 高尾智明 (上智大); 小林賢介, 柳澤吉紀 (理研)
- 3C-a02 並列高温超電導導体を用いた無絶縁コイルの外部磁場変動時の電流挙動と熱的安定性 ----- 118  
大池章太, 小林宏泰, 早乙女英夫, 宮城大輔 (千葉大); 長崎陽, 津田理 (東北大)
- 3C-a03 超伝導導体の回復電流に対する外部磁場分布の影響 ----- 119  
今川信作 (NIFS)
- 3C-a04 銅線による NbTi/Cu 線の冷却安定性に対する影響の研究 ----- 120  
島本知輝 (総研大); 今川信作, 高田卓, 濱口真司, 尾花哲浩 (NIFS)

休憩 10:30 - 10:45

MgB<sub>2</sub> (2) 10:45 - 11:45 座長: 石原篤

- 3C-a05 データ駆動型超伝導線材の開発 - ベイズ最適化を使った熱処理条件の探索 - ----- 121  
松本明善, 石井秋光, 柳生進二郎, 西島元, 松波成行, 伴野信哉 (NIMS); 細川貴弘,  
山本明保 (東京農工大)
- 3C-a06 B 過剰 MgB<sub>2</sub> を原料とした MgB<sub>2</sub> 多結晶体の臨界電流特性 ----- 122  
関口直希, 岩崎響, 元木貴則, 下山淳一 (青学大); 児玉一宗, 田中秀樹 (日立)
- 3C-a07 SUS と Monel の併用による MgB<sub>2</sub> 線材のひずみ耐性強化 ----- 123

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司 (日立); 西島 元, 松本 明善 (NIMS)

- 3C-a08 MgB<sub>2</sub> 超伝導材料の異方的な構造乱れと磁場中の輸送臨界電流密度 ----- 124  
前田 穂 (Kangwon 国立大); LEE Dong Gun, CHOI Jun Hyuk (Sam Dong);  
金正鎬 (Wollongong 大); 崔 世鎔 (Kangwon 国立大)

昼食 11:45 - 12:45

加速器用 HTS マグネット 12:45 - 13:45 座長: 柳 長門

- 3C-p01 加速器用 HTS マグネットの開発 (10-1) - 全体概要 - ----- 125  
土屋 清澄, 王 旭東, 寺島 昭男, 有本 靖, 大内 徳人, 宗 占国, 増澤 美佳 (KEK);  
菊池 章弘 (NIMS); 藤田 真司 (フジクラ)
- 3C-p02 加速器用 HTS マグネットの開発 (10-2) - 特殊六極マグネットの励磁試験 - ----- 126  
王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男, 有本 靖, 大内 徳人, 宗 占国 (KEK); 藤田 真司 (フジクラ)
- 3C-p03 加速器用 HTS マグネットの開発 (10-3) - 特殊六極マグネットの磁場測定 - ----- 127  
有本 靖, 大内 徳人, 王 旭東, 宗 占国, 寺島 昭男, 土屋 清澄 (KEK)
- 3C-p04 加速器用 HTS マグネットの開発 (10-4) - 加速器用 REBCO 丸型ケーブルの基礎研究 - ----- 128  
王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男 (KEK); 田邊 豪, 根岸 伸行 (潤工社); 菊池 章弘 (NIMS)



# 輸送機器用 REBCO バルクバーを用いた高温超伝導誘導同期モータの実験的研究

## Experimental study of a high-temperature superconducting induction/synchronous motor with REBCO bulk bars for transportation applications

高 雲飛, 中村 武恒(京大)

GAO Yunfei, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

E-mail: gao.yunfei.83h@st.kyoto-u.ac.jp

### 1. Introduction

Lightweight and highly efficient high-temperature superconducting (HTS) rotating electric machines show great potential for transportation applications such as electric aircraft. An advantage of rare-earth barium copper oxide (REBCO) bulk superconductors over stacked HTS tapes is their ability to carry larger and more homogenous currents. This study is the first in which an HTS induction/synchronous motor (HTS-ISM) with REBCO bulk superconductors has been successfully designed, tested, and fabricated.

### 2. Design and fabrication of HTS-ISM with REBCO bulk bars

Fig. 1 shows a schematic of the prototype, which comprises a 36-slot, 4-pole copper stator, and a 44-slot HTS squirrel-cage rotor. The stator was equipped with a conventional three-phase distributed winding comprising copper wires with a diameter of 0.9 mm. The number of turns in the copper windings of each slot was 44. The squirrel-cage rotor winding consisted of 44 REBCO bulk bars inserted into the rotor iron slots and two end rings. Each end ring consisted of three turns of REBCO tapes, which were shorted by soldering to both ends of all the bars. The length, width, and height of one bar were 90, 2.2, and 1 mm, respectively.

### 3. Test results and discussions

No-load and load tests were performed in liquid nitrogen at different frequencies to verify the performance of the prototype. We analyzed the differences between the proposed HTS-ISM that utilizes REBCO bulk bars and developed HTS-ISMs that utilize a few turns of HTS tapes per bar.

Fig. 2 shows the test results of the normalized speed ( $N/N_s$ ) versus the input voltage/frequency ( $V_i/f$ ) at 77 K under the no-load condition. The input voltage  $V_i$  was gradually increased to 200 V and then decreased to 0 V. The rotating speed lay almost on the same curve with increasing or decreasing input voltage, indicating that there was no obvious hysteretic behavior compared to HTS-ISMs that utilize a few turns of HTS tapes per bar. The load test results are shown in Fig. 3. The slip torque was dominant. It can be clearly inferred that the REBCO bulk superconductor utilized in this study had a smaller  $n$ -value than the HTS tapes used in previous studies did. At 40 Hz, the maximum output power of the preliminary design was 417 W.

### Acknowledgements

This work is supported by HARADA Foundation (203220900070) and KAKENHI (22H01471).

### Reference

1. T. Nakamura, *et al.*: "Novel rotating characteristics of a squirrel-cage-type HTS induction/synchronous motor," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 10, p. 911, 2007.

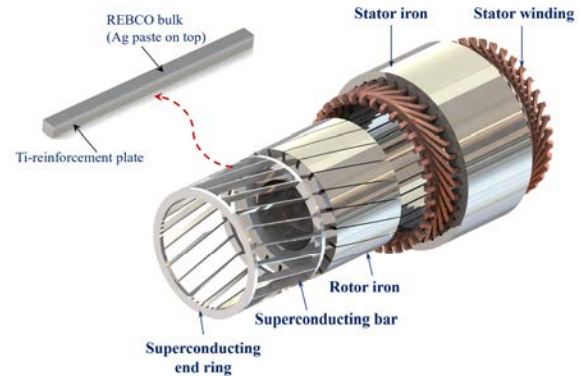


Fig.1 Schematic diagram of HTS-ISM with REBCO bulk bars.

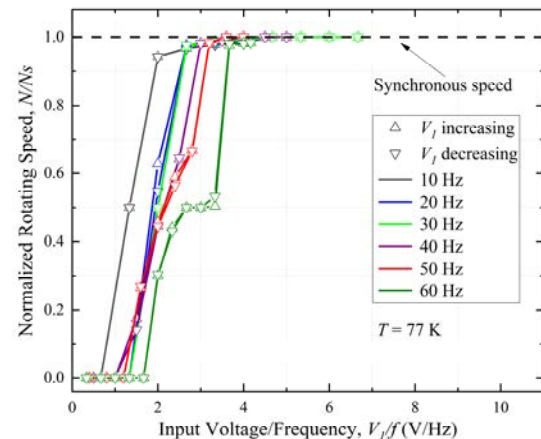


Fig.2 Test results of normalized rotating speed versus input voltage/frequency in the no-load condition.  $N_s$  is synchronous speed, and  $N$  is steady speed of rotor. (Print in black and white, from left to right: 10 to 60 Hz)

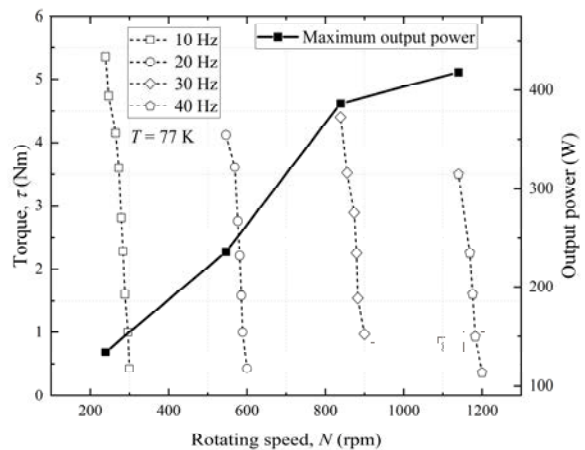


Fig.3 Torque and output power as a function of the rotor speed for the prototype. The maximum output power is calculated from the peak torque and the corresponding speed.

# 高効率・高出力密度・安定制御性を同時に実現する実用的高温超伝導 誘導同期モータに関する基礎検討

## Fundamental Study on Practical High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor Realizing High Efficiency, High Power Density, and Stable controllability

中村 武恒, 小野 友輝 (京大); 菊池 章弘 (NIMS)

NAKAMURA Taketsune, ONO Tomoki (Kyoto Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS)

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

### 1. はじめに

我々は、来たるべき水素社会に資するため、液化水素(大気圧沸点:20 K)の冷熱を利用して駆動する高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)[1]の最適構造や最適システム構成に関する研究開発を推進している。モータの開発に際しては、定常駆動時の高効率化だけでなく、始動・過負荷時の高出力密度化、さらには可変速駆動に対して安定であることなどの複数の性能が要求される。

本講演では、液化水素中で運転する固定子電機子型 50 kW 級モータを対象にして、定常時高効率、始動・過負荷時高出力密度、および可変速駆動時安定制御性の観点から最適な実用的モータの検討を実施したので報告する。

### 2. 固定子設計の考え方

固定子巻線の役割は、無効電力を用いた回転磁界の発生・磁気エネルギー貯蔵、および有効電力を用いたモータ内損失補償ならびに電気-機械エネルギー変換のための電力伝達である。従って、当該役割を果たすための固定子巻線導体はあまり自身の性格を主張しない縁の下の力持ちであるべきである。これまでの研究により、固定子を HTS 導体で構成した電圧源駆動モータでは、同導体の非線形抵抗によって三相電流が不平衡になり易く、焼損のリスクがあることを示している[2]。勿論、電流源駆動する場合には電流不平衡の問題は解決されるものの、電圧波形の歪によって鉄損の上昇が心配される。従って、本研究でターゲットとしている実用モータという観点からは、電圧型インバータがこれからも主流であるという仮定のもとで、固定子には Ohm の法則に従う常伝導体を採用することにする。

一方で、常伝導体は有限の抵抗を有することから、巻線損失の増加が懸念されるため、残留抵抗比(RRR)の高い銅線若しくはアルミ線を用いる予定である[3]。例えば、温度 20 K における銅(RRR3000)の抵抗率は  $1.32 \times 10^{-5} \mu\Omega\text{m}$  であり、RRR30 の一般的銅線の約 1/40 となっている[4]。さらに、抵抗率の低い導体では比較的低い電気周波数に対しても表皮効果が顕著になってしまうことから、極細多芯撚線を採用する。

### 3. 回転子設計の考え方

一方で、回転子巻線は固定子の作る回転磁界に変調を与える必要があり、それを実現できる合理性がある場合には個性を発揮すべきである。モータは、始動時や可変速時等の過渡状態において回転安定でなければならない。一般的モータの電氣的あるいは機械的制動項が小さい場合には、回転系が不安定になり易く、少なくとも HTS モータでは電氣的制動(抵抗)が非常に小さいので、当該傾向が強くなる。しかしながら、HTS-ISM のように回転子巻線に HTS 導体を使用すれば、臨界電流および磁束フロー抵抗という非線形パラメータによって自律的に回転安定になり、かつ定常状態では制動に伴う損失も発生しないことから、理想的な回転安定性が実現される[1]。さらには、HTS 回転子巻線内部の磁性体中に磁束が蓄積されて高効率な同期回転が実現され、かつ高出力密度も達成可能である。一方で、電流量の増大に伴って HTS 導体の断面積が大きくなれば、遮蔽電流に伴って誘導電流が導

体表面にしか流れ無いことから、導体の利用率が低下してしまう。これは、HTS 導体中の磁束ピン止め現象に伴う臨界電流によって生じる現象であるが、出力密度を改善するためには、やはり極細多芯撚線かそれと等価な導体構造にする必要がある。本研究では、希土類系 HTS テープでは少なくとも超伝導層の厚みが 1  $\mu\text{m}$  程度であることから、幅方向を可能な限りスクライビング加工して用いる。あるいはビスマス系テープは基本的に多芯構造となっていることから、銀安定化層との電磁的カブリング時定数に注意して使うことになる。さらには、 $\text{MgB}_2$  線材では極めてフレキシブルな超極細線が開発されていることから[5]、液化水素応用では最適な材料の一つと考えられる。

### 4. 50 kW 級機的设计例

上記方針のもと、2次元電磁界解析プログラム(COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>)によって50 kW級機(運転温度: 20 K)の設計を行った。なお、本研究では未だ固定子・回転子導体の極細多芯構造は考慮していない。また、固定子巻線導体としては RRR3000 の銅を、回転子巻線導体としては希土類系 HTS 導体を想定している。

Fig. 1には、設計した50 kW級HTS-ISMの半径方向磁束密度コンター図(回転数: 5000 rpm)を示す。解析の結果、出力 53.7 kW を実現できており、定常回転効率は99.85%(機械損は含まず)となっている。この値は非常に高く、ベアリング損他の機械損を考えればこれ以上高くしてもあまり意味がないと考えられる究極値である。さらに、このときの出力密度は1.2 kW/kg であり、連続定格の定常効率であることを考えれば非常に高い。なお、もしも出力密度重視の設計を行えば、10 kg/kW を軽く超える設計は容易である。

### 参考文献

1. T. Nakamura: TEION KOGAKU, Vol. 57, No. 2 (2022) pp. 101-108
2. D. Sekiguchi: Master's thesis, Kyoto University (2012)
3. M.D. Sumption, et al.: Cryogenics, Vol. 111 (2020) 103171
4. Handbook on Materials for Superconductivity Machinery (1977), p. 281
5. A. Kikuchi: Abstract of ISS2022 (2022) WB5-2-INV

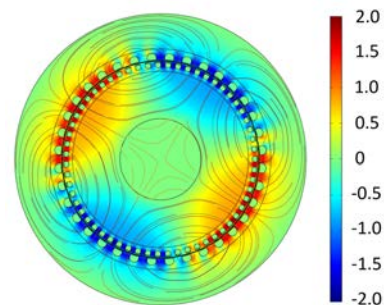


Fig. 1 Radial magnetic flux density contour of 50 kW class HTS-ISM (rotating speed: 5000 rpm).

## 6 kW 級高温超伝導誘導同期モータのパルス電流注入法を用いた始動電流低減法に関する解析的検討

### Analytical Study on Starting Current Reduction Method Using Pulse Current Injection Method for 6 kW Class High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor

中村 武恒 (京大); 桜井 貴夫, 犬塚 俊康, 舟山 智歌子 (三菱重工)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); SAKURAI Takao, INUZUKA Toshiyasu, FUNAYAMA Chikako (MHI)

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

#### 1. はじめに

高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconductive Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)は、かご形誘導機と同様の基本構造を有しているが同期回転とすべり回転の両立などの回転原理上の優位性を有している[1]。我々は、6 kW 級 HTS-ISM を試作し、その実用的設計・制御法の確立と更なる高性能化の検討を行っている。

一方で、HTS-ISM の実用の際の課題の一つとして始動法の確立が挙げられる。即ち、始動時には HTS かご形巻線の磁気遮蔽を破るために大きな始動電流を要し、駆動インバータおよび HTS 巻線に大きな負担となる。

本講演では、6 kW 級試作機を対象にして上記磁気遮蔽を速やかに破るためのパルス電流注入法[2]を導入し、始動電流低減効果を解析的に検討したので報告する。

#### 2. 検討対象とした 6 kW 級 HTS-ISM

Fig. 1には、検討対象とした6 kW級HTS-ISMの概略図を示す[3]。三相4極の銅巻線固定子とビスマス系高温超伝導巻線かご形回転子で構成されており、設計通りの定格出力(77 K)や室温における低出力駆動(1.5 kW)に成功している[3]。

#### 3. パルス電流注入法

Fig. 2(a)にはHTSかご形巻線の模式図を示す。また同図(b)には、かご形巻線の1ループを抜き出して、始動直前の磁気遮蔽特性の概念図を示している。静止状態のHTSループ(抵抗0)に固定子側から磁束を供給すると、巻線内に遮蔽電流が流れることによって鎖交が妨げられる。従って、この磁気遮蔽を破るためには、遮蔽電流をHTSロータバーの臨界電流以上にする必要があるが、これをパルス電流注入によって実現する。このとき、パルスを注入する時間( $\Delta t$ )は、HTSかご形巻線の電氣的時定数(= 巻線インダクタンス/巻線抵抗)を $\tau_e$ 、HTS回転子の機械的時定数(= 慣性モーメント/制動係数)を $\tau_m$ とすると次式の条件で与える必要がある。

$$\tau_e < \Delta t \ll \tau_m \quad (1)$$

式(1)は、一次巻線からのパルス電圧を有効に磁束に変換し、かつトルクに変換されないための条件として重要である。

#### 4. 解析方法

Fig. 1の6 kW級機について、液体窒素大気圧沸点(77 K)における一次巻線抵抗測定、無負荷試験、および回転子拘束試験から等価回路パラメータを求め、さらに非線形電圧方程式を導出した。その際、HTS巻線の非線形電流輸送特性は回転子抵抗に電流依存性を持たせて反映している。同方程式と運動方程式を組合せ、MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>によって解析を行った。

#### 5. 解析結果と考察

Fig. 3には、電圧実効値95 V、入力周波数60 Hz (同期回転数= 1800 rpm)で定常運転する際の始動電圧パターンを示す。時刻0.26 sで電圧印加を開始し、2.85 sで定常電圧(95 V)に到達するパターンとしている。なお、始動電圧パターンの時間変化は線形ではなく、回転子に運動エネルギーが吸収されるパターンに類似させて指数関数的変化としている。

解析の結果、Fig. 3に示すような時刻0.26 sでピーク値20 V強のパルス電圧を印加した場合の固定子始動電流の最大値

は26 Aであった。一方で、上記パルス電圧を印加しない場合には29 Aであり、即ちパルス電圧印加によって始動電流を10%強低減出来ている。詳細は、講演当日に報告する。

#### 謝辞

松木健次郎氏には、京都大学在学中に解析プログラムの開発に協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

1. T. Nakamura: TEION KOGAKU, Vol. 57, No. 2 (2022) pp. 101-108
2. K. Matsuki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) 2A-a06
3. T. Nakamura, et al.: Abstracts of ISS2022 (2022) AP5-4

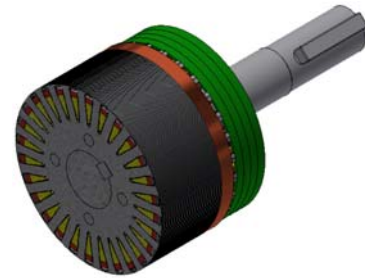
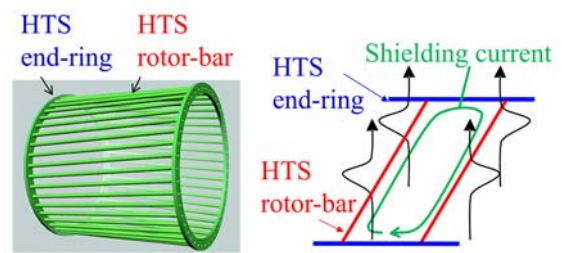


Fig. 1 Schematic diagram of 6 kW class HTS-ISM [3].



(a) Cage-winding (b) Magnetic shielding state  
Fig. 2 Conceptual diagram of HTS squirrel cage-winding just before starting.

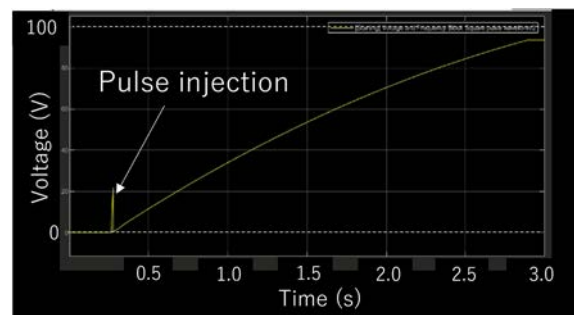


Fig. 3 Voltage pattern for starting.

# 移動平均法によって生成した PWM 電圧波形による高温超伝導 誘導同期モータの駆動特性

## Driving Characteristics of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor by PWM Voltage Waveform Generated by Moving Average Method

中村 武恒, 後藤 芳隆 (京大)

NAKAMURA Taketsune, GOTOU Yoshitaka (Kyoto Univ.)

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

### 1. はじめに

我々は、高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) [1] の実用を目指した研究開発を推進している。一般に、モータの駆動にはパルス幅変調 (Pulse Width Modulation: PWM) によって作成された電圧が用いられる。その際、変調波 (一般に正弦波) と搬送波 (三角波若しくはのこぎり波) を比較してパルスパターンを決定している。

本講演では、PWM 電圧波形の新しい生成法として移動平均法 [2] を提案し、同波形の物理的特長を説明すると共に、HTS-ISM の駆動特性を報告する。

### 2. 移動平均法による PWM 波形の生成アルゴリズム [2]

本研究では、一般的なフルブリッジ2レベルインバータ駆動系を対象とする。まず、時刻  $t$  における変調波を次式で与える。

$$v_m(t) = A \sin(2\pi f_m t - \theta_0) + B \quad (1)$$

ここで、 $A$  は電圧振幅値であり、 $B$  は同バイアス値である。また、 $f_m$  は変調波周波数であり、 $\theta_0$  は位相差である。式 (1) の電圧波形を実現すべく、離散時間  $\Delta t$  毎の電圧パルス値  $v_k$  を次式のように決定する。なお、簡単のため  $A=B=0.5$  とする。

時刻  $t$  において、直近時間  $n\Delta t$  ( $n$  は平均を取る離散時間の個数) の電圧平均値  $v_s$  を次式で与える。

$$v_s(t) = \frac{\sum_{i=t-n\Delta t}^{t-\Delta t} v_k(i)\Delta t}{n\Delta t} \quad (2)$$

時間  $t \sim t+\Delta t$  の  $v_k$  値について、 $v_m \geq v_s$  ならば 1、 $v_m < v_s$  ならば 0 とする。Fig. 1 には、生成した電圧波形例を示す。上段の PWM 波形を見ると、一般的波形に比較して時間対称性が崩れている。この解釈を事項で説明する。

### 3. 物理的解釈

以上のように、移動平均法のアルゴリズムは単純であり、またローパスフィルターと同様の効果として、モータ特性に影響を与える低次高調波成分の低減が期待される [3]。一方で、モータの低次高調波を選択的に削除する方法としては例えば Selective Harmonic Elimination [4,5] が挙げられる。しかしながら、移動平均法は下記物理的解釈が可能である。

Faraday の誘導則によると、誘導起電力  $e$  は鎖交磁束  $\Psi$  によって次式で与えられる。

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

式 (3) から、次式が得られる。

$$\Psi = -\int e dt \quad (4)$$

上式を積分時間で割れば、その形式的表現としては式 (2) に一致する。即ち、移動平均法によって履歴を踏まえた電圧波形を作成する方法は、滑らかな磁束の計算行為に一致することになる。モータにおける電気-機械エネルギー変換の主役は電気系でも機械系でもなく、磁束の時空間変調である。その磁束の情報を含んだ離散的な PWM 電圧波形によって、オープンループ制御でさえもある程度の回転特性改善が期待される。

### 4. 解析結果の一例

Fig. 2 には、これまでの検討において最も特性の良い条件 ( $n\Delta t$ : 2.000 ms の場合に  $\Delta t = 100 \mu s$ 、0.600 ms の場合に  $\Delta t = 20.0 \mu s$ 、0.714 ms の場合に  $\Delta t = 14.3 \mu s$ ) について FFT 解析を

実施し、基本波電圧、全高調波歪 (THD)、高調波成分のそれぞれを三角波比較 PWM 法の場合の値で除して示している。図から明らかなように、 $\Delta t = 20.0 \mu s$  のとき、基本波電圧が最も高く、THD が最も低くなった。また、高調波成分が他の条件よりも低く、最良の特性と考えられる。同結果から、スイッチング時間は短ければ良いというものではなく、最適値が存在することが明らかになった。この理由や、移動平均法を用いた HTS-ISM の駆動特性に関しては、講演当日に報告する。

### 参考文献

1. T. Nakamura: TEION KOGAKU, Vol. 57, No. 2 (2022) pp. 101-108
2. Y. Gotou: Master's thesis, Kyoto University (2023)
3. T. Nakamura and Y. Gotou: unpublished
4. H.S. Patel, et al: IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-9, No. 3 (1973) pp. 310-317
5. H.S. Patel, et al: IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-10, No. 5 (1974) pp. 666-673

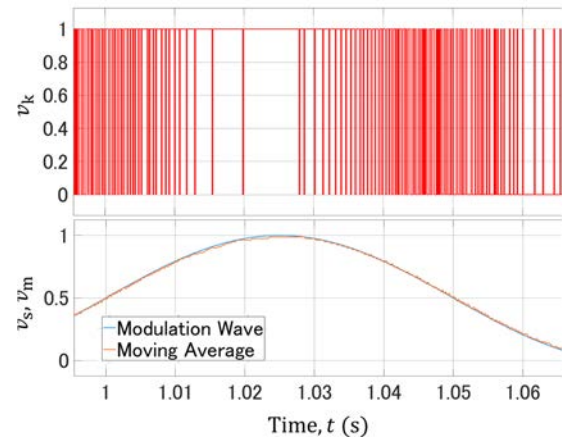


Fig. 1 Example of voltage waveform generation by moving average method [2].

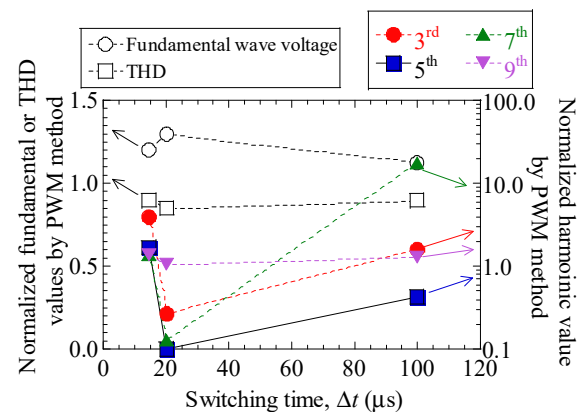


Fig. 2 Example of normalized values of the fundamental voltage, THD, and harmonic components by the typical triangular wave comparison PWM method.

# 無絶縁高温超伝導コイルを界磁巻線に適用した大型同期電動機の回転機特性の解析 Analysis of Motor Characteristics of Large Scale HTS Synchronous Motor Using No-insulation Field Winding

福井 聡, 塩澤 勇太郎, 吉田 惇生, 小川 純 (新潟大); 石山 敦士 (早稲田大)

FUKUI Satoshi, SHIOZAWA Yutaro, YOSHIDA Saiki, OGAWA Jun (Niigata University); ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)  
E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

## 1. はじめに

NIコイルを大型HTS同期機の界磁巻線に適用することが検討されている<sup>(1)</sup>。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級大型高温超伝導同期電動機の電気設計を行い、界磁巻線にNIコイルを適用することが回転機特性に与える影響について有限要素解析による検討を行った。また、速度制御特性への影響を評価するために、ベクトル制御による速度制御特性について検討した。

## 2. 電気設計及び解析モデル

本研究では、大型輸送船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線コイルによる設計(空隙磁界3.2 T程度)とする。界磁コイルの設計においては、巻線部の最大垂直磁界を4.74 T、界磁電流を500 Aとした。電気装荷を9452 A/m、定格電圧を5480 Vrms(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。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評価される等価抵抗の並列回路で表すこととし、それらが全て直列に接続されていると考える。

## 3. 解析結果

FEM解析に基づいて、NI界磁コイルの電気的特性が回転機特性に与える影響について、以下の項目の評価を行った。

- ① 固定子磁束の空間高調波の影響の評価
- ② 固定子磁束の空間高調波の動特性へ与える影響の評価(フリーラン解析)
- ③ インバータ駆動時の高調波電流の影響の評価
- ④ 固定子電流変化によるトルク追従性の評価

ここでは、解析結果の一例として、固定子を正弦波電流源で駆動し、運動方程式を連成するフリーラン解析の結果を示す(負荷トルクを回転数の瞬時値に対応するように変化させて、脱調しないようにした)。解析結果の一例をFig. 2に示す。Fig. 2に示すように、空間高調波磁界及び速度起電力の影響により、界磁電流に変動があるものの、影響は小さい(1-2%程度)。これは、本機が空芯機かつギャップが大きい(電機子-界磁間の相互インダクタンスが小さい)ため、界磁コイルの位置では固定子の空間高調波の影響はほとんどないことによるものと考えられる。次に、速度制御特性への影響を評価するために、dq等価回路に基づくベクトル制御則を導出した。dq等価回路では、界磁回路をインダクタンスと等価抵抗の並列回路とする。Fig. 3に速度指令値を90 rpm / 20 s (90 rpmで一

定)としたときの、速度追従性の解析結果を示す。この結果より、電機子側からの電流制御により速度制御は十分に可能であることが分かった。

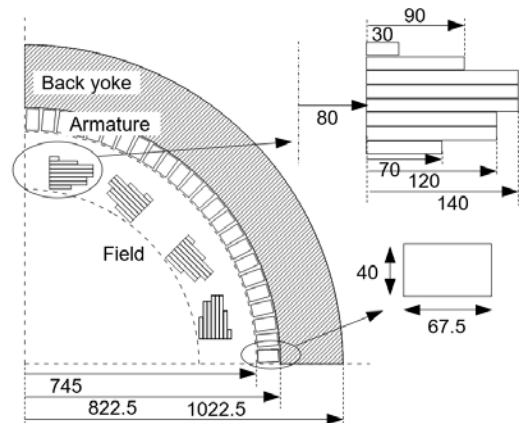


Fig. 1 Schematic illustrations of developed HTS armature and coil.

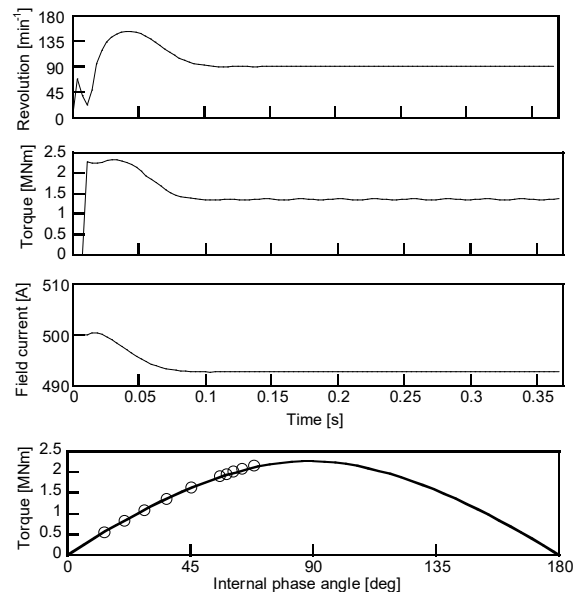


Fig. 2 Example of analytical results by FEM (free-run mode).

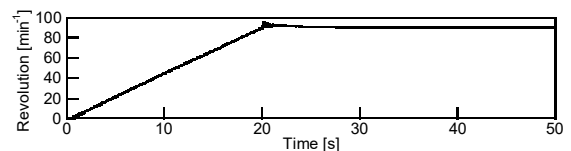


Fig. 3 Speed response by field oriented control.

Tab. 1 Specifications of 20 MW-class HTS synchronous motor model.

基本諸元		界磁	
定格出力 [MW]	20	定格電流 [A]	500
定格電圧 [V]	5480	電流密度 [A/mm <sup>2</sup> ]	167
定格電流 [A]	2363	ターン数	3400
回転数 [rpm]	90	線材間横断抵抗 [ $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	100
周波数 [Hz]	6	電機子	
極数	8	電流密度 [A/mm <sup>2</sup> ]	3.5
		スロット数/極・相	4
		導体数/スロット	4

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(22H01464)により実施した。

## 参考文献

1. U. Bong, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 5, Art. no. 5200505 (2021).

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年春)(1): 概要とリール・トゥ・リール式ケーブル作製機によるケーブル作製

## Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (1): Overview and 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); 中崎 竜介, 山野 聡士(古河電工); 坂本 久樹(SuperPower Inc.)  
 AMEMIYA Naoyuki, SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, FUJINO Masato (Kyoto U.);  
 NAKASAKI Ryusuke, 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ケーブル(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。SCSC ケーブルは、交流損失低減のために薄膜高温超伝導線を多心化し、フィラメント間分流を可能にして局所的欠陥などに対するロバスト性を向上させるために銅を複合し、結合時定数を低減するために超伝導線を円形コアのまわりにスパイラル状に巻き付けた円形導体である。その構造は、ツイストされた低温超伝導線と類似のものと解釈することもできる。大電流化・高電流密度化のため、コアの周りに線材を多層に巻きつけるが、層間、超伝導線材とコア間は絶縁されていないため、それらの間の電流分流も安定性・保護性を高める。

### 2. 進捗の概要

SCSC ケーブルを構成する銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線については、幅 2 mm、フィラメント数 10、銅メッキ厚さ 10 mm (片面あたり)を標準的な仕様として、標準単長 40 m、総長約 1.5 km の線材の作製を進めている。マルチフィラメント加工はレーザーによって行うが、レーザーによるマルチフィラメント加工前の元材を長くすれば単長を伸ばすことは可能で、作製中の 1.5 km のうち、作製済みの最も長いものでは、マルチフィラメント線の単長は 150 m である。フィラメントの間のストリェーション(条痕)部の幅は 50 mm 程度から、さらに狭くする技術開発を進めている。

ケーブル作製については、リール・トゥ・リール式ケーブル作製機を京都大学に導入し、ステンステープや銅テープを用いて多層模擬ケーブルを作製するとともに、超伝導線材を用いた実ケーブルの作製条件の検討を進めている。

また、SCSC ケーブルの応用可能性を提示するために発電機への応用の概念検討を行っている(1A-p02)。

さらに、SCSC ケーブルの特性を明らかにするため、結合時定数の温度依存性の実測(1A-p03)、多層ケーブルにおける線材間の相互作用が磁化損失に与える影響の検討(1A-p04)、フィラメント間の電流分流が熱暴走に与える影響の実験的検討(1A-p05)、ケーブルクエンチ解析手法の構築(1A-p06)などを行っている。

### 3. リール・トゥ・リール式ケーブル作製機によるケーブル作製

リール・トゥ・リールで送るコアの周囲で超伝導線材を巻いたスプールを回転させ、コアに超伝導線材を巻き付けていく方式のリール・トゥ・リール式ケーブル作製機を京都大学に導入した。その外観を Fig. 1 に示す。ケーブル作製技術としては、幅 2 – 4 mm、厚さ 50 mm 程度の超伝導線材を、1 mm 以下の間隔で重なることなく、コアや内側の層の超伝導線材の上に巻き付けていくことがケーブル作製機には求められる。まず、超伝導線材より剛性が高いステンステープ、剛性が低い銅テープを用いて、テープを整列して巻き付けるための試し巻きを繰り返し、安定してケーブルを作製する手順を構築した。Fig. 4 は、このようにして作製した、幅 2 mm、厚さ 50 mm の銅テープを、1 層あたり 3 本、4 層にわたってコアの周りに巻き付

けた模擬ケーブルである。この模擬ケーブルは長さ 5 m であるが、これは、作製技術確認には 5 m で十分と判断してそれ以上の巻き付けを行わなかっただけで、巻き付けを継続していけば、これより長いものも作製可能である。Fig. 4 は、幅 2 mm、厚さ 50 mm の超伝導線材を、1 層あたり 3 本、4 層にわたってコアの周りに巻き付けた試作 SCSC ケーブルである。通電のための電流端子も、その試作をかねて取り付けてある。こちらについても、試作目的で超伝導線節約のために 0.7 m でケーブル作製をやめただけで、ケーブル作製機の運転を続ければ、用意する線材・コアの長さ以外に、作製できる長さを制約する要素はない。

### 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJMI19E1 の支援を受けたものである。



Fig. 1 Reel-to-reel cabling machine.



Fig. 2 5 m-long mock-up cable made with copper tapes.



Fig. 3 0.7 m-long, 4-layer SCSC cable with terminals for current injection.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年春)(2): SCSC ケーブル応用の概念検討 Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (2): Conceptual studies of applications

雨宮 尚之, 曾我部 友輔(京大); 福井 聡(新潟大); 山野 聡士(古河電工)

AMEMIYA Naoyuki, SOGABE Yusuke (Kyoto U.); FUKUI Satoshi (Niigata U.); YAMANO Satoshi (Furukawa Electric)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

SCSC ケーブルは、CORC ケーブル/ワイヤと同様にあらゆる方向に曲げることが可能で多様な形状の立体巻線に適用可能であること、CORC ケーブル/ワイヤに比べて交流損失が小さいこと、といった特徴を有している。今回、線材メーカーで作られているREBCO線材の臨界電流特性(温度・磁界振幅・磁界方向依存性)に基づき、定格電流、電流密度の観点から、SCSC ケーブル応用機器の概念検討を行ったので報告する。

## 2. 検討対象

検討対象は、Fig. 1 に示すような超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)がNEDOから受託した「超電導電力応用技術開発」において試作した超電導同期発電機(70 MW 級モデル機)の界磁巻線である。70 MW 級モデル機では、仕様の異なる3種類の回転子(界磁)を作り、回転子を入れ替えて試験が行われた。この講演概要では、系統擾乱時に界磁電流を速く変化させる超速応励磁に対応した超速応C機(電流変化率3200 A/s)の界磁巻線を対象とした検討について記述する。

## 3. 検討条件

Table 1 の NbTi conductor と示した列に、超速応C機の導体の仕様を示す。導体は、NbTi 超伝導線を77本燃り合わせて構成されており、液体ヘリウム浸漬冷却で使用され、運転温度は4.2 Kであった。

この導体(NbTi 導体)を基準にして、同じ定格電流、同じ経験磁界、ほぼ同じ断面積(ほぼ同じ電流密度)で、20 K および 40 K で運転可能な SCSC ケーブルを設計する。ただし、4.2 K に比べて 20 K および 40 K では物質の比熱が格段に大きく、熱擾乱に対して超伝導体は格段に安定であることから、臨界電流は NbTi 導体に比べて小さくなることを許容した。

超伝導線材の臨界電流については、ウェリントン・ビクトリア大学ロビンソン研究所の高温超伝導線材臨界電流データベース[2]の  $I_c(B, T, q)$  データをもとに、磁界振幅 6.75 T において、もっとも小さい  $I_c$  の値を、線材幅 2 mm に換算した値を利用した。

## 4. 検討結果

Table 1 に示すように、20 K 運転、40 K 運転ともに、定格電流、電流密度の観点から仕様を満たす SCSC ケーブルを設計することができた。

20 K 運転の場合は液体水素もしくは気体ヘリウムで、40 K 冷却の場合は、気体水素もしくは気体ヘリウムで冷却することが想定される。4.2 K の液体ヘリウムで冷却しなければならない NbTi 導体に比べ、温度マージンが大きく本質的に安定性に優れた界磁巻線が構成できるほか、気体冷却を適用すれば、液体ヘリウム冷却の場合に比べて、冷媒を回転子に導入するカップリングを含めた冷却システムの単純化の可能性もある。

## 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] 大石、西嶋「Super-GM における超電導発電機開発の概要 - 超電導電力応用技術開発 -」低温工学 Vol. 36, pp. 104-112(2001)
- [2] <https://htsdb.wimbush.eu/dataset/4256624>

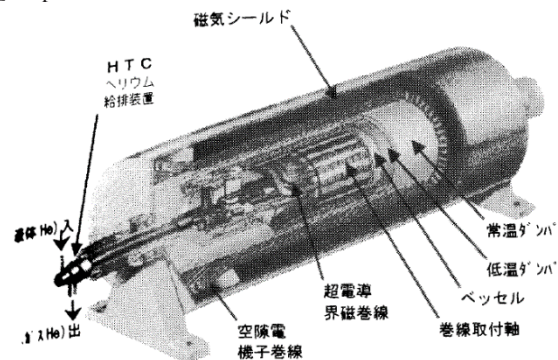


Fig. 1. 70 MW class superconducting generator developed by Super-GM [1].

Table 1 Specifications of SCSC cables and NbTi conductor for 70 MW class superconducting generator developed by Super-GM.

	NbTi conductor	SCSC cables	
Current (continuous rated / max)		3200 A / 4500 A	
Max. magnetic field at conductor		6.75 T	
Operating temperature	4.2 K	20 K	40 K
Conductor cross section	9.4 mm × 3.1 mm	6 mmφ (core = 4 mmφ)	6 mmφ (core = 3 mmφ)
Cross-sectional area (w/o insulation)	29.14 mm <sup>2</sup>	28.29 mm <sup>2</sup>	29.03 mm <sup>2</sup>
Current density	110 A/mm <sup>2</sup>	113 A/mm <sup>2</sup>	110 A/mm <sup>2</sup>
Critical current per 2 mm-wide tape	N/A	175 A @6.75 T #1	70 A @6.75 T #1
Critical current	12.8 kA@6 T	8.68 kA@6.75 T #2	4.75 kA@6.75 T #2
Wire / tape shape	0.59 mmφ, $d_f = 3.5 \mu\text{m}$	2 mm × 0.057 mm, $n_f = 10$	
Number of wires / tapes	7 × 11 = 77	66 in 13 layers	91 in 20 layers

#1 Before striation

#2 Assuming 25% reduction of critical current due to striation

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2023 年春) (3) : 結合時定数の温度依存性

## Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (3): Temperature dependences of coupling time constants

曾我部 友輔, 藤田 寛和, 祖父江 卓哉, 重政 茉於, 李 陽, 高橋 明, 雨宮 尚之 (京大)

SOGABE Yusuke, FUJITA Hirokazu, SOBUE Takuya, SHIGEMASA Mao, LI Yang, TAKAHASHI Akira, AMEMIYA Naoyuki  
(Kyoto U.)

E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

SCSC ケーブルの電磁的特性を示す重要なパラメータの一つに、フィラメント間の常伝導部を跨がって誘導される結合電流の減衰時定数 (以後、結合時定数と呼ぶ) が存在する。SCSC ケーブルにおける結合時定数はフィラメント間の常伝導抵抗に反比例することが知られており、SCSC ケーブルの運転温度によって結合時定数が変化すると予想されていた。我々は、SCSC ケーブルを異なる温度で運転した場合の結合時定数を実験的に測定し、その温度依存性を評価した。

### 2. 測定方法

試料に横方向交流磁界を印加し、ピックアップコイルで磁化損失を測定した [1]。磁界振幅を 0.15 mT とし、磁界周波数を 1 kHz から 20 kHz まで変化させることで、ヒステリシス損失の発生を抑制しながら結合損失の周波数依存性を測定した。

測定に使用した交流損失測定システムを Fig. 1 に示す。インサートデューワーに液体ヘリウムを充填し、液体ヘリウムを蒸発させ自然昇温しながら連続的に磁化損失を測定することにより、結合時定数の温度依存性を測定した。測定プロセスの都合上、結合時定数を決定するために必要となる磁化損失の周波数依存性を測定する間に数度の温度上昇が発生するため、各結合時定数の測定温度にエラーバーが存在する。

測定手順としては、試料をピックアップコイルに挿入する前の背景信号を測定後、速やかに試料をピックアップコイルに挿入し測定、その後速やかに試料を取り出し再度背景信号を測定し、試料での測定前後の背景信号の変化が十分小さいデータを採用した。

### 3. 測定試料及び測定結果

異なる銅層厚さのマルチフィラメント線で構成される 1 層 SCSC ケーブルを対象として測定を行った。銅層厚さが 10  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、40  $\mu\text{m}$  の 5 フィラメント、4 mm 幅のマルチフィラメント線を対象とした。コア直径は 3 mm、巻き角度を 55° としてスパイラル化した。

測定された結合時定数の温度依存性を Fig. 2 に示す。低温ほど結合時定数が長く、高温ほど短くなることが確認された。また、20 K 以下の温度領域では結合時定数がほとんど変化していない。これは、結合時定数が銅層の抵抗率に反比例しており、銅層の抵抗率が 20 K 以下ではほとんど変化しないことに起因していると考えられる。また、原理的には結合時定数は銅層の厚さに反比例すると予想されていたが、測定された結合時定数は銅層が厚いほど短くなる傾向はあるものの、完全に銅層の厚さに対して反比例することはなかった。特に、40 K 以上の比較的高い温度領域ではこの傾向が顕著となった。

### 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

- Z. Jiang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 17 (2004) 371

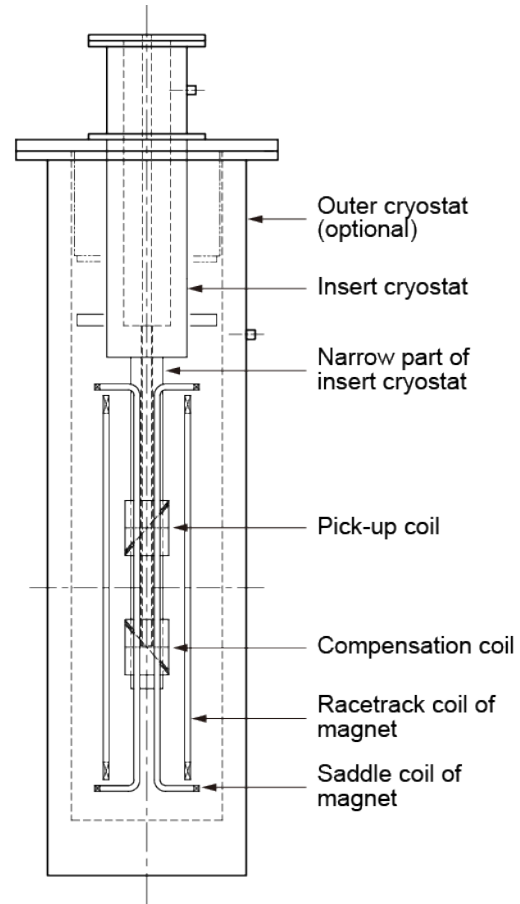


Fig. 1 Schematic of measurement system

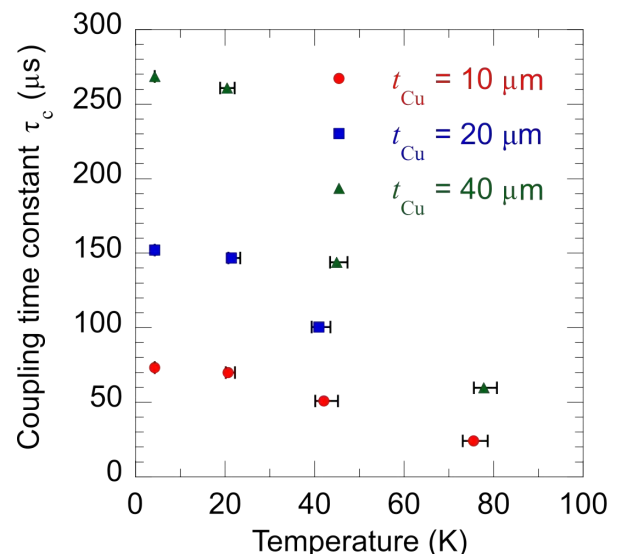


Fig. 2 Temperature dependence of coupling time constant with different thickness of copper plating.



# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年春)(4): 線材の重なりと磁化損失特性

## Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (4): Impacts of coated conductor overlaps on magnetization loss

重政 茉於, 曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之(京大)

SHIGEMASA Mao, SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は SCSC ケーブルと名付けられた、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の開発を行っている。SCSC ケーブルでは、Fig. 1 に示すように、銅複合多芯薄膜線材をコアの周りに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て結合時定数を小さくして、フィラメントの結合を抑制している[1]。SCSC ケーブルでは、異なる層の線材どうしが Fig. 2(a)に示すように交差状に、あるいは Fig. 2(b)に示すように平行に重なっている。これらのような線材どうしの重なりは、各線材に対する磁束の侵入のしかたを変化させ、結果として SCSC ケーブルの磁化損失特性に影響を与える可能性がある[2, 3]。本発表では、線材の重なりが磁化損失特性に与える影響を調べるため、短尺直線状の銅複合多芯薄膜線材を交差状あるいは平行状に積み重ねたものの磁化損失を測定し、その結果を報告する。

### 2. 試料と実験方法

長さ 5 mm の短尺直線状の銅複合多芯線材を、以下の三通りの並べ方で配置した試料について、磁化損失を測定する。

- (A) Fig. 3(a)に示すように、同一平面上で線材片を一直線状に平行配置する。  
 (B) Fig. 3(b)に示すように、(a)と同様に並べたものを交差状に 8 層積み重ねる。  
 (C) Fig. 3(c)に示すように、(a)と同様に並べたものを平行状に 8 層積み重ねる。

線材幅  $w_t$  は 2 mm、フィラメント幅  $w_f$  は 0.2 mm、銅層厚さ  $t_{Cu}$  は 10  $\mu\text{m}$  である。試料は液体窒素で浸漬冷却し、同一平面上に並べられた線材に対して垂直な方向から横方向の交流磁界を印加し、磁界変化の一周期あたりの磁化損失  $Q_m$  (J/m)を測定する。

フィラメントがほとんど結合していない場合、結合損失は周波数に比例するとみなすことができ、磁化損失は次式のように表すことができる。

$$Q_m = Q_h + Q_c = Q_h + kf \quad (1)$$

$f$  は周波数であり、 $Q_h$  はヒステリシス損失に、 $Q_c$  は結合損失に相当する。本発表では、上記(A)、(B)、(C)の並べ方で線材を配置した試料のそれぞれについて、測定された磁化損失  $Q_m$  より、最小二乗法を用いて式(1)にフィッティングし、ヒステリシス損失と結合損失に分離する。各種の試料のヒステリシス損失と結合損失をそれぞれ比較し、線材どうしの重なりがヒステリシス損失および結合損失に与える影響をそれぞれ報告する。

### 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。

### 参考文献

- [1] N. Amemiya et al., “Effective reduction of magnetization losses in copper-plated multifilament coated conductors using spiral geometry,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no.2 (2022), Art. no. 025003, doi: 10.1088/1361-6668/ac3f9c  
 [2] M. Shigemasa et al., “Progress of R&D of SCSC cable in

fall 2022 (2): Magnetization loss measurements of SCSC cable with various number of layers,” Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022), 3A-p02

- [3] M. Shigemasa et al., “Impact of number of layers on magnetization losses of spiral copper-plated multifilament coated conductors,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Early Access, doi: 10.1109/TASC.2023.3266420

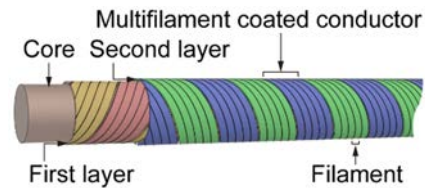


Fig. 1 Schematic view of the SCSC cable [1].

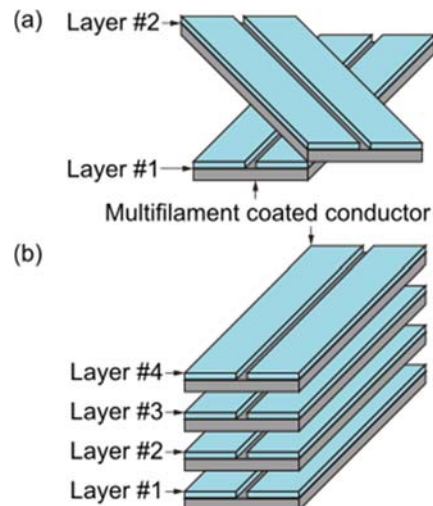


Fig. 2 Overlaps of multifilament coated conductors of different layers in SCSC cable; (a) coated conductors in adjacent layers crossing each other, and (b) coated conductors in four layers stacked in parallel.

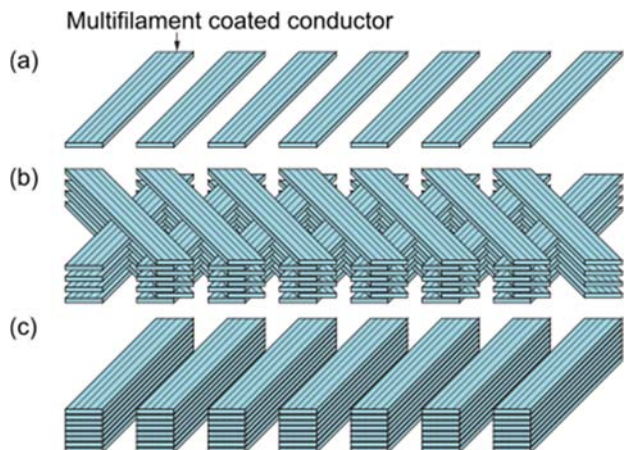


Fig. 3 Arrangements of multifilament coated conductors of each sample; (a) single layer, (b) 8 layers crossing one another, and (c) 8 layers stacked in parallel.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年春)(5): 熱暴走過程におけるフィラメント間の電流分流の測定

## Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (5): Measurements of current sharing among filaments during thermal runaway process

曾我部 友輔, 許 光輝, 李 陽, 雨宮 尚之 (京大)  
SOGABE Yusuke, XU Guangwei, LI Yang, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. Introduction

Local defects are unavoidable in a coated conductor. If a local defect exists in a filament of a multifilament coated conductor, the current is shared (detours) by other filaments through the copper layer overlaid on the entire multifilament. However, this bypassing current through the copper layer might generate additional Joule heat during the thermal runaway process and might affect protection characteristics as well as the threshold current of thermal runaway. In this study, we measured the voltages in longitudinal (both sides of a coated conductor) and transverse directions on a spiral multifilament coated conductor with local defect during the thermal runaway process.

### 2. Experimental sample and method

We conducted the experiment using a 4-mm-wide coated conductor spirally wound on a 3-mm-diameter GFRP core in our conduction-cooling experimental platform [1]. The coated conductor used in this study was a copper-plated multifilament coated conductor SC2030 manufactured by SuperPower Inc. The thickness of the copper layer was 20  $\mu\text{m}$ , and the number of filaments was five. We artificially created a local defect near one side of the multifilament coated conductor by using a fine drill bit. The position of artificial defect and voltage taps are shown in Fig. 1. The total length of the coated conductor was 230 mm, and the length of the effective section of the spiral multifilament coated conductor (the section between two current terminals) was 100 mm.

### 3. Experimental results

The  $V$ - $I$  characteristics of the multifilament sample with local defects are shown in Fig. 2. As shown in Figs. 2(a) and (b), the longitudinal voltage  $v_{a3-4}$  between taps a3 and a4, which were close to the local defect, was higher than the longitudinal voltage  $v_{b3-4}$  on the opposite side. In other words, the conductor was not equipotential in width direction. The voltages in the transverse direction  $v_{i3}$  and  $v_{i4}$  shown in Fig. 2(c) suggest that transverse currents flowed from a3 to b3 and from b4 to a4 through the copper layer. The sample currents at which the electric fields between a3-a4 and b3-b4 reached 100  $\mu\text{V}/\text{m}$  were about 13 A and 75 A, respectively.

When we applied 120 A, which is about 75 % of the critical current of the sample without local defect, thermal runaway was initiated. Results of the voltages and current of the sample during thermal runaway process are shown in Fig. 3. Thermal runaway initiated approximately 200 s after the current reached 120 A. The transverse voltages ( $v_{i2}$ ,  $v_{i3}$ ,  $v_{i4}$ ,  $v_{i5}$ ) shown in Fig. 3(b) suggest that before thermal runaway was detected, the transverse current flowed through the copper layer in the multifilament sample.

### Acknowledgments

This work was supported in part by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1 and in part by JSPS KAKENHI Grant Number JP22H00142.

### Reference

[1] X. Luo, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29 (2019) 4703511

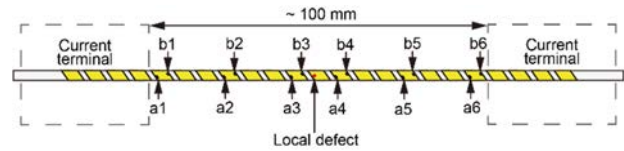


Fig. 1 Positions and geometry of voltage taps attached at the edges of the sample ( $a_i/b_i$ : voltage tap).

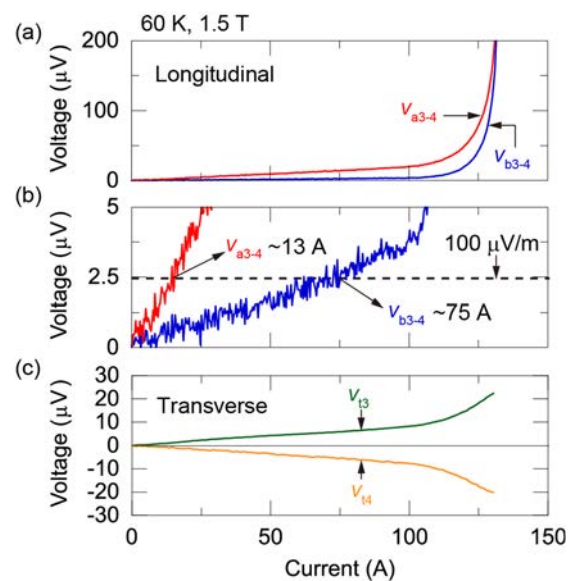


Fig. 2 Voltage-current characteristics of the sample with local defect at 60 K, 1.5 T. (a) Voltages on longitudinal direction. (b) Voltages on longitudinal direction (enlarged). (c) Voltages on transverse direction.

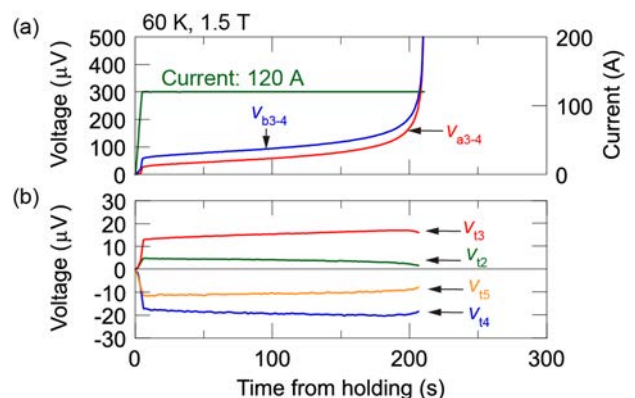


Fig. 3 Voltages and current of the sample with local defect at 120 A, 60 K, 1.5 T (thermal runaway initiated). (a) Voltages and current on longitudinal direction. (b) Voltages on transverse direction.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2023 年春)(6): ケーブルクエンチ解析手法の構築

## Progress of R&D of SCSC cable in spring 2023 (6): Development of quench simulation method for SCSC cable

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[1]。我々は、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。本解析では、SCSC ケーブルにおいてクエンチもしくは熱暴走が発生した後の保護過程における現象を可視化して解析することを目的とする。

### 2. これまでの銅分流層複合マルチフィラメント高温超伝導線を対象としたクエンチ解析

我々は銅分流層複合マルチフィラメント高温超伝導線中の温度分布や電流分布を可視化するための熱-電磁界連成解析を構築し、実験との比較を行ってきた。この結果、クエンチ・熱暴走発生後の銅分流層複合マルチフィラメント高温超伝導線内の幅・厚さ方向の温度分布はほぼ存在せず、長手方向のみを考慮すればよいことが明らかになった。また、コアなどの隣接する物体への熱伝導が、クエンチ・熱暴走現象に重要な影響を与えていることが確認された[2]。

### 3. SCSC ケーブルのクエンチ解析手法

これまでの知見を踏まえ、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する。

この手法では、それぞれの超伝導線における長手方向温度分布を以下の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。

$$S \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{l,j} \frac{\partial T_j}{\partial x} \right) - P q_{cl} + g_n S + g_{t,jj'} + p_{ds,j} - p_{cn,jj'} \\ = S c_j \frac{\partial T_j}{\partial t}$$

$x$ は超伝導線またはコアの長手方向、 $T_j$ は $j$ 番目の超伝導線またはコアの温度、 $S$ は超伝導線またはコアの断面積、 $k_l$ は超伝導線の厚さ方向の平均熱伝導率、 $P$ は冷却周長、 $q_{cl}$ は冷媒への熱伝達、 $g_n$ は超伝導線におけるジュール発熱、 $g_{t,jj'}$ は $j$ 番目と $j'$ 番目の超伝導線間の接触抵抗による発熱、 $p_{ds,j}$ は $j$ 番目の超伝導線における単位長さ当たりの熱擾乱、 $p_{cn,jj'}$ は $j$ 番目の超伝導線から $j'$ 番目の超伝導線への熱伝導、 $c$ は超伝導線またはコアの平均比熱である。

回路方程式においては、各超伝導線を直列接続された非線形抵抗として表す。熱伝導方程式及び回路方程式においては、超伝導線は互いに部分的に接触しているとし、局所的に電気的接触抵抗が存在しているとする。これらの接触点を節点 (Fig. 2) とし、Fig. 3 に示すような一次元線要素の回路ネットワークを構成することができる。Fig. 2 では 1 層当たり 2 本の超伝導線で構成される 2 層 SCSC ケーブルの場合の節点の位置を例示している。 $\varphi$  はケーブル周方向座標、 $x$  はケーブルの長手方向座標である。Fig. 3 において、 $R_{cc,j}$  は $j$ 番目の超伝導線に対応する非線形抵抗であり、 $R_{core}$  はコアの抵抗である。 $R_{core-cc}$ 、 $R_{cc-cc}$  はそれぞれコアと最内層の超伝導線間の接触抵抗、超伝導線間の接触抵抗を表す。Fig. 3 に示した図で

は簡単のために各層に含まれている超伝導線のうち Fig. 2 における Tape 1 のみを示している。

なお、金属コアについては、最内層に存在する超伝導線との間に連続的な接触抵抗が存在しているとし、超伝導線と同様に線要素の直列接続としてモデル化する。熱伝導率及び電気抵抗率については、超伝導線のスパイラル構造とコアの直線形状の差異を考慮するため、節点間の実効的な距離の差を踏まえて調整する。

発表では、典型的な SCSC ケーブルを対象としたクエンチ解析結果を示し、保護特性などについて検討する。

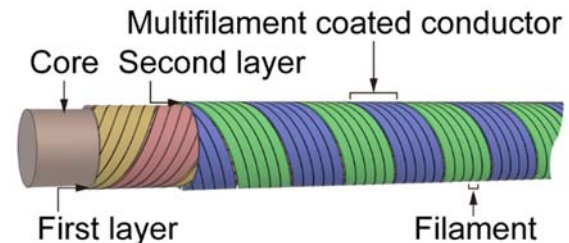


Fig. 1 Schematic of a multilayered SCSC cable [1]

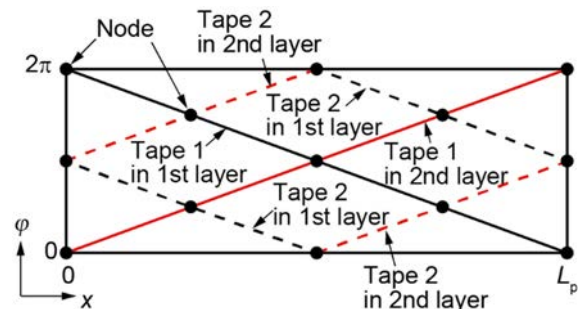


Fig. 2 Schematic of position of nodes in case of a SCSC cable which has 2 layers and 2 tapes per layer.

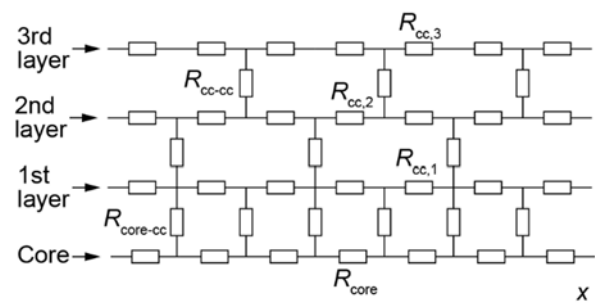


Fig. 3 Schematic of network in the model. Only tape 1 in each layer in Fig. 2 is shown.

### 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. J. Shen, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 33 (2023) 4700405

1 kA 級パルス電流を用いた REBCO 線材における  $I_c$  の磁場・温度依存性の測定Measurement of field and temperature dependence of  $I_c$  in REBCO tapes using 1 kA-class pulsed current

土屋 雄司(東北大); 水野 謙一郎(MTL); 小濱 芳允 (東大); Alexandre Zampa, 岡田 達典、淡路 智(東北大)  
 TSUCHIYA Yuij (Tohoku Univ.); MIZUNO Kenichinro (MTL); KOHAMA Yoshimitsu (Univ. Tokyo);  
 Alexandre ZAMPA, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)  
 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、高温域応用に向けて精力的に研究がなされてきた。近年、NMR などの応用にて 4.2 K、20 T 以上の低温超強磁場や、20 K 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、各メーカーの開発により、想定運転領域での線材の臨界電流  $I_c$  が向上しており、素線に対して 1,000 A 超の大電流通電試験が必要である。これらの線材の  $I_c$  測定には、微小ブリッジ法[1]、パルス通電法[2]などが提案されているが、低温強磁場の限られた空間・冷却能力での大電流通電が課題である。これまで我々のグループでは、500 A 級のパルス電源と超伝導マグネットを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[3]。しかし、4.2-20 K での REBCO 線材の  $I_c$  は 500 A を超えており、電流量の増強が必要であった。

本研究では、パルス電源を並列化することにより電流量を 1 kA に増強し、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

電圧 10 V および電流 1,000 A 容量のパルス電流源、高精度データアキュイジションシステム(横河計測 DL950)、クランプ型低インダクタンス測定プローブ[3]を用いて、フジクラ社製 REBCO 線材(FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、Cu 安定化層厚 40  $\mu\text{m}$ )の  $I_c$  を測定した。この試料は、東北大において 30 T 超の無冷媒超伝導マグネットの開発に使用している線材と同様である[4]。パルス電流のパルス幅は 5 ms、電流掃引速度は 1 A/ $\mu\text{s}$ 、電圧端子はプリント基板圧着によって設置し、電圧間距離は 6 mm とした。20 T 無冷媒超伝導マグネット、He フロークライオスタットを用いて低温強磁場(4.2-77 K、0-19 T)の環境で測定を行なった。測定プローブの電流リードは、振動による誘導起電力が発生しないよう、セミリジッド同軸ケーブルを使用した。

## 3. 実験結果及び考察

図 1 に、20 K におけるパルス通電中の電流および電圧波形の典型的な実験結果を示す。電流掃引時は、誘導起電力が発生し、その後一定電圧に漸近した。図 1(a)では、時定数 ms 程度の電圧の緩和が見られた。これは、REBCO 層および Cu 安定化層内に磁束が侵入し、電流分布が変化する過渡現象により誘導起電力が発生したためと考えられる[5]。一方、図 1(b)に示すように高磁場中では電圧の緩和が見られず、高温でも同様に見られなかった。また、強磁場中では電圧ノイズが数  $\mu\text{V}$  程度であったため、1  $\mu\text{V}$  以下の測定精度に達するまで繰り返し積算した。図 2 に、4.2-77 K での  $I_c$  の磁場依存性を示す。広範囲の磁場・温度域で  $I_c$  が得られた。

当日は、微小ブリッジおよび DC 電流を用いた  $I_c$  測定の結果との定量的比較についても報告する予定である。

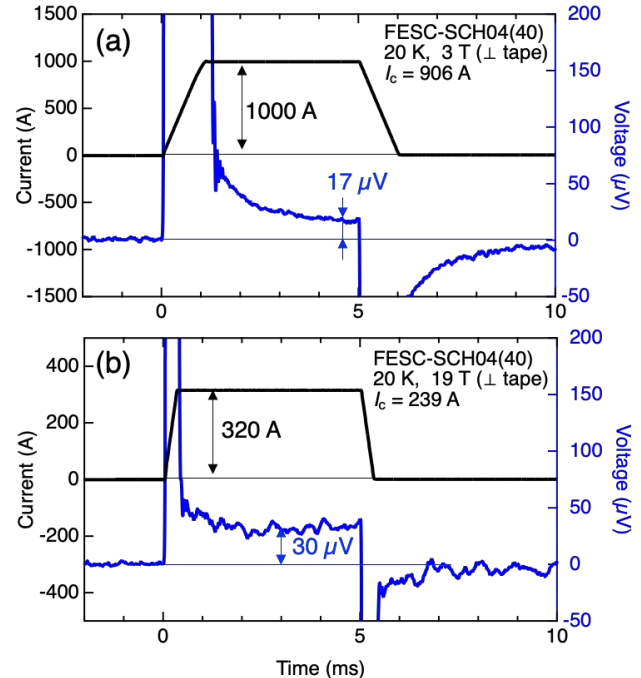


Fig. 1 Current and voltage waveforms in REBCO tapes during pulsed current at (a) 20 K, 3 T and 1,000 A and (b) 20 K, 19 T, 320 A.

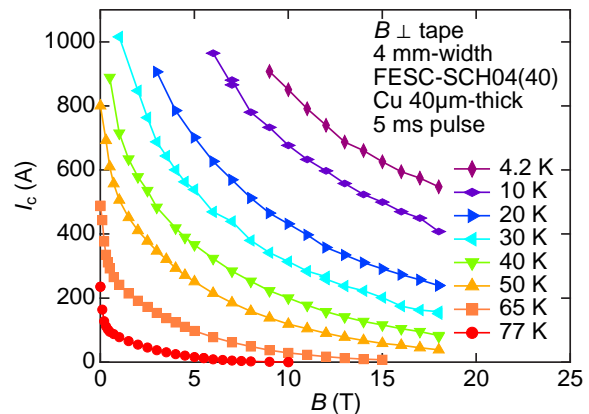


Fig. 2 Field dependence of the critical current density in the REBCO tape (Fujikura, FESC-SCH04(40)) at 4.2-77 K.

## 謝辞

本研究の一部は、名大-鈴木商館の共同研究、科研費(20K15217, 22H00104, 22H01522)、NEDO の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。

## 参考文献

- [1] S. Fujita *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 18466670 (2019).
- [2] F. Sirois *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23**, 034018 (2010).
- [3] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. in press.
- [4] K. Takahashi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 4601405 (2023).
- [5] S. Richard *et al.*, J. Appl. Phys. **126**, 023902 (2019).

# 磁気計測による積層 REBCO テープの $E-J$ 特性評価

## Evaluation of $E-J$ characteristics of multi-stacked REBCO coated conductors by magnetization measurements

呉 澤宇, 鄭 依城, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)  
 WU Zeyu, ZHENG Yicheng, 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電流輸送特性は重要な指標であり、一般的に四端子法と磁気的手法を用いて評価されてきた。我々は、先行研究において、着磁したREBCO線材の磁気計測より素線の電界—電流密度 ( $E-J$ ) 特性を非破壊・非接触に計測できることを報告した[1]。本方法により、四端子法の適用が難しくなる高 $I_c$ 領域も計測可能であることを示している。本研究では本手法をさらに積層したREBCO線材の評価に適用し、 $E-J$ 特性の導出について検討した。磁化電流 $J$ の導出に膜厚方向の均一性を仮定する妥当性と共、電界 $E$ に積層厚みの違いによる鎖交磁束の補正を検証し、磁気計測によるREBCO積層導体 $E-J$ 特性の導出法を明らかとした。核融合炉や加速器応用分野では素線を積層した大容量の導体開発が進んでおり、本方法は、そういった大容量導体の評価手法としての適用が期待できる。

### 2. 実験方法

積層枚数2, 4, 6, 8のREBCO高温超伝導導体を作製した。液体窒素温度において、走査型ホール素子磁気顕微鏡 (SHPM) を用いて試料直上の磁場分布 ( $B_z$ ) の緩和特性および、磁気特性測定システム (MPMS) で試料全体磁気モーメント ( $m$ ) の緩和特性を測定した。積層枚数2と4の試料において四端子法により $I-V$ 特性を測定した。

$B_z$ 分布に対し膜厚方向の均一性を仮定しBiot-Savart則の逆問題[2]により $J$ を求めると共に、ファラデー則により $E$ を求めた。 $m$ に対し、SHPMで得られた空間情報をもとに $J$ ならびに、形状補正係数を考慮し $E$ を導出した[1]。

### 3. 結果と考察

図1では四端子法とSHPMによる $E-J$ 特性を比較した。測定法によって電界基準の違いはあるものの、SHPM測定において膜厚方向の均一性を仮定し $J$ を導出する結果が合理的であると見受けられる。図2ではSHPMによる形状補正係数 $G$ の実測値と理論値[3]を比較した。厚み $d$ を試料全体の厚みと定義し、解析的に得られた $G$ の定量性を確認できた。 $G$ を用いて $m$ の緩和特性から導出した $E-J$ 特性と、SHPMで導出したものを図3で比較した。両者が良く一致することが分かる。また、今回の試料に対して磁気計測により最大400 A以上の電流特性を非破壊・非接触評価することになる。

### 4. まとめ

高温超伝導体積層導体の電流輸送特性評価に磁気計測手法を適用し、 $E-J$ 特性の導出法を明らかした。高 $I_c$ 領域での応用も可能であると考えられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617, JP22K20430 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] 呉 ほか, 2022 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会, 3B-a07.
- [2] Bradley J. Roth, Nestor G. Sepulveda, and John P. Wikswo Jr., *Journal of Applied Physics* 65, 361 (1989).
- [3] Z. Wu, et al., *IEEE TAS*, 32, 4 (2022).

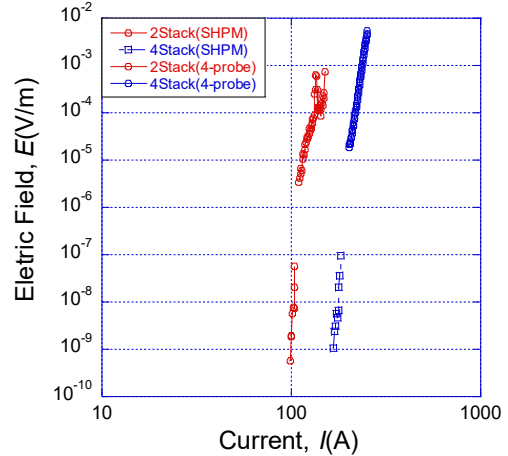


Fig. 1. Comparison of  $E-J$  characteristics by four-probe method and SHPM for 2- and 4-stack REBCO samples.

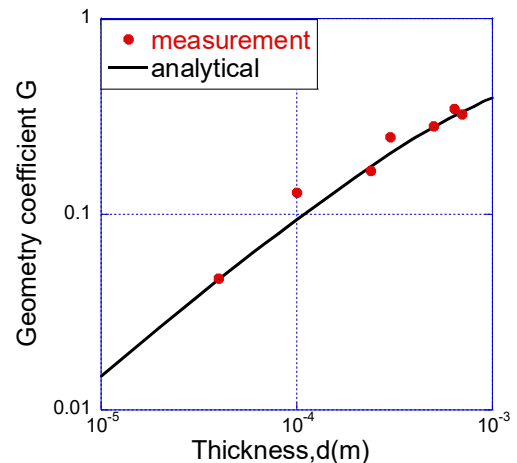


Fig. 2. Comparison of geometry coefficient  $G$  between measurements by SHPM and analytical results.

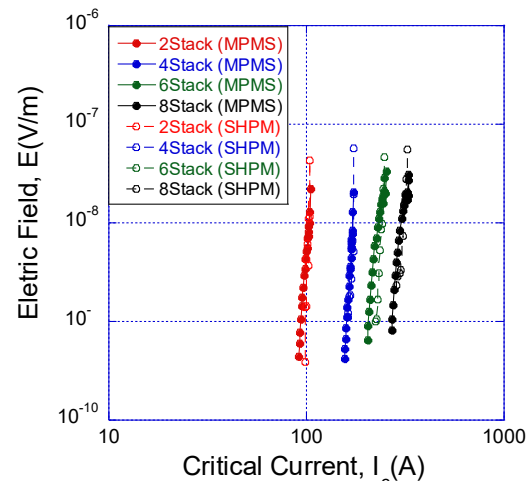


Fig. 3. Comparison of  $E-J$  characteristics by MPMS and SHPM.

# ねじりにより臨界電流が低下した REBCO 線材の面内臨界電流密度分布 In-plane $J_c$ distribution of REBCO coated conductor with reduced $J_c$ due to twist

井上 昌睦, 久我 響暉, 古賀 大揮, 塚原 柊弥, 中山 泰輔(福岡工大); 山田 穰(中部大)

INOUE Masayoshi, KUGA Hibiki, KOGA Daiki, TSUKAHARA Toya, NAKAYAMA Taisuke (Fukuoka Inst. Tech.);  
YAMADA Yutaka (Chubu Univ.)

E-mail: ms-inoue@fit.ac.jp

## 1. はじめに

我々は希土類系高温超電導 (REBCO, RE = Rare Earth) 線材のねじり依存性について調べている。前回は、幅 4mm と 2mm の 2 種類の線材に対して、臨界電流 ( $I_c$ ) のねじり角度依存性を調べた結果について報告した[1]。今回は、ねじりにより  $I_c$  が低下した REBCO 線材の面内の臨界電流密度 ( $J_c$ ) 分布について調べたので報告する。

## 2. 実験

基板 (Hastelloy, 50  $\mu\text{m}$ )、中間層 ( $\text{CeO}_2 / \text{LaMnO}_3 / \text{MgO} / \text{Y}_2\text{O}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ )、超伝導層 ( $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , 1  $\mu\text{m}$ )、安定化層 (Ag, Cu) で構成されている幅 4mm の REBCO 線材を、長さ 120mm 程度切り出して、ねじり試験用の試料とした。試料は電流端子を兼ねた銅ブロックで把持されており、この銅ブロックの片端を固定したまま他端を回転させることにより、試料にねじりを印加している。

ねじり角度を増加させながら直流 4 端子法にて  $I_c$  測定を行った。初期  $I_c$  の 30% 程度まで低下したところで測定を終了し、走査型ホール素子磁気顕微鏡 (SHPM) により補足磁場分布の計測及び面内  $J_c$  分布の解析を行った。

## 3. 実験結果及び考察

ねじり試験で得られた  $I_c$  のねじり角度依存性を Fig. 1 に示す。初期  $I_c$  は 187A で、ねじり角度 180°程度までは  $I_c$  の低下は観察されなかったが、その後ねじりに対して急激に  $I_c$  が低下し、500°までねじったところ  $I_c$  は 50A まで低下した。

500°までねじった線材を装置から取り出した後、20mm 程度を切り出して SHPM による補足磁場分布測定を行った。ねじり試験後の REBCO 線材は Fig. 2 のように塑性変形している。そのため、SHPM による補足磁場分布測定の際は、平らな状態に戻した後、銅ステージ上にエポキシ樹脂で固定した。

補足磁場分布及び面内  $J_c$  分布の結果を Fig. 3 に示す。図の  $x$  軸方向が線材の長手方向となっている。両図より、線材幅方向に対して斜めに、線材を完全に分断する欠陥が生じていることが分かる。20mm 長内で 2 つの大きな欠陥が観察されているが、この間隔はねじりのピッチよりも短い。同線材においては線材幅方向の端部において斜めのマイクロクラックが存在していることが確認されていることから、それらが起点となった欠陥であると考えられる。なお、これらの欠陥が線材幅方向を完全に分断するに至った原因としては、塑性変形した線材を平らに戻したことによる寄与も含んでいると考えている。

## 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。

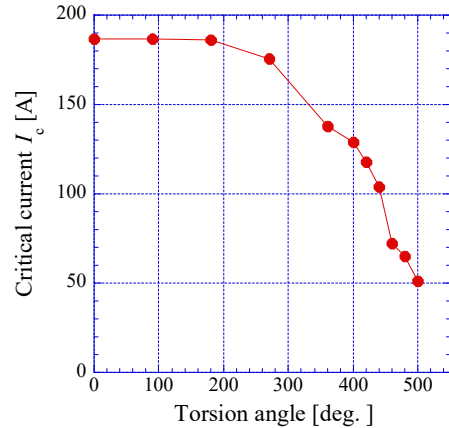


Fig. 1. Torsion angle dependence of  $I_c$  at 77K.



Fig. 2. Photograph of a 4mm-width REBCO coated conductor after  $I_c$  vs torsion angle measurement.

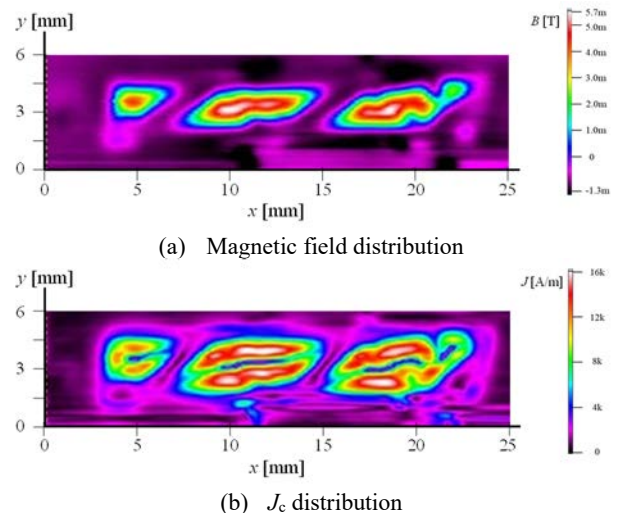


Fig. 3. Magnetic field distribution and critical current density distribution measured by scanning Hall-probe microscopy

## 参考文献

1. Y. Tanaka, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 51

# REBCO テープの縦曲げにおける曲げ歪分布と破断挙動

## Strain distribution and fracture in edgewise bending of REBCO tapes

長村光造(応用科研); 町屋修太郎(大同大)  
 OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ)  
 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、それに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。そこで本報告では REBCO テープにおける臨界電流の曲げ歪依存性の定量的な測定方法についての検討結果を報告する。

平曲げの場合には歪がゼロとなる中立面に向けて内向き、外向きに曲げるにより薄い超電導層には各々引張曲げ歪、圧縮曲げ歪が印加される。一方縦曲げの場合には図1に示すように最大の引張曲げ歪( $\epsilon_b$ )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。

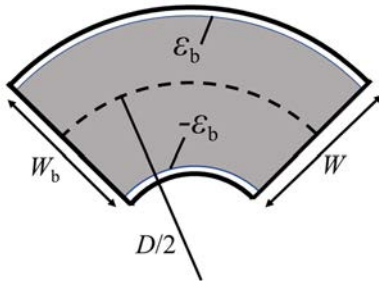


Fig. 1 Edgewise bending within REBCO tape plane

本報告では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 REBCO テープを縦曲げし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。解析の結果によれば引張破断と圧縮破断では破断モードが異なるが、曲げ条件により種々の破断モードが起こることが明らかになったので報告する。

### 2. 実験方法

本報告では超電導層が電流方向に対して  $\langle 110 \rangle$  に配向した Fujikura 製の REBCO テープについての実験結果を報告する。テープは薄いので直接縦に曲げるのは難しいため、brass4角棒(断面が幅4mm, 厚さ2mm)に貼り付け、その棒を所定の直径の治具に押しつけ図1のように縦曲げを行った。直径の異なる各テープについて77K で臨界電流測定を行うとともに、同等のテープについて室温で応力-歪線図を求めた。Spring8 BL19B2で単色 X 線(波長0.01769nm)を用いて精密格子定数測定を行った。

### 3. 実験結果と考察

臨界電流の曲げ半径依存性については前年度に一部報告したが[1]、さらにそれらの曲げ歪依存性について詳しい解析を行った。図2に  $\langle 110 \rangle$  配向した特性の異なる2種類のテープについて、引張平曲げと縦曲げしたときの規格化された臨界電流の最大曲げ歪( $\epsilon_b$ )依存性を示す。ここで平曲げの場合には曲げ歪に対して急激に減少するが、縦曲げの場合には

は徐々に臨界電流が減少する。これは図1からも見られるように曲げ歪がゼロに近い領域があるため、臨界電流はゼロにならないと考えられる。

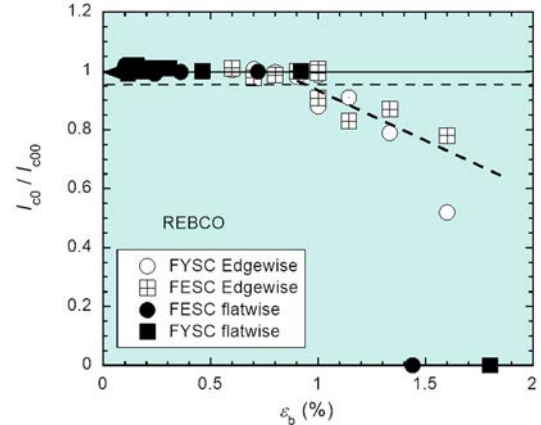


Fig. 2 Edgewise and tensile flatwise bending dependence of critical current

そこでテープ内に発生する歪と臨界電流の変化について考察を行った。図3に示すように圧縮曲げ歪から引張曲げ歪まで連続に内部歪は変化する。さらに複合体であることから REBCO 超電導層には二次元的な圧縮歪(熱歪)が生成している。結果的に点線で示すような歪分布が予想される。つまり図1に示す幾何学的な最大引張歪( $\epsilon_b$ )より熱歪が相殺された歪状態にあると考えられる。一方圧縮歪が最大( $-\epsilon_b$ )になる極限では、さらに熱歪が重畳していると考えられる。図2に示す臨界電流の減少の開始は引張破断によるのか、最大せん断圧縮破断あるいは座屈に拠るのかについて考察を行った。

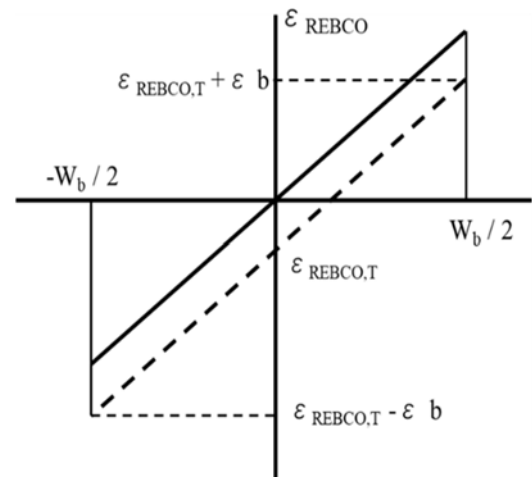


Fig. 3 Strain distribution within the plane due to the edgewise bending

最後に試料を提供して頂いた(株)フジクラに謝意を表します。

[1] K. Osamura, S. Machiya and S. Yamane: Abstracts of CSSJ Conference Vol 104 (2022) 145

## Bi2223 線材における臨界電流特性と不定比化学組成

## Relationship between nonstoichiometric chemical composition and critical current properties of Bi2223 tapes

下山 淳一、宮本 能伸、公平 龍之介、元木 貴則(青学大); 武田 宗一郎、中島 隆芳、山崎 浩平(住友電工)  
 SHIMOYAMA Jun-ichi, MIYAMOTO Yoshinobu, KOHEI Ryunosuke, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.);  
 TAKEDA Soichiro, NAKASHIMA Takayoshi, YAMAZAKI Kouhei (Sumitomo Electric Industries, Ltd)  
 E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

**1. はじめに** 2004年に加圧焼成法を量産プロセスに適用して開発されたBi2223線材(DI-BSCCO)は、Bi2223フィラメントの緻密化によって、寒剤の侵入、酸化による破損のリスクがなく、臨界電流特性の再現性、均一性に優れることが特徴である。つまり、臨界電流特性の改善に向けた仕込組成の調整、焼成条件の最適化を系統的に進めることができるようになり、比較的早期に工学的臨界電流密度( $J_c$ )が200 A/mm<sup>2</sup>を超える長尺線材の量産体制が整った。これらの線材は、送電ケーブルや様々な超伝導磁石に利用されているが、Bi系超伝導体の本質的に大きな電気的磁氣的異方性に由来した磁場中での $J_c$ の低下によって、超伝導磁石応用の温度、磁場条件が制限される。液体ヘリウム温度では20 T以上の強磁場発生に用いることができるが、MRIや汎用NMRなど広範な応用が期待される中温域(20~40 K)、数~10 T級の超伝導磁石システムへの利用には、一層の臨界電流特性の改善が必要である。

我々はこれまで、Bi2212単結晶で確認されていた、酸素アニールによるキャリアのオーバードープ状態の実現とPb置換量増加によるキャリアドーブと構造平坦化による電気的磁氣的異方性の低下による臨界電流特性改善指針が、Bi2223多結晶においても有効であることを示してきた。さらに最近、仕込金属組成を変えた線材開発に取り組みはじめ、Pb組成比だけでなくSr, Ca, Cuの組成比を制御した線材における相生成挙動と臨界電流特性に調べたところ、1次焼成段階でのBi2223相分率を適度に高くすることができれば、金属組成制御の臨界電流特性に対する効果が顕著なることを明らかにした<sup>[2]</sup>。このように金属組成を系統的にかつ大きく変えたBi2223線材の研究例は少なく、本研究ではこれらの線材に対する酸素アニール効果を含めて、さらなる臨界電流特性改善の指針をより明確にすることを目指している。

**2. 実験** 仕込金属組成が異なる4種の121芯銀シースBi2223二次圧延線材に対して、酸素分圧3 kPa下で二次焼成、同1 kPa下、755°Cでポストアニールを行い炉冷した。得られた短尺線材試料の超伝導特性をSQUID磁束計を用いて評価したあと、酸素気流中350°Cから250°Cまで徐冷し、再度、超伝導特性を調べた。

**3. 結果と考察** 以下では $X = \text{Pb}/(\text{Bi}+\text{Pb})$ 、 $Y = (\text{Sr}+\text{Ca}+\text{Cu})/(\text{Bi}+\text{Pb})$ を仕込金属組成比の指標として用いる。Fig. 1に4種の線材の仕込Pb置換量とEPMAにより分析したPb置換量の関係、および77 K、自己磁場下での工学的臨界電流密度( $J_c$ )を示した。やや酸素分圧で焼成した効果で $X = 0.197$ のPb-rich線材においても分析組成は仕込組成通りであり、もう少し高濃度のPb置換が実現すれば、Bi2212単結晶のようなPb濃度の異なる2相分離によりピンニング力の飛躍的な向上<sup>[1]</sup>が期待できる。また、77 Kの $J_c$ はYが極端に大きい試料を除いてほぼ同じである。特に $X =$

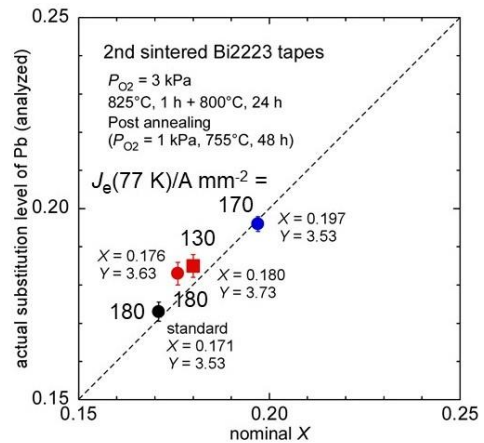


Fig. 1 Relationship between nominal  $X$  and analyzed  $X$  for Bi2223 tapes. Their  $J_c$  values at 77 K are also shown.

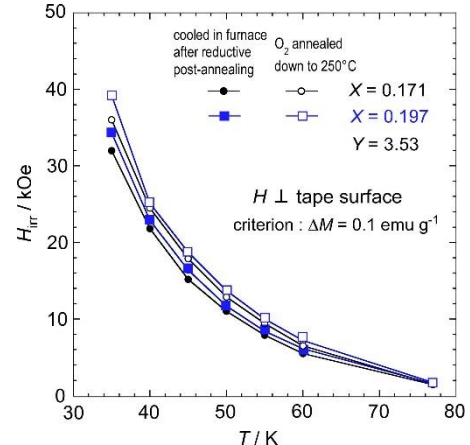


Fig. 2 Changes in irreversibility lines of Bi2223 tapes with different Pb composition by post-annealing.

0.197,  $Y = 3.53$ の試料は20~40 K磁場中の磁化ヒステリシスの幅が他の線材よりも明らかに大きく、中温域、磁場中での高 $J_c$ 線材の開発が期待できる。なお、これらの試料は最後に還元雰囲気下で冷却されたためキャリアの弱いアンダードーブ状態にある。Fig. 2に $X=0.171$ ,  $0.197$  ( $Y = 3.53$ )の試料について、酸素アニールによりキャリアのオーバードープ状態に制御した前後の不可逆曲線の変化を示した。Pb置換量の増加と酸素アニールによる不可逆磁場の改善が確認でき、一連の試料の磁化ヒステリシス幅温度、磁場依存性の解析も進めている。当日は磁場中 $J_c$ 改善に有効なキャリア濃度制御指針についても議論する

## 参考文献

1. I. Chong *et al.*, *Science* **276** (1997) 770-773.
2. Y. Miyamoto *et al.*, *Abstract of CSSJ Conf.* **104** (2022) 139.



# BaHfO<sub>3</sub> ナノ粒子を用いたフッ素フリーMOD REBCO 線材の作製

## Fabrication of fluorine-free MOD REBCO tapes with BaHfO<sub>3</sub> nanoparticles

吉原 健彦, 本田 元気, 永石 竜起, 小林 慎一(住友電工);  
蟹江 澄志(東北大,SRIS); 岡田 達典, 淡路 智(東北大,金研)

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

KANIE Kiyoshi (Tohoku Univ., SRIS); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ., IMR)  
E-mail: yoshihara-tatsuhiko@sei.co.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (REBCO) 薄膜の作製方法の中で、有機金属塗布熱分解法(MOD 法)は真空装置を必要とせず、高い原料収率が実現できる手法である。中でもフッ素フリーMOD(FF-MOD)法は、良好な2軸配向膜を短時間で得ることができるため[1, 2]、低コストな量産線材を実現可能とする工業的に優れた製法と考えられる。一方で、FF-MOD法を用いた人工ピン導入に関する報告はあるものの[2, 3, 4]、超電導層厚みが1 μm以下であることや、主に単結晶基板上的実験に留まっており、長尺線材への適用は進んでいなかった。

我々はBaMO<sub>3</sub> (BMO)ナノ粒子を溶液へ添加する方法および多結晶化熱処理の導入により、FF-MOD法によるREBCO薄膜線材において77 Kの*I<sub>c</sub>*が200 A/4 mm幅を超える120 m長の人工ピン入り線材の作製に成功したことを報告した[5]。今回は主に、添加するBMOナノ粒子の濃度を増加させることで、超電導膜内におけるピン密度が増加し、磁場中特性が向上したことを報告する。

### 2. 実験方法

Ni/Cu/SUSから成る30 mm幅のクラッド基板[6]上に、中間層CeO<sub>2</sub>/YSZ/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をRFスパッタリング法により成膜した。ソルボサーマル法[7]により作製したBMO (M = Zr, Hf)ナノ粒子を添加したフッ素フリーGdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>(GdBCO)溶液をダイコートにより塗布し、酸素雰囲気下で仮焼後、BaCO<sub>3</sub>の分解、超電導の多結晶化を目的とした熱処理を行った後、低酸素雰囲気下にて本焼を行うことで人工ピン入りREBCO層を成膜した。磁場中*I<sub>c</sub>*はマイクロブリッジを形成したサンプルを用いて、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター所有の無冷媒超伝導マグネット20T-CSM,25T-CSMにより評価を行った。

### 3. 実験結果

本報告にて用いたBaHfO<sub>3</sub> (BHO)ナノ粒子は、動的散乱法(DLS)により評価した結果、粒径が1.6~2.2 nmであり[5]、これらを添加してREBCO膜を作製した。BHOを0~5.4 mol%添加して作製したGdBCO膜(膜厚0.8 μm)の65 K, 1 Tにおける*J<sub>c</sub>*の磁場角度依存性をFig. 1に示す。いずれの角度においても、BHO添加量が多いほど高い*J<sub>c</sub>*を示した。Fig. 2に2.7, 5.4 mol%のBHOを添加したGdBCO膜の断面TEMを示す。2-10 nmの粒状のBHOが分布しており、また、添加量を増やすことで超電導膜内のBHO密度が増加したことを確認できる。これらの結果から、添加したBHOがランダムピンとして働き、添加量の増加によりピン密度が増加し、磁場中の特性が向上したと考えている。

### 謝辞

ナノ粒子形成について有意義な議論をしていただきましたInstitut de Ciència de Materials de Barcelona(ICMAB)のProf. Puig, Dr. Obradorsに感謝いたします。また、本成果の一部は、東北大学金属材料研究所における共同研究(強磁場センター課題番号202112-HMKPC-0006)によるものである。

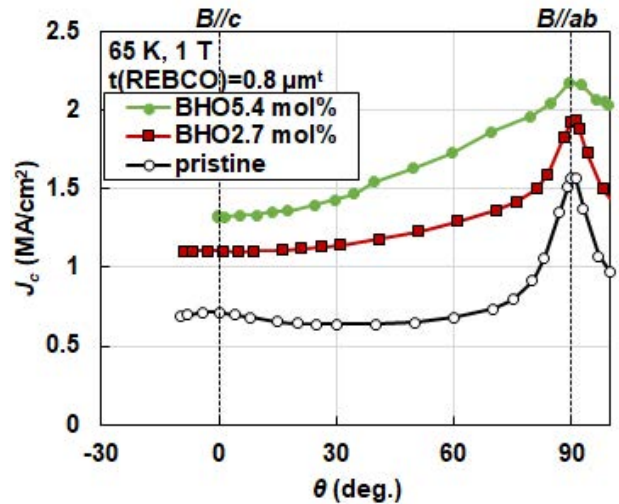


Fig.1 The angular dependencies of *J<sub>c</sub>* in pristine, 2.7 mol% and 5.4 mol% added GdBCO at 65 K and 1 T.

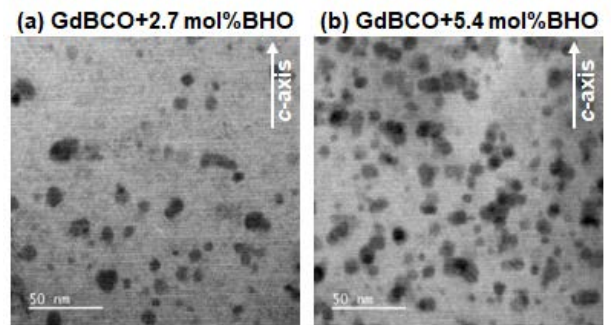


Fig.2 Cross-sectional TEM images of GdBCO films with (a) 2.7 mol% and (b) 5.4 mol% BHO.

### 参考文献

1. Y. Ishiwata, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **23** (2013) 7500804.
2. L. Soler, et al.: Nat. Commun., **11** (2020) 334.
3. F. Lu, et al.: Supercond. Sci. Technol., **26** (2013) 045016.
4. T. Motoki, et al.: Supercond. Sci. Technol., **29** (2016) 015006.
5. T. Yoshihara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **33** (2023) 6600205.
6. K. Ohki and T. Nagaishi, Ceramics Japan, **47** (2012) 280.
7. N. Chamorro, et al.: RSC Adv., **10** (2020) 28872.

# 形状の異なる BMO を導入した高 $J_c$ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 薄膜の 最適アニール条件の検討

Investigation of optimal annealing conditions high  $J_c$   
YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> thin films with BMO with different shapes

山本 拓実, 堀出 朋哉, 吉田 隆(名大)

Takumi YAMAMOTO, Tomoya HORIDE, Yutaka YOSHIDA (NAGOYA UNIVERSITY)

E-mail: yamamoto.takumi.x7@s.mail.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO)は超伝導機器応用を目指して磁場中高  $J_c$  が求められている。その手段の一つとして人工ピンニングセンター(APC)の導入が検討されてきている。特に BaMoO<sub>3</sub>(BMO)を REBCO 内に導入する方法は、REBCO 線材の磁場中  $J_c$  を向上させる手段として多くの研究グループで報告されている [1]。

M. Miura らは、酸素アニールによってコヒーレンス長  $\xi$  や磁場侵入長  $\lambda$  を小さくすることにより、対破壊電流  $J_d$  の増加、 $J_c$  向上が検討されている。(TFA-MOD)-BMO 添加 REBCO 線材において、歪を低減することにより自己磁場  $J_c$  の向上が確認されている。しかし PLD-REBCO の BMO ナノロッド形成は、歪による酸素空孔の形成により特性低下が報告されている [2-3]。

我々は、切れたナノロッドを人工ピンとして作製するため PLD 法で REBCO 層と BMO 添加 REBCO 層の多層構造膜で  $J_c$  の等方向性が向上することを報告した [4]。

本研究では、異なる BMO ナノロッド形状を有する PLD-YBCO 膜の  $J_c$  向上を目的として最適アニール条件、コヒーレンス長  $\xi$ 、 $T_c$  及び  $J_c$  の観点から検討した。

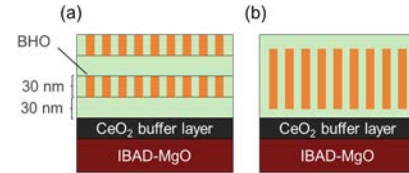
## 2. 実験方法

本研究では、YBCO/YBCO+BHO 多層膜を IBAD-MgO 基板上に YBCO 層を 30 nm と BHO 添加 YBCO 層を 30 nm、それぞれ 10 層で作製した(Fig.1(a))。膜厚は約 600 nm と一定とする。作製した超伝導膜の結晶性、超伝導特性を X 線回折法、直流四端子法により Quantum design 社製の PPMS を用いて評価した。コヒーレンス長  $\xi$  の測定は  $\rho$ - $T$  測定における 310 K における抵抗率の 0.5 倍になる時の温度とその際の印加磁場をその温度における  $B_{c2}$  とし、 $B_{c2} = \Phi_0 / 2\pi \xi_{ab}^2$  より求めた。また膜厚測定には誘導結合プラズマ発光分光分析装置を用いた。

## 3. 実験結果及び考察

Fig.2 に YBCO 膜、Fig.3 に YBCO/YBCO+BHO 多層膜の異なるアニール温度における 77 K における  $J_c^{s.f.}$  及び  $T_c$  を示す。それぞれの挿入図に 77 K におけるコヒーレンス長  $\xi$  を示す。YBCO/YBCO+BHO 多層膜は、 $T_c$  の最適アニール温度(400°C)と 77 K の  $J_c^{s.f.} = 2.18$  [MA/cm<sup>2</sup>] (350°C)は異なることが分かる。これは Fig.2 で得られた YBCO 膜の場合も同様の傾向にある。77 K におけるコヒーレンス長  $\xi$  は YBCO/YBCO+BHO 多層膜においては、アニール温度が低くなるにつれ、大きくなる。一方 YBCO 膜では、アニール温度を低くなるにつれ、小さくなる。また  $J_c^{s.f.}$  の最適条件におけるコヒーレンス長  $\xi$  は 4.5 nm とほぼ同じ値である。

PLD 膜中のナノロッド形状とアニール条件の違いによるコヒーレンス長  $\xi$  及び磁場中  $J_c$  などの関係を明らかにするため BHO ナノロッドを導入した YBCO 膜(Fig.1(b))との比較及び 20 K や 65 K の低温における  $J_c$  特性も検討し



ている。

Fig1. Schematic diagrams of YBCO films introducing different BMO shapes fabricated.

(a) YBCO/YBCO+BHO multilayer films, (b) BHO nanorods

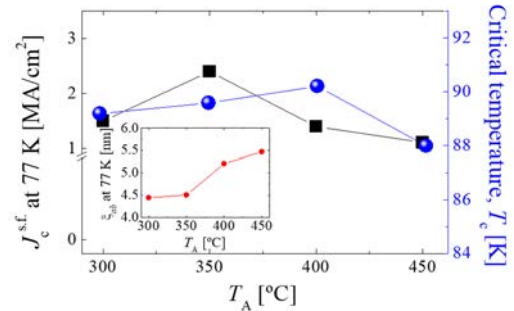


Fig.2  $J_c^{s.f.}$  at 77 K for YBCO films at different annealing temperatures. The Inset shows coherence length at 77 K at different annealing temperatures.

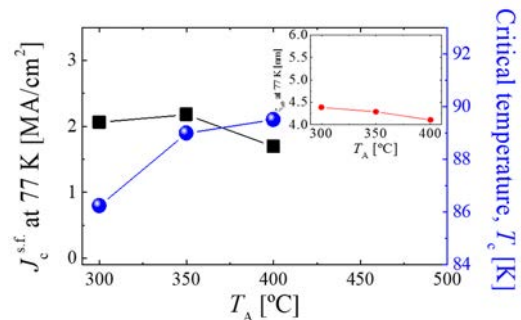


Fig.3  $J_c^{s.f.}$  at 77 K for YBCO/YBCO+BHO multilayer films at different annealing temperatures. The Inset shows coherence length at 77 K at different annealing temperatures.

## 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日比科学技術振興財団の助成を受けて実施した。また本研究で使用した IBAD-MgO 基板は(株)フジクラ飯島康裕様より提供して頂いた。

## 参考文献

- [1] A. Tsuruta et al, Jpn. J. Appl. Phys., 53 (2014) 090304-1 - 090304-4.
- [2] M. Miura et al., *NPG Asia Materials* (2022) 14;85.
- [3] M. Miura et al., *NPG Asia Materials* 9 (2017) e447.
- [4] A. Tsuruta et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23, (2013) 8001104.

# 強磁場マグネットの電磁場分布に基づく人工ピンによる $I_c$ の角度依存性の考察

Consideration on angular dependence of  $I_c$  due to artificial pins  
based on magnetic field distribution in high-field magnet

岡田 達典, 淡路 智 (東北大)

OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: tatsunori.okada.d8@tohoku.ac.jp

## 1. 背景と目的

東北大金研強磁場センターでは、REBCO 線材を用いた 33 T 無冷媒超伝導マグネット (33T-CSM) の開発<sup>[1]</sup>に取り組んでいる。REBCO 線材の複雑な臨界面に加え、軸・動径方向の座標に応じて磁場の大きさ  $B$  と向き  $\theta$  (面直磁場方向を  $\theta = 0$  とする) が変わるため、コイル内位置に依存した負荷率  $LF(T, B, \theta) = I_{op}/I_c$  を考慮した設計が必要となる。逆に、最も厳しい負荷率を与える磁場・角度における  $I_c$  値の改善が更なる強磁場発生への近道と言える。

本研究では、33T-CSM 用 REBCO インサートを念頭に、電磁場分布の評価と  $I_c(T, B, \theta)$  測定を通じて、負荷率軽減のための人工ピン形状・分布の検討を目的とした。

## 2. 実験および解析

### 2-1. 直流 $I_c(T, B, \theta)$ 測定

~ 10  $\mu\text{m}$  幅のブリッジを形成した Fujikura 社製 EuBCO 線材における  $I_c(T, B, \theta)$  を直流四端子法で評価した。6 K での運用を念頭に  $T = 20$  K で測定し、東北大金研強磁場センターの 25T-/20T-CSM などを用いて最大 24 T の磁場を印加した。

### 2-2. REBCO インサートコイル内電磁場分布の計算

設計案 (表 1) を基に、Biot-Savart 則にて電磁場分布を評価した。通電電流は線材の中心に位置した幅 4 mm・厚み無限小の環状シートに一樣に流れると近似し、線材を貫く磁場は線材中心の値で代表させた。33T-CSM では「REBCO/REBCO/補強テープ/絶縁テープ」の共巻き構造を想定し、LTS コイルによる背景磁場 14 T 下で最大中心磁場  $B_0^{\text{max}} = 33$  T を発生させる。比較として、NHMFL の Little Big Coil (LBC, 31.1 T 下で 14.4 T 発生し、 $B_0^{\text{max}} = 45.5$  T)<sup>[2]</sup> を模したマグネットも評価した。

## 3. 結果と考察

測定した  $J_c(20 \text{ K}, B, \theta)$  から得た 4 mm 幅 Fujikura EuBCO 線材の臨界面を Fig. 1 に示す。19 T 以上の磁場領域については各角度における磁場依存性を外挿した。この臨界面と電磁場分布を基に、各パンケーキ・各ターンにおける負荷率を評価したものが Fig. 2 である。

表 1 Design of REBCO insert coils used for coil field simulation for 33T-CSM<sup>[1]</sup> and 45.5T-LBC<sup>[2]</sup>.

	33T-CSM	45.5T-LBC
Bundle type	2 tapes wound	Non insulation
Turn thickness	0.583 mm	0.043 mm
Inn./Out. dia.	34/147 mm	14/34 mm
# of pancakes	64	12
# of turns	193	223
$I_{op}$	457.4 A	254.3 A
$B_0^{\text{max}}$	33 T	45.5 T

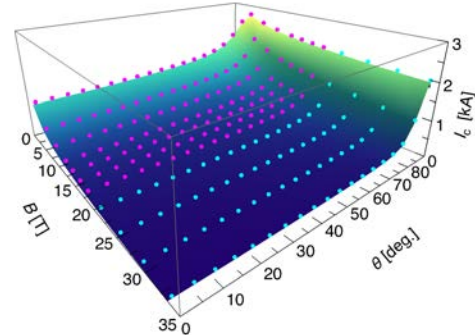


Fig.1 Critical surface of Fujikura EuBCO at 20 K.

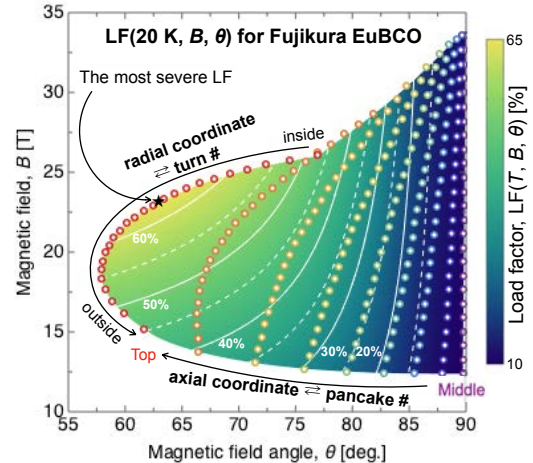


Fig.2 Load factor distribution at 20 K for Fujikura EuBCO insert coils for 33T-CSM.

表 1 の 33T-CSM 設計案では、最上 (最下) パンケーキの 108 ターン目に負荷率が最大となり、 $\theta \simeq 63$ deg. 近傍の  $I_c$  向上が求められる。また、45.5T-LBC 設計 (表 1) の場合には 79deg. 近傍で最大負荷率 (割愛) となり、Fujikura EuBCO 線材の強磁場マグネット応用としては 60–80deg. 域の  $J_c$  改善が有効と言える。これに際し、長尺/短尺 BHO ナノロッドによる要素的ピン止め力の数値計算<sup>[3]</sup>からは、短尺ナノロッドが  $c$  軸配向から逸脱して分布することで 0deg. ピークの裾野が広がる傾向が見られ、高  $\theta$  側の  $J_c$  特性の改善が期待される。

## 4. まとめ

REBCO インサートの設計案に基づく電磁場分布と Fujikura EuBCO 線材の  $J_c(T, B, \theta)$  特性から、負荷率が最大となる磁場・角度条件を評価した。講演では、他の REBCO 線材での結果も踏まえ、低温・強磁場マグネット応用に特化した人工ピン導入について触れたい。

## 参考文献

1. A. Badel et al.: MT27 (2021) THU-OR5-301.
2. S. Hahn et al.: Nature, Vol. 570 (2019) p.496.
3. 岡田達典, 淡路智: 応用物理学会 2022 年度春季学術講演会 (2022) 23p-E203-4.

# マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流

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

馬渡 康徳 (産総研)

MAWATARI Yasunori (AIST)

E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

## 1. はじめに

対破壊電流密度は、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り、Ginzburg-Landau (GL) 理論のオリジナル論文[1]にすでに対破壊電流密度に関する記述がある。GL 理論による対破壊電流密度の導出について、例えば Bardeen の解説論文[2]や Tinkham の教科書[3]をはじめ、多くの文献に解説されている。

通常観測される臨界電流密度は対破壊電流密度より桁違いに小さいことが多いが、膜厚  $d_s$  が磁場侵入長  $\lambda$  より薄く、かつ幅  $w$  が Pearl length  $\lambda^2/d_s$  より狭い銅酸化物および鉄系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 [4-8]。このような超伝導ナノストリップでは、Meissner 状態が不安定化して量子化磁束線が侵入を始める下部臨界磁場または過熱磁場が大きく、広い磁場範囲で Meissner 状態となっている。

本研究では、超伝導薄膜の膜面に平行な磁場を印加した場合の臨界電流密度について、理論解析および数値シミュレーションを行った。通電電流の方向に対して印加磁場が平行(垂直)である縦磁場(横磁場)の場合について、それぞれ臨界電流密度の膜厚依存性および磁場依存性について考察した。

## 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線が存在しない Meissner 状態では、秩序パラメータ  $\psi$  およびベクトルポテンシャル  $\mathbf{A} = A_y(x)\hat{y} + A_z(x)\hat{z}$  は  $x$  のみの関数であり、一次元 GL 方程式を満たす[1]。さらに、極端な第二種超伝導体  $\lambda/\xi \gg 1$  の場合、GL 方程式より

$$|\psi|^2 = 1 - \left| \frac{2\pi\xi}{\phi_0} \mathbf{A} \right|^2 \quad (1)$$

が得られ、次のような  $\mathbf{A}$  に関する非線形微分方程式(非線形 London 方程式)が導かれる[9]。

$$\lambda^2 \frac{d^2 \mathbf{A}}{dx^2} = \left( 1 - \left| \frac{2\pi\xi}{\phi_0} \mathbf{A} \right|^2 \right) \mathbf{A} \quad (2)$$

ここで、 $\xi$  はコヒーレンス長、 $\lambda$  は磁場侵入長、および  $\phi_0$  は磁束量子である。方程式(1)および(2)を、通電電流  $I_t$ 、外部磁場  $B_a$ 、および磁場角度  $\theta$  に関わる境界条件のもとに解いて、解が存在する(すなわち Meissner 状態が安定である)限界として定義される過熱磁場および臨界電流密度について考察する。

上の一次元 GL 方程式では、Meissner 状態が壊れて量子化磁束線が侵入する状態は記述することはできないが、Meissner 状態の安定限界について議論することは可能である。なお、横磁場の場合は、 $A_y = 0$  であるが、縦磁場を含めた一般の場合は  $A_y \neq 0$  である。

## 3. 超伝導薄膜の過熱磁場

超伝導薄膜に通電しないで外部磁場  $B_a$  を印加するとき、 $B_a$  の増加により  $|\mathbf{A}|$  も増加するが、(1)式より  $|\psi|^2 \geq 0$  なの

で  $|\mathbf{A}| \leq \phi_0/2\pi\xi$  を満たさなければならない。薄膜表面で  $|\mathbf{A}|$  は最大であり、その値が閾値  $\phi_0/2\pi\xi$  を超えると、Meissner 状態は不安定化して表面から量子化磁束線が侵入する。Meissner 状態の安定限界である磁場は過熱磁場  $B_{sh}$  と呼ばれる。(2)式を解いて、厚膜極限  $d_s \gg \lambda$  では  $B_{sh} = B_c$ 、および十分薄い薄膜  $d_s \ll \lambda$  では  $B_{sh} \sim (\lambda/d_s)B_c$  であることが導かれる[9]。ただし、 $B_c = \phi_0/(2\sqrt{2}\pi\xi\lambda)$  は熱力学的臨界磁場である。通常は外部磁場が下部臨界磁場  $B_{c1}$  に達すると量子化磁束線が超伝導体内へ侵入するが、超伝導体表面が理想的に平滑・清浄であれば  $B_{c1}$  を超えて  $B_c$  あるいはそれ以上まで Meissner 状態が保たれる。

## 4. 超伝導薄膜の臨界電流密度

超伝導薄膜に通電する場合、やはり(2)式を適当な境界条件のもとに解いて、一次元 GL 方程式の解が存在する限界として臨界電流密度  $J_c$  が導かれる。

ゼロ磁場中( $B_a = 0$ )の臨界電流密度  $J_{c0}$  は、十分薄い薄膜  $d_s \ll \lambda$  では  $J_{c0} = J_d$ 、および厚膜極限  $d_s \gg \lambda$  では  $J_{c0} \sim (\lambda/d_s)J_d$  であり、ここで  $J_d = \phi_0/(3\sqrt{3}\pi\mu_0\lambda^2\xi)$  は対破壊電流密度である[1,2,3,9]。すなわち、十分薄い超伝導薄膜のゼロ磁場中臨界電流密度は、対破壊電流密度に達する。

磁場中( $0 \leq B_a < B_{sh}$ )臨界電流密度は、次のように得られる。厚膜極限  $d_s \gg \lambda$  では、超伝導薄膜表面の磁場が  $B_{sh}$  に達すると Meissner 状態が不安定となる。通電電流による自己磁場と外部印加磁場をともに考慮して表面磁場を求めることにより、横磁場中臨界電流密度  $J_{c\perp}$  および縦磁場中臨界電流密度  $J_{c\parallel}$  は、それぞれ次のように導かれる。

$$J_{c\perp} = J_{c0} \left( 1 - \frac{B_a}{B_{sh}} \right), \quad (3)$$

$$J_{c\parallel} = J_{c0} \left[ 1 - \left( \frac{B_a}{B_{sh}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

ただし  $0 \leq B_a < B_{sh}$  である。横磁場(縦磁場)のときの表面磁場は外部磁場と自己磁場のスカラー和(直交するベクトルの和)なので、縦磁場のときの表面磁場は横磁場のときより小さい。縦磁場  $J_{c\parallel}$  が横磁場  $J_{c\perp}$  より常に大きいのはそのためである。

時間依存 GL 方程式に基づく数値シミュレーション結果との比較は講演で述べる。

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] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **20**, 1064 (1950); *Collected Papers of L. D. Landau*, D. ter Haar ed. (Pergamon, Oxford, 1965), p. 546.
- [2] J. Bardeen, Rev. Mod. Phys. **34**, 667 (1962).
- [3] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed. (McGraw-Hill, New York, 1996).
- [4] S. Tahara *et al.*, Phys. Rev. B **41**, 11203 (1990).
- [5] Ch. Peroz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 142502 (2006).
- [6] S. Nawaz *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 167004 (2013).
- [7] J. Li *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 062603 (2013).
- [8] Y. Sun *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 134516 (2020).
- [9] P. G. de Gennes, Solid Stat. Commun. **3**, 127 (1965).

# 多段式淘汰管を用いた常磁性物質の磁気分離法に関する基礎的研究

## Fundamental study on magnetic separation for paramagnetic substances using a multi-stage selection tube.

三島史人, 長濱葵, 野村直希, 西嶋茂宏 (福井工業大学)

MISHIMA Fumihito, NAGAHAMA Aoi, NOMURA Naoki and NISHIJIMA Shigehiro (Fukui University of Technology)

E-mail: f-mishim@fukui-ut.ac.jp

### 1. 緒言

2011年3月11日に発生した福島原子力発電所事故により周辺地域に放射線物質が拡散された。そして、表土剥ぎ取りなどの放射線汚染土壌等が除去され、仮置き場や除染現場で一時的に保管されている。その後、中間貯蔵施設で保管され、30年以内に県外の最終処分場へ搬出し処分される予定である。しかし、除去土壌は約1300万 $\text{m}^3$ にのぼるとされ、この大量の汚染土を最終処分場へ搬出するには、低コストで効率の良い減容化が不可欠である。<sup>1,2)</sup>

そこで、本研究では大量に発生した除去土壌の減容化に高度分級処理を適用するにあたり、多段式の淘汰管を用い様々な粒子径の粒子を選択的に分級処理しながら、磁気分離を適用する手法について検討したのでその結果について報告する。

### 2. 淘汰管の原理

淘汰管とは、液中に懸濁した粒子に作用する合力を利用して、微粒子を粒径によって選別する装置である。淘汰管内の粒子には、流体によるドラッグ力  $F_D$ 、浮力と重力が働く。粒子に作用する合力を式(1)に示す。

$$F_D = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f)g - 6\pi\eta r(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p) \quad (1)$$

ここで、 $r$  は粒子半径 [m]、 $\rho_p$  は粒子の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $\rho_f$  は媒質の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $\eta$  は流体の粘度 [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]、 $\mathbf{v}_f$  は流体の速度 [m/s]、 $\mathbf{v}_p$  は粒子の速度 [m/s]である。 $\mathbf{v}_f$ を0としたときに導かれる粒子の沈降終端速度  $v_s$ を式(2)に示す。

$$v_s = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_f)g}{9\eta} \quad (2)$$

粒子の沈降終端速度  $v_s$ が、淘汰管の底部から送流した流体の上昇速度  $\mathbf{v}_f$ よりも大きいまたは一致する場合、粒子は流体の流れに逆らって、淘汰管で停滞（浮遊）または沈降して、装置内に残留する。一方、 $\mathbf{v}_s$ が、 $\mathbf{v}_f$ よりも小さい場合、粒子は流体の流れに乗り淘汰管の系外に排出されることになる。

### 3. 淘汰管超電導磁気分離装置化のための検討

淘汰管に磁気分離を適用するにあたり、磁場発生源として電磁石（スケールアップの際には超電導磁石）を用いる系を想定した場合には、磁場の制御のみならず、流体制御によって、磁場分布領域に対して効果的に目的対象粒子径の粒子を停滞させることが望ましい。

しかしながら、通常の淘汰管を用いると、目的対象粒子径の粒子を管内に停滞させることは可能ではあっても、磁場空間の任意の位置に粒子を停滞制御させることは困難である。

そこで、管径の異なる管を多段に連結させた淘汰管を使用し、流速分布を段階的に変化させることで、そこに留まる粒子径の範囲を変化させ、目的粒子径の粒子の停留位置の制御を（ $\phi 25\text{mm}$ の配管内最大流速43mm/s）試みた。

Fig.1 (a), (b) に示すような計算から、淘汰管内に留まる粒子の粒径が重複しないような管径を選定した。

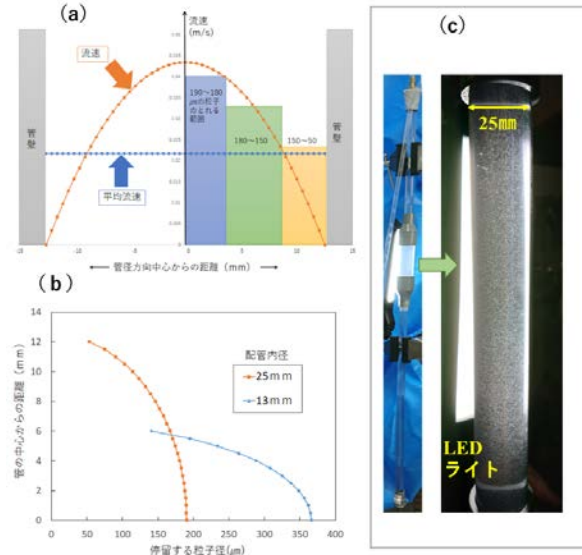


Fig.1 (a) Relationship between the flow velocity distribution in the selection tube and the diameter of particles allowed to be suspended. (b) Particle diameters of particles that can be suspended with 13 mm and 25 mm inner diameters. (c) Experimental results of glass particle suspension using a two-stage selection tube.

検討結果より、Fig.1 (c) に示すような淘汰管内径を $\phi 13\text{mm}$ （長さ80cm）と25mm（長さ20cm）を組み合わせ2段の淘汰管を作製し、径が170~200 $\mu\text{m}$ のガラス粒子を用い粒子の停留位置制御（管内濃縮）の実験を実施した。図に示すように、内径 $\phi 25\text{mm}$ の管内に、ほぼ全てのガラス粒子を停留（濃縮）させることに成功した。

次に同じ多段淘汰管を用い、常磁性を示す黒色ガラス粒子（比重3.1、体積磁化率 $3.17 \times 10^{-4}$ 、粒子径180~300 $\mu\text{m}$ ）を分離対象粒子として、磁場発生源に最大磁束密度1.3Tのハルバツハ永久磁石回路を適用し、停留状態となった黒ガラス粒子を開放勾配磁気分離（分離領域の平均磁束密度0.4T）し、磁気分離が可能であることを確認した。また、高勾配磁気分離も実施し、より高速に黒ガラス粒子が磁気フィルタ内に回収できることも確認した。

### 4. まとめ

本研究では超電導磁石内に淘汰管を適用するため、計算と実験により、任意の領域に目的粒子径の粒子を停滞させることを目的に、多段式の淘汰管を作製し、粒子の位置を制御し、目的対象粒子径の粒子を濃縮可能であることを示した。そして、停留させた常磁性粒子を低磁場で、磁気けん引し、分離可能であることを示した。

### 参考文献

- N.Nomura, F.Mishima, S.Nishijima, IEEE Trans.on Appl. Supercond., Vol.32, (6), pp.3700204, (2022)
- F.Mishima, N.Nomura, S.Nishijima, Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol.24, No.3, pp.19-23, (2022)

# 磁気力と旋回流を組み合わせた マイクロプラスチックファイバーの除去に関する研究

## Removal of Microplastic Fibers Using Magnetic Force and Swirling Flow

秋山 庸子, 藤井 里至, 真鍋 勇一郎, 佐藤 文信 (大阪大学)  
 AKIYAMA Yoko, FUJII Satoshi, MANABE Yuichiro, SATO Fuminobu (Osaka University)  
 E-mail: yoko-ak@see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、環境中に流出したマイクロプラスチックが生態系に影響を与えることが懸念されている。その一種に、洗濯排水に含まれるマイクロプラスチックファイバー (MPFs) がある。MPFs は下水処理施設を通過し、有害物質が吸着して生体に取り込まれることで、生物濃縮を引き起こす可能性がある[1]。

本研究では、MPFs の表面にマグネタイトを付着させ、磁気力により MPFs を除去する手法を検討している。我々はこれまで、MPFs にマグネタイトを付着させて (磁気シーディング)、高勾配磁気分離システム (HGMS) を用いて回収する手法を検討してきた。ピーカースケールの実験では粒子状・破片状のマイクロプラスチックを 90-97% 分離することに成功した[2] が、MPFs とマグネタイトの主な相互作用が、各粒子の表面電位に起因する静電的相互作用とファンデルワールス力であり、付着力が小さいため、連続処理の体系においては、マグネタイトに作用する磁気力が MPFs-マグネタイト間の付着力を上回り、MPFs から脱離するという問題が明らかになった。それに加え、定期的な磁気フィルターを洗浄する必要があるという HGMS 特有の課題もある。

そこで、これらの問題を解決し、低磁場でも分離可能で、メンテナンスフリーな連続磁気分離の 1 手法として、磁気力と旋回流を利用した磁気分離システムによる MPFs の磁気分離を試みた。この手法は、旋回流による遠心力を磁場によりアシストすることで、分離対象物質を外側に誘導し、磁気シーディングした MPFs を濃縮する新たな磁気分離法である。本研究ではシミュレーションとラボスケールの装置を用いた実験により、提案した手法の MPFs 除去への適用可能性を検証した。

### 2. 実験方法

マグネタイトを用いて MPFs に磁気シーディングした後、MPFs を磁場と旋回流を用いて磁気分離することで濃縮水と処理水に分離した。まずマグネタイト懸濁液を調製した。蒸留水にマグネタイト (1 次粒径 0.5  $\mu\text{m}$ ) を 1000:1 の重量比になるように加え、10 分間超音波攪拌した。一方、別途、蒸留水に対して MPFs (ポリエステル、長さ 400  $\mu\text{m}$ 、直径 10.1  $\mu\text{m}$ ) を添加し、これに上記のマグネタイト懸濁液を加え、100 rpm で 30 分間攪拌翼で攪拌することで、磁気シーディング済み MPFs を含む模擬排水 (MPFs 濃度 10 mg/L、マグネタイト濃度 10 mg/L の模擬排水 10 L) とした。

旋回流を利用した磁気分離装置の模式図を Fig. 1 に示す。この磁気分離装置は、流路内に旋回流を発生させることで MPFs に対して外向きに遠心力が作用すると同時に、流路の外側に配置した四極対向型磁石 (流路内壁面で最大 0.4T、中心部で 0.0T) により、磁気シーディングした MPFs に対して外向きに磁気力を作用させることができる設計とした。入口流速を 0.25, 0.5, 1.0 m/s と変化させ、流路外側と内側の排水を流出口 1 (処理水)、2 (濃縮水) として別々に回収することで、磁気分離性能を調査した。

### 3. 結果と考察

磁気分離による MPFs の濃縮水、処理水、壁面付着への各分配率の、磁場の有無と入口流速による変化を Fig. 2 に示

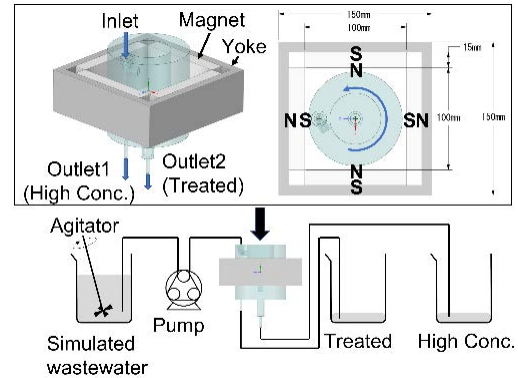


Fig.1 Schematic diagram of magnetic separator.

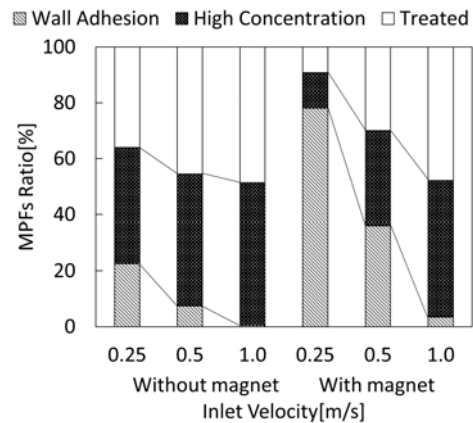


Fig.2 MPFs ratio by magnetic separation.

す。磁場を印加しない場合と印加した場合とで比較すると、磁場印加により濃縮水中の MPFs の比率は下がったものの、特に低流速で壁面付着率が増加した。また、入口流速の増加に伴って壁面に付着する MPFs が減少した。これは、入口流速の増加による壁面付近の流速の増加と、MPFs の流路通過時間 (磁場印可時間) の減少が要因であると考えられる。また流路から磁石を取り除くことで、壁面に付着した MPFs 回収可能であることも確認できたため、入口流速 0.5 m/s, 0.25 m/s では、壁面付着率と濃縮水に含まれる比率の和である、それぞれ約 70%, 約 90% の MPFs を回収できると考えられる。

### 4. まとめ

磁気力と旋回流を用いた磁気分離システムで、磁気シーディングした MPFs の磁気分離が可能であることが示され、また入口流速によってその性能を制御することができることが示された。

### 参考文献

- J. Sun, et al. : Water Research, Vol. 152 (2019) pp. 21-37
- R. Ueda, et al. : Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol. 24, Issue 3 (2022) pp.12-18

# 急速充電を実現する超電導非接触給電システムに適した共振回路方式の検討

## Investigation of resonance circuit topologies

### for a large-capacity wireless power transmission system using HTS coils

井上 良太, 岩本 貴大, 薦田 遥暉, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大)

INOUE Ryota, IWAMOTO Takahiro, KOMODA Haruki, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama Univ.)

E-mail: ryota.inoue@okayama-u.ac.jp

#### 1. はじめに

近年, 2050 年のカーボンニュートラルの実現を目指して, 数 100 kW 級の大容量非接触給電システムが求められている。そこで本研究では, 高温超電導 (HTS) コイルを用いた超電導非接触給電システムについて検討している。非接触給電システムの送受電回路は, 送受信コイルとコンデンサを用いた共振回路によって構成される。これまでに, 銅コイルとキャパシタの接続位置が異なる様々な共振回路方式が報告されている [1]。一方, HTS コイルの交流損失は通電電流に依存することから, 高効率かつ大容量な非接触給電システムを実現するためには, 超電導非接触給電システムに適した共振回路方式を明確にする必要がある。そこで本研究では, 共振回路方式や共振条件の違いが超電導非接触給電システムの電力伝送特性に与える影響について検討した。

#### 2. 解析条件

Fig.1 に, コイルとキャパシタの接続位置が異なる共振回路方式 (SS 方式, SP 方式, PS 方式, PP 方式) の回路図を示す。ここで,  $L_1$ ,  $L_2$  は 1 次側および 2 次側の自己インダクタンス,  $M$  は相互インダクタンス,  $C_1$ ,  $C_2$  は 1 次側および 2 次側のキャパシタンス,  $R_L$  は負荷,  $r_1$ ,  $r_2$  は 1 次側および 2 次側の等価抵抗を表す。また,  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  は 1 次側および 2 次側のコイル電流である。なお, 共振条件は,  $r_1 = r_2 = 0$  の場合に電源からみた力率が 1 となり, 負荷  $R_L$  に依存しない共振周波数を選択した。各共振回路方式の共振周波数を式(1)から(4)に示す。

$$f_{0SS} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

$$f_{0SP} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1(L_1 L_2 - M^2)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2)$$

$$f_{0PS} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2(L_1 L_2 - M^2)}} \quad (3)$$

$$f_{0PP} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\right)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\right)}} \quad (4)$$

ここで,  $f_{0SS}$ ,  $f_{0SP}$ ,  $f_{0PS}$ ,  $f_{0PP}$  は SS 方式, SP 方式, PS 方式, PP 方式の共振周波数である。なお, 式(1)から(4)の共振条件を選択した場合, SS 方式および PP 方式は, 負荷に対して定電流特性を示し, SP 方式および PS 方式は, 負荷に対して定電圧特性を示す。Table 1 に, HTS コイルの諸元を示す。ここで, 受電電力  $P_{RL}$  は, 鉄道用非接触給電システムを想定 (距離 5 km を 100 km/h で走行する 2 両編成) し, 駅停車中の 60 s 間で充電が完了する 300 kW とした。また, コイルサイズは外径が 800 mm, 内径が 100 mm であり, コイルにかかる最大電圧を 6.6 kV とした。なお, 負荷  $R_L$  は, 効率が最大となる負荷である。また, HTS コイルの交流損失は, 薄膜近似を適用した 2 次元軸対称の有限要素法 (2D-TA 法) を用いて計算した。

#### 3. 結果および考察

Fig.2 に各回路方式に流れるコイル電流  $I_L$  およびコイル間効率  $\eta_t$  の等価回路解析による計算結果を示す。Fig.2 より, SS 方式のコイル間効率  $\eta_t$  が最大となった。これは, SS 方式において, 直列共振を積極的に利用していることから, コイルの両

端電圧が上昇し, コイルに流れる通電電流  $I_L$  が他の方式に比べて減少したためと考えられる。また, SP 方式および PS 方式のコイル間効率  $\eta_t$  は, SS 方式に比べて僅かに低下した。これは, 1 次側または 2 次側に並列共振回路が含まれており, 並列共振時に HTS コイルの通電電流  $I_L$  が SS 方式に比べて増加したためと考えられる。一方, PP 方式のコイル間効率  $\eta_t$  は, 他の方式に比べて大きく低下した。これは, 1 次側および 2 次側に並列共振回路が含まれているため, 他の方式に比べて 1 次側および 2 次側の HTS コイルの通電電流  $I_L$  が増加し, HTS コイルの交流損失が増加したためと考えられる。以上より, 高効率な超電導非接触給電システムを実現するためには, 定電流負荷の場合, SS 方式が適しており, 定電圧負荷の場合, SP 方式または PS 方式が適していることがわかった。

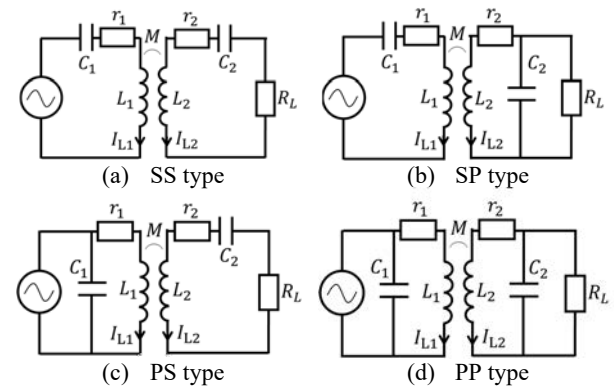


Fig.1 Resonance circuit topologies for the WPT system

Table.1 Specifications of the resonance circuit topologies

	SS type	SP type	PS type	PP type
Receiving power $P_{RL}$ (kW)	300			
Resonance frequency $f_0$ (kHz)	1.9			
Self-inductance $L_1, L_2$ (mH)	2.3			
Mutual inductance $M$ (mH)	1.1			
Critical current of HTS wire (A)	720			
Width of HTS wire (mm)	12			
Primary capacitance $C_1$ ( $\mu$ F)	3.0	3.8	3.0	3.8
Secondary capacitance $C_2$ ( $\mu$ F)	3.0	3.0	3.8	3.8
Load resistance $R_L$ ( $\Omega$ )	12.8	60.8	13.0	46.7

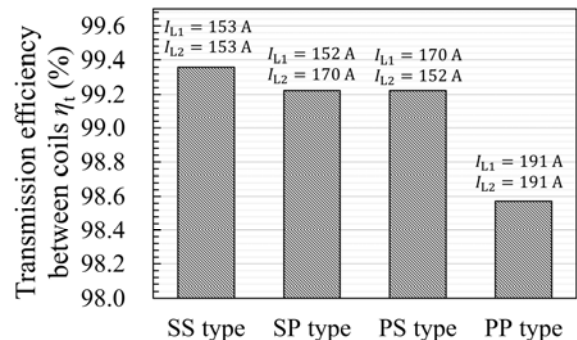


Fig.2 Calculation results of the transmission efficiency between coils in different resonance circuit topologies for the WPT system.

#### 参考文献

- R. Inoue, et al., *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, Vol. 58, no. 1, (2023) pp. 3-10

# 高温超電導マグネットを用いたアルミ押出成形用 400 kW 級直流誘導加熱装置の開発—連続繰り返し加熱試験と高温超電導マグネットの健全性評価—

## Development of 400 kW-class DC Induction Heating Device Using HTS Magnet for Aluminum Extrusion Process: Continuous Repetitive Heating Test and Evaluation of Soundness of HTS Magnet

伊東 徹也(テラル, 新潟大); 福井 聡, 小川 純(新潟大); 河島 裕, 緒方 康博, 正 孝幸(テラル); 古瀬 充穂(産総研); 渡部 智則(中部電力); 長屋 重夫(大阪大学); 森下 勇樹, 長岡 孝, 府山 伸行, 縄稚 典生(広島総技研)  
ITO Tetsuya (TERAL Inc., Niigata University); FUKUI Satoshi, OGAWA Jun (Niigata University); KAWASHIMA Hiroshi, OGATA Yasuhiro, SHO Takayuki (TERAL Inc.); FURUSE Mitsuho (AIST); WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co., Inc.); NAGAYA Shigeo (Osaka University); MORISHITA Yuki, NAGAOKA Takashi, FUYAMA Nobuyuki, NAWACHI Norio (HiTRI)  
E-mail: ito00@teral.co.jp

### 1. はじめに

我々は、高温超電導マグネットを用いたアルミ押出加工用のアルミビレット加熱装置を開発しており、これまでに 400 kW 級の実証装置に関する一連の開発内容について報告を実施した[1]–[5]。この実証装置により、連続 2 時間、合計 90 本のアルミビレット連続繰り返し加熱を実施し、高温超電導 (HTS) マグネットの健全性を評価したので、その結果について報告する。

### 2. アルミビレット加熱が HTS コイルに与える影響

本加熱装置では、HTS マグネットで生成した静磁場内でアルミビレットを強制回転させることで、アルミビレット内部に誘導電流 (渦電流) を発生させ、そのジュール損によりアルミビレットを加熱する。アルミビレットの内部に流れる電流は、アルミビレットに鎖交する磁束の変化を妨げるように流れるため、この電流により、HTS コイルを鎖交する磁場にも変化が生じる。アルミビレット内部電流の変化は、主にアルミビレットの回転速度の変化により生じ、これにより HTS コイルの鎖交磁束が変化するため、HTS コイルに電圧が誘導され、HTS コイルの電流や温度に影響を与える。

### 3. 連続繰り返し加熱試験結果

アルミビレット加熱運転が HTS コイルに与える影響を評価する目的で、直径 155 mm、長さ 500 mm のアルミビレットを、約 88 秒サイクルで 2 時間以上連続して繰り返し加熱する、連続繰り返し加熱試験を実施した。加熱試験中の主電動機入力を Fig. 1 に、HTS コイル温度を Fig. 2 に、HTS コイル外周部に取り付けた歪ゲージの測定値を Fig. 3 に示す。連続 90 本の繰り返し加熱では、HTS コイルの温度および歪の変化は飽和には至らなかったが、飽和傾向を示した。

### 4. まとめ

- 連続繰り返し加熱試験中に投入パワーの減少は認められず、適切に加熱を実施できていた。
  - 連続繰り返し加熱試験中に HTS コイルの温度が徐々に上昇したが、温度上昇は凡そ 5 K 以内と推定され、HTS コイルの通電電流に影響を与えない範囲であった。
  - 連続繰り返し加熱試験中に HTS コイル外周部の歪が変化したが、変化量は HTS 線材に不可逆な変化が生じるとされている 0.5% にくらべ 1 桁以上低い値であった。
- 以上より、装置の加熱運転により、HTS マグネットの健全性が損なわれないことが確認された。

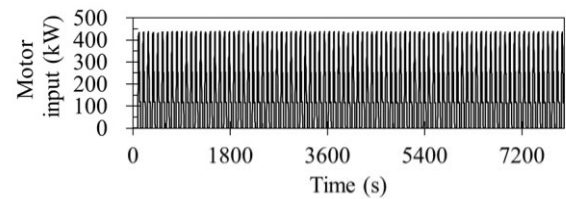


Fig. 1 Input power of drive motor in continuous repetitive heating test.

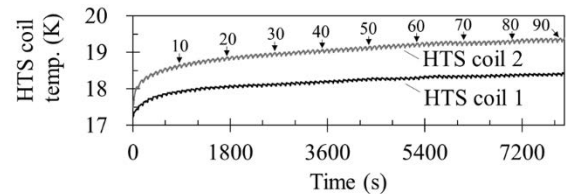


Fig. 2 Temperature of HTS coils measured in continuous repetitive heating test.

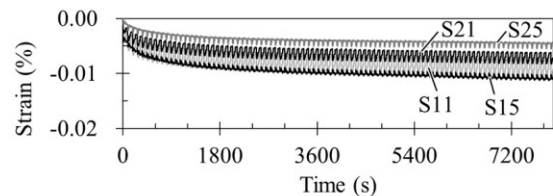


Fig. 3 Measured strain in winding of HTS coil in continuous repetitive heating test.

### 謝辞

本研究開発の一部は、令和元年度～令和3年度戦略的基盤技術高度化支援事業及び科学研究費補助金 (19K04347) により実施した。

### 参考文献

- T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.108
- T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.5
- T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2021) p.42
- T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.15
- T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.108



# SmBCO 系バルク超伝導体の高磁場勾配を利用した 片側開放 NMR による自己拡散係数の測定

## Measurement of self-diffusion coefficient using single-sided NMR with high magnetic field gradient generated by SmBCO-based bulk superconductor

坂藤 正樹, 菊池 翔, 竹村 賢人, 岡 徹雄, 坂井 直道(芝浦工大); 山本 航輝, 岡村 哲至(東工大);  
高橋 雅人, 仲村 高志(理研); 横山 和哉(足利大)

SAKAFUJI Masaki, KIKUCHI Sho, TAKEMURA Kento, OKA Tetsuo, SAKAI Naomichi (SIT); YAMAMOTO Koki, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); TAKAHASHI Masato, NAKAMURA Takashi (RIKEN); YOKOYAMA Kazuya (AIT)

E-mail: mb21501@shibaura-it.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導(HTS)バルク体の産業応用例として仲村ら[1]による円筒型の HTS バルク体内部で測定を行う NMR 装置がある。本研究では、円柱型の HTS バルク体表面の磁場を用いて測定を行う片側開放 NMR 装置を開発した。リチウムイオン電池材料開発を想定し、さまざまな濃度の塩化リチウム水溶液の自己拡散係数の測定に成功したため報告する。

片側開放 NMR とは、磁石表面に生じる磁場を利用し、磁石外側の空間で測定を行う NMR 装置であり、NMR の代表的な用途である分子の構造解析には利用できない。しかし、分子の運動性は測定できるため、永久磁石を使った片側開放 NMR 装置が市販されている。磁極表面に試料を当て測定を行うため、試料の大きさや形状の制限がなく、NMR を利用したオペランド測定等、産業応用が期待されている。

NMR を利用した拡散測定は、リチウムイオン電池のイオン伝導等の分析に利用され、パルス磁場勾配を利用した Pulse Field Gradient(PFG)-NMR 法が広く普及している。一方、当グループでは HTS バルク磁石表面の急峻な静磁場勾配を利用することで、より短い時間での分子の移動を検出でき、空間分解能を高めることもできる。また、片側開放 NMR に HTS バルク磁石を利用すると、永久磁石よりも強力な磁場を発生できるためより短時間で測定でき、かつ、着磁後は冷凍機冷却により永久磁石より安定した磁場が得られる。

以上より本研究では、SmBCO バルク磁石を用いた片側開放 NMR を開発し、リチウムイオン電池の電解質等の分析へ向け塩化リチウム水溶液等の自己拡散係数の測定を行い、その結果を報告する。

### 2. 実験方法

60 mm 径, 15 mm 厚の SmBCO 系バルクを 40K に冷凍機冷却し、パルス着磁(PFM) 法を用いて磁極表面で約 1.3T に着磁した磁極表面に、ソレノイドコイルを設置、試料を封入した直径 2.0 mm のガラス管をコイル内に挿入し、測定を行った。Fig.1 に片側開放 NMR 用磁極および NMR 検出部の外観写真を示す。

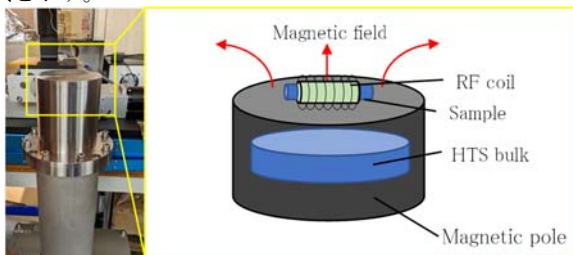


Fig. 1 Appearance of single-sided NMR using HTS bulk.

The figure on the right is a simplified illustration of a single-sided NMR measurement.

自己拡散係数の測定には、スピンエコー(SE) Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 法を用いた。

本研究では次の式 (1) から、自己拡散係数  $D$  を算出した。

$$\ln\left(\frac{S(\tau)}{S(0)}\right) = -\frac{2}{3}\gamma^2 G_0^2 \tau^3 D \quad (1)$$

$S(\tau)$  は待ち時間  $\tau$  における信号強度、 $\gamma$  は磁気回転比(定数)、 $G_0$  は静磁場勾配であり、 $\tau$  を変化させた際の信号強度の変化から、自己拡散係数  $D$  を算出した。

### 3. 結果・考察

15, 10.7, 4.5 M (mol/L) 塩化リチウム水溶液の測定結果を以下に示す。

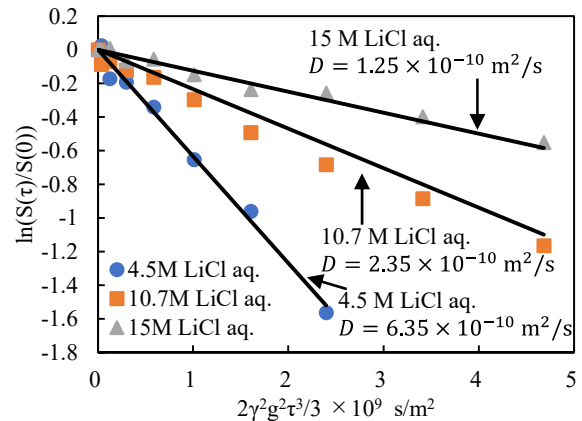


Fig. 2 Diffusion measurements of 15 M, 10.7 M, 4.5 M LiCl aqueous solutions.

求められた 15, 10.7, 4.5 M 塩化リチウム水溶液の自己拡散係数は、それぞれ  $1.19 \times 10^{-10}$ ,  $2.62 \times 10^{-10}$ ,  $6.36 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s と文献値[2](Fig.2 における実線)に近く、本装置により、塩化リチウムの濃度の違いによる拡散係数の違いを識別できることが分かった。これは、72.1 T/m と急峻な静磁場勾配の利用および検出精度の向上のために行った様々な装置改良により達成できた成果である。また、自己拡散係数の小さなグリセロールや多成分系(ショ糖+水)の自己拡散係数の測定にも成功している。

### 4. まとめ

SmBCO 系バルク磁石を用いた片側開放 NMR 装置を開発し、15, 10.7, 4.5 M の異なる濃度の塩化リチウム水溶液について拡散測定を行い、濃度の違いによる自己拡散係数の違いを識別できることを示した。この装置は、リチウムイオン電池材料の評価や様々な用途での利用が期待できる。

### 参考文献

1. T. Nakamura et. al.: Journal of Magnetic Resonance, Vol 259 (2015) p.68-75
2. B. M. Braun et. al.: The Journal of Physical Chemistry, Vol.92, No.5 (1988) p.1342-1346

## 2次元平面内における MDDS 用磁性薬剤の磁気誘導に適した HTS コイルと HTS バルク体の配置方法

### HTS coil and HTS bulk arrangement suitable for magnetic induction of magnetic drugs for MDDS in a two-dimensional plane

野島渉平, 長崎陽, 津田理 (東北大)

NOJIMA Shohei, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: shohei.nojima.q2@dc.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

磁気誘導型ドラッグデリバリーシステム(MDDS)の実現には、血管を通じて磁性薬剤を患部まで誘導する必要がある。従来の単一の磁場源では、血管表面と垂直方向の磁気力(摩擦力)が非常に大きいため、血管長手方向に磁性薬剤を局所的に集積させ、誘導することは困難であった。これに対し、先行研究では、HTS コイル内部に2つのHTS バルク体を配置することで、垂直方向の磁気力低減と血管長手方向の磁気力増加を可能にした<sup>[1]</sup>。しかし、この磁場源構成は、血管長手方向における磁性薬剤の集積を目的としており、分岐のある血管内を誘導することはできない。そこで、本研究では、血管表面と垂直方向の磁気力を低減と水平方向の磁気力増加を同時に実現し、2次元空間での磁性薬剤の局所的集積を可能にする磁場源の構成方法について検討した。

#### 2. 解析方法

先行研究では、HTS コイルの内部に2つの円柱状 HTS バルク体を、HTS バルク体の遮蔽電流領域が磁性薬剤を集める領域(HTS コイルの中心軸)近傍に来るように配置することで、垂直方向の磁気力(磁気勾配)低減と長手方向の磁気力(磁気勾配)増加を実現した<sup>[1]</sup>。そこで、本研究では、先行研究で提案した磁場源の構成方法を踏まえ、HTS コイルの内部に4つのHTS バルク体を配置することで、2次元空間での磁性薬剤の局所的集積を試みた。しかし、先行研究のように、円柱状 HTS バルク体を用いると、HTS バルク体間の距離を任意に調整することができず、HTS バルク体の遮蔽電流領域を HTS コイル中心軸近傍に作ることはできない。そこで、HTS バルク体間距離を任意に調整可能な4つの四角柱状 HTS バルク体を HTS コイル内に配置することを考えた。

解析では、3次元の有限要素法(H法)を用いた。今回検討した磁場源の構成と諸元をそれぞれ Fig. 1 と Table 1 に示す。なお、解析では計算量を減らすために8分の1モデルを使用した。まず、Model A, B, D の比較により、HTS バルク体の遮蔽電流領域が HTS コイルの中心軸近傍の磁性薬剤に働く磁気力に及ぼす影響を検討した。次に、Model B, C の比較により、HTS バルク体間距離が磁性薬剤に働く磁気力に及ぼす影響を検討した。本解析では、磁場源上空50mmにある磁性薬剤を局所的な領域に集積させることを想定し、磁場源上空50mmでのz方向の磁束密度勾配 $\partial B/\partial z$ と磁性薬剤に働く磁気力 $F_{mi}(\propto B \cdot \partial B/\partial i)$  ( $i = x, y$ )を評価した。

#### 3. 解析結果および考察

Fig. 2 に Model A, B, C と HTS コイルのみを用いた時の、磁場源上空50mmの HTS コイル中心軸近傍におけるz方向の磁束密度勾配と磁性薬剤に働く磁気力ベクトルの分布を示す。Fig. 2(a), (b), (d)より、Model A では、磁性薬剤を中心軸近傍に集積できる磁気力が得られるものの、 $|\partial B/\partial z|$ が増加している。一方、Model B では、 $|\partial B/\partial z|$ を低減できているものの、磁性薬剤に働く磁気力の向きが HTS コイルの中心軸方向とは逆になることがわかった。これらは、HTS コイルの中心軸近傍に形成される HTS バルク体の遮蔽電流のループ径の

大きさに起因していると考えられる。そこで、HTS コイルの中心軸から四角柱状 HTS バルク体までの距離を変化させた場合における磁性薬剤に働く磁気力を検討した。Fig. 2(b), (c), (d)より、HTS バルク体間に適度な隙間を設けることで、 $|\partial B/\partial z|$ を低減すると同時に、磁性薬剤を中心軸近傍に集積可能な磁気力が得られることがわかった。

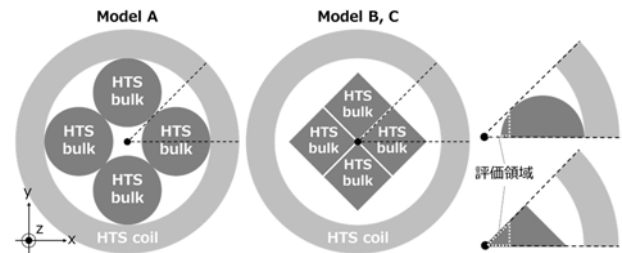


Table 1. Specifications of HTS bulk and HTS coil.

Model	A	B	C	HTS coil
Radius of HTS bulk [mm]	60	-	-	-
Length of a diagonal line of HTS bulk [mm]	-	120	-	-
Height of HTS bulk [mm]	20	-	-	-
Distance from HTS bulk to z-axis [mm]	$60(\sqrt{2}-1)$	0	5	-
Inner radius of HTS coil [mm]	-	$60(1+\sqrt{2})$	-	-
Outer radius of HTS coil [mm]	-	$110+60\sqrt{2}$	-	-
Height of HTS coil [mm]	-	20	-	-

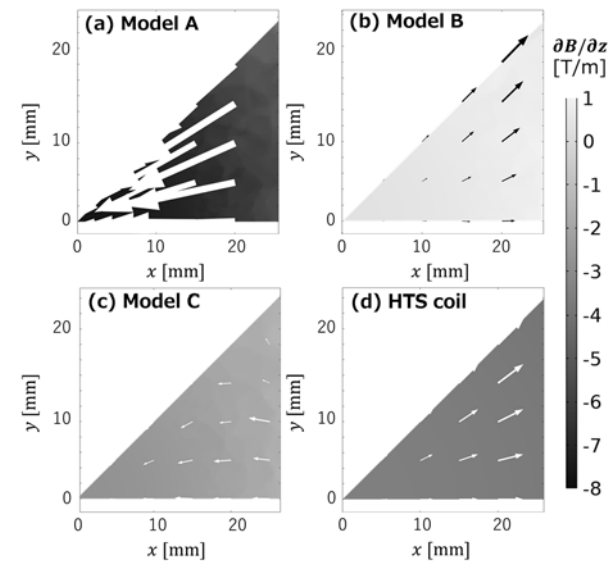


Fig. 2  $\partial B/\partial z$  distribution and magnetic force vector around the central axis of the HTS coil at 50mm above the magnetic field source in Model A, B, C, and HTS coil.

#### 参考文献

- S. Nojima, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33 (2023) p.1-5

# メンブレンを用いた STJ 検出器での GaN の評価

## Evaluation of GaN in STJ detectors with Membranes

野口 剛志, 柴崎 大我, 田井野 徹(埼玉大); 藤井 剛, 志岐 成友, 中島 昭, 菊地 貴大(産総研)

NOGUCHI Tsuyoshi, SHIBASAKI Taiga, TAINO Tohru (Saitama Univ.); FUJII Go, SHIKI Shigetomo, NAKAJIMA Akira, KIKUCHI Takahiro(AIST)  
E-mail: noguchi.t@aist.go.jp

### 1. はじめに

近年、持続可能な社会の実現に向けた取り組みとして、再生可能エネルギーや電気自動車などが注目されている。これら製品には半導体を用いられるが、既存の Si 半導体ではスイッチング速度や動作温度など、今後望まれる性能を満たせない。そこで Si の代替材料として、SiC や GaN など次世代半導体が注目されている。半導体デバイス作製においては、エピタキシャル成長やイオン注入が重要な開発テーマであり、それら開発において、不純物濃度の評価が重要である。不純物の分析手法の一つとして、X線分光分析があり、X線検出器として一般的に用いられているシリコンドリフト検出器(Silicon Drift Detector : SDD)では、エネルギー分解能が不十分なため、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、開発中の超伝導トンネル接合(Superconducting tunnel Junction : STJ)検出器はエネルギー分解能が優れており、既に SDD より数倍優れたエネルギー分解能を実現している。実際、SDD のエネルギー分解能 42 eV(@C-K $\alpha$  線)[1]に対し、STJ では 12 eV(@C-K $\alpha$  線)[2]が報告されている。実際に STJ を用いて、n 型 SiC の N ドープ(300 ppm)の XAFS 分析にも成功している[3]。

### 2. 研究背景

通常、STJ 検出器は Si 基板上に直接作製される。また、STJ の膜厚は合計で数 100 nm と非常に薄いため、高エネルギー X 線のほとんどが STJ を透過し Si 基板に到達する。一方で Si 基板は数 100  $\mu\text{m}$  と非常に厚く、到達した X 線は基板で吸収され、基板内で大量のフォノンを発生させる。フォンは 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 線とこの信号の分離を非常に困難にしている。この信号低減が、更なる微量軽元素分析の大きな課題となっている(Fig.1)。

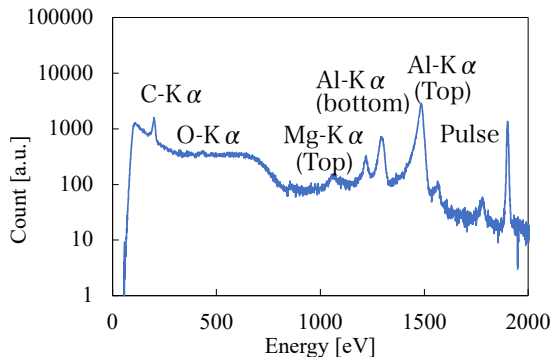


Fig.1 Spectrum at STJ fabricated on Si substrate

そこで、基板イベントの原因となる Si 基板での吸収を除外するため、STJ と基板の間にメンブレンを成膜し、STJ 直下の Si 基板を取り除く構造を提案する。この構造により、基板イベントのより一層の低減が見込める[5]。

### 3. 実験内容

本研究では、SiO<sub>2</sub>(100 nm)/SiN(5500 nm)/ SiO<sub>2</sub>(700 nm)のメンブレン 3 層膜上に作製した Nb(100 nm)/Al(70 nm)/AlO<sub>x</sub>/Al(70 nm)/Nb(300 nm)の STJ を超伝導蛍光 X 線検出器付走査電子顕微鏡(SC-SEM)に搭載し、GaN の Mg ドープ(1.0 $\times$ 10<sup>19</sup> [/cm<sup>2</sup>])のサンプルについての分析を行い、微量軽元素の識別の可否を検証した。

取得したスペクトルを Fig.2 に示す。微量軽元素である Mg を確認することができた。

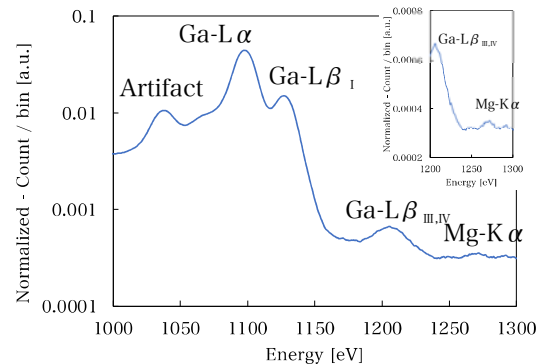


Fig.2 Sample analysis of GaN

### 4. まとめ

STJ 基板直下での X 線吸収を減らし、基板イベントの低減のため、自立メンブレン上に STJ を作製し、STJ 直下の Si 基板を除去することを提案した。同検出器で GaN の Mg ドープ(1.0 $\times$ 10<sup>19</sup> [/cm<sup>2</sup>])のサンプル分析を行ったところ、微量軽元素の Mg を確認することができた。

今後は他サンプルを用いた検証を行い、実用性評価を行う予定である。

### 謝辞

本研究にて使用したデバイスは、(国研)産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム CAVITY において作製されました。本研究(の一部)は、文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォームの支援を受けて実施されました。

### 参考文献

1. D.M. Schlosser, et al.: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., Vol.A624, (2010) pp.270-276.
2. G. Fujii, et al.: X-Ray Spec., Vol.46 (2017) pp.325-329
3. S. Shiki, et al.: J. Low Temp. Phys., Vol. 167 (2012) pp.748-53
4. Y. Fujisawa, et al.: J. Phys. Conf. Ser. Vol.1293 (2019)
5. T. Kikuchi, et al, IEICE Technical Report, vol.119, no. 369 (2020) pp. 183-187

# 低臨界電流密度ニオブ集積デバイスの 0.3K における特性評価

## Circuit Characterization of Niobium-Based Low Critical Current Density Integrated Devices at 0.3 K

田中 雅光<sup>1</sup>, 北川 佳廣<sup>2,3</sup>, 佐藤 哲朗<sup>2,3</sup>, 山本 剛<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>名大, <sup>2</sup>日本電気, <sup>3</sup>産総研)  
 TANAKA Masamitsu<sup>1</sup>, KITAGAWA Yoshihiro<sup>2,3</sup>, SATOH Tetsuro<sup>2,3</sup>, YAMAMOTO Tsuyoshi<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>Nagoya Univ., <sup>2</sup>NEC, <sup>3</sup>AIST)  
 E-mail: masami\_t@ieee.org

### 1. はじめに

我々は、希釈冷凍機内の量子ビット近傍で制御を行うために、臨界電流密度  $J_c$  を  $250 \text{ A/cm}^2$  に低減したニオブ集積デバイスの開発を進めている。近年、超伝導量子ビットの集積化が進展しているが、室温のマイクロ波エレクトロニクスを用いる場合、汎用機器の限界や高周波ケーブルからの熱流入に対する冷却能力の限界、希釈冷凍機内の限られたスペースなどがボトルネックになると考えられている。超伝導デバイスを用いた単一磁束量子(SFQ)回路は、数十 GHz での高周波動作を低消費電力で行うことができ、量子ビットの置かれる温度ステージでデジタル信号処理を導入できれば、量子ビットの大規模集積化に向けたブレイクスルーになることが期待される。

これまでの SFQ 集積回路は、Nb/AIO<sub>x</sub>/Nb 構造のジョセフソン接合を用い、液体ヘリウム温度 (4.2K) での動作を想定して設計されたものが主である。本稿では、より低温での動作を目指し、ジョセフソン接合の臨界電流値  $I_c$  やインダクタンス、抵抗など回路設計に必要な特性の評価を、<sup>3</sup>He 冷凍機を用いて 0.3K で行ったので報告する。

### 2. テストチップの設計と冷凍機への実装

本研究では、 $I_c$  を従来の 1/50 から 1/10 となる、2~20  $\mu\text{A}$  (設計上の最小値) に削減するとともに、10GHz での動作を可能にするという条件から、 $J_c$  を  $250 \text{ A/cm}^2$  に低減したプロセス [1] を用い、以下のパラメータを抽出するためのテストチップを設計した。

- ジョセフソン接合の臨界電流値 1000 個のジョセフソン接合のアレイの電流 - 電圧特性から評価
- シートインダクタンス ループ部の長さが異なる SQUID の  $I_c$  の磁場変調パターンから評価
- シート抵抗 異なる幅と長さの Pd パターンから評価
- ジョセフソン接合容量 SQUID のループインダクタンスと接合容量で決まる共振周波数から評価 [2]

作製したチップは、銅製バックプレートに貼り付け、パッケージを Fig. 1 に示すジグで<sup>3</sup>He 冷凍機の 0.3K ステージに取り付けた。信号線の雑音を抑制するため、冷凍機の 3K ステージに 1 次 RC 型低域通過フィルタ (カットオフ周波数 50kHz) を挿入した。

### 3. 測定結果

Fig. 2 に  $2.7 \mu\text{m}$  角で設計したジョセフソン接合の電流 - 電圧特性を例として示す。比較のため、同冷凍機で 3K で評価した結果と比較したところ、平均で 7% の  $I_c$  の上昇が観察された。これは、接合の電極の Nb の臨界温度を 9K と仮定して予測される  $I_c$  の上昇 2~3% と比べても大



Fig. 1 Package holder mounted on the 0.3-K stage of a <sup>3</sup>He cryocooler (the package is equipped with 48 cables).

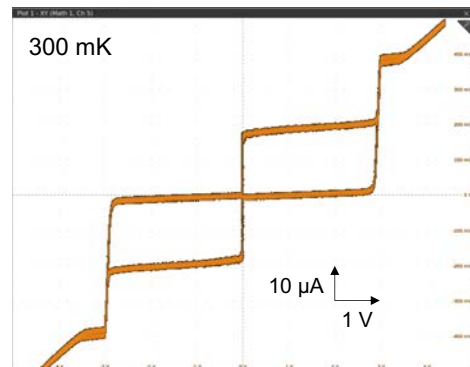


Fig. 2 Current-voltage characteristic of  $2.7 \times 2.7 \mu\text{m}$  junction.

きい。この理由については、より詳細な解析を進めている。シートインダクタンスはレイアウトから InductEx を用いて抽出した結果とよく一致していた。一方、接合容量は  $59 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  と先行研究 [3] に基づく予測に比べて大きい。これらのパラメータとシート抵抗には有意な温度依存は見られなかった。今後は、本実験で得られた知見に基づき、SFQ 回路のレイアウト設計を修正する予定である。

### 参考文献

1. M. Tanaka, Y. Kitagawa, T. Satoh, and T. Yamamoto, "Design and fabrication of low-power single-flux-quantum circuits toward quantum bit control," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, Art. no. 1700805, Aug. 2023.
2. J. Magerlein, "Specific capacitance of Josephson tunnel junctions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-17, no. 1, pp. 286-289, Jan. 1981.
3. M. Maezawa, M. Aoyagi, H. Nakagawa, I. Kurosawa, and S. Takada, "Specific capacitance of Nb/AIO<sub>x</sub>/Nb Josephson junctions with critical current densities in the range of 0.1-18 kA/cm<sup>2</sup>," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, no. 16, pp. 2134-2136, Apr. 1995.

### 謝辞

本研究は JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2067) の助成を受けたものである。本研究の一部は東京大学 VDEC 活動を通しケイデンス株式会社の協力で行われた。チップは産業技術総合研究所 CRAVITY (現 Qufab) において試作した。

# 集束イオンビーム法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ プローブの作製と評価

## Fabrication and evaluation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ probes by the focused ion beam method

大西 漢, 江畑 敦志, 大西 理志, 林 幹二, 田中 三郎, 有吉 誠一郎(豊橋技科大); 宮戸 祐治(龍谷大); 廣芝 伸哉(大工大)  
 OHNISHI Baku, EBATA Atsushi, OHNISHI Satoshi, HAYASHI Kanji, TANAKA Saburo, ARIYOSHI Seiichiro (TUT);  
 MIYATO Yuji (RU); HIROSHIBA Nobuya (OIT)  
 E-mail: onishi.baku.iv@tut.jp, ariyoshi@tut.jp

### 1. はじめに

走査型トンネル顕微鏡 (STM) とは、鋭く尖った探針 (プローブ) を試料に接近させ、バイアス電圧を印加してトンネル電流を検出し、圧電素子を用いて走査することで試料表面を観察する顕微鏡である。現在、STM プローブにはタングステンや白金イリジウムなどの常伝導金属が用いられ、材料の探求や尖鋭化などの機能向上が図られてきた。しかし、これまで高温超伝導 (HTS) プローブによる測定は行われておらず、HTS を使用することで STM の高機能化に繋がると考えられる。さらに、ナノレベルでプローブと試料間を接近させることにより、トンネル接合の実現が期待される。そこで、本研究では STM プローブの材料に  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) を採用し、HTS トンネル接合を創製することを目的として行った。

### 2. プローブの作製

まず、c 軸配向 YBCO バルク ( $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$ ) をファインカッター (平和テクニカ社製 HS-100) を用いて角棒 ( $0.6 \times 0.6 \times 5 \text{ mm}^3$ ) に切り出した。次に、研磨装置 (メイワフォーシス社製 SBT900) と集束イオンビーム装置 (Ga-FIB、日立ハイテック社製 NB5000) を用いて角棒の片端を尖鋭化した。加工条件の最適化の結果、プローブ尖鋭部の曲率半径は  $334 \text{ nm}$  という鋭利な形状を実現した (図 1 (a))。また、Ar イオンミリングによるプローブ尖鋭部の洗浄も行った。

### 3. プローブの評価

プローブ加工前に、YBCO バルクの X 線回折測定を行った。その結果、(000) の回折ピークのみが検出され、高い c 軸配向性と結晶性を確認した。また、ファインカッター加工時の冷却水による影響を調査するために、抵抗-温度特性評価を行った。その結果、YBCO 角棒の超伝導転移温度  $T_c$  は  $88.6 \text{ K}$  を示し、バルクに比べて超伝導特性に若干の劣化は見られたものの、液体窒素温度 ( $77 \text{ K}$ ) 下で十分に超伝導特性を発現することを確認した。

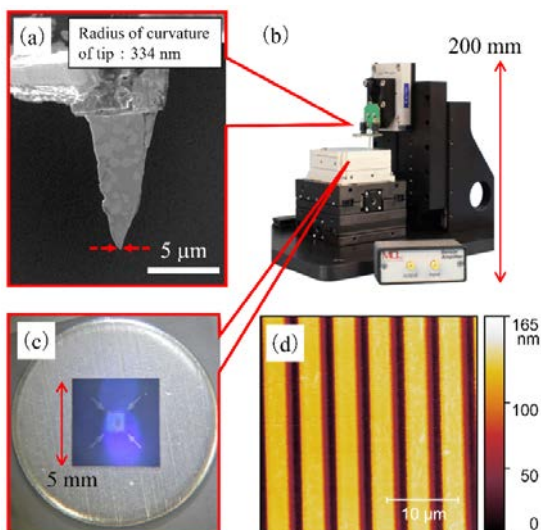


図 1(a) YBCO プローブ、(b) AFM 装置、(c) 測定試料、(d) ラインパターンの AFM 像

次に、HTS トンネル接合創製への第一歩として、YBCO プローブをチューニングフォーク駆動の原子間力顕微鏡 (AFM) に搭載し、プローブ尖鋭部の評価を行った。図 1 (b) に示す AFM 装置 (Mad City Labs 社製、SPM-M Kit) に尖鋭化したプローブを搭載し、同図 (c) に示す Si 製試料を測定した。その結果、同図 (d) の AFM 像が得られ、ピッチ  $5 \mu\text{m}$ 、高さ  $100 \text{ nm}$  のパターンを明瞭に識別できた。また、ナイフエッジ法による画像解析により、断面形状の鋭さは  $297 \text{ nm}$  と算出した。以上より、本研究で作製したプローブが試料表面の凹凸を計測するために十分な空間分解能を有することを実証した [1]。

さらに、Ga-FIB における Ga 汚染の影響を検討するために、加工後のプローブに Ar イオンミリングを行った。図 2 にエネルギー分散型 X 線分光法により測定した Ga 分布量を示す。10 分間のミリング後に Ga 濃度が減少していることが分かる。このことから、Ga-FIB 加工で汚染された YBCO プローブに Ar イオンミリングを施すことで、Ga の除去ができると考えられる。

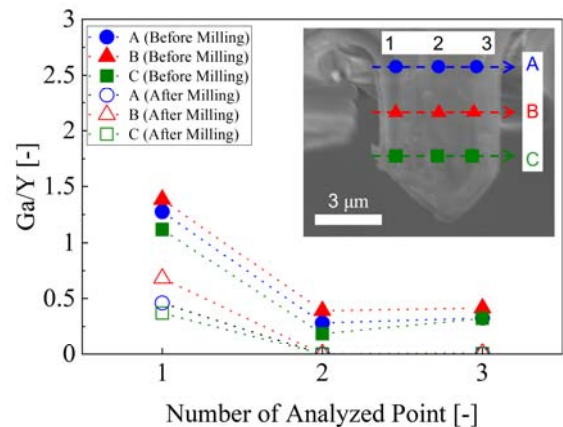


図 2 Ar イオンミリング前後での YBCO プローブ尖鋭部の Ga 濃度分布

### 4. まとめ

本研究では、HTS トンネル接合の創製を目的として、YBCO 製 STM プローブの開発を行った。まず、ファインカッターや研磨装置、FIB 装置を駆使して YBCO バルクをプローブへと加工した結果、尖端曲率半径  $334 \text{ nm}$  という鋭利な形状を実現した。次に、X 線回折や抵抗-温度特性の各種評価を経て、AFM システムへの搭載試験を行った結果、同プローブが十分な空間分解能を有することを実証した。また、Ga-FIB における汚染の影響においても、Ar イオンミリングを行うことで除去できると考えられる。従来のプローブ材料には常伝導金属や半導体などが用いられてきたが、本研究のプローブは初の高温超伝導セラミック製と位置付けることができる。

今後、YBCO プローブを冷却 STM システムへ搭載することで尖端部の超伝導特性を把握し、超伝導薄膜の試料へアプローチすることで、HTS トンネル接合の創製が期待される。

### 参考文献

- S. Ariyoshi, A. Ebata, B. Ohnishi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33(5) (2023), p.7200104

# 高 $J_c$ -REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜を用いた高耐電力超伝導アンテナの検討

## Investigation of High-power transmit HTS antenna using high- $J_c$ REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> thin films.

武田 航太郎(山梨大); 關谷 尚人, 作間 啓太  
 TAKEDA Kotaro (University of Yamanashi); SEKIYA Naoto, SAKUMA Keita  
 E-mail: g23te017@yamanashi.ac.jp

### 1. はじめに

マイクロ波方式ワイヤレス電力伝送は、長距離に電力伝送できるが伝送効率が数%程度と非常に低く、効率の改善が求められている。REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO)薄膜を用いた超伝導アンテナは損失が小さく、伝送効率の改善が期待できる。しかし、耐電力特性が低いこと(250 mW [1])が問題となっている。これは、表皮効果によりアンテナ端部に電流が強く集中し、その電流がREBCO薄膜の臨界電流密度( $J_c$ )を超え超伝導状態を保てなくなるためである。そのため、高い $J_c$ をもつREBCO薄膜が必要とされる。我々はTrifluoroacetates Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法を用いて、独自のアニール処理を行った5×10 mm角CeO<sub>2</sub>/r-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基板において非常に高い $J_c$ (約10 MA/cm<sup>2</sup>@77 K)を有するREBCO薄膜を報告した[2]。しかし、アンテナなどのマイクロ波機器作製のためには、25 mm角以上の大面積の超伝導薄膜が必要である。そこで本研究では、25 mm角のサファイア基板上に高 $J_c$ -REBCO薄膜の作製を試みた。また、その薄膜を使用した超伝導アンテナの耐電力特性の向上について電磁界シミュレーションを用いて検討したので報告する。

### 2. 高 $J_c$ -REBCO 薄膜の作製および評価

TFA-MOD法を用いて、アニール処理を行った25 mm角CeO<sub>2</sub>/r-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基板上にTFA-MOD REBCO薄膜を作製した。Fig.1(a)に作製した25 mm角のTFA-MOD REBCO薄膜を示す。TFA-MOD REBCO薄膜が全面にできていることがわかる。Fig.1(b)にXRD法で $\theta$ -2 $\theta$ スキンの測定結果を示す。サファイア基板上にTFA-MOD REBCO薄膜が成長していることがわかる。Fig.2(a)に $\Delta\phi$ の配向性を、(b)に $J_c$ 分布@77 Kを示す。どちらも5×10 mm基板上に作製したREBCO薄膜の $\Delta\phi$ 、 $J_c$ の測定値と近い。面内の配向性が1°以下と小さいため、高い $J_c$ が得られたと考えられる。25 mm角の基板上に均一な配向性と超伝導特性を有するTFA-MOD REBCO薄膜が作製できたと考えられる。TFA-MOD REBCO 薄膜の $J_c$ は最大9.9 MA/cm<sup>2</sup>@77 Kを示し、市販REBCO薄膜(Ceraco社)の約3 MA/cm<sup>2</sup>@77 Kに対し、約3.3倍の $J_c$ が得られている。また、表面抵抗( $R_s$ )は22 GHzで2.3 m $\Omega$ @77 Kと市販REBCO薄膜より低い値になっている。超伝導アンテナ使用環境の低温(40 K)ではTFA-MOD REBCO薄膜の $J_c$ は60 MA/cm<sup>2</sup>を超え、市販REBCO薄膜[11.3 MA/cm<sup>2</sup>(推測値)]に比べ、約5.5倍の $J_c$ が得られている。

### 3. 超伝導パッチアンテナの設計

Fig.3に電磁界解析シミュレーションを用いて設計した超伝導アンテナの構造と放射パターンを示す。アンテナの形状は、高い耐電力特性が得られる正方形のパッチアンテナで設計した。この超伝導パッチアンテナの利得の最大値は8.1 dBであり、銅アンテナの利得(4.5 dB)と比較して3.6 dB高く、利得の向上による伝送効率の改善が期待できる。シミュレーションから得られたアンテナ端部電流から、超伝導パッチアンテナの耐電力特性の計算を行った。市販REBCO薄膜を用いた超伝導パッチアンテナの耐電力特性は先行研究[4]をもとに計算し、1.64 W@35 Kと予測される。

耐電力特性には $P \propto J_c^2$ の関係があると考えられるため、高 $J_c$ -REBCO薄膜を用いた超伝導パッチアンテナの耐電力特性は市販REBCO薄膜を用いたものより、77 Kで約11倍、40 Kで

は約30倍になると予想され、50 W@40 Kを超える可能性があることがわかった。計算の詳細は当日報告する。

### 4. まとめ

TFA-MOD 法を用いて 25 mm 角のサファイア基板上に高 $J_c$ -REBCO 作製を行い、実際に良好な特性をもつ REBCO 薄膜が得られた。この薄膜を用いた超伝導アンテナの耐電力特性は 50 W を超えることが推測され、耐電力特性を大幅に向上できる可能性があることを明らかにした。今後は、TFA-MOD REBCO 薄膜を用いた超伝導アンテナを作製し、周波数特性と耐電力特性の測定を行う。

### 参考文献

- [1] K.Ehata et al., Electronics and Communication in Japan **82** (1999) 915
- [2] K.Sakuma et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58** (2019) 053001
- [3] K.Sakuma et al. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 25, NO.3, Feb 2023
- [4] N.Sekiya, Physics Procedia **65** (2015) 205

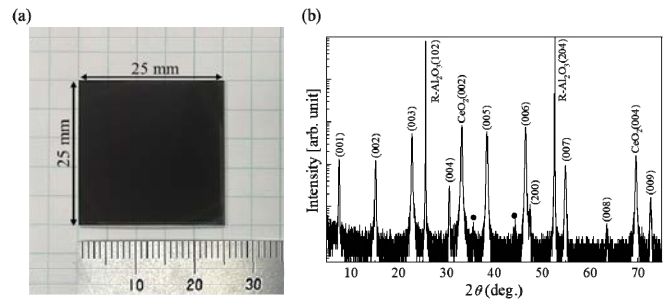


Fig.1 (a) Photograph of 25 × 25 mm TFA-MOD REBCO thin film and (b) XRD  $\theta$ -2 $\theta$  scan for TFA-MOD REBCO thin film.

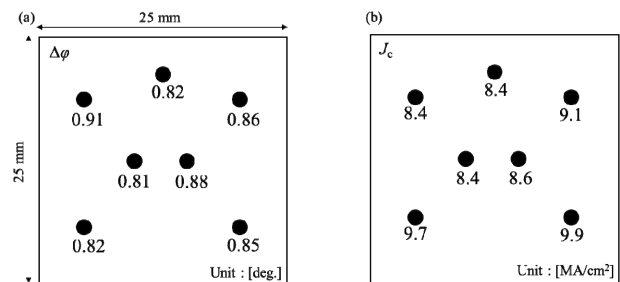


Fig.2 (a)  $\Delta\phi$  and (b)  $J_c$  at 77 K maps for TFA-MOD REBCO thin film.

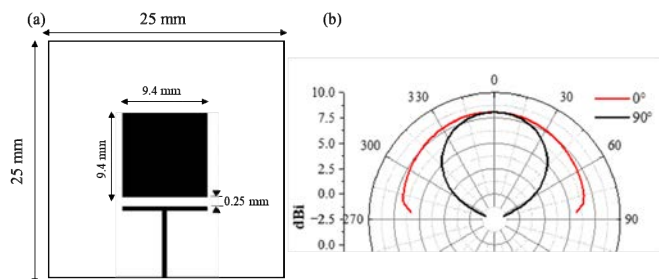


Fig.3 (a) Structure and (b) radiation pattern of superconducting patch antenna.

# 小型超電導機器の並列ガス循環冷却技術の開発(1) –並列流路の温度制御–

## Development of parallel gas circulation cooling technology for compact superconducting equipment (1) –temperature control of parallel flow path –

高木 紀和, 高橋 政彦, 上野 航生, 栗山 透, 福島 武人, 上田 紘司, 金谷 和長 (東芝エネルギーシステムズ)  
 TAKAGI Norikazu, TAKAHASHI Masahiko, UENO Koki, KURIYAMA Toru, FUKUSHIMA Takehito, UEDA Koji,  
 KANAYA Kazuhisa (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)  
 E-mail: norikazu1.takagi@toshiba.co.jp

### 1. 背景

複数の小型超電導・極低温機器を一つの冷却源と並列流路を用いて循環冷却するシステムを開発している。各流路の熱負荷変化に応じた制御が課題である。前報では制御に用いる小型の低温バルブと低温流量計を試作し、単流路での流量計の評価と温度制御について報告した [1]。本報では、試験装置を並列流路に改造し、温度制御試験を実施、対応する解析結果との比較を報告する。

### 2. 試験装置

試験装置の構成を Fig.1 に示す。室温部の圧縮機で昇圧されたヘリウムガスは、2段 GM 冷凍機と2台の熱交換器によって冷却された後3流路に分岐し、各流路に設けた銅ブロックを冷却する。各銅ブロックには熱負荷を模擬したヒータ(HS1~HS3)を備えた。分岐部温度(T1)は、冷凍機2段ステージに設けたヒータ(H2nd)の出力で調整する。各流路には前報[1]で動作検証したモータ駆動の流量調整バルブと低温流量計を設けた。

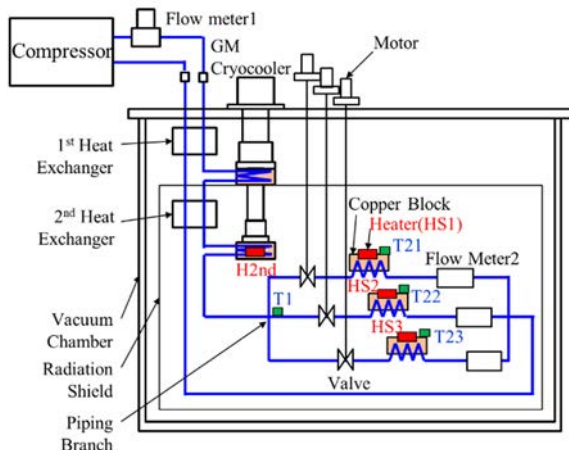


Fig.1 Flow diagram of helium gas cooling system.

### 3. 試験方法

各銅ブロックのヒータ出力を変化させた際に、3流路の銅ブロック温度(T21~T23)を等しく、かつ全体としては低い温度となるようバルブ開度を制御する。制御方法は、目標温度を3流路の平均温度に対してわずかに低い温度に設定するPD制御とした。分岐部温度 T1 を 20K、3流路の合計流量は 0.5g/s、出口圧力は 0.7MPa である。熱負荷ヒータの出力変化は、制御の応答性評価のためステップ状とし、流路1を 6W、流路2と流路3を 3W とし温度均一制御を行う定常状態から、前者を 3W に下げ、後者を 6W に上げた後、再び元の状態に戻した。

### 4. 解析方法

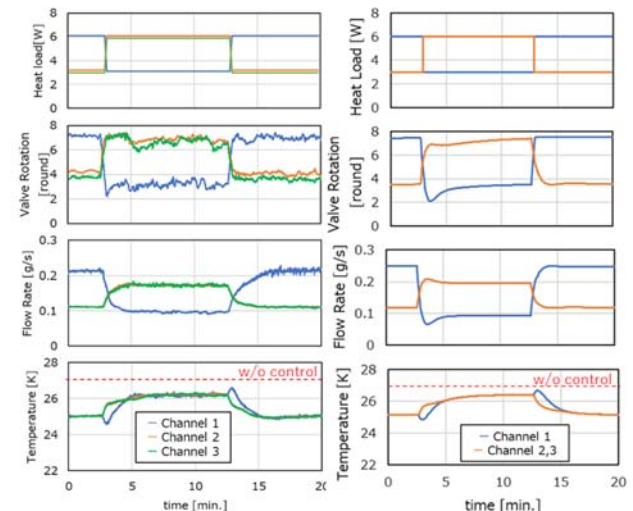
解析は3流路の分岐部から合流部までに対して行い、バルブ、銅ブロックの熱容量、熱交換器、配管をモデル化した。境界条件を試験と同じ入口温度 20K、出口圧力 0.7MPa、3流路の合計流量 0.5g/s で一定とした。バルブ制御は試験と同様の PD 制御とした。

### 5. 試験結果

試験の熱負荷、バルブ開度、流量、銅ブロックの温度履歴を Fig.2(a)に示す。初期の定常状態では、3流路の温度は等しく 25.0K であった。熱負荷の変化に伴い、流路1ではバルブが閉じて流量が低下し、一旦温度が下がった後に約 2 分で3流路の平均温度 26.1K に収束した。流路2と3では温度が上昇し、平均温度に収束した。熱負荷を元に戻す際には、過渡時に流路1の温度が最高 26.5K となった後、初期温度の 25.0K に収束した。過渡時の3流路間の温度差は最大 1.1K となった。比較として、並列流路の制御を行わない場合の3流路の最高温度を Fig.2(a)の温度グラフに赤線で示した。熱負荷の小さい流路の流量を熱負荷の大きい流路に配分する制御により、全ての時間帯で最高温度を低く抑えられた。

### 6. 解析結果

試験と同様の項目の解析結果を Fig.2(b)に示す。過渡時の3流路の銅ブロックの温度差は最大 0.8K、最高温度は 26.6K となり、試験に近い値となった。3流路の温度は熱負荷変化後 2 分程度で平均温度に収束し、概ね試験結果を再現した。



(a) Experiment

(b) Simulation

Fig.2 Temperature and flow rate profile of temperature control under heat load variation.

### 7. まとめ

3並列のガス循環冷却流路において、各流路の熱負荷を変化させ、3流路の温度均一制御を実証した。温度制御により、制御しない場合と比べて最高温度を低く抑えられる効果を示した。また、試験に対応した3並列流路部の解析を行い、バルブと温度の応答は試験結果を再現し、並列流路の温度制御について解析での評価が可能となった。

### 参考文献

1. N. Takagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.40.

## 小型超電導機器の並列ガス循環冷却技術の開発(2) -極低温ガス流量計の特性評価-

### Development of parallel gas circulation cooling technology for compact superconducting equipment (2) -characteristics of low temperature gas flow meter-

高橋 政彦、高木 紀和、栗山 透、上野 航生、福島 武人、上田 紘司、金谷 和長(東芝エネルギーシステムズ)  
TAKAHASHI Masahiko, TAKAGI Norikazu, KURIYAMA Toru, UENO Koki, FUKUSHIMA Takehito, UEDA Koji,  
KANAYA Kazuhisa (Toshiba Energy Systems)  
E-mail: masahico.takahashi@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

ガス循環冷却系の研究開発では熱伝達、熱輸送や圧力損失を対象とするが、これらには全て流量が関係し、ガス流量の測定は非常に重要となる。特に低温で分岐する配管系で、個別の配管の流量を測定するためには、低温流量計が必要となる。われわれはガス循環冷却系の開発[1]で Fig. 1 に示す熱式流量計を報告した。この流量計はガスをヒーター加熱し、その前後の温度差  $\Delta T$  を測定することで、式 1 より質量流量を求める。

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (\text{式 1})$$

$Q$ : ヒーター入力(W),  $m$ : 質量流量(kg/s),  $C_p$ : 比熱(J/kg K)

本方式は十分な断熱を前提としているため、一般の流量計としては使われていないが、極低温の装置では真空断熱が施されており、相性が良い。また、温度計とヒーターのみで流量計を構成でき、可動部が無いので信頼性が高く、組み込みが容易な利点もある。

原理的にはトーマスガスメーターとして知られているものと同じであるが、本研究で用いている流量計ではヒーターと温度計を配管の外側に配置している。このため、新たな測定誤差要因が生じる。本報では温度助走区間による誤差と配管熱伝導による誤差について報告する。

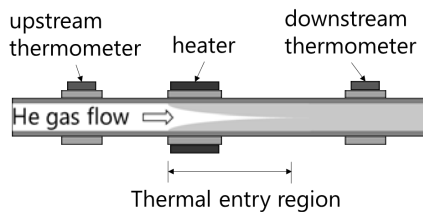


Fig.1 Schematic figure of thermal mass flow meter

#### 2. 温度助走区間による誤差

本流量計ではヒーターを配管の外側に配置しており、配管近くのガスのみが加熱され、配管内のガスに温度境界層が発生する。ガス温度も配管を介して計測されるため、式 1 を満たすには、温度境界層が十分発達した地点で温度を計測する必要がある。この対策としては、下流側温度計の位置を温度助走区間よりも後方に配置する。乱流域での温度助走区間長さ  $L_T$  は式 2 [2] で求められる。

$$L_T = 4.4 \times D \times Re^{\frac{1}{6}} \quad (\text{式 2})$$

$D$ : 配管直径(m),  $Re$ : レイノルズ数

本研究の試験範囲である、流量 0.1~0.8 g/s、温度 30 K、圧力 0.6 MPa の条件では  $L_T = 100 \sim 130$  mm となる。

実際にヒーター後方 30 mm、130 mm、260 mm に温度計を配置し、流量を求めた。Fig. 2 に温度計のヒーターからの距離に対する、測定した質量流量 ( $m$ ) と直列に配置した室温の質量流量計 ( $m_0$ ) との誤差を示す。30 mm では 35~40 % 小さく出ており、130 mm では誤差 6 % 以内、260 mm では 2 % 程度に収まっている。

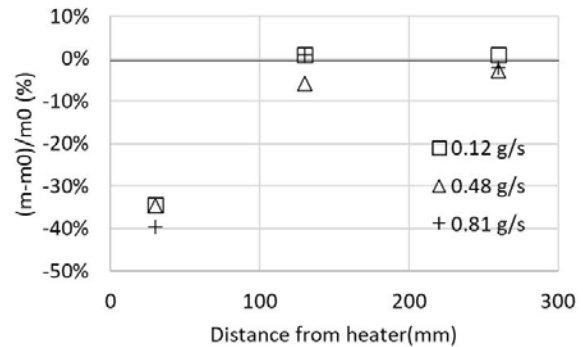


Fig.2 Relationship between distance from heater and flow meter error

#### 3. 配管熱伝導による誤差

もう一つの技術課題として、ヒーターと温度計が同一の配管に取り付けられているため、配管の伝導による伝熱が発生する。定性的には、ヒーター加熱部周辺の配管温度がガス温度よりも高くなり、温度計がこの温度を測定してしまうことである。この配管の温度分布はガスの熱伝達と配管の熱伝導の比率で決まるので、この影響を数値計算で定量的に評価した。

本流量計ではヒーターから 30 mm 上流に配置した幅 10 mm の銅ブロック上に上流側温度計を配置している。そこで、この位置での配管温度とガス温度の差を求めた。流量 0.1 g/s、ヒーター 2 W の条件での計算結果を Fig. 3 に示す。温度計位置での配管とガスの温度差は 0.01 K 以下で、無視できることが分かった。

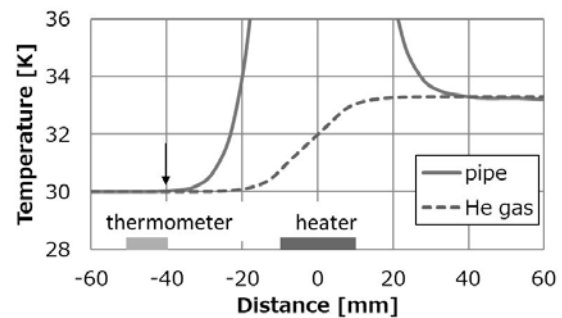


Fig.3 Calculated temperature distribution

#### 4. まとめ

試作した熱式流量計の誤差要因を分析し、上流および下流側温度計の設置位置を適正にすることで、誤差 6 % 以内で測定できることが分かった

#### 参考文献

- N. Takagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.40
- Yunus A. Cengel, Robert H. Turner: Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill (2011) p.760



# NMR マグネット向け冷媒蒸発抑制装置 Evaporation Suppression System for NMR Magnets

松本 拓也, 永濱 秀明, 福山 和宏, 谷 直俊, 横山 彰一, 伊藤 聡(JASTEC);  
宮本 哲雄, 濱津 順平, 廣瀬 政宣, 小松 功典, 末松 浩人(日本電子)

Takuya Matsumoto, Hideaki Nagahama, Kazuhiro Fukuyama, Naotoshi Tani, Shoichi Yokoyama, Satoshi Ito (JASTEC);  
Tetsuo Miyamoto, Junpei Hamatsu, Masanori Hirose, Takanori Komatsu, Hiroto Suematsu (JEOL)  
E-mail: matsumoto.takuya-1@kobelco.com

## 1. はじめに

ヘリウムは世界的な需要増加と供給不足により、近年価格の高騰や入手が困難な状況が続いており、持続可能な運用が求められている[1]。NMR(Nuclear Magnetic Resonance)マグネットは超電導コイルの冷却に液体ヘリウムと液体窒素を用いており、定期的な補充が必要である。そこで、NMR マグネットの液体ヘリウムと液体窒素の蒸発量を大幅に低減する冷媒蒸発抑制装置を開発した。

## 2. 冷媒蒸発抑制装置の概要

装置の構成図を Fig.1 に、NMR マグネットに搭載した写真を Fig.2(a)に示す。本装置は、設置高さおよびメンテナンス性を考慮し GM 冷凍機はモータ側を下にしている。1st および 2nd ステージにそれぞれ窒素およびヘリウムの冷却室を備えている。冷却室は断熱移送管を介して、NMR マグネットの各貯液槽に接続している。移送管は気液二相流が対向する構造としている。

NMR 測定ではわずかな振動がノイズとなって現れる。特に 10 Hz 以下の低周波領域が問題になる。それに対して、GM 冷凍機の往復運動周期は約 1 Hz である。対策として、振動の低減(制振)と伝達の抑制(防振)が重要と考え、装置架台の支持位置をパラメータに振動解析を行い、固有振動数を評価した(Fig.2(b), Table1)。解析結果より、固有振動数をより高くできるマグネット支持脚への固定を採用した。なお支持脚の上端には防振機構が備わっており、マグネットへの振動伝達を低減している。さらに制振の観点から、移送管にはフレキシブルホースを用いた。

貯液槽内を正圧に維持するための制御機構を有する。各槽内圧力を調整器にフィードバックし、圧力を一定に保つよう冷却室に設けたヒータの出力を制御している。装置の異常時に動作するリリーフ弁のクラッキング圧を考慮し、制御圧力を設定している。加えて、ヒータ異常などで負圧を検知した際に緊急停止などの安全機能も搭載している。

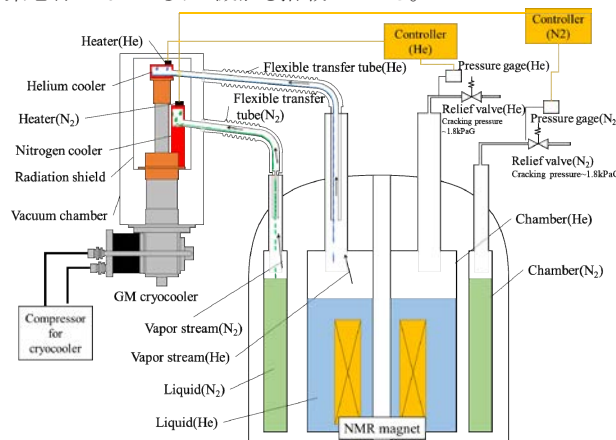


Fig.1 Configuration of Evaporation Suppression System.

## 3. 性能試験

ヘリウム側の初期冷却過程を Fig.3 に示す。運転開始から 80 分後に 2nd ステージが最低温度に到達し、180 分後に蒸発

抑制が開始された。以降はヒータ出力の調整により内圧を一定に保つことができています。

本装置を NMR マグネットに搭載し、NMR 測定や長期の検証試験を行った。NMR 測定では、装置搭載による発生ノイズが支障のないレベルであることを確認し、長期検証では半年以上にわたって±0.02 kPa の範囲で圧力が制御できており、冷媒の蒸発は認められていない。

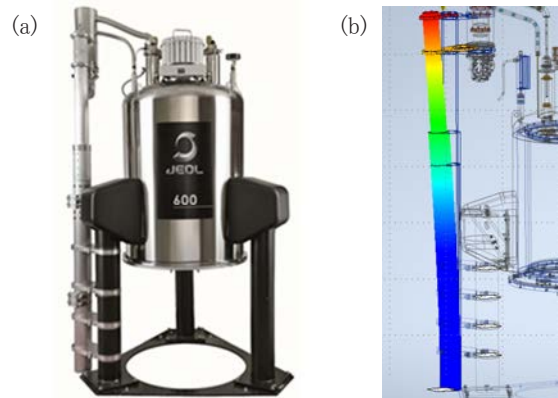


Fig.2 (a) Evaporation Suppression System attached to an NMR magnet.  
(b) Vibration analysis (Fixed with floor, Mode 1).

Table1 Fixing method of the stand and natural frequencies.

Mode number	Fixed with	
	Floor	Magnet support
1	19.0 Hz	35.2 Hz
2	19.3 Hz	37.8 Hz
3	74.8 Hz	100.0 Hz
4	75.0 Hz	103.2 Hz

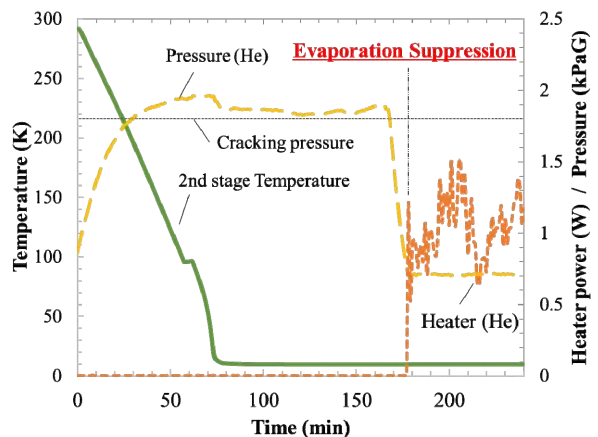


Fig.3 Initial cooling properties of helium unit.

## 参考文献

1. S. YOSHIDA: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 56, No. 3 (2021) p.135-141

# 多層断熱材の巻き付け強さの違いによる侵入量への影響

## Influence of different winding strengths on multi-layer insulation on the heat leak

渡邊 裕文, 小林 東矢, 神田 昌枝, 山口 作太郎 (中部大)

WATANABE Hirofumi, KOBAYASHI Toya, KANDA Masae, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: h\_watanabe@isc.chubu.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導送電の送電線を構成する低温配管には断熱のために多層断熱材(Multi-Layer Insulation, MLI)が用いられるが、その断熱性能は MLI の施工方法に大きく依存する[1]。超伝導送電用低温配管の断熱性能を向上させる MLI の施工方法を調べるために、カロリメーターを用いて図 1 に示す 3 種類の巻き方で熱侵入量の測定を行い、その結果を比較した[2]。それによると、図 1 の(a)の片側を糸で縫いブランケット化し、最外層のみ継ぎ目を覆うように巻き付けた場合と、(b)の一枚の MLI フィルムを連続的にスイスロール状に巻き付けた場合と、(c)の MLI フィルムを一層ずつ、継ぎ目部分をタンクの外周で 180 度ずつ交互になるように巻き付けた場合では、(a)と(b)は同程度の熱侵入量だったのに対し、(c)はそれらよりも少ない熱侵入量だった。(a)と(b)は MLI の巻き付け周長が各層で同じ長さになるよう施工したのに対し、(c)は外側の層ほど巻き付け周長が長くなるよう施工した。(a)と(b)については外側の層が内側の層を締め付ける形となるため、層間の圧縮圧を減らせば熱侵入量が減少すると予想した。今回、これを確認するため、(b)の場合に対して外側の層ほど巻き付け周長が長くなるよう MLI を施工し、熱侵入量の測定を行った。今回はその結果を報告する。

### 2. 実験方法

実験ではガードタンク付き縦型ボイル・オフ・カロリメーターを用いた。図 2 にその模式図を示す。液体窒素タンクは上中下の 3 段式であり、中タンクが測定用のタンク、上下タンクが軸方向からの熱の侵入を防ぐガードタンクである。タンクに MLI を施工し、中タンクからの蒸発窒素ガス流量を測定することで熱侵入量を測定する。又、液体窒素タンクの温度を TL1 ~6 の熱電対により測定する。液体窒素タンクは低温配管の内管を模擬した円筒形で、外径は 89.1 mm であり、従って、周長は 280 mm である。測定に用いた MLI はカネカ製 KFHN-9B05 であり、巻き付けは図 1(b)の方法で行った。前回発表した測定では 1000×2380 mm のフィルムを、長辺を巻き付け方向として、7層になるように巻き付けた。その際、一番内側の層から外側の層まで一巻き 340 mm と同じ長さとした。一方、今回の測定では同サイズ(1000×2380 mm)のフィルムを、最内層を一巻き 310 mm とし、一層毎に 10 mm 長くし、最外層 370 mm とすることで7層になるように巻き付けた。このようにすることにより、内側から外側に向けて緩くなるよう施工した。

実験では MLI を巻き付けた液体窒素タンクを外容器内に取り付けした後、MLI からの放出ガスを十分に減らすために 100 時間以上排気を継続し、外容器内の真空度が  $3 \times 10^{-3}$  Pa 以下に到達後、液体窒素タンクに液体窒素を充填した。カロリメーター内部が十分に冷えるのを待ったため一晩置いた後、液体窒素を再充填し、中タンクに流量計を接続し、測定を開始した。外容器温度は熱電対による温度の測定結果を元に温度調節器とヒーターにより制御した。又、別途 5ヶ所で熱電対により外容器温度を測定した。

### 3. 測定結果

外管の設定温度を 35.0 °C とした際の測定結果を図 3 に示す。FR は窒素ガス流量を示す。TL4 は中タンク入口直上の温度であり、その温度が上昇した後の 1 時間のデータを中タンクが丁度満液の時のデータとして解析に用いた。この時の平均流量は 0.0655 L/min であり、熱侵入量に換算すると  $0.421 \pm 0.011$  W/m であった。以前の巻き方で同じ設定温度で測定した結果は  $0.419 \pm 0.011$  W/m であり、今回の結果と一致している。このことから、今回の実験条件の範囲では巻き付けの強さの違いにより熱侵入量の変化は起きないことが分かった。

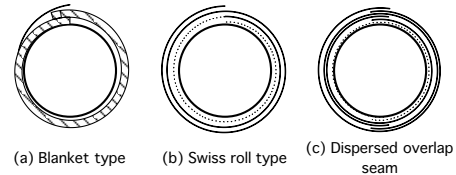


Fig. 1 Winding methods of MLI

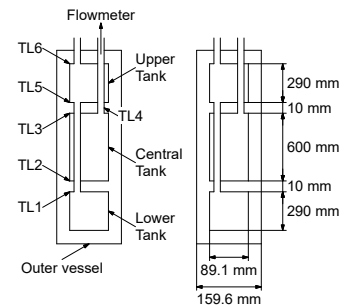


Fig. 2 Experimental setup

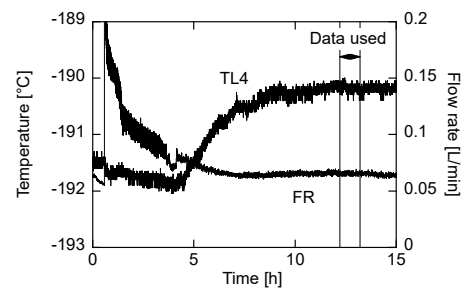


Fig. 3 The result measured at the outer vessel temperature setting of 35.0 °C

### 参考文献

1. H. Watanabe, et al.: J. Phys: Conf. Series, Vol. 1590 (2020) 012059.
2. H. Watanabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2018) p.42.

# Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の反強磁性転移温度と比熱に対する Ni, Zn 置換効果

## Effects of Ni and Zn substitutions in Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> on the specific heat

松本 圭介, 柏原 優樹, 平岡 耕一(愛媛大); 上床 美也(東大)

MATSUMOTO Keisuke, KASHIHARA Yuki, HIRAOKA Koichi (Ehime Univ); UWATOKO Yoshiya (Univ. of Tokyo)

E-mail: matsumoto.keisuke.cv@ehime-u.ac.jp

### 1. 緒言

Gifford-McMahon 冷凍機など蓄冷式冷凍機の 4 K での冷凍性能は、10 K 以下の蓄冷材の比熱の大きさに依存する。そのため、10 K 以下で磁気秩序に伴う比熱のピークを示す磁性蓄冷材が利用されている。冷凍性能を向上させるためには、10 K 以下で比熱の大きな磁性蓄冷材の開発が必要である。Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の比熱は、 $T_N^{\text{Gd}}=6.6$  K で Gd の磁気モーメントの反強磁性秩序に伴う大きなピークを示す。Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の Cu<sup>2+</sup>(3d<sup>9</sup>) を Ni<sup>2+</sup>(3d<sup>8</sup>), Zn<sup>2+</sup>(3d<sup>10</sup>) で置換することで Cu の反強磁性転移温度  $T_N^{\text{Cu}}$  が低下し、 $T_N^{\text{Gd}}$  が上昇したという報告があるが、その起源については述べられていない[1]。Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> がとる正方晶 T' 構造の特徴は、CuO<sub>2</sub> 面からなる層と Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 層が積層することである。Gd の磁気モーメント間の反強磁性相関に、CuO<sub>2</sub> 面内の二次元反強磁性相関が影響を与えていると予想される。そのため、比熱がピークを示す温度  $T_N^{\text{Gd}}$  を、CuO<sub>2</sub> 面内の Cu を Ni や Zn で置換することで制御できる可能性がある。そこで本研究では Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の Cu を Ni や Zn に置換した Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>O<sub>4</sub>, Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>O<sub>4</sub> の磁性や熱物性について調べた。

### 2. 実験方法

原料粉末の Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, ZnO, NiO をそれぞれ空気中で煅焼した後に秤量し、播潰気を用いてエタノールによる湿式混合を行った。その後大気中 900°C で 10 時間仮焼きし、大気中 1000°C, 45 時間で焼成した。この際、中間粉碎と混合を 2 回行った。最後に 1050°C, 3 時間焼結し、Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>O<sub>4</sub>, Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>O<sub>4</sub> (x=y=0, x=0.03, 0.05, y=0.01, 0.05, 0.1) を作製した。試料評価として、粉末 X 線回析による構造解析と SEM-EDS による元素分析を行った。物性は、磁化を SUQID 磁束計を用いて 3 K~400 K, 比熱を熱緩和法により 2 K~20 K で測定した。

### 3. 結果

粉末 X 線回析の結果より、Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>O<sub>4</sub>, Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>O<sub>4</sub> のすべての試料で主相は T' 構造であった。リートベルト解析を用いて求めた格子定数は、先行研究と概ね一致しており、x, y に対してほとんど変化しなかった。元素分析による Ni の組成比は x=0.05 で 0.054, Zn の組成比は y=0.1 で 0.13 であった。Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>O<sub>4</sub> と Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>O<sub>4</sub> の比熱の温度依存性を Fig. 1 に示す。Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> (x=y=0) では、先行研究と同様  $T_N^{\text{Gd}}=6.6$  K で比熱はピークを示した。Fig. 1(a) の Ni 置換系では、x=0 での 6.6 K から x=0.03 で 5.85 K までピークを示す温度が低下したが、x=0.05 でのピーク温度は x=0.03 と同じであった。ピークでの比熱の値は Ni 置換によりわずかに増加した。また、 $T_N^{\text{Cu}}$  も x 増加に伴い、x=0 の 292 K から x=259 K へと低温側にシフトした。一方、Zn 置換試料では、 $T_N^{\text{Cu}}$  は y=0 の 292 K から y=0.1 の 282 K へ低下したが、Fig. 1(b) に示すように、 $T_N^{\text{Gd}}$  は Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> から変化せず、比熱は y=0 と同じ温度依存性を示した。Ni, Zn を置換したどちらの系でも、6 K 以下では HoCu<sub>2</sub> よりも大きな比熱を示した。

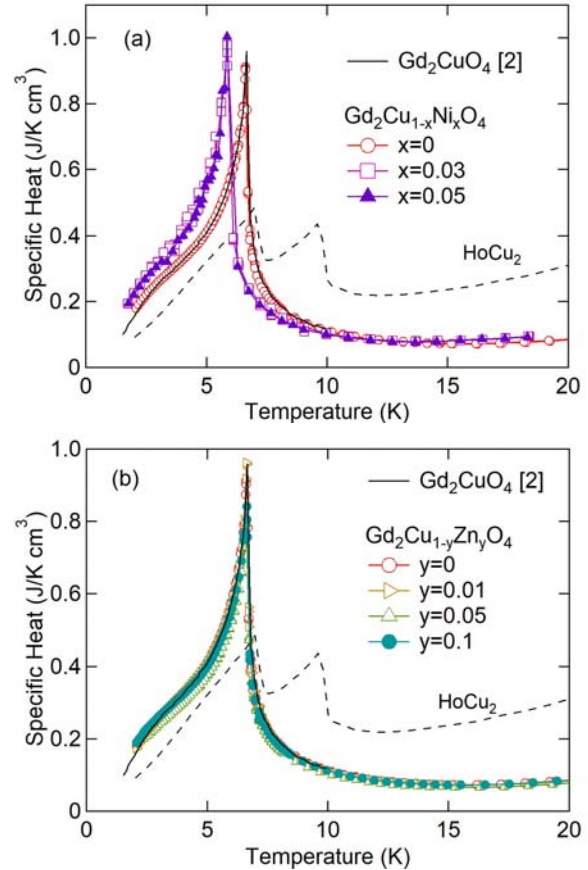


Fig. 1 Specific heat of (a) Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>O<sub>4</sub> and (b) Gd<sub>2</sub>Cu<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>O<sub>4</sub> as a function of temperature. The dotted line indicates the data of HoCu<sub>2</sub> [3].

$T_N^{\text{Cu}}$  への置換効果に差が生じたのは、Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> が電荷移動型絶縁体であることに起因すると考えられる。講演では、Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の  $T_N^{\text{Cu}}$  への電子・ホールドープの影響について述べ、それが  $T_N^{\text{Gd}}$  に与える影響について議論する。

### 4. 結言

Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の Cu サイトに Ni, Zn を置換することで、 $T_N^{\text{Gd}}$  を制御することを狙った。Zn 置換では  $T_N^{\text{Gd}}$  は変化しなかったが、Ni 置換では Gd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> の 6.6 K から x=0.05 で 5.85 K まで低下した。このことから、比熱がピークを示す温度を制御できることが示唆された。

### 参考文献

1. C. Lin, *et al.*: Physica C, Vol. 204 (1992) 127-129.
2. P. Adelman, *et al.*: Phys. Rev. B, Vol. 46, (1992) 3619-3630.
3. K. T. Matsumoto *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 60, (2021) 043001/1-3.

# 低速動作 4 K 冷凍機の蓄冷器性能の数値解析

## Numerical analysis of regenerator performance of low operating 4 K cryocoolers

増山 新二 (大島商船高専); 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)

MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College); KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)

E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

### 1. はじめに

現状の 4 K-GM 冷凍機において, 1~1.5 W 程度の能力を得るためには, 入力電力が 7~8 kW クラスの圧縮機が使用されている. GM 冷凍機の消費電力は, この圧縮機動力により, ほぼ占められる. われわれは, 2 段 GM コールドヘッド (膨張部と蓄冷器部) 内のディスプレイサを 36 rpm の低速動作することで, 2 kW クラスの低消費電力圧縮機においても, 4.2 K で 0.95 W の冷凍能力を発揮できる組合せを実験的に見出した. [1]

そこで今回は, 低速度動作が及ぼす 2 段目蓄冷器の効率や圧力損失, ならびに蓄冷器サイズ依存性を実機の実験パラメータを参考にし, 蓄冷器解析ソフト REGEN3.3[2]から得られた数値解析結果を報告する.

### 2. GM コールドヘッドと圧縮機

計算では, 実機の 2 台の GM コールドヘッドサイズを参考にし, 2 段目蓄冷器部のみを実施した. 両コールドヘッドとも住友重機械工業製であるが, 2 段目蓄冷材は, Pb, HoCu<sub>2</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を 2 台とも同じ割合で著者により再充填してある. それらの諸元を Table 1 に示す. タイプ L は, M より 2 段目シリンダサイズが大きく, 蓄冷材の充填量も多い. 一方, 2 段目膨張空間は両者ともほぼ同等である. そこで数値解析は, 蓄冷器サイズと動作速度のみを変化させ, その他は一定とした. 圧縮機は, 低消費電力用として 2 kW クラス, 一般用として 7 kW クラスの二つを想定し, 上記のタイプ M, L のコールドヘッドとそれぞれ組合せることで, 4 種類の計算を行った.

Table 1. Specifications of two types of GM cold heads.

Cold head type	Fist cylinder volume ratio*	Second cylinder volume ratio*	Second expansion space [cm <sup>3</sup> ]	Second regenerator materials filling ratio*
M	1.0	1.0	29	1.0
L	1.0	1.2	30	1.3

\* Based on type M

### 3. 数値解析結果

Table 2 は, 4 種類の組合せによる 4.2 K の冷凍能力の実験結果である. [1] なお, カッコ内の数値は, 得られた冷凍能力でのディスプレイサの動作速度を示す. タイプ L が, いずれの圧縮機の組合せとも大きな能力を発揮している. この要因の一つは蓄冷材充填量の差が考えられる.

Fig. 1 は, 数値解析から得られた 2 段目蓄冷器の圧力損失の動作速度依存性を示す. 2 kW 圧縮機で動作した時の圧力損失が, 7 kW のそれより小さくなっている. これは, 質量流量が小さくなることに起因していると考えられる. 2 kW 圧縮機では, 低速動作することで圧力損失も低下しているものの, 両タイプではほとんど差がない. 一方, 7 kW 圧縮機では全動作速度範囲において, タイプ L の方が小さい. Fig. 2 は 2 段目蓄冷器の非効率の解析結果である. 7 kW 圧縮機ではタイプ L がわずかながら小さい結果となっている. その一方で, 2 kW 圧縮機では大きな差が生じており, タイプ L の非効率が一段と小さくなっている. ただし, 動作速度による大幅な変化は見られない. 以上から, タイプ L は, タイプ M よりサイズが大きいにもかかわらず, 2 kW と 7 kW のいずれの圧縮機で動作しても, タイプ M より高い蓄冷器効率を持っている.

### 4. まとめ

低速動作 4 K 冷凍機の蓄冷器解析を行った. 低速動作による効果は, 2 kW 圧縮機で圧力損失が若干小さくなるものの, 非効率に関しては, 全体的に大きな変化は見られなかった. また, 2 種類のコールドヘッド比較から, サイズの大きいタイプ L が優れている結果となった. これから, 蓄冷材充填量が多いタイプ L では, 蓄冷器の熱容量と低損失の二つの相乗効果が, 冷凍能力改善に大きく寄与していると考えている.

Table 2. Experimental results of cooling capacity at 4.2 K with four combinations of two cold heads and two compressors.[1] Parentheses show the reciprocating speed.

Cold head type	Compressor class	Second stage cooling capacity at 4.2 K [W]
M	2 kW	0.68 (36 rpm)
	7 kW	1.6 (72 rpm)
L	2 kW	0.95 (36rpm)
	7 kW	2.1 (72 rpm)

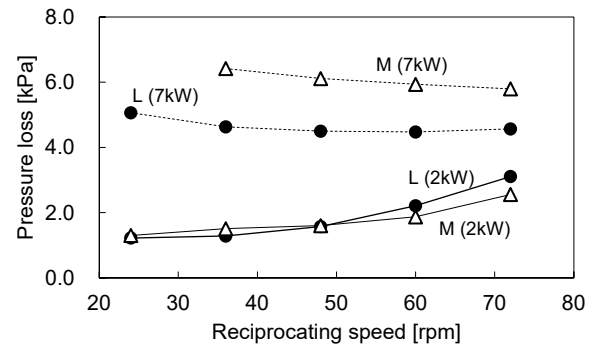


Fig. 1. Reciprocating speed dependence of pressure loss for the second stage regenerator.

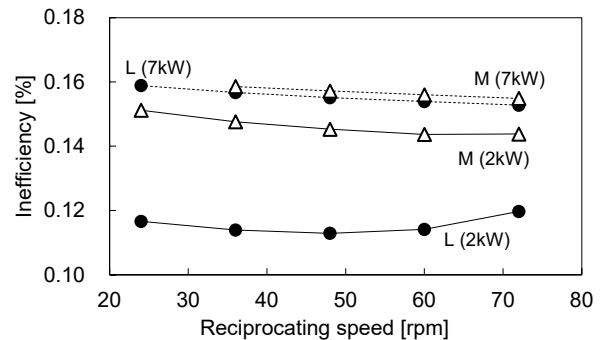


Fig. 2. Reciprocating speed dependence of inefficiency for the second stage regenerator.

### 参考文献

- 増山新二, 神谷宏治, 沼澤健則: 低温工学 **58** (2023) 69-73
- REGEN3.3: <https://trc.nist.gov/cryogenics/software.html>

### 謝辞

本研究は, JST 未来社会創造事業 JPMJMI18A3, ならびに JSPS 科学研究費助成事業 22K04058 の支援を受け実施された. ここに感謝する.

# 液体水素温度における予冷式 2 段シリーズ型パルス管冷凍機の数値シミュレーション

Numerical simulation of pre-cooling two-stage series pulse tube refrigerator at liquid hydrogen temperature

胡 荣沢, 朱 紹偉 (同济大学)

HU Rongze, ZHU Shaowei (Tongji University)

E-mail: hujiaoerya@tongji.edu.cn

## 1. Introduction

In the liquid hydrogen refueling station (LHRS), inserting the cold head of the refrigerator into the storage tank can liquefy the evaporation of liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>). This work proposes a pre-cooling two-stage series pulse tube refrigerator (PTSPTR) at LH<sub>2</sub> temperature to realize zero-boil-off of LH<sub>2</sub>, thus improving the safety and environmental friendliness of LHRSs.

## 2. Structure

Fig. 1 shows the structure and simulation model of the PTSPTR. Its theoretical efficiency is close to the Carnot efficiency, with a double inlet as the phase shifter of the first cold head, and an inertance tube and reservoir as the phase shifter of the second cold head [1]. Double inlet supplies part of the input work to the second cold head and the first stage cooling power is transported to pre-cooling heat exchanger in the second regenerator for higher efficiency at LH<sub>2</sub> temperature. In the 2D axisymmetric model, the first and second cold heat exchanger temperatures are set at 60K and 25K, respectively.

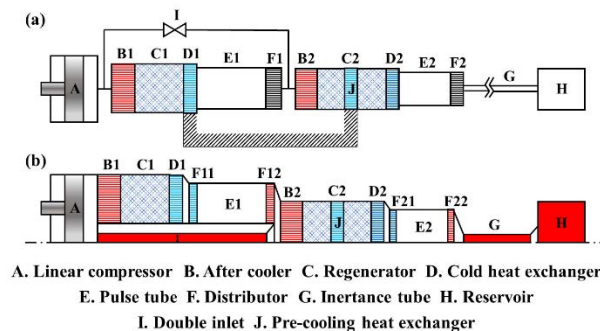


Fig. 1 Schematic of the PTSPTR structure (a) and simulation model (b).

## 3. Phase distribution

Due to the long computer time, it is hard to let regenerators reach steady condition, phase at the cold end of regenerators is used to adjudge whether the working condition is good based on basic regenerator theory.

Tubes with diameters of 2mm, 4mm, 6mm and 8mm are selected to simulate the effect of double inlet valve openings on the first regenerator phase. In all cases, the first regenerator phase is not good. The second regenerator phase is little affected

by double inlet tubes.

The second regenerator could get the good phase because it is controlled by the inertance tube. The effect of inertance tube diameters of 2mm, 4mm, 6mm and 8mm on the second regenerator phase is studied when the double inlet tube diameter is 2mm. The phase with 8mm inertance tube is better. The pressure wave leads the mass flow rate at the second regenerator cold end, but lags the mass flow rate at the first regenerator cold end (reg1c).

When changing the frequency, the first regenerator is still under phase shifting, while the second regenerator is over phase shifting. Matching the phase of the first and second regenerators is difficult. A circular gap for the resistance element with a reservoir in front of the first after cooler is added for improve the phase of the first regenerator, as Fig. 2 shown. If the circular gap is closed, the first regenerator phase is excellent, but the input work is from the first pulse tube warm end to the cold end, which makes the first cold head become a heat pump. When open the circular gap suitable, the input work is from the regenerator warm end to the cold end, the in-phase point moves to the middle of the first regenerator, which makes good phase and cooling power.

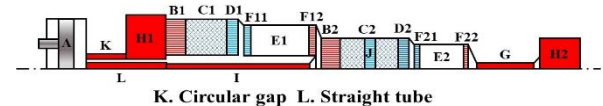


Fig. 2 A new structure of the PTSPTR.

When the double inlet tube diameter is 8mm, the pressure wave leads the mass flow rate by 19.0° at reg1c. The in-phase point is almost at middle of the first regenerator.

## 4. Conclusion

In the original PTSPTR, it is difficult to get the good phase for the first regenerator. Adding a circular gap with a reservoir can effectively improve the first regenerator phase, making it a potential new refrigerator for LH<sub>2</sub> temperature.

## Reference

[1] S.W. Zhu, M. Nogawa, T. Inoue, Numerical simulation of a step-piston type series two-stage pulse tube refrigerator. *Cryogenics* 47 (2007) 483-489.

# ダブルインレットとイナータンスチューブを備えたシリーズ・パルスチューブ冷凍機

## Series pulse tube refrigerator with double inlet and inertance tube

許 爽, 朱 紹偉 (同济大学)

Xu Shuang, Zhu Shaowei (Tongji University)

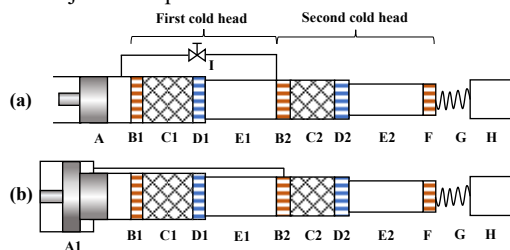
E-mail: promise\_256@163.com

### 1. INTRODUCTION

Series pulse tube refrigerator (SPTR) with double inlet and inertance tube is introduced, which has the functions of input work distribution, expansion work recovery and phase shift. Two kinds of double inlet SPTR structures, bypass type and step piston type, are studied. CFD simulation is carried out to analysis the influence factors of the phase relation, work distribution and recovery. The cooling capacity of bypass type SPTR is studied by experiments.

### 2. STRUCTURE

The structures of bypass type and step piston type SPTR are shown in Fig.1. Two cold heads are connected in series so that the expansion work of the first cold head can be used as part of the input work of the second cold head. In the existing SPTRs, the well-distribution of the acoustic power between the two cold heads is usually hard to reach because the expansion work of the first stage does not always meet the requirement of the second cold head. The double inlet adds more power for the second stage and adjust the input work distribution.

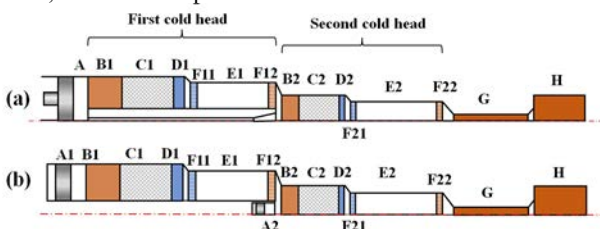


A. Compressor A1. Step piston compressor B. After cooler C. Regenerator D. Cold heat exchanger E. Pulse tube F. Distributor G. Inertance tube H. Reservoir I. Double inlet valve

Fig.1 Two kinds of double inlet SPTR structures

### 3. NUMERICAL SIMULATION

The structures of double inlet SPTR were simplified into 2D axisymmetric models in Fig.2 for CFD simulation. Refrigeration temperature was fixed to be 77 K for both cold heads, and room temperature was set to be 300 K.



A. Compressor A1. First compressor A2. Second compressor B. After cooler C. Regenerator D. Cold heat exchanger E. Pulse tube F. Distributor G. Inertance tube H. Reservoir

Fig.2 2D axisymmetric model of double inlet SPTR

The results showed that the pressure wave and mass flow rate were almost in phase at the middle of the second regenerator when the frequency was 53 Hz. The phase relation of the first cold head was less affected by frequency, but more by the dead volume of the first cold head, the opening of the double inlet valve and the swept volume ratio. It could be adjusted to the ideal state by increasing the dead volume between A1 and B1. The input work distribution could be adjusted by changing the swept volume ratio. When the swept volume ratio was 0.48, the input work of the first and second cold head was 193.8 W and

147.5 W. The recovered expansion work was 82.1 W, which was 24.1% of the total input work.

### 4. EXPERIMENTS

The parameters of bypass type SPTR are shown in Table 1, and the structure is shown in Fig.3.

Table 1 Parameters of bypass type SPTR

Listed dimensions are all given in mm

Component	First cold head	Second cold head
After cooler	d70 mm, L40 mm	d55 mm, L40 mm
Regenerator	d70 mm, L65 mm	d55 mm, L65 mm
Pulse tube	d40 mm, L127 mm	D30 mm, L107 mm

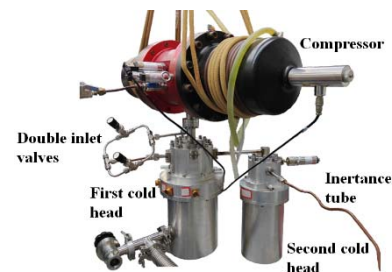


Fig.3 Bypass type SPTR

The lowest temperatures obtained with different inertance tubes are shown in case 1 and case 2 in Table 2. The inner diameter of the double inlet pipe is 4 mm, and the maximum opening of the valve is 12 turns. Keeping the left valve fully open and changing the opening of the right valve, the lowest temperature of case 2 is obtained when the valve opening is 2 turns. The results show that the double inlet has the ability to adjust the phase relation of the first cold head, but the input work of the second cold head is still not enough. Replacing one of the double inlet valves with a copper tube with an inner diameter of 6 mm and adjusting the opening of the other valve, the results of case 3 and 4 in Table 2 are obtained. When the opening is 6 turns, the lowest no-load temperature of the first and the second cold head is 80.7 K and 82.1 K. This result is better than that of the inertance tube SPTR [1].

Table 2 The lowest no-load temperature

Case	Inertance tube size	First cold head	Second cold head
1	d4 mm, L1.5 m	167.7 K	109.7 K
2	d7 mm, L2.4 m	75.8 K	162.2 K
3	d6 mm, L3 m	110.0 K	100.9 K
4	d7 mm, L2.4 m	80.7 K	82.1K

### 5. CONCLUSION

The numerical simulation and experiments of double inlet SPTR were carried out. The capabilities of phase shift, input work distribution and expansion work recovery were studied. The experimental results verified the feasibility of the SPTR.

### REFERENCE

1. M. Chen, et al.: Series inertance tube pulse tube refrigerator. Int. J. Refrig. Vol. 132 (2021) p.217-221.

# パルスチューブ冷凍機の初期設計方法の検討

## Study on initial design method of pulse tube cryocoolers

保川 幸雄, 松本 伸, 溝口 義則, 柴田 将史 (富士電機)

YASUKAWA Yukio, MATSUMOTO Noboru, MIZOGUCHI Yoshinori, SHIBATA Masafumi (Fuji Electric)  
e-mail: yasukawa-y@fujielectric.com

### 1. はじめに

小型パルスチューブ冷凍機(PTC)は計算に合いにくいと言われ、実験的手法により冷凍機性能の向上が図られてきた。しかし近年、海外において市販の計算ツールを使って設計し、冷凍機性能を評価したとする文献が散見されるようになってきた[1,2]。これまで取得してきた実験データを用いて、計算手法がどの程度実験結果と合っているかを検証し、冷凍機の初期設計に使用し得る計算方法を見出したいと考えている。最終的には試作レスによる冷凍機設計技術の確立を目指す。

### 2. 計算手法(計算ツール)の概要

3つの計算ツールを用いて計算を実施した。一つ目は、熱音響理論による解析式[3]をPythonでプログラミングした自作の計算ツール“C1”である。初期検討段階で蓄冷器の粘性抵抗が大きく、仕事流がマイナスとなる部分が出たため、このモデルを修正した。二つ目は、米ロスアラモス研究所で開発した“DeltaEC”[4]で、これは熱音響理論に基づいている。三つ目は、Gedeon Associatesが提供している“Sage”[5]である。これはオーソドックスな数値解析によるもので、この分野で最もポピュラーな計算ツールとして知られている。

### 3. 計算ツールの精度比較

アフタークーラ(AC)の検討に使用した実験データ[6]を用いて計算ツールの比較を行った。まず、C1での計算結果をFig.1に示す。横軸は流れに沿ったACを起点にしてパルス管高温端までの長さを示す。圧力の位相は合っているが、パルス管高温端での圧力絶対値が50%を超える差異になった。

Fig. 2にDeltaECとSageによる計算結果を示す。どちらの計算でも低温端温度は実験値に合わせた。計算はDeltaECではC1と同様にACからパルス管高温端までをモデル化し、Sageでは冷凍機全体をモデル化している。ピストンストローク(横軸)に対して、圧縮機とAC間での音響パワー(Wap)は両計算とも実験値とかなり近い値となっている。圧力の絶対値と位相が計算と実験でほぼ一致しているので、音響パワーの一致を裏付けている。図としては示していないが、パルス管高温端における圧力は、実験値よりも計算値の方がかなり大きく出ており40%近い差異となっている。これはC1と同様の傾向である。

### 4. 考察

今回の計算ではパルス管高温端での圧力値(絶対値, 位相)が実験値を十分に再現できていないことが明らかになった。蓄冷材であるステンレス・ファインメッシュに加工を施しているおり、計算モデルに反映できていないことが要因の一つではないかと推測している。蓄冷器をモデル化するための計算パラメータ設定上の工夫が必要となる。3つの計算ツールではそれぞれ入力形態が異なるが、設計の初期段階で使用できるものは、Sageに限定される。実機のパラメータを丁寧に見積ることにより、音響パワーは比較的良く合うことが分かった。これに対して他の2つは一部測定データが入力値として(今回は圧力値)必要となってくる。また、C1は蓄冷器等の複雑流のモデル化に課題が残り、DeltaECは計算の収束性が悪く、少しずつモデルの要素を増やす必要があることとモデル変更の場合でも変化幅を小さく抑えながら進める必要があり課題となっている。

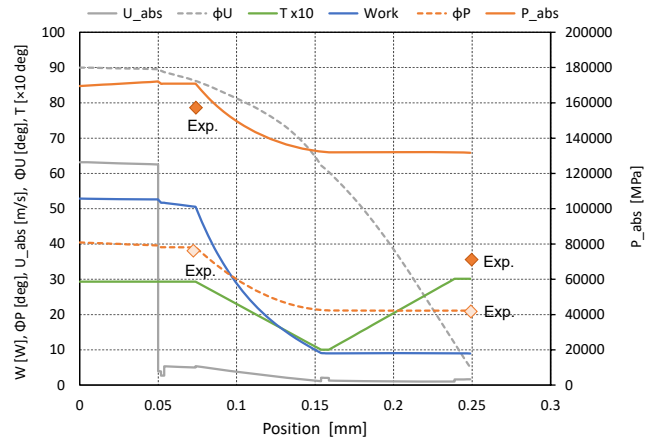


Fig.1 Calculation results by C1

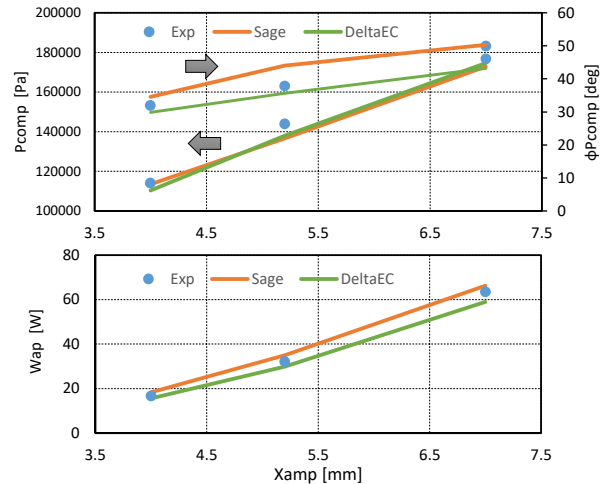


Fig.2 Comparison of Exp. and Cal.

### 5. まとめ

実験データを利用し、3つの計算ツールによる計算精度の比較を行った。今後は蓄冷器の適切なモデル化等の改善を行ってゆき、冷凍機の初期設計に資する設計計算技術の確立を目指す。

### 参考文献

- N. Wang, et al.: Cryogenics Vol. 93 (2018) 48-50
- M. Abolghasemi, et al.: Cryogenics Vol 111 (2020) 103143
- 上田祐樹ほか: 熱音響理論を用いた積層金網再生器のエネルギー変換効率の数値計算, 低温工学 Vol.51 No.8 (2016) 403-408
- J. Clark, W. Ward and G.W. Swift: Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion (DeltaEC). J Acoust Soc Am (2007) 1-291
- https://www.sageofathens.com/
- Y. Yasukawa, et al.: Experimental Study on the Effect of Aftercooler Configuration on the Performance of Pulse Tube Cryocoolers, Cryogenics (2021) 103408

# 極低温温度計セルノックスの熱線流速計としての使用可能性

## Availability of Cernox for cryogenic thermometer as a hot wire anemometer

高田 卓(核融合科学研究所); 神谷 宏治(物質材料研究機構)

TAKADA Suguru (NIFS); KAMIYA Koji (NIMS)

E-mail: takada.suguru@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

本研究は水素液化用磁気冷凍システムを開発する中で、数秒間のうちに起こる冷媒の温度変化を観察したい、流量変化を知りたいという動機によって開始された。開発中の磁気冷凍システム内では熱のやり取りにヘリウムガスを使用しており、温度並びに流速を把握することが最適化に重要である。

こうした要求に対して旧来熱線流速計という計測手法がよく用いられてきた[1]。極細のタングステン線等に電流を印加し、極僅かな自己加熱と流体による放熱によって変化する電気抵抗を精密計測することによって流速を計測する技術であり、一般流体分野のみならず、高感度を必要とする極低温に特殊な現象等の広い範囲において結果を残してきた[2]。

本報告では、この熱線流速計と同じ原理のまま金属極細線の代わりにセルノックスを使用すると、どの程度使えるものであろうかという素朴な疑問に答えるべく、試験を実施した。

### 2. 試験装置

試験は液体窒素に浸した配管にヘリウムガスを流すことで作られた 77K のガスフローによって行われた。まず、ガスボンベからレギュレータを介し電磁弁の開閉によってガスを流し、10m程度の液体窒素に浸された銅管を経てFig. 1のように温度計を配置した試験配管に送り込んだ。送り込まれたガスはアルミフィンタイプの加熱器によって室温まで温められたのち室温用流量計で流量を計測した。

試験空間には VCR1/4 インチ継手の中央に CernoxSD タイプ(T1)、ICF70 ニップルの壁に沿ってベアチップ(T2)と SD タイプ(T3)、中心軸上に 2 つの SD タイプ(T4, T5)を設置した。なお、中心軸上の T4,5 は銅配線によって自立している。

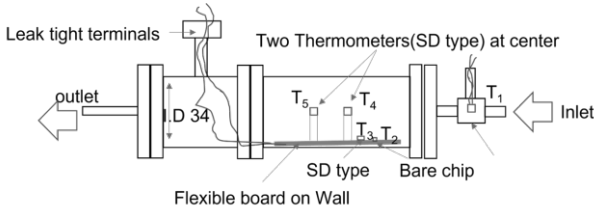


Fig.1 The illustration of the test section

サンプルには直流電流電源を用い 0.01~4.00mA の電流値を印加して試験をした。後に詳述するが、ICF70 配管内ではバルブの開閉に伴って起こる圧縮膨張の効果により、配管内の温度が過渡的に上昇、下降する。非常に狭い領域の T 字継手内の温度計においては極僅かしか現れない。この効果を観測する為、ICF70 の中央、壁にはそれぞれ 2 つの温度計を配置している。

抵抗測定は 4 端子法によって計測し、校正カーブから温度を求めた。熱線流速計においては、通常ブリッジ回路などの精密測定を伴う場合が多いが、本試験では簡便な手法でどこまで計測できるかを追求するべく、電流源から電圧計に至るまで、一般に温度計測に使われるモノを使い、特別な計器は一切用いていない。

### 3. 試験結果

Fig.2 に典型的な温度計の過渡的応答を示した。バルブの ON/OFF に応じて 5 秒程度の過渡的な温度上昇、下降が標

準的な電流値 10 $\mu$ A を流した場合でも、過電流 3mA を印加した場合においても計測されている。なお、こうした圧縮・膨張の効果による緩和時間は ICF70 の配管内に顕著に現れる。T 字継手内の温度計においては同様の効果があるものの、温度上昇幅も小さく、その緩和時間も格段に小さい。また、10 $\mu$ A 印加した T4 についてはガス流れのある無しに関わらず 77.2K 程度に落ち着くが、過電流を流した T5 においてはガス流れに依存して温度上昇に差が見られることが分かる。

この定常状態における各温度計の温度上昇分とガス流量の関係は Fig.3 の様に負の相関を持って示される。温度計のサイズや挿入する配管径にも依存するが、事前に校正すればセルノックス温度計も十分に流速計の役割を果たすことが分かった。

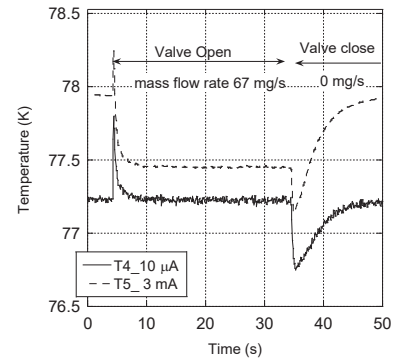


Fig.2 A typical time variation of the temperature inside ICF70 pipe with overcurrent 3mA comparison that with regular current 10  $\mu$ A

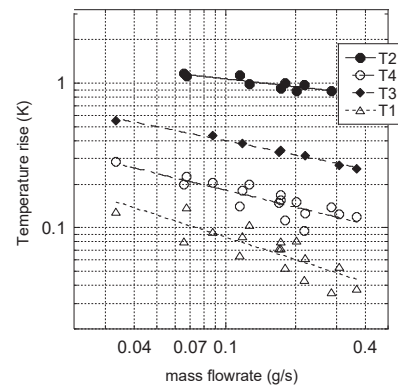


Fig.3 Temperature rises on mass flow at the bias current 3 mA

### 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)の支援を受けて実施された。

### 参考文献

1. H.W. Liepmann and A. Roshko, Elements of Gasdynamics, Dover publications, Inc. (1956) 172-177
2. T. Shimazaki, M. Murakami, T. Iida, Cryogenics Volume 35, Issue 10, 1995, Pages 645-651



# 振動ワイヤ法を利用した低温領域における水素脆化現象の検出

## Hydrogen embrittlement at low temperatures studied by vibrating wire method

太 子周, 芳賀 雄仁, 宮川 一慶, 志賀 雅亘, 稲垣 祐次, 河江 達也 (九州大学工学部)  
 TAI Zizhou, HAGA Yuuto, MIYAKAWA Kazuki, SHIGA Masanobu, INAGAKI Yuuji, KAWAE Tatsuya (Kyushu University)  
 E-mail: t.kawae.122@m.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、水素エネルギー社会の実現へむけて金属等に対する水素の侵入・拡散のダイナミクスが盛んに研究されている。これを解明する上で重要になる点が、トンネル効果の関与を明らかにすることである。水素原子は最も軽い元素であり、金属中水素はトンネル効果など強い量子性を有することが指摘されている。したがって低温でもトンネル効果によって水素侵入・拡散が進行する可能性がある。我々はこれまでナノワイヤで生成される弾道的な電子を使用して、液体水素から金属ナノコンタクト内への水素吸蔵・拡散過程の直接観測実験を行ってきた[1, 2]。その結果  $T = 18 \text{ K}$  という低温でも、電気伝導(微分伝導)測定のために局所電圧を印加したとき、液体水素から金属内に水素がトンネル効果によって吸蔵・拡散することを明らかにしている。

それではトンネル効果によって金属内に侵入・拡散した水素も脆化現象を引き起こすのか? 我々はこの問題を明らかにすることを目的に、水素侵入によるヤング率変化に注目し実験を行っている。具体的には下記に説明する振動ワイヤ(Vibrating Wire)法を用いることで、金属ワイヤ内への水素侵入によるヤング率変化を追跡する[3]。

### 2. 実験方法

振動ワイヤ法は金属ワイヤの固有振動数を測定することで、ワイヤ周りに満たされた液体の粘性を調べる方法などとして用いられてきた。本研究はこの方法を水素吸蔵検出法として応用する。図1に振動ワイヤ法実験装置の模式図を示す。サンプルのワイヤは半径数 mm の半円で、両端を固定する。このワイヤに定常磁場をかけて、交流電流を流すと、ワイヤはローレンツ力を受けて振動する。このとき、交流電流の周波数とワイヤの固有振動数が一致した時、共振が起きて誘導起電力が極大となる。つまり、交流の周波数を変化させながらワイヤの両端にかかる電圧を測定すると、共振発生時に電圧が大きく変化しワイヤの固有振動数が測定できる。ワイヤの固有振動数はワイヤの半径  $a$ 、ヤング率  $Y$ 、密度  $\rho$ 、長さ  $L$  より

$$\omega_r^2 = z_0^4 Y a^2 / 4 \rho L^4$$

と表される[3]。ただし  $z_0 = 4.73004$  (定数) である。ワイヤが水素を吸蔵すればヤング率や密度に変化が生じ、固有振動数も変化する。すなわち水素ガス導入の前後でワイヤの固有振動数に変化が起きれば、ワイヤが水素を侵入したと考えられる。

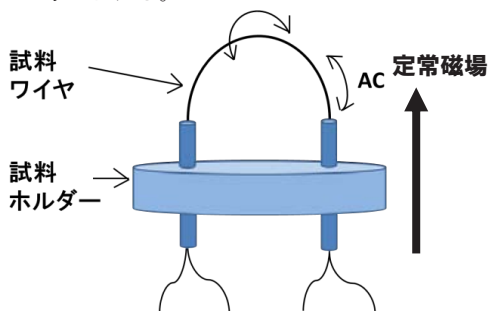


図1: Vibrating wire 法模式図

### 3. 実験結果

実験は、Pd ワイヤ、SUS ワイヤ(線径は両ワイヤともに 0.02mm)に対して水素ガスを導入した後、固有振動数の時間変化を測定した。まず Pd ワイヤに対して水素ガスを導入した際には固有振動数に大きな時間変化が見られた。図2は、室温で圧力  $P = 0.005 \text{ MPa}$  の水素ガスを導入した後の Pd ワイヤの固有振動数の時間変化を示している。固有振動数が時間とともに増加し、やがて一定の値に近づいて行くことがわかる。さらに水素を排気すると、逆方向の変化が始まる。以上の結果は Pd が水素を吸蔵・脱離することによりヤング率および密度に変化が生じ、固有振動数が変化したとすることで説明できる。一方、SUS ワイヤに対して水素を導入した場合は真空状態から共鳴振動数は変化するものの、Pd ワイヤで見られたような大きな振動数変化は見られない。これは SUS に対する水素の吸蔵はわずかなため、水素曝露後も大きな共鳴振動数に大きな変化がないと理解できる。今後は以上の実験を低温に拡張することでヤング率の温度変化を追跡する予定である。

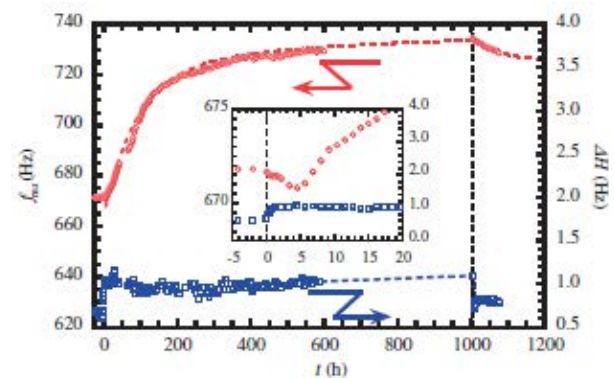


図2: 室温の Pd ワイヤに対する水素曝露後の共鳴周波数(赤)と半値幅(青)の時間変化。  $t = 0$  で  $P = 0.005 \text{ MPa}$  の水素を導入している。その後、1,000 時間後に水素を排気している。

### 4. まとめおよび今後の展望

振動ワイヤ法を用いて金属内への水素侵入によるヤング率変化を調べた。Pd の場合、水素侵入により共鳴周波数が大きく変化することが分かった。SUS の場合は Pd のような大きな変化は見られていない。今後は、測定を低温に拡張することで低温における水素侵入によるヤング率を追跡する予定である。

### 参考文献

- [1] K. Ienaga, H. Takata, Y. Onishi, Y. Inagaki, H. Tsujii, T. Kimura, and T. Kawae, Appl. Phys. Lett. **106**, 021605 (2015).
- [2] 家永紘一郎, 高田弘樹, 河江達也, 固体物理 **53**, 317 (2018).
- [3] Y. Inagaki, A. Nishimura, H. Yokooji, H. Takata, T. Kawae, Appl. Phys. Exp. **8**, 095502 (2015).

# ヘリカル型液体水素用流量計に関する基礎研究

## Fundamental study on a helical flowmeter for liquid hydrogen

章 誠豫, 武田 実, 佐藤 更, 前川 一真(神戸大)

ZHANG Chengyu, TAKEDA Minoru, SATO Sara, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)

E-mail: 219w603w@stu.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

地球温暖化と二酸化炭素排出の問題が日々深刻になると共に、化石燃料の替わりとして、水素エネルギーの活用が注目されている。最近では、液体水素運搬船でオーストラリアから日本(神戸)へ液体水素(LH<sub>2</sub>:沸点 20 K)を海上輸送するプロジェクトも進んでいる。そのとき、輸送タンクから陸上タンクへ液体水素を荷役する技術の研究開発が求められ、特に液体水素用流量計の研究開発が急がれる。我々は、新たな流量計として、ヘリカル型液体水素用流量計を注目している。本研究では、市販の計算ソフト ANSYS における数値シミュレーション結果と過去の計算結果を比較し、ヘリカル型液体水素用流量計の実現性について検討した。また、3Dプリンターによるヘリカル流路と整流器の試作も行ったので報告する。

### 2. 先行研究

先行研究では、液体における圧力とひずみ[1]の関係を求めるために、ヘリカル流路が無限長続いていると仮定し、配管内が非粘性、非圧縮の定常な流体で、LH<sub>2</sub> を流した場合と LN<sub>2</sub> を流した場合の流量とひずみの関係をベルヌーイの定理から計算した。LH<sub>2</sub> を流した場合、流量計として機能させるためには、もう一桁ほど精度の高いひずみの測定が求められた。LN<sub>2</sub> を流した場合、LH<sub>2</sub> と比べてひずみが一桁大きいので、十分に流量計として機能できるという結果が得られた。

### 3. ANSYS における数値シミュレーション

Fig.1 に数値シミュレーションで使用したヘリカル流路の概略図を示す。ヘリカル流路の仕様は、ヘリカル流路の外半径 11.6 mm、ヘリカル流路の内半径 3.6 mm で、先行研究で計算されたヘリカル流路の仕様とほぼ一致させており、ヘリカル回転の数だけが無限から 5 回転へ変化させた。また、GFRP 配管壁の厚さは 1 mm で、ひずみゲージの大きさは 5 mm × 5 mm と仮定した。ANSYS CFX において、一定の流量を伴う流体による配管内の圧力分布を計算し、圧力分布の計算結果に基づいて、ANSYS Static Structural を使用し、管内圧力の変化により生じる配管のひずみのシミュレーションを行った。

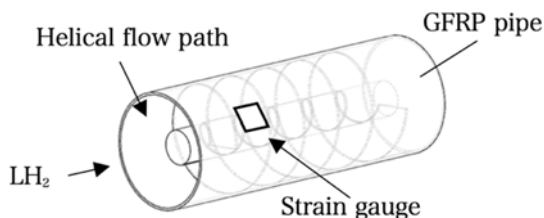


Fig. 1 Schematic diagram of a helical flow path.

### 4. 計算結果と解析

ヘリカル型液体水素用流量計の実現性を検討するため、シミュレーション結果と先行研究における計算結果を比較した。LH<sub>2</sub> を流した場合と LN<sub>2</sub> を流した場合をシミュレーションした。Fig.2 に LH<sub>2</sub> を流した場合(100 L/min)の全領域のひずみ分布を示す。また Fig.3 に LH<sub>2</sub> を流した場合のひずみのシミュレーション結果と先行研究での計算結果と比較したものを示す。

LN<sub>2</sub> を流した場合と LH<sub>2</sub> を流した場合いずれも、ANSYS における数値シミュレーションの結果は先行研究の計算結果より、ひずみが 1/4 に小さくなった。一方、圧力は大きな違いはなかった。ヘリカル流路の仕様を仮定通りにしたまま、流量計として機能させるためには、もう一桁以上の精度の高いひずみの測定が求められる。

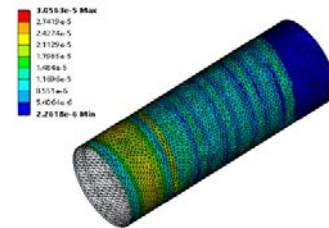


Fig.2 Strain distribution under 100 L/min of LH<sub>2</sub> flow.

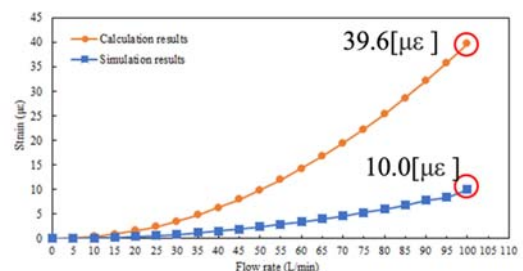


Fig.3 Flow rate vs. strain for LH<sub>2</sub> flow.

### 5. ヘリカル流路の試作

3Dプリンター (RAISE 3D 社 Pro3 シリーズ) を用いてヘリカル流路の試作を行った。試作品の材料には、PLA と PPGF30 (BASF 社) の二種類のフィラメントを使用し、極低温の環境で使用できるかを検証するため、LN<sub>2</sub> 浸漬実験を行った。また、ヘリカル型液体水素用流量計のプロタイプを作製するため、気密性の予備実験なども行った。

### 6. まとめと今後の予定

本研究より、LH<sub>2</sub> を流した場合と LN<sub>2</sub> を流した場合いずれも、ANSYS における数値シミュレーションの結果は先行研究の計算結果より、ひずみが 1/4 に小さくなり、圧力は大きな違いはなかった。流量計として機能させるためには、ヤング率の低い GFRP 配管を選択し、あるいはヘリカル流路の構造を改善する(整流器の増設など)ことで、ひずみを大きくする必要があると考えられる。今後はプロタイプを試作し、高精度のヘリカル型液体水素用流量計を開発することを目指していく。

### 参考文献

1. S. Sato, *et al.*: Measurement of apparent strain of foil strain gauge at low temperature, ICEC28-ICMC 2022, P9-B14-4142.

# 光学クライオスタットによる非超電導線材を追加した 液体水素用外部加熱型 MgB<sub>2</sub> 液面センサーの性能評価

## Performance evaluation of external-heating-type MgB<sub>2</sub> liquid hydrogen level sensor with non-superconducting wire using optical cryostat

福本 祥一, 高田 芳宏(山本電機); 武田 実, 前川 一真(神戸大); 熊倉 浩明, 松本 明善(NIMS)

FUKUMOTO Shoichi, TAKADA Yoshihiro (Yamamoto Electric Works); TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.);

KUMAKURA Hiroaki, MTSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

E-mail: s.fukumoto@manostar.co.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倍の密度となる液体水素(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少ない。これまで弊社では、神戸大学、物質・材料研究機構(NIMS)、岩谷産業株式会社と協力し、外部加熱型超電導 MgB<sub>2</sub>(二ホウ化マグネシウム)液面センサーの開発を行ってきた[1]。実際に使用されている液体水素容器に設置する実用試験を実施し、その結果をもとに改良した液面センサーを試作、評価したので報告する。

### 2. 2,000 L 液体水素容器における実用試験

センサー長1,300 mmのMgB<sub>2</sub>液面センサーを試作し、岩谷産業岩谷水素技術研究所(兵庫県尼崎市)所有の2,000 L液体水素容器に設置、容器使用時に液面を計測する実用試験を3カ月に渡り実施した。結果の一部をFig. 1に示す。容器の重量と内圧から算出した液面位置、差圧式液面センサーの計測結果、MgB<sub>2</sub>液面センサーの計測結果を各々比較すると、放出弁を閉じて内圧が上昇している際に大きな差が認められた。これは圧力変化に応じた気相部の温度変化による影響と考えられる。

### 3. 非超電導線材を追加した MgB<sub>2</sub> 液面センサー

上記の結果より、気相部の温度変化の影響を減少させるため、非超電導線材を追加した MgB<sub>2</sub> 液面センサーを試作した。測定原理をFig. 2に示す。非超電導線材とMgB<sub>2</sub>線材を平行に設置し、それぞれに測定電流を流して、出力電圧を測定する。液体水素中において、MgB<sub>2</sub>線材は超電導状態となり、電気抵抗がゼロであるが、非超電導線材はある抵抗値( $R_C$ )を示す。一方、ガス中においては両線材ともに別の抵抗値( $R_G$ )を示す。液面位置に関わらず、ガスの温度が大きく変化することで抵抗値も変化するが、MgB<sub>2</sub>線材と非超電導線材は同等の影響を受ける。よって、それぞれの線材の抵抗値を引き算すると、非超電導線材の液中の抵抗値のみが残るので液面位置がわかる。

### 4. 光学クライオスタットによる性能評価

光学クライオスタットを用いて、非超電導線材を追加したMgB<sub>2</sub>液面センサーを評価した。使用した神戸大の光学クライオスタットは耐圧力0.4 MPaGの液体水素槽を持ち、液面を目視で確認できる観測用窓が設置されている。内圧を上昇、下降させた時の液面計測値と目視による液面位置を比較した結果をFig. 3に示す。内圧の上昇に伴い実液面は上昇もしくは変化なしとなっているのに対して、液面センサーによる計測は液面の下降を示した。この誤差は内圧が高くなるにつれて大きくなり、最大で約10 mmとなった。一方で、非超電導線材を追加した MgB<sub>2</sub> 液面センサーも同様の挙動を示したが、その誤差は追加していない液面センサーより小さかった。

### 5. まとめと今後の課題

液面の目視観察によって、容器気相部の温度変化に伴う液面センサーの計測誤差が認められたが、非超電導線材を

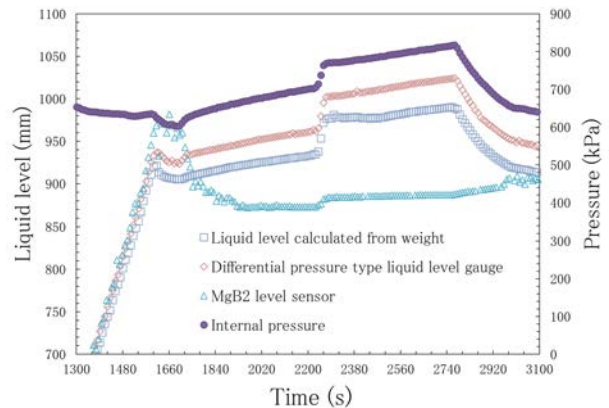


Fig.1 Measurement results of each level sensor and internal pressure of 2,000 L tank.

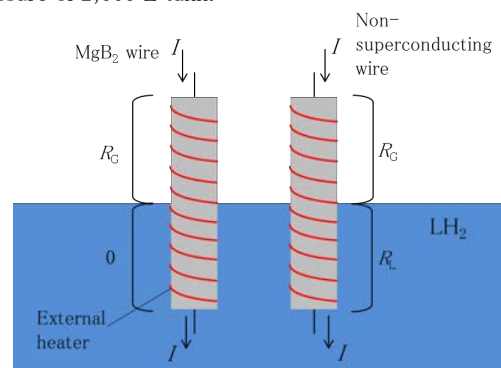


Fig.2 Principle of the external-heating-type MgB<sub>2</sub> liquid hydrogen level sensor with non-superconducting wire.

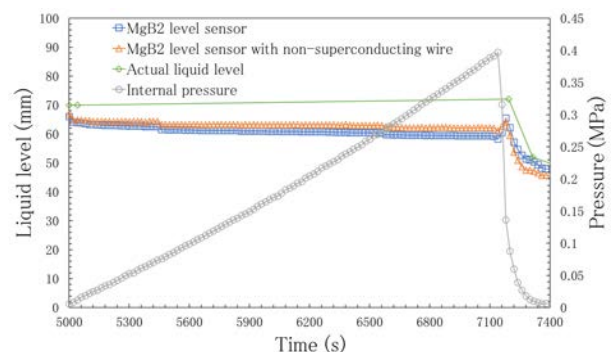


Fig.3 Actual liquid level by visual observation and measurement result of MgB<sub>2</sub> liquid level sensor with/without non-superconducting wire.

追加することで誤差の低減に成功した。今後はさらなる低減が必要となる。

### 参考文献

1. S. Fukumoto, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 57, No. 1(2022) p.39

# EPICS に基づく Belle 超伝導ソレノイド用歪みゲージ計測系の開発

## Development of strain gauge measurement system based on EPICS for Belle superconducting solenoid

青木 香苗, 近藤 良也, 榎田 康博, 川井 正徳 (KEK)

AOKI Kanae, KONDOU Yoshinari, MAKIDA Yasuhiro, KAWAI Masanori (KEK)

E-mail: kanae.aoki@kek.jp

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、高エネルギー物理学における標準理論を超えた物理の探求のため、2016年2月より SuperKEKB 加速器(電子陽電子衝突型シンクロtron加速器)及び Belle II 測定器の運転を開始した。2019年3月からは物理ランが開始されたが、2022年7月からは、検出器及び加速器の性能向上をめざした改良を行う LS1 と呼ばれる運転休止期間となっている。運転再開は、2023年12月の予定である。

ビーム衝突点近傍には、測定器用超伝導ソレノイド(Belle ソレノイド)及び加速器ビーム最終集束用超伝導電磁石システム(QCSL 及び QCSR)が位置している。我々は、以前にこの超伝導電磁石群及びヘリウム冷凍システム用リモートモニタリングシステムを、オープンソースソフトウェアの集合体である EPICS (Experimental Physics and Industrial Control) を使用して開発し報告を行った[1]。このモニタリングシステムは、総合計装システム日立 EX-8000 の専用ネットワークからのデータを収集、アーカイブしている。

元々 Belle ソレノイド冷凍システムは、Belle II 実験の前身の Belle 実験(1999年~2010年)の頃より、総合計装システムには取り入れられないデータを専用のデータロガーで計測、収集していた。その主たるものは歪みゲージの値である。その当時は別個に収集されていたものなので、オンライン上で総合計装システムに収集されたデータと、リアルタイムに参照、比較というのは行われていなかった。

この度、歪みゲージデータと EPICS で一般化された他のデータとの統合を図るための開発を行ったのでその報告を行う。

### 2. 開発の対象

以下の、ハードウェアとソフトウェア部分の開発を行った。

- 1) 歪みゲージ専用の測定器を使わなくても歪みの測定ができるように、Bridge Box を製作
- 2) この Bridge Box を測定するには、既存のデータロガー(旧 Agilent Technologies 社・現 Keysight 社 34980A)の電圧測定用モジュール(34922A)を使用する。このデータロガーからのデータ収集とアーカイブを、EPICS を用いて作成。
- 3) 別途収集された EPICS データと組み合わせて、モニター用のグラフィックやグラフ類を作成。

以上の開発の内、1と2の部分について以下に詳細を示す。

### 3. ハードウェア Bridge Box の製作

Bridge Box の仕様を以下にまとめる。

- 1 ゲージ用 Bridge Box と 2 ゲージ用 Bridge Box、及び電源ユニットから構成されている。
- bridge を構成する抵抗器は、金属皮膜 120.0 Ω 1/4W・F 級(誤差 1%)を使用し、これらを選別して相対誤差 0.1%以内のものを使用した。
- 供給電圧は、途中の電圧降下を見込んで電源の出力電圧 1.3 V に設定。各 bridge には約 1.0 V が印可される。

- 電源の保護機構として、出力電圧異常にたいしてメーターリレーによる保護回路、過電流に対しては即断ヒューズが設けられている。

### 4. ソフトウェア EPICS IOC 部分の作成

EPICS においてデータ収集を行うのは、IOC (Input/Output Controller) と呼ばれる部分である。データロガー 34980A と専用の Ethernet で接続された PC 上に IOC を構築した。この IOC には以下の特徴がある。

- 34980A には、製造元からソフトウェアの構築に便利なツールとなるアプリケーションが提供されている。これらは Windows ベースで利用できる。一方 IOC を搭載する OS には、開発に便利な Linux を利用したい。このため、PC 側は仮想環境を利用することにした。具体的には、ホスト OS として Windows 10 を、仮想環境実現には Virtual Box をインストールしてゲスト OS として Linux を搭載した。IOC はこの Linux 上で稼働する。
- 34980A の初期設定等は、別途プログラミング言語 Python3 を利用してプログラムを作成した。この初期設定等のプログラムは、ホスト OS とゲスト OS と両方から利用できる。
- 34980A で測定できるのは電圧であるので、歪みゲージのデータにするには加工(算術計算)が必要である。その加工は IOC で行っている。

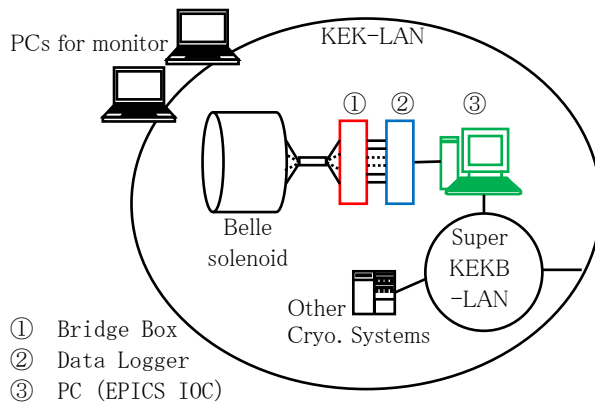


Fig.1 Constitutional diagram

### 5. まとめ

SuperKEKB 加速器、及び Belle II 測定器の超伝導電磁石と冷凍システムのデータを、EPICS をベースとして統合し、リアルタイムやアーカイブとして利用するために、データロガーを使用した歪みゲージ計測系をハード、ソフトの両面で開発した。これらは、他の計測にも応用できる。LS1 終了後の運転再開時から本格的に運用される予定である。

### 参考文献

1. K. Aoki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2022) p15

パルス電流による REBCO 線材の  $I_c$  測定に向けた電流振動の抑制Suppression of Current Oscillation for  $I_c$  Measurement in REBCO Tapes by Pulsed Current

土屋 雄司(東北大); 坂井 徹(名大工); 小濱 芳允(東大); 吉田 隆(名大工)

TSUCHIYA Yuji (Tohoku University); SAKAI Itsuki (Nagoya University); KOHAMA Yoshimitsu (University of Tokyo);

YOSHIDA Yutaka (Nagoya University)

E-mail: tsuchiya@tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

近年、超伝導コイル、加速器など、大規模な機器への高温超伝導線材の利用が期待されている。各メーカーの線材開発により、想定運転領域での線材の臨界電流  $I_c$  が大きく向上しており、素線にて数 100 A 超の大電流通電試験手法が必要である。限流器やクエンチ保護特性の設計に向けた高電界特性測定[1]や、低温強磁場環境の限られた空間における大電流通電測定[2]には、矩形波状のパルス電流を用いた通電測定手法の開発が必要である。矩形波パルス電流源を作製する際の課題として、回路中のインダクタンスとキャパシタンスによる電流発振による電流不安定性が挙げられる。

本研究では、パルス電源の電流振動の抑制を目的として、実験およびシミュレーションを用いて電源回路を作製し、回路のパラメータを変更して電流振動の抑制を行なった。

## 2. 実験およびシミュレーション方法

図 1 に、フィードバック回路を用いた矩形波パルス電流発生装置の回路図を示す。定電圧電源からの電圧入力に対して、IGBT のゲート電圧のフィードバック制御により、入力電圧波形  $V_{\text{pulse}}$  に比例した電流  $I_{\text{test}}$  が出力される。実験では回路を構築し、 $m$  を用いて負荷抵抗の電圧から  $I_{\text{test}}$  を計測した。さらに、LCR メーター(NF 回路ブロック ZM2372)を用いて回路素子の寄生(parasitic)成分を測定した。入力パルス電圧は幅 1 ms とし、想定出力電流は 20 A とした。回路素子のパラメータを変更して電流波形を計測した。シミュレーションでは、Simulink を用いて回路を模擬し、実験と同様にパラメータを変更して電流振動を最小に抑える組み合わせを探索した。

## 3. 実験結果及び考察

図 2 に、典型的なパルス電流波形を示す。電流は、平均電流値  $I_{\text{ave}}$  に対してオーバーシュートした後、減衰振動する。この振動の最大および最小値を  $I_{\text{max}}$ 、 $I_{\text{min}}$  とした。素子パラメータが最適でない場合には発振は減衰せず、振幅が大きかった。図 3 に、ローパスフィルタ回路の振動抑制抵抗  $R_{\text{att}}$  を変更した時の振動電流振幅  $I_{\text{max}} - I_{\text{min}}$  および  $I_{\text{ave}}$  の変化を示す。 $R_{\text{att}} = 10 \Omega$  の時、内挿図に示されている最適波形が得られた。

当日は、実験とシミュレーションの結果の比較および大容量 IGBT を用いた 600 A までのパルス電流発生回路、液体窒素中の REBCO 線材の臨界電流測定結果について報告する予定である。

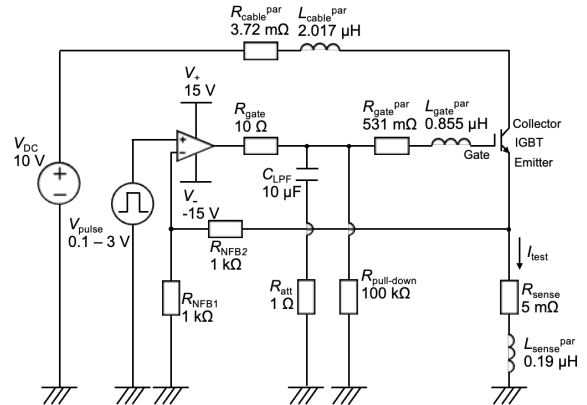


Fig. 1 Circuit diagram of pulsed current circuit with feedback circuit.

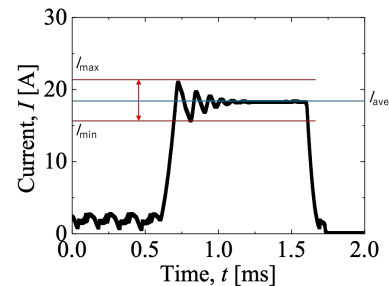
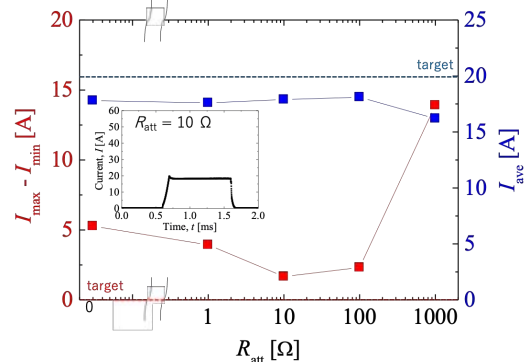


Fig. 2 Typical waveform of pulsed current with an overshoot and a damped oscillation.

Fig. 3 Resistance  $R_{\text{att}}$  dependence of  $I_{\text{max}} - I_{\text{min}}$  and  $I_{\text{ave}}$  by experiments. Inset shows optimal pulse current waveform.

## 謝辞

本研究の一部は、名大-鈴木商館の共同研究、科研費(20K15217, 22H00104, 22H01522)、NEDO の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。

## 参考文献

- [1] F. Sirois *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23**, 034018 (2010).  
 [2] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. in press.

# Er 粉末の比熱へのミリング効果

## Effect of ball milling on the specific heat of Er powder

小椋 隆平, 松本 圭介, 平岡 耕一 (愛媛大)

OGURA Ryuhei, MATSUMOTO Keisuke, HIRAOKA Koichi (Ehime Univ.)

E-mail : j843008u@mails.cc.ehime-u.ac.jp

### 1. 諸言

宇宙分野において、検出器や熱シールドの冷却のためにスターリング冷凍機が超小型衛星に搭載されている。<sup>[1]</sup>その冷凍機内の蓄冷器には、各温度領域で大きい体積比熱をもつ蓄冷材が充填されている。20 K スターリング冷凍機では、蓄冷材に SUS316 が用いられている。<sup>[2]</sup>しかし、その比熱は格子振動を源泉としているため、60 K 以下で急激に比熱が小さくなる。蓄冷性能の向上のためには、60 K 以下で大きい体積比熱を示す材料の開発が必要となる。そこで、磁気比熱をもち、100 K 以下で磁気相転移による大きな比熱を示す希土類 Er に着目した。Er は磁気相転移温度 87 K 付近で大きな比熱のピークを示す。

メカニカルアロイング (MA) 法とは、ポットに 2 種類以上の粉末試料と粉碎媒体 (ボール) を入れて回転させることで、ボールによる粉末試料の加圧、展延の繰り返しで合金を作製する方法である。このプロセスによって、微粉末化や過飽和合金、アモルファス合金などの作製が可能である。<sup>[3]</sup> Er 粉末に MA 法によって機械的な歪を入れると、磁気相転移温度での比熱がピークが低温側に移動すると期待できる。

本研究では、Er の体積比熱に対するミリング効果について明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験

油中保存の Er 粉末を、ヘキサンをを用いて洗浄した。Er 粉末対 SUS ボールの重量比を 1:7 とし、SUS ポットへ封入した。ポットを遊星運動型ボールミル装置に取り付け、ミリング時間 (MT) を最大 24 時間、自転・公転の回転数を 600 rpm とした。構造解析を X 線回折測定 (XRD)、元素分析を SEM-EDS により行った。比熱を熱緩和法により  $20 \leq T \leq 100$  K の温度範囲で測定した。

### 3. 結果

Fig. 1 に XRD パターンを示す。全ての試料で、主要なピークを六方晶 Er で指数付けできた。10 h 以上になると立方晶 Er のピークが生じた。ミリング時間を長くするほど、立方晶のピーク強度が増大した。これは、ミリングの機械的なエネルギーにより高温相である立方晶が生じたと考えられる。

Fig. 2 にミリングした Er およびミリングしていない Er 原料粉末、SUS316 の体積比熱の温度依存性を示す。粉末原料で見られた相転移温度での比熱の跳びはミリング時間が長くなるほど減少し、24 h でピークが消失した。これは、ミリングによる歪や欠陥で Er 原子間距離が一定でなくなり、磁気モーメント間の RKKY 相互作用の強さに分布が生じたためだと考えられる。相転移温度は 1.5 h までほとんど変化しなかった。MT が長くなるほど  $15 \leq T \leq 80$  K での比熱の絶対値が小さくなった。これはミリングによる歪や欠陥によって密度が減少したためだと考えられる。MT=10 min 試料が  $20 \leq T \leq 80$  K で最も大きい値を示したが、20 K 以下と 80 K 以上では MT=24 h の試料が最も大きい値を示した。

### 4. 結言

Er をメカニカルアロイング (MA) 法によって機械的な歪を入

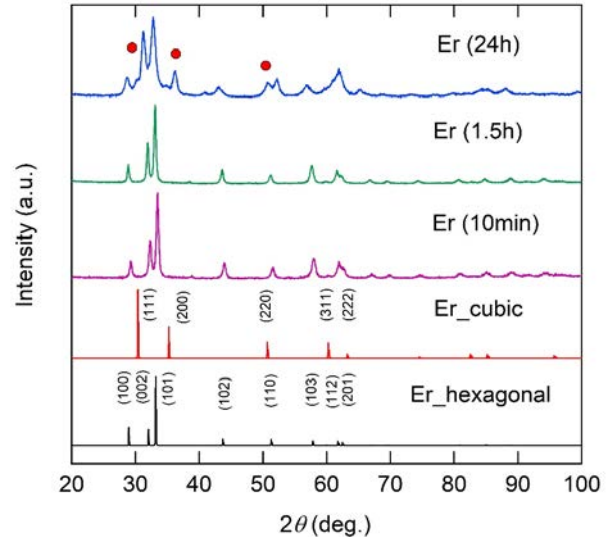


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of ball milled Er powders. The red circles indicate the Bragg positions of cubic Er.

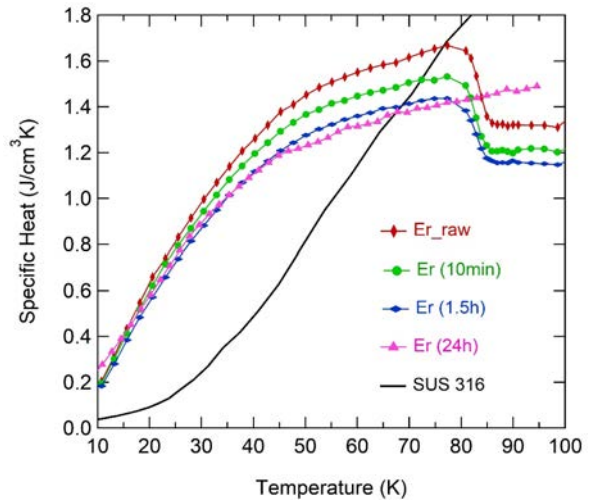


Fig. 2 Temperature dependence of volumetric specific heat for MA samples, raw powder of Er, and SUS316

れることで、比熱のピーク温度を低温側に移動させることを目指した。MT=1.5 h まで比熱のピークは低温側にほとんど移動しなかった。MT を長くするほど比熱の絶対値は小さくなり、MT=24 h でピークが消失した。上記のことから、歪は相転移を抑制し、密度の低下を引き起こすことで、体積比熱の減少につながるということがわかった。

### 参考文献

1. K. Narasaki, J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol. 53, (2018) p.355-362.
2. Y. Sato, *et al.*: The Symposium on Stirling Cycle, Vol. 10, No. 6, (2006) p.69-72
3. H. Hashimoto, Y. Pak, T. Abe, *Materia Japan*, Vol. 36, (1997) p.1025

# 無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける 局所劣化の検出方法

## Method for detecting local degradation in no-insulation REBCO pancake 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) では劣化が発生した状態でも継続運転が可能であることが示唆されている[1][2]が、そのためにはコイルの健全性を常に監視する必要がある。この監視を実現するため、本研究ではコイル両端電圧による監視法と、コイル内部磁場の変化を観測するピックアップコイルによる監視法の2つについて検討した。結果として両者は劣化を捉えたが、ピックアップコイルは両端電圧よりも良い感度で劣化に反応する可能性が示された。なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S (18H05244) に依ったことを付記する。

### 2. 解析手法・解析条件

先行研究で用いられてきた PEEC による電流分布解析と FEM による熱解析の連成モデル[3]に加え、ピオ・サバルの法則を用いた内部磁場計算を新たに実装したプログラムを用いた。伝導冷却を用いて運転温度を 30K に保ち、395A (負荷率 70%, 外部磁場 10T) の一定電流通電下で、突如 1kΩ の抵抗を持つ劣化が生じたとした。コイル内径には小口径 (内径 60mm) と大口径 (内径 500mm) の2つの場合を対象とした。これらの条件下で、ピックアップコイル電圧の時間変化およびコイル両端電圧の時間変化を調べた。なお、層間電気抵抗率は  $200 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$  とし、ピックアップコイルは Fig.1 のように超電導コイル内部に設置するものとした。また、小口径コイルに関しては上記に述べた条件下で 1A/s で励磁した途中で、通電電流が 200A となった瞬間に劣化が生じたときの結果も報告する。

### 3. 解析結果

得られたピックアップコイル電圧を Fig.2 に示す。一定電流通電下では、100 ターン巻のピックアップコイルを用いると、小口径コイルでは最大で 14mV、大口径コイルでは 5.6mV の電圧が観測された。また、両端電圧は Fig.3 の通り小口径と大口径でそれぞれ 3.5mV、1.2mV まで上昇したが、いずれもピックアップコイル電圧に比べて小さく、劣化に対する応答も遅い。

励磁中に劣化が生じた場合は、劣化直後の両端電圧は 1.8mV、ピックアップコイル電圧は 4.6mV を示した (Fig.4)。両端電圧は運転電流の増加とともに上昇し、最大値はピックアップコイル電圧と同程度となるが、劣化に素早く反応するという点においてはピックアップコイルの方が有利である。また、励磁終了時における両端電圧は Fig.3 のものと同ほ等しい。

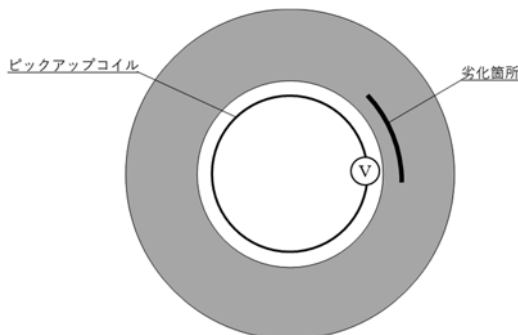


Fig.1 Single pancake coil with pickup coil and degradation area

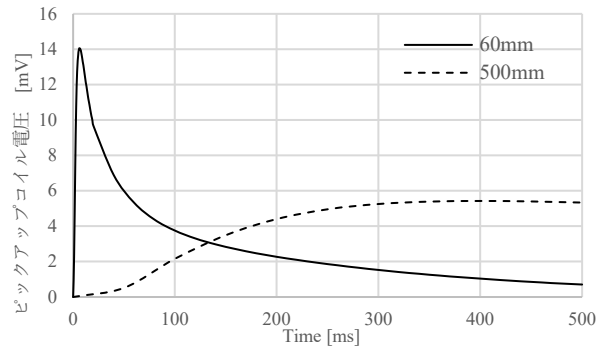


Fig.2 Pickup coil voltage immediately after degradation under constant current

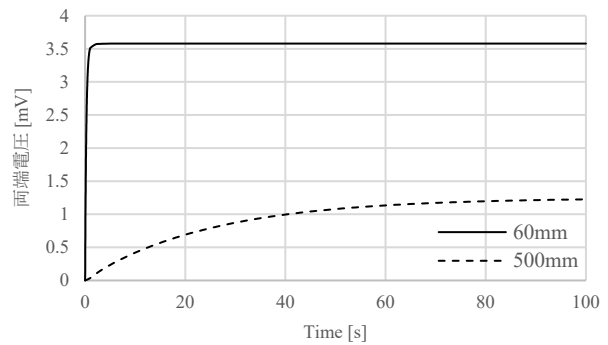


Fig.3 Voltage at both terminals immediately after degradation under constant current

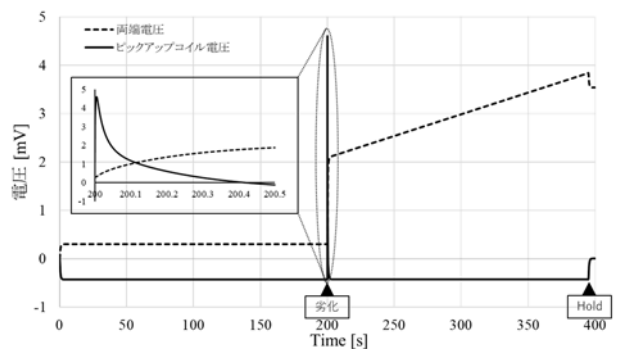


Fig.4 Voltage at both terminals and Pickup coil voltage when degradation occurs during excitation

### 参考文献

1. S. Hahn et al., Supercond Sci Technol, vol. 29, no 10(2016), Art. no. 10517.
2. Y. Kakimoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 29, no. 5(2019), Art. no. 4603005
3. T.Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 27, no. 4(2017), Art. no. 0601206

# 等価回路モデルのみに基づく無絶縁 REBCO コイルの遮蔽電流解析

## Screening current-induced magnetic field analysis of no-insulation REBCO coils based on only equivalent circuit model

吉藤 夢来, 内山 誠士郎, 太田 海斗, 石山 敦士(早大); 野口 聡(北大); 植田 浩史(岡山大)  
 Muku YOSHIFUJII, Seishiro UCHIYAMA, Kaito OTA, Atsushi ISHIYAMA, So NOGUCHI, Hiroshi UEDA  
 E-mail: yshfjmk@fuji.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は医療用サイクロトロンや高磁場 MRI の実現を目指し、無絶縁 REBCO 超電導コイルの開発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、先に我々が開発した 3次元非線形過渡電磁場解析[1]の課題である計算時間を短縮する目的のもと、新たな解析手法として「双方向分割回路型遮蔽電流磁場解析手法」を提案し、3次元解析との比較・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」を提案する。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  $R_{re}$  ((4)式:  $n$  値モデル)により表現する。以上により NI コイルの励磁遅れを考慮した電流分布計算と磁束侵入による遮蔽電流磁場計算を同時に行うことができる。

$$\sum_{j=1}^{\text{totalnum}} M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei}R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} - I_{cti}R_{cti} = 0 \quad (1)$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^{\text{div}_z} (I_{\theta i} + I_{cti}) \right\} - I_{op} = 0 \quad (2)$$

$$I_{cti}R_{cti} - I_{ct(i+1)}R_{ct(i+1)} = 0 \quad (1 \leq i \leq \text{div}_z - 1) \quad (3)$$

$$R_{rei} = \frac{E_c}{I_{ci}} \left( \frac{I_{\theta i}}{I_{ci}} \right)^{n-1} \times l_i \quad (4)$$

### 3. 解析例

今回は、遮蔽電流磁場解析に対する提案手法の妥当性を評価するため、AMEDプロジェクト(2013~2017年)で試作・実験を行った絶縁 REBCO コイルシステム(内径50mm, 発生磁場10T, Fig.2)を対象に、実験と同様の台形波通電を行ったときの遮蔽電流磁場の計算を行い、測定結果、3次元非線形過渡電磁場解析結果[2]と比較した。なお、今回は、提案手法においては、層間電気抵抗を非常に大きく取ることで絶縁コイルを模擬した。Fig.3にそれぞれの結果を示す。回路解析に基づく提案手法でもある程度の精度で振舞いを再現することが確認できた。

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S (18H05244) 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.23, No.3, 2013, 4100805  
 [2] H.Ueda, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.26, No.4, 2016, 4701205

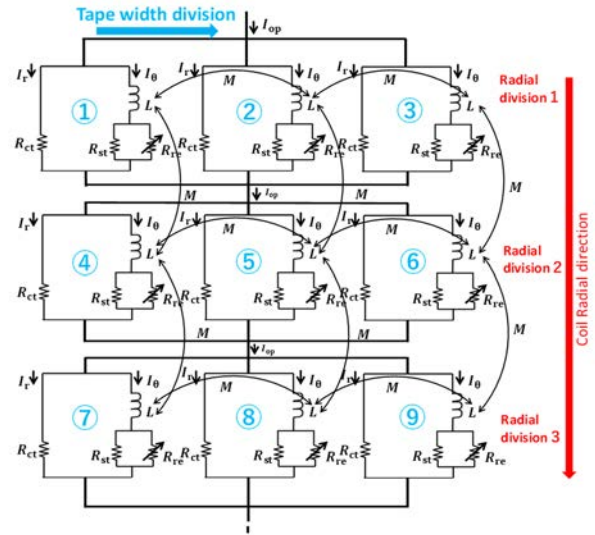


Fig.1 Proposed bidirectional split circuit

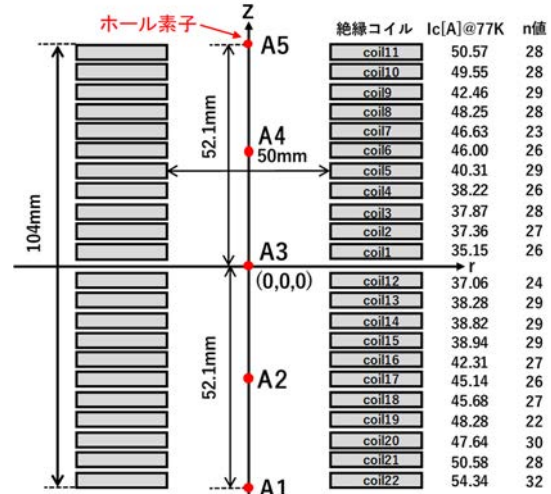


Fig.2 10-T REBCO coil system for comparison

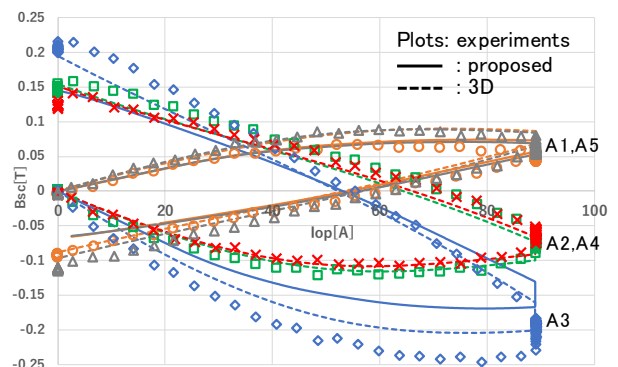


Fig.3 Comparison of shielding current-induced magnetic fields



# 簡単な解析式による NI HTS マグネットの熱的安定性評価

Thermal investigation of NI HTS magnet by simple analytic equation

間藤 昂允, 野口 聡(北大)

MATO Takanobu, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

E-mail: mato@em.ist.hokudai.ac.jp

## 1. はじめに

無絶縁巻線(No-Insulation winding technology; NI)技術の登場により, 高温超電導(High-Temperature Superconducting; HTS)マグネットの応用化が加速している。2017年には世界最高 DC 磁場である 45.5 T が, 内挿マグネットに NI HTS マグネットを用いることで達成され[1], 2021 年には小型核融合炉の実証試験に向けた NI HTS マグネットで 20 T の生成に成功した[2]。このように, 比較的小型の HTS マグネットに NI 技術が適用され, 高熱的安定性が実証されてきたが, より大型のマグネットにも NI 技術が適用されはじめています。一方, その設計に際して, 熱的安定性評価を行うためのシミュレーションは, 大型化に伴い計算時間が長時間化し, 容易ではない。そこで我々は, 比較的簡単な仮定を採用し, 解析的に熱的安定性を評価できる計算式を立示した。今回はマグネットの電流遮断後, 全てのエネルギーが径方向抵抗で消費されマグネット温度が上昇する, 同時に冷媒によってコイルが冷却されるとした。本提案式を用いることで, 簡単に安定性を評価できることから, マグネット設計時の初期検討に活用できる。本発表では本評価式により大型マグネットの熱的安定性限界を探る。

## 2. 解析式による NI HTS マグネットの温度

理想的なマグネットを考え, 図 1 に示すように径方向抵抗  $R_r$  とインダクタンス  $L$  でマグネットを簡易電気回路で表す。今, 運転電流が  $I_m$  の定常運転状態から電流を遮断することを考える。電流遮断後のマグネット内に生じる電流は以下のように表される。

$$I = I_m e^{-t/\tau} \quad (1)$$

ただし,  $\tau$  は時定数 ( $L/R_r$ ) [s],  $t$  は時刻 [s] である。マグネット内電流が全て径方向抵抗で消費され, 同時に冷媒によってマグネットが冷却されるとすると, コイル温度の支配方程式は以下で表される。

$$C \frac{dT}{dt} = R_r I^2 - H_s (T - T_i) \quad (2)$$

ここで  $C$ ,  $H_s$ ,  $T$ ,  $T_i$  はそれぞれコイル熱容量 [J/K], 熱伝達係数 [W/K], コイル温度 [K], コイル初期温度 [K] である。これを温度  $T$  について解くことでコイル温度の時間変化を得る。

$$T(t) = \frac{LI_m^2}{H\tau - 2C} \left( e^{-\frac{2t}{\tau}} - e^{-\frac{Ht}{C}} \right) + T_i \quad (3)$$

## 3. 大規模マグネットの熱的安定性

今回は表 1 に示すように, SPARC トロイダルフィールドコイル級のマグネットを解析対象とする[2]。ただし, 仮にコイルは液体ヘリウムで浸漬冷却されているとし, 冷却面はコイル表面

TABLE I  
COIL SPECIFICATIONS

Parameters	Value
Coil inner diameter [m]	2.0
Coil outer diameter [m]	1.0
Coil height [m]	0.1
Inductance [mH]	100
Radial resistance [ $\mu\Omega$ ]	10
Specific heat [J/(K·kg)]	100
Heat transfer coefficient [W/(K·m <sup>2</sup> )]	100
Mass density [kg/m <sup>3</sup> ]	9000
Center field [T]	8.6

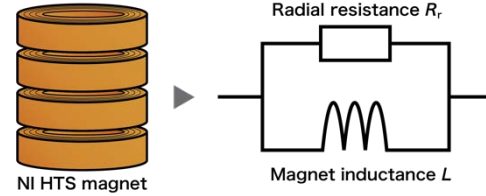


Fig. 1. NI HTS coil and equivalent electrical circuit

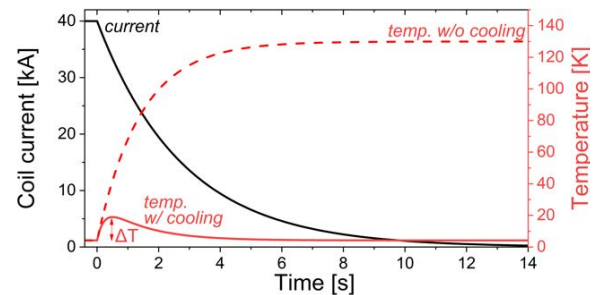


Fig. 2. Coil temperature after sudden discharge.

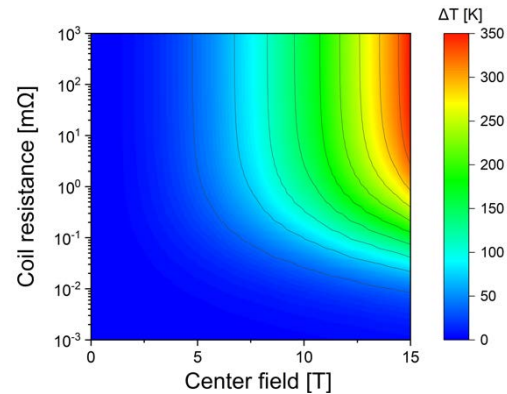


Fig. 3. Maximum temperature rise plot as parameters of radial resistance and center magnetic field

のみとした。諸物性値も表 1 に示す。式(3)による計算結果を図 2 に示す。電流減衰初期では大きな発熱とともに温度が上昇し, 時間の経過とともに冷却の効果が現れ始めて再び運転温度に落ち着く。冷却効果の有無を比較すると時定数の大きいコイルでは冷却による効果が大きく現れることがわかる。

ここで, 冷却ありの場合の最大コイル上昇温度  $\Delta T$  を接触抵抗値および中心磁場(運転電流)の関数としてプロットした結果が図 3 である。接触抵抗値が高い領域であるほど到達温度が高い。時定数が小さい, 急激なエネルギー消費に冷却が追いつかないためである。一方, 接触抵抗値が低い領域では時定数が大きいため, 冷却効果が大きくなる。図 2 で解析した規模のコイルも十分に時定数が大きく(2.7 h), 安定な動作域内である。コイルの大型化とともに, 冷却による効果を十分に加味しなければならない。

## 参考文献

- [1] S. Hahn et al., "45.5-Tesla Direct-Current Magnetic Field Generated with A High-Temperature Superconducting Magnet," *Nature*, vol. 570, pp. 496–499, 2019.
- [2] D. Chandler, "MIT-designed project achieves major advance toward fusion energy," MIT news, accessed Apr. 11, 2023, <https://news.mit.edu/2021/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-energy-0908>, Sep. 2022.

# 「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムを想定した 熱的安定性評価

## Thermal stability evaluation of a REBCO coil system for the “Skeleton Cyclotron”

且浦 琢言, 中村 太郎, 天野 一樹, 寺内 和, 石山 敦士(早大); 野口 聡(北大); 植田 浩史(岡山大)  
 HIURA Takuto, NAKAMURA Taro, AMANO Kazuki, TERAUCHI Nodoka, ISHIYAMA Atsushi(Waseda Univ.);  
 NOGUCHI So(Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi(Okayama Univ.)  
 E-mail: takufish208@fuji.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、進行がん治療への効果が期待されている $\alpha$ 線核医学治療用 RI ( $^{211}\text{At}$ ) 製造のための「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発を行っている[1]。同コイルシステムは形状の異なるコイル、すなわち、等時性磁場発生用の大小円形コイルと AVF 発生用のセクターコイルから構成されている。今回は、現在我々が小型実証用モデル [2] として試作し実験を行っている UBSC (Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron) 用コイルシステムを想定し、Fig.1 に示す口径の異なる同軸の円形コイルと非円形セクターコイルで構成される無絶縁 REBCO コイルシステムを対象として、その内の一つのコイルに局所的な劣化が生じた場合のコイルシステム全体の電磁的・熱的振る舞いを数値解析し、熱的安定性を評価した。本発表ではその結果を報告する。

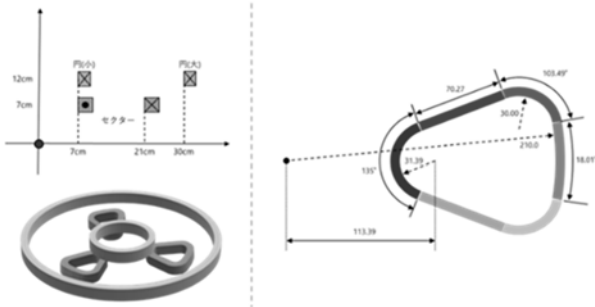


Fig.1 Schematic diagram of the coil system for analysis

### 2. 解析方法

Fig.1 のコイルシステムを対象に、PEEC 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。円形コイルの口径は、小コイル 140mm、大コイル 600 mm とし、ターン数は 50 とした。また、非円形コイルのターン数は 60 とした。全てシングルパンチンキーコイルであり、外部磁場を 1.6T、冷凍機による伝導冷却(30K)とし、940A(負荷率 70%)の一定電流通電を仮定した。なお、劣化は超電導層の抵抗値を 1000  $\Omega$  とすることで模擬した。また、熱的安定性については、転流による発熱が支配的な場合は熱的に安定、銅安定化層を流れる電流による発熱が支配的な場合は熱的に不安定であることが先行研究で示されており、ここでも同様の評価を行った[3]。以下の場合について解析を行った。

#### ●Case1: 円形コイルに局所的劣化が生じた場合:

- i) 円形小コイルに局所的劣化が生じた場合
- ii) 円形大コイルに局所的劣化が生じた場合

どちらのコイルも 25 ターン目に 1/6 周にわたり局所的線材劣化が発生したと想定した。それぞれのコイルの局所的劣化に対して、層間電気抵抗値を  $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  と変化させた。ただし、非円形コイルの層間電気抵抗値は  $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  とした。

#### ●Case2: 非円形セクターコイルに局所的劣化が生じた場合:

非円形コイルの 10 ターン目の 1 つの円弧部分と、20 ターン目の異なる 1 つの円弧部分に局所的劣化が発生したと仮定し  $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  と変化させた。なお、Case1 の結果を用い、小コイルの層間電気抵抗値を

$200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、大コイルの層間電気抵抗値を  $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  とした。

### 3. 解析結果

例として円形小コイルに局所的劣化が生じた場合の電磁的振る舞い(層間電気抵抗値  $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ) を Fig.2 (劣化発生後から 1 秒間の変化) に示す。

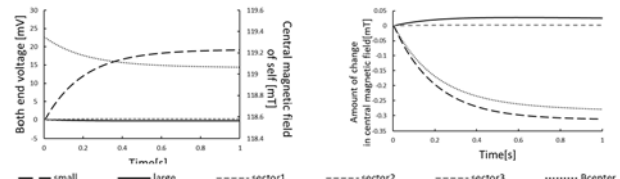


Fig.2.(a)Both-end voltage of each coil and central magnetic field; (b)Central magnetic field generated by each coil

同図(a)は各コイルの両端電圧と中心磁場、(b)は各コイルが作る中心磁場の変化量である。ここで  $B_{\text{center}}$  はコイルシステム全体で作る磁場である。小コイルに劣化が発生すると (Case1-i)、小コイルで正の電圧が発生し中心磁場が減少した。この変化を妨げるように大コイルの作る磁場が増加し、わずかに負の電圧が生じた。非円形コイルが中心に作る磁場の変化量、電圧の変化は極めて少なかった。一方、大コイルで劣化が発生した場合 (Case1-ii) は、大コイルで正の電圧が発生し、(Case1-i) と大小コイルが逆の振る舞いを示した。また、非円形コイルに劣化が生じた時 (Case2) は、劣化発生非円形コイルで正の電圧が発生し中心磁場が増加した。これは劣化が発生した非円形コイルが中心に作る下向きの磁場が減少するためである。これを妨げるように小コイルの作る磁場が減少し、わずかに正の電圧が生じた。一方、大コイルが作る中心磁場は増加し、わずかに負の電圧が生じた。

層間電気抵抗値を変えた場合は、値が大きいほど、両端電圧の絶対値が大きく、変化速度も大きい。これは、値が大きいほど、転流がしづらく、銅安定化層に流れる電流が大きくなるためと考える。これにより中心磁場の減少量も少なくなった。

熱的安定性については、小コイルの劣化の時、層間電気抵抗値が  $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  で、転流による発熱が支配的となり熱的安定性が保てた。一方、 $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  のときは、銅安定化層を流れる電流が支配的となり、コイル内温度が増加したことから、熱暴走に至る可能性がある。大コイルに劣化が生じた時は  $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  のとき、熱的安定性が保てたが、 $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  のとき熱暴走に至る可能性があることがわかった。非円形コイルに劣化が生じた時は、 $200\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  のとき、熱的安定性が保てた。一方、 $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $20\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  のとき熱暴走に至る可能性があることがわかった。

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244)と基盤研究 B(22H01478)に依ったことを付記する。

### 参考文献

- [1] H.Ueda et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.29, No.5, 2019, 4101105
- [2] T.Ogata, et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.31, No.5, 2021, 4400105
- [3] H.Onoshita et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.30, No.4, 2020, 4702605

## 3 芯一括型高温超電導ケーブル 1 相分の交流損失解析

### AC loss analysis of one phase of a three-core high- $T_c$ superconducting cable

野地 英樹 (都城高専)

NOJI Hideki (NITMC)

E-mail: noji@cc.miyakonoyo-nct.ac.jp

#### 1. はじめに

本研究室では、これまで 2 層ケーブル(古河電工製)[1]と 3 層ケーブル(同社製)[2]を対象に、交流損失の解析に成功してきた[3](3 層ケーブルの結果は未発表)。本研究では、4 層超電導+2 層磁気シールドケーブル(フジクラ製)[4]を研究対象として、交流損失解析を行った。フジクラ製ケーブルは、2013 年に発表された 66 kV-5 kA 級ケーブルである。ケーブルを構成する REBCO テープの各層における巻き付け方向と巻き付けピッチ(ケーブル構成パラメータと呼ぶ)は明らかにされていないため、電気回路モデルにより適切な値を算出した。算出したケーブル構成パラメータによりケーブルの 3 次元モデルを作成し、高速化した  $H$  formulation による 3 次元電磁界解析により交流損失を算出した。本発表では、その結果を報告する。

#### 2. 計算方法

##### 2. 1. 電気回路モデル

本研究室が開発した電気回路モデル[5]により数式処理ソフト Mathematica を使ってプログラミングし、推移式アルゴリズムによりケーブル構成パラメータを決定した。推移式アルゴリズムでは、32 通りある REBCO テープの巻き方向の組み合わせに対して巻き付けピッチを変化させ、Norris の方程式を基にして最小の損失が得られるケーブル構成パラメータを決定した。(ただし、この方法では各層電流が均一になるときのケーブル構成パラメータとは異なることが分かっている)

##### 2. 2. 3 次元電磁界解析

電気回路モデルで決定したケーブル構成パラメータを基に、有限要素解析ソフト COMSOL Multiphysics でケーブルの 3 次元モデルを作成した。3 次元電磁界解析は、通常の  $H$  formulation [6]をベースとして、AC/DC モジュールの磁場定式化(mfh)インターフェースを利用してプログラミングした。境界条件は超電導とシールドそれぞれに設定し、「磁場」を使用して、超電導にはアンペールの法則により境界の磁界を決定した。シールドの境界条件における磁界はゼロとした(完全磁気遮蔽が実現できているものとした)。以上の方法により、 $H$  formulation による計算を高速化することが可能であり、「高速化した  $H$  formulation」と呼んでいる。3 次元電磁界解析により、各層の交流損失および層電流を算出し、ケーブル全体の損失計算値と測定値を比較した。

#### 3. 結果と考察

電気回路モデルにより決定したケーブル構成パラメータは、各層の「巻き付けピッチ(巻き方向)」で記述すると、1 層目が  $HP_1 = 0.4$  m(S 方向)、2 層目が  $HP_2 = 3.6$  m(Z 方向)、3 層目が  $HP_3 = 0.25$  m(Z 方向)、4 層目が  $HP_4 = 0.12$  m(Z 方向)、5 層目が  $HP_5 = 0.58$  m(S 方向)、6 層目が  $HP_6 = 5$  m(S 方向)であった。なお、1 層目から 4 層目までが超電導層、5、6 層目が磁気シールド層である。巻き方向は 2 種類であり、S 方向と Z 方向はそれぞれ巻き方向が逆であることを意味する。

ケーブル構成パラメータに基づき、ケーブルの 3 次元モデルを作成するが、ケーブルの損失計算値は、解析に使用するケーブルモデルのケーブル長さ  $L$  に依存する。 $L$  が長くなると、ケーブルの損失は指数関数的に減少し、やがて一定値に収束する。その反対に、計算時間は指数関数的に増加

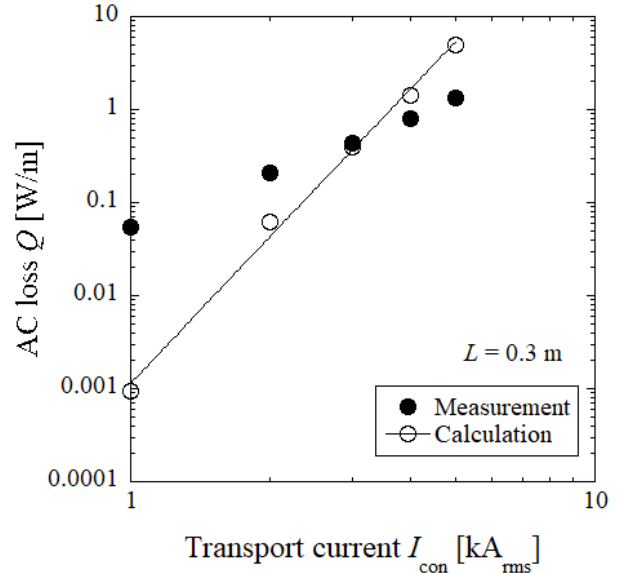


Fig.1 AC loss vs. transport current characteristics

する。そのため、適切なケーブルモデル長さを設定する必要があり、 $L = 0.3$  mとした。

Fig.1に通電電流値に対する損失計算値と測定値の比較を示す。黒丸がフジクラの測定値、白丸が計算値であり、実線は計算値に対する近似値である。計算では、超電導固有の抵抗率の式における指数値を  $n = 25$  とし、臨界電流密度  $J_c$  は磁場に依存しないものとした。測定値も計算値も、その近似値は指数の式で表現され、傾きは測定値が 2、計算値が 5 とそれぞれ異なる値となった。また、各層の損失の計算結果からは、最外層の損失  $Q_6$  が極端に高く、これが全体の損失を高めている原因となっていた。さらに、各層の層電流の計算結果からは、最外層の電流  $I_6$  が極端に高いことが分かった。

#### 4. おわりに

計算結果が測定結果と合わない理由は、電気回路モデルで使用したアルゴリズムに問題があることが考えられる。発表では、アルゴリズムを総当たり式に変え、さらに層電流の通電電流の平均値に対する標準偏差からケーブル構成パラメータを求めるアルゴリズムに変えた結果を報告する予定である。時間的に間に合えば、指数値を変え、また  $J_c$  の磁場依存性を考慮した計算結果を示したい。

#### 参考文献

1. S. Mukoyama, et al.: Physica C, Vol. 445-448 (2006) p.1050
2. S. Mukoyama, et al.: Physica C, Vol. 463-465 (2007) p.1150
3. R. Okadome, et al.: Proc. of JSST Conference, (2019) p.8
4. M. Daibo, et al.: Physics Procedia, Vol. 58 (2014) p.314
5. H. Noji, et al.: Physics Procedia, Vol. 58 (2014) p.322
6. R. Brambilla, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 20 (2007) p.16

# 故障・事故時の超電導ケーブルの電磁場と熱伝導場の連成解析

## Coupled analysis of electromagnetic and heat conduction fields of superconducting cables under fault conditions

呂 高泰, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)  
 LYU Gaotai, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: lyu.gaotai22@ae.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. Introduction

Under the overcurrent conditions that cause a sharp increase in the temperature of superconducting cables, the superconducting materials in them will lose their superconducting properties in a short period of time. In this study, the fault overcurrent condition of high temperature superconducting (HTS) cable is taken as the example, and the electrothermal characteristics of the HTS cable are analyzed during the transient fault condition and the recovery process. In the heat transfer model, combined with the electrical and thermal characteristics of REBCO tapes, the temperature performance is iteratively calculated considering the influence between different layers of the HTS cable.

### 2. Theoretical analysis of fault conditions

As one of the second generation HTS tapes, the REBCO tape is usually composed of REBCO conductor, copper, silver and other materials. In the case of high fault currents, usually some parameters of these materials change with increasing temperature [1].

From Fig. 1, the superconductor's electrical resistivity is obtained from the electromagnetic field calculation model, while the cable transient temperature can be obtained from the heat conduction field. Before calculating the Joule heat loss, substitute the temperature to obtain the resistivity of copper, silver, and the substrate at the current temperature. With the combination of models shown in Table 1 and fault current, the heat loss is calculated by MATLAB. The temperature behavior of the cable during fault and recovery can be evaluated by cyclic analysis.

### 3. Case study

Taking the short-circuit fault of phase A of the HTS AC cable as an example, the initial fault current is set to 10 kA, and the fault time is 0.01 s - 0.18 s. The temperature varies with the length of the cable due to the pressure drop caused by the flow of liquid nitrogen in the cooling channel [2].

In Fig. 2, the left picture shows the cable temperature at 0 s, and the right picture shows the temperature at 0.2 s. The temperature of the outer cooling channel increases and then decreases with length, which is due to the usage of a single LN2 source in the inner channel.

Fig. 3 depicts the radial temperature distribution during fault and recovery at 200 m of the cable. Compared with the constant estimation method, the coupling method improves the accuracy by about 8% in the peak temperature.

### 4. Conclusion

Considering the fault and recovery process, the multi-model coupling method obtains the temperature behavior of the cable over time and length. Variations in temperature have a significant effect on the material resistance, fault current, and the accuracy of loss evaluation.

### References

1. D. Kumagai, et al.: Cryogenics, Vol. 80 (2016) pp.229-233
2. H. Ohsaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 25, No. 3 (2014) 5400505

Table 1. Parameters of Coupled Analysis

Width of REBCO tape	4 mm		
REBCO layer thickness	0.1 mm		
Length of cable	200 m		
Cable rated current	2 kA <sub>rms</sub>		
Peak overcurrent value	10 kA		
Density of LN2	808 kg/m <sup>3</sup>		
Inflow temperature	70 K		
	LN2	Insulation	REBCO
Thermal conductivity	0.2	0.18	400
	W/m · K	W/m · K	W/m · K
Heat capacity	2000	320	0.5
	J/kg · K	J/kg · K	J/kg · K

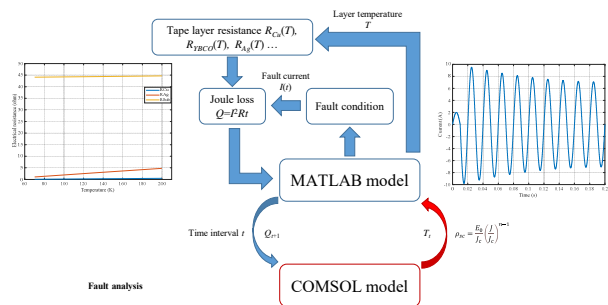


Fig. 1. Coupled analysis for fault conditions

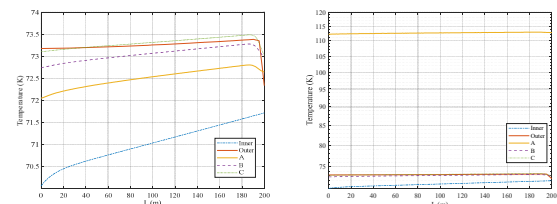


Fig. 2. Temperature variation along cable length

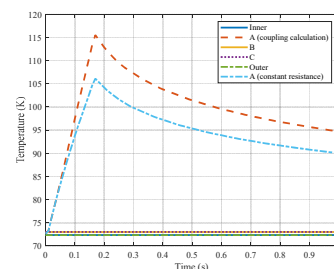


Fig. 3. Temperature distribution considering fault and recovery process

# 電磁誘導型超電導磁気シールドの遮蔽性能向上に適した構成方法

## Configuration method suitable for increasing shielding performance of electromagnetic induction type HTS shield

長 史典, 塚田 耀太, 長崎 陽, 津田 理 (東北大学)

CHO Fuminori, TSUKADA Yota, NAGASAKI Yoh, TSUDA makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: fuminori.cho.t6@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

宇宙放射線シールドへの適用に向けて、強磁場を遮蔽可能な高温超電導 (HTS) テープ線材を用いた電磁誘導型超電導磁気シールド (HTS シールド) の研究開発を行っている。従来の超電導磁気シールドは、超電導バルク体を用いた磁気シールドの検討が主であったが、目的に応じたサイズや形状の磁気シールドを製作することは容易ではない。そこで、HTS 線材を互い違いに巻いて層構造にし、両端部をはんだで接合して閉ループ化した HTS シールドを提案し、超電導バルク体内の遮蔽電流分布に近い電流分布を実現可能な無絶縁型 REBCO シールドが遮蔽率向上に有効であることを明らかにしてきた [1]。しかし、REBCO シールドには、超電導層間の抵抗により、遮蔽電流の減衰時定数が短くなるという問題がある。このため、本研究では、HTS 線材内の構造に着目し、BSCCO 線材を用いた場合と従来の REBCO 線材を用いた場合の超電導磁気シールドの遮蔽電流の減衰時定数を比較検討した。

### 2. 実験方法・解析手法

実験では、BSCCO 線材を用いて製作した 4 層無絶縁型 HTS シールドと REBCO 線材を用いて製作した 4 層無絶縁型 HTS シールドに直流磁場を印加した際のシールド内中心部における遮蔽磁場の時間変化をホールセンサを用いて測定し、減衰時定数  $\tau$  を比較した。また、解析では、2~4 層の無絶縁型 HTS シールドを等価回路で近似し、シールド中心に 8.48 mT の直流磁場を印加した場合の遮蔽電流分布を計算して、シールド中心軸上の磁場の減衰時定数を算出した。なお、超電導層間抵抗の値は、4 層における減衰時定数の実験値とのフィッティングにより算出し、減衰時定数は遮蔽率の時間変化より算出した。算出した超電導層間抵抗を Table 1 に示す。

### 3. 結果

実験で測定された 4 層 HTS シールド中心部における遮蔽電流磁場の減衰特性を Fig. 1 に示す。BSCCO 線材を用いた場合の減衰時定数は 26.5 s、REBCO 線材を用いた場合の減衰時定数は 22.2 s であった。これより、BSCCO 線材を用いた方が時定数が長くなることがわかった。BSCCO 線材および REBCO 線材を用いた 2~4 層の HTS シールドの遮蔽率の時間変化の解析結果を Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 に示す。どの層数においても BSCCO 線材を用いた HTS シールドの方が減衰時定数が大きくなることが確認された。また、BSCCO 線材を用いた HTS シールドでは層数に応じて減衰時定数が増加したが、REBCO 線材を用いた場合は、減衰時定数が単純に増加しないことがわかった。これは REBCO 線材を積層する場合は、超電導層間抵抗が均一ではなく、遮蔽電流ループが複数形成され、実質的なインダクタンスが単純に増加しないためと考えられる。なお、本検討では、実験の都合により直径 30mm、シールド長 100mm の小型シールドを検討対象としていたため、減衰時定数の差がわずかであったが、実規模の HTS シールドにおける減衰時定数は、BSCCO 線材を用いた場合が 21.5 年で REBCO 線材を用いた場合が 14.5 年と 7 年の差があることを確認している。このことから BSCCO 線材の方が遮蔽性能の長期持続性に優れているといえる。

Table 1 Superconducting Interlayer resistance used in the analysis

	BSCCO	REBCO
Between 1 and 2 layers	4.74 $\mu\Omega$	7.36 $\mu\Omega$
Between 2 and 3 layers	4.74 $\mu\Omega$	564.27 $\mu\Omega$
Between 3 and 4 layers	4.74 $\mu\Omega$	7.36 $\mu\Omega$

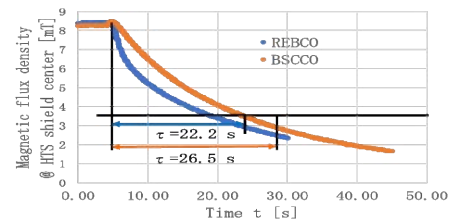


Fig. 1 Time transient of magnetic flux density due to shielding current attenuation (experiment: 4 layers)

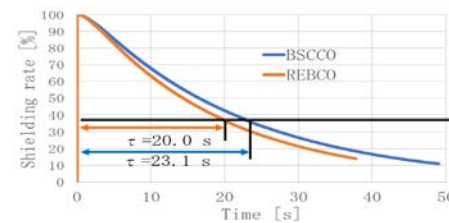


Fig. 2 Time transient of shielding rate (analysis: 2 layers)

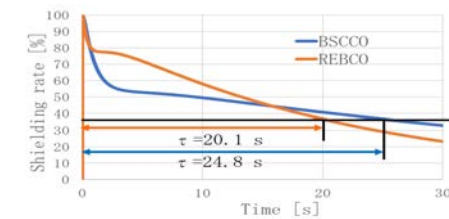


Fig. 3 Time transient of shielding rate (analysis: 3 layers)

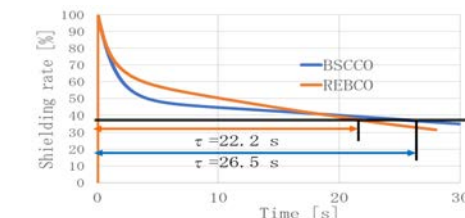


Fig. 4 Time transient of shielding rate (analysis: 4 layers)

### 参考文献

- 長崎 陽, 花木悠哉, 塚田 耀太, 津田 理, 2022 年度秋季低温工学・超電導学会, 2P-p14

# 高勾配型超伝導バルク磁石を用いた卓上型磁気浮上装置の 着磁運用と微小重力環境の応用展開

## Magnetizing operation of a desktop-type, magnetic levitation device

### using high-gradient trapped field magnets and its potential applications of a quasi-microgravity

高橋 圭太, 小泉 結, 大久保 明希, 渡邊 匡人(学習院大学)

TAKAHASHI Keita, KOIZUMI Yui, OKUBO Haruki, WATANABE Masahito (Gakushuin University)

E-mail: keita.takahashi@gakushuin.ac.jp

#### 1. 序論

REBaCuO系超伝導バルク材は、磁場中冷却により転移温度以下で着磁することで小型の永久磁場源となる。複数のバルク材を積層して用いる卓上型磁気浮上装置[1]では、その強磁場並びに高磁気力場を利用して、反磁性体の磁気浮上環境を実現するものである。ただし、磁気特性は着磁中のバルク材の温度条件に大きく依存しており、磁場と温度の安定性を評価し運用する必要がある。

本研究では、卓上型磁気浮上装置の運用に際し一連の着磁工程における磁場-温度特性を報告する。更に、超伝導応用として浮上分離とタンパク質結晶成長の展開を紹介する。

#### 2. 実験方法

図1に示すように円筒形EuBaCuOバルク(外径60mm, 内径36mm, 高さ20mm, 日本製鉄製)を3段積層し、高勾配型の構造体を構築した。構造体は金属治具を介して無冷媒10K冷凍機の冷却ステージに接続され、真空容器により外気と熱絶縁した。真空容器はヒートシンク機構の内径に合わせたボア空間( $\phi$ 25mm)を有し、大気中で磁場を利用できる。磁場中冷却着磁は初期温度23.6Kで外部磁場8.00Tを $-0.1\text{T/min.}$ で掃引した。温度はCernox<sup>TM</sup>温度計で金属治具の上下2か所、磁場はバルクの磁場中心で測定した。3か月運用の後に、ヒーター加熱による消磁を $0.1\text{K/min.}$ で行った。

#### 3. 実験結果

図2に着磁中の上部と下部で測定した温度 $T_T$ ,  $T_B$ の時間依存性を示す。温度は電磁誘導による超伝導相の発熱により初期温度から最大41.2Kまで上昇したが、磁場中の超伝導電流特性が良好である低温領域に抑制できることが確認された。これは積層体を囲む治具が熱容量の増大に寄与した結果である。着磁後の磁気特性は、磁場中心の捕捉磁場7.88Tで概ね部分着磁であり、最大磁気力場は $-1550\text{ T}^2/\text{m}$ であった。これは従来の電磁石では15T以上の強磁場で実現できる領域にあり、体積磁化率が $10^{-6}$ のオーダーにある一般的な反磁性体の磁気浮上に適用できる値である。

図3に消磁過程の磁場と温度の時間依存性を示す。50Kを超えると、非超伝導相において抵抗が発生し徐々に温度上昇するとともに、磁場が減衰する。5T、70K付近から急激に磁場が低下した。クエンチのような飛びは生じないが、消磁工程が熱的に最も不安定であると言える。

#### 4. 超伝導磁場による磁気浮上応用の展開

本装置の特徴は、「①磁気力場並びに磁気浮上を大気中で利用できること、②卓上型であること、③永久磁場で長期稼働できること」である。これらの特性から、磁場の応用研究におけるハードウェアの課題を解決することが期待される。

例えば、磁気浮上を大気中で利用できれば、その後の回収や分析方法の組み込みを制限しない。一方、従来では宇宙軌道上の微小重力下で行われるタンパク質結晶成長を地上の磁気浮上で置き換えることで、浮遊環境へのアクセス性を改善することが期待される。

#### 参考文献

1. K Takahashi, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 35 (2022) 054003

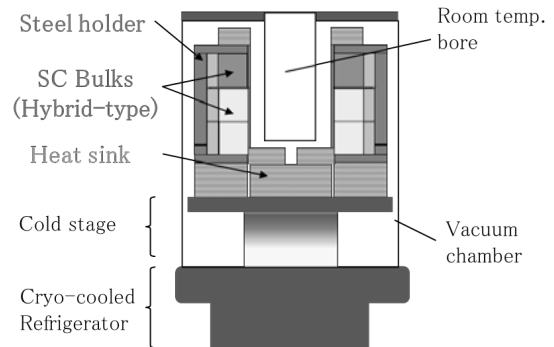


Fig.1 Overview of magnetic levitation device including SC bulk components encapsulated in a steel holder.

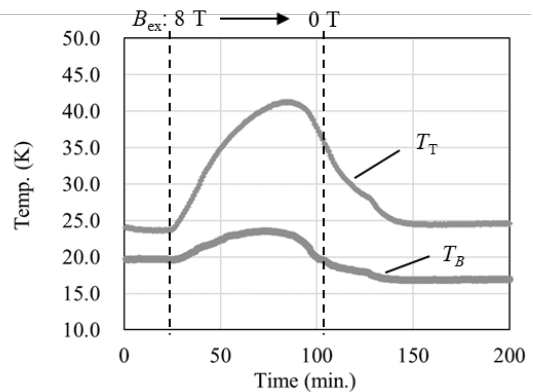


Fig.2 Time dependence of the temperatures during magnetization measured on each position:  $T_T$  at the top surface and  $T_B$  at the bottom under the cold stage.

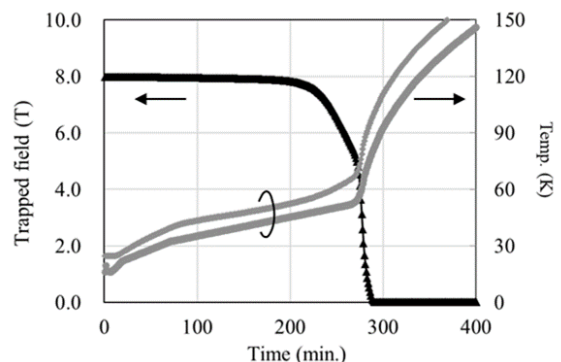


Fig.3 Time dependence of the trapped field and the temperatures during de-magnetization with a constant rate,  $+0.1\text{ K/min.}$

# 磁気アルキメデス法を用いたレアアース泥の選鉱に関する基礎的研究

## Fundamental Study on Ore Sorting of Rare Earth Mud by Magneto-Archimedes Separation

西川 怜志, 秋山 庸子, 真鍋 勇一郎, 佐藤 文信 (大阪大学)

NISHIKAWA Satoshi, AKIYAMA Yoko, MANABE Yuichiro, SATO Fuminobu (Osaka University)

E-mail: nishikawa@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

レアアースは最先端産業において重要な元素群であるが、我が国は、その供給を他国からの輸入に依存しており、安定供給には課題がある。このような状況のなか、2013年に、我が国の排他的経済水域である南鳥島周辺でレアアースに富む深海堆積物、レアアース泥が発見され、レアアースの新たな供給源として注目されている。

本研究では、レアアース濃度を高める選鉱手法の一つとして磁気アルキメデス法を提案し、レアアースを吸着させたアパタイトと反磁性鉱物を用いて調製した模擬レアアース泥に本手法を適用した場合の有効性を評価した。

### 2. レアアース泥の組成

レアアース泥は、Fig.1に示すように、約70%の反磁性鉱物と約30%の常磁性鉱物で構成されることが分かっている[1]。レアアースは、主にリン酸カルシウム的一种であるアパタイトに吸着しており、レアアースを吸着したアパタイトは常磁性を示すことがわかっている。そのため、磁気分離によってレアアース泥から反磁性鉱物を選択的に除去することで、レアアース泥を最大70%近く減量化し、濃縮できる可能性がある。

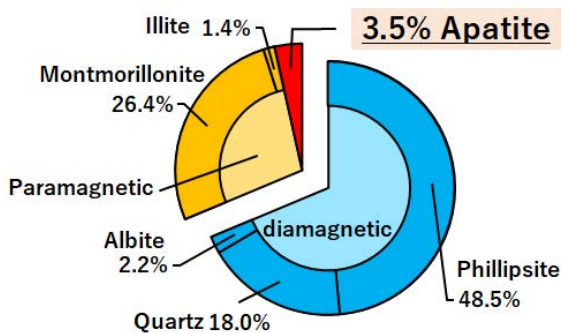


Fig.1 Composition of rare earth muds and their magnetic properties.

### 3. 実験方法

常磁性媒質に鉛直方向に磁場を印加することで、媒質が見かけ上重くなり、媒質中の粒子に働く浮力が大きくなる。この浮力に加え、粒子は、重力と磁化率に応じた磁気力を受け、その密度と磁化率に応じた位置に浮上する。この浮上位置の差を用いて分離を行う手法を磁気アルキメデス法という。

本実験では、分離対象として、反磁性鉱物の大部分を占めるフィリップサイトと石英、濃縮対象として、レアアース泥に含まれるレアアースの中で、特に濃度と体積磁化率の大きいジスプロシウム、ガドリニウム、ネオジムをレアアース泥中と同濃度で吸着させたアパタイト(以下、REYアパタイト)を使用した。

まず、各鉱物と磁気アルキメデス法を適用するための常磁性媒質である塩化マンガン水溶液(7.5 wt.%)の密度と磁化率から浮上に必要な磁場積を計算し、超電導バルク磁石(最大磁場 3.2 T)の磁場積分布から磁石のクライオスタット中心での浮上高さの位置を求めた。その後、同条件で実際に検証実験を行い、浮上位置を確認した。

続いて、検証実験で得られた結果を元に REYアパタイトと石英の分離・回収実験を行った。REYアパタイト 0.3 gと石英 0.3 gを混合した模擬レアアース泥を作製し、7.5 wt.%塩化マンガン水溶液 30 mlと超電導バルク磁石を用いて、磁気アルキメデス法による分離を行った。その後、回収した浮上物と沈殿物の磁化率測定により、それらのアパタイトと石英の比率を求め、分離性能を評価した。

### 4. 実験結果と考察

浮上高さの試算の結果、超電導バルク磁石のクライオスタット中心では、表面から REYアパタイト 7.3 mm、石英 9.4 mm、ゼオライト 12.1 mmの位置に浮上すると推測された。検証実験では、REYアパタイトは約 4 mm、石英は約 9 mmの位置に浮上し、ゼオライトは投入から数分後に沈殿した。

REYアパタイトの浮上位置が推定値よりも低下した原因とゼオライトが沈殿した原因として、アパタイトやゼオライトは常磁性媒質中のマンガンイオンを吸着するため、磁化率が大きくなったことが考えられる。一方、石英はイオンをほとんど吸着しないため、推算値とほぼ同じ高さに浮上したと考えられる。以上より、塩化マンガン水溶液を用いた磁気アルキメデス法による REYアパタイトと石英の分離の可能性が示された。

次に、REYアパタイトと石英の混合物からの分離・回収実験を行った。結果を Fig.2に示す。分離後の浮上物中の石英の比率は84%、質量は0.23 gであり、分離前の石英 0.30 gに対して約75%が回収できたことを示している。従って、浮上物を除去することで、レアアースを濃縮できることが確認された。

また、ゼオライトは、マンガンイオンを吸着するため、塩化マンガン水溶液を用いた条件では分離できなかったが、ガドリニウムイオンをほぼ吸着しないことから、媒質を硝酸ガドリニウム水溶液に変更したところ、浮上することが確認された。

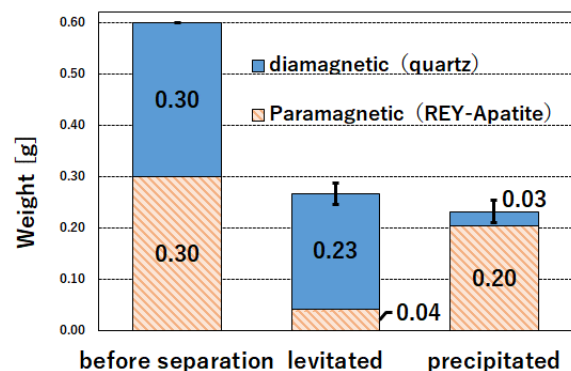


Fig.2 Results of separation experiment of simulated mud.

### 5. 結論

石英の分離率の結果から、レアアース泥の選鉱に磁気アルキメデス法が適用可能であることが示された。またマンガンイオンを吸着するゼオライトについても、硝酸ガドリニウムを用いることで分離できる可能性が示された。

### 参考文献

1. Y. Kon et al.: Resource Geology, 64[1], (2014) pp.47-57

# 「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 年春): (その1)全体概要

## Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Spring 2023): (Part 1) Overview

西山敦士, 熊谷豊(早大); 野口聡(北大); 植田浩史(岡山大); 渡部智則(中電); 吉田潤(住重); 福田光宏, 長屋重夫(阪大)

ISHIYAMA Atsushi, KUMAGAI Rui (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.);

WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co.,Inc); YOSHIDA Jyun (Sumitomo Heavy Industries Ltd.);

FUKUDA Mitsuhiro, NAGAYA Shigeo (Osaka Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

遠隔転移等の進行がんへの有効性が期待されている $\alpha$ 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)」の開発を進めてきた。本装置では、空芯の REBCO コイルシステムのみでビーム加速に必要な磁場を発生させることが特徴になっている。鉄芯の磁化特性の非線形性を考慮する必要がないため、出力エネルギーを変化させることができ、PET 用 RI 製造等への応用など多機能化が期待できる。まず(その1)として、HTS-SC 用 REBCO コイルシステムの 2023 年春時点での開発状況の概要を報告する。

### 2. 小型実証用 REBCO コイルシステムの設計・製作

HTS-SC の 1/2 スケールの小型実証用モデルである Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron(UBSC)用無絶縁(NI)REBCO コイルシステム(Fig.1, Fig.2)を設計・製作した。UBSC の加速粒子として陽子を想定し、取出し半径は 200mm とした。実機 HTS-SC では用途に合わせて出力エネルギーを変化させて運転を行う予定である。そこで、UBSC でも通電電流(最大 540A)・発生磁場と、出力エネルギーを3段階可変とする運転を想定し、ビーム加速に必要な磁場を発生させるためのセンターコイル、メインコイル、セクターコイルの形状と位置を最適化設計した。そしてそれに基づき無絶縁 REBCO コイルシステム(Fig.2)を製作した。GM 冷凍機付き真空断熱容器内に設置し、昨年秋から評価試験を行っている。なお、GM 冷却機 2 台によって伝導冷却を行い、約 10 日で 5K 以下まで達した。コイル内の温度差はなく、ほぼ均等にコイル全体を冷却することができた。その後、温調によりコイル温度を 30K とし繰り返し通電試験を行っている。

### 3. 無絶縁 REBCO コイルシステムの基盤技術と特性評価

本研究では、HTS-SC用REBCOマルチコイルシステム開発のための基盤技術として、1)高機械強度化のためのコイル補強構造 (YOROIコイル構造)、2)高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術 (無絶縁コイル巻線技術)、3)高精度の磁場を発生する技術 (遮蔽電流による不整磁場の評価と低減)、4) 5-High統合技術を活かしたマルチコイル設計最適化技術の確立を目指している。

本セッション (5 件連報) では、まず本発表 (その 1) で全体概要を報告した後、UBSC 用無絶縁 REBCO コイルの冷却・通電試験の途中報告として、(その 2 : 2A-a02) でコイル励磁時の各コイル両端電圧とホール素子による磁場の变化、および励磁後一定電流通電状態になった後のビーム加速面の磁場分布の測定結果 (計算結果との比較) を示しつつ無絶縁コイル特有の振舞いについて考察している。(その 4 : 2A-a04) では、励磁時の各コイルに設置したひずみの測定結果を数値解析結果とともに報告し、YOROI コイル構造の効果を考察している。

(その 3 : 2A-a03) と 1P-p05 では、無絶縁 REBCO コイルの遮蔽電流磁場解析法として計算時間の短縮を目的

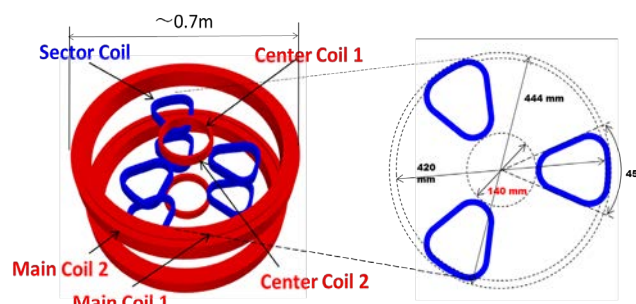


Fig.1 Schematic of NI-REBCO Coil System for UBSC

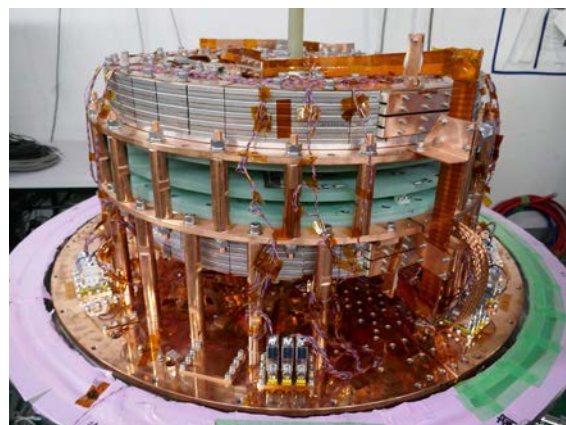


Fig.2 Photo of the fabricated NI-REBCO coil system

として新たに開発した回路モデルのみに基づく数値計算法「双方向分割回路型解析手法」を提案し、対象としたモデルコイルの実験結果との比較により、提案手法の妥当性の確認を行うとともに、2A-a03 では、無絶縁コイル特有の電圧波形に、1P-p05 では遮蔽電流磁場にそれぞれ着目した考察を行っている。

本セッション最後の (その 5 : 2A-a05) では、HTS-SC の要素技術開発の一環として試作した無絶縁 REBCO コイルを用いた高温超伝導 ECR イオン源 (HTS-ECR) の設計・製作・性能試験結果を報告する。

その他の報告として、1P-p07 では、HTS-SC 用コイルシステムの熱的安定性について検討した結果を報告している。HTS-SC 用コイルシステムは、口径の異なる同軸の等時性磁場発生用円形コイル (メインコイルとセンターコイル) と AVF 発生用非円形セクターコイルから成る (Fig.1)。本報告では、このようなコイルシステムの中の 1 つのコイルに劣化が発生したときのコイルシステム全体の電磁的・熱的振舞いを数値解析に基づき評価している。また、1P-p04 では、無絶縁 REBCO コイルの健全性の監視法として、コイルの一部に新たに発生した劣化をコイル電圧およびピックアップコイルにより検出する方法の有効性を検討した結果を報告する。

本研究の一部は科研費基盤研究S(18H05244)に依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 年春)  
 : (その2) 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの冷却・励磁特性試験  
 Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Spring 2023): (Part 2)  
 Cooling and excitation characteristics tests of 1/2 scale demonstration REBCO coil system

折原 菜月, 熊谷 塁(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 (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

進行がんへの効果が期待される $\alpha$ 線核医学治療の研究が進められている。我々が想定している $\alpha$ 線放出 RI( $^{211}\text{At}$ )は、飛程が短く(55 $\mu\text{m}$ )、標的となるがん細胞のみを殺滅することができる。しかし半減期が7.2時間と短いため、病院内或いは近隣施設での生産が求められる。そこで $^{211}\text{At}$ の安定供給を目指し、超小型で高強度(生産量の増加)な加速器「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を実現するため、5H(高機械強度、高電流密度、高熱的安定性、高磁場、高精度磁場)を可能とする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、YOROIコイル補強構造[2]と無絶縁(NI)コイル巻線技術[3]を適用した1/2スケール小型実証モデル「Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron(UBSC)用REBCOコイルシステム」を設計[4]・製作し(Fig.1)、現在、通電試験を行っている。その途中経過を報告する。

## 2. UBSC用無絶縁REBCOコイルシステムの通電試験

試作した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で、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は上側コイルを指す。図に示していないが下側コイルはLと表記する。現在、30K(全コイル内の温度差は $\pm 1\text{K}$ 以内に温調できた)伝導冷却下で160A(設計定格電流:540A)までの通電試験を実施した。

### 2-1. コイル両端電圧の時間変化

Fig.2に電流上昇率0.07A/sで図のように階段状に励磁していったときの下のセンターコイル(CL1)、主コイル(ML1,4)とセクターコイル(SL1)の各両端電圧の測定結果を示す。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、図のような電圧波形が観測された。

### 2-2. ビーム加速面の磁場分布の時間変化

Fig.2と同じ実験時のFi.3(a)の位置に設置されたホール素子で測定された磁場の時間変化をFig.3(b)に示す。ここでも、無絶縁コイル巻線特有の「励磁遅れ」が発生している。ホール素子は、回転板の上に設置してあり、これを回転させることにより、ビーム加速面の磁場分布を測定できるようになっている。その結果と、数値解析による結果の比較は当日報告する。

本研究の一部は科研費基盤研究S(18H05244)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. Watanabe et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, No.3, 8400204 (2015)
3. S. Hahn et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.21, No.3, pp.1592-1595 (2011)
4. T. Ogata, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.31, No.5, 4400105 (2021)

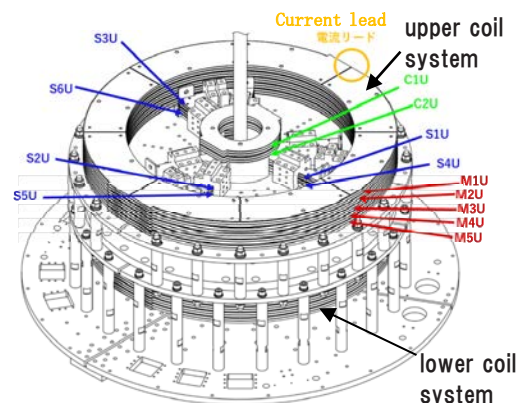


Fig.1 NI-REBCO Coil System for UBSC

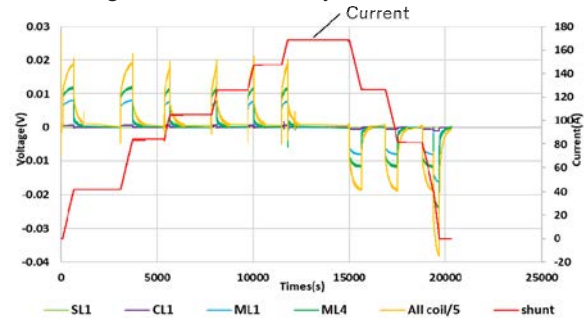


Fig.2 Voltage waveform (lower coil system)

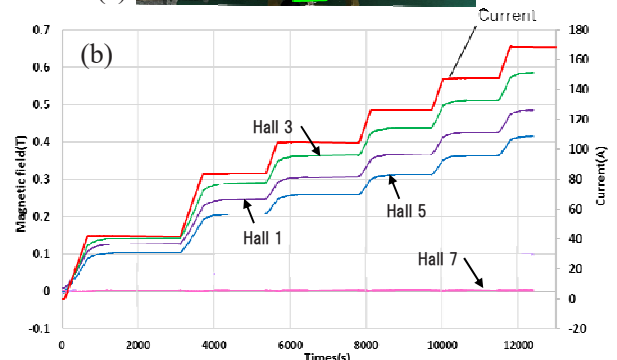
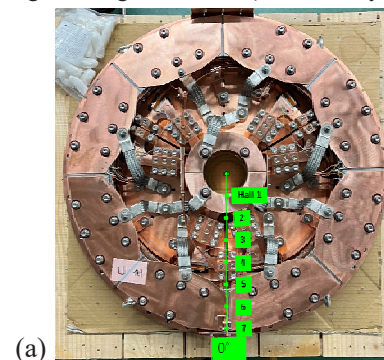


Fig.3 (a) Position of Hall probes, (b) Change in magnetic field on beam acceleration plane

「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 年春)  
 :(その3)無絶縁 REBCO コイル励磁時のコイル両端電圧波形  
 Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Spring 2023)  
 :(Part 3) Coil voltage waveforms during excitation of no-insulation REBCO coil

島田 亜緒, 熊谷 隼(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, KUMAGAI Rui (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、層間接触抵抗の大きさが両端電圧波形に及ぼす影響について考察した結果を報告する。

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 先行研究での解析手法

従来の解析手法[1]は、等価回路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・提案する「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、ビオ・サバ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。遮蔽電流と磁束侵入の考慮方法は、本学会 1P-p05 で報告する。

$$\sum_{j=1}^{total\_num} M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei}R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} I_{cti} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{div\_z} (I_{\theta i} + I_{cti}) = I_{op} \quad (4)$$

$$I_{cti} R_{cti} - I_{ct(i+1)} R_{ct(i+1)} = 0 \quad (5)$$

4. 解析結果

解析結果を Fig.4 に示す。本解析手法により、無絶縁 REBCO コイルの励磁遅れによる特徴的な両端電圧波形が再現できた。また、層間接触抵抗率が大きくなると励磁遅れが小さくなっており、この点についても無絶縁 REBCO コイルの特徴を再現できているといえる。

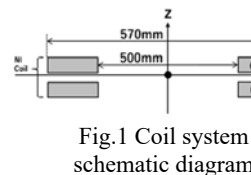


Table.1 Parameters of coil

Width [mm]	4.1
REBCO layer thickness [μm]	2
Turns per pancake coils	154
Numbers of Single pancake coil	2
Temperature [K]	40
Base coordinates of coils [mm]	Coil1 : 0.525 Coil2 : -4.625

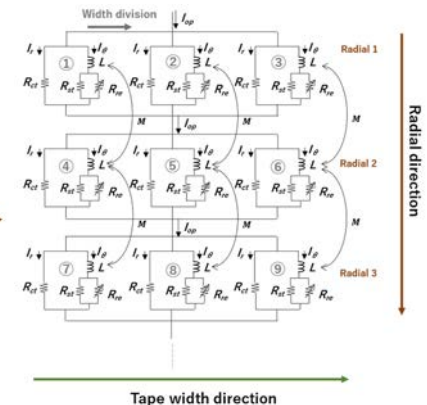
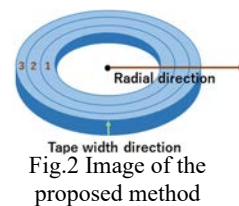


Fig.3 Equivalent circuit of NI coil in the proposed method

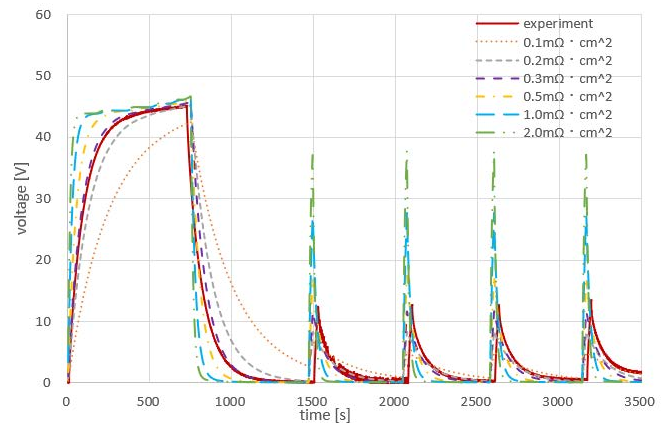


Fig.4 Analysis result

本研究の一部は科研費(基盤 S:18H05244)によった。

参考文献

1. S.Ueda, et al., IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.31, 4601405, 2021
2. 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.
3. H.Ueda et al. IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.26 4701205, 2016
4. 野口聡他,低温工学,Vol.54,No.2,103-110,2019.

「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 年春)  
 : (その4) 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムのひずみ評価  
 Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Spring 2023)  
 : (Part 4) Strain estimation 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][2]。コイルシステムは円形コイルと非円形(三角形)コイルを組み合わせた構成になっており、巻線が受ける電磁力は線材長手方向に均一ではない。本発表では、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。なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S (18H05244) に依ったことを付記する。

### 2. Ultra-Baby Cyclotron

スケルトン・サイクロトロンマルチコイルシステムの開発技術の確立に向けた課題となる要素技術について検証を行うため、REBCO 線材を用いて実証用高温超伝導小型マルチコイルシステムを製作した。その概略図を図 1 に示す。取出半径は 20 cm で陽子を 5 MeV まで加速させることを想定した。等時性磁場を形成する 4 対の円形メインコイルと AVF (Azimuthally Varying Field) を形成する 3 対の非円形セクターコイルから構成されている。各コイルは YOROI 構造で補強されている。マルチ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。ひずみゲージの配置を図 1 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。

### 3. 実験結果と解析結果

30 K まで冷却した後、120A まで励磁したときのひずみ測定の結果の一例としてセクターコイルの結果を図 2 に示す。ひずみは 30 K まで冷却した時点をもととしている。同時計測が可能な測定機器は限られているため、図 1 のすべてのひずみ測定はできていない。電流が 120 A まで励磁した後、徐々に減衰しているのは電源の特性のためである。図 2 からわかるように、セクターコイル 5,6 では直線部で 0.001~0.002% の引張りひずみ、セクターコイル 6 の底辺円弧部では引張りひずみ 0.015% が発生した。底辺円弧部のひずみが直線部に比べ 10 倍ほど大きいことになる。

併せて、マルチ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。REBCO 線材の積層構造(幅 6 mm, 厚さ 0.1 mm, 基板, Hastelloy 50  $\mu\text{m}$ , 超伝導層 1  $\mu\text{m}$ , 安定化層 Copper 40  $\mu\text{m}$ ) や巻線部は複合則で考慮して、弾性体として解析を行った。他のコイルの結果や解析結果の詳細、YOROI 構造の効果などについては、当日報告する。

#### 参考文献

- 2023 年春季低温工学・超伝導学会講演概要集 2A-a01 (2023)
- 2023 年春季低温工学・超伝導学会講演概要集 2A-a02 (2023)

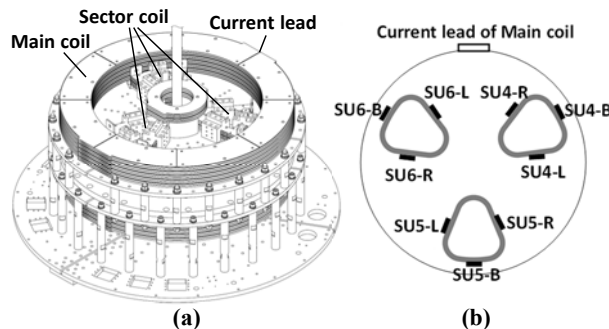


Fig.1 Drawing of Ultra-Baby Cyclotron and (b) Top view of sector coils and arrangement of strain gauges. “SU” means upper sector coil.

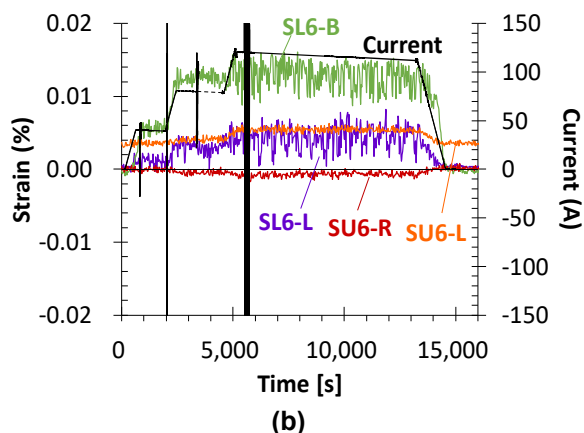
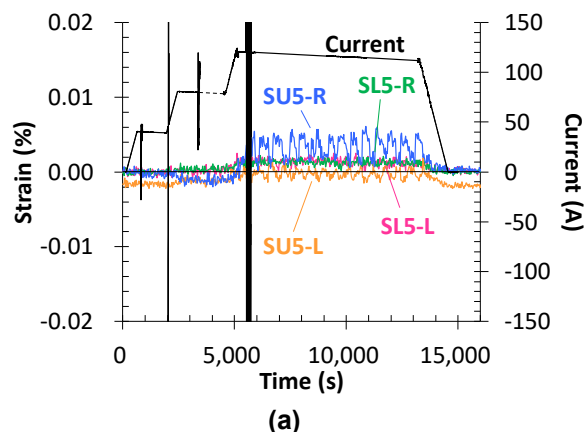


Fig. 2 Experimental results of strain in Sector coils. (a) SU5 and SL5, (b) SL6 and SU6.

# 「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 年春)

## :(その5) ECR イオン源用無絶縁 REBCO コイルの開発

Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Spring 2023) :

(Part 5) Development of NI-REBCO coil for ECR Ion Source

荘 凌謙, 福田 光宏(阪大); 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡山大); 野口 聡(北大); 福井 聡(新潟大); 吉田 潤(住重); 渡部 智則(中部電力)

CHONG Tsun Him, FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI Sou (Hokkaido Univ.); FUKUI Satoshi (Niigata Univ.); YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);

WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co., Inc.)

E-mail: oscar@rcnp.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導空芯型加速器スケルトン・サイクロトロンの要素技術開発の一環として、小型無絶縁 REBCO コイルを用いた高温超伝導 ECR イオン源(HTS-ECR)の開発を行っている。円形コイル4個、レーストラック型コイル6個から構成されるコイルアセンブリを製作し、これらのコイルを同時に励磁することによって無絶縁 REBCO コイルの外部磁場の下での性能を検証している。本発表は、高強度 ECR イオン源の開発を兼ねた磁場分布形成の概要と、製作した小型コイルアセンブリの液体窒素浸漬冷却(77K)性能試験の結果について報告する。

### 2. 小型 REBCO コイルアセンブリ

複数の REBCO コイルを同時に或いは順に通電して励磁した際に各コイルが経験する外部磁場の下での性能検証を行うため、小型の REBCO コイルを製作し、コイルアセンブリを完成させた。製作した高温超伝導 REBCO コイルアセンブリを Fig.1 に示す。このコイルアセンブリは4個の円形コイルと6個のレーストラック型コイルから構成されており、それぞれ幅 12 mm と 6 mm の REBCO 線材を使っている。円形コイルはイオン源中心軸方向のプラズマ閉じ込めミラー磁場を作るためのものであり、ミラーコイルと呼ばれている。レーストラック型コイルはイオン源の半径方向の閉じ込めを行うための磁場分布を形成するためのもので、6極コイルと呼ばれる。ミラーコイルと6極コイルの臨界電流は 20~30 K の運転温度でそれぞれ 500 A 以上と 250 A 以上を期待している。

### 3. HTS-ECR の磁場設計

大電流の陽子ビームや  $\text{He}^{2+}$  イオンビームの供給を目指し、HTS-ECRの磁場分布を設計した。中心軸上の軸方向の磁場分布を Fig.2 に示す。陽子生成用の 2.45 GHz と  $\text{He}^{2+}$  イオン生成用の 10 GHz の異なるマイクロ波周波数での運転を想定し、REBCO コイルの励磁電流値の切り替え能力を検証する。Fig. 2 では、黒い線は 10 GHz に対応したミラー磁場分布で、赤線は 2.45 GHz に対応した磁場分布である。点線はそれぞれの電子サイクロトロン共鳴(ECR)磁場を示しており、電子は実線と点線が交わる場所で共鳴現象によりマイクロ波からエネルギーを得て、イオン化を引き起こす。上流側の磁場ピークを高め、磁場の谷部分に共鳴ゾーンを置くことによりマイクロ波の入力効率が最大になる[1]。Cannobio's Theory によると HTS-ECR は 18 W のマイクロ波を入力させた場合、電子の最大エネルギーは二つの周波数モードでそれぞれ 12 keV および 30 keV と見積もられ、大電流イオンビームの生成が期待できる[2]。

### 4. 77 K 低温性能試験

製作した REBCO コイルアセンブリを液体窒素に浸して 77K で通電試験を行った。4個のミラーコイルと6個の6極コイルはそれぞれ直列に接続して同じコイル電流を通電するよう

にした。ミラーコイルには 90A、6極コイルには 60A まで電流を通電し、各コイルの入力出力端子間の電圧変化を測定した。コイルがお互いにする磁場を経験しても端子間電圧は接触抵抗等に起因した線形的な変化のみ示しており、常伝導状態への転移は見られなかった。約 3 時間のホールドにおいても電圧は安定していた。この電流値では ECR イオン源として 2.45 GHz の運転モードに必要な磁場が生成できるので、製作した REBCO コイルアセンブリはイオン源用電磁石として安定な運転ができる性能を持っていると考えられる。

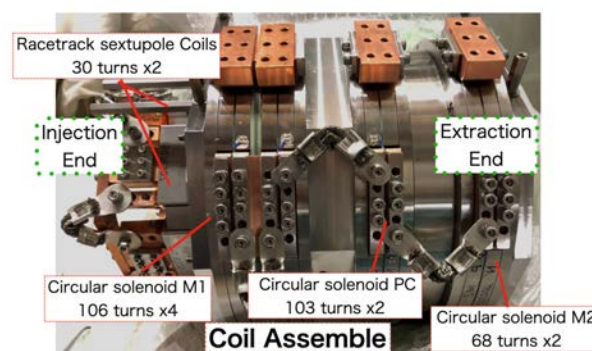


Fig.1 REBCO coil assemble of HTS-ECR.

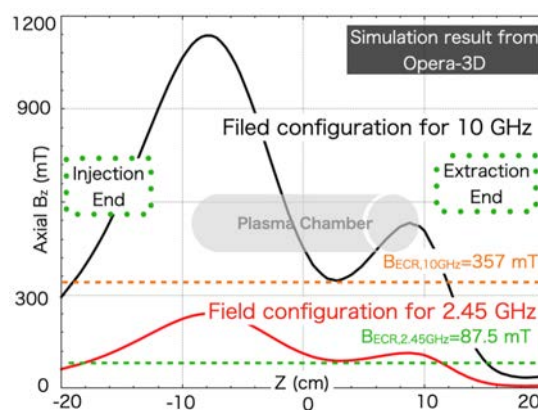


Fig.2 Designed magnetic field configuration of HTS-ECR.

### 参考文献

1. M. A. Liberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley Interscience, 2005).
2. R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Source and ECR Plasmas* (Institute of Physics Publishing, 1996).

# 陽子線治療向け 230 MeV サイクロトロンにおける超伝導マグネットの励磁試験

## Excitation Test of Superconducting Magnet in 230 MeV Isochronous Cyclotron for Proton Therapy

吉田 潤, 橋本 篤, 森江 孝明, 荒川 慶彦, 筒井 裕士, 鶴留 武尚, 宮下 拓也 (住友重機械)  
 YOSHIDA Jun, HASHIMOTO Atsushi, MORIE Takaaki, ARAKAWA Yoshihiko, TSUTSUI Hiroshi, TSURUDOME Takehisa,  
 MIYASHITA Takuya (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.)  
 E-mail: jun.yoshida@shi-g.com

### 1. 序論

陽子線治療装置は更なる市場拡大のためにシステムを構成するガントリ、ビーム輸送系、加速器などの機器の小型化、軽量化が進んでおり、それに超伝導技術は大いに貢献してきた。当社も装置小型化のために 230MeV 超伝導 AVF サイクロトロンを開発を行った。このサイクロトロンは従来の常伝導コイルを超伝導化することで装置外径を従来の 4.4 m から 2.8 m に小型化し、鉄心重量を従来比約 1/3 の 65 ton に軽量化することができた。また超伝導化によってシステム全体の消費電力を 4 割削減することができ、輸送と据付工数も低減できた。更に本サイクロトロンはビーム電流を従来比 3 倍以上の 1000 nA の出射が可能で治療の高速化にも対応している。本発表ではサイクロトロン超伝導マグネット部分の設計および励磁試験結果について報告する。

### 2. サイクロトロンの磁場設計とクライオスタット設計

本サイクロトロンは大ビーム電流が求められているためヒル&バレーの磁極構造を持つ。Fig. 1 にマグネットの下側半分の磁束密度コンターを示す。磁極は 4 つのセクターは大きなスパイラル角を持ち、バレーは深く、更に上下セクター間のギャップは狭く設計されており、これらの形状はビームの垂直方向収束力を得ることが目的である[1]。コイルアセンブリは NbTi 線材を巻線した上下 2 つのコイルで構成されており、2 つのコイル間に設置された構造部品にはビーム引出口や RF キャビティのチューナー等のために幾つかの貫通孔が設けられている。定格通電電流は 442 A に対して最大電流は 488 A で設計されており、最大電流通電時のコイルのピーク磁場は 4.2 T、臨界温度は 7.4 K で設計されている。

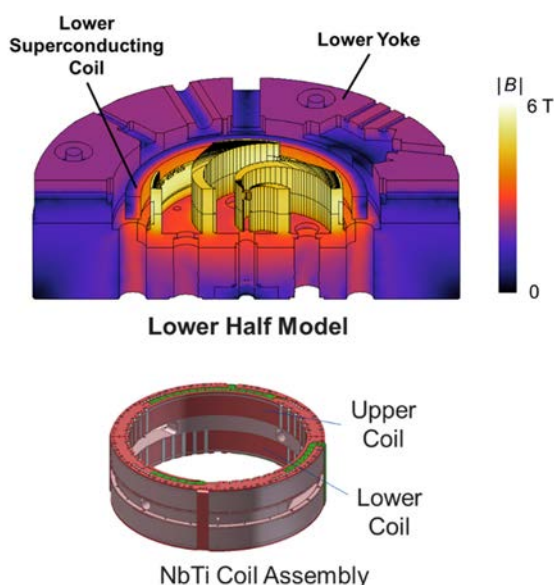


Fig. 1 サイクロトロンの磁束密度コンターとコイルアセンブリ構造

クライオスタットは 4 つの Gifford-McMahon 冷凍機[2]を備えており伝導冷却でコイルと輻射シールドが冷却されている。またコイルに生じる不平衡電磁力の支持と位置調整のために 4 つの水平荷重支持体、4 つの垂直支持体を備えている。初期冷却時間は 14 日と推定された。

### 3. 冷却試験と励磁試験

冷却試験を実施し、初期冷却は設計どおり14日で上コイルの最低到達温度は4.2 Kであった。その後、通電電流を上げていき、段階を踏みながら保護回路のテストとコイル位置の粗調整を実施していった。最後に300 Aでの遮断試験を実施しFig. 2に示す最大電流488 Aへの励磁試験へと移行した。初めての最大電流の励磁試験はクエンチなしで到達することができた。

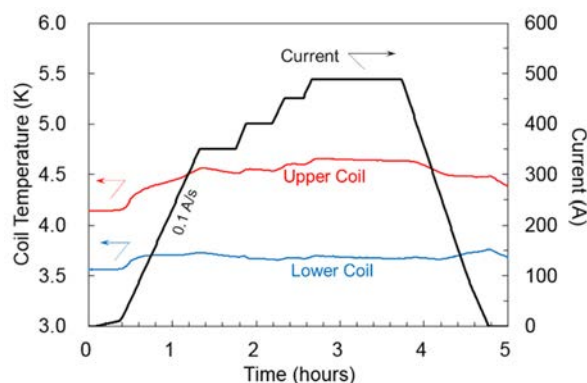


Fig. 2 初回の最大電流励磁試験結果

その後、インダクタンスの電流依存性の評価、定格の電流掃引パターンでの励磁試験を経て最大電流でのクエンチ保護試験を実施した。このサイクロトロンはクエンチした際のサイクロトロンのダウンタイムを短縮化するためにクライオスタット外部に1.1 Ωの保護抵抗を並列に備えている。クエンチしたときは蓄積エネルギーの一部を保護抵抗で散逸することができる。実際に試験した結果、ほぼ設計通り全蓄積エネルギー5.3 MJのうち42%を外部保護抵抗によって取り出すことができ、クエンチ後17時間で再励磁することができた。この試験結果はOperaのQUENCHモジュールで検証を行い設計と良い精度で一致することがわかった。

### 参考文献

1. H. Tsutsui, et al.: Proceedings of the 20th International Conference on Cyclotrons and their Applications (2013)
2. SHI Cryogenics Group: "Cryocoolers," <http://www.shicryogenics.com/products/4k-cryocoolers/> (Accessed 2023-3-15).

# 液体水素冷却発電デモ機向け高強度 REBCO コイルの検討

## Study of High-Strength REBCO Coil for Liquid Hydrogen-Cooled Power Generation Demonstrator

小畑 慶人, 三浦 英明, 殿岡 俊(三菱電機); 大屋 正義(関西学院大学)

OBATA Keito, MIURA Hideaki, TONOOKA Shun (Mitsubishi Electric Corp.); OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.)

E-mail: Obata.Keito@eb.MitsubishiElectric.co.jp

### 1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて[1]、液体水素の冷熱を活用したゼロエミッションな高温超電導発電機の研究開発を行っている。

大型発電機の開発に向けた課題の一つが、REBCO 線材の機械的脆弱性である。600 MW 級超電導発電機では、8000 × g の遠心力によって、コイルに対して 50 MPa 級の軸方向圧縮応力が発生すると想定している。先行研究では、10 MPa 程度から超電導特性が低下し始めることが報告されており[2]、この 5 倍以上の強度を有する REBCO コイルを開発する必要がある。本研究では、軸方向圧縮時の構造解析と、圧力下でコイルの  $I_c$  特性を測定するシステムを構築したので報告する。

### 2. 圧力印加時の構造解析

解析ソフト Opera を用いて、パンケーキコイルを軸方向に圧縮した場合の構造解析を行った。コイル軸方向に圧力を印加すると、コイルは径方向に膨張し、コイルの最外層と最内層では、径方向に剥離して倒れるように変形する。したがって、実際にコイルを径方向に圧縮したとき、コイルの最外層ないし最内層から劣化が進行し、 $I_c$  が低下することが見込まれる。

### 3. 実験装置

Fig.1 のような液体窒素中でコイルを局部的に圧縮しながら通電できるシステムを構築した。SUS 製の液体窒素容器の底に油圧ジャッキが取り付けられている。さらに SUS 容器の上方にロードセルが設置されており、ジャッキアップすると SUS 製のネジの先端に取り付けられた GFRP 製のアタッチメントにコイルが挟まれ、圧縮される。本試験には、Table.1 にある円形シングルパンケーキコイルを用いた。

### 4. 実験結果

コイル周方向 5 mm の区間に、18.2 MPa ずつ段階的に圧力を印加し (Fig.2)、一定圧力下で  $I_c$  の測定を行った。Fig.3 のように常圧から 164 MPa までは、 $I_c$  は減少しなかった。しかし、164 MPa から 182 MPa に圧力を上昇させる際に、異音とともに印加圧力の低下がみられ、 $I_c$  も急激に低下した。試験後のコイルは、最内層が内側に座屈しており、これが大幅な  $I_c$  低下の原因であると考えられる。

### 5. 結び

超電導発電機の安全性に大きく関わる、高温超電導コイルの機械強度について、軸方向圧縮に対する構造解析と  $I_c$  測定を行った。構造解析では軸方向の圧力によって、径方向に膨張することが示され、コイルの最内層と最外層は剥離して倒れることが予想される。さらに実験では、最内層が径方向の圧縮に耐えきれずに座屈し、 $I_c$  が急激に低下した。これらの結果から、最内層の座屈を抑える構造によって、コイルの機械強度の向上が期待される。本発表では、コイルの補強構造について解析結果も交えながら議論する予定である。

なお、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ある。

Table.1 Specifications of REBCO tape and coil

Tape width (mm)	4.0
Hastelloy substrate thickness (μm)	40
Copper stabilizer thickness (μm)	10
Critical current (A) @77 K, 0Pa	140
Coil inner diameter (mm)	85
Coil outer diameter (mm)	96

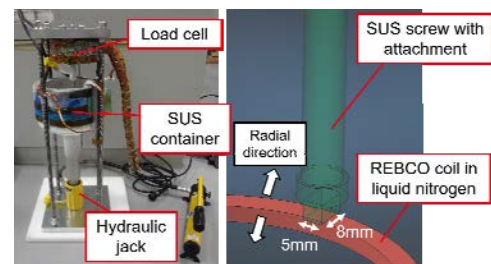


Fig.1 Appearance of compression system and REBCO coil compressed in liquid nitrogen

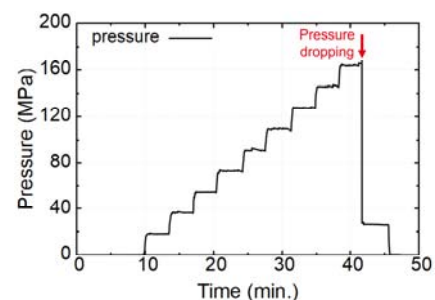


Fig.2 Time change of applied pressure

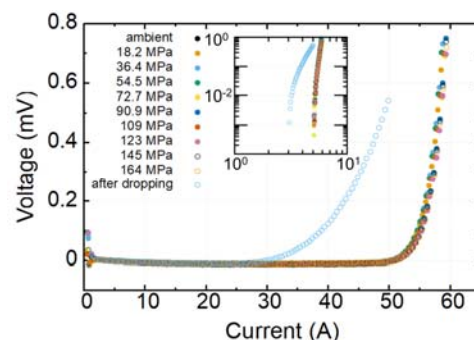


Fig.3  $I-V$  curves of REBCO coil under pressure and after pressure dropping

### 参考文献

1. 資源エネルギー庁、「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討」、令和3年1月27日
2. Y. Nagasaki et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.31, no.5 (2021).

# 大口徑 10T 級 REBCO マグネット開発(3) 10T 級テストコイルのクエンチ試験

Development of a 10T class large bore REBCO magnet (3) Quench tests of a 10T class test coil

藤田 真司, 武藤 翔吾, 中村 直識, 大保 雅載 (フジクラ)

FUJITA Shinji, MUTO Shogo, NAKAMURA Naonori, DAIBO Masanori (FUJIKURA)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

## 1. はじめに

蓄積エネルギーが MJ 級の大型高温超電導マグネットではクエンチ保護が課題である。2013 年に我々が開発した大口徑 5T-REBCO マグネットでは安定化銅を厚くすることでクエンチ保護を可能にしている[1]。同様の方針で、厚い銅テープを貼合せた REBCO 線材を用いることでクエンチ保護可能な大口徑高磁場マグネット(以下、実機)の検討を行っている。これまで、銅テープを貼合せた線材を用いたクエンチ試験[2, 3], 10T 級小型テストコイル(以下、テストコイル)の作製[3], およびその通電試験と遮蔽電流評価・解析[4]について報告した。今回、テストコイルを用いたクエンチ試験を実施し、実機でのクエンチ保護可能性について検証したので報告する。

## 2. 試験方法

テストコイルは[3]に記載のものである。使用している REBCO 線材は 4 mm 幅の人工ピンタイプ線材 (FESC-SCH04) の基板側に 0.3 mm 厚の銅テープを Sn で貼合せたものである。コイルは最内ターンで接続したエポキシ樹脂含浸の 2 層パンケーキコイルであり、内径 50 mm, 外径 146 mm 程度のもを 16 個積層したものである。

コイルを GM 冷凍機が付いた伝導冷却クライオスタットに取り付けて冷却し、20 K に温調して試験を行った。試験回路を Fig. 1 に示す。今回、コイルをクエンチさせるため、コイルの下側の真鍮フランジに 50 W のヒーターを取付けた。コイルに実機の運転電流である 275 A を通電した状態で、下側フランジ全体を加熱することで、最下層のパンケーキコイルをクエンチさせる。クエンチ検出は検出電圧  $V_{QD} = 100$  mV, 検出時間  $t_{QD} = 100$  ms とし、クエンチ検出されると遮断器が開く。保護抵抗の抵抗値を 0.5, 0.25, 0.1, 0.05  $\Omega$  と変化させ、電流遮断後の減衰時定数を変化させた。

## 3. 試験結果

保護抵抗を 0.5  $\Omega$  とした場合の試験結果を Fig. 2 に示す。コイル電圧は 2 層パンケーキごとの電圧を計測しており、積層順に上から Coil 1~16 としており、最下層が Coil 16 である。コイル初期温度 20 K で通電電流 275 A の状態でヒーター投入し、約 160 秒後に Coil 16 で電圧が発生し始め、約 200 秒後にクエンチ検出器が動作し、電流が遮断された。Coil 16 以外のコイルでは電圧発生は無かった。電流減衰の時定数は 0.59 秒であり、コイルのインダクタンス 0.28 H から求めた時定数 0.56 秒とほぼ一致した。クエンチ後にコイルを 77 K に温調して  $I_c$  を測定し、劣化がないことを確認した。保護抵抗の抵抗値を小さくして同様にクエンチ試験を実施し、クエンチ後に 77 K で  $I_c$  測定を繰り返し、保護抵抗 0.05  $\Omega$  では時定数は 5.1 秒まで増加した。保護抵抗が 0.05  $\Omega$  の場合、時定数は計算上 5.6 秒であるが、コイルの常電導電圧による抵抗成分が約 3 m $\Omega$  発生しており、この抵抗成分を考慮すると実験結果と概ね一致した。Fig. 3 に各クエンチ試験後の 77 K のコイル  $I_c$  を示す。縦軸は一連のクエンチ試験前の  $I_c$  で規格化しており、横軸は試験時の実測時定数として表示している。時定数が 5 秒を超えてもコイルに劣化がないことを確認した。想定している実機では時定数 4.4 秒の設計であり、今回の結果は実機でもクエンチ保護が可能であることを示している。

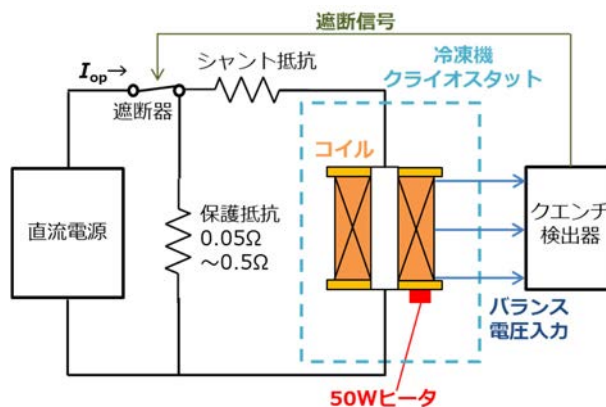


Fig. 1 Electrical circuit of the quench test.

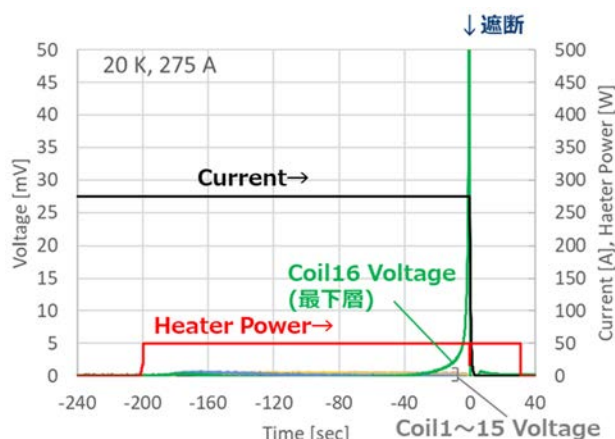


Fig. 2 Quench test results with 0.5  $\Omega$  dump resistor.

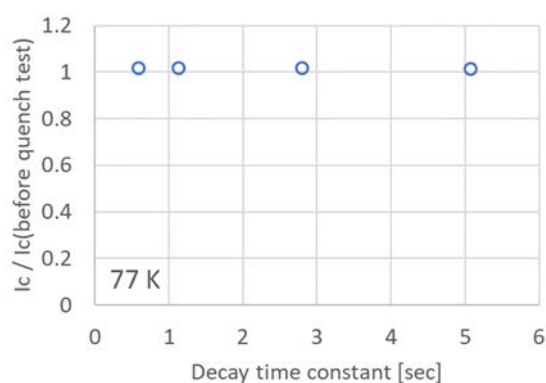


Fig. 3  $I_c$  ratio at 77 K before and after each quench test against the decay time constant.

## 参考文献

- [1] M. Daibo, *et al.*, IEEE TAS, **23**, no. 3, (2013) 4602004.
- [2] S. Muto *et al.*, IEEE TAS, **32** (2022) 4701605.
- [3] S. Fujita *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, **102** (2021) p.36.
- [4] S. Muto *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, **102** (2021) p.37.

# 人工ピン入り EuBCO スプリット線コイルの 液体窒素蒸発法による交流損失の測定評価

## Measurement and evaluation of AC loss for EuBCO coil winded by split wire having artificial pins with liquid nitrogen boil-off method

金沢 新哲, 関根 ちひろ, 川口 秀樹(室工大)  
KANAZAWA Shintetsu, SEKINE Chihiro, KAWAGUCHI Hideki (MIT)  
E-mail: shintetsu\_kanazawa@muroran-it.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材は交流磁場下でヒステリシス損失が生じることから、交流機器へ応用するためには多芯化が必要である。また直流機器でも遮蔽電流磁場による不都合があることから、重要な研究課題となっている。我々は線材に様々な応力を印加することで、線材内部の超伝導層が分割したスプリット線の開発を行っている[1,2]。前回の発表では、人工ピンありの EuBCO 線材を用いてスプリット線を加工し、これまで一番高い臨界電流が得られている。また、線材の磁化測定の結果からヒステリシス損失が改善したことから、スプリット線は人工ピンありの REBCO 線材にも応用できると考え、さらなる調査として、今回は人工ピンありのスプリット線でコイルを作製し、交流損失を評価することを目的とした。

### 2. 実験

本実験では、(株)フジクラ製の EuBCO 線により、スプリット線加工を行った。線材の幅は 4 mm、厚さは 50  $\mu\text{m}$  (銅メッキなし、人工ピンあり)である。作製したスプリット線の長さは 9 m である。表 1 はスプリット線の作製条件を示し、超伝導層側の Ag 層が切断されない程度に加工した。コイルはスプリット線と元の線材の両方で作製し、交流損失を比較した。2つのコイルは同じ仕様であり、内径 30 mm、8 ターンの 12 層である。

表1 スプリット線材の作製条件

応力印加方法	引きさき応力
丸刃の本数(枚×セット)	37×3 = 111
1セットあたりの負荷 (N)	50
応力印加表面	超伝導層側
ローリングの加工回数	1

### 3. 実験結果とまとめ

Fig.1 は、線材の Ag 表面の写真である。線材の長手方向に白い線がみられ、丸刃での加工ラインである。ハステロイ側を加工するより、加工ラインがはっきり見えるので、どの丸刃が押されていないか区別しやすい。

コイルの交流損失の測定方法は、Fig.2 に示した液体窒素蒸発法を用いた。測定手順について、まず、交流磁場発生用コイルと測定用コイルおよび測定用コイルを入れたポリエチレン容器を固定し、大きな発砲スチロール容器に入れて、液体窒素を注入する。次は、測定用コイルが完全に液体窒素に含浸されるように液体窒素をポリエチレン容器に入れ、容器の容量の 80%程度になるようにする。それから、ポリエチレン容器の蓋を閉め、流量計により外部印加磁場がない時の窒素ガスの流量を計測する。最後に、交流磁場発生用コイルに 500 Hz の交流電流(有効電流 10 A)を流した状態で窒素ガスの流量を計測する。データ解析では、室温で大気圧(1 atm)における流量 250 ml/min を 1 W として交流損失を計算した。測定結果を Fig.3 に示す。まず、両方のコイルは交流磁界を印加した後、約 1分程度で排気量が安定し、交流磁界を印加していない場合(縦軸の値がゼロ)に比べて上昇した。元の単芯線コイルでは、ガス流量が最大 70 ml/min であり、これは交流損失 0.3 W である。スプリット線によるコイルでは、ガス流量が最大

7 ml/min であり、交流損失 0.03 W で、元の単芯線コイルより 10 分の 1 に大きな改善が得られた。



Fig. 1 Ag surface of the fabricated split wire.

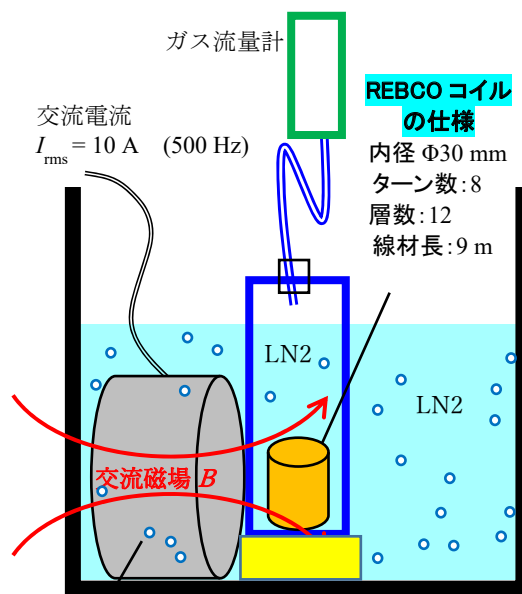


Fig. 2 Measurement method of AC loss in coil.

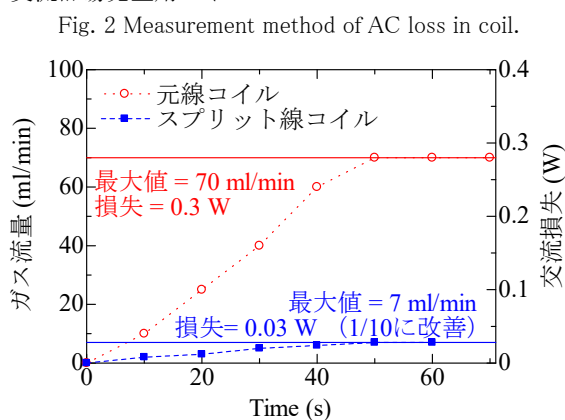


Fig. 3 AC losses in both coils.

### 参考文献

- [1] 金 新哲, 前田 秀明, PCT/JP2015/072393, 2015.08.06  
[2] Xinzhe Jin, et al., Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 045006



# Zr をパターンニングした基板上でマルチフィラメント構造化した MOD-YBCO 薄膜の組織観察

## Microstructure observation of multifilament structured MOD-YBCO film on Zr-patterned substrate

藤本 大貴, Guo Zimeng, 波多 聡, 寺西 亮 (九大); 松本 明善, 大井 修一 (NIMS)  
 FUJIMOTO Hiroki, GUO Zimeng, HATA Satoshi, TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.);  
 MATSUMOTO Akiyoshi, OOI Shuuichi (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、下地基板の結晶配向の違いを利用した超伝導層の結晶配列化を検討している。これまでに SrTiO<sub>3</sub>(STO)基板上の一部に Zr をバンク状に堆積することで、YBCO 膜は STO 上では配向し、Zr 上では配向が乱れることが分かっている。そこで Zr を細線状にパターンニングした基板上に YBCO を成膜し、STO 上と Zr 上の結晶配向の違いを利用したマルチフィラメント化を行っている。

本報告では、5 μm 幅の Zr 直上における YBCO 膜の断面組織を FIB-SEM で観察し、Zr バンクや YBCO 膜の内部組織の解析結果を示す。

### 2. 実験方法

基板には STO (100)を用い、幅 5 μm の Zr を細線状にパターンニングした。MOD には Y : Ba : Cu = 1 : 1.5 : 3 のオクタン溶液を用い、基板の上にスピコートと 703 K での仮焼を 3 回繰り返した後、1053K での 150 分の本焼を施した。得られた試料を FIB-SEM にて二次電子像観察を行い、Zr バンクの中央及び端部における表面と断面の結晶組織の違いについて調査した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 は作製した試料表面の二次電子像である。これより観察視野の中央に幅 5 μm 程度で上下方向の端から端までコントラストの違いが観察された。この結果から、コントラストの強い部分が 5 μm 幅の Zr 直上に相当すると考えられる。

Fig. 2(a), (b)は、Fig. 1 における 5 μm 幅の Zr 上及び Zr バンク近辺における断面の二次電子像である。Fig. 2(a)において Zr バンクに注目すると、上辺が 2.0 μm 程度、下辺が 4.5 μm 程度の台形であることが観察された。また Zr バンクの上部には凹凸があり、内部には 70nm 程度の空隙が観察され、基板と Zr バンクの界面に 220nm 程度の空隙の存在も観察された。また YBCO 膜に注目すると、Zr バンク直上の YBCO 膜表面は凹凸が激しく、200~430nm 程度の粒子が複数観察され、これら粒子のコントラストは均一でないことが観察された。

Fig. 2(b)において STO 直上に注目すると、膜厚が 580nm 程度の一様な YBCO 膜が観察され、平らな膜の表面上に 180nm 程度の粒子が複数観察された。また YBCO 膜中には 130nm 程度のコントラストの濃い部分や 100~350nm 程度の複数の空隙が観察された。Fig. 2(a)と(b)の結果から Zr と STO 上における YBCO の膜厚を比較すると、Zr 上の方が 280nm 程度厚くなっていることが分かった。そこで、結晶化前後の Zr と STO 上の YBCO 膜の変化は Fig. 3 のように模式的に示すことができる。Fig. 3(b)の YBCO 膜内の空隙は MOD のプロセスにおいて前駆体から YBCO へ結晶化する際に生じる体積収縮に起因していると考えられる[6]。また、Zr と STO 上の

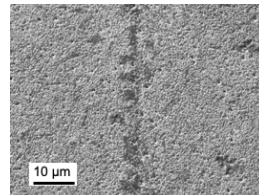


Fig. 1 SEM image of the YBCO film surface  
On Zr stripe with 5 μm-width

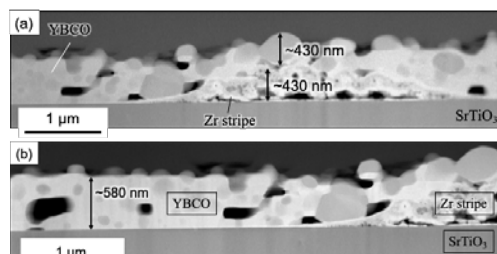
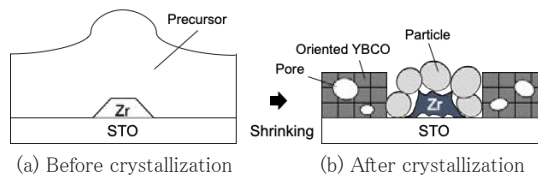


Fig. 2 Cross-sectional image of the sample  
on Zr (a) and STO (b)



(a) Before crystallization (b) After crystallization  
Fig. 3 Schematic images of YBCO on Zr and STO

YBCO の膜厚の差は、STO 上では YBCO 膜が密に結晶化し、Zr 上では粒子が積み重なることに起因すると考えられる。

以上から、Zr の導入が YBCO 膜の配向を乱し、STO 直上の配向した YBCO 膜と配列することで YBCO 層のマルチフィラメント化に繋がっていることが分かった。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K18831 および 22H0219、ならびに (国研) 物質・材料研究機構の Joint Research Hub Program 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] 徳永義孝 他, 日本金属学会誌, 68, 9 (2004) 742-747

# 一方向溶融成長(SDMG)法による大型リング状 REBCO 溶融凝固バルクの直接育成

## Direct fabrication of large ring-shaped REBCO melt-textured bulks by the Single-Direction Melt Growth (SDMG) method

元木 貴則, 仙波 実怜, 下山 淳一(青学大)

MOTOKI Takanori, SEMBA Mirei, 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応用されているが、さらなる広い用途での実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るため、卓上 NMR 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 Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた<sup>[1,2]</sup>。本手法は、希土類元素の異なる REBCO の包晶温度( $T_p$ )の差を利用して、高  $T_p$  の既製の TSMG バルクを板状に切り出して seed plate とし、その上に載せたバルクを鉛直方向に一次元的に結晶成長させる手法である。SDMG 法を用いると、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。

### 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 25–50 mm, 内径 10–25 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 SDMG 法リング形状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  $T_p$  を低下させるため 10 wt% の  $Ag_2O$  を、RE211 の微細化のため 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 から切り離れた後、1% $O_2$ /Ar フロー中 850–900°C での還元アニールを行い、425°C で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、リング内部の捕捉磁場分布を評価した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した 7 つのリング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約 15% 収縮したが、リング形状を維持しておりクラックの発生などは見られなかった。外径 35 mm までのリングバルクでは、高い捕捉磁場が期待できる DyBCO を、外径 50 mm の大型リングバルクでは、NMR 用途に適すると考えられる非磁性の YBCO をそれぞれ選択した。Fig. 2 に 77 K における DyBCO リングバルク内部の高さ方向の捕捉磁場の変化を示す。溶融凝固後サイズで外径 28.7 mm, 内径 7.9 mm, 高さ 11.5 mm の #Dy3 バルクにおいて、リング中心において 1.8 T を超える極めて高い捕捉磁場が確認できた。また、外径 50 mm の金型から作製した大型のリングバルク #Y1–Y4 についても動径方向に均一な組織が形成されており、

リング中心での最大捕捉磁場は 0.34–0.50 T であった。さらに、これら #Y1–Y4 を積層することでリング内の高さ約 18 mm の範囲で捕捉磁場が 1 T を超え、大口径かつ広範囲で強磁場発生が可能であることを実証した。詳細は当日報告する。

[1] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13**, 093002 (2020)

[2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** 094003 (2022)

### 謝辞

本研究は、NEDO 未踏チャレンジ 2050 (22M1C01Y) の助成を受けたものである。



Fig. 1. Appearance of SDMG-processed DyBCO and YBCO melt-textured ring-bulks fabricated using ring-shaped dies with outer and inner diameters of 25 mm and 10 mm (#Dy2), 35 mm and 10 mm (#Dy1, 3), and 50 mm and 25 mm (#Y1–4).

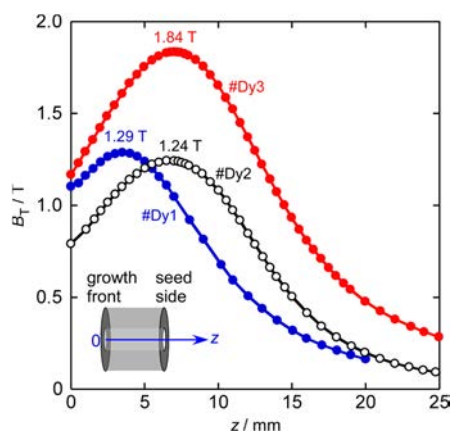


Fig. 2. Trapped magnetic field distributions along the center axis of ring-shaped bulks, #Dy1, 2, 3, at 77 K.

## 結晶成長方位の異なる RE123 溶融凝固バルクの臨界電流特性

Critical current properties of RE123 melt textured bulks with different crystal growth direction.

仙波 実怜、元木 貴則、下山 淳一(青学大)

SEMBA Mirei, MOTOKI Takanori, 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]。この RE123 溶融凝固バルクの一般的な作製法である Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法で作製した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成長領域によって異なる *a*-growth 領域と *c*-growth 領域が共存する。一方、Fig. 1 に示すように作製するバルクより包晶温度( $T_p$ )の高い既製の RE123 溶融凝固バルクを seed plate に用い一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、全体が *c*-growth もしくは *a*-growth 領域のみからなる単一ドメインの Dy123 溶融凝固バルクを SDMG 法により作製し、その超伝導特性や捕捉磁場特性、微細組織を評価している。

## 2. 実験方法

本研究では、RE に Dy を選択し、TEP 社製 Dy123 粉末に対して包晶温度低下と機械的強度向上のために Ag<sub>2</sub>O を 10 wt%、Dy211 析出物の微細化のために CeO<sub>2</sub> を 0.5 wt% 添加した前駆体粉末を 100 MPa の一軸プレスによりペレット成型し、バルクの緻密化のため空气中 1050°C、2 h の短時間溶融過程を導入した。続いて、前駆体ペレットを表面が(001)面または(100)面の Eu123 seed plate 上に置き、ペレット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、徐冷過程に続いて等温過程を加えた温度パターンで結晶育成を行った。得られた溶融凝固バルクを seed plate から切り出した後、Dy/Ba 固溶を低減するため 1%O<sub>2</sub> 気流中、850°C、24 h で還元ポストアニールを行い、最後に O<sub>2</sub> 気流中、425°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評価を行った。

## 3. 結果と考察

Fig. 2. (a) に *c* 軸成長領域のみからなるバルク(all *c*-growth bulk)、Fig. 2. (b) に *a* 軸成長領域のみからなるバルク(all *a*-growth bulk)の seed plate からの距離の異なる小片試料に対する 60 K における  $J_c$  の磁場依存性を示す。all *c*-growth bulk の  $J_c$  は seed plate からの距離依存性が大きく、all *a*-growth bulk は種近傍を除いては距離に依らない  $J_c$  を示していることがわかった。また、all *a*-growth bulk の方が  $J_c$  の絶対値も高い。これらのことから all *a*-growth bulk では、高さ方向に均質な組織が形成されており、all *c*-growth bulk に比べて  $J_c$  も本質的に高いことが示唆された。講演では、成長方位が異なるバルク間の物性、特に微細組織の相違や捕捉磁場特性の違いについても議論する。

## 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.

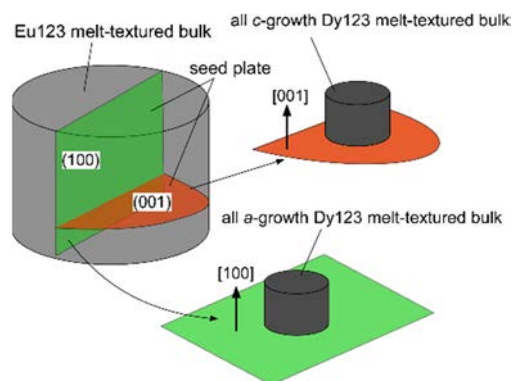


Fig. 1. Schematic illustration of the SDMG-processed Dy123 bulks with entirely *a*- or *c*-grown regions prepared on Eu123 seed plates.

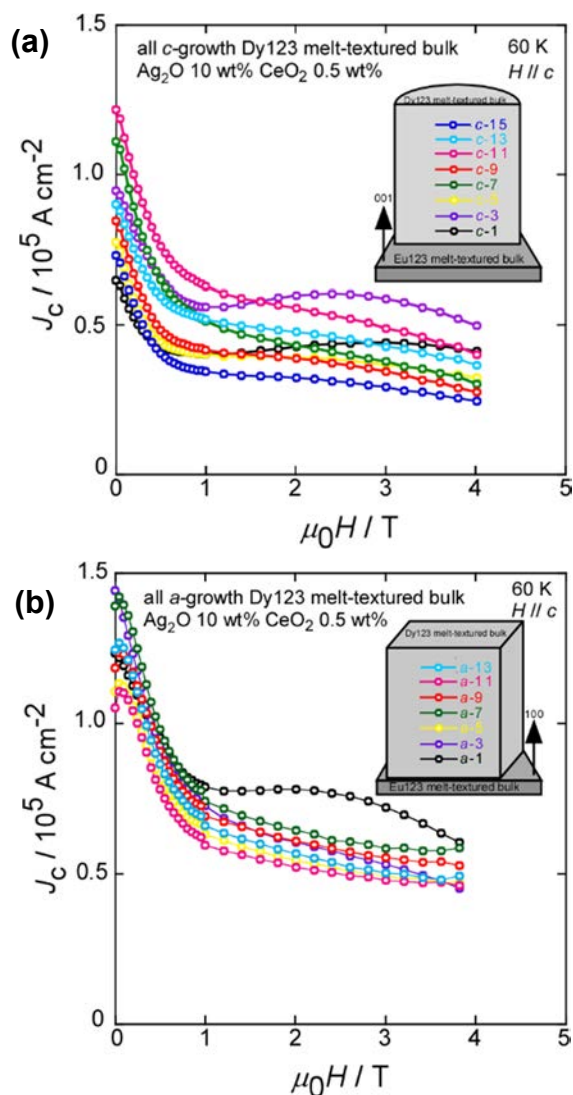


Fig. 2.  $J_c$ - $H$  curves of Dy123 melt-textured bulks, at 60 K. (a) all *c*-growth bulk, (b) all *a*-growth bulk

- [3] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003.

# Mg 気相輸送(MVT)法により作製した MgB<sub>2</sub> バルクの金属添加効果

## Metal addition effects of the Mg Vapor Transportation (MVT) method of MgB<sub>2</sub> superconducting bulks

川崎 玲, 白旗 知暉, 山本 明保(東京農工大学)

KAWASAKI Reji, SHIRAHATA Tomoki, YAMAMOTO Akiyasu (Tokyo University of Agriculture and Technology)

E-mail: s230058u@st.go.tuat.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導材料は MRI やリニアモーターカーなど最先端の医療やインフラに応用されている。MgB<sub>2</sub> 超伝導体[1]は高い臨界温度  $T_c$  (39 K)と優れた磁場均一性などの特長を持ち、液体水素などで冷却可能な 10-20 K での運転が可能であることから、バルク形態では永久磁石や磁気シールド等への応用が期待されている。Mg の金属蒸気を B 源ペレットに反応させる Mg 気相輸送(MVT)法[2]は、従来の *in-situ* 法等と比較して高密度・高純度な MgB<sub>2</sub> バルクを作製することが可能である。MVT 法による MgB<sub>2</sub> バルクの高特性化に向けては、結晶粒成長を抑制することで結晶粒界の磁束ピンニング特性を向上することが課題の一つである。本研究では、従来よりも低温・短時間で MVT 法 MgB<sub>2</sub> バルクを合成することを目的として、B 源ペレットに Cu を混合する金属添加効果を検討した。

### 2. 実験方法

Premix 用 MgB<sub>2</sub> 粉末とアモルファス B ナノ粉末をモル比 0.375 : 1.25 で混合した粉末に、合成される MgB<sub>2</sub> に対してモル比 5%で Cu を添加した粉末、および Cu 添加しない粉末を、直径 10 mm、厚み 2 mm の円盤状に成型し、B 源ペレットとした。B 源ペレットを 750°C の Mg 蒸気雰囲気下で、熱処理時間を変化させて熱処理を行い、MVT 法 MgB<sub>2</sub> バルクを得た。得られたバルク試料に対し、X 線解析(XRD)により構成相を、SEM、EDX により微細組織、化学組成を評価した。

### 3. 結果と考察

Fig.1 に作製した MgB<sub>2</sub> バルクの XRD パターンを示す。XRD のピークから、主相として MgB<sub>2</sub> が生成しており、不純物として MgO および添加金属由来の化合物(Mg<sub>2</sub>Cu)が存在していた。Fig.2 に、750°C で 3 h 熱処理した試料の MgB<sub>2</sub> バルク断面の微細組織と EDX 線分析の結果を示す。EDX 線分析の結果より、無添加試料ではバルク中心部に近い領域で Mg の拡散が不十分な様子がみられたのに対し、Cu 添加試料では全体にわたって Mg が拡散している様子が確認された。この結果は、バルクの熱処理後の質量変化から見積もった反応率が、熱処理時間が 3 h の試料では、無添加試料で約 70%であったのに対し、Cu 添加試料では約 92%と大きく向上したと一致している。また、Cu 添加試料では数十ミクロン程度の大きさの不純物がみられ(Fig.2(b))、化学組成を分析したところ Fig.1 の XRD パターンでみられた Mg<sub>2</sub>Cu であることが分かった。無添加試料においては MgB<sub>2</sub> 相と未反応 B が確認された。Cu 添加による反応率向上の理由として、添加した Cu と Mg が熱処理温度において液相[3]を形成することが、Mg の拡散速度や B との反応速度に影響したことが挙げられる。

### 4. 結論

MVT 法 MgB<sub>2</sub> バルクに対する Cu 添加効果を検討した。MVT 法プロセスにおいて、Cu 添加は Mg の拡散、MgB<sub>2</sub> 生成反応を促進し得ることが示唆された。

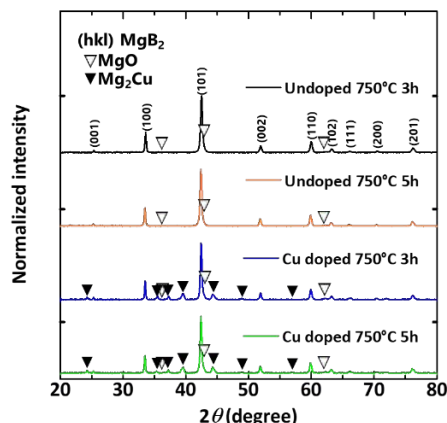


Fig.1 X-ray diffraction patterns.

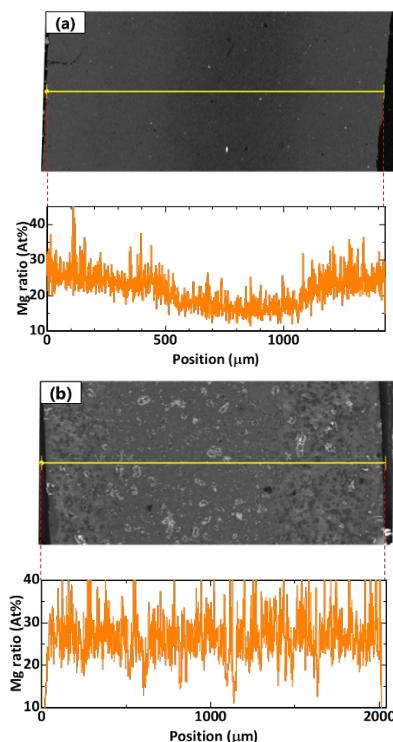


Fig. 2 EDX Linescan : (a) undoped 3 h, (b) Cu doped 3 h

### 参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* **410**, 63-64 (2001)
- [2] Y. Sanogawa *et al.*, *J. Jpn Inst. Met.* **83**, 9, 341-345 (2019)
- [3] Hiroaki Okamoto, *Desk Handbook Phase Diagrams for Binary Alloys Second Edition*, ASM. (2010)

# Ag 添加 GdBCO バルクの捕捉磁場に対する ステンレス材でボールミルされた前駆体の効果

Effect of precursor powder ball-milled using stainless-steel media  
on trapped field of Ag-added GdBCO bulks

箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)

HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: s3123003@iwate-u.ac.jp

## 1. はじめに

REBCO 超伝導バルクはコンパクトな強磁場発生源であり、卓上型 NMR 装置、モータおよびドラックデリバリーなどへの応用が期待されている。REBCO バルクの捕捉磁場向上や高温運転には  $J_c$  向上が必要であり、それには微細な RE211 を使用することが有効であることが知られている[1]。前回の学会にて、我々は Gd211 のボールミル粉碎においてステンレスを用いることで微細化と不純物微量添加効果が得られることを報告した[2]。REBCO は様々な添加物効果があるため、前回の報告では一般的に添加する Ag などは添加せず、ステンレスの影響のみ評価した。実際の REBCO バルク磁石応用には機械強度の観点から Ag の添加は必要不可欠である。そこで本研究ではステンレスによるボールミル粉碎した Gd211 粉末を使用した Ag 添加 GdBCO バルクの作製および捕捉磁場について報告する。

## 2. 実験方法

Gd123とGd211はGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BaCO<sub>3</sub>、CuOを使用した固相反応法により作製した(900°C24h×2回)。作製したGd211粉末は遊星式ボールミル装置によりエタノール中で湿式粉碎した。ボールミルの容器およびボールはマルテンサイト系ステンレスを使用し、ボールサイズは3/8 inchであった。粉碎条件は200rpm-1hとした。得られた粉末を100wt%[Gd123:Gd211 = 3:1 (モル比)]+0.5wt% CeO<sub>2</sub>+1.0wt% BaO<sub>2</sub>+10wt% Ag<sub>2</sub>Oとなるよう秤量、混合した後、大気中でBufferペレットを使用したTSMG法によりAg添加GdBCOバルクを作製した。Fig. 1に結晶成長条件に示す。成長したバルクは400°Cの酸素中で酸素富化処理を150 h 行った。

試料の評価は、Hall 素子を用いた捕捉磁場測定および SQUID 磁束計を用いた磁化測定を行った。臨界電流密度  $J_c$  は磁化データより拡張型ビーンモデルを用いて算出した。また SEM による微細組織観察を行った。

## 3. 結果と考察

初めに Ag 添加 GdBCO バルクの結晶成長条件の最適化を行った。REBCO バルクの作製は RE 種による包晶温度の違いを利用して結晶成長を行うため、結晶成長における最高溶解温度  $T_{max}$  がバルク作製に大きな影響を与えることが知られている[3]。また REBCO に Ag を添加すると包晶温度が低下し、種結晶が融けやすくなるため  $T_{max}$  の設定がよりシビアになる。Fig. 2 に  $T_{max}=1040^\circ\text{C}$ 、 $1045^\circ\text{C}$ 、 $1050^\circ\text{C}$ 、 $1055^\circ\text{C}$  で作製した Ag 添加 GdBCO バルクの外観写真を示す。 $T_{max}=1040^\circ\text{C}$ 、 $1045^\circ\text{C}$  では Gd123 が溶融せず残留し、結晶成長時に残留 Gd123 を起点とした不均質核生成が発生した。一方、 $T_{max}=1055^\circ\text{C}$  では種結晶が溶融し、4 本以上の GSB が確認された。 $T_{max}=1050^\circ\text{C}$  は 4 本の GSB が確認されたことから種結晶が溶融していない  $T_{max}$  である。また種結晶以外からの核生成もないことから  $T_{max}=1050^\circ\text{C}$  は Gd123 が完全に溶融する適切な  $T_{max}$  である。以上より種結晶に Mg-NdBCO 劈開バルクを使用した場合の Ag 添加 GdBCO バルクの  $T_{max}$  は  $1050^\circ\text{C}$  近傍の非常に狭い範囲であることが分かった。

上記の結果は Ag 添加 GdBCO バルクの作製には精密な温度コントロールが要求されることを意味し、使用する電気炉の種類、電気炉内の均熱ごとに細かく条件を設定しなければ

ならない。そこで作製条件緩和のため、文献[4]を参考に Buffer ペレットの組成を Ag-free として結晶成長を行ったところ、 $T_{max}=1055^\circ\text{C}$ においても種結晶は溶融せず、比較的広い範囲で単一粒の Ag 添加 GdBCO バルクの作製に成功した。

講演では、最適化された結晶成長条件に基づいて作製した Ag 添加 GdBCO バルクの捕捉磁場特性・超伝導特性を報告する。

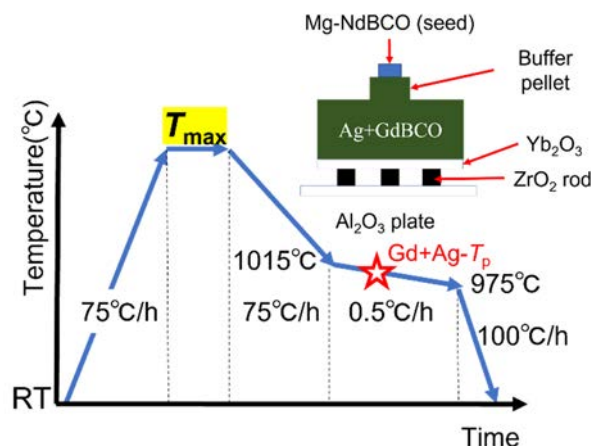


Fig. 1 Crystal growth conditions for Ag-added GdBCO bulks

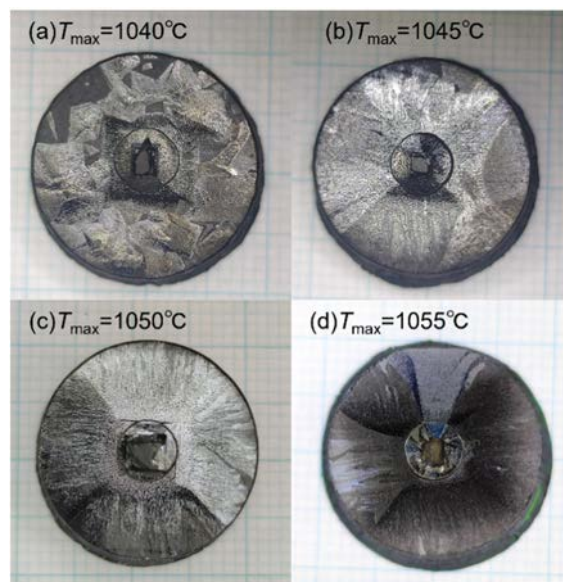


Fig. 2 Appearance of Ag-added GdBCO bulks fabricated at various  $T_{max}$ . (a)  $T_{max}=1040^\circ\text{C}$ , (b)  $T_{max}=1045^\circ\text{C}$ , (c)  $T_{max}=1050^\circ\text{C}$ , (d)  $T_{max}=1055^\circ\text{C}$

## 参考文献

1. S. Nariki, et al.: *Supercond.Sci. Technol.* **15** (2002) 679-682.
2. H. Hakoishi, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104* (2022) p.156.
3. H. Hinai, et al.: *Physica C*, **357-360** (2001) 706-708.
4. S. Nariki, et al.: *Physica C*, **392-396** (2003) 468-472.

# 波形制御パルス着磁による 40K での GdBCO バルクの捕捉磁場特性

## Trapped magnetic field properties of GdBCO bulk by waveform controlled pulse magnetization at 40 K

今道 颯人, 土屋 美月, CAUNES Antomne, 川澄 渚, 和泉 充, 井田 徹哉(東京海洋大)

IMAMICHI Hayato, TSUCHIYA Mizuki, CAUNES Antomne, KAWASUMI Nagisa, IZUMI Mitsuru, IDA Tetsuya (TUMSAT)

E-mail: m223008@edu.kaiyodai.ac.jp

### 1. はじめに

強磁場を捕捉することで擬似的な永久磁石として振る舞う高温超電導バルクは、モータあるいは発電機(以下、回転機)の出力を大幅に向上させる界磁極として期待される[1]。高温超電導バルクを回転機内部に組み込み使用する際、回転機としての機能を損なうことなく、パルス磁場の印加による強磁場捕捉を実現する技術が必要となる。我々は高温超電導回転機に内蔵したバルクの強磁場捕捉を実現するために、単一のパルス磁場を印加することによる捕捉磁場の向上を課題として研究を行っている。本発表では、40KにおいてGdBCOバルクに対してパルス着磁を行った際の実験結果を示す。

### 2. 実験方法

高温超電導回転機の電機子を模した 2 個の渦巻型銅コイルの間に直径 45 mm、厚さ 19 mm の GdBCO を挟み、Fig. 1 に示す配置にて 40 K に冷却して実験を行なった[1]。LCR 過渡応答による従来通りのパルス着磁(PFM)で高温超電導バルクに強磁場捕捉を実現することは困難である。本研究では過剰な磁束の侵入による発熱を抑制し捕捉磁束密度を向上させる波形制御パルス着磁(WCPM)に加え、フラックスジャンプを適切に制御するために侵入磁束密度を入力とした負帰還制御を用いるパルス磁場波形整形によって印加磁束密度の最適化を図る波形制御パルス着磁(NFB-WCPM)を試みた[2]。制御入力とする磁束密度はバルクの裏面中心上方 2mm の位置に置いたホール素子から得ている。一方、捕捉磁束密度はバルク表面の上方 2 mm の位置に設けた 5 個のホール素子によって測定した。

### 3. 結果と考察

60 K と 40 K において、着磁に要したエネルギーに対してバルク中心における測定した最大捕捉磁束密度を Fig. 2 に示す[2]。60 K では PFM に対して WCPM、そして NFB-WCPM と着磁方法を変更する度に捕捉磁束密度が大きく増加している。しかし 40 K では PFM と WCPM の間に明確な差異が見られず、NFB-WCPM によって大きな捕捉磁束密度が得られたことから、低温における NFB-WCPM の優位性が明確に示された。

40 K における NFB-WCPM では 1 度のパルス着磁によってバルク中心で 3.7 T の強磁場捕捉を達成した。Fig. 3 に示す通り、GSB と GS の侵入磁束密度はほぼ等しく、磁束が円錐形状に侵入した様子を示した。印加磁束密度が 7 ms で最大に達して減少したにも関わらず、100 ms 以上に渡ってバルク中心で強磁場を維持したことで、良好な捕捉磁場特性を実現したものと考えられる。

### 参考文献

1. M. Watasaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, 23 (2013) 8201604
2. A. Caunes, et al.: Journal of Physics: Conference Series, 1975 (2021) 012018

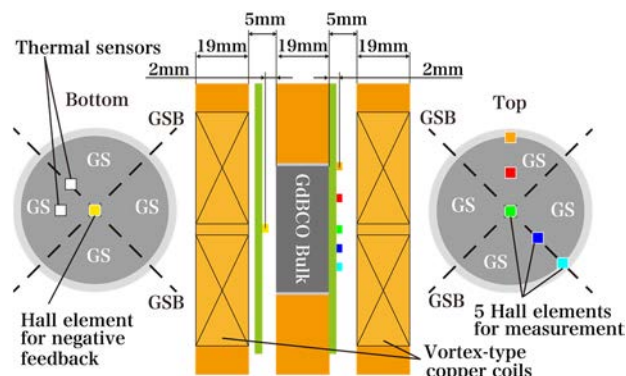


Fig.1 Schematic of experimental setup.

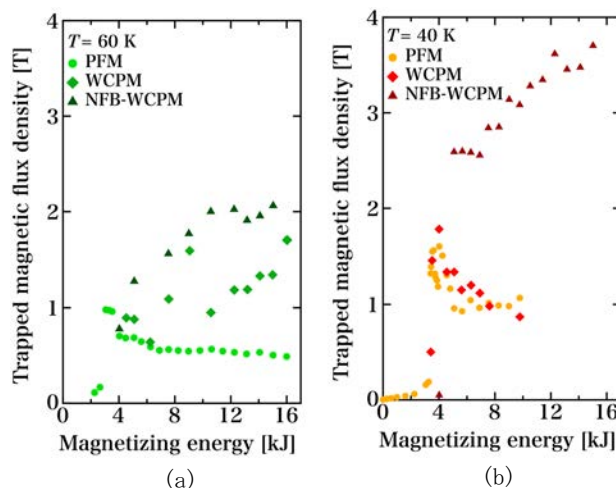


Fig.2 Maximum trapped magnetic flux density on the center by various magnetizing energies.

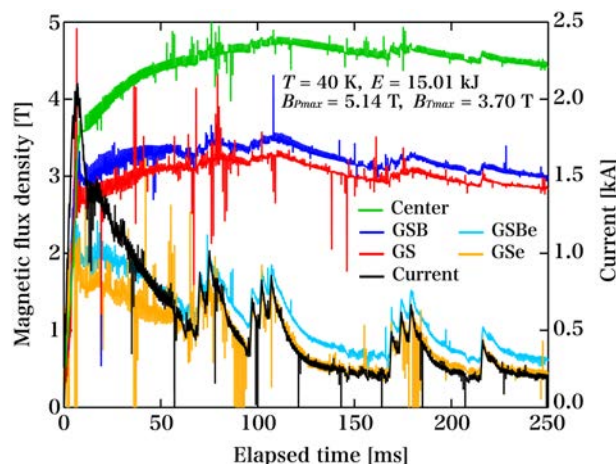


Fig.3 Trapped magnetic flux density by NFB-WCPM.

# REBCO バルク磁石における上下面のパルス着磁特性の比較

## Comparison of pulsed-field magnetization characteristics of top and bottom surfaces in REBCO Bulk Magnet

横山 和哉, Tendongafac Regobert, Shang Jiahao (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)

YOKOYAMA Kazuya, Tendongafac Regobert, Shang Jiahao (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: yokoyama.kazuya@g.ashikaga.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO バルク磁石の大型風力用の発電機, 航空機や大型船舶用の電気推進装置等への応用を目指して, パルス着磁(PFM)で捕捉磁場を改善するとともに, 装置の小型・軽量化について検討している。これまでに, バルク体の上面(種結晶を配置した面)の捕捉磁場特性のみを評価してきたが, アキシャル型の回転機の場合はバルク磁石の上下両面の磁場を用いる。本文では, バルク体の上下面を入れ替えてパルス着磁実験を行い, 上下面の着磁特性を比較する。

### 2. 実験方法

Fig. 1に, 厚さ2 mm の SUS リングを取り付けた  $\phi 60 \times 20$  mm の GdBCO バルク体(日本製鉄製)の上面及び下面の写真を示す。上面は結晶成長境界(Growth Sector Boundary; GSB)及び結晶成長領域(Growth Sector Region; GSR)がはっきりと判別できるが, 下面はそれらを確認することはできない。また, 試料の出荷データであるFC@77 K のデータでは, 下面の捕捉磁場は, 上面の捕捉磁場の約90%程度であった。ただし, 両面とも磁場分布は歪みの少ない円錐形であった。

実験は, 試料の上面がサンプルステージに接するように配置し, 2段GM冷凍機(RM20, アルバック製)で冷却する。温調器を用いて20, 30, 40, 50 K に調整し, 各温度において4.2~5.8 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し, その実測データから総磁束量を算出した。

### 3. 結果及び考察

Fig. 2に30及び50 Kにおいて, 試料の上面(Top)を上配置した場合と下面(Bottom)を上配置した場合の総磁束量の比較を示す。印加磁場が小さいときには, Bottomの方が値が大きくなっているが, これは $J_c$ が低いために磁束が侵入し易くなっているためと考えられる。一方, 最大値は, 印加磁場の条件が異なるもののTopとBottomでほぼ等しいことがわかる。

Fig. 3に, (a)20 Kで印加磁場 $B_{app}=5.0$  Tの時, (b)50 Kで $B_{app}=4.6$  Tの時の捕捉磁場分布を示す。Fig. 2において総磁束量の値はほぼ等しいが, Bottomの方が最大磁束密度が大きい値となった。これは, Bottomの方が $J_c$ が低く磁束が侵入し易い反面, 周辺部でフラックスフローが発生したため総磁束量が小さくなったと考えられる。

### 4. まとめ

本研究は, バルク磁石をアキシャル型の回転機に用いる場合を想定して, 試料の上下面のパルス着磁特性を比較した。

総磁束量の比較から, 磁束侵入と磁場捕捉の特性に違いがあるものの, 最大磁束密度の値は同程度であることが確認できた。このことから, 適切な条件でパルス着磁することにより, 上下面でほぼ同じ磁束密度を達成できる可能性を示した。

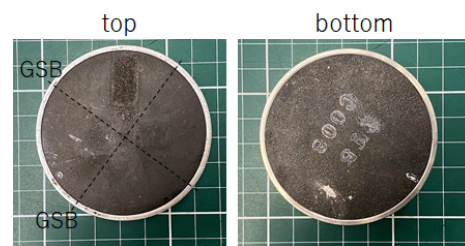


Fig. 1. Photograph of top and bottom surfaces of GdBCO bulk

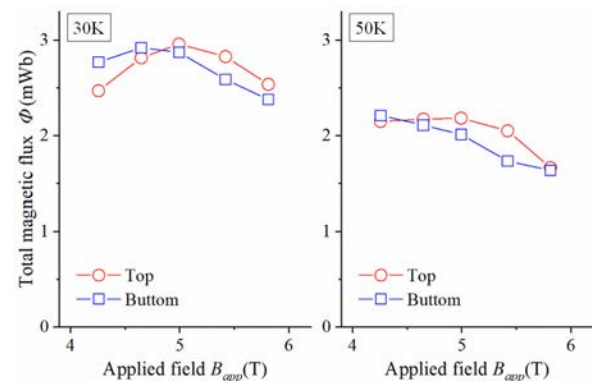


Fig. 2. Comparison of total magnetic flux between top and bottom surfaces

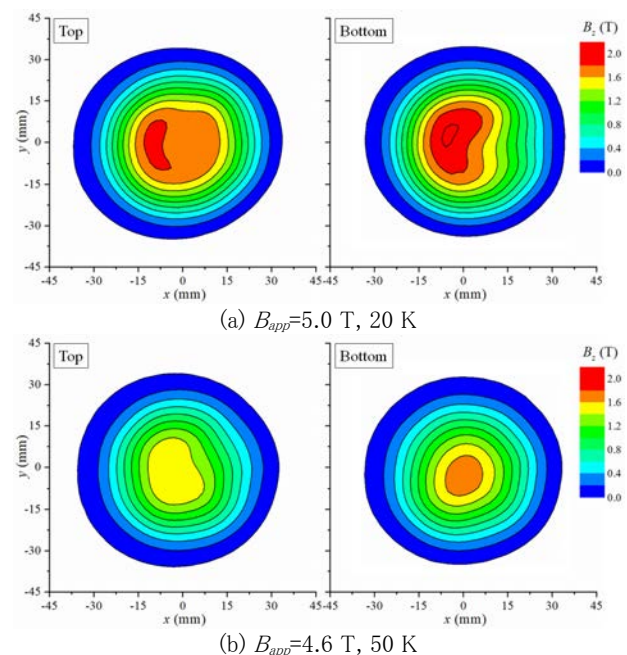


Fig. 3. Comparison of trapped field distribution between top and bottom surfaces

# REBCO バルク磁石の $c$ 軸方向の不均一性を考慮した パルス着磁シミュレーション

## Numerical simulation of pulsed-field magnetization of REBCO bulk magnet with $c$ -axis inhomogeneity

SHANG Jiahao, TENDONGAFAC Regobert, 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)

SHANG Jiahao, TENDONGAFAC Regobert, YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: g22608@g.ashikaga.ac.jp

### 1. はじめに

バルク磁石は小型・軽量の装置で強磁場を発生できるため、大型風力用の発電機、航空機や大型船舶用の電気推進装置等への応用が検討されている。それらの応用においては、オンサイトにおいて短時間で作業できるパルス着磁 (PFM) が有効である。一方で、捕捉磁場が磁場中冷却法より低いため、PFM で捕捉磁場の改善が必要である。これまで、実験によりパルス着磁特性を評価してきたが、時間的・経済的な問題から数値解析が必要である。近年、本研究室のパルス着磁システムに基づく数値解析モデルを作成し、実験と同じ条件で数値シミュレーションを行ってきた。さらに、REBCO バルク体の結晶成長境界 (Growth Sector Boundary; GSB) と結晶成長領域 (Growth Sector Region; GSR) の不均一性を考慮した詳細な解析も行っている。本文は、 $c$  軸方向の不均一性を考慮した PFM の着磁シミュレーションを行った結果を報告する。

### 2. 解析モデル

Fig. 1 に着磁コイルを取り付けたバルク PFM システムの概要、及びバルク体の GSB 及び GSR を考慮したモデルをそれぞれ示す。さらに、試料の  $c$  軸方向については、試料の出荷データである 77 K での磁場中冷却 (FC) の着磁データから、上面の捕捉磁束密度に対して下面の値は約 90% であることから、試料の下半分の  $J_c$  を上半分の 90% とした。

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

$$E = E_0 \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad \dots(1)$$

ここで、 $E_0$  は超伝導体の臨界電流密度  $J_c$  を定義する基準値臨界電流の磁場依存性には Kim-Anderson モデル

$$J_c(B, T) = \frac{J_{c0}(T)}{\left(1 + \frac{B}{B_0}\right)^\alpha} \quad \dots(2)$$

ここで、 $B_0$ ,  $\alpha$  は実測値から得られるフィッティングパラメータ

$$J_{c0}(T) = J_{cn} \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^m \quad \dots(3)$$

ここで、 $J_{cn}$  は  $T=0$  における電流密度をそれぞれ用いた。

さらに、バルクの温度変化を考慮するために、以下の熱伝導方程式を用いた。

$$\rho \cdot C \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q \quad \dots(4)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $C$  は比熱、 $\kappa$  は熱伝導率、 $Q$  は発熱であり、 $Q=E \cdot J$  で与えられる。

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. 解析結果

Fig. 2 に、20 K において 5.0 T の磁場を印加した時の、 $c$  軸の不均一性を考慮した場合としない場合の磁束密度分布を示す。 $c$  軸の不均一性を考慮することにより、磁束密度が小さくなっている。現在、温度や印加磁場の大きさを変えてシミュレーションを継続しており、それらの結果は発表当日に報告する。

### 4. まとめ

本文は、本研究室のバルク PFM システムに基づく解析モデルにおいて、これまでにバルク体の GSB と GSR の  $J_c$  の不均一性を考慮することに加え、 $c$  軸方向の不均一性を考慮した場合について検討した。77 K の FC による捕捉磁場のデータを基に、試料下面の  $J_c$  を上面の 90% として解析を行った。現在は単純に厚さ方向を 2 分割しているのみであるが、分割数を大きくした時の影響について検討する予定である。なお、本研究は JSPS 科研費 20K04449 の助成を受けたものである。

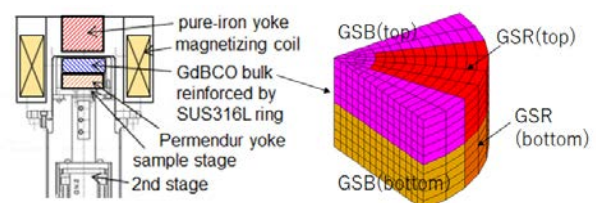


Fig. 1 Schematic of bulk PFM system, and bulk model with inhomogeneity

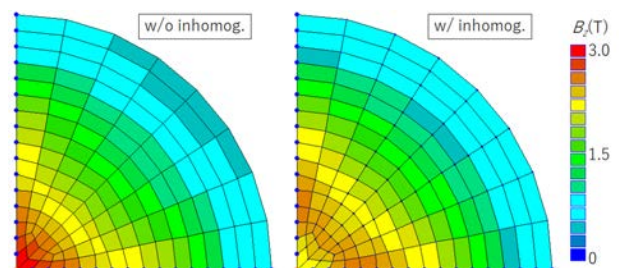


Fig. 2 Comparison of trapped field distribution between w/ and w/o inhomogeneity ( $B_{app}=5.0$  T at 20 K)



# 低温用箔ひずみゲージを用いた GFRP 管のヤング率測定

## Measurements of Young's modulus of GFRP pipe using foil strain gauges for low temperature

杉原 弥悠加, 佐藤 更, 武田 実, 前川 一真(神戸大)

SUGIHARA Miyuka, SATO Sara, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)

E-mail: 217w604w@stu.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

水素を媒体とするエネルギー社会の実現に向けて、国際水素サプライチェーンを構築するためには、液体水素(沸点 20 K)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。そこで本研究では、全く新たな原理に基づく、配管外部取り付け型のひずみゲージを用いた液体水素用流量計を考案した[1]。本流量計は、配管(GFRP 管)とヘリカル型仕切り板と箔ひずみゲージで構成される。ヘリカル流の液体を通す配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歪みを検知すれば、その大きさから、流量を算出することができるという仕組みである。この流量計を開発するためには、配管材料の低温下における力学的特性(ヤング率)を調べるのが重要である。本研究の目的は、この流量計の配管に用いる GFRP 管に、低温用箔ひずみゲージを貼り付け、極低温下での圧力とひずみの関係を計測し、GFRP 管のヤング率の温度依存性を明らかにすることである。

### 2. 実験装置

実験システムは、He ガスボンベ、圧力計測システム、ひずみ・温度測定システム、真空ポンプ、LN2/LHe デュワー、加圧試験ホルダー、低温試験部、バッファータンクで構成されている。実験システム及び低温試験部の概略図を、それぞれ Fig.1 と Fig.2 に示す。低温試験部は、厚さ 1 mm の GFRP 管(外径 26 mm)に、低温用箔ひずみゲージ(共和電業; KFL-5-120-C1-11)を 2 枚直交させるように貼り付けている。GFRP 管の両端は真鍮でキャップをしており、その片側に銅管を差し込み加圧孔としている。また、両端の真鍮キャップにはセルノックス温度計(Lake shore; CX1050 シリーズ)がそれぞれ埋め込まれている。さらに、温度をコントロールするためのヒーターを上下の真鍮キャップに貼り付けた。

### 3. 実験方法

室温実験と、LN2/LHe を用いた実験を行う。LN2/LHe を LN2/LHe デュワーに注ぎ、加圧試験ホルダーを LN2/LHe の温度域まで冷却する。低温試験部内と加圧試験ホルダー(真空断熱槽)内を真空にする。この状態でひずみのゼロ点を取り、温度とひずみと圧力の計測を同時に開始する。次に、大気圧の状態と 0.05 MPaG へ圧力を上げた状態をそれぞれ計測する。続いて大気圧に戻した状態と、更に 0.05 MPa 高い圧力まで加圧した状態をそれぞれ計測する。この作業を繰り返し 0.40 MPaG までのデータを収録する。設定温度を変えて、同様の実験を行う。温度制御には Lake Shore 社製の温度コントローラ 335 型を使用した。また、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 EDX-200A を使用した。

### 4. 実験結果

Fig.3 は、予備実験で得られた測定値をゼロ点補正し、圧力とひずみの関係のグラフを描いたものである。GFRP 管内の圧力とひずみの関係は室温・LN2 温度ともに、非常に直線性が高かった。ひずみの測定値の安定性及び再現性も高かった。また、温度の測定値は、LN2 実験において、室温の

He ガスの挿入・排出による温度の上昇・降下が見られ、安定性は高くなかった。

LN2 温度以下における圧力とひずみの関係、実験結果を基に導出した GFRP 管のヤング率については、学会当日に報告する。

### 参考文献

1. S. Sato, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.104 (2022) p.88

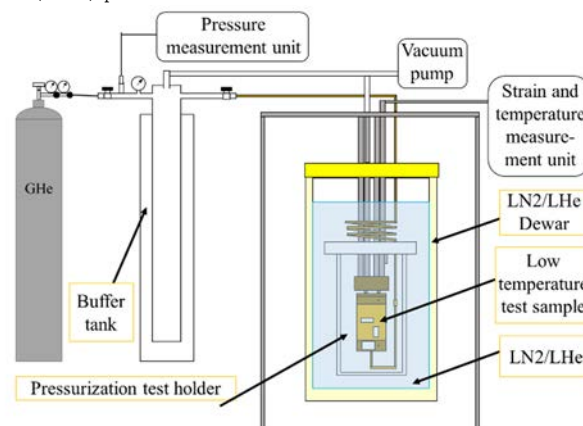


Fig.1 Schematic diagram of pressurized experiment system.

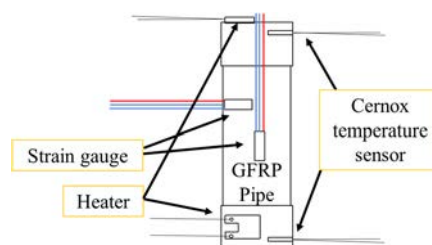


Fig.2 Schematic diagram of a test sample.

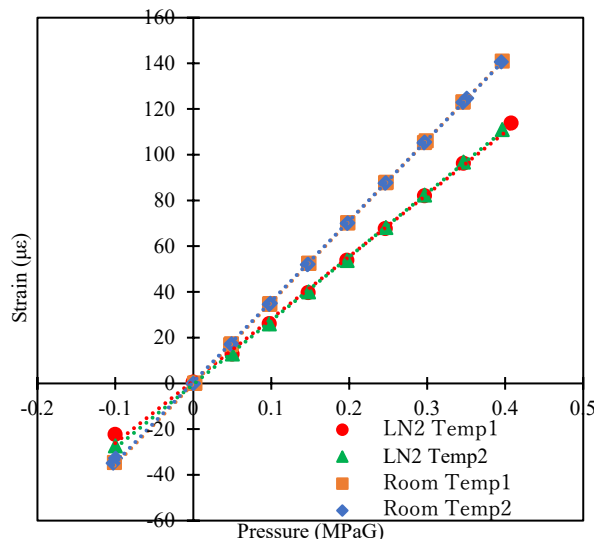


Fig.3 Relationship between pressure and strain.

## 歪ゲージによる低温での色々な材料の高感度測定

High-sensitivity measurements of various materials at low temperatures using strain gauges

神田 昌枝, 山本 実奈 (中部大学); 岩田 暢祐, 鯉沼 秀臣 (SCT 社); 山口 作太郎 (中部大学)  
 KANDA Masae, YAMAMOTO Mina (Chubu University); IWATA Yousuke, KOINUMA Hideomi (SCT, Inc.);  
 YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)  
 E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

## 1. はじめに

従来、歪ゲージは材料や測定温度で使い分けてきた。このため、数多くの歪ゲージが必要とされた。特に低温で歪ゲージ測定を行うと、「真の歪」の他に「みかけの歪」も同時に測定されるため、「真の歪」と「みかけの歪」を分離する必要がある。そこで、4端子計測法を用いることで使い分けの必要性の確認と同時に新しい計測方法の開発につなげることが本研究グループの目的である。4端子計測法では歪ゲージ抵抗の精密測定が可能であり、過去の研究において Mg-Li 合金[1]、単結晶サファイア[2]を測定した。本研究では、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)の低温での歪応力測定を行い、ヤング率(縦弾性係数)を求めた。また測定では室温と液体窒素温度だけではなく、スラッシュ窒素温度まで温度を変えて測定した。

## 2. 実験試料・方法

本研究で用いた GFRP (G-10)のサイズは 90×20×0.3t を使用した。試料には、歪ゲージ(株式会社共和電業, 低温用ステンレス鋼材用歪ゲージ KFLB-2-120-C1-16, ゲージ率  $K_s=2.01$ )とゲージ端子を接着剤で固定した。その後、室温、77 K での抵抗値をブリッジ回路ではなく、4端子計測法で計測し、電流を 1 mA 流して 7 桁まで測定した。従来の測定方法は、定電流源に歪ゲージと可変抵抗と 2 つの抵抗でブリッジ回路を組み、出力電圧が 0 になるよう可変抵抗を調整して、アナログ差分回路を作り、歪ゲージを測定している。新しい回路では、定電流電源と可変電圧源、歪ゲージで回路を作り、可変電圧源により出力電圧を 0 に調整して、荷重による抵抗値の変化だけを測定した。この新しい回路を使うことで、電圧計測の感度が 4 倍になった。本実験では、各温度で荷重を加えて、縦弾性係数を算出した。

## 3. 実験結果・考察

図 1 に GFRP の室温と低温での歪ゲージ抵抗測定結果を示す。この状態では応力をかけていないため、この抵抗差は全て「みかけの歪」となる。また、荷重による GFRP の歪を算出するために式(1)から算出した。

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \times \varepsilon \quad (1)$$

なお、無荷重と荷重を加えた状態の歪ゲージの抵抗値の差を  $\Delta R[\Omega]$ 、無荷重での歪ゲージの抵抗値を  $R[\Omega]$ 、測定した歪ゲージのゲージ率を  $K_s$  とする。図 2 に各荷重に対する歪を示す。さらに、荷重を  $W[N]$ 、荷重部から歪ゲージまでの距離を  $L[m]$ 、断面係数を  $Z[m^3]$  として、式(2)から縦弾性係数  $E[Pa]$  を求めた。

$$E = \frac{W \times L}{Z \times \varepsilon} \quad (2)$$

その結果、今回、使用した GFRP の縦弾性係数は 28.6 GPa であった。以上の結果から、試料に荷重を加えることで、「真の歪」を計測し、実際に働いている応力を求めることが可能となる。従来の方法では歪ゲージを温度毎や材料毎に選定す

る必要があったが、今回の新しい計測方法では、材料毎に歪ゲージを変える必要がなくなる。

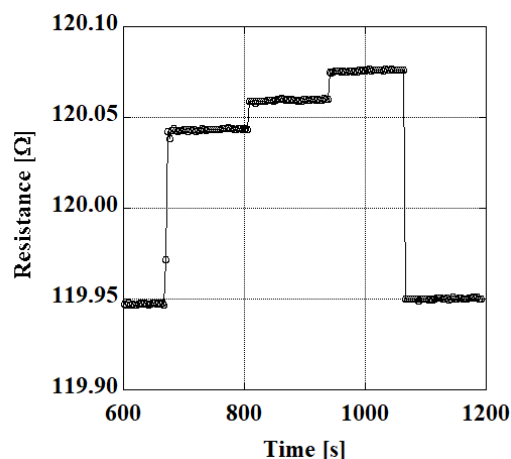


Fig.1 Resistance of GFRP.

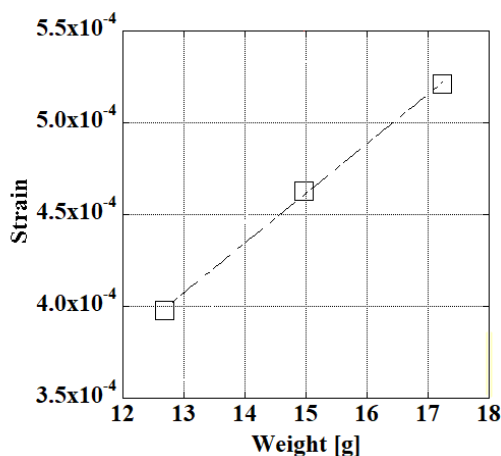


Fig.2 Strain at each weight of GFRP at 63K.

## 4. 結言

本研究では、4端子測定法を用いてGFRPの室温と低温での抵抗値を測定し、温度変化における「みかけの歪」と「真の歪」の分離実験を行った。さらにGFRPに荷重を加えることで、「真の歪」を計測し、実際に働いている応力を求めることが可能となった。従来の方法では歪ゲージを温度毎や材料毎に選定する必要があったが、今回の新しい計測方法では、材料毎に歪ゲージを変える必要がなくなることを目指している。

## 参考文献

1. 神田 他: 航空機用低温部材の熱応力測定, 2021 年度秋季低温工学・超電導学会, 2A-p07, 2021
2. 山本 他: 液体窒素温度以下での単結晶サファイアの歪測定, 令和 5 年電気学会全国大会, 5-145, 2023

# 極低温における真空中金属界面の接触熱抵抗の温度・圧力依存性

## Temperature and pressure dependance of thermal contact resistance of the metal-metal interface in vacuum at cryogenic temperature.

上野 航生, 高橋 政彦, 高木 紀和, 栗山 透(東芝エネルギーシステムズ)

UENO Koki, TAKAHASHI Masahiko, TAKAGI Norikazu, KURIYAMA Toru

(Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)

E-mail: koki1.ueno@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

伝導冷却方式の超電導磁石では、高熱伝導率の伝熱部材を用いて、極低温冷凍機と超電導コイルを熱的に接続する。これらの伝熱部材の接続界面では、固体表面のミクロな凹凸によって、接触熱抵抗(TCR ; Thermal Contact Resistance)が生じる。前報では、超電導磁石の使用条件で TCR 測定装置を製作し、基礎試験結果とその評価を報告した[1]。本報では、無酸素銅 C1020 をサンプルとして、温度と圧力の依存性を測定した結果を報告する。

### 2. 試験装置と接触熱抵抗の測定方法

試験装置の構成を Fig.1 に示す。極低温冷凍機と冷却ステージを接続し、3 K~60 K の温度域にて、真空中の熱抵抗が測定できる。また、ボルトでバネ変位量を調整することで、接触界面の押し付け圧力を調整する。使用した銅サンプルは直径 30 mm、高さ 15 mm で、上側のサンプルの上部にフィルムヒータを取り付けた。フィルムヒータにより熱負荷  $Q$  [W] を印加し、接触面を通過して、下部の冷却ステージに熱が流れる際に生じる温度差  $\Delta T$  を測定し、次式により熱抵抗  $R$  [K/W] を測定した。

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (1)$$

その後、測定した熱抵抗  $R$  から予め測定した銅サンプル自体の熱伝導による熱抵抗を差し引いて TCR を算出した。別途実施した測定結果より、銅サンプルの RRR は 50 程度である。また、接触界面の表面粗さはレーザー顕微鏡による測定から、共に Ra0.5  $\mu\text{m}$  のサンプルを用いた。

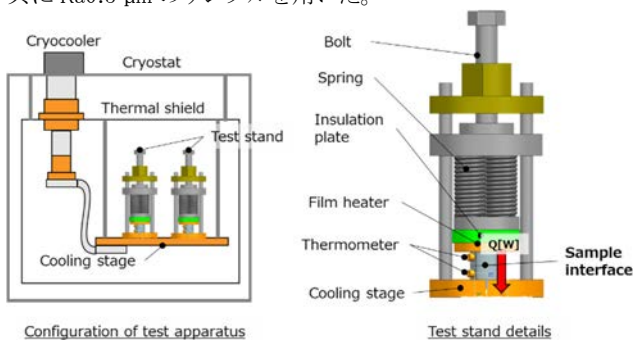


Fig.1 Thermal contact resistance test apparatus

### 3. 試験結果および考察

押しつけ圧力を 1.5 MPa から 11.7 MPa の間で変化させた後に、5.8 MPa、1.5 MPa と除荷して、熱抵抗を測定した。測定結果から 4.2 K の TCR を算出した結果を Fig.2 に示す。

ここでは、試験結果と Yovanovich による次の TCR モデル式とを比較した[2]。

$$TCR = \frac{1}{1.25} \left( \frac{\sigma_s}{m_s} \right) \left( \frac{P_{applied}}{H_{micro}} \right)^{-0.95} \frac{1}{k_s(T)} \quad (2)$$

$\sigma_s$  は表面粗さ、 $m_s$  はアスペリティ、 $P_{applied}$  は押し付け圧力、 $H_{micro}$  はピッカーズ硬さ、 $k_s$  は熱伝導率である。TCR は、押しつけ圧力に対しては -0.95 乗の関係がある。Fig.2 には、1.5 MPa 加圧時の TCR を基準として、圧力の -0.95 乗の依存性を

仮定した計算値を加えた。今回の測定結果は、概ね式(2)の圧力依存性を示した。また、加圧後の除荷過程ではヒステリシスが見られ、1.5 MPa で初期の 70% 程度となった。界面が塑性変形したことにより、界面の実接触面積が増加したことが要因と考えられる。

次に、初期押し付け時に 1.5 MPa を加えた条件で、3 K~60 K の際の TCR を Fig.3 に示す。破線は、式(2)によって計算した TCR を示す。20K 以上では比較的良好一致を示したが、10 K 以下の温度域では、C1020 の熱伝導率が温度に比例することから、式(2)には温度の -1 乗に比例するが、測定結果は温度の -2.5 乗の関係が見られた。全ての圧力においても同様の依存性が見られ、10 K 以下では、次式で整理した。

$$TCR = \frac{1}{1.25} \left( \frac{\sigma_s}{m_s} \right) \left( \frac{P_{applied}}{H_{micro}} \right)^{-0.95} (CT^{-2.5}) \quad (3)$$

ここで  $C$  はフィッティング係数であり、最小二乗法により 0.68 と求め、Fig.3 に点線で示した。

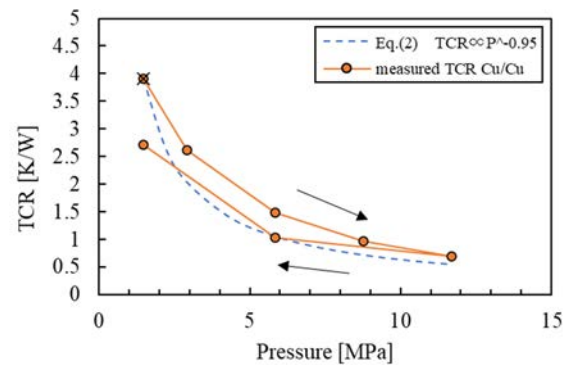


Fig.2 Pressure dependance of TCR at 4.2 K.

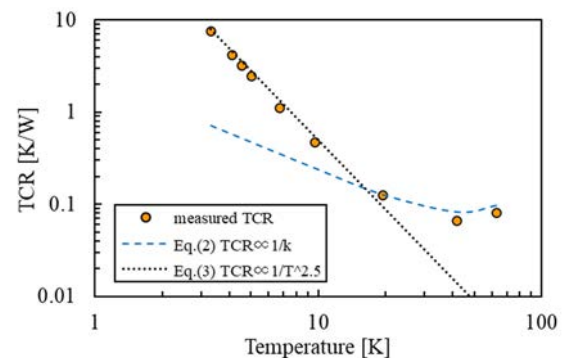


Fig.3 Temperature dependance of TCR under 1.5 MPa

### 4. まとめ

伝熱部材界面の TCR の温度と圧力依存性を測定した。圧力依存性については、従来の TCR モデル式に概ね一致した。一方、温度依存性については、10 K 以下により大きな温度依存性が見られ、モデル式の補正を試みた。

### 参考文献

- Ueno et.al, Abstracts of CSSJ Conference, Vol.103 p26, (2022)
- Yovanovich, IEEE Trans. Compon, Packag, Technol., **28**(2), pp.182-206, (2005)

## フッ素樹脂コーティングを用いた極低温機器の予冷時間短縮 ～液体窒素による急冷実験

### Chilldown time reduction of cryogenic equipment using fluoroplastic coating — quenching experiment in liquid nitrogen

高畑 一也 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya (NIFS)

E-mail: takahata.kazuya@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

極低温機器の配管、タンクなどを液体窒素や液体水素を用いて予冷する際、冷媒の消費量削減、時間効率の観点から予冷時間の短縮が重要となる。ところが予冷過程の初期においては、伝熱面に膜沸騰による蒸気相が発生し伝熱を阻害することが知られている。そこで古くから、表面テクスチャリングやコーティングなどの表面改質による伝熱促進が試みられてきた。その一例が、フッ素樹脂コーティングである。熱絶縁層を用いて伝熱を促進するという一見矛盾した方法であるが、期待以上の効果が得られる。これを「断熱層のパラドックス」と呼ぶ。しかし、膜厚を厚くするとその低い熱伝導率によって促進効果が相殺され、予冷時間短縮には限界があった。本研究では、フッ素樹脂コーティングに熱収縮による表面クラックが発生することにより、さらに予冷時間を短縮できることを見出した。

#### 2. 実験方法

30 mm×30 mm×2 mm の銅板をユニレート®製のブロック (70 mm×70 mm×20 mm) に貼り付け、銅板片面の伝熱面 (30 mm×30 mm) 以外を熱絶縁した。銅板の温度を測定するため、熱絶縁された側の銅板表面中央に T 型熱電対を半田付けした。液体窒素の浴槽に、伝熱面を上にしてブロックを落下させ、その後の温度変化を測定した。

続いて、銅板の伝熱面に、2種類のフッ素樹脂を厚さ 5 μm から 32 μm の範囲でコーティングし、裸面と同じ急冷実験を、各サンプル5回ずつ繰り返して行った。フッ素樹脂は、スプレー缶で塗布するタイプのニュー TFE コート FC-102 (ファインケミカルジャパン株式会社) と、刷毛で塗布するフロロサーフ®FG-3650C-20 (株式会社フロロテクノロジー) である。いずれも常温乾燥が可能である。

#### 3. 実験結果と考察

図 1 に、銅裸面、厚さ約 15 μm のコーティングを施した2種類の伝熱面についての冷却曲線を示す。290 K から 90 K までの冷却時間は、裸面: 130 s, ニュー TFE コート: 65 s, フロロサーフ®: 26 s であった。最も冷却時間が短かったフロロサーフ®では、裸面に対して 80% の予冷時間短縮を達成している。

冷却後に表面観察を行った結果、フロロサーフ®のみに、冷却前にはなかった表面クラックが発生していた。図 2 に代表的な顕微鏡写真を示す。この形状は、天然の泥層の表面に発生するマッドクラックに酷似しており、同様の機構で発生したものと考えられる。クラックに囲まれた小片 (ポリゴン) の大きさは、100 μm のオーダーであった。

図 3 に、2種類のフッ素樹脂コーティング伝熱面について、冷却時間とコーティング厚さの関係を示した。フロロサーフ®コーティングでも、厚さが 5.2 μm と薄い場合は、表面クラックは発生しなかった。また厚さ 21.9 μm で、一部のポリゴンが銅板から剥離したため、これ以上の厚さのコーティングは実施しなかった。この図から、表面クラックが発生することで、冷却時間が約 1/2 に短縮されていることが分かる。低熱伝導率材料をコーティングしたことによる「断熱層のパラドックス」の効果と、表面クラックの蒸気膜生成を抑制する効果が相乗し、大幅な予冷時間短縮が実現できたと考えられる。

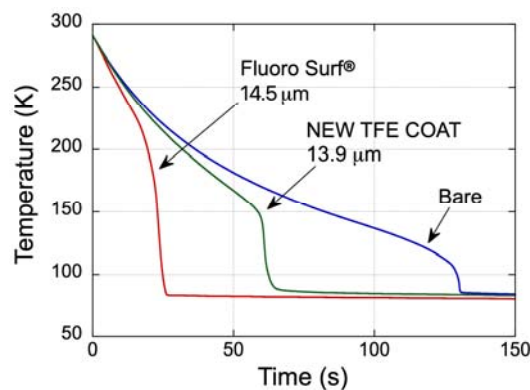


Fig. 1 Temperature measurements of the bare and fluoroplastic coated copper plates.

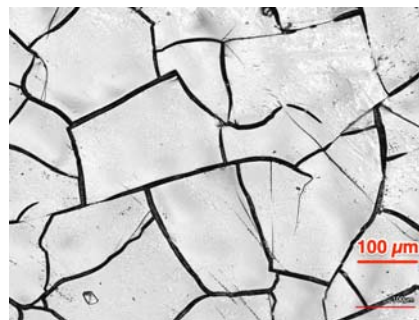


Fig. 2 Surface micrograph of fluoroplastic coating (Fluoro Surf®, 14.5 μm) after quench experiments.

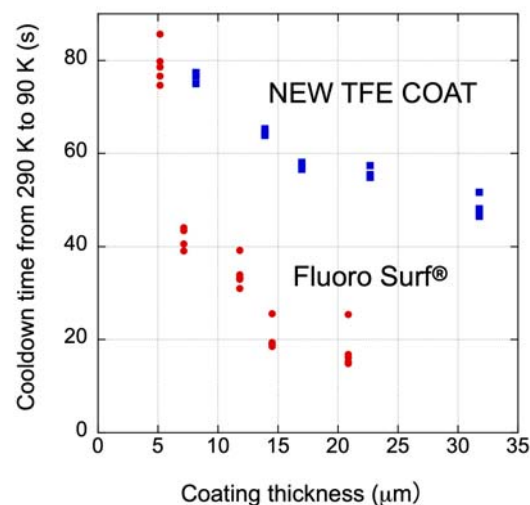


Fig. 3 Cooldown time from 290 K to 90 K. Experimental results of five quench experiments for each sample are shown.

## 15 K 下におけるステッピングモーターの発熱量の実験的見積もり

### Experimental estimation of heat dissipation from a stepping motor at 15 K

飯田光人 (株式会社たすく); 松村知岳, 長谷部孝, HOANG Thuong Duc, 片山伸彦 (東京大学カブリ IPMU); 桜井雄基 (岡山大学); GHIGNA Tommaso (高エネルギー加速器研究機構); 高久諒太 (東京大学); 中川潤 (三菱電機株式会社)

IIDA Teruhito (Task Inc.); MATSUMURA Tomotake, SAKURAI Yuki, HASEBE Takashi, HOANG Thuong Duc, KATAYAMA Nobuhiko (Kavli IPMU The Univ. of Tokyo); GHIGNA Tommaso (KEK/QUP); TAKAKU Ryota (The Univ. of Tokyo); NAKAGAWA Jun (MITSUBISHI ELECTRIC Corporation)

E-mail: t.iida@task-inc.tech

#### 1. はじめに

現在、衛星用の極低温(4K)で使用するためのステッピングモーターの開発を行っている。室温で使用可能な民生品のステッピングモーターは存在するが、極低温環境では発熱が大きすぎるものが課題となっていた。衛星用に開発されたモーターは、コイルを高純度銅線に置き換えた。今回、民生品のモーターと、開発したモーターの2つのモーターを使用し実験を行い、発熱量を比較した結果、後者のモーターで発熱量が大幅に改善されたことが確認された。

#### 2. ステッピングモーターの構造と仕様

本実験で使用した民生品のステッピングモーターは多摩川精機(株)から購入したものであり、その仕様を Table 1 に示す。また、実験で4端子法により測定した15Kにおけるコイルの抵抗値を Table 2 に示す。民生品を改良して開発したステッピングモーターは鉄損を減らすために、アルミ合金のシャシーをG10に変更した。内部構造のインダクターは歯形状の突起構造を有し、ステーターは8個の電磁石を有しており、同様な歯形状の突起をもっている。この歯形状の突起構造により、角度の正確な制御が可能となる。

Table 1 Specification of stepping motor

Dimensions	56.4 mm x 56.4 mm x L39 mm
Mass	0.45 kg
Step angle	0.9 deg.
Holding torque	0.45 N·m

Table 2 Two phase coil resistance @ 15 K

	Commercial	Developed
A phase coil resistance	41.9 mΩ	1.8 mΩ
B phase coil resistance	40.3 mΩ	2.1 mΩ

#### 3. モーターの主要な発熱源(損失)

モーターの主要な発熱源(損失)として以下のものがある。

#1 駆動部間の摩擦によって生じるものを機械損という。ボールベアリングとシャフト間で生じる発熱がその1例である。

#2 ジュール発熱は銅損と言われ、ステーター上の銅線コイルで生じる。

#3 電気的あるいは磁気的な作用による損失は鉄損と呼ばれている。この損失は、ヒステリシス損と渦電流損の2つに分けられる。前者は主にステーター上の磁性体部分で生じ、後者も主にステーター上の金属部分で生じる損失である。

各発熱源の特徴としては、銅損は電流の2乗に比例し、鉄損のうちヒステリシス損はモーターの回転周波数に比例し、渦電流損は回転周波数の2乗に比例する。

#### 4. 実験装置と実験方法

Fig. 1 に実験装置を示す。ステッピングモーターは薄肉のSUSの円筒(φ 25 mm, L40 mm, t0.5 mm)の上に台座をつくり、

そこに設置されている。薄肉の SUS の円筒を使用したのは、モーターから冷凍機へ熱が運ばれるのだが、モーターと 20K ステージ間の温度差を測定可能な大きさにするための高熱抵抗体として採用した。さらに20K ステージは、冷凍機の20K コールドヘッドに接続されており、冷却される。実験では、20K ステージ温度は15Kとなっていた。Lakeshore 製 DT670CU の2つの温度センサーを使用し、1つはモーターの上部、もう1つは20K ステージに設置した。実験時には20K ステージの温度変化はほぼなく、したがって、モーター上部の温度センサーの温度上昇を使い、モーター回転時の発熱量との関係を探った。このために、モーター非回転時に予めモーターコイルをヒーター抵抗体として使い発熱させ、その発熱量とモーター温度上昇の関係を測定により求めておいた。

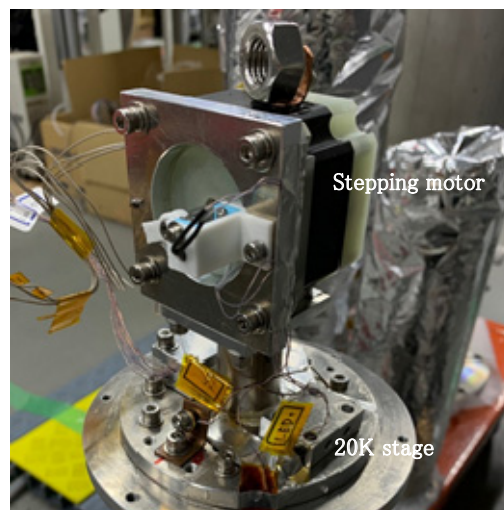


Fig.1 Experimental setup

#### 5. 実験結果

モーターを 40sec/回転で回転させた場合の結果を Table 3 に示す。コイル上のジュール発熱(銅損)はモーターの回転周期に関わらず一定で、コイルに流した交流電流の振幅 590mA と電気抵抗により計算された。開発品の総損失は大幅に改善されたことが分かる。

Table 3 Total loss and copper loss

	Total loss (mW)	Copper loss (mW)
Commercial motor	17.42	14.31
Developed motor	8.36	0.68

#### 6. まとめ

- #1 銅損は約1/20まで減少した。
- #2 (40sec/回転時の)総損失(発熱)は52%低減された。
- #3 機械損の影響がまだ大きいと考えられる。
- #4 今後、搭載環境と同じ4Kでの実験を行う予定である。

## Nb<sub>3</sub>Sn 層形成に与える Hf-Ta と Hf-Ti の添加効果 Doping effect of Hf-Ta and Hf-Ti on Nb<sub>3</sub>Sn layer formation

伴野信哉, 諸永 拓, 原 徹(NIMS); 浅井航希(上智大学, NIMS); 谷貝 剛(上智大学)

BANNO Nobuya, MORONAGA Taku, HARA Toru(NIMS); ASAI Koki (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn 線材への Hf 添加は、Nb 内部酸化法と同様に、Nb<sub>3</sub>Sn 層の結晶組織微細化の点で注目されている。しかしながら Hf 添加効果について、内部酸化の影響が指摘されるなど、効果の度合いなどについては十分明らかにされていない。本研究では、Hf 添加 Nb<sub>3</sub>Sn 層形成における Sn 拡散駆動力の影響、ならびに Hf-Ta 添加と Hf-Ti 添加の Nb<sub>3</sub>Sn 層形成に与える効果を調べるため、TEM および ASTAR システムによって、詳細な組織観察・結晶粒方位解析を行った。本研究で作製した試料には、ナノ酸化物相の析出頻度は低く、ほぼ純粋な Hf 添加の効果が現れていると考えられる。

### 2. 実験方法

まず Cu/Nb 合金の複合単芯線(線径 1.09 mm)を作製し、圧延してテープ形状とした。その表面に Sn メッキを施し、550°Cでの予備熱処理ののち、685°C×100 h の熱処理を施し、Nb との界面に Nb<sub>3</sub>Sn 層を生成させた。Nb 合金として、Nb-4Ta, Nb-4Ta-1Hf, Nb-2Ti, Nb-2Ti-1Hf (at%) の組成のバルク体をアーク溶解にて作製した。Nb<sub>3</sub>Sn 相の生成過程に大きな影響を与える Sn-Cu 中の Sn 比率[1]は約 25 at% とした。

TEM 観察に供するため、各試料を樹脂に埋め込んで横断面を鏡面研磨し、FIB で Nb<sub>3</sub>Sn 層を含む薄い層を切り出した。その幅広面(線材長手方向に平行な面)に対し、STEM 組織観察・STEM-EDS による元素分析(使用装置: JEM-ARM300F 加速電圧 300kV) および ASTAR システムによる方位解析(使用装置: JEM-2800 加速電圧 200kV)を行った。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に試料の横断面(左)と TEM 用試料の FIB による切り出し部の場所のイメージを示す。Fig. 2 には Nb-4Ta-1Hf 芯を用いた試料の Nb<sub>3</sub>Sn 結晶層の STEM-EDS マップを示す。Hf は酸素のアフィニティが高く、これまで Hf 酸化(ナノ析出)による微細化への影響も指摘されていたが、本作製試料では酸素の影響は小さく、Nb<sub>3</sub>Sn 結晶層の中に高頻度のナノ酸化物の存在は見られなかった。一方、酸化物は認められないものの、Hf, Ta, Cu が結びついてナノ化合物を形成していることが確認された。Ti-Hf 添加試料では、主として Hf と Cu の化合物粒であった。こうした Cu-Hf 化合物は Nb<sub>3</sub>Sn 層内に均一に分散しているわけではなく、直線的に形成している様子が見られた。

Fig. 3 には、紙面の関係上、Ti-Hf および Ta-Hf 添加の 2 試料のみの STEM-ASTAR 解析による Nb<sub>3</sub>Sn 層の結晶方位マップを示す。Table 1 には、4 試料の結晶粒径解析の結果をまとめた(Nb 母相に近い側のデータのみ掲載)。全体的に、Ti 添加よりも Ta 添加の方が結晶粒が微細化される傾向が見られた。さらに、Ti, Ta 添加いずれの場合にも、Hf を追加で添加することによって、結晶粒の微細化が確認されたが、Ta-Hf 添加でより強い微細化が見られた。先に述べたとおり、ナノ酸化物がほとんど存在せず、純粋な Hf 添加効果が現れていると考えられる。

本研究の一部は公益財団法人 池谷科学技術振興財団の研究助成により実施された(0341203-A)。

参考文献 [1] N. Banno, "Low-temperature superconductors: Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al, and NbTi", Superconductivity, vol. 6, 100047, 2023.

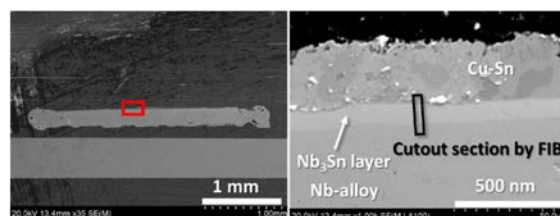


Fig.1. Transverse cross-sectional SEM image of the sample (left) and an image of cutout section by FIB (right).

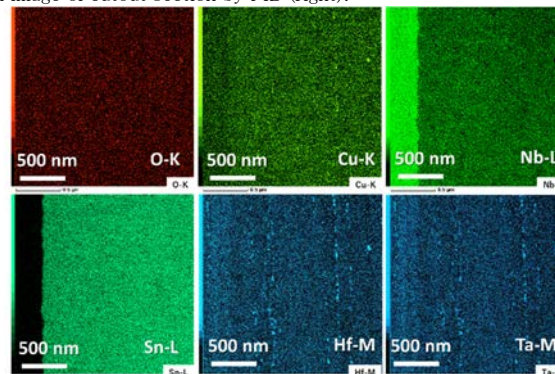


Fig.2. STEM-EDS maps of Nb<sub>3</sub>Sn layer fabricated with Nb-4Ta-1Hf alloy.

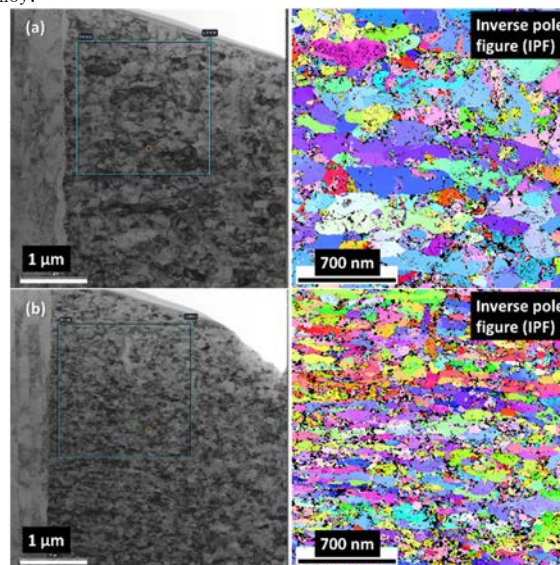


Fig.3. STEM image and IPF maps analyzed by ASTAR for (a) Nb-2Ti-1Hf core sample and (b) Nb-4Ta-1Hf core sample.

Table. 1. Grain size results analyzed by ASTAR

Sample	Additive 1	Hf addition	Grain size (nm)
1	2at%Ti	-	171.6
2	2at%Ti	1at%	145.1
3	4at%Ta	-	111.0
4	4at%Ta	1at%	69.7

## Sn 高拡散駆動力下での Nb<sub>3</sub>Sn 層形成 Formation of Nb<sub>3</sub>Sn layer under high Sn diffusion driving force

浅井 航希(上智大学、NIMS);谷貝 剛(上智大学);伴野 信哉(NIMS)  
ASAI Koki (Sophia univ. , NIMS);YAGAI Tsuyoshi (Sophia univ.); BANNO Nobuya (NIMS)  
E-mail: kouki0204@eagle.sophia.ac.jp

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn 線材における一般的な製法は、Nb/Cu-Sn 拡散反応によるものであり、Sn 拡散駆動力という点において、Sn 拡散駆動力が低い場合(すなわちブロンズ法)と高い場合(チューブ法、PIT法、内部拡散法)に分けられる。Sn 拡散駆動力は Cu 添加量と強い相関があるが、Nb<sub>3</sub>Sn の層厚の増大、及び結晶粒径の微細化を目的として Sn 拡散駆動力に着目した研究報告は少ない。本研究では、Sn-Cu 内の Cu 含有率を 10at% 以下と極端に低くした試料を用い、Sn 化学ポテンシャルの観点 (Fig. 1[1]) から Nb<sub>3</sub>Sn 層形成を議論した。加えて、Sn 化学ポテンシャル制御の可能性を調べるため、Sn-Cu 合金中への Zn、Ge 及び Ti 添加を行いその効果を観察した。

### 2. 実験方法

本研究では 5 種類の試料を作製し実験した。Sn 芯を (a)Sn-10at%Cu, (b)Sn-5at%Cu5at%Zn, (c)Sn-5at%Cu5at%Ge, (d)Sn-5at%Cu5at%Ti 及び 比較試料の pure-Sn としたテープ線材(厚さ 0.18mm)を用意し、Ar ガス封入したガラス管で 650°C×100h までを 8 段階に分け熱処理した。熱処理後の試料の研磨断面、及び厚い Nb<sub>3</sub>Sn 層が確認された試料では粒界破断面における微細組織観察 (FE-SEM) を行った。平均結晶粒径はある特定の範囲の結晶粒を数えることで計算した。組成分析はエネルギー分散 X 線分光法 (EDS) により行った。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 2 に各試料の 650°C×100h 熱処理後の断面写真を示す。(a)-(c)の3つの試料において Nb<sub>3</sub>Sn 層形成が確認された。層厚はそれぞれ 11.1 μm, 10.70 μm, 1.29 μm であり、10%Cu 添加試料が最も厚い Nb<sub>3</sub>Sn 層が形成され、Zn 添加試料でもそれに近い厚さの層が確認された。Ge 添加試料では、Nb<sub>3</sub>Sn 層形成はされたものの形成される層厚が薄かった。(d)の Ti 添加試料では目的である Nb<sub>3</sub>Sn 相が確認されず、Nb<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 相までの形成となった。これまでの結果では、純 Sn の場合には NbSn<sub>2</sub> 相までの形成しか見られておらず、それよりは形成が進展した。

Fig. 3 は Sn-10at%Cu, Sn-5at%Cu5at%Zn における形成された Nb<sub>3</sub>Sn 層の粒界破断面である。両者とも Nb 界面での微細な結晶粒(左側)と Nb<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> が分解して生成された粗大な結晶粒(右側)が確認できる。微細な結晶粒の平均粒径はそれぞれ 124.5nm, 136nm であった。一方、Nb<sub>3</sub>Sn 層内における微細な結晶層と粗大な結晶層の層厚比はそれぞれ 10:9, 2:1 であり、Zn 添加において微細な結晶層の割合が増加する傾向が見られた。PIT 法やチューブ法など、Sn 拡散駆動力が高い製法の場合には、粗大な結晶層を低減することが課題とされているが、Zn 添加がそれを改善する可能性がある。

添加元素によるこうした層形成の違いは、単に Sn-Cu 芯中の Sn 化学ポテンシャルを考えるだけではうまく説明できない。層形成の理解には、Sn-Cu 芯中の Sn 化学ポテンシャルだけでなく、元素添加による NbSn<sub>2</sub> や Nb<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> への Sn 化学ポテンシャルの影響も検討する必要があると考えられる。

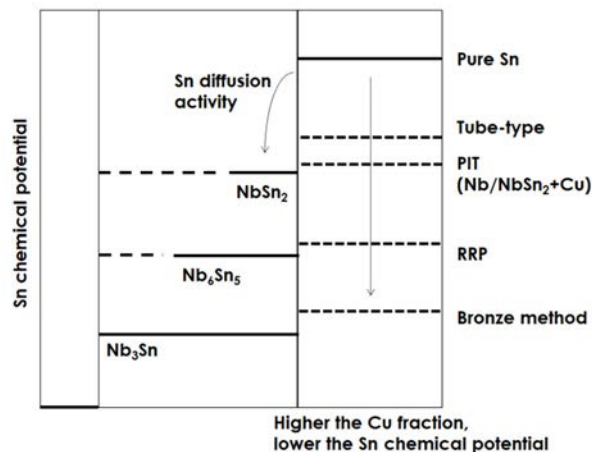


Fig. 1. The schematic diagram of chemical potential during Nb/Sn diffusion reaction. [1]

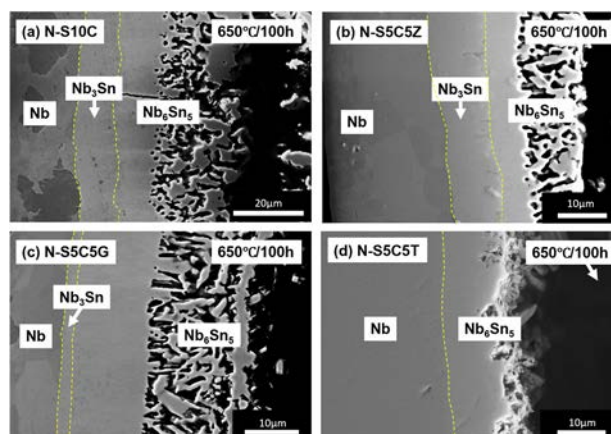


Fig. 2. The microstructure of N-S10C (a), N-S5C5Z(b), N-S5C5G(c) and N-S5C5T(d) after 650°C×100h heat treatment.

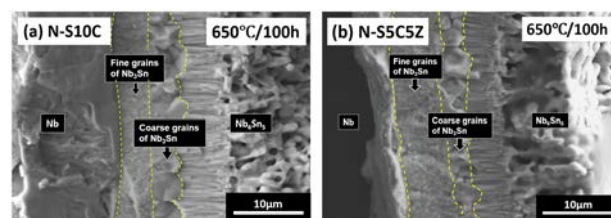


Fig. 3. The fracture cross-section of N-S10C (a), N-S5C5Z (b) after 650°C×100h heat treatment.

### 参考文献

1. N.Banno, Low temperature superconductors: Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al, and NbTi, Superconductivity, Vol. 6 (2023), 100047

# 硬脆性材料 $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ 超伝導体のバルク磁石としての可能性

## Potential of hard brittle material $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ superconductor as a bulk magnet

金木 大祐, 内藤 智之 (岩手大)  
 KANEKI Daisuke, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)  
 E-mail: g0323045@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

$\text{PbMo}_6\text{S}_8$  超伝導体は現在線材として実用されている  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  に比べて上部臨界磁場  $B_{c2}$  が 51 T (4.2 K) [1] と高い値であるが、硬脆性や低充填率などの問題から長尺線材化の研究が行われていない。また、先行研究から作製過程の熱処理温度等に起因する化学量論比からのずれによって超伝導特性が低下することが報告されている [2]。バルク材は線材化に比べ大きな加工を必要としないことから、加工以外の問題を克服できればバルク磁石としての応用に期待できる。バルク磁石の大型化を目指すには従来の作製方法である石英管真空封入では大量合成が出来ない。従って、本研究では、石英管真空封入を用いない方法で  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  バルク体を作製し、その臨界電流特性からバルク磁石の可能性について報告する。

### 2. 実験方法

原料粉末  $\text{Pb}$  (99.9%),  $\text{Mo}$  (99.9%),  $\text{S}$  (99.99%) を化学量論比の  $\text{Pb}:\text{Mo}:\text{S}=1:6:8$  で秤量し異なる条件下で封入を行った。石英管真空封入した試料を Quartz tube Sample, Ar 雰囲気中でステンレス (SUS) 管封入した試料を Ar/SUS Sample とした。その原料粉末を  $450^\circ\text{C}-4$  h,  $650^\circ\text{C}-8$  h の二段階焼成して前駆体 ( $\text{PbS}, \text{MoS}_2, \text{Mo}$ ) を得た。その後、その前駆体を粉砕・混合した後再封入し  $900^\circ\text{C}-44$  h の焼成を行い  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  相を得た。得られた粉末は真空雰囲気中で印加圧力 50 MPa、保持温度と時間  $800^\circ\text{C}-20$  min、ダイスサイズ  $\phi 10$  の条件で放電プラズマ焼結法 (Spark Plasma Sintering: SPS) によりバルク化した。試料の評価は結晶の同定に X 線回折 (XRD) 装置、磁化測定には SQUID 磁束計を用いた。臨界電流密度  $J_c$  は磁化測定データより拡張型ビーンモデルを用いて算出した。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に各試料の XRD パターンを示す。すべての試料で  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  のピークが確認できたが、Quartz tube sample では不純物の残留が確認でき、Ar/SUS sample では不明なピークが確認できた。これは粉末に磁性が確認できたため SUS と反応した物質と考えられる。そこで SUS との接触を防ぐために、前駆体ペレットと SUS の間に Nb ペレットを挿入した試料を作製した (Ar/Nb Sample)。その結果 Ar/Nb sample では SUS 容器との反応を防ぐ対策を講じたことにより比較的不純物の少ない  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  が作製できた。

Fig. 2 に各試料の磁化の温度依存性を示す。Quartz tube sample は不純物が多く残留しているため  $T_c$  が低下したと考えられる。Ar/SUS Sample は反磁性を示さなかった。粉末に磁性が確認できたため SUS と反応したことが考えられる。対して Ar/Nb sample は体積当たりの磁化の減少幅が大きく転移幅がシャープであった。これは Nb ペレットを用いたことで SUS との反応を防ぐことができたためと言える。しかし、すべての試料の  $T_c$  は化学量論比組成である  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  の  $T_c$  約 14 K より低いことから、 $\text{Pb}, \text{Mo}, \text{S}$  の組成が化学量論比からずれが生じていると考えられる。

Fig. 3 に超伝導を示した Quartz tube sample と Ar/Nb sample の 8 K における  $J_c$  の磁場依存性と充填率を示す。Ar/Nb sample の  $J_c$  は  $4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  であり、磁場の増加とともに緩やかに減少した。これは Quartz tube sample より  $T_c$  が高

いため高い  $J_c$  が得られたと考える。しかし、超伝導バルク磁石として動作する目安は  $1 \text{ T} \approx 10^5 \text{ A/cm}^2$  級であることから今回得られた  $J_c$  値は一桁ほど低い。従って今後は SPS 法の熱処理温度や保持時間等を再検討し充填率を向上させることで  $J_c$  の向上をさせる予定である。

このことから  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  超伝導体は  $J_c$  向上が実現できれば加工をほとんど必要としないバルク磁石として活用可能となる。

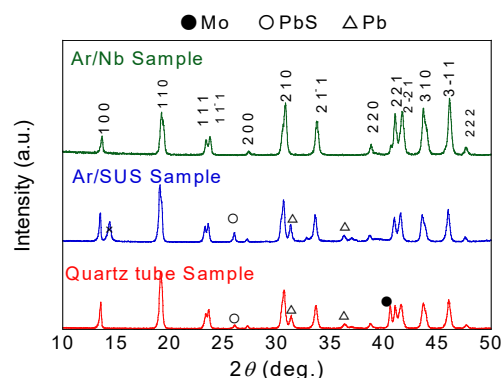


Fig.1 XRD pattern of the indicated  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  samples

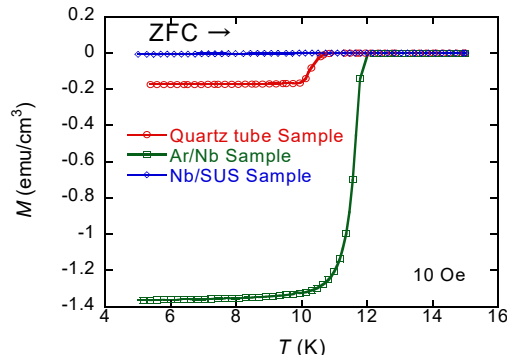


Fig.2 Temperature dependence of magnetization for the indicated  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  samples

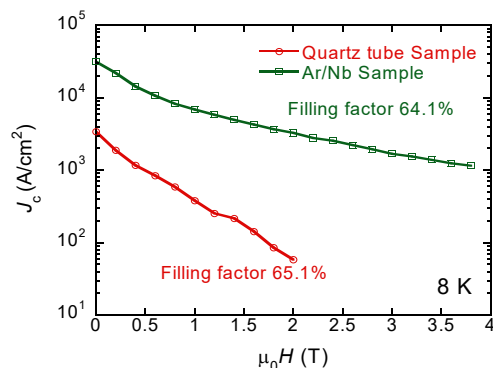


Fig.3 Magnetic field dependence of  $J_c$  and filling at 8 K for Quartz tube sample and Ar/Nb sample

### 参考文献

1.  $\phi$ . Fischer, Appl. Phys. **16**, (1978) 1.
2. 木村 錫一: 低温工学 **14** (1979) 51



## MgB<sub>2</sub>ハイブリッド線材の微細組織と通電特性 Microstructure and transport property of MgB<sub>2</sub> and YBCO hybrid wires

小黒 英俊, 大橋 克也, 吉澤 侑希 (東海大) 淡路 智 (東北大金研)

OGURO Hidetoshi, Ohashi Katsuya, Yoshizawa Y uki (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (IMR, Tohoku Univ.)

E-mail: h-oguro@tsc.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>は、臨界温度  $T_c$ が39 K[1]であり、すでに線材化され市販までされている。MgB<sub>2</sub>線材は、 $T_c$ が高いことから熱的安定性に優れているが、上部臨界磁場  $B_{c2}$ が低いいため、強磁場中での臨界電流密度  $J_c$ が低いのが現状である。

これに対して、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(YBCO、Y:RE または希土類元素)は、 $B_{c2}$ が非常に高く、磁場中での  $J_c$ 特性が優れていることが知られている。現在は、coated conductor として非常に臨界電流密度の高い線材が作成されているが、丸線は作成が困難な状況にある[2]。

そこで、我々のグループでは、YBCO と MgB<sub>2</sub> の 2 つの超伝導体を組み合わせた、ハイブリッド線材を提案している[3]。これは、外側に YBCO、内側に MgB<sub>2</sub> を配置することで、YBCO の磁気遮蔽効果を利用して外部磁場を遮蔽し、MgB<sub>2</sub> が感じる磁場を減少させることが狙いである。本発表では、前回の報告を踏まえ、超伝導層の元素分布などから超伝導層の様子を調べたので報告する。

### 2. 実験方法

ハイブリッド線材の作製方法を示す。MgB<sub>2</sub> 芯は、Ex-Situ Powder-in-Tube 法により作製した。MgH<sub>2</sub> 粉末(富士フィルム製)と amorphous B 粉末(Pavezyum 製)を、モル比 1:2 で混合し、真空雰囲気下 630°C×10 h の熱処理を行い、MgB<sub>2</sub> を作製した。この MgB<sub>2</sub> を、直径 5 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 50 mm の Nb 管に詰め、直径が 3.5 mm 以下になるまで溝ロール圧延機による圧延加工を行った後、長さ 40 mm に切断した。外側に挿入する YBCO 粉末は、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(和光純薬製、99.99%)、BaCO<sub>3</sub>(和光純薬製、99.9%)、CuO(和光純薬製、95.0%)を、モル比 Y:Ba:Cu=1:2:3 で混合し、900°C×4 h の仮焼き、930°C×24 h の本焼きを経て作製した。MgB<sub>2</sub> 芯を外径 5 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 50 mm の Ag 管に詰め、MgB<sub>2</sub> 芯の周りに YBCO 粉末を配置した。これを外径 3.0 mm まで圧延加工をした。その後、未熱処理線、真空雰囲気下 630°C×10 h の熱処理線材を作製した。

作製したハイブリッド MgB<sub>2</sub> 線材に対して、電子顕微鏡による断面観察、および、EPMA による元素分析を行った。また、通電試験による臨界電流の確認を行った。

### 3. 実験結果

図 1 に熱処理前後線材の電子顕微鏡画像を示す。中心の MgB<sub>2</sub> 芯は熱処理前後とも均一であった。これに対し、熱処理後の YBCO 層には亀裂が多く見られた。

図 2 に MgB<sub>2</sub> 芯部分、図 3 には YBCO 部の元素分布マッピングをそれぞれ示した。右上の画像は、電子顕微鏡画像であり、それ以外の図が、元素マッピングである。図 2 の結果から、MgB<sub>2</sub> 芯の部分に多くの酸素が検出された。これは、MgB<sub>2</sub> 作製時に混入してしまった酸素と考えられ、MgO が多数存在することが考えられる。これは、線材の  $J_c$  そのものの低下につながる原因となる。図 3 からは、Nb 管と YBCO の接触面付近に、Nb の酸化層が形成されていることが分かった。このことから、YBCO から酸素が抜けて Nb が酸化したと考えられ、YBCO が劣化していることがわかった。臨界電流を考えると、未熱処理線材はゼロ磁場 4.2 K で 200 A 以上、熱処理後は 150 A 程度

であり、YBCO の超伝導特性によって変化すると考えられる。発表当日には、EPMA の結果より YBCO が分解している様子についても詳しく説明する。

### 謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの課題(202112-HMKGE-0041)の一部として行われた。本研究の一部は、東海大学高度物性評価施設及び、核融合科学研究所一般共同研究(研究コード NIFS22KIEA023)の支援を受け、実施したものである。

### 参考文献

1. J. Nagamatsu et al., Nature, Vol. 410 (2001) p. 63
2. Z. Zhang et al., Christ. Eng. Comm., Vol. 21 (2019) 1369
3. K. Ohashi et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 78

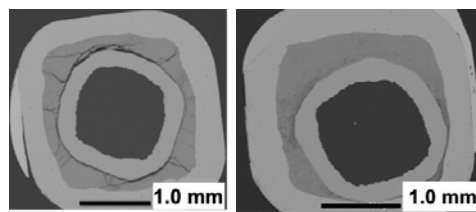


Fig. 1 A backscattered electron image of cross section for hybrid MgB<sub>2</sub>-YBCO wire. The left and right photos are the heat-treated and as-drawn samples, respectively.

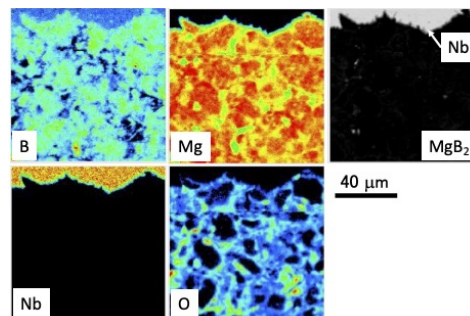


Fig. 2 The elemental mappings for YBCO layer of heat-treated hybrid wire. The upper right photo is the backscattered electron image.

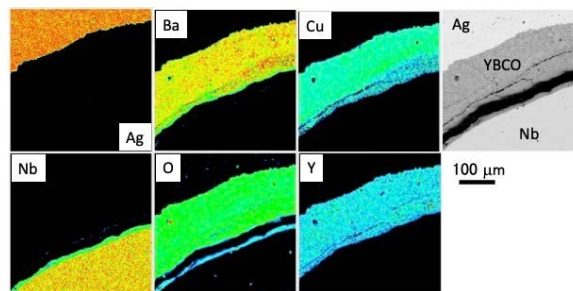


Fig. 3 The elemental mappings for YBCO layer of heat-treated hybrid wire. The upper right photo is the backscattered electron image.

# Er-Ba-Cu-O 超伝導接合材を用いた Gd-Ba-Cu-O 接合バルク超伝導体の接合部特性の制御

## Control of joining properties of Gd-Ba-Cu-O joined bulk superconductor using Er-Ba-Cu-O superconductor joining material

竹村 賢人, 須藤 正照, 坂藤 正樹 (芝浦工大); 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄, 坂井 直道 (芝浦工大)  
 Takemura Kento, Sudo Masaki, Sakafuji Masaki (SIT); Yokoyama Kazuya (AU); Oka Tetsuo, Sakai Naomichi (SIT)  
 E-mail: na21104@shibaura-it.ac.jp

### 1. 緒言

RE-Ba-Cu-O (RE: 希土類元素) バルク超伝導体の大型化やパルス着磁に適したバルクの作製を目的として、局所溶融法を用いた接合部の作製条件を検討し、接合部の超伝導特性の向上を検討した。局所溶融法は良好な超伝導接合を行う技術であるが、接合方位や溶融条件など接合部の作製条件によっては接合部の中心で多くのポアや第二相の偏析が生じて、超伝導特性の低下につながることを確認した。また、先行報告[1]では接合方位は (110) 方向が適切であり、(100) 方向では中心部に偏析が集中し超伝導特性が悪化していたが、結晶成長速度を速めることで改善されることを確認した。

### 2. 実験方法

被接合材として日本製鉄製の Gd-Ba-Cu-O バルク超伝導体 ( $\phi$  60 mm, Ag 9.4 wt% 添加, Pt 0.5 wt% 添加) を用い、接合材として  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (Er123) と  $\text{Er}_2\text{BaCuO}_5$  (Er211) をモル比 5:2、 $\text{Ag}_2\text{O}$  を 10 wt%、 $\text{CeO}_2$  を 1 wt% 混合した焼結体を使用した。示差熱分析装置 (DTA) により空気中の包晶分解温度 ( $T_p$ ) を測定したところ、被接合材の  $T_p$  が 993 °C、接合材の  $T_p$  が 937 °C であった。Gd-Ba-Cu-O バルクから接合面が (100) 面同士または (110) 面同士になるように 4 mm 角を切り出し、接合面をラッピングペーパーの 0.3 ミクロンまで使用して鏡面に研磨した。この研磨面同士の間厚さ 0.3 mm に研磨した接合材を挟んだ。接合試料前駆体は電気炉にて 960 °C で 3 h 保持した後、940 °C まで 0.5 h で冷却、920 °C まで 12 h かけて部分溶融成長させることで、接合材のみ溶融成長し接合した。接合試料は超伝導化のため、酸素雰囲気下で 400 °C、100 h アニールを施した。接合試料は電子線マイクロアナライザ (EPMA) により ab 面の組織および組成分布観察を行った。また、接合試料から接合部を跨ぎ、2 mm × 2 mm × 1.5 mm になるように切り出して SQUID 磁束計により超伝導特性 ( $M-T$  および  $J_c-B$ ) を評価した。以下、接合面が (100) 面同士になる試料を (100)/(100)、(110) 面同士になる試料を (110)/(110) と表記する。

### 3. 実験結果と考察

Fig.1 に (100)/(100) および (110)/(110) の接合組織観察結果を示す。この結果から (100)/(100) においても接合部中心で偏析がほとんど発生していないことを確認した。また、Fig.2 に 50 K における被接合部、接合部、(100)/(100) および (110)/(110) 接合試料の  $J_c-B$  を示す。ここで、Gd (Matrix) は Gd-Ba-Cu-O バルクを切り出した試料、Er (Joined part) は Gd-Ba-Cu-O バルクと厚い接合材を重ねて接合試料と同様に溶融成長させた試料から切り出した試料である。(100)/(100) は Gd (Matrix) と Er (Joined part) の  $J_c-B$  の各磁場における低い方の値を示していることがわかる。これは超伝導電流ループが Gd (Matrix) と Er (Joined part) の低い値に依存するためであり、良好な超伝導接合が施されたことを示す。先行報告では (100)/(100) は接合部中心で偏析が多く、超伝導特性で (110)/(110) に劣るとされていた。報告内の結晶成長速度は -0.5 °C/h であり、本研究の -1.7 °C/h より非常

に遅い。そのため、trapping-pushing 理論により、RE211 粒子が排出され、接合部中心で偏析が多くなったと考えられる。これにより、結晶成長速度を制御することで、偏析が少なく、超伝導特性に優れた超伝導接合を施すことが可能であることが示唆された。対照的に (110)/(110) では  $J_c-B$  が (100)/(100) の約 65 % を示していた。これは接合部中心で超伝導特性に影響を与える組織が存在している可能性が考えられる。

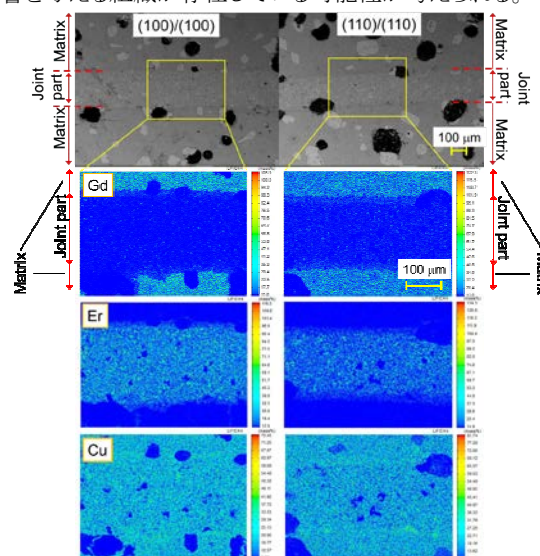


Fig.1 Comparison of EPMA measurements of (100)/(100) and (110)/(110) of the joined bulk

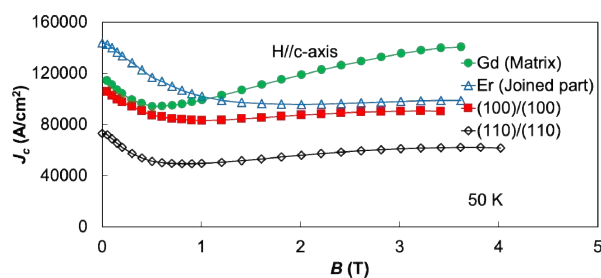


Fig.2  $J_c-B$  curves of the matrix, joined part, (100)/(100) and (110)/(110) at 50 K

### 4. 結言

局所溶融法を用いた超伝導接合では偏析が生じるため、接合方位は (110) 方向が適切とされていたが、結晶成長速度を制御することで (100) 方向でも改善されることを確認した。また、接合部を含む箇所を SQUID で評価することで、接合部の超伝導特性を定量的に比較できることが示唆された。

### 参考文献

1. J. Yoshida et al.: Physica C: Superconductivity, Vol. 378-381 (2002) pp641-645

## 短尺の直流超電導ケーブルの特性評価

### Characterization of short DC superconducting cable

山口 悠平, 濱本 拓郎, 木内 勝 (九工大)

YAMAGUCHI Shuhei, HAMAMOTO Takuro, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.)

E-mail: yamaguchi.syuuehi889@mail.kyutech.jp

#### 1. はじめに

一般に超電導ケーブルの臨界電流の評価法として直流四端子法が用いられる。この方法は、ケーブル長が数メートル以上と十分長い場合は、超電導層に均一に輸送電流が流れるが、数十センチ長の模擬ケーブルでは、電流端子部と超電導線材間の接続のばらつきの影響を受けて、オーミックや、負の電界等の複雑な電流-電圧特性となる。すなわち、短い超電導ケーブルの臨界電流を正しく評価することができない[1]。

本研究では、RE 系コート線材を用いた短尺の超電導ケーブルを作製し、液体窒素下で通電試験を行い電流-電圧特性を評価した。この結果に対して、接続抵抗のばらつきに起因する超電導ケーブルの線材間の電流分布を簡単なモデルで計算し、ばらつきが電流-電圧特性へ与える影響について調べた。

#### 2. 短尺の超電導ケーブルの通電特性

長さ 50 mm の短尺のケーブルは、市販されている SuperPower 社製の幅 4 mm の RE 系コート線材 ( $I_c=113A$ ,  $n=25.5 @77K$ , self-field) を 8 枚用いて作製した。直径 10 mm のベーク材にケーブルの軸に対して、 $10^\circ$  の角度で巻きつけた。作製したケーブルの外観を Fig. 1(a) に示す。電流端子は両端部 30 mm で、中央部に 30 mm の電圧端子を、ケーブル評価で用いられる銅線を導體部に一周させ、その上に合計 8 つの電圧端子を取り付けた (Fig. 1(b))。通電試験は液体窒素中で、ケーブルへの電流通電を 3A/s で行った。

Fig. 2 に、例として  $V_{43}$  と  $V_{54}$  の電流-電圧特性を示す。低電流から中電流領域は線形的な特性、または負の電界が発生している領域が確認できるが、900A 以上の領域では電流-電圧特性が指数的に増加し、2 つの特性は同じようは振舞いになる。ここで電流容量  $I_{ct}$  を、電界基準  $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$  V/m と  $E_c = 1.0 \times 10^{-3}$  V/m で決定すると、 $V_{43}$  では 894 A と 978 A、 $V_{54}$  は 590 A と 904 A となり、端子の違い、すなわち接続抵抗の違いにより  $I_{ct}$  が大きく異なることがわかる。

#### 3. 超電導ケーブルの等価回路モデル

ここではケーブルの電流-電圧特性を Fig. 3 に示す等価回路モデルで考える。この場合のケーブル全体の電圧  $V_{total}$  は、左右電流端子の接続抵抗によって生じる電圧  $V_{cow,i}$  と  $V_{coe,i}$ 、接続部から電圧端子までの距離  $x_p$  で発生する電圧  $V_{x_p}$ 、超伝導線材部で発生する電圧  $V_d$  ( $n$  値モデル) の直列接続として [2]

$$V_{total} = V_{d,i} + 2V_{x_p,i} + V_{cow,i} + V_{coe,i} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

で表す。ここで、 $m$  は超電導線材の枚数を表す。従って、測定される電圧  $V_{ij}$  は、隣り合うテープ線材の電圧の差として

$$V_{ij} = (V_{d,i} + V_{x_p,i} + V_{coe,i}) - (V_{x_p,j} + V_{coe,j}) \quad (2)$$

で与えられる。 $i$  は電流プラス側の電圧端子を取り付けた線材の番号、 $j$  はマイナス側の電圧端子を取り付けた線材の番号を表す。

#### 4. 検討

解析に必要な電流接合の長さが 30 mm の接続抵抗を測定し、 $0.40 \sim 1.20 \mu\Omega$  の範囲であること確認した。従って、ここではこの範囲の接続抵抗値をフィッティングパラメータとして用いて電流-電圧特性の解析を行った。解析結果を Fig. 2 の

実線で示す。実験結果との一致はよく、接続抵抗の大小関係により、実験結果のような負の電圧が生じることがわかる。解析手法の詳細や、 $I_{ct}$  とケーブル長の関係は当日報告を行う。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金:21H01872 からの助成を受けて実施した。

#### 参考文献

- 1 M. Takayasu *et al.*: MIT Plasma Science and Fusion Center Reports, PSFC/JA-16-41, 2016.
- 2 G P Willering *et al.*: 2015 Supercond. Sci. Technol. 28 035001.

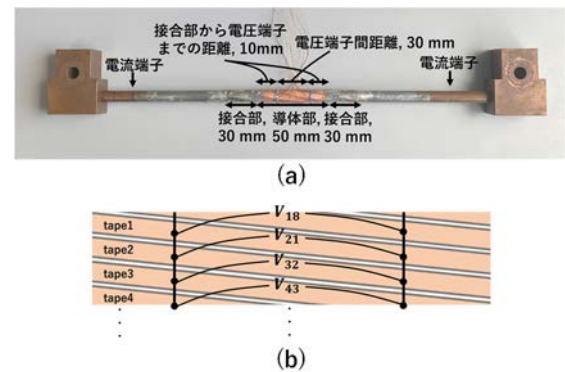


Fig. 1 (a) Appearance of the prototype cable. (b) The schematic of voltage taps installation.

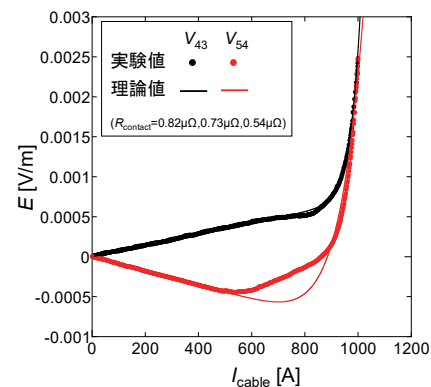


Fig. 2 Electric field vs. transport current.

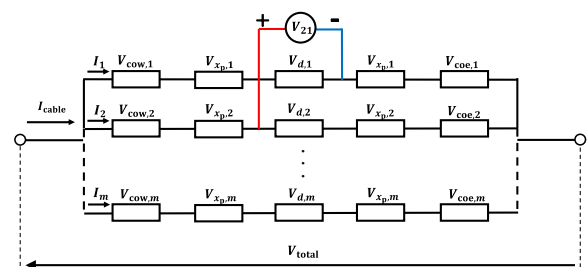


Fig. 3 Equivalent circuit model of superconducting cable.

## 超電導複合導体の流入部の電流分布の解析 (2)

## Analysis of current distribution in the inflow section of a superconducting composite cable(2)

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。我々は前回、超電導線材と銅板から成る導体の電流電界 ( $I$ - $E$ ) 特性の実験及び有限要素解析の結果について報告した[1]。今回、前回と異なる導体の電流流入部における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

複合導体への電流流入部の電流分布を調べるため、SuperPower 社の REBCO 線材に  $10\ \mu\text{m}$  の銅をコーティングした複合導体を試料として通電測定を行った。その概要図を Fig. 1 に示す。幅  $2\ \text{mm}$  の線材を  $50\ \text{mm}$  の長さに切り出し使用している。電流端子から流入した電流は、銅から超電導層へと流れ込み再び銅を介して反対側の電流端子へ流出する。電圧端子は銅上に取り付けており、電流端子に近い順に V1、V2、V3 とした。各電圧端子における  $I$ - $E$  特性を測定し、流入部での電流分布を検討した。REBCO 線材の臨界電流は  $46\ \text{A}$  である。

## 3. 実験及び解析結果

複合導体の  $I$ - $E$  特性を Fig. 2 に示す。V1 は最も電流端子に近い部位であるため、超電導層への電流流入が十分ではなく低電流側で電界が発生していることが分かる。電流端子から  $1\ \text{mm}$  離れた V2 でも、線形抵抗が観察されている。V1 及び V2 のみかけ上の抵抗は、それぞれ  $10.7\ \mu\Omega/\text{m}$ 、 $4.23\ \mu\Omega/\text{m}$  であった。電流端子から  $15\ \text{mm}$  離れた V3 では、低電流での線形抵抗は確認できなかった。測定感度の影響により充分低い電界まで計測できていないが、超電導層に電流の大部分が流れていると考えられる。

また、本実験結果を定性的に確認するため有限要素法による解析を行った。解析に用いたモデルは、前回の報告時に作成した幅  $2\ \text{mm}$ ×長さ  $50\ \text{mm}$ ×厚み  $1\ \mu\text{m}$  の REBCO 膜を有する超電導線材の銀安定化層の上部に、厚さ  $100\ \mu\text{m}$  の銅板をはんだ付けしたモデルである。このモデルに対して電流流入部からの距離によって  $I$ - $E$  特性がどのように変化するかを調べた。電界の観察部位は実験と合わせ、それぞれ V1'、V2'、V3' とした。有限要素解析による  $I$ - $E$  特性を Fig. 3 に示す。解析に用いたパラメータは実験試料とは異なる超電導線材に基づくものであるため、定量的には一致していないが定性的には同様の振る舞いとなった。

有限要素解析の各パラメータや電流の分流の様子などの詳細は当日発表する。

## 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。

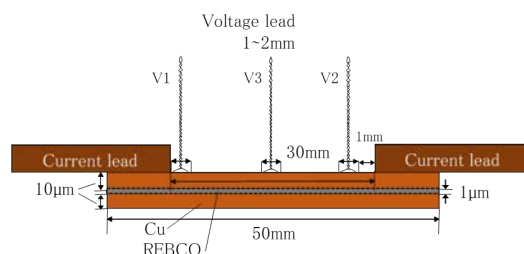
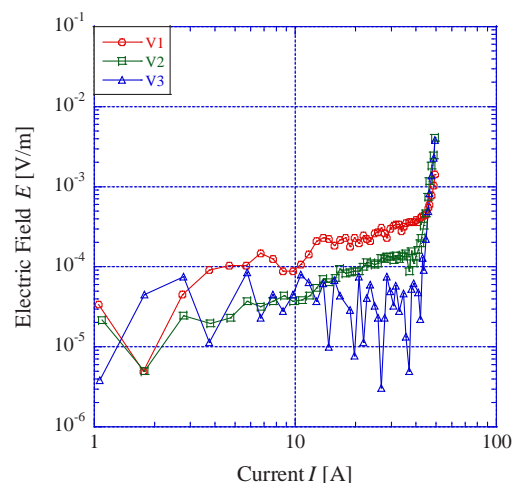
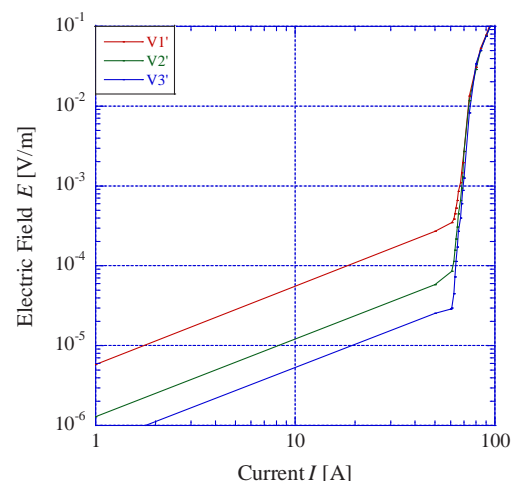


Fig. 1 Schematic of a measurement sample

Fig. 2 Measurement result on  $I$ - $E$  characteristicsFig. 3  $I$ - $E$  characteristics by finite element analysis

## 参考文献

1. M. Takahashi, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol.104 (2022) p. 51

## 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 (2)

## Critical current properties of REBCO thin films on Zr-patterned substrate (2)

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における交流損失低減は重要な課題である。交流損失低減に向けて線材の細線化が進められている。細線化の方法の一つとして、成膜前に SrTiO<sub>3</sub> (STO) 基板上に線状の金属 (Zr, Nb 等) をパターニングしバリア層として機能させ、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO) を成膜し分離する手法が提案されている[1][2]。我々は前回、幅 20 μm のスリットをいれたパターンを用いて Zr を形成し、REBCO 薄膜を成膜した試料の臨界電流特性を走査型ホール素子磁気顕微鏡 (Scanning Hall-Probe Microscopy, SHPM) による面内臨界電流密度 ( $J_c$ ) 分布測定と物理特性測定システム (Physical Properties Measurement System, PPMS) による直流磁化測定より調べた結果について報告した[3]。今回は、幅 5 μm のスリットパターンでバンク状の Zr を形成した結果について報告する。

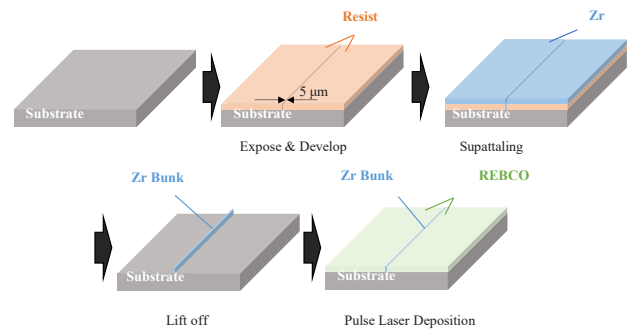


Fig. 1 Schematic of fabrication process for REBCO thin films on a bank-patterned substrate.

## 2. 実験方法

本研究でを使用した試料の作製手順を Fig. 1 に示す。REBCO 薄膜を二分割するようなバリア層となることを期待して STO 基板上に Zr バンクを形成した。その後、基板上に REBCO 薄膜をパルスレーザー蒸着法にて成膜した。Zr バンクによって REBCO 膜が電気的に分離されているかを確認するために捕捉磁場の面内分布を SHPM により測定した。磁化には永久磁石を用いた。得られた補足磁場分布からビオ・サバルの逆問題を解いて面内の  $J_c$  分布についても求めた。

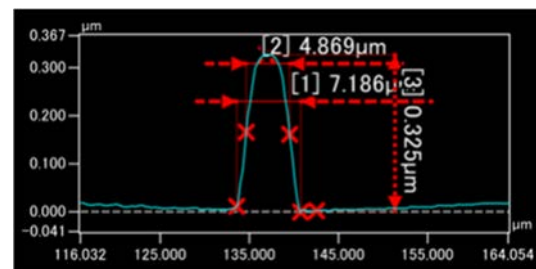


Fig. 2 Shape of Zr bank measured by laser microscopy.

## 3. 結果と考察

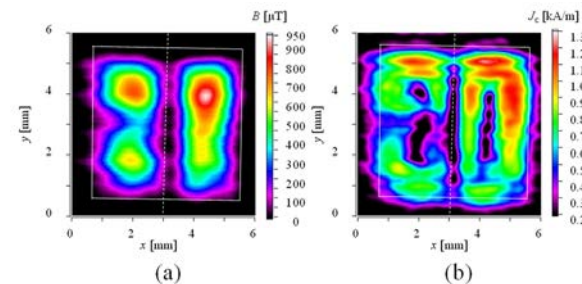
Fig. 2 にレーザー顕微鏡より得られた Zr バンクの形状測定結果を示す。高さ約 0.3 μm、半値幅約 5 μm のバンクが形成されていることが確認できた。

Fig. 3 に SHPM による測定で得られた補足磁場分布 (a)、面内  $J_c$  分布 (b) の結果を示す。測定間隔は x 軸, y 軸に対してそれぞれ 10 μm, 50 μm であるが、得られた結果に対して平均化処理を行った結果を示している。また、Fig. 3 において白線は試料の形状を、白破線は Zr バンクの位置を示す補助線である。補足磁場分布を見ると、Zr バンク部を境にして二つの補足磁場が形成していることが確認できた。面内  $J_c$  分布においても、Zr バンクを境界とした二つの周回電流が確認できた。これらの結果より、Zr バンクにより超電導層は分離できていると考えられる。

発表当日は、PPMS による磁場中  $J_c$  特性の結果などについても報告する予定である。

## 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。

Fig. 3 (a) Magnet field distribution and (b)  $J_c$  distribution of REBCO thin film on a Zr bank-patterned substrate.

## 参考文献

- [1] A. Matsumoto, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 18.
- [2] H. Fujimoto, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 19
- [3] S. Shuya, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 100

## 溶融した BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を利用した YBCO 丸線材作製方法の基礎検討

Basic study of fabrication process for YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> round wire by melt growth of BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

耿 智輝, 小黒 英俊 (東海大)

GENG Zhihui, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.)

E-mail: 2CAJM009@mail.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(YBCO)高温超伝導線材は、次世代超強磁場超伝導マグネットなど、様々な応用が期待されている。しかし、結晶が持つ異方性から、大電流通電が可能な方向が結晶の ab 面方向に制限されるという性質がある。このため、希土類系高温超伝導線材は、薄膜作製法を用いて配向したテープ状の線材が作製され、販売されている。ところが、テープ状線材では、超伝導体自体の結晶構造の層間の結合の弱さから物理的に弱く、剥離力に弱いという課題が存在している。そのため、YBCO 線材の丸線化が期待されている。このとき、丸線材内部において配向を促すため、溶融状態からの結晶成長を行うことが考えられる[1]。

丸線材作製時には、金属管中に超伝導粉末を入れて線引き加工する Powder in Tube(PIT)法を使うことが簡単であるが、YBCO との反応性を考えて金属管として銀管を使うことになる。このとき、銀の融点は 961°C で、YBCO の融点である 1000°C より低いという問題点がある。そのため、融点の低い BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [2]と Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>(Y211)を利用することで、YBCO の結晶粒をゆっくり成長させることが、一つの方法として考えられる。

本研究では、BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と Y211 を使って高温超伝導丸線材を作製することを目的とした。作製した線材を線引き加工した後、BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の低い融点を利用し、YBCO をゆっくり成長させることを目指して、実験を行った。

### 2. 実験方法

YBCO 丸線材は、PIT 法により作製した。原料として、Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub> と Y211 を用いた。

Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub>(5BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+BaO)粉末の作製方法を示す。BaCO<sub>3</sub>(和光純薬製、99.9%)と CuO(和光純薬製、95.0%)をモル比が Ba:Cu=3:5 になるように大気中で秤量、混合した後、大気中にて 850°C×24 h の仮焼き、真空中にて 860°C×24 h の本焼きを経て、試料を作製した。作製後には、少量の Cu<sub>2</sub>O と BaO が試料中に生成したことが確認された。

Y211 粉末の作製方法を示す。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(和光純薬製、99.99%)、BaCO<sub>3</sub>(和光純薬製、99.9%)、CuO(和光純薬製、95.0%)をモル比が Y:Ba:Cu=2:1:1 になるように大気中で秤量し、混合した後、900°C×24 h の本焼きを経て、Y211 を作製した。

BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 粉末と Y211 粉末をモル比が Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub>:Y211=7:9 になるように混合して、10wt%Ag<sub>2</sub>O と 0.5wt%CeO<sub>2</sub> を添加した後、直径 5 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 50 mm の Ag 管に詰めた。その後、直径が 0.8 mm 以下になるまで溝ロール圧延機による圧延加工を行った。

各線材の熱処理条件を表 1 に示す。1 から 6 までの線材は、Ar ガス雰囲気において 3 時間で最高温度まで昇温し、温度を安定させるため 1 時間保持した。そして、酸素分圧を表 1 の

Table 1 Heat treatment conditions for samples

	Oxygen partial Pressure	Maximum temperature	Cooling rate to 900°C
Sample1	0.10 atm	900°C	-
Sample2	0.15 atm	900°C	-
Sample3	0.20 atm	900°C	-
Sample4	0.10 atm	930°C	-
Sample5	0.15 atm	930°C	-
Sample6	0.20 atm	930°C	-
Sample7	0.10 atm	930°C	3°C/min
Sample8	0.10 atm	940°C	3°C/min
Sample9	0.10 atm	950°C	3°C/min

条件にコントロールして 3 時間熱処理した。7 から 9 までの線材は、Ar ガス雰囲気において 3 時間で 900°C まで昇温し、1 時間保持した。その後、表 1 の最高温度まで 10 分で昇温し、5 分間保持し、表 1 の酸素分圧にコントロールして、参考文献 [3]を参考にして、3°C/min の速度で 900°C まで冷却した。これは、参考文献と同様に、結晶成長できるかどうか確認するためである。

作製した YBCO 線材は、エポキシ樹脂に埋め込み、研磨後、光学顕微鏡による組織観察を行った。

### 3. 実験結果および考察

図 1 に、未熱処理の線材断面の観察結果を示し、図 2 に、熱処理した線材断面の観察結果を示した。図 1 と 2 を比較すると、明らかに試料の組織が変わっていることが分かった。線材 1 から 3 までの観察結果より、900°C の場合、溶融した様子が見られなかった。それに対して、線材 4-6 で行った 930°C 熱処理の場合、溶融した様子が見られた。900°C で溶融しなかった原因として、Ar ガスで熱処理した BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の融点が 900°C 付近であるためだと考えられる。

酸素分圧の変化に関して、20%から 10%まで変化させても、組織の変化は見られなかった。そこで、酸素分圧が低いほど BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の融点が下がるため、線材 7-9 は 10%の酸素分圧で熱処理した。

線材 7 から 9 までの観察結果から、溶融した様子は確認できた。今後、電子顕微鏡を用いて、結晶粒の様子を詳細に調べ、結晶成長の様子を調べる必要があると考えている。

### 4. まとめ

Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub> と Y211 を用いて丸線材を作製し、酸素分圧コントロールにより BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の低い融点を利用して、YBCO の溶融成長が可能かどうかを検討した。今回の結果から、銀管の中で BaCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を溶かすことが可能であることが分かった。

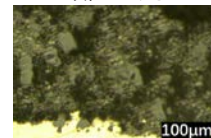


Fig. 1 Cross sectional view for the wire before heat-treatment

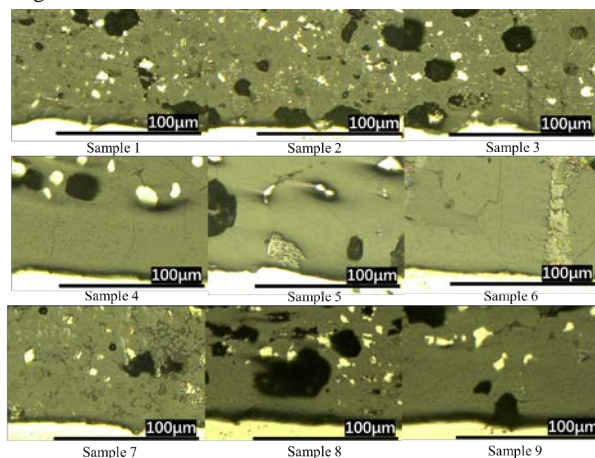


Fig. 2 Cross sectional views for Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub> + Y211 wires

### 参考文献

1. Y. Ozawa et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 100 (2020) p. 153
2. T. B. Lindemer et al., Physica C, Vol. 255 (1995) 81
3. T. C. Shields et al., J Mater Sci, Vol. 35 (2000) 6105-6110

# AFI 数値積分法を用いた 2 次元の超伝導体内の 量子化磁束線の可逆運動の研究

## Reversible motion of quantized flux in a 2D superconductor using the AFI method

温 謙, 上田 天馬, 小田部 荘司(九工大情工); 松野 哲也(有明工業高等専門学校)

WEN Qian, UEDA Tenma, OTABE Edmund Soji (Kyusyu Inst. of Tech.); MATSUNO Tetsuya (NIT-Ariake)

E-mail: wen.qian457@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

超伝導体内における多くの電磁現象は不可逆なものであり、臨界状態モデルによってよく記述される。ただし、この不可逆現象はピン・ポテンシャル付近での磁束線の運動、とくに磁束線がピン・ポテンシャルに落ち込むときと、これから飛び出すときの不安定現象に起因している。であれば、磁束線の変位量が小さい場合、その運動がピン・ポテンシャル内に限られ、現象が可逆となって(磁束線の可逆運動)、臨界状態モデルによる記述に合わなくなることが予想される。

本研究では、AFI(Affine Integrator)数値積分法[1]を用いて、Ginzburg-Landau 方程式を解き、量子化された磁束線を可視化し、理論的な磁束可逆運動を二次元で再現することを目的として行う。

### 2. 計算方法

まず、本研究では TDGL 方程式を数値解析する。TDGL 方程式は、G-L 方程式に時間依存性を付与したものである。G-L 方程式に対して時間発展する場合を考えると、以下の 2 式となる。

$$\gamma \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} + ie^* V \Psi \right) + \frac{1}{2m^*} (-i\hbar \nabla + e^* \mathbf{A})^2 \Psi + \alpha \Psi + \beta |\Psi|^2 \Psi = 0 \quad (1)$$

$$\nu \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} + \frac{i\hbar e^*}{2m^*} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - \frac{e^*}{m^*} |\Psi|^2 \mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

ここで  $\gamma$  と  $\nu$  はそれぞれ  $\Psi$  と  $\mathbf{A}$  の時定数、 $V$  はスカラーポテンシャルである。

続いて、AFI 法を用いて、2 次元超伝導現象を可視化する。左側では、オーダーパラメータの二乗の大きさを輝度、オーダーパラメータの位相を色相で表示する。右側では、磁場の大きさは色相、電場の空間平均の向きは黒の矢印、電流密度は白の矢印で表示する。

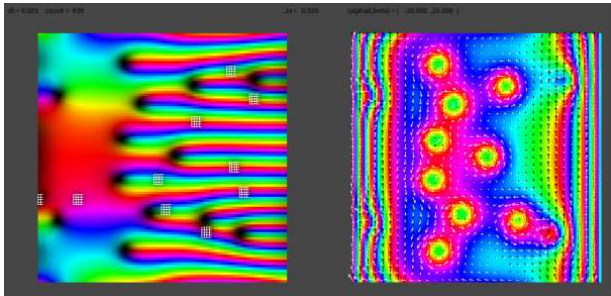


Fig. 1: Visualization and simulation of 2D superconductors

### 3. 結果

Fig. 2 は、規格化磁界  $B_z = 1.0$  の磁場下で超伝導体に正弦波電流を流して、規格化電流  $J_a$  が  $1.7 \sin 3/2\pi$ ,  $1.7 \sin 13/8\pi$ ,  $1.7 \sin 14/8\pi$ ,  $1.7 \sin 15/8\pi$  のとき、 $y$  軸方向の  $B_x$  を全部加算して、 $B_{max}$  に規格化された磁場分布である。減磁から増

磁に転じた後、磁束密度は侵入深さによって増加し、その後減少する。

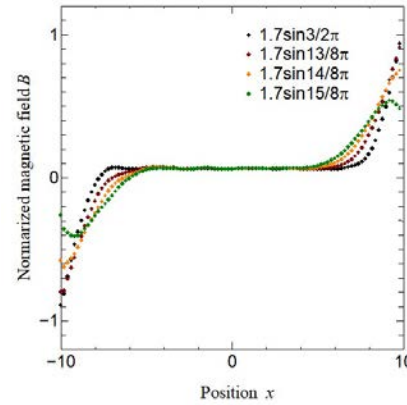


Fig. 2: Magnetic field distribution of a superconductor passing a sinusoidal current under a magnetic field.

Fig. 3 は減磁過程の臨界状態から増磁に転じたときの超伝導体内の磁束分布の変化である [2]。(a)は磁束線の可逆運動が顕著な場合、(b)は臨界状態モデルによる予想である。

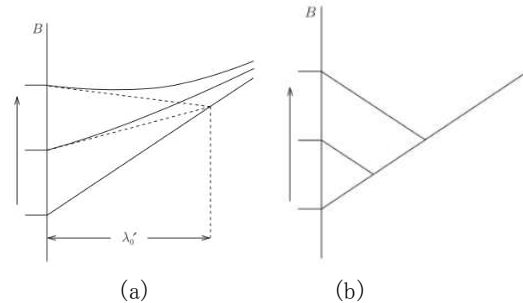


Fig. 3: Change in magnetic flux distribution in a superconductor when the demagnetization process turns from the critical state to the magnetization increase. [2]

数値計算の結果は、磁束線が顕著な可逆運動するという予測に近い。実験は期待に一致し、磁束線の可逆運動の観測に成功した。磁束線は折れ曲がりを見せず、ある点で急に傾きが変わることもなく、ゆっくりと曲がっていることから、磁束線の運動は可逆的であることがわかる。

### 4. まとめ

本研究では、簡易化された TDGL 方程式と AFI 数値積分法を用いて、数値計算を行い、量子化された磁束線を可視化する。磁束線が顕著な可逆運動するとき、理論的に予測された磁場侵入と同じ実験結果を観測した。

### 参考文献

1. T. Matsuno et al.: Journal of the Physical Society of Japan 89 (2020) 054006.
2. 松下照男:「磁束ピンニングと電磁現象」産業図書 (1995)

# MgB<sub>2</sub> 線材における 高調波磁界成分を重畳した外部印加回転磁界による交流損失の解析

## Analysis of AC losses in MgB<sub>2</sub> wires due to externally applied rotating magnetic fields with superimposed harmonic magnetic field components

河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)

KAWANO Ryosuke, TERA0 Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: kawano.ryosuke23@ae.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

航空機や船舶といった大型の輸送システムの電動化にあたっては超電導回転機の利用が注目されている。巻線に超電導材料を用いることで、高電流密度・強磁界発生という超電導の特性によって高出力密度を達成できる。一方で、電機子巻線を超電導化した場合には、交流磁界・交流電流の印加による交流損失の発生が問題となる。巻線設計においては交流損失の正確な推算が課題である。そのためには運転時に印加・通電される高調波の重畳した回転磁界の影響を考慮する必要がある。

本発表では、電機子巻線中の MgB<sub>2</sub> 超電導線材のフィラメントモデルに対し、高調波磁界成分を含む回転磁界を外部から印加した場合におけるヒステリシス損失の解析結果について報告する。

### 2. MgB<sub>2</sub> 線材の交流損失解析モデル

Fig. 1 及び Table 1 に今回の解析で用いた超電導線材のモデルを示す。ここでは、MgB<sub>2</sub> 超電導フィラメント 1 本をモデリングし、外部磁界として回転磁界を印加した。超電導体の電圧電流特性には  $n$  値モデルを用い、臨界電流密度は HyperTech 社が公開しているデータから冷却温度 20 K で 1 T の磁束密度を印加した場合のものを用いている[1]。支配方程式として超電導体領域では  $H$  法、真空(空気)領域では  $\varphi$  法を用い、磁束密度振幅や回転周波数をパラメータとして解析を行った。

### 3. 有限要素法によるヒステリシス損失解析

COMSOL Multiphysics®によって外部回転磁界を印加した際のヒステリシス損失の解析を行った。Fig. 2 に示すように基本波成分のみの印加時には、理論式[2]に基づく計算結果と解析結果が概ね一致し、ヒステリシス損失の値は磁束密度振幅の値に比例する。また、高調波成分を重畳した回転磁界の印加時には高調波成分の影響でヒステリシス損失の値が非線形に変化することが確認された。例として Fig. 3 に基本波成分と 30%の第 3 次高調波に対して、第 5 次高調波成分の重畳率と交流損失の関係を示す。重畳率 0.05 付近で一度極小値を取った後に損失が増加することが分かる。

### 4. まとめと今後の課題

MgB<sub>2</sub> 線材のフィラメントのモデリングを行い、外部回転磁界印加時の交流損失解析を行った。結果として交流損失の値が高調波成分の重畳に対して増加していく一方で、成分ごとの重畳条件によっては減少する場合があることも確認できた。今後は高調波成分が交流損失に与える影響の一般化を目指し、より詳細に考察・検証を行っていく。

### 参考文献

1. Hypertech Inc., MgB<sub>2</sub> and Nb<sub>3</sub>Sn brochure rev 10, Jun. 2019.
2. 野田稔ほか, 楢岡上回転横磁界中の超電導多芯線の交流損失, 低温工学, 21 巻, 6 号, pp.348-353, 1986.

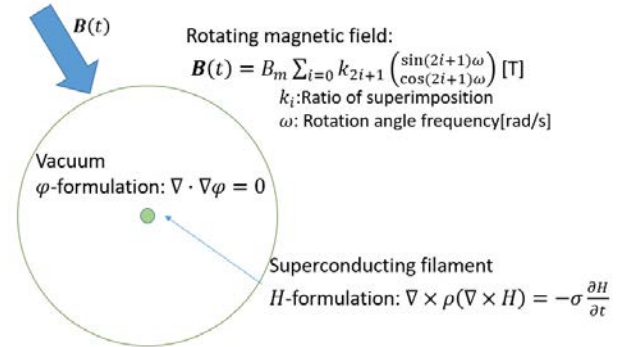


Fig. 1. Analysis model and method for a single filament of MgB<sub>2</sub> superconductor

Table 1. Analysis conditions

Table 1. Analysis conditions	
Filament radius	26.2 μm
Vacuum area radius	0.25 mm
Critical current density	3.15×10 <sup>9</sup> A/m <sup>2</sup>
$n$ value	25
Parameters	Amplitude of magnetic flux density: $B_m$ Rotation frequency: $f$

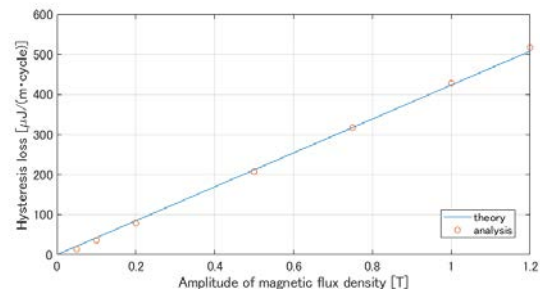


Fig. 2. Relation between the magnetic flux density  $B_m$  and hysteresis loss when applying fundamental rotating magnetic field

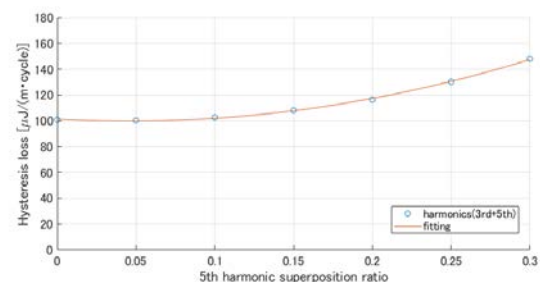


Fig. 3. Relationship between the 5th harmonic superposition ratio and hysteresis loss when the 3rd and 5th harmonics are superposed



# MgB<sub>2</sub> 多芯線で巻いた超電導コイルの回転磁界下での交流損失の数値解析

## Numerical analysis of AC losses in multifilament MgB<sub>2</sub> coils under a rotating magnetic field

奥村 皐月, 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

超電導回転機は従来の回転機に比べて高効率・高出力密度であることから、近年注目を集めている。特に航空機分野では二酸化炭素排出量のネットゼロを目指して電動化に向けた研究開発が盛んに行われている。全超電導回転機は電機子巻線と界磁巻線の両方に超電導線材が使用されている。そのため、回転磁界下における電機子巻線の電磁的特性を評価することが重要である。特に電機子巻線の交流損失特性は設計時に把握することが必要である。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ときの交流損失の数値解析を行っている。特に多芯構造を考慮した交流損失を評価可能なモデルを作成した。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<sup>[1]</sup>。本研究では交流損失の中でも大きな割合を占めるヒステリシス損失について扱う。

### 2. 解析手法とモデル

$H-\phi$ 法を使用して MgB<sub>2</sub> 線材の交流損失について解析を行った。解析条件のパラメータを Table 1 に示し、解析モデル形状を Fig. 1 に示す。MgB<sub>2</sub> 線材の周りには十分な空気領域を設けた。解析には COMSOL Multiphysics を用いた。印加回転磁束密度が 0.01 T, 0.1 T, 1.2 T の場合を調査し、多芯構造の影響を確認する。また、同条件において理論式から交流損失を求めた。単位体積当たりの交流損失の理論式は以下の式で与えられる<sup>[2]</sup>。

$$W_h = \frac{32}{3\pi} f \lambda B_m J_c r_f \Omega(\eta) \quad (1)$$

ここで  $f$  [Hz] は周波数、 $\lambda$  は超電導フィラメントの占積率、 $B_m$  [T] は最大印加磁束密度、 $J_c$  [A/m<sup>2</sup>] はフィラメントの臨界電流密度、 $r_f$  [m] は超電導フィラメント半径、 $\Omega(\eta)$  は回転磁界の周波数楕円率である。

### 3. 解析結果と考察

Fig. 2 に最大印加磁束密度 0.01 T の場合の磁束密度分布を示す。また、Fig. 3 に磁場を印加してから 2 秒以降の Fig. 1 の 2 点の磁束密度の時間変化を示す。最大印加磁束密度 0.01 T, 0.1 T, 1.2 T の場合、超電導遮蔽電流による磁界の振幅はそれぞれ約 0.021 T, 約 0.050 T, 約 0.055 T であった。0.01 T の場合は超電導遮蔽電流がフィラメント表面に流れているが、0.1 T と 1.2 T の場合は超電導遮蔽電流がフィラメント中心まで流れている。最大印加磁束密度が小さいほど超電導遮蔽電流による磁束密度の影響が大きくなる事が分かる。

また、Fig. 4 に磁場を印加してから 2 秒以降の交流損失の時間変化を示す。最大印加磁束密度が 0.1 T の場合と 1.2 T の場合はほぼ一定に推移しているが、0.01 T の場合は振動している。これは周囲のフィラメントに流れる超電導遮蔽電流が作る磁界が最大印加磁束密度に対して大きいからだと考えられる。

### 4. まとめと今後の展望

MgB<sub>2</sub> コイルを対象としてモデルを構築し、交流損失解析を行った。特に多芯線の影響について評価した。今後、3 次元モデルに拡張し、通電時の自己磁界の影響についても評価を行う。

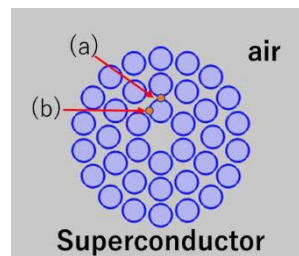


Fig. 1 Model built in COMSOL.

Table 1 Analysis conditions

Parts	Scale
$f$ [Hz]	0.156
$\lambda$	36
$B_m$ [T]	0.1, 1.2
$J_c$ [A/m <sup>2</sup> ]	$3.15 \times 10^9$
$r_f$ [m]	$26.2 \times 10^{-6}$
$\Omega(\eta)$	$\pi/4$

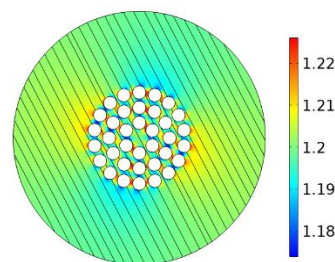


Fig. 2 Magnetic flux density distribution 7 seconds after the application of a rotating magnetic field.

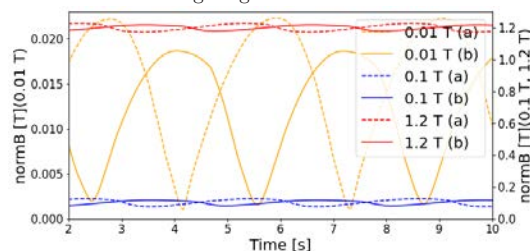


Fig. 3 Time dependence of magnetic flux density

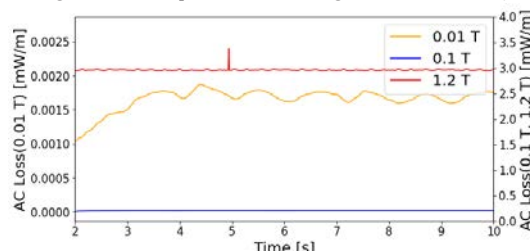


Fig. 4 Time dependence of AC loss

### 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.

# 大小 2 種類の REBCO ダブルパンケーキコイルを組み合わせた 電機子コイルの電流分流特性

## Current distribution characteristics of an armature coil composed of two types of racetrack double pancakes

高島 敦史, 宮崎 寛史(九州大学);川越 明史(鹿児島大学);

三浦 峻, 吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓(九州大学)

TAKASHIMA Atsushi, MIYAZAKI Hiroshi(Kyushu University);KAWAGOE Akifumi(Kagoshima University);

MIURA Shun, OSHIDA Koichi, SATOU Seiki, SASA Hiromasa, and IWAKUMA Masataka(Kyushu University)

E-mail: Takashima.atsushi.232@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

航空機の電動化に向けて、超伝導技術を用いたモータに注目が集まっており、国内外で研究が行われている。我々は電圧の制限と大電流化を実現する並列導体を用いた超伝導モータの開発を進めており、転位を用いて各電流の均流化を図っている。そこで、大小 2 つのダブルパンケーキコイルを組み合わせることで、正弦波に近い回転磁界を発生可能な電機子コイルを考案した[1]。大電流化を目的として、ダブルパンケーキコイルには転位並列導体を用いており、本発表では各線材に流れる電流を実験的に評価した結果について報告する。

### 2. 構造

本研究では高臨界電流密度特性を有する REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO) 線を2本束ねた並列導体コイルを作製した。しかし、並列導体の各電流はわずかなインダクタンス差で偏流を引き起こし、航空機用のモータにおいては電流容量の低下や回転磁界の偏りを招く。そこで我々は、並列導体の各電流の均流化のために、ダブルパンケーキコイルの最内層と各コイルの接合部で転位を施した。

加えて、巻線構造において分布巻きは正弦波に近い回転磁界を発生させることができ、モータの出力を向上できる。そこで本研究では分布巻きを做って大小2つのコイルを組み合わせて一つの極を構成し計 12 個のコイルで測定系を作製した。

### 3. 実験手順

本研究の電流分流測定系とコイル詳細を Fig.1 に示す。コイルのターン数は大小コイルどちらも 16 ターン×2 の計 32 ターンで作製し、電流分流の測定法はログスキーコイルを用いて行った。ログスキーコイルにおける電流値計算法や線材性能に関しては文献[1]に記載している。

### 4. 結果・考察

本研究では、界磁コイルは用いず、電機子コイルの各相に 120 度ずつ移送をずらして通電し、各線材に流れる電流を測定した。実際に 30A を 150Hz で印加した際の結果を Fig.2 に示す。各導体間の分流は約 10% に収まっており、転位によって均流化に近づいたことがわかる。しかし、理想的な完全な均流とはならなかった。以上の結果になった理由の考察としては、隣り合うコイルや対向した極間の受け渡し部など線材同士の間接合の際にインダクタンス差が生じた可能性が挙げられる。

### 5. まとめ

本研究では、REBCO超伝導線材を用いた転位並列導体コイルに三相交流を印加した際の電流分流を測定した。測定系は大小2種類のREBCOコイルを用いて分布巻きを模擬

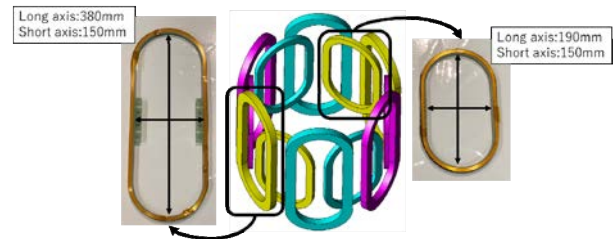


Fig. 1 schematic diagram of current distribution measurement armature coils and details of each coil.

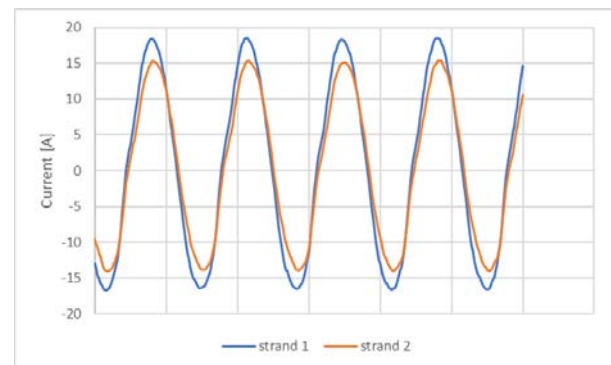


Fig.2 Current distribution of each strand when a 30A current flows in 150Hz through three-phase.

した電機子コイルを作製し、実証実験を行った。電流分流率としては10%程の差に収まっており、転位によって電流の均流化を実現することができた。しかし、実際の航空機用電機子コイルでは高い出力密度が必要であるため、この分流の差は電流容量の低下を引き起こす可能性があり、並列導体数もさらに増やす必要がある。そのため、今後はより良い転位方法を考えると共に、さらに並列導体数を増やした電機子コイルの作製や電流分流測定を行う。

### 参考文献

1. A. Takashima, et al.: Current Distribution of Armature Coils Combining Two Different Sizes of REBCO Racetrack Double Pancakes, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33 (2023)

# 積層超電導体と永久磁石による磁気軸受の電磁特性 Electromagnetic Characteristics of Magnetic Bearings Using Stacked Superconductors and Permanent Magnets

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 Univ.)

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

## 1. はじめに

モータ等の回転機における軸受は必要不可欠なコンポーネントである一方、機械的な接触が存在するために機械損の要因となる。この問題を解決するために磁気軸受が提案されており、さらに超電導体の磁束ピンニング力を使用すれば制御を行うことなく安定な浮上をする磁気軸受を実現できる可能性がある。現在バルク超電導体を使用した磁気軸受が複数提案されているが、近年は大型化や加工性の観点等から、超電導線材を積層させてバルクのように構成して使用することが検討されている[1, 2]。

本発表では、超電導線材をリング状に加工して永久磁石 (PM) と組み合わせた磁気軸受を構成し、回転特性実験等を行い考察した結果を報告する。

## 2. 積層超電導体の概要

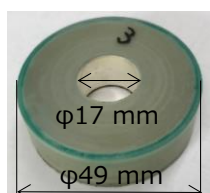
Table 1 及び Fig. 1 に、今回使用した超電導線材の諸元と使用する積層超電導体を示す。超電導線材は SuperOx Japan 製の 12 mm 幅の線材であり、300 A 以上の  $I_c$  を持つ線材である。これをリング状に巻いて加工し、FRP で補強して成型した積層超電導体 (Fig. 1 (a)) は、外直径 49 mm (超電導部分の外直径 46 mm) かつ内径 17 mm であり、比較実験として使用する YBCO バルク超電導体 (Fig. 1 (b)) とほぼサイズを合わせている。また次項での回転試験で磁気軸受を構成する場合、直径 15 mm、高さ 13 mm の円柱状 PM を使用する。

## 3. 回転試験による結果

Fig. 2 (a) に回転試験を行う実験装置の概要を示す。二つの磁気軸受の間には回転の際のトルクを与えるための模擬負荷が接続されている。これを DC モータによって一般的な発電機等の回転速度である 1800 rpm で回転させる。そして定常状態のあるタイミングにおいて磁気クラッチで、DC モータと回転系 (磁気軸受+模擬負荷) を切り離し、減衰する回転速度の波形から時定数を算出する。本試験では、PM1 が 1 個に対して積層超電導体 1 個、3 個及びバルク超電導体 1 個で一つの磁気軸受を構成し、試験を行った。さらに底部から回転中心

Table 1. Superconducting wire specifications.

Manufacturer	SuperOX Japan
Type	REBCO
Wire width	12 mm
Thickness	~0.1 mm
Critical current at 77 K, s.f.	> 300 A

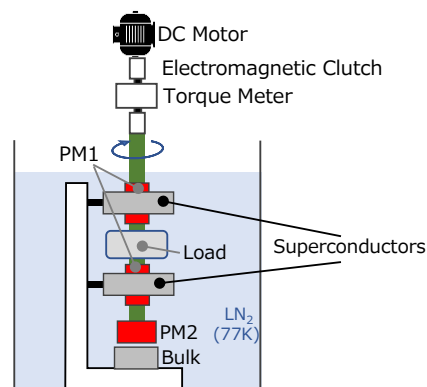


(a) Stacked  
(14 mm in height)

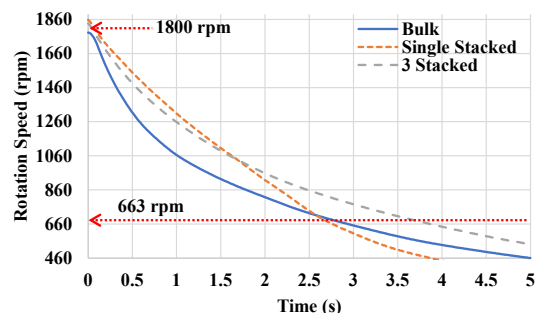


(b) Bulk  
(15.4 mm in height)

Fig. 1 Superconductors for the experiments



(a) Experimental setup



(b) Rotation speed as a function of time

Fig. 2. Experimental result of rotation characteristics

のブレを抑えるために、別途 PM2 とバルクを使用して底部で安定した磁気浮上系を構成している。

Fig. 2 (b) に、磁気軸受における定常回転からの減衰の様子を示す。磁気クラッチの切り離し時の回転速度 1800 rpm に対し、 $\pm 3\%$  程度の変動を許容している。1800 rpm から時定数 (1/e) となる速度約 663 rpm に到達する時間は、積層超電導体 1 個、3 個及びバルク超電導体 1 個でそれぞれ 2.75 s、3.85 s、2.92 s となり、積層超電導体を 3 つ使用することで、回転中における PM に働く電磁力が増して回転軸中心部でより安定し、バルク超電導体 1 個よりも安定な回転 (減衰時間が長い) が可能となる。

## 4. まとめと今後の課題

超電導線材をリング状に加工した積層超電導体と PM で磁気軸受を構成し、バルク超電導体と回転特性の比較を行った。積層超電導体を 3 個使用した場合にはバルク超電導体 1 個の場合よりも時定数は長くなり、より安定な回転を維持する磁気軸受として働くことが分かる。今後はさらに積層超電導体の直径を拡大した構造の磁気軸受を構成して試験を行い、大型化の可能性に関して考察していく。

## 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。

## 参考文献

1. A. Patel, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 9 (2018) 09LT01.
2. A. Patel, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3 (2015) pp. 1-5.

## 超電導磁気軸受における分割固定子リングのモデリングと 損失特性への影響

### Modeling of a Segmented Stator Ring of Superconducting Magnetic Bearings and its Effect on Loss Characteristics

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, TERAU 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)は高温超電導体からなる固定子と永久磁石からなる回転子によって構成される装置である。磁束ピン止め効果によって機械的に非接触な状態での浮上・回転が可能であり、低損失、長寿命、省メンテナンス性という特徴を持つことから、フライホイールや人工衛星搭載用軸受[1]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。そのため、分割構造と回転損失を含む電磁的特性の関係を解明し、構造の最適化を行う必要がある。そこで本研究では、3次元電磁界数値解析を行い、SMB における分割固定子の構造と、回転損失の原因の1つである磁界の不均一性( $\Delta B$ )の関係につい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 モデルの構成を 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 かけてギャップ長 3 mm まで変化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

Fig. 1(b)における Air Gap の大きさと、内側鉄ヨークの底面中央における不均一磁界の分布の関係性について解析した結果を Fig. 2 に示す。縦軸は磁束密度、横軸は SMB モデルの周方向角度を表している。両端のピークの平均値と中央付近の最小値の差を  $\Delta B$  と定義すると、その値はギャップ長が 2, 4, 10 mm の時、それぞれ 156, 166, 175 mT となった。このことから、分割固定子間のギャップが大きくなるにつれて、回転子側の底面にあらわれる磁場の不均一性も大きくなることが分かった。この磁場は浮上力を発生させる超電導電流が作る磁場であり、その不均一性の増加は回転動作時における損失の増加に寄与すると考えられる。

#### 参考文献

1. Y. Sakurai, et al.: Proc. SPIE 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX; 107080E (2018)

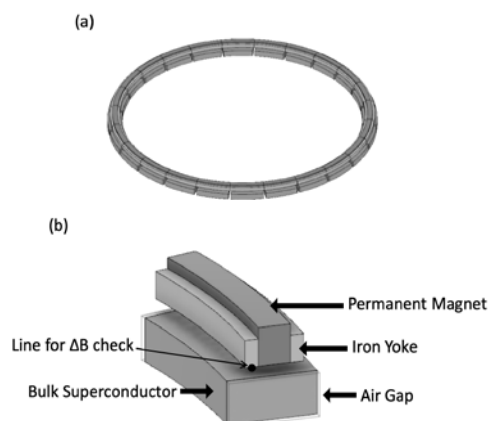


Fig. 1 (a)Overview of SMB, (b) 1/24 model of the SMB for numerical analysis.

Table 1. Specifications of analyzed SMB model.

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
$J_c$	$3.30 \times 10^8$ A/m <sup>2</sup>
$n$	21
Constant of Kim model $B_0$	0.35

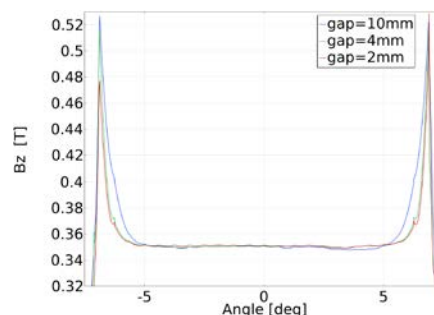


Fig. 2 Distribution of  $\Delta B$  for different gap distances.

# 大型 SMES 磁石応用への大電流容量 MgB<sub>2</sub> 導体開発

## Development of Large Current Capacity MgB<sub>2</sub> Conductors as a Potential Application of Large-Scale SMES Magnets

谷貝 剛, 高橋 雅史, 高尾 智明 (上智大); 新富 孝和, 榎田 康博 (KEK); 駒込 敏弘(前川製作所); 平野 直樹 (NIFS); 濱島 高太郎(東北大); 菊池 章弘, 西島 元, 松本 明善(NIMS)

YAGAI Tsuyoshi, TAKAHASHI Masafumi, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); SHINTOMI Takakazu, MAKIDA Yasuhiro (KEK); KOMAGOME Toshihiro(Mayekawa MFG); HIRANO Naoki (NIFS); HAMAJIMA Takataro (Tohoku University); KIKUCHI Akihiko, NISHIJIMA Gen and MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

2001 年 MgB<sub>2</sub> の発見とその後の線材開発にともなって、20 K 程度の冷却温度を想定した SMES の開発研究がなされるようになった。近年の地球温暖化対策のため、電力エネルギー部門の低炭素化も急務となっており、太陽光・風力発電の導入容量が増加している。これらは天候に左右される電源であり、半導体スイッチングデバイス増加による系統慣性力の低下の現状、さらに需要家側の太陽光発電固定買い取り制度 FIT 終了の背景もあり、電力貯蔵装置の役割は年々注目度を増している。繰り返し充放電で劣化がさげられない 2 次電池と比較して、長寿命・容量劣化の心配がない SMES の貯蔵装置としてのポテンシャルは、液体水素サプライチェーンの発展に伴って注目を集めつつある。

そこで本グループでは先進超電導電力変換システム ASPCS (Advanced Superconducting Power Conditioning System) を提案し、10 kJ クラスの Bi2223 SMES コイルを設計・製作して、再生可能エネルギー由来の不安定な直流電力のうち、時定数 1sec 以下の高速変動分の補償を行って不安定な出力電圧の安定化実証を行い、その有用性を証明した[1]。液体水素間接冷却を導入したこの装置をさらに発展させるため、100 MJ 級の SMES コイルに必要とされる kA 級導体を設計・試作し、30 kJ クラス MgB<sub>2</sub> SMES コイルで同様の実証を行って、MgB<sub>2</sub> 大型 SMES コイルの実現可能性を示す事を目的に開発研究を行った。

### 2. kA 級導体の開発

これまでの R&D を通して、当初設計例としては貯蔵エネルギー 50 MJ、出力 1 MW の SMES の定格電流が 2.2 kA、最大電圧は 1 kV に設定した。MgB<sub>2</sub> 素線の臨界電流(I<sub>c</sub>)は、20 K、2 T で 100 ~150 A 程度であり、kA 級の導体を得るには撚線導体の開発が不可欠である。A15 線材同様に曲げ歪みによる劣化が顕著な MgB<sub>2</sub> 素線を用いた導体構成は、導体撚り線加工後に熱処理を施すリアクト&ワインド(R&W)法適用も考慮し、ダブルパンケーキ(DP)コイル巻き線時の曲げ歪みを小さくできる、平角形状のラザフォード導体を採用した。MRI 応用を想定したラザフォード導体開発で先行する研究グループが、パ

ッキングファクター向上のために行った導体圧縮によって、I<sub>c</sub> がむしろ向上した報告も参考にしている[2]。

実証を目指す 30 kJ 容量の SMES には、容器制約で決まる外径 600 mm 程度の DP を想定すると、曲げ歪みが許容値である熱処理後 0.24 %以内となる内径は 400 mm となった。この場合インダクタンスから算出される容量を目標値にするには、DP が 5 個必要である。導体の定格は 600 A だが、設計では素線 I<sub>c</sub>劣化を考慮して 1.2 kA とした。この場合の必要素線数は、大雑把に 8~13 本となる。具体的な本数は、導体を構成する全素線が断熱条件で常伝導転位した場合、素線内の銅が電流を担って発熱しても、導体全体が 300 K 以下となるように決める。銅に流れる電流が、クエンチ検出時間 t<sub>d</sub>、外部保護抵抗とコイルのインダクタンスで決まる時定数 τ で指数関数的に減衰したとすると、導体内の銅に流すことができる最大電流密度 J<sub>0</sub> は次のように表せる

$$J_0 = \sqrt{\frac{1}{(t_d + \tau/2)} \frac{A_{all}}{A_{Cu}} \int_{20}^{300} \frac{\gamma_{Cu} C_{Cu}(T)}{\rho_{Cu}(T)} dT} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、A<sub>all</sub>, A<sub>Cu</sub> は各々全ての素線断面積、および銅の断面積であり、γ<sub>Cu</sub> C<sub>Cu</sub>(T) は銅の熱容量、ρ<sub>Cu</sub>(T) は銅の抵抗率である。例えば MgB<sub>2</sub>/Cu 比=0.17/0.12 を持つ直径 0.83 mm の Hyper Tech 社製の場合、t<sub>d</sub>, τ を各々 0.5, 1 sec とした場合は約 1.3 GA/m<sup>2</sup> となる。上記最大定格を満足する超電導 I<sub>c</sub> を得るための素線数は、20 K, 2 T では 8 本だが、銅だけでは(1)式より約 650 A が限界である。上記最大定格 I<sub>c</sub> に耐えるため、真鍮線を入れて銅比を増やし、さらにワインド&リアクト(W&R)法の場合、熱処理後の曲げ加工がなければ導体コア材として銅マンドレル導入で見かけ上銅比を増やせる。一方銅比の高い素線を選択すると銅マンドレルが不要で、巻き半径方向に薄い導体になり、R&W 法で DP コイル製作が可能となる。本プロジェクトでは、さらなる大容量化を見据えて W&R, R&W 両方を導入してコイル製作を行い、特性を比較することで大容量 SMES に最適な製作手法の確立も目指している。銅比の高い素線も用いた DP 用導体断面構造を Fig. 1 に示す。DP1 は MgB<sub>2</sub> 8 本+CuNi 4 本に銅マンドレル、DP2 は銅比 0.2 の MgB<sub>2</sub> 線 10 本、DP3 は、銅比 0.17 の素線 12 本となった。

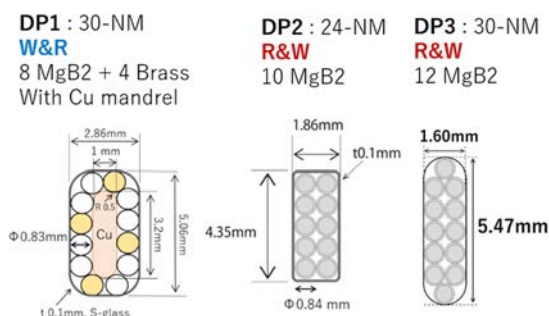


Fig. 1 Schematic drawing of the cross sections of the designed Rutherford cables with Hyper Tech MgB<sub>2</sub> strands.

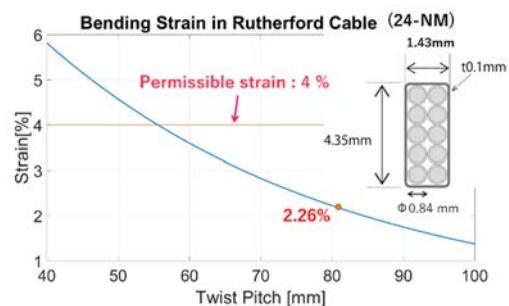


Fig. 2 Maximum strain vs. twist pitch in the conductor for DP2 R&W coil.

3. 撚りピッチに対する素線歪み評価

空間曲線理論を導入すると、撚り線加工およびコイル巻き線時の素線歪みの分布を評価できる。3次元曲線軌道C上における素線曲げ半径 $\rho$ は、

$$\frac{1}{\rho(x,y,z)} = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dc^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dc^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dc^2}\right)^2} \dots\dots\dots(2)$$

となるため、素線内部フィラメントの最大半径 $r_f$ を用いると、素線の歪み $\varepsilon(x,y,z)$ は

$$\varepsilon(x,y,z) = \frac{r_f}{\rho(x,y,z)} \times 100 [\%] \dots\dots\dots(3)$$

式(3)を用いる事で、素線歪みの詳細な3次元分布が得られる。Fig. 2は、銅比0.2の素線を用いて設計したR&W 導体について、様々な撚りピッチに対する素線最大歪みの計算結果である。熱処理前の許容値4%より歪みが小さくなる撚りピッチ、かつ撚り線導体の設定仕様から82 mmを選定した。設計結果をまとめると、Fig. 1のDP1, 2, 3用導体として、各々撚りピッチが58 mm, 82 mm, 82 mmと決まった。

4. 導体  $I_c$  の評価試験結果

Fig. 3は、DP3用導体設計において、数種の撚りピッチで製作され、素線に異なる曲げ歪みが印加された試作導体について、導体のまま、および撚り解して直線にした素線の  $I_c$  を、無加工の素線  $I_c$  と比較した結果である。測定は4.2 K, 5 Tで実施した。両ケースともに曲げ歪み4%で劣化しておりメーカーの仕様通りだが、それより小さくても、撚り解し線で-12%、導体のままで-28%の劣化が確認された。小型コイルによる試験でも同様の結果であった。導体・コイル  $I_c$  劣化は、曲げ歪みだけで決まらない事が明らかになった。

5. 素線  $I_c$  劣化の検討

導体製作には、硬いNi合金を最外層に有するMgB<sub>2</sub>線のまとまりを確保し、解れない導体とするため、撚り線工程で断面圧縮を印加する。そのため、素線が凹む部位が多数見られた。詳細な調査のため凹み部についてX線CT観察を行った結果をFig.4に示す。左右2列の画像は、左が熱処理前、右が熱処理後である。18本ある黒いフィラメント領域を覆うNbバリアが破れており、熱処理後は漏れたMg粉とコアの銅が反応して、別の物質が生成されているように見える。EPMAによる成分分析ではMgCu<sub>2</sub>の生成が確認され、正味のMgB<sub>2</sub>減少が  $I_c$  の劣化の原因と考えられる。

6. 素線の変形と  $I_c$  の関係

導体圧縮による凹みと  $I_c$  劣化割合の相関を調査するため、異なる曲げ歪みの撚りピッチ58 mm, 82 mmに相当する交差角22 deg, 14 degで直線・無加工の素線を重ね、任意の凹みを加えて  $I_c$  測定を行った。その結果がFig. 5である。交差角に対する明確な依存性は確認されないが、凹み量の増大に従って  $I_c$  が線形に減少していることが分かる。凹みの印加によって、元の直径の80%程度まで変形すると、凹みのない素線  $I_c$  の約50~60%まで劣化している事が確認された。Hyper

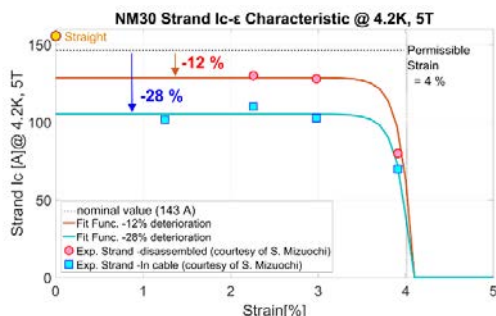


Fig. 3 Test results of  $I_c$  of strands exposed to various bending strains.

Tech 社の素線の MgB<sub>2</sub> 前駆体粉を覆う Nb のバリアは、板を曲げて粉を乗せた後に円形になるよう開放端をラップさせて閉じる、Continuous Tube Filling and Forming (CTFF)法で製作されるため、バリアのラップ部が変形によって開き易い事が原因と考えられた。

そこでシームレスのNbチューブ管をバリア材に適用し、かつ同じフィラメント数・同じ直径のSamDong社の素線を用いて同様に凹み対  $I_c$  特性を測定したところ、凹み量0.3 mmでも劣化していないことが確認された。 $I_c$ 劣化を最小限にする素線の機械強度が重要である事が確認された。

7. まとめ

不安定な再生可能エネルギー由来電力の高速変動分のBi2223線材SMESシステムでの安定化実証に続き、水素社会との整合性がある液体水素冷却MgB<sub>2</sub> SMESシステムの開発を目的に、大容量のラザフォード導体およびコイルの開発を進めてきた。大型の撚り線導体では、熱処理の前後でMgB<sub>2</sub>の許容曲げ歪み以内で微分幾何学に基づく空間曲線理論を適用して設計・試作を行い、さらに小型のコイル製作および試験でその性能を評価した。その結果、導体製作で生じた曲げ歪みで説明できない劣化がコイル性能を決める事がわかり、導体製作工程で加わる  $I_c$ 劣化要因を調査した。撚り線導体で生じる素線の凹みを意図的に与える事で劣化が生じる事が判明したため、素線内部構造や組織検査を行った。MgB<sub>2</sub>前駆体粉を収めるNbバリアが素線の変形によって破れ、熱処理時に他の金属と反応して相対的なMgB<sub>2</sub>生成量の減少が生じ、劣化すると推測された。この現象には、製造方法の違いに対する依存性も認められたため、大型導体設計では、曲げ歪み感受性だけでなく、素線製造方法に適した制御する加工工程が重要である事がわかった。

参考文献

1. Y. Makida, et al., IOP Conf. Series: Materials Sci. Eng., vol. 101 (2015) 012028.
2. L. Kopera, et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 30 (2017) 015002.

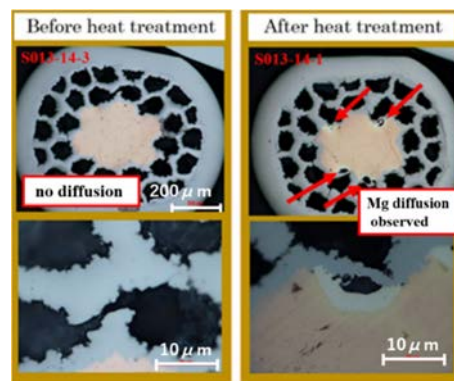


Fig. 4 Observation of broken Nb barrier with X-ray CT.

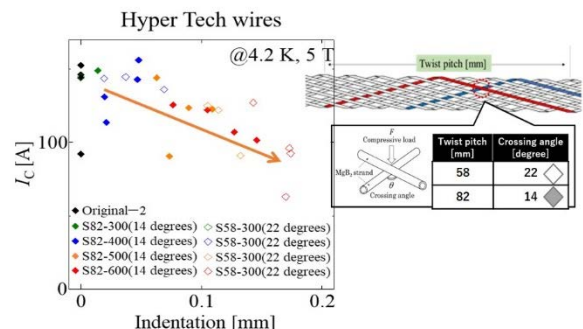


Fig. 5  $I_c$  dependence on dimple depth of Hyper Tech wires.

# 液体水素浸漬冷却下における REBCO 界磁コイルの励磁試験結果

## Excitation test results of REBCO filed coils immersed in liquid hydrogen

大屋 正義(関学); 殿岡 俊, 三浦 英明, 小畑 慶人(三菱電機);  
寺尾 悠(東大); 白井 康之(京大); 小林 弘明, 岡井 敬一(JAXA)

Masayoshi OHYA (Kwansei Univ.); Shun TONOOKA, Hideaki MIURA, Keito OBATA (Mitsubishi Electric);  
Yutaka TERAO (Univ. of Tokyo); Yasuyuki SHIRAI (Kyoto Univ.); Hiroaki KOBAYASHI, Keiichi OKAI (JAXA)  
E-mail: Masayoshi-Ohya@kwansei.ac.jp

### 1. はじめに

NEDO 先導研究において、液体水素の冷却を活用した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、蒸発したガスで常電導電機子を冷却した後水素ガスタービンに送って発電するシステムの構築を目指す[1]。本プロジェクトでは、10 kW 級の発電デモ機を設計・製作し、JAXA の能代ロケット試験場において水素給排下で回転励磁検証を行う予定である[2]。本報では、デモ機向け試作レーストラックコイルの液体水素浸漬冷却下励磁試験結果について報告する。

### 2. コイル諸元

液体水素冷却高温超電導発電デモ機(10 kW 級、1,800 rpm、4 極)の設計検討を行い[3]、界磁コイルの第一次設計案をまとめた。コイル 1 極分の諸元を表 1 に示す。50 ターンのシングルパンケーキコイル 2 枚を重ねてダブルパンケーキコイルとし、ステンレス製のコイルケースに挿入して補強した。3 枚のダブルパンケーキコイルを重ねて 1 極分の界磁コイルを組み立てた。直線部の長さは 200 mm、定格電流値は 100 A である。

2022 年度は、液体水素浸漬冷却下で限界通電特性を検証するため、2 極分のコイルを試作した(図 1 参照)。能代ロケット試験場の 500 A 直流電源を用いるため、SuperOx Japan 社に低  $I_c$  線材(4 mm、 $I_c < 50$  A@77 K, s.f.)を発注して使用した。基板厚は 30  $\mu\text{m}$ 、銅メッキ厚は 10  $\mu\text{m}$  である。

### 3. 通電試験結果

液体水素中で通電試験を行う前に、液体窒素中でダブルパンケーキコイル単体および 2 極コイル組立後の  $I$ - $V$  特性を測定した。図 2 は 2 極コイルの通電試験結果であり、電流のスweepレートは 0.1 A/s である。14 A 付近からコイル①の電圧が立ち上がり、15.5 A で 0.5 mV の電圧が発生した。本結果は使用した線材の  $I_c$  特性を考慮すると妥当な結果である。

20 K の飽和液体水素浸漬冷却下において実施した通電試験結果を図 3 に示す。電流のスweepレートは 0.2 A/s である。180 A 付近からコイル③の電圧上昇が確認され、190 A 通電時に最大 0.75 mV の電圧が発生したが、熱暴走することなく安定に通電を継続できることを確認し、試験を終了した。

上記試験終了後にコイル③の  $I$ - $V$  特性を液体窒素中で再測定したが、試験前後で特性の変化は確認されなかった。液体水素中で、コイル①ではなくコイル③の電圧上昇が確認された原因については、現在線材メーカーも含めて線材出荷試験方法を議論中である。

### 4. まとめ

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。2022年度は、低 $I_c$ 線材を用いて2極コイルを試作し、液体水素浸漬冷却下で限界通電特性を検証した。液体水素冷却下では、液体窒素冷却下とは異なるダブルパンケーキコイルで電圧が発生する現象が確認されたが、コイルの劣化が原因ではなく、線材メーカーも含めて線材出荷試験方法を議論中である。

Table 1 Specifications of test coil (1 pole)

Width of REBCO wire	4 mm
Effective length of double pancake coil	200 mm
Turn number of double pancake coil	100
Number of double pancake coils	3
Rated current	100 A

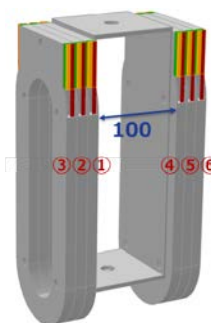


Fig.1 Illustration of test coil (2 pole)

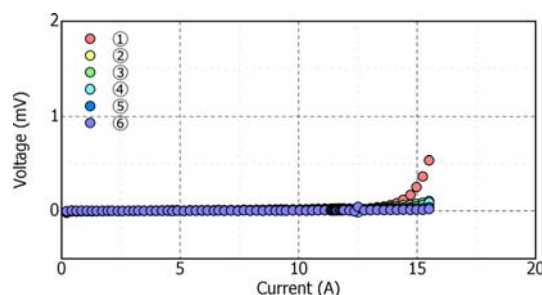


Fig.2 Excitation test result of test coil immersed in LN2

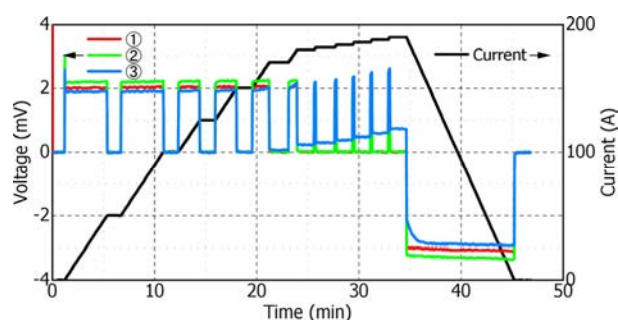


Fig.3 Excitation test result of test coil immersed in LH2

### 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. Y. Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1 (2020) pp. 44-52
2. M. Ohya et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 104 (2022) 1A-p02
3. Y. Terao et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 104 (2022) 1A-p03

## 空芯型 REBCO 誘導電動機用回転子の特性評価

## Evaluation of the properties of REBCO rotors for induction motors with air core

鳥居 龍ノ介, 中川 心平, 川越 明史 (鹿児島大学); 三浦 竣, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九州大学)  
 RYUNOSUKE Torii, SHINPEI Nakagawa, AKIFUMI Kawagoe (Kagoshima University); SHUN Miura, HIROSHI Miyazaki,  
 MASATAKA Iwakuma (Kyusyu University)  
 E-mail: k1651011@kadai.jp

## 1. はじめに

電動航空機を実現するためには、推進システムの軽量化が必要である。液体窒素温度で利用可能な REBCO 線材を用いれば、常電動機では不可能な軽量・高効率な電気推進システムが実現できると期待されている。

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特性を評価し、最適設計を行うためには、まず、空芯の超伝導回転子に流れる誘導電流の評価方法を確立することが重要である。そのために本研究では、回転磁界にさらされた回転子に流れる誘導電流をピックアップコイルで測定する実験装置を開発した。本実験で用いるピックアップコイルで回転子電流が測定できるかどうかを実験的に検証した。

## 2. 実験方法

実際の電動機では回転子が回転しているものの、経験する磁界はすべり周波数の回転磁界である。回転子の誘導電流の特性を調べるには、回転子が固定した状態で回転磁界を印加する状態でも十分である。今回は、回転子を固定して回転磁界を印加した。この周波数がすべり周波数に相当する。直径 120mm の空芯のサンプル空間に、常伝導プレート線材で作製したカゴ型回転子サンプルを配置した。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することによって、回転子に流れる電流を定量的に評価できる。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。今回の測定では、5 ~ 500Hz まで変化させた。また、回転磁界の大きさは 5.15Gauss とした。

本実験では、使用した円筒形状ピックアップで磁気モーメントを正確に測定できることを確認するため、常伝導回転子を用いて実験した。回転子サンプルは、直径 81mm、長さ 155mm である。ローターバー 6 本とした。また、ピックアップコイルは直径 88.5mm で、長さは、U、V、W 相それぞれが 70mm、75mm、65mm である。ターン数は 30 ターンである。使用したピックアップコイルの検出率は 0.5 になるように設計している。実験で確かめたい主な点は、この検出率が 0.5 かどうかである。

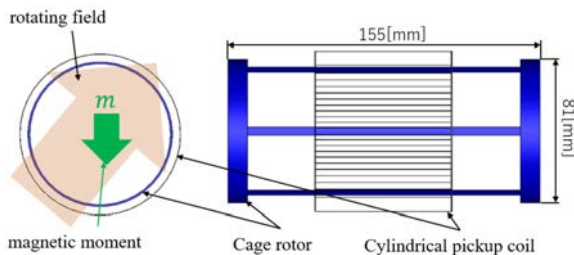


Fig.1 Set up of pick-up coil with round cross-section and the squirrel cage type rotor sample. Three pick-up coils were mounted to measure three direction components of magnetic moments due to induced currents in the rotor.

## 3. 実験結果

回転子がある場合とない場合で測定し、回転子ありの測定磁束を回転子なしの測定磁束で規格化した規格化磁束の周波数依存性を Fig.2 に示す。縦軸が規格化磁束で、横軸が周波数である。50Hz 付近から低下し始めて、500Hz 付近では飽和する傾向が見られる。

この結果を評価するために、以下の式で表せる理論曲線を実線で示している。この理論式には、本ピックアップコイルの検出率が 0.5 であることを考慮している。

$$\frac{\Phi_{\text{prf}} - \Phi_p}{\Phi_{\text{prf}}} = 1 - \frac{3\pi r_s^2 L_p}{8r_p^2} \cdot \frac{\mu_0}{L_{\text{si}}} \cdot \frac{j\omega t}{1 + j\omega t} \quad (1)$$

ここで、 $F_{\text{prf}}$  は回転磁界による鎖交磁束、 $F_p$  は回転子による鎖交磁束である。 $r_s$  と  $r_p$  は、それぞれ回転子とピックアップコイルの半径である。 $L_{\text{si}}$  は回転子の自己インダクタンスである。 $t$  は、回転子の減衰時定数である。実験結果と理論曲線はよく一致している。このことから、本ピックアップコイルの係数が 0.5 であることが確かめられた。

## 4. まとめ

本研究では、円筒形状ピックアップコイルを用いて、回転子の作り出す磁気モーメントの測定を行った。その結果、理論曲線と一致する結果を得ることが出来た。このことより、回転磁界中の回転子の磁気モーメント測定ができることがわかった。今後は、測定された磁気モーメントから、回転子に流れている電流を算出し、超伝導回転子の特性を定量的に評価する予定である。

## 参考文献

[1] K. Ozaki, et al.: IEEE Appl. Supercond., Vol. 30, No. 4 (2020) 8984315

## 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す。

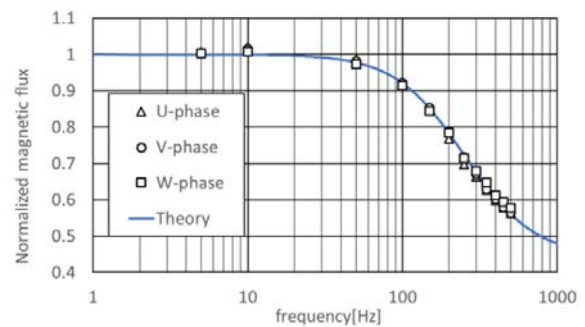


Fig. 2 Frequency dependences of magnetic flux linked to the pick-up coils with round cross-section under rotating magnetic fields. Three plots represent three components of magnetic flux, U, V, and W. The solid line is the theoretical curve.



# 電機子コイルにおける $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 並列導体の 素線間電流分流の簡易解析手法

## Simplified Analytical Method for Current Distribution among Multi-strand $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ -Parallel Conductors in Armature Coils

三浦 峻, 公文 麻人, 増田 陽平, 中村 一稀, 宮崎 寛史(九大); 川越 明史(鹿児島大);  
吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓(九大)

MIURA Shun, KOBUN Asato, MASUDA Yohei, NAKAMURA Kazuki, MIYAZAKI Hiroshi (Kyushu Univ.); KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.); YOSHIDA Koichi, SATO Seiki, SASA Hiromasa, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)  
E-mail: miura@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は全超伝導回転機における電機子コイルの大電流容量化を実現するため、複数の  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO)超伝導テープ線材で構成する転位並列導体を提案している。本研究では、電機子コイルにおける並列導体の素線間の電流分流を簡易に計算する解析手法を開発し、また実験との比較により、その妥当性を明らかにすることを目的とした。本手法により、コイルの設計の際に素線間の電流分布を簡易に計算できるようになり、また均一な電流を得る転位の配置・構成を容易に調べられる。

### 2. 解析方法および実験方法

解析的手法により各素線の鎖交磁束数を計算し、インダクタンス成分のみを考慮し、素線間における電流分流を計算した。磁界分布の計算では、巻き線分布を円周方向に沿ってフーリエ級数で表現し、円柱座標系における磁界  $H$  のスカラーポテンシャルのラプラス方程式を解いた。解析式の詳細は参考文献 1. において報告しており、また当日報告する。

Fig. 1 に実験のセットアップを示す。サンプルコイルとして、厚さ方向に 2 枚の REBCO 線材を重ねて巻き線したレーストラック型のダブルパンケーキ巻きコイルを用意した。ターン数は 16-48 ターン/コイルで、同じターン数のコイルをそれぞれ 2 個用意した。図のように 2 極機における単相(U と U'相)の電機子コイルの配置を想定し、2 個のコイルを対向して配置した。各素線はポリイミドテープで絶縁され、電極部でのみ素線間を接続した。交流電流  $10 \text{ A}_{\text{peak}}$  で通電し、液体窒素中におけるサンプルコイルの各素線の電流をログスキーコイルで測定した。

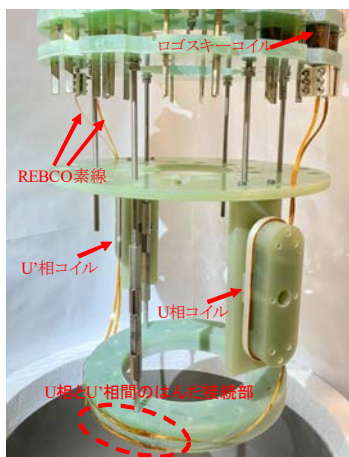


Fig. 1 Experimental setup of the measurement.

### 3. 結果及び考察

Fig. 2 に 2 本並列導体サンプルコイルの電流分流率のコイルターン数依存性を示す。U と U'相の間で素線それぞれを単独で接続し(Fig.1 の赤の破線部分)、コイル内側(外側)の素線同士を接続する場合は転位なし(No-trans.)とした。また内側素線と外側素線を入れ替えて接続する場合は転位あり(Trans.)とした。Fig. 2 における実線で示す解析により予測した電流分流率は、プロットで示す実測値と概ね一致した。今回の実験の範囲内では、48 ターンの No-trans.において、解析値と実測値に最大の乖離があり、その値は約 10%であった。乖離の理由として、解析モデルと実際の巻き線配置の違い、素線内の電流分布を考慮に入れていない点、実験誤差等が主に考えられる。実験誤差として、ログスキーコイルの測定誤差、およびサンプルコイルの製作の均一性を評価した。製作の均一性は、同じターン数のコイル単体の電流分流率を比較し、その差異を評価した。その結果、実験誤差は 1-2%程度であり、実験誤差を除けば 10%以内で予測できており、本解析手法は妥当な手法と考えられる。

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(21K14144)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. S. Miura *et al.*: Supercond. Sci. Technol. *Accepted* (2023), DOI: 10.1088/1361-6668/acca4f.

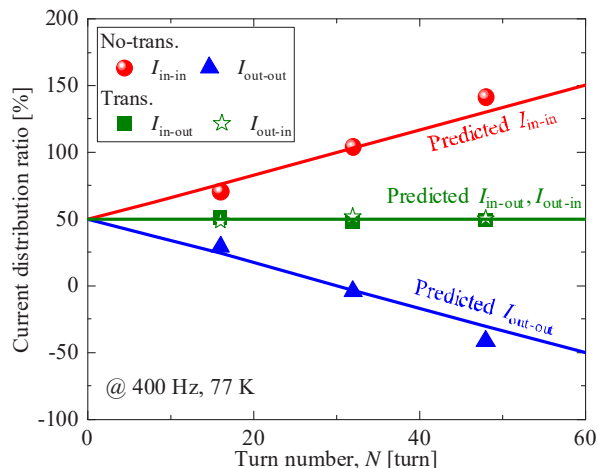


Fig. 2 Turn number dependence of the current distribution ratios under a frequency of 400 Hz in the single-phase coils connected with the no-transposition or transposition connection.

# 高温超電導バルク/コイルで構成される超電導磁気軸受の希薄ガスヘリウムによる冷却特性：数値解析による熱負荷評価

## Cooling characteristics of Helium Gas at Low Pressure in Superconducting Magnetic Bearings: Thermal Load Evaluation by Numerical Analysis

宮崎 佳樹, 山下 知久, 坂本 泰明, 富田 優(鉄道総研)

MIYAZAKI Yoshiki, YAMASHITA Tomohisa, SAKAMOTO Yasuaki, TOMITA Masaru (RTRI)  
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

### 1. はじめに

高温超電導バルク/コイルで構成される超電導磁気軸受[1] (SMB)では、内槽容器に格納された超電導コイルは冷凍機により伝導冷却される(Fig.1)。一方、断熱回転軸に搭載される超電導バルクは浮上・回転するため、冷凍機などで直接冷却できない。そこで超電導バルクを冷却するため、10Pa 程度の希薄ガスヘリウム[2]を内槽容器に封入している。本研究では、希薄ガスヘリウムを考慮した SMB の熱回路網モデルを構築し、冷却過程を実験結果と比較することで、希薄ガスヘリウムの冷却特性と、各部の熱負荷を評価した結果を報告する。

### 2. SMB の熱回路網モデル

Fig.1 には SMB 構成部材の熱伝導、ふく射ならびに、希薄ガスヘリウムによる熱伝導を考慮した熱回路網を示す。モデル化にあたっては、断熱回転軸や断熱荷重支持材、超電導コイル/バルク、内槽容器に付属する伝熱フレキ、パワーリードなどの部材の熱伝導と、各部のふく射伝熱を考慮した。希薄ガスヘリウムによる伝熱は温度依存性を考慮し、断熱回転軸およびベローズ空間①②、超電導バルクの冷却にかかわる経路(超電導バルク/超電導コイル③、超電導バルク/内槽上部④)、超電導コイルと内槽上部⑤、内槽下部⑥などについてモデル化した。さらに、超電導コイル/バルク間③やコンフラットを接続する伝熱フレキ(アルミプレート間)の狭隘部⑦では自由分子条件における圧力依存性を考慮した。

### 3. 冷却試験結果

希薄ガスヘリウムを内槽に封入しない場合と封入した場合について冷却試験を行った。希薄ガスヘリウムを封入しない場合の冷却プロファイルについて、Fig.2 に試験結果と数値解析結果を示す。希薄ガスヘリウムを内槽に封入しない場合、銅部材などで構成される超電導コイルの温度は、冷凍機コイルヘッド温度の低下とともに速やかに低下している。一方、内槽容器の温度低下速度が遅いのは SUS 材であること、超電導コイルより質量が大きいことなどが影響していると考えている。また、超電導バルクは冷凍機と直接的には接続していないため、主にふく射により 100K 程度まで冷却される。これらの構成部材の伝熱特性を考慮した数値解析結果は、超電導コイル、バルクの冷却プロファイルにやや違いが見られるものの、全体的なトレンドや最低到達温度については実験結果と概ね一致することが確認できた。そこで、次に希薄ガスヘリウムの伝熱特性を考慮したモデル化を行った。

Fig.3 に、希薄ガスヘリウムを内槽に封入した場合の実験結果と数値解析結果を示す。希薄ガスヘリウムを内槽に封入した場合、超電導コイルの温度低下は Fig.2 に比べて緩やかになっている。内槽内に希薄ガスヘリウムがあることで、内槽と超電導コイルやコンフラットなどの熱的な結合が強まったためと考えられる。超電導バルクや内槽についても希薄ガスヘリウムにより冷却が促進され、最低到達温度は Fig.2 よりも低下していることがわかる。希薄ガスヘリウムの伝熱特性を考慮した数値解析においても、これらの実験結果が概ね再現できており、SMB の設計ツールとしての熱回路網モデルを構築することができたと考えている。

### 4. まとめ

希薄ガスヘリウムを考慮した SMB の熱回路網モデルを構築し、冷却過程を実験結果と比較検証した。発表当日は、断熱回転軸、断熱荷重支持材を高剛性化した場合の比較ならびに熱負荷評価についても報告する。

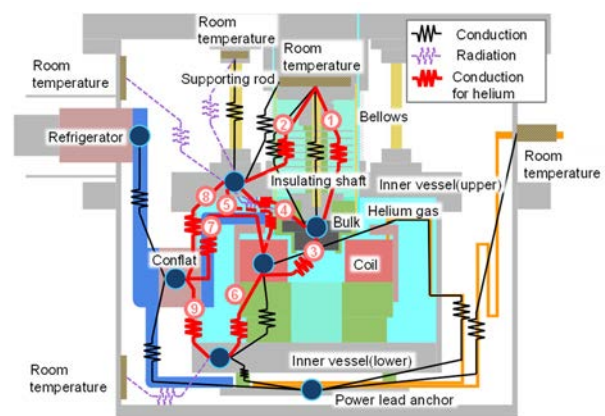


Fig. 1 SMB schematic drawing and thermal network model.

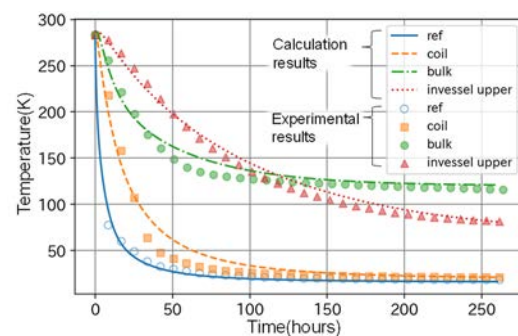


Fig. 2 Cooling profile of SMB without helium gas.

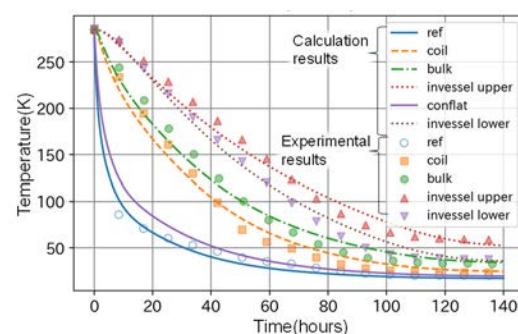


Fig. 3 Cooling profile of SMB with helium gas.

### 参考文献

- [1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, **104** (2022) 168
- [2] Y.Tanaka. et.al, Physica C 469 (2009) **1862-1865**.

## 核融合原型炉の超伝導 TF コイル設計検討の進捗 Progress on Superconducting TF Coil Design of JA DEMO

宇藤 裕康, 坂本 宜照 (量研機構); 三浦 英明, 荒川 仁, 越前谷 大介, 松田 拓也, 長谷川 満, 野元 一宏 (三菱電機); 伴野 信哉 (物材機構); 谷貝 剛 (上智大); 杉本 昌弘 (古河電工); 西嶋 茂宏 (福井工大)  
 UTOH Hiroyasu, SAKAMOTO Yoshiteru (QST); MIURA Hideaki, ARAKAWA Hitoshi, ECHIZENYA Daisuke, MATSUDA Takuya, HASEGAWA Mitsuru, NOMOTO Kazuhiro (Mitsubishi Electric); BANNO Nobuya (NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); SUGIMOTO Masahiro (Furukawa); NISHIJIMA Shigehiro (Fukui Univ. of Tech.)  
 E-mail: uto.hiroyasu@qst.go.jp

### 1. はじめに

現在、原型炉設計合同特別チームでは、アクションプランに沿って核融合原型炉の概念設計を実施中である。原型炉の超伝導トロイダル磁場(TF)コイルはITERよりも大型のコイルで高磁場を生成する必要があり、要求仕様を満たした上で製作コストの合理化を図る必要がある。そのため、主案であるラジアルプレート(RP)方式に加え、矩形導体レイヤー巻方式を用いた場合のTFコイル概念の検討も進めている。本発表では、これらの原型炉TFコイル設計の他、導体設計、高強度低温構造材料、耐放射線性絶縁材料など超伝導コイルの概念設計研究の最近の進展について報告する。

### 2. 原型炉 TF コイル設計

原型炉TFコイルの製作コストの合理化オプションの一つとして、RP方式よりも製作性や製作コストの観点から利点がある矩形導体を直接巻く概念を検討中である。これまで、矩形導体をダブルパンケーキ巻する概念(JT-60SA TFコイルにて採用)を検討したが、従来からの矩形導体概念の課題点の1つである絶縁材の信頼性、すなわちターン絶縁材にかかる応力の低減に課題が残っていた。そこで今回、レイヤー巻概念におけるグレーディングの利点を最大限に生かし、絶縁層応力低減を目的とした導体配置およびレイヤー毎の導体断面形状を検討し、電磁構造解析を実施した。新たにターン絶縁材の応力が大きい部分に「2段曲率導体」を配置することにより、従来の矩形導体ダブルパンケーキ巻での課題であった絶縁材応力を大幅に低減することができた。さらに、コイル内の磁場分布に応じて各導体のNb<sub>3</sub>Sn素線の量を最適化することで、コイル性能を確保したままNb<sub>3</sub>Sn線材の量を従来のRP方式や矩形導体によるダブルパンケーキ巻概念と比較して最大65%低減可能な見通しが得られ、レイヤー巻概念ではRPを使わないことによる製作工程の削減と超伝導素線量の低減により、製作コストを低減可能でことが明らかになった。

### 3. 超伝導導体設計

原型炉TFコイル導体では、ITERに比べて約1.5倍の高電磁力下で83kAの導体電流を安定して流すことが求められる。これまでの検討において、ITER CS インサートコイル試験(13 T, 40 kA)からの外挿により、ITER CS 導体並の短ピッチ撚線導体を83kA級で採用できれば、現状のITER素線に対応可能な見通しが得られている。一方、短ピッチ撚線構造の導体は、ITER導体よりも多い線材で多重撚り線を形成する必要があり、このような導体は核融合炉用超伝導導体としては前例がないことから、製作上問題が生じる可能性がある。そこで、①原型炉TFコイル導体の模擬導体の試作による短ピッチ撚線構造の成立性検討、②電磁応力下における多重撚り導体の機械的・電磁的現象把握、③超伝導線材の高強度化の検討を柱に、原

型炉開発共同研究(2件、研究代表者:伴野氏(NIMS)、研究代表者:杉本氏(古河電工))の枠組みも活用し設計検討を進めている[1][2]。短ピッチ撚線構造の成立性検討では、ITER-CS撚線と同じ撚りピッチとした現行導体では、素線断線が頻発する可能性が高く、撚り込率をITER-CS撚線と同等にするなどの変更が必要ながわかっており、高強度線材の特性評価と合わせて、原型炉に適用可能なTFコイル導体の導体仕様及び線材仕様の検討を継続している。

### 4. 高強度極低温構造材料

高強度極低温構造材料の開発に関連する取組として、まず原型炉に向けた極低温鋼(母材)の開発目標を4Kでの0.2%耐力:1,600 MPa以上、4Kでの破壊靱性値:120 MPa√m以上と定め、既存鋼種の評価とQSTのITER構造材料開発の知見をベースに設計した新材料(50 kg溶解)の試作と評価を行い、候補材料の基本成分の絞り込みと成分の最適化を図っている。原型炉TFコイルでは極厚の構造材料が大量に必要とされることから、鋼種として製造性、コストの観点からオーステナイト・ステンレス鋼に限定している。既存鋼種の評価では、XM19の機械特性評価により実機材で0.2%耐力>1200MPaは達成可能な見通しが得られた。また、新材料の評価では、XM19の組成をベースに窒素、ニオブ、バナジウム等を変化させた高Cr系6種類の4Kでの機械特性試験を実施し、窒素、添加材であるニオブやバナジウムの効果を評価した。その結果、XM19規格材の窒素の量を増やすことにより0.2%耐力は上昇し、目標とする1,600 MPa以上が得られた。

### 5. 耐放射線性絶縁材

核融合原型炉における耐放射線性絶縁材料の検討では、γ線及び中性子線照射に耐え得る絶縁材料の検討、応力下絶縁特性評価とその放射線照射効果及び耐放射線性絶縁材料の試作・試験を通じて、原型炉超伝導コイルの概念設計ならびに原型炉に向けた耐放射線絶縁材の設計基準の策定に指針を与えるデータを取得することを目的に、原型炉開発共同研究(研究代表者:西嶋氏(福井工大))にて進めている。近年の検討では、ガラス有機複合材料(GFRP)の機械的性質と絶縁性の相関を明らかにするため、層間せん断応力下での絶縁耐圧を室温及び液体窒素温度で測定した結果、層間せん断破壊など巨視的機械的欠陥が導入される前に絶縁耐圧が低下することがわかっており、原型炉コイル設計並びに絶縁材料開発の指針となる結果が得られている。

### 参考文献

1. N. Banno, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 33 no. 5 8400708 (2023)
2. M. Sugimoto, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 33 no. 5 8400805 (2023)

# 核融合炉用超電導磁石絶縁材料のせん断応力下絶縁耐圧特性

## Study on Dielectric Strength under Shear Stress of Insulating Materials for Fusion Magnet

西嶋茂宏, 砂川武義, 野村直希 (福工大); 秋山庸子 (阪大工); 山中淳彦 (名 NCC); 岩本晃史, 高畑一也, 今川信作 (核融合研); 坂本宜照, 宇藤裕康 (量研機構); 平井正明, 戸田良彦 (有沢製); 遠山喜克 (昌立工)

Shigehiro Nishijima, Takeyoshi Sunagawa, Naoki Nomura (FUT); Yoko Akiyama (Osaka Univ.); Atsuhiko Yamanaka (NCC); Akifumi Iwamoto, Kazuya Takahata, Shinsaku Imagawa (NIFS); Yoshiteru Sakamoto, Hiroyasu Utoh (QST); Masaaki Hirai, Yoshihiko Toda, Masaaki Hirai (Arisawa Mfg); Yoshikatsu Toyama (Shoritsu Kogyo)  
E-mail: nishijima@fukui-ut.ac.jp

### 1. はじめに

矩形導体方式で製作される核融合コイル絶縁材料(ガラス繊維強化プラスチック)の特性評価を行っている。特に応力下における絶縁特性の問題に注目した。それは矩形導体方式では絶縁材料に印加される応力(あるいは歪)が高く、ラジアルプレート方式に比較して絶縁物に対して厳しい使用条件となることが予想されるからである。また、この問題は機械的特性と電気的特性の連成した問題であるが、ここに注目して行われた実験例は少なく、設計に供し得る特性データが不足していると考えているのも理由である。

さらに本研究では、これら絶縁材料の照射劣化の問題も視野に入れている。応力下の絶縁特性に関する照射効果については、ほとんどが明らかになっていないのが現状である。マトリックス樹脂の微視的欠陥導入が絶縁耐圧の低下の引き金となることは予想されることであるが、この微視的欠陥の導入は巨視的機械的性質の劣化には必ずしも結びつかないと考えられる。巨視的機械的強度は、通常、強化材のガラス繊維で規定されるからである。したがって絶縁材料の機械的強度の照射劣化特性で、絶縁特性劣化挙動を代替させることの是非の検討が必要となると考えられる。

このような現状に鑑み、絶縁材料の問題を明確にしつつ、具体的な対処方法を構築するための研究を行うこととした。

### 2. 試験試料および実験方法

せん断応力下における GFRP の絶縁耐圧の検討を室温 (RT) と液体窒素温度 (LNT) で行った。試料資料は G10 相当品であり、ガラス重量含有率は約 65% である。層間せん断強度 (ILSS) は室温で  $49 \pm 3.8$ 、液体窒素温度で  $80 \pm 2.9$  MPa の材料である。この材料を図 1 に示すように目違い切り欠き試験片に加工し、その側面の表裏から直径 2mm の穴を掘り、残り厚さを約 0.5 mm として、残り厚さの絶縁耐圧を室温と液体窒素温度で測定した。電圧印加は沿層方向とし、針電極を使用した。測定時には、試験片に応力を印加し、その応力を一定として(実際は、試験機クロスヘッド位置を一定にした。試験片形状から一定のせん断応力が印加されている)、せん断応力下での絶縁耐圧を測定した。電圧が 6kV で絶縁破壊を起こさなかった場合は電圧を除去し、改めて応力を増加させ同様の手順の試験を繰り返した。試験は絶縁破壊を起こすかあるいはせん断破壊が起きるまで実施した。

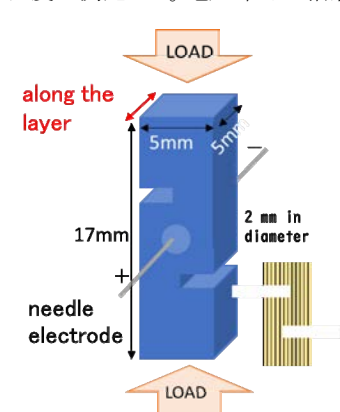


Fig.1 Shape and dimension of tested specimen.

ここでは、沿層方向における絶縁特性に注目した。沿層方向は繊維が存在しておらず樹脂の特性そのものが反映する物性であるため、照射劣化をはじめ樹脂の劣化が直接巨視的物性に反映するものと考えられるためである。穴を穿って

るのは、沿面放電を防止し、かつ耐圧試験器容量を補うため試験片厚さを薄くする目的である。

### 3. 実験結果および考察

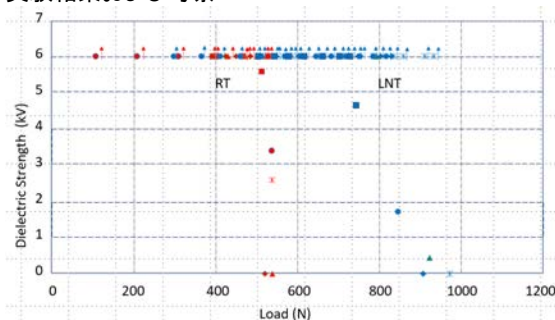


Fig.2 Dielectric strength under shear stress obtained at Room Temperature (RT) and Liquid Nitrogen Temperature (LNT)

図 2 に試験結果を示す。縦軸に絶縁耐圧を横軸に印加荷重を示している。図中上向きの矢印は 6kV でも絶縁破壊を起こさなかったことを意味しており、本試験で用いた電源の最大値である。また丸印は RT のデータであり、丸以外は LNT で測定した結果である。ある荷重まで印加し荷重を保持しつつ、電圧を上昇させることで実験を実施した。絶縁破壊した時点で試験は中止している。荷重軸上にプロットしてある点は、機械的に破壊する荷重である。注目すべきは、破壊に至らない荷重レベルで、絶縁破壊が生じている点である。応力軸上に矢印を付けていない点が、応力下で絶縁破壊した試料である。LNT では、試料によっては、機械破壊の 80% 程度の荷重で絶縁破壊が起こっている。これは応力により絶縁破壊電圧が低下することを意味している。

図 3 に LNT での絶縁破壊の経路を示す。ガラス繊維ヤーンに沿って絶縁破壊が起こっている。またその場所は、せん断応力が高い領域である(ノッチ底を結んだ線上)。このため、応力によるヤーンの変形に伴ったストランド(繊維)と樹脂の界面の微小き裂が導入されるが、これを結ぶ形で放電経路が形成されていると考えられる。



Fig.3 Dielectric breakdown path at LNT.

### 4. 結論

せん断応力下での沿層方向の絶縁耐圧試験を室温と液体窒素温度で実施した。機械的破壊が起こるより低応力側で絶縁破壊が起こった。その絶縁破壊経路はせん断応力が高い領域のヤーンに沿った経路で起こっていた。このことから、ヤーンの変形によりその近傍あるいはヤーンの中のマトリックス樹脂に微小き裂が導入され、それを結ぶ形で絶縁破壊が起こっていると推定された。

この事は、絶縁破壊に対する材料開発の新たな指針を示すものと考えられる。

## 20 kA級高温超伝導STARS導体の通電特性と展望

### Current-carrying properties of the 20-kA-class HTS STARS conductor and prospects

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, 高田 卓, 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, CHIKARAIHI Hiroataka, TAKADA Suguru, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya (NIFS); ITO Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yanagi.nagato@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

次世代のプラズマ核融合実験装置のマグネットに適用できる大電流高温超伝導 (HTS) 導体として内部構造の異なる3種類の導体: 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、外側をレーザービーム溶接した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である。テープ形状の REBCO 線材間には撚りや転位を入れていない。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]。現在は 20 kA 級で実用となる導体の開発を進めている [3, 4]。

#### 2. 20 kA 級 STARS 導体 6 m 長サンプル

20 kA 級 STARS 導体の試験を行うため、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た。導体の断面図を Fig. 1(a) に示す。12 mm 幅 REBCO 線材 15 枚を積層し、銅安定化材ケーシングとステンレスジャケットの間はカプトンテープを巻いて内部絶縁方式としている。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、これを大口径強磁場導体試験装置に取り付けた。サンプルの全景を Fig. 1(b) に示す。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。

#### 3. 20 kA 級内部電気絶縁型 STARS 導体の試験結果

第 1 回の冷却励磁試験では、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した。また、外部磁場 8 T において高速通電を行い、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顕著に遅れることが観測された。これは積層したテープ線材間を渡る循環電流による影響と考えられる。電流を立ち下げた際の残留磁場を通電速度に対してプロットすると比例関係となっており (Fig. 2)、積層した線材間のインダクタンスの差にもとづく非一様電流分布の形成によって定性的に説明可能であることがわかった。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、8 T の場合と比べて残留磁場の時定数が長く、絶対値も大きいことが認められた (Fig. 2)。現在、これら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。

一方、第 2 回試験で温度 40 K、磁場 6 T において臨界電流測定を行ったところ、クエンチの回数に応じて臨界電流の低下が認められた。この際に電源遮断のためのクエンチ判定を 100 mV、100 ms でかけていたが、この条件では導体の一部が局所的に臨界に達した場合にホットスポット温度として高くなり過ぎた可能性がある。結果として全線

材の半分程度が劣化したと推定された。その後、温度を 20 K まで下げたところ、定格の 8 T、18 kA まで 1 kA/s の高速通電 100 回の繰り返し励磁を行うことはできた。クエンチによる性能低下の問題については、サンプルの取り出し後に詳細原因を探る予定である。

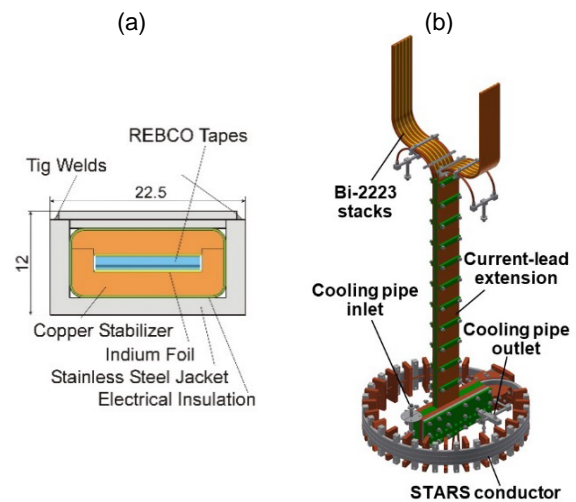


Fig. 1 (a) Cross-sectional layout of the 20-kA-class HTS STARS conductor and (b) illustration of a 6-m, 3-turn solenoid sample.

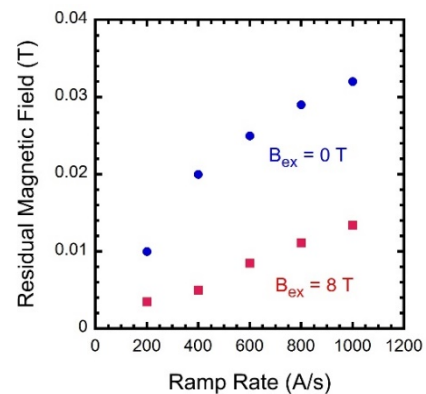


Fig. 2 Observed residual magnetic field, when the transport current reached zero, as a function of the ramp rate for excitations with the external magnetic field of 8 T and 0 T. For the 0 T case, it is considered that the circulation current reached the critical current in some tapes at a high ramp rate.

#### 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., to be published in Journal of Physics Conference Series.

# 素線断面入熱と高精度温度検出を用いた大型ケーブル・イン・コンジット導体の素線配置計測システムの構築

## Development of Strand Trace Measurement Inside Cable-In-Conduit Conductor Based on High Resolution Rising Temperature Detection Initiated by Selective Heating of Strand Cross Sections

谷貝 剛, 星野壮太, 石田道由 (上智大); 伴野信哉 (NIMS); 宇藤裕康, 坂本宜照 (量研機構)

YAGAI Tsuyoshi, HOSHINO Sohta, ISHIDA Michiyuki (Sophia Univ.); BANNO Nobuya (NIMS); UTOH Hiroyasu, SAKAMOTO Yoshiteru (QST)

E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

### 1. はじめに

大型のマグネット用導体にはケーブル・イン・コンジット導体(CIC 導体)が採用されており, 高い機械的強度や低交流損失, 高い冷却安定性などの特性から, 核融合装置用マグネットでは世界標準の導体となっている。直径約 0.8mm の超電導素線と銅線を 1000 本以上, 多段に撚り合わせる導体は, コンジットへの挿入に伴って圧縮されるため, 内部の素線配置が複雑に変化し, 幾何学的に非対称となる撚り乱れや, 素線の凹みなどの不規則な変形が不可避である。これは, 素線毎のインダクタンス変化だけでなく, 熱処理後の冷却に伴う熱収縮応力, さらに通電時の電磁力による導体の超電導特性劣化を引き起こす。特に ITER 後の原型炉設計では, マグネットの大型化が必須であるため, これまでの導体・マグネット製作後に熱処理を施すワインド&リアクト(W&R)法だけでなく, 導体熱処理後に巻き線を行う, リアクト&ワインド(R&W)法の適用も考えられる。そのため, 熱処理後の冷却および電磁力による素線歪みとその劣化を推定する手法の確立は, 今後の核融合マグネット開発にとって重要である。世界的には素線の配置を数値計算で推定し, 歪みや超電導特性の推定を行った研究もあるが[1], 1000 本を超える Nb<sub>3</sub>Sn 導体の内部素線配置の測定と, それに基づいた歪みに関する数値解析は行われていない。そこで本グループでは, ITER TF 導体の SULTAN サンプルを用いて詳細な素線配置計測を可能にする装置開発を行っている。

### 2. 計測のための CIC 導体サンプル準備

導体サンプルの諸元を Table. 1 に示す。まず導体内部を真空引きした後, 液体のエポキシを流し込み, 固めて素線配置が変化しないようにする。次に導体長手方向に 10mm の厚みでスライスし, 素線切断面を露出させる。切り代は概ね 1mm 未満であるため, 切断面同士を向かい合わせると素線断面の位置はほぼ鏡映対称となる。一方サンプル両断面間(10mm)の素線配置は大きく変化するため, 素線切断面の両面上での各々の位置を特定する必要がある。素線位置特定を長手方向連続して行う事で 3 次元内部構造が明らかになる

### 3. 素線切断面位置の測定原理

著者はこれまで, 素線切断面間に直径 0.8mm 以下の電流印加プローブを機械的に押し当て, プローブ間抵抗を評価して位置特定を行ってきた[2]。しかし, この手法はボイド率が比

Table.1 Specification of CIC conductor sample

Specification of CIC conductor	
Diameter (Inner / Outer)[mm]	38 / 43.8
Num. of Strands (Nb <sub>3</sub> Sn / Cu)	900 / 522
Cabling Pattern	(2sc+1Cu)×3×5×5+core×6
Twist pitch (1 <sup>st</sup> / 2 <sup>nd</sup> / 3 <sup>rd</sup> / 4 <sup>th</sup> / last) [mm]	45/85/130/250/450
Ave. Void Fraction [%]	33.5
Thickness of Pieces [mm]	10
Total Conductor Length [mm]	200

較的高く(約38%), かつNbTi素線導体でのみ有効で, 低ボイド率のNb<sub>3</sub>Sn 導体では完全な特定は不可能だった。そのため, 温調付き半田ごてから素線切断面への入熱による素線軸方向および素線間を跨ぐ方向の温度上昇を, 反対面上の素線断面にサーミスタ・プローブ(0.6mm×0.3mm)を当て, 加温前から定常状態までの温度変化時定数  $\tau$  と最大温度差  $dT$  を検出して比較し, 10mm 長の素線軌道が得る方法を開発した。

### 4. 実験の概要と結果

半田ごては, 先端直径0.8mm, 最大電力110Wで, 150°C のアイドリング温度から約1sec程で270°C一定温度になるようにした。半田ごてを当てた素線断面の反対側で, サーミスタ・プローブを当てる素線断面を6個選び, 温度上昇を測定した結果をFig. 1に示す。素線への入熱はプローブを当てた反対面の素線断面が室温になってから行った。No.4, 5の隣り合う素線の温度上昇がほぼ同じで最大となった。さらに Fig.2 は, No.4,5 の 2 素線断面について再測定し, 指数関数フィットを行った結果である。No.4, 5 の時定数が各々9.8 sec, 12.5 secとなり, 抵抗測定よりも明確な差が確認された。

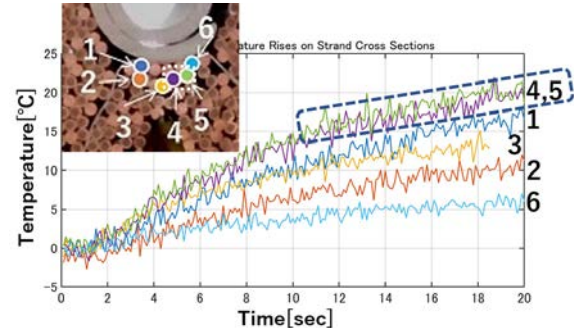


Fig.1 Temperature rises of strand cross sections over time

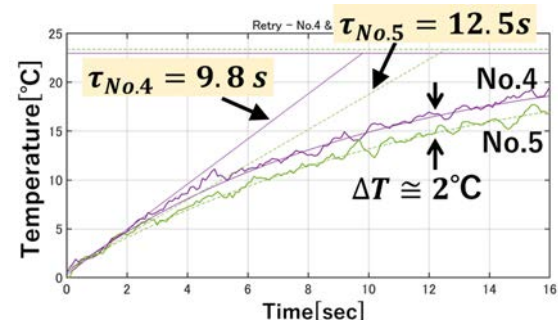


Fig.2 Time constants of the temperature rises for No.4 and 5 strands.

本研究は, QST共同研究の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- H. Bajas, et al.: Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 054019.
- T. Yagai, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol.75 (2006) p.250

# JT-60SA 超電導コイルの現地絶縁補強

## On-site insulation reinforcement for JT-60SA superconducting magnet

村上 陽之、土屋 勝彦、梶谷 秀樹、中本 美緒、小島 有志、山本 聡、大西 祥広、河野 勝己、濱田 一弥(量研)  
 MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, KAJITANI Hideki, NAKAMOTO Mio, KOJIMA Atsushi, YAMAMOTO Satoshi,  
 ONISHI Yoshihiro, KAWANO Katsumi, 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、2021年1月から通電試験[2,3]を開始した。しかし、2021年3月に、絶縁施工不良による短絡電流発生事象が発生し、絶縁施工不良部分の補修および類似場所の絶縁補強を並行して実施した。また、試験再開前に真空中での絶縁性能を確認するためクライオスタット内の真空度を1Paから1000Paまで変化させた状態で耐電圧試験(グローバルパッシェン試験)を実施した。本試験で発覚した絶縁不良箇所についても絶縁補強を行っている。

これらの絶縁作業は、装置に組み立てられた状態で実施する必要があるため、クライオスタット内の現地作業で絶縁補強を行える方法を開発した。本発表では、現地作業による絶縁補強方法およびその結果について報告する。

### 2. 現地作業における絶縁補強方法

JT-60SAの超電導コイルの絶縁は、ガラステープやカプトンテープをエポキシ樹脂で含浸した構造である。コイル製作時には、プリプレグテープを巻きつけた後にコイル全体を加熱キュア、あるいはドライのテープを巻きつけた後に真空含浸を用いて樹脂含浸を行った。しかし、現地作業では、作業空間に限られること、冷却配管や計測線が接続され形状が複雑なことから、製作時の方法では絶縁施工できない。そのため絶縁の弱い部分を局所的に補強する方法を複数開発し、周辺の作業空間や絶縁対象の形状に合わせて適切な絶縁補強方法を選択し現地作業を実施した。

各絶縁補強の概略手順を以下に、特徴を表1に示す。

- (1) ガラスカプトンプリプレグテープ + 加熱キュア
  - ・プリプレグテープを絶縁対象に貼り付ける。
  - ・治具を取り付け、テープ面を加圧する
  - ・ヒーターで全体を加熱しキュアを行う。
- (2) ガラスカプトンテープの塗巻き
  - ・ガラスカプトンテープを常温硬化型のエポキシ樹脂と一緒に絶縁対象に巻きつける。
  - ・シリコンテープ、熱収縮テープを巻きつけ加圧する。
  - ・加圧用のテープを巻く空間が無い場合は、万一隙間が生じた場合も樹脂が充填されるように、ガラスファイ

- ーを混合した常温硬化型のエポキシ樹脂を代用。
- (3) 簡易モールドを用いて樹脂含浸(キャストイング)
  - ・絶縁対象部を囲うように簡易モールドを組み立てる。
  - ・ガラスファイバーを混合した常温硬化型のエポキシ樹脂をモールド内に流し込む
  - ・樹脂硬化後に周囲をガラスカプトンテープで塗り巻く
- (4) 粘土状に半硬化した樹脂塗り(プラスタリング)
  - ・ガラスファイバーを混合した常温硬化型のエポキシ樹脂に硬化促進剤を注入する。
  - ・適度な粘度(粘土状)になるまで時間を置く。
  - ・絶縁対象物に塗り付ける

### 3. JT-60SA 実機の絶縁補強状況

放電事象が生じた超電導導体の接続部、計測線の取り出し部や接続部、冷媒配管などの絶縁補強を実施した(図1)。現在は、通電試験再開前のグローバルパッシェン試験を実施している。問題ないことを確認でき次第、通電試験およびファーストプラズマに向け運転を進める計画である。

### 参考文献

1. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.65
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) p.29
3. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.23

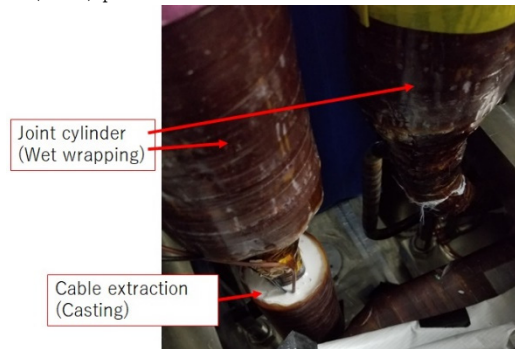


Fig. 1 Insulation reinforcement

Table 1 Advantage and disadvantage for each method

Method	(1) Prepreg	(2) Wet wrapping	(3) Casting	(4) Plastering
Required space	×Large It needs space for press jigs and heater	○Small Workable if tape can be wound	×Large It needs space for mold assemble	○Small Workable if resin can be plastered
Applicability for complex shape	△Applicable as long as press jigs fit	×Not applicable Tape is slipping if there is tapered surface	○Applicable	○ Applicable
Insulation quality	○High Work quality can be checked before heating for curing	○High Insulation work can be restarted if wrapping quality is not good	○High Work quality can be checked before resin insertion	△There is risk It is quite difficult to restart insulation work due to short curing time
Applicability for large material	○Applicable	×Not applicable It is difficult to keep tape in proper position	× Not applicable Risk for resin leakage or air pocket in resin	○ Applicable
Working time	△Not short Many work steps	○Short Wrapping is quick. Curing time is 48h	△Not short Double curing (Casting and wet wrapping)	◎Quite short Curing time is several hours because of accelerator

## HTS テープ線材の短絡電流試験 - 4

## Short circuit experiment of HTS tape conductor for Superconducting DC power transmission (SCDC) - 4

山口 作太郎, 江口 実穂, 川合 修平, イワノフ ユーリ, 神田 昌枝, 斎藤 涼夫(中部大); ニノ宮 晃(明治大)  
 YAMAGUCHI Sataro, EGUUCHI Miho, IVANOV Yury, KANDA Masae, SAITOH Suzuo (Chubu Univ.);  
 Akira NINOMIYA (Meiji 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、テープ線材や複合導体の短絡電流実験を継続している<sup>1-4)</sup>。用いる線材は Bi2223 線材(住友電工)と RE123 線材(SuNAM)の2種類であり、臨界電流は 190 A ~ 200 A 級である。今回は線材の温度見積もりを中心に述べる。尚、短絡ピーク電流を大きくし RE123 では焼損実験まで行った。ピーク電流は SuNAM で ~2.5 kA, Bi2223 で ~5.0kA 以上まで上げ、焼損実験を目指し電源系の増強を行っている。通電時間は ~8 ms (Bi2223), ~40 ms 以上(SuNAM)である。したがって、臨界電流の 10 倍から 20 倍以上の電流を流した。超伝導ケーブルの定格電流は 77 K でケーブル臨界電流の 50% ~ 70%ほどにするため、定格電流との比較ではこの比はもっと大きくなり、その意味で過酷試験である。

直流ケーブルではアルミや銅ケーブルでも短絡電流波形規格は決まっていない。負荷短絡時には電力変換器は高速遮断ができること、ケーブル地絡時には場所や電力変換器回路によって大きく短絡電流が異なるためである。このため、安全基準をどう決めるかを念頭に実験を進めている。

一方、既存の交流系では AC66 kV では定格電流の 20 倍の電流が 1 秒ほど流れる条件でケーブルが作られるが、最近の交流遮断器は ~60 ms の高速遮断が可能になっている。特に、電鉄用直流遮断器は ~1 ms である。これらを勘案しながら、超伝導直流ケーブルの短絡電流仕様を決めたい。

## 2. RE123 &amp; Bi2223 線材の短絡電流実験

コンデンサとサイリスターを利用した電源に超伝導テープ線材を接続し、短絡電流を流し、同時に電圧タップ線で線材電圧測定を行っている。15 cm 長の SuNAM 線材に電流電圧波形を Fig. 1 (upper) に示す。また、この波形から電圧/電流比を Fig. 1 (below) に示す。今までの実験でテープ線材の抵抗の温度依存性が分かっており、この一連の実験で SuNAM 線材はほぼ抵抗負荷であるため、Fig. 1(below)の電圧電流比はほぼ抵抗の時間変化であると考えられる。この例では、抵抗値は ~0.032 [Ω] に t = 15 ms 頃到達している。放電後半でデータ散乱が大きい理由は電流と電圧の値が小さくなり、ノイズの影響が大きい。このようにして求めた抵抗を元に SuNAM 線材の構成や実験結果から、ほぼ銅の抵抗率と似た温度依存性があると考えられるので、これから線材の温度を見積もることができる。

## 3. 現状のまとめ

Fig. 1 に示した実験をコンデンサ電圧を変えて複数回行っている。それによると、コンデンサ電圧を上げて流す電流を大きくすると、電圧電流比から得る抵抗値はコンデンサ電圧が高い時大きくなり、結果として温度が上昇していることなる。その結果、Fig. 1 の例では、線材温度は ~400 [°C] と見積もられた。現在、誤差評価を行っているが、大きくて 50 [°C] 以下と思われる。この温度は半田熔融温度以上であり、実際に電圧タップは放電を行うと液体窒素中にも拘わらず外れる。

したがって、SuNAM 線材温度の見積もりは大きくは外れていないと考えている。同様な線材温度の見積もりは Bi2223 線

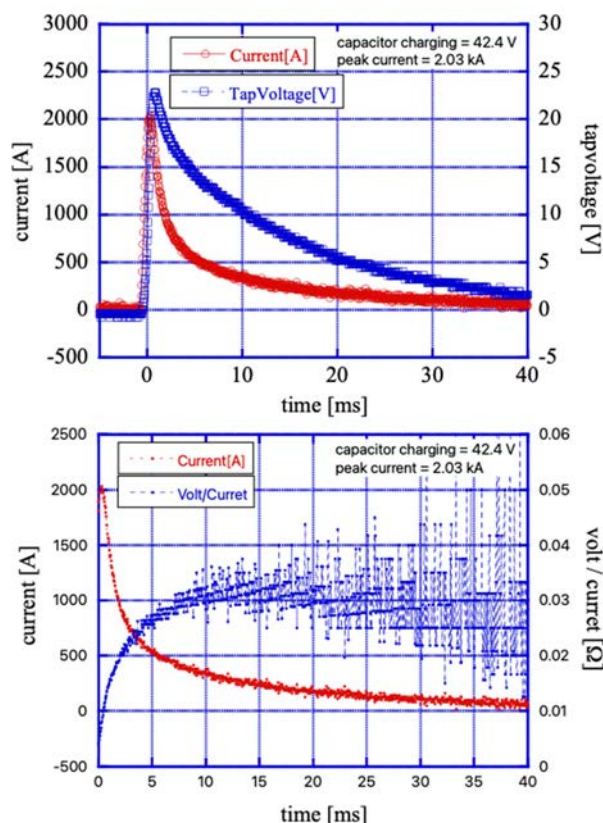


Fig. 1 Short circuit waveforms of voltage & current for SuNAM tapes (upper), and voltage/current ratio and current (low)

材に対しても行っている。Bi2223 線材は単位長さ当たりの重量でも行っている。これは SuNAM 線材に比べて 2.8 倍重く、抵抗値は 1/6 以下であるため、温度上昇は低く押さえられ、同じ電源で peak current が 5 kA 以上でも、最大温度は ~240 K と見積もられた。この温度は半田熔融温度以下であり、電圧タップ線が外れることがないことと整合性がある。

## 参考文献

- 山口, 神田, イワノフ, 「航空機向け積層超伝導ケーブルの短絡電流試験」 2020 年度春期低温工学・超電導学会講演概要集, 1B-a02.
- 山口, 江口, 神田, イワノフ, 「HTS テープ線材の短絡電流試験-1」 2021 年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集, 2A-p08.
- 山口, 江口, 神田, イワノフ, ニノ宮, 「HTS テープ線材の短絡電流試験-II」 2022 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 2A-a08.
- 山口, 江口, 神田, イワノフ, 斎藤, ニノ宮, 「HTS テープ線材の短絡電流試験-III」 2022 年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-a02.



# SMES ケーブルを用いた直流マイクログリッドによる 再生可能エネルギー利用効率の向上

## Improvement of energy use efficiency of renewal energy by DC microgrids using SMES cables

東川 甲平, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)

HIGASHIKAWA Kohei, BIAN Wenhao, KISS Takanobu (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>。本発表では、これによって再生可能エネルギーの出力変動をリアルタイムに補償することが可能となり、他のエネルギー貯蔵媒体への事前のエネルギー変換を最小限とすることで、その利用効率が大幅に向上することを報告する。

### 2. マイクログリッドの想定

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、それぞれの動作は以下のとおり想定した。

- ・太陽光発電 (PV): 定格は 10 MW とする。
- ・水素発電: 定格は 10 MW とし、時定数はガスタービン発電相当として 60 秒とする。水素の製造は太陽光発電によるものとし、水素発電は太陽光発電による電気エネルギーの 30% を電気エネルギーに戻せるものとする。
- ・蓄電池: 定格は 10 MW とし、時定数は典型例として 10 秒とする。充放電効率は 90% とする。
- ・SMES ケーブル: 事前の実験<sup>[2]</sup>によって瞬時の充放電動作が可能となることがわかっているが、時定数は余裕を見て長めの 0.1 秒とする。送電を兼ねるため、充放電にかかる付加的な損失は発生せず、充放電効率は 100% とする。

### 3. マイクログリッドのエネルギー利用効率の評価

様々な電源構成において需給バランス調整の成否とその際のエネルギー利用効率を検討した結果を Table 1 に示す。例えば、Fig. 2 に示すように、Case A と Case B では晴時々曇りの日の太陽光発電の急激な出力変動を水素発電や蓄電池では吸収しきれずに瞬時レベルでの需給バランスをとることができないが、Case D のように SMES ケーブルを導入した場合には蓄電池を用いなくてもこの問題が解決している。すなわち、SMES ケーブルを用いない場合には、太陽光発電の出力をそのままリアルタイムに利用することが困難となり、Case E のように事前に水素などの他のエネルギー貯蔵媒体に変換した後に再度電気エネルギーに戻す必要があり、その変換効率に起因してエネルギー利用効率が低くなってしまふ。一方、SMES ケーブルを用いる Case C や Case D では、太陽光発電の出力をそのまま利用できることから、エネルギー利用効率が、晴時々曇りの日で 2 割以上、晴の日で 3 割程度も向上することが分かった。発表当日には、SMES ケーブルの利用を想定した最適電源構成の検討によって、さらに効果が出る例についても報告する予定である。

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.

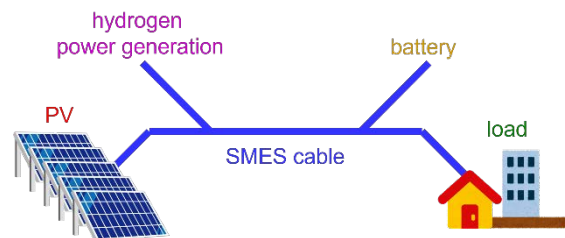


Fig. 1. Conceptual diagram of a microgrid using SMES cable.

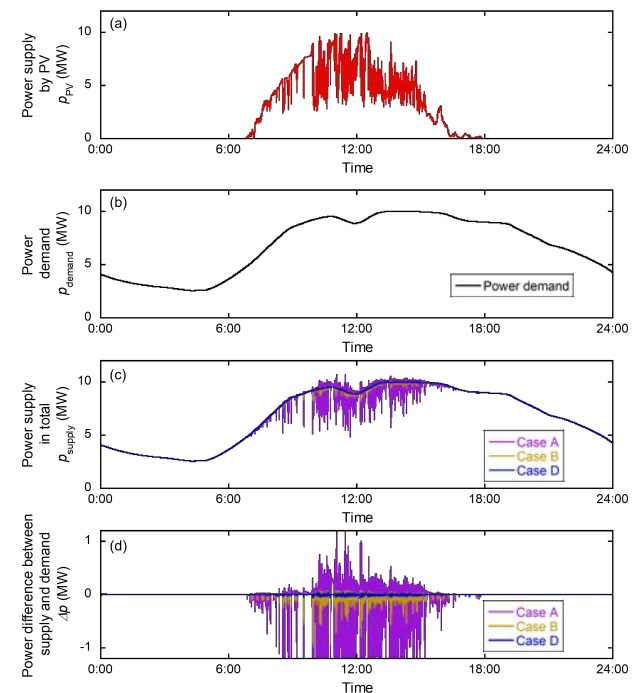


Fig. 2. Output power fluctuation compensation behavior in various cases (see Table 1 for power supply configurations for each case): (a) power supply by PV on a clear sometimes cloudy day, (b) power demand, (c) power supply in total, and (d) power difference between supply and demand.

Table 1. Availability of supply-demand balancing and energy use efficiency in various cases.

Case	PV	hydrogen	battery	SMES cable	supply-demand balancing	energy utilization efficiency (clear sometimes cloudy day)	energy utilization efficiency (clear day)
Case A	10 MW	10 MW	-	-	NG	-	-
Case B	10 MW	10 MW	10 MW	-	NG	-	-
Case C	10 MW	10 MW	10 MW	40 MJ	OK	37%	42%
Case D	10 MW	10 MW	-	1 GJ	OK	38%	42%
Case E	-	10 MW	-	-	OK	30%	30%

# スクライビング加工された RE 系コート線材を用いた 超電導電流導体の通電特性評価

## Evaluation of current-carrying characteristics of superconducting current conductors using scribed RE-based coated wire

濱本 拓郎, 木内 勝(九工大); 山崎 春太郎, 吉田 隆(名大)

HAMAMOTO Takuro, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.); YAMAZAKI Shuntaro, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: hamamoto.takuro771@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

近年、小型核融合炉や電動航空機等の超電導応用機器では、高エネルギー密度かつコンパクトなエネルギー輸送が期待されてきている。特に RE 系コート線材は軽量で、高磁界下で高い臨界電流密度  $J_c$  を持つことから様々な分野への利用が期待されるが、テープ形状であることからその利用が制限される[1]。一方で、レーザースクライビング加工技術の向上により、1 mm 幅の RE 系コート線材が比較的容易に得られるようになってきた。このような細線化した線材を利用することで丸形状の電流導体が作製可能になると、ソレノイドコイルなどの応用機器への利用も視野に入ってくる。

本研究は市販されている RE 系コート線材を 1 mm 幅にスクライビング加工し、丸形状のフォーマに巻き付けて、丸形状の超電導電流導体を作製した。さらに、この電流導体の通電試験を液体窒素中で行った。

### 2. 電流導体の作製

本研究で用いた線材は SuperPower 社製の SCS4050-AP で、銅メッキが表面に施された 4 mm 幅の RE 系コート線材である。この線材をエネルギー密度  $0.53 \text{ J/cm}^2$  の UV レーザーで 1 mm 幅にスクライビング加工した。この 4 mm 幅および 1 mm 幅線の 77 K, s.f.における電界  $E$ -電流  $I$  特性を Fig. 1 に示す。臨界電流  $I_c$  を電界基準  $1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$  で決定すると、加工前の  $I_c$  は 115 A で、加工後は 29 A と約 1/4 の値であり、スクライビングによる  $I_c$  の劣化はほとんどないことがわかった。ただし、 $n$  値が加工前  $n = 27$ 、加工後  $n = 35$  となり、加工後のほうが大きな値を示した。

この線材を用いて電流導体を作製した。フォーマとして、軽くて熱伝導性がよい  $3 \text{ mm } \Phi$  のアルミパイプを用いた。このフォーマに絶縁のためのカプトンテープを巻き、その上に両面テープを貼り付け、今回は線材の曲げや捻じれによる特性劣化の少ない、電流導体の軸に対して  $5^\circ$  の角度で 9 枚の線材を巻き付けた。作製した電流導体を Fig. 2 に示す。電流導体の全長は 100 mm、電流端子接続部は両端 25 mm、電流導体部が 50 mm である。この電流導体に用いた線材が全て 29 A 程度の  $I_c$  値を持つならば、予想される電流容量  $I_{ct}$  は 260 A 程度である。

電流導体の通電特性評価には直流四端子法を用いた。電圧端子は導体部中央に電圧端子距離 20 mm で、導体を一周させる形で、低温はんだを用いて取り付けられた。また、測定は液体窒素中で、スイープレート  $0.2 \text{ A/sec}$  で通電した。

### 3. 結果と検討

$E$ - $I$ 特性の測定結果を Fig. 3 に示す。電流通電開始から 100 A 程度まで線形的な電界の増加が測定され、その後不安定な電界となり、200 A 近傍から超電導体の特微的な指数的な電界の増加を示した。このような電界の振る舞いの原因の一つは、電流導体に均一に電流が流れていないためである。ここでは、超電導特有の指数的な領域の  $E$ - $I$ 特性から  $1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$  の電界まで外挿し電流容量を  $I_{ct}$  求めた。得られた  $I_{ct}$  値は 125 A となり、予想値の 48 % 程の結果になった。ただし、領域の  $n$  値は 8 程度と一本の線材の値に比べてかなり小さく、

指数的な領域の  $E$ - $I$ 特性も抵抗成分の影響を受けており、この抵抗成分がなければもう少し大きな  $I_{ct}$  が得られると予想される。電流端子接続を改良した結果は当日報告する。

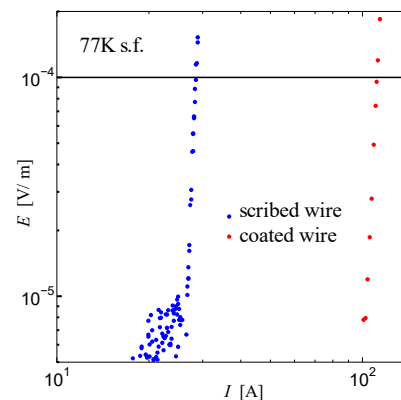


Fig. 1  $E$ - $I$  characteristic of the coated wire and scribed wire.

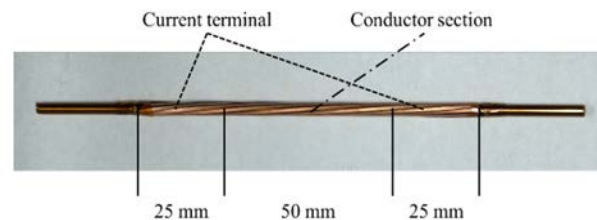


Fig. 2 Fabricated current conductor.

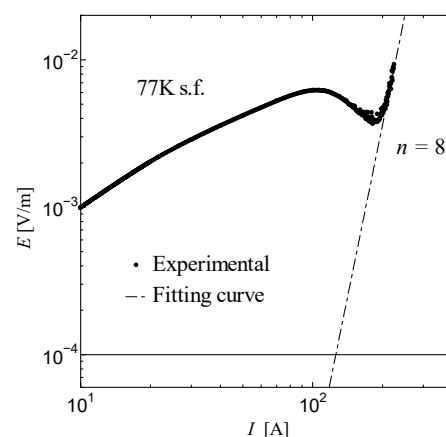


Fig. 3  $E$ - $I$  characteristic of the current conductor.

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金:21H01872からの助成を受けて実施した。

### 参考文献

- Jeremy D Weiss et al, Supercond. Sci. Technol. 30 014002 (2017)

# 並列導体を構成する超伝導テープ線幅広面に垂直な外部磁界が テープ間電流分布に及ぼす影響

The effect of external magnetic field perpendicular to the flat face of superconducting tapes constituting parallel conductors on current distribution between each tape

押川 昌樹, 吉田 尚貴, 川越 明史(鹿大); 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)

OSHIKAWA Masaki, YOSHIDA Masataka, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ);

MIURA Syun, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka (Kyusyu Univ)

E-mail: k9871072@kadai.jp

## 1. はじめに

電力・産業応用のための超伝導機器を開発するために、REBCO テープ線材を複数本束ねた数 kA 級の大電流容量導体の開発が進められている。この候補の一つとして、線材同士を絶縁して並列導体とし、転位を施した導体が検討されている[1]。このような導体では、転位などによりテープ線材間電流分布の均一化を図ることが重要である。線材形状やコイル形状等の制約を考慮した、最適な転位位置・回数を求めることは一つの課題となっている。従来の研究では、テープ線材の中心に電気的中性線があるとして、テープ面に平行な磁界成分のみが考慮されている。しかしながら実際のテープ線材にはテープ面に垂直な磁界も印加される。このとき、電気的中性線はテープ線材中心に存在しない。本研究では、テープ面に垂直な外部変動磁界がテープ間電流分布に及ぼす影響を、数値解析によって調べた。

## 2. 垂直磁界による電流分布への影響

Fig. 1 は、テープ面に垂直な磁界中にある二本並列導体のテープ線断面の磁束密度分布を示す。a, b は、それぞれ、偏流の大きい状態と小さい状態を示す。折れ曲がり点を線材長手方向に結んだ線は、誘導電界がゼロの線であり、電気的中性線と呼ばれる。この線で囲まれた閉曲面では、鎖交する磁束は保存される。電流分布が不均一な a では、各テープ線の電気的中性線は揃わないため、グレーの範囲に外部磁界が鎖交する。磁束は保存されるので、元の電流分布が変化する。この結果、均流化した b の状態になり、テープ線の電気的中性線が揃う。

## 3. 解析モデル

本解析では有限要素法解析を行なった。Fig. 2 に、超伝導テープ線を三本束ねた並列導体のモデルを示す。レーストラック型のコイルを構成した一部の導体を取り出している。超伝導体のみをモデル化しており、常電導金属は省いた。導体 A と B は往復導体を構成していると考え、この 2 本の導体の解析を行なった。全く転位をしない場合、3 本のテープ線の並びは、A と B で、コイル外側のテープ線は常に外側である。コイル中央で①と③が入れ替わるように転位をした場合は、コイル外側と内側が入れ替わる。A と B 内のテープ線の電気的接続

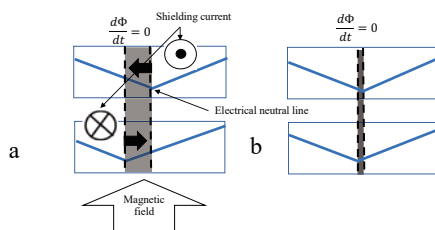


Fig. 1 The magnetic flux density distributions and the electrical neutral line in each tapes in the parallel conductors composed of two tapes. a and b represent two cases of current distribution, non-uniform and uniform, respectively.

を切り替えて解析することによって、この効果を考慮した。この場合には、前節で示したメカニズムによって、テープ面垂直な磁界が電流分布に影響する。超伝導特性は、n 値モデルを考慮した。この往復導体に交流電流(180A,10Hz)を通電し、外部磁界まで考慮して解析した。

## 4. 解析結果

Fig. 3 に外部磁界なしとテープ面に垂直な外部磁界を印加した場合の解析結果を示す。外部磁界なしの場合には、電流分布が不均一であることがわかる。3 本のテープのうち、2 本に挟まれたテープ線の電流が小さい。垂直磁界ありの場合には、均流化していることがわかる。以上の結果から、テープ面に垂直な外部磁界は、テープ線間電流分布を均流化する効果があることが、数値解析から示された。

## 参考文献

1. A.Kobun, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.62

## 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す。

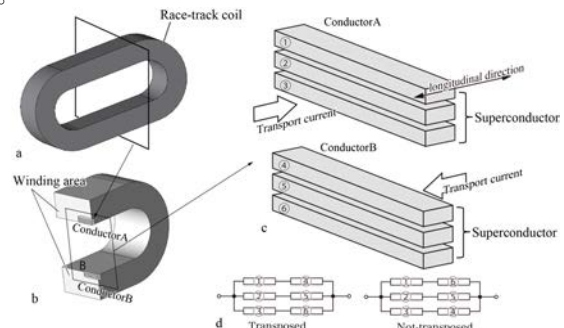


Fig. 2 Numerical calculation model of the parallel conductor. To consider the effect of transposition, electrical connection between each tapes in upper and bottom conductors are changed.

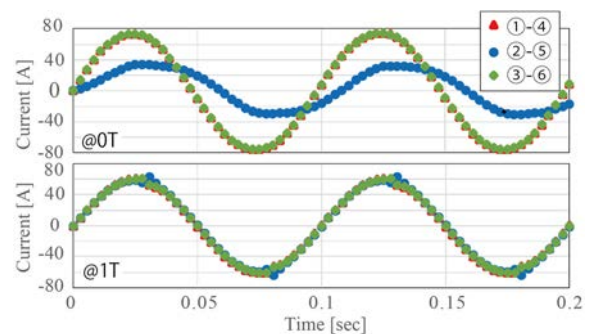


Fig. 3 Current distributions between three tapes under external magnetic fields, a and b represent results @0T, 1T, respectively.

## NbN ペーストの作製と超伝導接続技術

### NbN 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

電子機器用回路基板、ディスプレイ用電極、圧電部品用フレキシブルプリント基板などの製造に、導電性ペーストが開発されている。その中で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、一般的に、熱硬化は空気中で100~200℃、保持時間は数10分程度で行われる。ペーストは選択的に広い範囲の粘度を実現することができ、スクリーン印刷やインクジェット技術でインク材料として利用される。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。超伝導ペーストの開発により、線材や薄膜の超伝導接合部や、多層デバイスにおける超伝導インターコネクトの要素技術として適用することができる。電気伝導のメカニズムは、一般に、樹脂の硬化収縮によって導電性フィラー同士が接触し、電気伝導が生じると考えられる。したがって、導通性能を向上させるためには、フィラー同士をできるだけ近づける必要がある、収縮率が大きく、フィラーの接触点が多い樹脂を選択する必要がある。本報告では、化学的に安定な超伝導体として知られるNbN超伝導粉末を用いたペースト試作を報告する。また、このペースト技術の応用として、機械的柔軟性を有する自立型超伝導膜の試作を行った。さらに、超伝導接続への応用を調べるため、NbTi薄膜パッド/NbNペースト/NbTi薄膜パッド接続を試作し、接続抵抗を測定したので報告する。

#### 2. 実験

NbN超伝導ペーストは、NbN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2Kから300Kの間で測定した。

#### 3. 結果と考察

##### ①NbN超伝導粉末を用いたペースト試作

NbN超伝導を、厚さ100, 200, 300, 400 $\mu\text{m}$ の各種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℃、20分の加熱硬化後のペーストの厚さは、それぞれ80, 150, 220, 300 $\mu\text{m}$ であった。NbN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NbNの回折ピークを確認した。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NbNペーストが固化し、立方体のNbN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. 1に厚さ400nmのメタルマスクを用いてSrTiO<sub>3</sub>(001)単結晶基板上にスクリーン印刷後固化したNbNペースト膜(膜厚300nm)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16Kで抵抗率の変化が見られ、約10.5Kで抵抗率がゼロになり、超伝導を示すことが分かる[1]。

##### ②自立型超伝導膜

前述で作製したSrTiO<sub>3</sub>(001)単結晶基板上を用い、固体基板として薄いフレキシブルなステンレス板を使用した。メタルマスクには、6mm×140mmの構造体を作製した厚さ

400 $\mu\text{m}$ のステンレス板を使用した。印刷後、ペーストを180℃の乾燥炉に5分間入れ、ペーストを半生状態にする。次に、固体基板と半生印刷シートを丁寧に剥がし、自立膜を形成した。次に、この自立膜を180℃で20分間乾燥させた。抵抗率の温度依存性を測定した結果、室温から低温まで金属的な電気伝導性を示し、約15Kで抵抗率の変化が始まり、約11Kで抵抗率がゼロになり、超伝導を示すことが分かった[1]。

##### ③NbTi薄膜パッド/NbN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/NbN/NbTi薄膜パッド接続構造を作製し、抵抗値の温度依存性を測定した。その結果をFig. 2に示す。15Kから10Kの領域で抵抗値が緩やかに低下するのはNbNペースト膜に、7.5K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、超伝導コンタクト技術からなる3つの要素技術[2]の課題克服に繋がる。

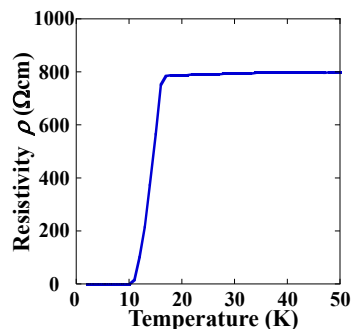


Fig.1 Temperature dependence of resistivity of NbN paste ( $t = 300\text{nm}$ )

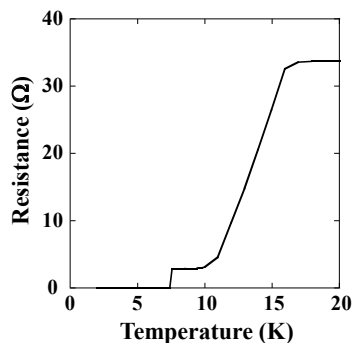


Fig.2 Temperature dependence of joint resistance of NbTi film / NbN paste / NbTi film

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. Wellstood F. C, Kingston J. J, Clarke J, J. Appl. Phys. 75 (1994) 683-702.

## 様々な補強線材間の Bi2223 線材間超伝導接合開発

### Development of superconducting joints between various reinforced Bi2223 tapes

山口 章, 中井 優亨, 稲葉 勇人, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大);

中島 隆芳, 山崎 浩平 (住友電工)

YAMAGUCHI Sho, INABA Hayato, NAKAI Ukyo, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);  
NAKASHIMA Takayoshi, YAMAZAKI Kouhei (SEI, Ltd)

E-mail: c5623078@aoyama.jp

#### 1. はじめに

Ag シース (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>[Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO<sup>®</sup>[1])は高い臨界電流特性と優れた量産性から、20 T 超の高磁場発生装置を含め様々な超伝導磁石に用いられている[2]。これまでに我々は、補強材のない DI-BSCCO<sup>®</sup> Type H 線材間の超伝導接合技術を確立し[3]、さらに Ni 合金テープ補強高強度 Bi2223 線材 (DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-NX) 間において実用的な接合  $I_c$  を有する超伝導接合の開発に成功したことを報告してきた[4]。これらは JST 未来社会創造事業のもとで得られた成果であり、この事業では、LTS, Bi2223, RE123 の各線材を直列に接合した永久電流 1.3 GHz(30.5 T) NMR 磁石(運転温度 4.2 K)の開発が進められている。特に、数が多い Bi2223 線材間接合では実用的な手法での超伝導接合技術の確立が必須となっている[5]。本研究では接合技術の汎用性をさらに高めることを目的とし、これまで蓄積してきた超伝導接合技術をもとに、より中温域应用到に適した汎用性の高い銅合金補強 (DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-CA) およびステンレス補強 (DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-SS) Bi2223 線材に対する超伝導接合の開発にも取り組み始めた。今回は様々な補強線材間の接合部の微細組織及び 77 K での接合  $I_c$  の関係について調べた結果を、接合  $I_c$  の決定因子、制限因子の考察を含めて報告する。

#### 2. 実験方法

DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-NX 線材間の接合作製では、まず温風加熱と電気分解により補強合金テープとはんだを除去した。この線材を浅い角度 (~0.4°) で傾斜研磨し 121 本の超伝導フィラメントの 6 割程度を露出させその上にスラリーを滴下した。スラリーは Bi2223 仮焼粉末、及びその前駆体粉末を Bi2223 単相粉末と混合し、エタノールとブタノールを加え、ボールミル混合することで調製したものである。溶媒の揮発後、拌み合わせ型形状に組み合わせて接合部を Ag 箔で包んだ。一軸プレス後、3% O<sub>2</sub>/Ar 気流中、830°C, 24 h で一次焼成を行い、中間一軸プレス後に 3% O<sub>2</sub>/Ar 気流中、820°C, 24 h で二次焼成することにより接合試料を得た。一軸プレス圧は線材の破損を考慮して、~150 MPa とした。DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-SS 線材、DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-CA 線材間の接合試料も同じ方法で作製した。得られた接合試料について、直流四端子法により液体窒素浸漬下で接合  $I_c$  を、断面研磨面の SEM 観察により接合部の微細組織を調べた。

#### 3. 実験結果

Fig. 1 に短尺 DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-NX 線材間の接合試料の 77 K における  $I$ - $V$  特性を示す。ノイズは大きいですが、再現性良く高い接合  $I_c$  を示し、4 試料とも ~80 A 以上、うち 3 試料の接合  $I_c$  は 100 A 以上である。Fig. 2 に DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-SS 線材間の接合試料の 77 K における  $I$ - $V$  特性を示す。接合  $I_c$  は 60 A 程度であるが、補強材が変わっても超伝導接合が確認できた。補強材が変わると線材への貼り

付け条件や構造のわずかな違いにより電気分解条件が変わり、これが傾斜研磨やプレス、さらに焼成条件にも影響することから、現在、各プロセスの最適化を進めているところである。当日は、DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-CA 線材間の接合試料の微細組織や通電特性についても報告する。

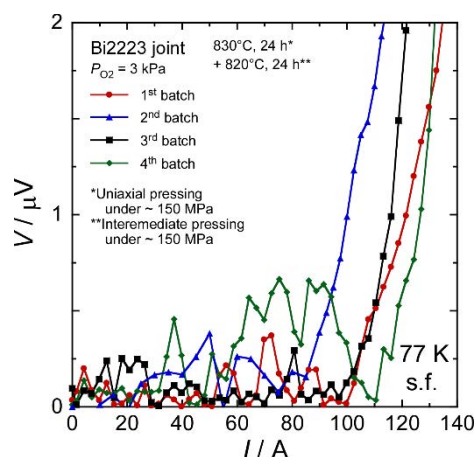


Fig. 1  $I$ - $V$  curves of superconducting joint between DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-NX tapes measured at 77 K in self-field.

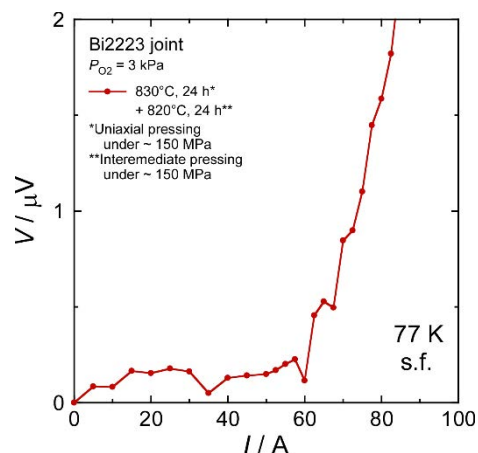


Fig. 2  $I$ - $V$  curves of superconducting joint between DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-SS tapes measured at 77 K in self-field.

#### 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ある。

#### 参考文献

1. N. Ayai *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112
2. T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713-718.
3. Y. Takeda *et al.*, *Appl. Phys. Express* **12** (2019) 023003
4. U. Nakai *et al.*, *Abstract of CSSJ Conf.* **102** (2021) 47.
5. H. Maeda *et al.*, *IEEE TAS* **29** (2019) 4602490

## Ni 合金補強 Bi-2223 線材の超伝導接合抵抗評価

## Resistance evaluation of superconducting joint for Ni-alloy reinforced Bi-2223 tape

武田 泰明, 西島 元 (NIMS); 中井 優亨, 稲葉 勇人, 山口 章, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 北口 仁 (NIMS)  
 TAKEDA Yasuaki, NISHIJIMA Gen (NIMS); NAKAI Ukyo, INABA Hayato, YAMAGUCHI Sho, 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 JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「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」に参画し、1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS NMR マグネット[1,2]の永久電流運転を実現するために、HTS 超伝導接合技術の開発に取り組んでいる。これまでに 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 (住友電工社製 DI-BSCCO<sup>®</sup>) を用いた超伝導接合の形成に成功[3]し、高い臨界電流 ( $I_c$ ) と低い接合抵抗 ( $R_j$ ) を実現した[4]。

従来の Bi-2223 超伝導接合開発においては主に無補強の線材を使っていたが、1.3 GHz NMR マグネットには高強度な Ni 合金補強 Bi-2223 線材 (DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-NX [5]) が使われる。我々は、この線材の補強材料を除去することで超伝導接合が形成できることを報告した[6]。前回までの本学会[7,8]では、この補強線材間接合の  $I_c$  向上手法を議論してきた。今回は、上記の手法で 1 本の補強線材の両端を超伝導接合することで作製したループ試料の接合抵抗を、電流減衰測定により評価した結果を報告する。

## 2. 実験方法

1.6 m 長の 1 本の DI-BSCCO<sup>®</sup> Type HT-NX の両端を、我々が報告してきた手法[3,4,6-8]で超伝導接合し、3 回巻きのループ (直径 100 mm) 試料を作製した。自己インダクタンス ( $L$ ) は、同形状の試料の実測値から 1.4  $\mu$ H 程度と見積もられた。直流四端子法で測定した 77 K (液体窒素浸漬下) 自己磁場での接合  $I_c$  は 1  $\mu$ V 基準で約 100 A であった。

電流減衰測定は、我々が開発した接合抵抗評価装置[9]を用いて行った。試料に流すループ電流 ( $I_{loop}$ ) は、ループの中心に配置した銅コイルを用いて磁氣的に誘導した。磁性コアとホール素子を組み合わせた電流検出器[10]を用いて計測した  $I_{loop}$  の時間 ( $t$ ) 依存性を調べた。 $I_{loop} \propto \exp(-R_j t/L)$  に  $I_{loop}-t$  曲線をフィッティング[4,9,10]することで、 $R_j$  を見積もった。0-1 T の磁場 ( $B$ ) は接合に平行方向[4,10]に印加した。

## 3. 結果と考察

Figure 1 に 4.2 K,  $B = 0.2$  T での測定結果を示す。初期  $I_{loop}$  は 233 A 程度で、 $t = 5$  ks における電流減衰は 0.2 A 以下であった。 $B = 0.2$  T では接合  $I_c$  が  $I_{loop}$  よりも高く、233 A 程度の永久電流がループに流れたことが確かめられた。この  $I_{loop}$  は 1.3 GHz NMR マグネットの設計運転電流[1,2]と同程度である。 $t = 2-3.5$  ks でのフィッティングから  $R_j = 5.6 \times 10^{-14} \Omega$  と見積もられた。この値は上記の NMR マグネットでの HTS の  $R_j$  要求値 ( $< 10^{-12} \Omega$ ) [1,2]を下回っている。

Figure 2 に、4.2 K,  $B = 0-0.3$  T における  $R_j$  の  $B$  依存性を示す。いずれの測定でも、初期  $I_{loop}$  は 233 A 程度であり、 $R_j$  は  $t = 2-3.5$  ks でのフィッティングから見積もった。 $B \leq 0.2$  T では、接合  $I_c > I_{loop}$  によって、 $R_j < 10^{-13} \Omega$  とマグネット応用に適した低抵抗が観測された。一方  $B = 0.3$  T では  $R_j = 6.9 \times 10^{-12} \Omega$  と

高い値であった。測定では、 $t = 3.5$  ks までに 10 A 以上の比較的大きな電流減衰が観測された。これは初期  $I_{loop}$  が接合  $I_c$  よりも高く、電流負荷率 ( $I_{loop}/I_c$ ) が高かったために、 $R_j$  も高くなった[9,10]と解釈される。当日は他の測定結果も示し、Ni 合金補強 Bi-2223 線材間の超伝導接合の物性やマグネット応用の可能性について議論する。

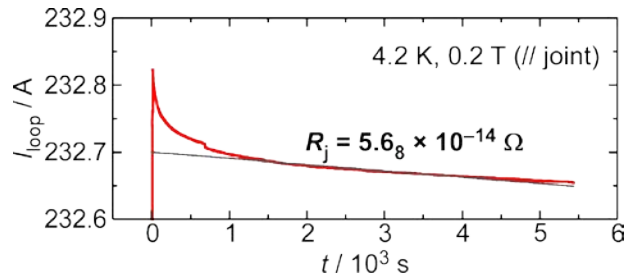


Fig. 1  $I_{loop}-t$  curve obtained by current decay measurements at 4.2 K and  $B = 0.2$  T. Exponential decay curve deduced by fitting data points at  $t = 2-3.5$  ks is also shown.

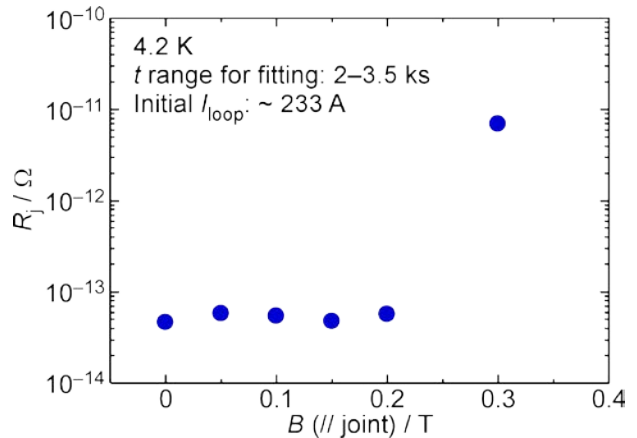


Fig. 2  $B$  dependence of  $R_j$  at 4.2 K. Each  $R_j$  value was deduced by fitting data points of  $t$  and  $I_{loop}$  in current decay measurements.

## 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. H. Maeda *et al.*, *IEEE TAS* **29** (2019) 4602409.
2. Y. Yanagisawa *et al.*, *SuST* **35** (2022) 044006.
3. Y. Takeda *et al.*, *APEX* **12** (2019) 023003.
4. Y. Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 02LT02.
5. T. Nakashima *et al.*, *IEEE TAS* **25** (2015) 6400705.
6. Y. Takeda *et al.*, *IEEE TAS* **32** (2022) 4301005.
7. U. Nakai *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **104** (2022) 80.
8. H. Inaba *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **104** (2022) 81.
9. K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30** (2020) 9000204.
10. K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **32** (2022) 6601404.

# マルチジャンクション法による Bi2223 線材間の接合の臨界電流と コイルの永久電流の測定評価

Measurement and evaluation for critical current of joint between Bi2223 tapes fabricated by multi-junction method and for persistent current of its coil

金沢 新哲(室工大)

KANAZAWA Shintetsu (MIT)

E-mail: shintetsu\_kanazawa@muroran-it.ac.jp

## 1. はじめに

NMR 装置などの永久電流に実用可能な Bi2223 線材間の超伝導接合は、高い臨界電流と  $10^{-12} \Omega$  程度の低抵抗および再現性が高い製造方法などが必要されている。我々が提案した分解溶融法[1]では、Bi2212 相により Bi2223 線材間を接合し、臨界温度と臨界電流を高くするには Bi2223 が Bi2212 に分解溶融する温度付近で加熱する必要がある。そのため、接合時の最高温度は Bi2223 相の分解溶融温度から +5°C 程度の間が良いと思われるが、温度制御のばらつきなどにより毎回の接合でこのような温度範囲内に収まることは難しい。それを解決しようとした方法がマルチジャンクション法[2]であり、複数回にわたって接合することで適切な加熱温度を有する接合体を作製する確率が高い。これにより、高い臨界電流を持つ接合を作製する再現性が向上できる。

これまでは数多くのマルチジャンクションの接合体を作製し、すべて臨界電流の向上が見られ、自己磁場と 77K で最大 50A 程度の臨界電流が測定された。本研究では小型コイルにおいて4連の接合を行い、77K で接合部の臨界電流とコイルの永久電流の実験評価を進めた。

## 2. 実験

Bi2223 テープ線は、住友電工(株)製の DI-BSCCO Type HT-NX (ポリイミドフィルム絶縁あり)を使用した。臨界電流は 77 K、自己磁場で 170 A 程度である。コイルの構造はダブルパンケーキコイルであり、内径は 50mm、ターン数は計 22 ターンである。接合の前処理として、Bi2223 線材の補強材とはんだを除去し、片面のみ Ag 表面にした。接合方法は分解溶融法とマルチジャンクション法を用いて、表1で示した熱処理を実施した。接合は1箇所ずつ行い、最高温度で1分程度保持した。熱処理にかかる時間はほぼ冷却過程であり、100°C 以下になってから次の熱処理を実施した。作製したコイルと接合部を Fig. 1 に示した。

表1 Bi2223 線材間の接合の作製条件

マルチジャンクションの構造	4 連
マルチジャンクションの作製時間	3h × 4 = 12 h
接合時の最高温度(°C)	890
保持時間(min)	1

## 3. 実験結果とまとめ

コイルの接合部の臨界電流を自己磁場で測定した結果、77 K で 50 A であった。これは、線材での4連の接合同じ臨界電流であり、コイルにおいても 50 A レベルを再現できたこととなる。しかし、接合部では補強材を除去したため、耐力性が弱く、測定後に何らかの接触により接合部が折れ曲がった。臨界電流が下がったと思っていたが、再度臨界電流を測定することは難しいと判断し、永久電流の測定を行った。コイルへの通電電流は最大 50 A とし、それから永久電流モードにした。測定結果は、Fig. 2 に示した。最初の2時間までは電流が大きく降下しているが、これは上記の接合部の折り曲げに起因すると考えている。それから、22 時間経過後に 25 A となった。その時の、抵抗は挿入図に示したように  $10^{-11} \Omega$  程度であ

り、NMR 装置などに求められている低抵抗になる可能性が高い。

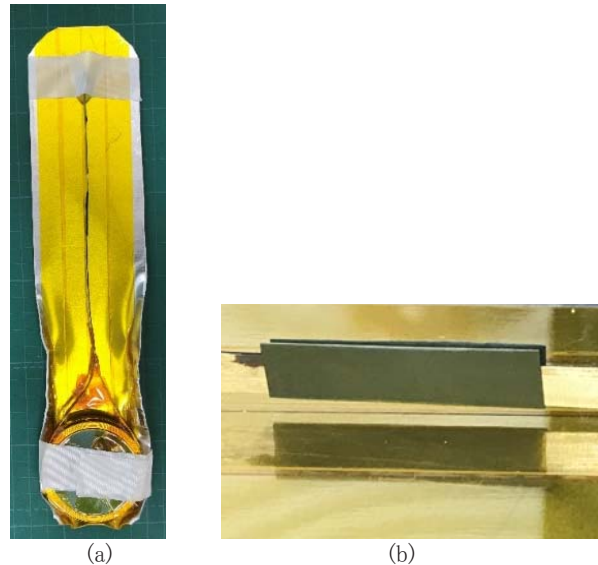


Fig. 1 (a) Bi2223 coil with a joint having 4 junctions (b) picture of one junction wrapped by a Ni sheet.

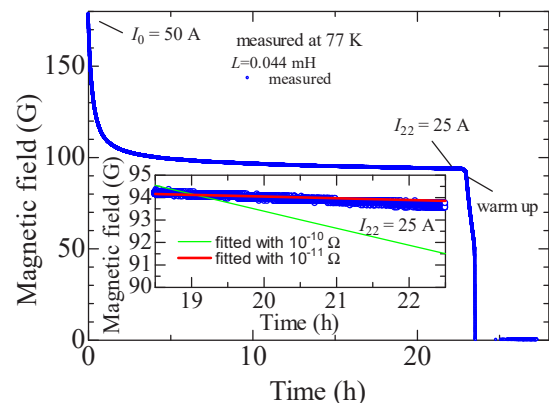


Fig. 2 The magnetic field of coil center.

## 謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業「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」(JPMJMI17A2)の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Xinzhe Jin, et al., Supercond. Sci. Technol. **32** (2019) 035011  
 [2] Shintetsu Kanazawa, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31** (2021) 7000104

# WISE 導体の REBCO テープと電流フィーダーの接続構造に起因する焼損現象の解析 Analysis of burnout phenomena caused by the connection structure between REBCO tapes and current feeder in WISE conductors

成嶋 吉朗、濱口 真司、力石 浩孝、柳 長門 (核融合研、総研大);

DIEGO Garfias-Davalos (総研大); 小野寺優太、馬場智澄 (核融合研)

NARUSHIMA Yoshiro, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAIISHI Hiroataka, YANAGI Nagato (NIFS, SOKENDAI);

GARFIAS-DAVALOS Diego (SOKENDAI); ONODERA Yuta, BABA Tomosumi (NIFS)

E-mail: narushima.yoshiro@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導(HTS)導体のヘリカル型核融合炉マグネットへの適用を目的に、WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes) 導体[1]の研究を進めている。WISE 導体は、単純積層 HTS テープ線材を歪みなく所定のコイル形状に巻き線したのちに低融点金属 U アロイで含浸・固定するため、自由度の高い柔軟なマグネット形状が実現できる特徴がある。

## 2. WISE 導体電流フィーダー部の焼損

WISE 導体の通電試験において、電流フィーダー部の積層 REBCO テープに焼損が発生したことは既に報告されている[2]。電流フィーダー構造を改良し(図 1)再度通電試験を実施した結果、 $T = 20\text{K}$ 、自己磁場条件下において、 $I = 19\text{kA}$  で電流フィーダー部の REBCO テープが焼損した(図 2)。しかしながら超伝導体部分は焼損が無く、健全性が保たれていた[3]。

## 3. 電流フィーダー部の電流密度分布

電流フィーダー部の電流密度分布を有限要素法 (ANSYS) で計算した結果、積層した REBCO テープに流れ込む電流値が非均一になり、根本部分で最大電流値( )を示した(図 3)。この位置は、実験で焼損した箇所と一致する。電流フィーダーと REBCO テープを接続する U アロイの厚みの非均一性が局所的接触抵抗の不均一性を生み出し、積層した REBCO テープの一部分にテープ一枚当たりの臨界電流を越えた電流値が流れたためにクエンチ現象が発生したと考えられる。以上の結果から、WISE 導体における焼損現象は、電流フィーダーと REBCO テープとの接続構造に起因するものであると考えられる。

## 4. まとめ

WISE 導体において、電流フィーダー部の焼損問題が明らかになった。また、ANSYS による電流密度分布の計算から、焼損箇所において、積層 REBCO テープに流れ込む電流値が非均一であることが示された。この結果から、接続構造に問題があることが示唆された。今後の課題として、接続構造を改善し、電流の不均一を解消することが必要である。例えば、電流フィーダーと REBCO テープとの接続面の距離を一様にする事で、電流の分布を均一化することができる。

本研究は核融合科学研究所予算(UFPP001)により実施された。

## 参考文献

1. 宮澤順一 他 特許第 6749541 号
2. Y. Narushima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.115
3. Y. Narushima, et al.: "Characteristics and causes of voltage observed at the current feeder of high-temperature superconducting WISE conductor", Journal of Physics: Conference Series, Accepted

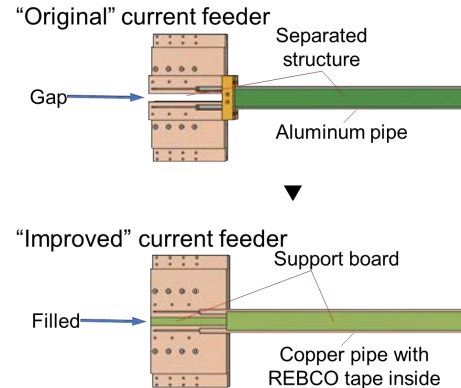


Fig. 1. Improved current feeder structure using the integrated support board structure.



Fig. 2. Burned REBCO tape. The root of the left side was burnt to torn off.

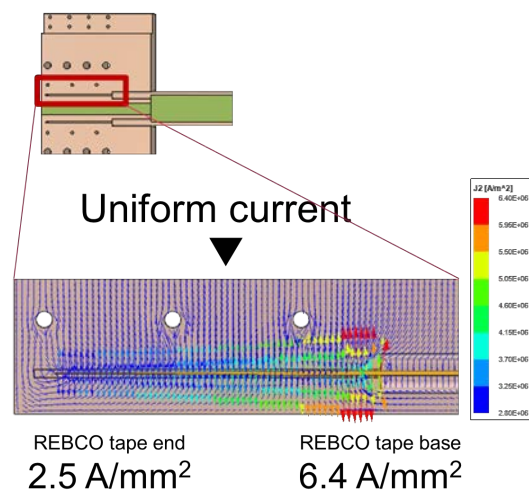


Fig. 3. Current density distribution inside the current feeder, with the maximum current flowing in at the base of the REBCO tape.



# REBCO 長尺線材における局所 $I_c$ 不均一性に係る統計性に関する 機械学習画像分類を用いた考察

## Statistical consideration on local $I_c$ inhomogeneity in long REBCO coated conductors based on ML image classification

木須 隆暢, 呉 澤宇, SOMJAIJAROEN Natthawiro, 寺崎 拓也, 今村 和孝, 東川 甲平 (九州大学)  
 KISS Takanobu, WU Zeyu, SOMJAIJAROEN Natthawiro, TERAZAKI Takuya, IMAMURA Kazutaka, HIGASHIKAWA Kohei  
 (Kyushu University)  
 E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

長尺の REBCO 線材における臨界電流 ( $I_c$ ) は、仕様で与えられた一定値ではなく、様々な因子によって変動する。工業材料として、その統計事象の把握は線材の特性を記述する上において極めて重要であるにもかかわらず、まだ十分に解明されていない。一般に、長尺線材の統計的な  $I_c$  分布の記述は、正規分布を用いた取扱が広く行われており、 $I_c$  の平均値と分散が重要視される。しかしながら、正規分布の背景にある局所不均一性の発生因子は無記憶性で偶発的なものなのか否かについては十分な検証が行われていない。我々は、先行研究において、長尺線材の磁気顕微鏡観察によって局所  $I_c$  低下部位を計測すると共に、機械学習によって欠陥画像を分類する手法を確立した。本研究では、本解析結果を用いて、欠陥の発生についてその統計事象を解析し、欠陥間の距離の分布や欠陥頻度分布について調べた。

### 2. 長尺 REBCO 線材の連続磁気計測と欠陥検出

本研究では、市販の IBA PLD 法による 200 m 長のテープ線材を試料として用い、我々の研究室で開発したリール式高速磁気顕微鏡観察により、テープ面内の磁化電流の分布を取得した。さらに、当該電流マップに対して、機械学習を用いて画像分類モデルを開発し、局所  $I_c$  低下部位の自動検出を行った[1]。Fig. 1 に検出結果の一例を示す。本線材の場合、200 m 全長において約 750 の該当箇所が検出された。なお、ここで定義した局所低  $I_c$  部位とは、バックグラウンドの  $I_c$  のバラツキに対して有意に局所的に  $I_c$  の低下が見られる部位を指しており、extrinsic な効果により  $I_c$  の低下を引き起こしていると考えられる部位であり、必ずしも  $I_c$  の絶対値が低いというわけではない。したがって、一般的な局所  $I_c$  を基準とした検出では、欠陥部位としては認識されない部位であり、応用によっては、これらの部位がすぐさまボトルネックとなる分けではない事に注意されたい

### 3. 局所 $I_c$ 低下位置の偶発性に関する検討

前述した自動解析の結果、長尺線における局所  $I_c$  低下部位の挙動の詳細について調べる事が可能となった。局所  $I_c$  低下部位の長手位置を線材全長でマークした結果を Fig. 2(a) に示す。欠陥の発生位置に粗密が見られることが分かる。ここでは、隣り合う局所  $I_c$  低下位置の間隔に着目してその統計性について調べてみた。局所  $I_c$  低下部位間隔に対してその発生確率をプロットすると、同図(b)に示す様にべき乗の関係がある事を見出した。あるイベントと次のイベントが全く無関係に(無記憶に)偶発的に起こるとすると、イベント間の距離の発生確率は、距離に対して、常に一定の危険率で発生するため、指数関数分布になると考えられる。しかしながら、本実験結果はある局所  $I_c$  の低下が次の局所  $I_c$  低下の発生に影響を及ぼしており、偶発的な物ではないことを示している。これは、局所  $I_c$  低下の発生因子の発生機構を検討する上においても重要な知見といえる。

この事はまた、局所  $I_c$  の統計分布が、ランダムな欠陥発生

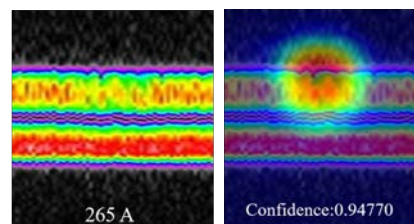
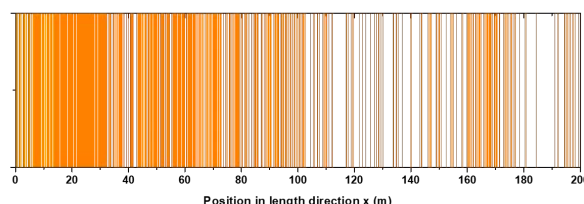
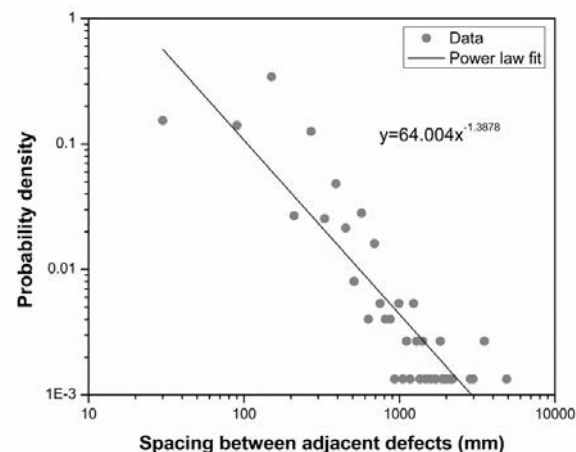


Fig. 1 Example of automatic detection of local  $I_c$  drop realized by ML based image classification [1].



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Position of local  $I_c$  drop and (b) probability the spacing between them.

の帰結としての正規分布ではなく、低  $I_c$  側にテイルを有する様な、非対称な分布となっていることとも対応している。したがって、REBCO 線材の実用上の観点からは、低  $I_c$  側のテイル近傍の閾値の挙動に着目すべきである事を強く示唆していると言える。

### 謝辞

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

### 参考文献

[1] N. Somjajaroen et al., IEEE TAS, Vol. 32, 6601504, 2022.

# 導電性マイクロパスを設けた REBCO 高温超伝導線材の開発

## Development of REBCO high $T_c$ coated conductor with conductive micro-path

吉田 隆, 長田 智樹, 坂井 巖, 山崎 春太朗, 山田 寛之(名大); 土屋 雄司(東北大); 三戸 利行, 小野寺 優太, 平野 直樹(核融合研)  
 YOSHIDA Yutaka, OSADA Tomoki, SAKAI Itsuki, YAMAZAKI Shuntarou, YAMADA Hiroyuki (Nagoya Univ.); TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.);  
 MITO Toshiyuki, ONODERA Yuta, Naoki Hirano (NIFS)  
 E-mail: yoshida@nuce.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

クリーンな新エネルギーとして期待されている核融合発電では、現在プラズマ閉じ込め用コイルとして  $Nb_3Sn$  等の低温超伝導体が主に使用されている。さらに、小型核融合炉の実現に向けて、強磁場発生が可能な  $REBa_2Cu_3O_y$  (REBCO) 高温超伝導体が期待されており、REBCO 線材を数十本積層して大電流化した REBCO 積層導体が研究されている。これらの REBCO 積層導体では導体内に局所的な損傷部分が発生した場合、導体が焼損するという課題がある。この導体の焼損は、線材間での電流の乗り移り、転流の発生により局所的劣化部分を迂回して電流が流れることで防止できると考えられる。しかし、従来の REBCO 積層導体では、絶縁層である中間層が線材間を絶縁するため転流が発生しない。そこで、本研究では導体の焼損防止のために線材間での転流の発生を目的として、線材間におけるマイクロメートルオーダーの微細な電流パス(導電性マイクロパス)を REBCO 線材中に作製した。さらにその電気特性評価などにより転流評価を行う。

### 2. 実験方法

図 1 に導電性マイクロパス作製方法の概念図を示す。導電性マイクロパス作製は、はじめに UV レーザーマーカー(Kokyo 製)を用いて超伝導市販線材の超伝導層側から 3 倍波の Nd レーザーを照射し加工を行う。なお、高温超伝導線材は人工ピン入り市販線材(FESC-S12(フジクラ製)及び ST-12-500-10(Super-0x 製))を用いた。さらにマグネトロンスパッタリング装置を用いて Ag を  $3\mu m$  堆積し、導電性マイクロパスを作製した。作製したパスは走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分光分析器を用いて観察、評価を行った。また、マイクロパス導入による超伝導特性は直流四端子法を用いて評価した。

導電性マイクロパス導入線材は 10 cm 程度の短尺線材及び 50cm 程度の中尺線材を作製して転流試験などの評価を行った。その際超伝導線材間には高純度 Al シートを設置した。なお、使用した超伝導線材の幅は指定の大きさにレーザーで加工し、プレートの上に積層させた線材を載せ、その上から抑え棒をコマでボルト締めして押し付けることでサンプルを圧着した。電圧端子は上側の超伝導線材(上部線材)に複数個圧着した。直流電源装置( $\sim 500$  A)を用いて下側の超伝導線材(下部線材)に電流を  $0.1\sim 10.0$  A/s で増加させながら印可し、電圧変化を測定する。

### 3. 実験結果及び考察

導電性マイクロパス導入中尺 REBCO 線材を積層し、液体窒素中で転流試験を行った。下部線材に導電性マイクロパスを用いない場合、異なる上部線材の長さの REBCO 線材を用いた場合及びブリッジ幅の長さを変化させた場合の検討を行った。図 2 に線

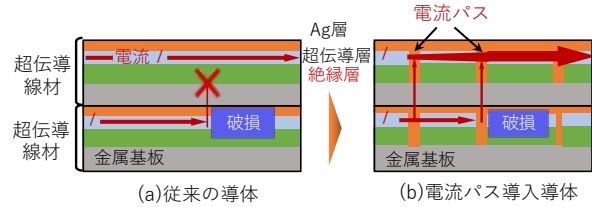


Fig. 1 Conceptual diagram of commutation between REBCO tapes (a) Conventional method (b) Proposal by conductive micro-path.

材間転流試験の結果を示す。導電性マイクロパスがない REBCO テープは、図 2(a)に示すように、 $I/I_c < 0.8$ では、電流が臨界電流以下であるため、全ての電圧タップの電圧は  $10^{-7}$  V 程度であり、ノイズ電圧のみが観測された。 $I/I_c > 0.8$ では、テープ 1 のブリッジの電圧が上昇したため、 $V_A$ 、 $V_{T1}$ 、 $V_{T2}$  が上昇した。電圧タップ A で測定した  $n$  値は  $I/I_c \cong 1.0$ において 23.9 であった。一方、Tape 2 に取り付けられた他の電圧タップでは、 $10^{-7}$  V 程度の電圧となり、ノイズ電圧のみが観測された。 $I/I_c \cong 1.05$ において全ての電圧タップの電圧が急激に上昇して、テープ 1 は焼損した。

図 2 (b) の導電性マイクロパスを持つ REBCO テープでは、 $I/I_c < 1.0$ で電圧が上昇するまで、図 2 (a)と同様の特性が観察された。電圧タップ A で測定した  $n$  値は、 $0.8 < I/I_c < 1.1$ において 20.6 であった。 $I/I_c > 1.1$ では、以下に述べるように異なる挙動が見られた。 $1.1 < I/I_c < 1.15$ では、 $I/I_c \cong 1.1$ で急激に電圧が上昇した後、 $V_A$ 、 $V_{T1}$ 、 $V_{T2}$  の上昇が  $10^{-2}$  V 程度で緩やかになった。 $V_{R1}$  の電圧上昇も  $10^{-5}$  V 程度で緩やかになった。これらの電圧は図 2 では一定に見えるが、実際は直線的に上昇した。これはテープ 1 に印加する電流が増加してもブリッジを流れる電流が一定になったためである。以上のことから、 $1.1 < I/I_c < 1.15$ でテープ 1 からテープ 2 へ線材間転流が発生したと考えられる。

### 謝辞

本研究の一部は NIFS 共同研究 (NIFS21KECA090, NIFS21KOB034) 科学研究費補助金 (20H02682、21H01872)、NEDO、天田財団、大倉和親記念財団、日比科学技術振興財団からの助成を受けて実施した成果である。

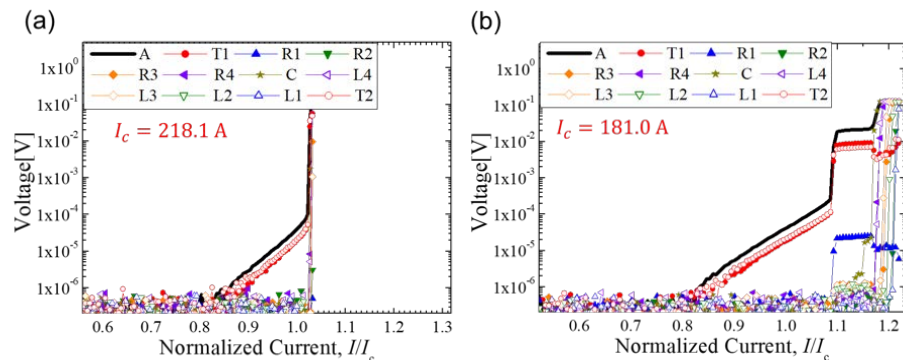


Fig. 2 The current dependence of the voltage in the REBCO tapes (a) without and (b) with the conductive micro-paths. The horizontal axes are normalized by the critical current of the bridge part of Tape 1.

## 単純積層 HTS 導体における電流分布へのインダクタンスの影響 Inductance Influence in Current Distribution for Simple-Stacking HTS Conductors

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

For high-current High-Temperature Superconducting (HTS) cables, a non-twisted and simple-stacking design approach is under exploration at NIFS, making use of ReBCO tapes [1, 2]. Simple-stacking is mechanically robust and simplifies the manufacturing process, intended specially for DC operation in fusion magnet applications.

An experiment for a short and straight (length: 1.3 m) simple-stacking HTS cable, confirmed stable operation under the worst-case scenario of non-uniform current, produced by current feeding from one side of the five-tape stack, and a numerical calculation was performed for comparison [3, 4]. Though this result may suggest that a longer-length HTS cable in a magnet could be also operated stably despite the non-uniform current formation by the inductance variation across HTS tapes, it should be confirmed more quantitatively.

### 2. Magnetic Field Decay in STARS

A 20-kA-class STARS conductor (length: 6 m), 3-turn coil experiment has been performed, confirming stable operation with 18 kA, 8T, 20K, under 200 repetition cycles, with a fast ramp-rate of 1 kA/s.

A non-uniform current formation due to the inductance variation among the REBCO tapes was inferred by the observation of a residual magnetic field, suggesting circulating currents that decay inside the conductor, with a dependence on the current ramp rate. In the second experimental phase, additional magnetic sensors were placed to further investigate the magnetic field decay (Fig. 1).

### 3. RL Numerical Model

A numerical calculation for the current distribution was developed, accounting the inductance variation among the stacked tapes and mutual inductance between them.

Under a magnetic shielding assumption, the magnetic field was computed according to the current distribution computed (Fig. 2), getting insights for the current transfer among HTS tapes, source of the circulating currents expected to be the cause of the magnetic field decay.

An additional HTS solenoid experiment is ongoing, to explore the circulating currents in an inductance-enhanced case. Plates that compress the HTS can be used to modify the contact resistance between them, to explore additional scenarios in how current can redistribute among HTS tapes.

### References

- [1] N. Yanagi et al. “Magnet design with 100-kA HTS STARS conductors for the helical fusion reactor”. *Cryogenics* 80 (2016), p. 243-249.  
[2] Y. Narushima et al. “Test of 10 kA-Class HTS WISE Conductor in High Magnetic Field Facility”. *Plasma and Fusion Research* 17 (2022), p. 2405006.  
[3] T. A. J. Meulenbroeks et al. “Observation of a non-uniform current distribution in stacked high temperature

superconducting tapes”. *Journal of Physics Conference Series* 1293 (2019), p. 012065.

[4] D. Garfias-Dávalos et al. “Simulation of non-uniform current distribution in stacked HTS tapes”. *Plasma and Fusion Research* 17 (2022), p. 2405066.

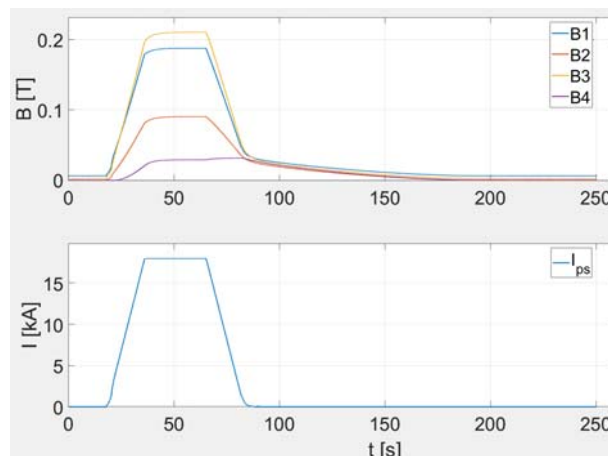


Fig.1 Magnetic field measurement for STARS conductor. Maximum current is 18 kA, no background magnetic field, temperature of 20 K, and ramp rate of 1 kA/s. The magnetic field decay can be observed to last for around 100 seconds, after the input current is zero.

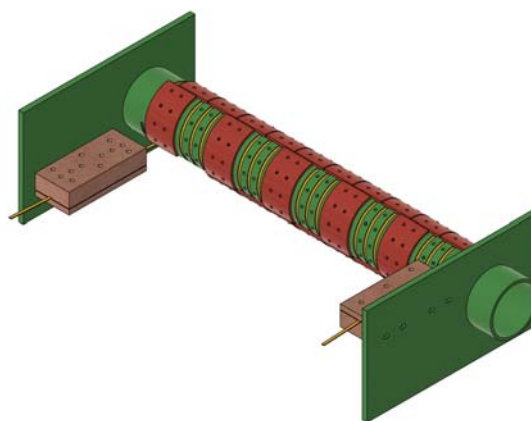


Fig. 2 HTS solenoid experiment (30 turns, diameter: 100 mm, length: 625 mm). HTS tapes follow a helical path carved in the bobbin, while pressed by plates (in orange, some plates hidden for visibility of HTS tapes). Current leads include options to feed the current in a uniform or worst-case scenario.

## 国際超電導直流送電プロジェクトと標準化の検討 (1)

### International SCDC Power Transmission and Proposal of Its Standardization (1)

長村光造(応用科研); 三戸利行(核融合研); 松下照男(九工大); 西島元(物材研究); 筑本知子(中部大);  
早川直樹(名古屋大); 富田優(鉄道総研); 大屋正義(関学院大); 向山晋一(電線工業会)  
OSAMURA Kozo(RIAS); MITO Toshiyuki(NIFS); MATSUSHITA Teruo(KIT); NISHIJIM Gen(NIMS);  
CHIKUMOTO Tomoko(Chubu Univ); HAYAKAWA Naoki(Nagoya Univ); TOMITA Suguru(RTRI);  
OHYA Masayoshi(Kansei Univ); MUKOHYAMA Shinichi(Jap EWCMA)  
E-mail: kozo\_osamura@rias.or.jp

#### 1. はじめに

SDGs(持続可能な開発目標)に向けて電気エネルギーシステムの再構築を考慮する時期に来ている。

自然エネルギーとしては風力発電、水力発電等があるが、これらは 2 次エネルギーと位置付けることができる。太陽系における 1 次エネルギーである直接の太陽光エネルギーの有効活用は必須であり、地球全体で太陽光エネルギーを効率的に受容するためには電気エネルギーに変換して、昼夜による電気エネルギーの使用を平準化することが望まれる。その実現のためには地球規模の送電網を構築することである。

現状では電力送電の主要幹線には AI 等の常伝導導体が使われている。それらの金属導体の電気抵抗は小さいといえども非常に超長距離の送電ではジュール損を無視することはできない。長距離送電には電気抵抗がほぼゼロに近い超電導直流送電が不可欠となる。超電導直流送電によりすべての発電電力を世界で平準化できるので、つまり同時同量性が担保され、電力貯蔵の問題は軽減される。

本提案ではアジア-欧州間の電力送電をモデルケースとして、想定される必要電力量を送電するために要求される超電導直流送電網の要件を考察し、基礎となる実用超電導線の特性、資源量、製造コスト、関連する諸技術の要求特性等を試算し、その実現性を提案する。

さらにかかる世界規模の事業の実現のためには国際的な技術協力が不可欠である。そのシステムとして国際電気標準会議(IEC)の国際標準化の活動のもとで実現するのが現実的であることを説明する。

#### 2. 調査方法

現状では大電力の送電には超高压直流(HVDC)送電が行われているが、その概要と電力損失の発生について調査を行った。さらに同量の電力を超電導直流送電(SCDC)によって実現する場合の技術的課題と将来における地球温暖化解決策の有効な工業技術として成立するのかが検討を行う。さらに IEC での国際標準化の具体的な課題と協力関係の実現性について可能性を模索する。

#### 3. 調査結果と考察 (1)

IEC では 2009 年に UHV 送電技術について 1100kV を標準電圧として国際規格に認定している。例えばアジアからヨーロッパまで 20 万 km に及ぶ長距離に 10GW 規模の直流電力を送電する例を考察してみた。大電流送電にはアルミニウム導体を用いられるので、ジュール損は  $t$  [s] 時間あたり  $2 \times 10^{13} t$  [J] と見積もられ、この発熱量は地球上の大気温度上昇に有意な影響を与えることが推論された。たとえば我が国と同程度の電力を世界中で使用すると 7 年間で約 0.1 K の大気温度の上昇が見込まれることになる。超電導ケーブルによってもジュール損はゼロではないが考慮する必要性が無いほどに小さい。

大電力の送電のために超電導直流送電ケーブル網を建設するためには、石狩プロジェクト[1]を参考にすると表1に示すように多岐にわたる検討すべき技術的課題がある。10GW の

電力を送電することを前提にして、現状の技術および開発すべき技術について調査・検討を行った。今回の報告では主に課題1, 2についての検討結果を報告する。

現状の BSCCO, REBCO テープの臨界電流は 200A 程度である。電圧を 1100kV とすれば電流は 9.1kA であり、超電導ケーブルの特徴を考慮して電圧を 10kV とすれば電流は 1000kA となる。

Table 1 Technical issues for realizing the SCDC power transmission

1	複合超電導線の改質、最適設計と接合技術
2	Sub-Cable の最適設計と spiral bending 設計
3	Cable と sub-cable の組合せ、設置方法、接続方法 およびケーブルによる送電電力、電圧、電流の最適条件
4	ケーブル保護協調に必要な Current Limiter, および DC circuit breaker の電気容量、電力変動の応答特性
5	Current Lead: 超電導ケーブル端末における電源との接続方法
6	Outer Tube; Sub-cable 被覆管の設計、電気絶縁、熱絶縁
7	冷却システムの最適設計、冷媒の選定、冷媒循環、冷媒貯蔵
8	電力変換に関する DC/AC, DC/DC 変換方式
9	外部電力系統との連携、
10	ケーブル設置環境、環境負荷

いずれの条件でも現状の技術では大量の超電導線が必要である等の困難があり送電電力量は抑えられることになる。ただ現状の BSCCO, REBCO テープには潜在的なポテンシャルがあり、どの程度の改質が必要か検討した。

ここではテープ線材を 1 条の線に組み合わせたものを sub-cable とよび、さらに全体を cable と呼んでいるが所要の電流を確保するためには、これらの HTSC テープ線材を 50~5000 枚組み合わせることになり、spiral bending における誘導磁場低減、テープ接続等の技術に新たな開発が不可欠となる。ここで flatwise および edgewise 曲げの効果について検討した。

[1] S. Yamaguchi et al: Abstracts of CSSJ Conference, Vol 88 (2013) p.23.

# 導電性エポキシを用いた intra-Layer No-insulation (LNI) REBCO コイルの層間接触抵抗率の安定性

## The stability of inter-layer contact resistivity for intra-Layer No-insulation (LNI) REBCO coils with conductive epoxy

田中 湧也(上智大); 末富 佑\*(理研); 高尾 智明(上智大); 小林 賢介, 柳澤 吉紀(理研)

TANAKA Yuya (Sophia Univ.); SUETOMI Yu\* (RIKEN); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

KOBAYASHI Kensuke, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN)

E-mail: y-tanaka-6d9@eagle.sophia.ac.jp

### 1. はじめに

我々はNMR装置のより広範な普及に向け、小型・永久電流・液体ヘリウムフリーAll-HTS NMRマグネットに向けた技術開発を始めている<sup>[1]</sup>。このようなマグネットには、(1) $J_{\text{overall}} > 300 \text{ A/mm}^2$ を超える高電流密度運転時のクエンチ保護性、(2)高温超電導接合による永久電流回路、(3)短時間の冷却を実現する効率的な伝導冷却パスが必要とされる。片面絶縁の銅シートをレイヤー間に挿入するintra-Layer No-Insulation (LNI)<sup>[2]</sup> REBCOコイルは、高電流密度クエンチに対する自己保護性、永久電流コイルに適したレイヤー巻、銅シートを伝導冷却パスとして利用できる、という特徴を持つため、この種のマグネットに適している。

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( $\rho_{\text{ct}}$ )に大きく影響を受ける<sup>[3]</sup>。特に開発を目指すNMR用コイルにおいては、(i)100 mΩcm<sup>2</sup>級の超高抵抗率を得ること、(ii)サーマルサイクル・大電流・電磁力の経験下でも接触状態が安定して保持されること、が必要である。これらの観点から、導電性エポキシを用いた超高抵抗の接触界面形成に着手し、前回の学会で基本的な実証結果を示した<sup>[4]</sup>。今回は、接触圧力や通電電流に対する $\rho_{\text{ct}}$ の安定性を、単純な接触界面と比較しながら調べた。

### 2. 実験方法

Fig. 1にREBCO線材 (SuperPower, SCS4050) を用いて作成した接触抵抗率評価試験系の模式図を示す。エポキシ樹脂 (CTD-521) にフィラーとして銅粉を混ぜた導電性エポキシで線材間を接着し、外周側線材に荷重をかけた状態で凝固させた。液体窒素浸漬下で通電し、抵抗値 ( $=V_{\text{contact}}/I$ ) と接着面積 $A_{\text{contact}}$ を掛け合わせたものを $\rho_{\text{ct}}$ として定義した。

### 3. 実験結果

Fig. 2に張力すなわち接触圧力に対する $\rho_{\text{ct}}$ の変化を示す。ドライサンプル(▲/△)では、接触圧力の増加に伴って、 $\rho_{\text{ct}}$ が2桁も減少している。一方、導電性エポキシサンプル(■/□)では、接触圧力に対して $\rho_{\text{ct}}$ が一定である。ドライサンプルでは圧力によりミクロな接触界面、すなわち電流パスが増加しているのに対し、導電性エポキシサンプルではフィラーを含めた接触界面・電流パスが圧力下でも保持されているためと考えられる。

次に、通電電流に対する $\rho_{\text{ct}}$ の変化をFig. 3に示す。ドライサンプル(▲)では、通電電流の増加に伴って、 $\rho_{\text{ct}}$ が1桁も減少する。原因は定かでないが、線材表面に形成された酸化被膜(酸化銅)を持つ非線形電流-電圧特性によるものである可能性がある<sup>[5]</sup>。対して、導電性エポキシサンプル(■)では、 $\rho_{\text{ct}}$ は通電電流に依存せず一定で、オームの法則が成り立っている。

### 4. まとめ

導電性エポキシで接触界面を形成することにより、 $\rho_{\text{ct}}$ は接触圧力・通電電流に対して安定した値を示す。これらは、コ

イルにおける $\rho_{\text{ct}}$ 制御の観点から優れた特性である。一方で、今回の実験サンプルの $\rho_{\text{ct}}$ の値は、クエンチ保護に必要とされる100 mΩcm<sup>2</sup>級の抵抗値と比べて数桁小さい。今後、界面の安定性を備えた超高抵抗界面抵抗を得る手法の開発を進める。

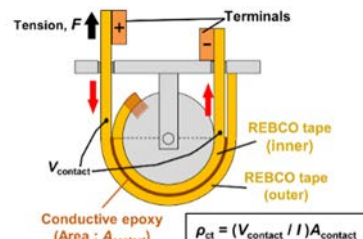


Fig. 1 Schematic illustration of the test setup

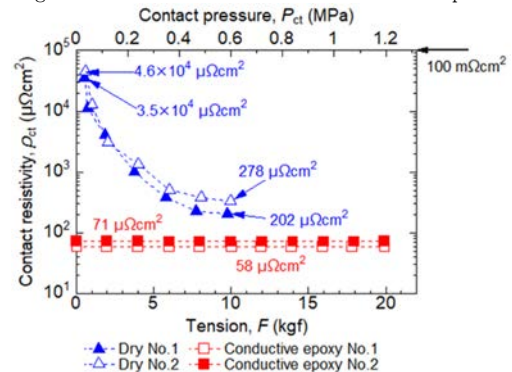


Fig. 2 Contact resistivity versus tension<sup>[6]</sup>

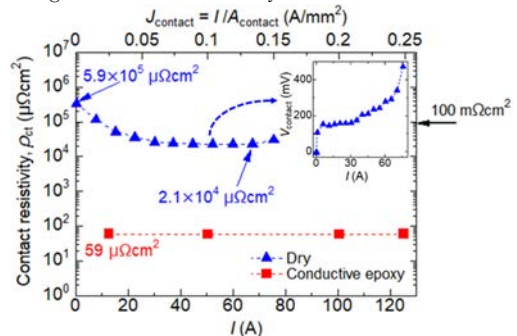


Fig. 3 Contact resistivity versus supply current

本研究は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., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 64
- [2] Y. Suetomi et al., SuST, 32 045003 (2019)
- [3] Y. Suetomi et al., SuST, 34 064003 (2021)
- [4] Y. Tanaka et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 65
- [5] T. Tamai et al., T.IEE Jpn A, Vol. 93 (1973) p.237-244
- [6] K. Takahashi et al., IEEE TAS, 32 6 (2022)

## 並列高温超電導導体を用いた無絶縁コイルの外部磁場変動時の電流挙動と熱的安定性

## Current Behavior and Thermal stability of No-Insulation Coils with Parallel HTS Conductors under External Magnetic Field Fluctuation

大池 章太, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔(千葉大学); 長崎 陽, 津田 理(東北大学)

OIKE Shota, KOBAYASHI Hiroyasu, SAOTOME Hideo, MIYAGI Daisuke (Chiba Univ.); NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)  
E-mail: shotaaaa.1114@chiba-u.jp

## 1. はじめに

無絶縁コイル(NI コイル)の課題である励磁遅れを低減するコイルとして、素線間絶縁のない並列高温超電導導体を用いたNIコイルが提案されている[1]。NIコイルの応用として、NMR等の高磁場マグネットの内挿コイルが考えられるが、外挿コイルがクエンチを起こした際の内挿NIコイルの電流挙動や熱的挙動は明らかにされていない。本論文では、外部磁場変動時におけるNIコイルの電流挙動が熱的安定性に及ぼす影響を評価するために、部分要素等価回路(PEEC)モデル[2]により電流分布解析を行う。なお、本検討は外部磁場変動時の電流挙動に関する基礎検討であるため、運転電流を0Aとして解析を実施する。

## 2. 解析モデル及び解析方法

NIコイルのモデル化において、高温超電導導体のE-J特性にはn値モデルを用い、臨界電流 $I_c$ の磁場・角度・温度依存性[3]を考慮して数値解析を行った。温度分布解析は、二次元円筒座標系熱伝導方程式を用いた。境界条件は、コイル表面で熱の出入りの無い断熱条件とした。解析における並列高温超電導導体を用いたNIコイルの諸元、及び解析条件をTable 1へ示す。NIコイルに加わる外部磁場の大きさは10Tとし、外部磁場は100T/sで減少するものとした。

## 3. 解析結果

外部磁場1%(0.1T)減少時におけるModel Aの周方向電流分布をFig. 1に、温度分布をFig. 2にそれぞれ示す。Fig. 1より、最内ターンでは最内層で、最外ターンでは最外層に最も大きい誘導電流が確認できる。なお、NIコイルにおける誘導電流は、コイル内の1ターンで流れるため、ループが閉じる部分付近のターン間接触抵抗に周方向電流が集中する(Fig. 1では、1ターン目と2ターン目および9ターン目と10ターン目の間)。その結果、Fig. 2のように局所的な温度上昇がみられる温度分布になった。Model Aでは、最大温度上昇は376.8Kであり、Model BおよびCでは、それぞれ501.4K、649.4Kであった。Fig. 3に外部磁場1%減少時におけるModel A~Cの周方向電流分布を示す。なお、Fig. 3では、各ターンの分割区間毎に並列導体を流れる周方向電流の総和を示している。Fig. 3より、並列数が増えるとともに誘導電流が増加することが分かる。Fig. 1で述べた通り、誘導電流が流れるループが閉じる部分付近のターン間接触抵抗への電流集中が発熱の主要因であることから、誘導電流が最も大きいModel Cにおいて、発熱が最も大きくなった。

以上より、並列高温超電導導体を用いた無絶縁コイルについて、3並列の場合でも外部磁場変動時には誘導電流が流れるループが閉じる部分付近で、臨界温度を超えた温度に達する。

## 参考文献

1. J. Geng, et al.: Supercond. Sci. Technol., 32 (8) (2019).
2. Tao Wang et al., IEEE vol.25, no.3 2015A.

Table 1. Specifications and analysis conditions of NI coil.

Model	A	B	C
Number of parallel layers	3	6	10
Number of turns	10	5	3
$I_c$ [A] at $B_{\perp} = 0.4$ [T], 30 K	356.3		
Divisions per turn	10		
Tape width [mm]	4		
Tape thickness [mm]	0.16		
n value	33		
Coil i.d. [m]	0.5		
Applied magnetic field $B_{ex}$ [T]	10		
Decrease rate of $B_{ex}$ [T/s]	100		

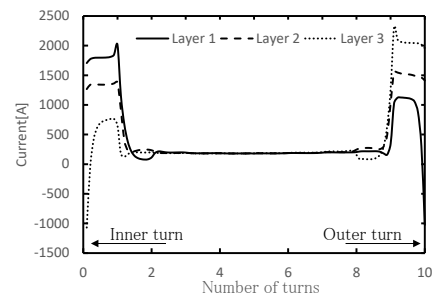


Fig. 1 Circumferential current distribution in Model A when the external magnetic field is reduced by 1%.

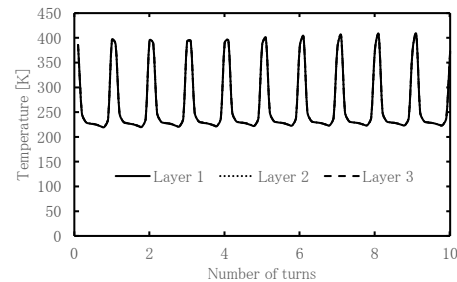


Fig. 2 Temperature distribution when the external magnetic field is reduced by 1% in Model A.

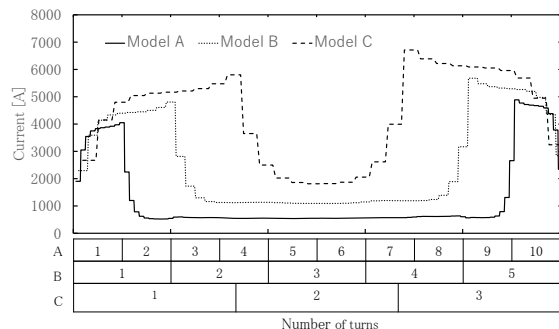


Fig. 3 Sum of circumferential currents in each model when the external magnetic field is reduced by 1%.

3. Selvamianickam, V et al., Superconductor Science and Technology 25.12 (2012)

# 超伝導導体の回復電流に対する外部磁場分布の影響

## Effect of magnetic field distribution on recovery current of a superconductor

今川信作 (NIFS)  
 IMAGAWA Shinsaku (NIFS)  
 E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

冷却安定な浸漬冷却コイルは、導体の回復電流が運転電流よりも高いことが基本となる。導体性能試験においては、通電した試験サンプルを外部加熱によって常伝導に転移させてから、通電電流値を緩やかに低下し、超伝導に回復する電流値を回復電流とすることが一般的である。この際に、常伝導部の温度分布の特性長に対して外部磁場の範囲が十分に長くない場合、常伝導中央部の温度が発熱と冷却の平衡温度よりも低い値に留まり、真の回復電流よりも高い電流値で超伝導に回復してしまう(図1参照)。本研究では、大型ヘリカル装置のヘリカルコイル導体を例として、回復電流に対する外部磁場分布の影響を解析的に評価し、さらに、一般化を試みる。

### 2. 回復電流に対する磁場分布影響の解析的評価

核融合科学研究所の大型導体導体試験装置のスプリットコイルの磁場分布は図2に示すように、放物線に近い分布である。また、有限長さの発熱体の温度分布を発熱一定の条件で計算すると、常伝導長さが熱的な特徴長さの4倍程度までは放物線分布と見なすことができる。熱的な特徴長さ $\Gamma = (kA/hp)^{0.5}$  (A: 断面積, p: ペリメータ, k: 熱伝導率, h: 熱伝達係数)を導体露出率0.5, 外部磁場7 Tの場合で概算すると,  $A = 224.4 \text{ mm}^2$ ,  $p = 61 \text{ mm}$ ,  $k \sim 2000 \text{ W/m/K}$ ,  $h \sim 150 \text{ W/m}^2/\text{K}$ なので,  $\Gamma \sim 0.22 \text{ m}$ となる。回復電流に近い電流値での常伝導長さは0.5 m程度なので、温度分布は放物線と見なすことができる。磁場分布と導体温度分布を相似と見なすことができる場合は、磁場依存性を考慮した発熱項積分が可能である[1]。短導体試験および一様磁場における回復電流を解析的に求めた結果を図3に示す。短尺導体試験では、回復電流が一様磁場中よりも15-20%高くなることが予測された。

### 3. 回復電流の数値解析結果

前述の解析で用いた温度分布は、発熱一様として求めたもので、電流分流域と磁場分布を考慮していない。この解析解の妥当性を確認するため、有限差分法を用いて回復電流の解析を行った。解析モデルは、導体内部の温度分布を無視して1次元モデルとした。磁場中心から片方向に約1 mのモデルとし、分割ピッチ長1 mmで、680 mmまでは27 mm毎に断熱と冷却を繰り返し、680 mmから986 mmは全面冷却として両端部は断熱条件とした。計算では、磁場を固定し、各電流値で平衡温度となるまで繰り返して計算を行い、電流値を0.1 kA刻みで減少させて超伝導に回復する電流値を求めた。各電流値における初期温度は、前の電流値での平衡温度を用いた。この条件で平衡温度に達する時間は、1.5 s程度である。13.4 kA, 7.0 Tでの回復過程を図4に示す。13.5 kAでの平衡温度を初期温度とする場合、1.66 sで超伝導に回復することを示している。

このようにして求めた回復電流を図3に示す。数値解析が解析解と良く一致する結果となっているが、解析では熱伝導率の磁場依存性を考慮していないなどの差があるため、精査が必要と考えている。

### 謝辞

本研究は、NIFS共同研究NIFS10ULAA702の支援の下に実施されました。

### 参考文献

1. S. Imagawa, et al., Proceedings of the 16th ICEC/ICMC, Kitakyushu, Japan, May 20-24, 1996 (1997) pp. 1825-1828.

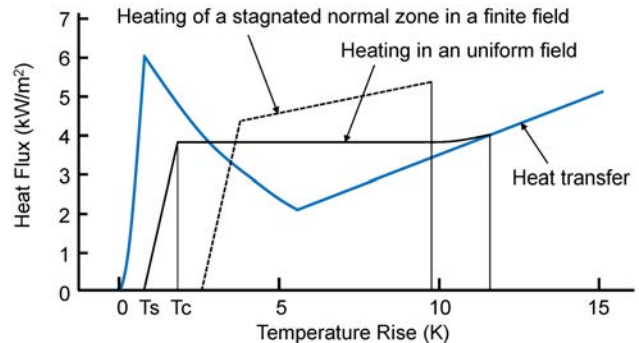


Fig. 1. Sketch of the heat balance of a normal zone.

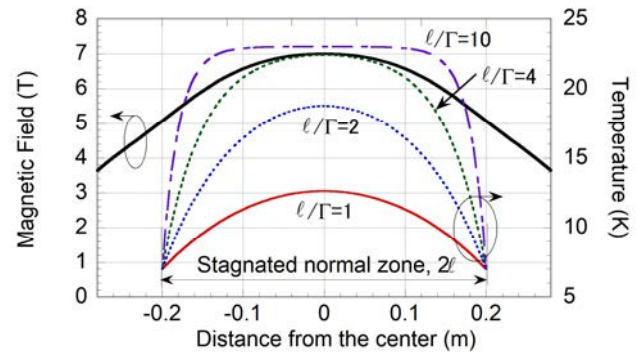


Fig. 2. Magnetic field in the test facility in NIFS and normalized temperature profiles of a normal zone for  $T_c$  of 7 K.

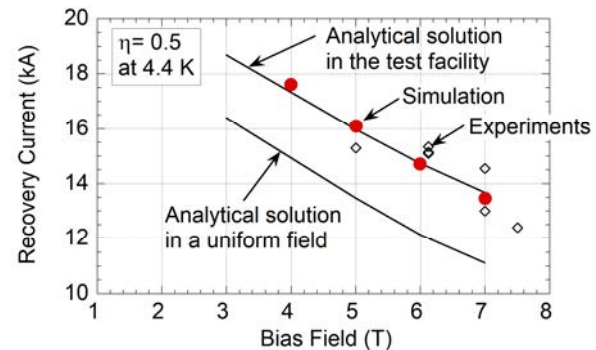


Fig. 3. Recovery current of a conductor for LHD helical coils. The solid lines are analytical solutions, and the solid circles are simulation results with a one-dimensional difference model.

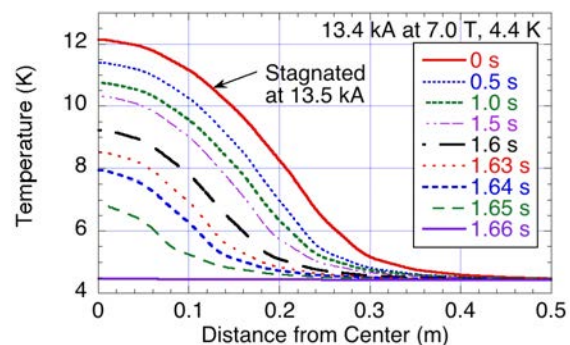


Fig. 4. Simulation of temperature change during recovery of a normal zone that had been stagnated at 13.5 kA at 7.0 T.

## 銅線による NbTi/Cu 線の冷却安定性に対する影響の研究

## Study on the effect of a segregated copper for cryogenic stability of NbTi/Cu wire

島本 知輝(総研大);今川 信作, 高田 卓, 濱口 真司, 尾花 哲浩(NIFS)

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

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

## 1. はじめに

フランスで建設中の ITER で採用されている超伝導コイルの導体には、SC 線(超伝導素線)だけではなく銅線も含めて構成されている。この銅線は、クエンチ(常伝導転移)時のコイル保護を主な目的として採用されているが、冷却安定性が向上する効果も存在することが報告されている。しかし、この効果についての実験研究はほとんど行われておらず、定量的な理解が必要であるとされている<sup>[1]</sup>。

NbTi 線と銅線を用いた実験より、試験線に取り付けた電圧タップ線やはんだが、伝播速度に影響を与えることが明らかとなったので、この効果について整理した結果を報告する。

## 2. 方法

円筒の支持治具に試験線を巻き付けたサンプルを液体ヘリウムに浸漬冷却されたソレノイドコイル内に挿入し、試験線の電流値と印加磁場を変化させながら常伝導伝播時の電圧を計測した。試験線は以下の 3 種類であり、SC 線には径 0.65 mm、銅比 1.7 の NbTi 線を用い、銅線は径 0.6 mm のものを用いた。

- ① SC 線だけの線。
- ② SC 線と銅線をはんだ付けした線。
- ③ SC 線と銅線を撚った線。

実験サンプルの構成を Fig.1 に示す。支持治具は 2 種類あり、どちらも表面の溝に試験線を沿わせた。Fig.1(a)は試験線①、②で用い、200 mm 程度の長さを計測できる。Fig.1(b)は試験線③で用い、1400 mm 程度を計測できる。

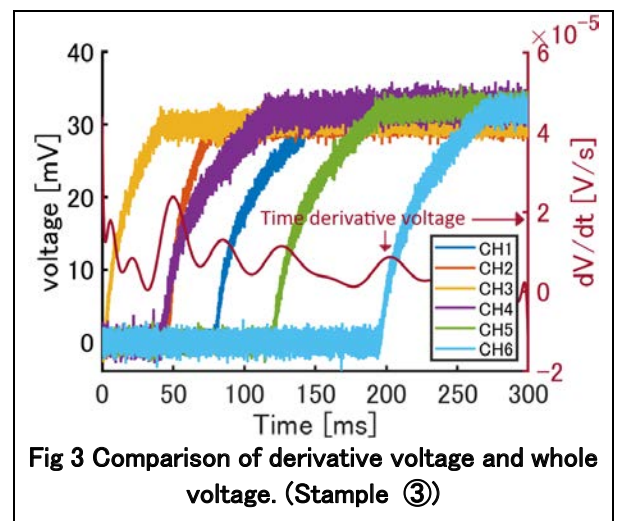
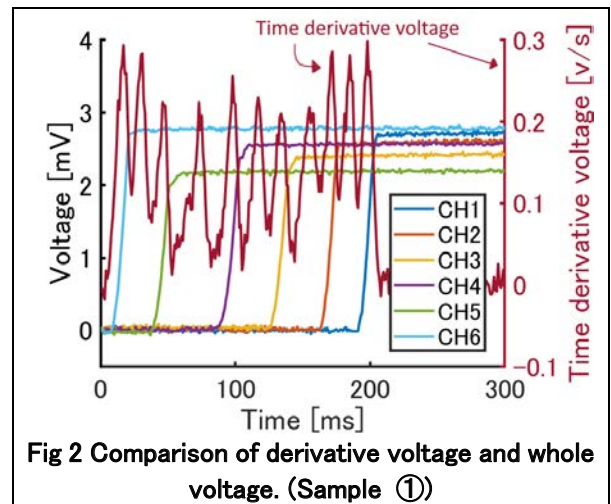
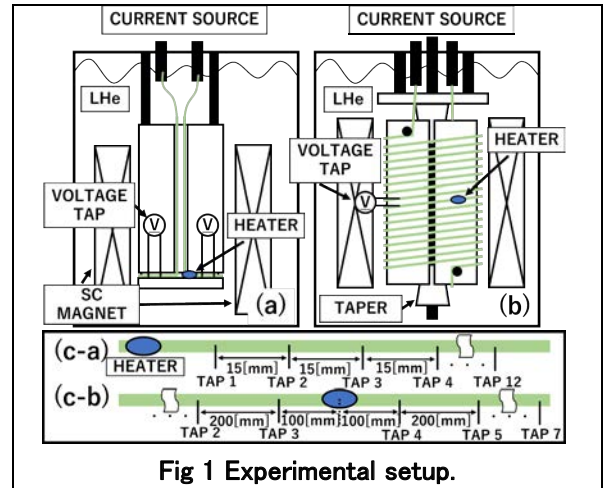
試験線には、常伝導転移を引き起こすための加熱ヒーター1つと計測用電圧タップを 6 チャンネル分取り付け付けた。(a),(b)それぞれにおける試験線の電圧タップ位置を Fig.1(c)に示す。任意のタイミングで SC 線の狭い領域を常伝導転移させ、常伝導領域の拡大を電圧タップに生じる電圧として計測した。電圧タップ間の距離と伝播までの経過時間から、常伝導伝播速度を計算した。

## 3. 結果

はんだによる常伝導伝播速度への影響は、端から端への電圧タップにおける電圧(以下、全体電圧)計測で確認できた。Fig.2 に試験線①における全体電圧の化を微分した波形と、各チャンネルにおける電圧の変化波形の 2 つを比較した図を示す。図より、電圧の立ち上がり立ち上がり終わりのタイミングにおいて、全体電圧の変化量が減少することがわかる。これは、電圧タップが取り付けられている箇所において常伝導伝播速度が低下していることを示している。

このはんだによる影響は、試験線③における結果においても確認できた。Fig.3 に、試験線③における全体電圧の微分波形と各チャンネルにおける電圧の変化の比較波形を示す。

これらの影響が発生する理由として、はんだや電圧タップにより超伝導線に対する冷却面積が増えて冷却が良くなることや、導体断面における熱容量が大きくなることが考えられる。なお、試験線②においては局所的な常伝導伝播速度の低下という現象は見られなかった。これは、超伝導線が全体的にはんだにより銅線とよく接触しているため、局所的な伝播速度への影響としては表れなかったことが理由だと考えられる。



## 参考文献

- [1] ITER, Magnet Superconducting and Electrical Design Criteria, p 16.



# データ駆動型超伝導線材の開発-熱処理条件のベイズ最適化手法の適用-

## Data-driven superconducting wire development – Application of Bayesian optimization to heat treatment conditions

松本 明善, 石井 秋光, 柳生 進二郎, 西島 元, 松波 成行, 伴野 信哉 (NIMS); 山本 明保 (農工大)  
 MATSUMOTO Akiyoshi, ISHI Akimitsu, YAGYU Shinjiro, NISHIJIMA Gen, MATSUNAMI Shigeyuki, BANNO Nobuya (NIMS);  
 YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)  
 E-mail: matsumoto.akiyoshi@nims.go.jp

### 1. はじめに

我々は物質・材料研究機構 (NIMS) に蓄積された超伝導材料線材におけるデータおよび関連する論文からのデータを集約することによって、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・応用化へのスピードが遅れていることが大きな課題の一つである。その大きな要因の一つに機器が要求するスペックが異なることが挙げられる。材料の出口としての応用機器からバックキャストした線材開発のためには、それぞれの機器に応じた特性が必要である。一方で、材料特性はプロセスに大きく依存するためプロセス最適化が必要になる。そこで、これまで NIMS で蓄積され、培われた様々なプロセスデータの再整理および実験データ構造化を行い、制御因子と超伝導特性について PI の手法を取り入れた研究開発を開始した。今回はベイズ最適化手法により MgB<sub>2</sub> 超伝導線材の熱処理条件探索を行ったので報告する。

### 2. 実験

超伝導線材開発に合った PI を用いた最適化法の探索を模索した。今回は内部拡散法 (IMD) MgB<sub>2</sub> 線材作製方法に焦点を当てた。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なった。まず 2 つの特徴量を比較して相関を見るが、より視覚的に見るために相関行列の作成を行った。次に PI として必要となるパラメータ=「特徴量」を決定し、データ探索空間を定めた。MgB<sub>2</sub> 線材に関しては熱処理方法の探索空間に焦点を当てるために熱処理時間と熱処理温度の 2 つの特徴量を用いた。

次に、目的変数を最大化するためにベイズ最適化によるアプローチを検討し、IMD 法による MgB<sub>2</sub> 超伝導線材の試作を行った。Fe パイプ内に Mg 棒を挿入し、その周りにアモルファス状のホウ素粉末を配置したビレットを用意した。これらを溝ロールやカセットローラーダイスにより伸線加工し、短尺に切断した後、熱処理温度、時間を変えながら試料線材を作製した。熱処理後の試料線材を 4.2 K、磁場中で臨界電流を測定し、評価した。

### 3. 結果

Fig.1 に MgB<sub>2</sub> 線材作製におけるパラメータの相関図を示した。実際にはカラーによって正と負の相関を持った領域が示されているが、本稿では色の濃淡を用いた。色が濃いほど正の相関が強いことを表している。例えば、線径と熱処理温度も弱いながら相関が見られることや、MgB<sub>2</sub> の組成比が T<sub>c</sub> に影響する等、これまで得られている知見を反映して色が濃くなる傾向を示した。過去のデータは、そのほとんどが研究者の経験等に基づいていることから、それを裏付ける結果となった。

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 次元空間における臨界電流密度分布を表している。白い領域は特性が高く、暗い部分は特性が低い。黒丸はこれまでの実験を行った条件、白丸が次の実験の提案点である。これまで得られていた領域である 700°C 数時間の近傍で最適値が得られる一方で、これまで考えていなかった条件でも最適値が得られる可能性が示された。PI は最

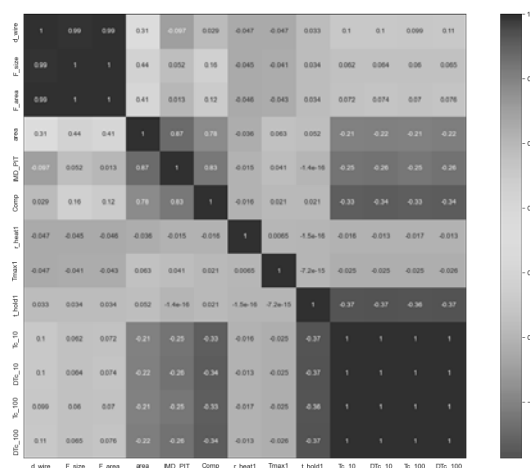


Fig.1 Correlation map of MgB<sub>2</sub> wire fabrication parameters

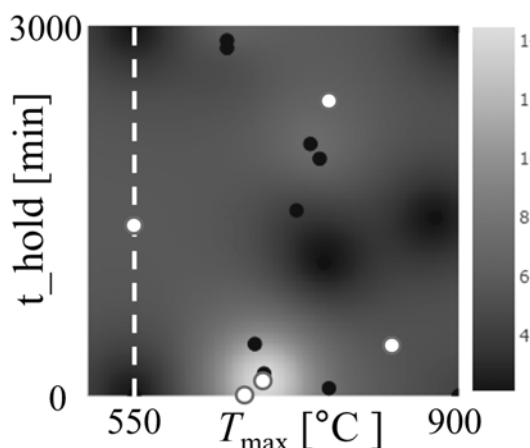


Fig.2 Two-dimensional heatmap of  $J_c$  on  $T_{max}$  and  $t_{hold}$

適値を早く見つけることを目指したものであるが、探索領域を広げることで研究者が予期していなかった条件において最適値が得られる可能性があり、最適化加速だけでなく、新たな実験対象の可能性を示すことが出来ることも示唆される結果となった。

### 4. 結言

本研究ではIMD-MgB<sub>2</sub>線材作製方法においてPIを適用した。これまでのデータについて相関図を用いて解析を行い、その後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けれ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.

B 過剰 MgB<sub>2</sub> を原料とした MgB<sub>2</sub> 多結晶体の臨界電流特性Critical current properties of MgB<sub>2</sub> polycrystalline bulks starting from B-rich MgB<sub>2</sub> powder

関口 直希, 岩崎 響, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 児玉 一宗, 田中 秀樹 (日立)

SEKIGUCHI Naoki, IWASAKI Hibiki, MOTOKI Takatori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

KODAMA Motomune, TANAKA Hideki (Hitachi)

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  $H_{irr}$  が比較的低く、 $J_c$  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-P ICT 拡散法<sup>[2]</sup>が有効である。我々は前回、結晶粒径の小さい MgB<sub>2</sub> 結晶を含む前駆体粉末を原料とし、Premix-P ICT 拡散法により作製した MgB<sub>2</sub> 多結晶体が、安価な B を用いても 20 K で 1 MA/cm<sup>2</sup> を超える  $J_c$  を有することを報告した<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 B 過剰 MgB<sub>2</sub> 前駆体粉末を原料とした Premix 法 MgB<sub>2</sub> 線材の物性を含めて報告する。

## 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(フルウチ化学社製、粒径 $\sim 48$   $\mu$ m) を Mg : B = 1 : 2.2 または 1 : 2.5 のモル比で混合したものと Mg(#100) と B(Pavezyum 社製、粒径 $\sim 300$  nm) を Mg : B = 1 : 2.5 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 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-P ICT 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。また、MgB<sub>2</sub> 線材は前駆体粉末と Mg(#100) の混合粉末を鉄管に充填、外径 0.55 mm $\phi$  の丸線(単芯)に加工後、真空石英管内で焼成することにより作製した。微細組織は SEM、電気抵抗率は交流四端子法、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 Premix-P ICT 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。高圧一軸プレス後にロール圧延を施すことで圧延を施していない試料と比較して、低磁場下での  $J_c$  が高くなった。これは、反応前の段階で緻密になり反応性が向上したためと考えている。また、Pavezyum 社製 B 粉末を用いた試料では 2 T 以上でフルウチ化学社製 B 粉末を用いた試料の値を上回った。これは、粒径の小さい B 粉末による粒界の高密度化の効果と考え

られる。Fig. 2 にフルウチ化学社製の B 粉末を用いた前駆体粉末と Mg の混合粉末から 800°C, 3 h の熱処理により作製した MgB<sub>2</sub> 線材のフィラメントの ZFC 磁化率の温度依存性を示す。いずれの試料も  $T_c \sim 38$  K であり深刻なシーズ材との反応がないことがわかった。当日は、様々な焼成条件で作製した Pavezyum 社製 B 粉末を原料とした MgB<sub>2</sub> パルクの物性、B 過剰 MgB<sub>2</sub> 前駆体粉末を原料とした MgB<sub>2</sub> 線材の臨界電流特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 104* (2022) 79.

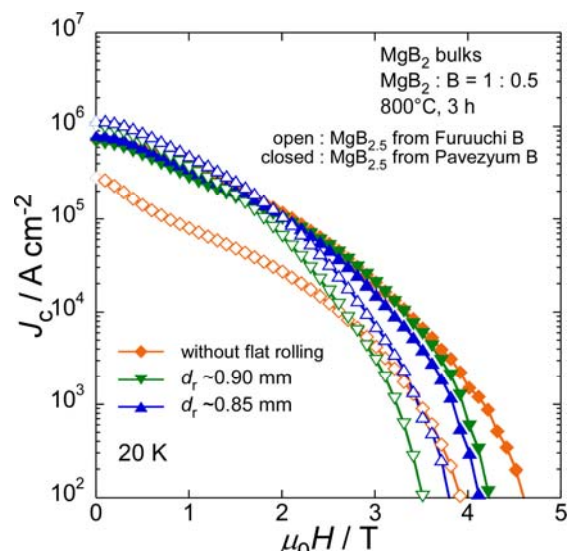


Fig. 1  $J_c - H$  curves at 20 K of MgB<sub>2</sub> bulks prepared by Premix-P ICT-Diffusion method using B-rich precursor.

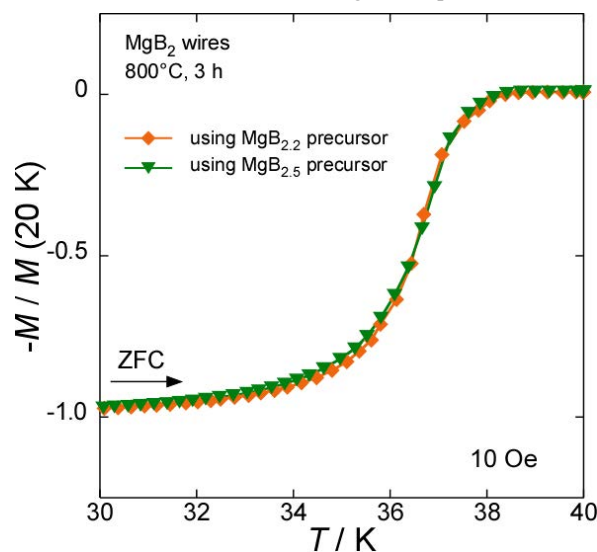


Fig. 2 ZFC magnetization curves of MgB<sub>2</sub> filaments.

## SUS と Monel の併用による MgB<sub>2</sub> 線材のひずみ耐性強化

Improvement of strain tolerance on MgB<sub>2</sub> wire with using both SUS and Monel.

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立); 西島 元, 松本 明善(NIMS)  
 TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi);  
 NISHIJIMA Gen, MATSUMOTO Akiyoshi(NIMS)  
 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、MgB<sub>2</sub>線材のひずみ耐性を強化する必要がある。これまでに、線膨張係数の比較的大きなステンレス鋼(SUS)を構成材料に採用することで、MgB<sub>2</sub>線材のひずみ耐性が向上することを報告した[1]。本発表では、SUS と Monel とを併用することで熱処理後のひずみ耐性・曲げ耐性を向上させた MgB<sub>2</sub>線材について、その評価結果を報告する。

### 2. 実験方法

Fig.1(a)にSUSとMonelとを併用した18芯MgB<sub>2</sub>線材の断面写真(熱処理後)を示す。室温での引張り試験にはFig.1(b)に示す直線状で熱処理した線径1.5mmの線材を用い、ひずみ量は2枚のひずみゲージを張り付けて測定し、各サンプル線材に対し異なる最大ひずみを印加した。曲げ試験では直線状で熱処理した線径1.16mm線材を様々な半径で曲げた[2]。

一方で同断面構成を持つ0.55mm線材には、React & Wind工程を模擬した複合負荷を印加した。具体的には、外半径90mmのポビンに巻付けて熱処理した後に、1kgfの張力を加えつつ、熱処理時と同方向に外半径25mmのポビンに巻取り(順曲げ)、または熱処理時と逆方向に外半径50mmのポビンに巻取り(逆曲げ)を行った。その概要図をFig.2に示す。これらの引張り・曲げ負荷印加後のサンプル線材に対し、液体ヘリウム浸漬冷却、四端子法で臨界電流特性を評価した。

### 3. 結果

Fig.3に引張り試験で得た応力-ひずみ曲線を示す。縦軸は2枚のひずみゲージから得た出力の平均値である。図中の丸印は各サンプル(a)-(h)に加えた最大応力と、これに対するひずみ(平均値)とをプロットしたものである。

Fig.4にサンプル線材に印加した最大ひずみと、規格化した $I_c$ とをまとめたグラフを示す。1.16mm線材曲げサンプルでは0.7%、1.5mm線材引張りサンプルでは0.6%のひずみ印加で $I_c$ が低下した。引張り試験でのひずみ測定誤差10%を考慮すると可逆ひずみは0.6%とみなされ、SUSとMonelを併用することで、主にSUSによるひずみ耐性を向上させた線材[1]が有していた可逆ひずみ0.44%から明らかに改善した。

Fig.5にReact & Windの模擬負荷を印加した0.55mm線材の $I_c$ 測定値を示すが、 $I_c$ 劣化は観測されなかった。フィラメント束領域半径と曲げ半径から算出できる引張りひずみと、張力とS-S曲線から得られる引張りひずみの合計は、順曲げ時に0.51%、逆曲げ時に0.54%であり、前出の単純引張りや単純曲げから得た可逆ひずみ0.6%を支持する結果である。本MgB<sub>2</sub>線材の10-20Kにおける $J_c$ -B特性は当日報告する。

### 参考文献

1. H. Tanaka, et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.100 (2020) p.143
2. H. Tanaka, et al. : IEEE TAS. 32 (2022) 6200205

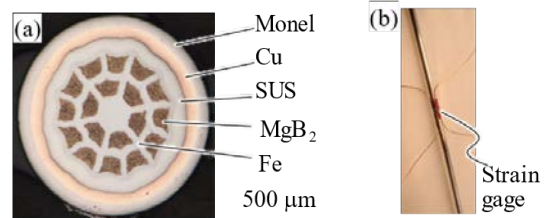


Fig.1 (a) Cross-sections of 1.16-mm wire and (b) appearance of 1.5-mm wire with two strain gages[2].

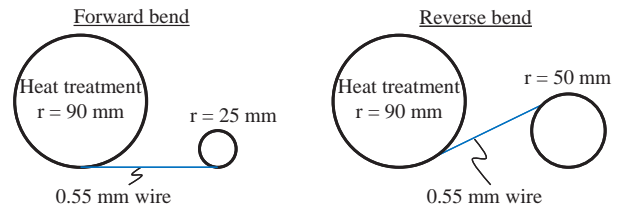


Fig.2 Schematic image of bending test on 0.55-mm sample wire.

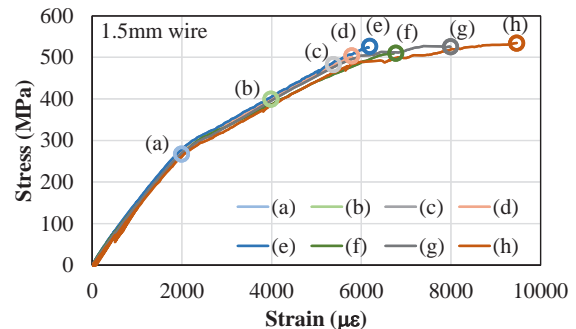


Fig.3 Stress-strain curves obtained by tensioned samples.

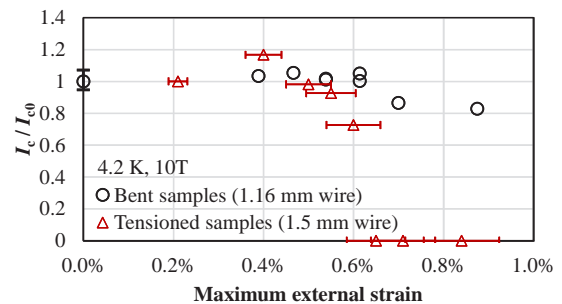


Fig.4 Maximum external strain dependences of  $I_c$  of bent 1.16-mm and tensioned 1.5-mm sample wires[2].

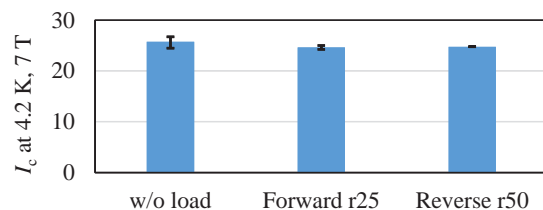


Fig.5  $I_c$  values of tensioned and bent 0.55-mm wires.

# MgB<sub>2</sub> 超伝導材料の異方的な構造乱れと磁場中の輸送臨界電流密度

## Disorder anisotropy and in-field transport critical current density of MgB<sub>2</sub> superconducting materials

前田 穂(Kangwon 国大); 李 東虔, 崔 俊赫(株式会社 三東); 金 正鎬(Wollongong 大); 崔 世鎔(Kangwon 国大)  
 MAEDA Minoru (Kangwon National Univ.); LEE Dong Gun, CHOI Jun Hyuk (Sam Dong Co., Ltd.);  
 KIM Jung Ho (Univ. Wollongong); CHOI Seyong (Kangwon National Univ.)  
 E-mail: mmaeda@kangwon.ac.kr

### 1. はじめに

輸送臨界電流(Transport  $J_c$ )または輸送臨界電流密度(Transport  $J_c$ )は、超伝導材料の応用において、重要な特性の一つである。その臨界特性は、超伝導材料の構造、例えば微視的欠陥や歪みなどに左右される。特に、結晶配列の乱れや結晶欠陥または粒界欠陥などの導入と最適化は、磁場中の  $J_c$  特性を大きく向上させる。それ故に、様々な超伝導物質の本質的性質(結晶・電子構造及び化学結合状態など)から、それらの材料の構造特性に及ぼす影響と超伝導特性との関係について、数多くの研究が現在までに行われてきた。本研究対象の二硼化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)も、その物質・材料の一つである。その結晶構造は、Fig. 1 に示すように六方晶系の格子を有し、 $c$  軸方向に Mg 層と B 層が交互に積層した極めて単純な層状配列となっている。しかしながら、電子構造は多少複雑となり、B 層に沿った擬二次元的な  $\sigma$  バンドと三次元的な広がりを持つ  $\pi$  バンドを有する。さらに次元性の異なる二つのバンドは、その相互作用が弱く、お互いの超伝導性も異なる。この特異な物性を示す MgB<sub>2</sub> の層状結晶配列(Fig. 1(b))は、B 層内の非常に強い共有性及び金属性の結合(covalent/metallic bonding)と、B-Mg-B 層間に広がる金属性及びイオン性の結合(metallic/ionic bonding)によって形成される。この異なる結合状態は、MgB<sub>2</sub> の(層内と層間方向の)構造秩序と( $\sigma$  バンドによる)超伝導特性の「異方性」を発現させる。それ故に後者の異方性は、MgB<sub>2</sub> の超伝導性の発見当初から世界中で盛んに研究されてきた。しかしながら、前者の構造異方性は、微視的欠陥や歪みの観点から、ほとんど研究されていない。さらに、もし層内と層間の構造乱れに大きな差があれば、 $J_c$  への影響について本質的に明らかにする必要がある。そこで本研究では、「格子歪み」と「結晶子サイズ(格子秩序の平均サイズ)」及び「結晶粒サイズ(結晶粒界)」の3つの観点から、層内と層間方向の構造乱れについて解析を行い、次元性の異なるバンドが担う輸送特性への影響とさらなる臨界特性の向上について検討した[1]。

### 2. 実験方法

本研究では、MgB<sub>2</sub> 材料の異方的な構造乱れと輸送臨界電流特性への影響を調べるために、MgB<sub>2</sub> 線材とMgB<sub>2</sub> 粉末を作製した[1]。また、微視的欠陥及び歪みの導入と磁場中の輸送特性の向上のために、ピレン(C<sub>16</sub>H<sub>10</sub>)を炭素添加剤として使用した。炭素のドーピングレベルは、Mg と B と C<sub>16</sub>H<sub>10</sub> のモル比が 1:(2-x):x/16 において、 $x = 0.1$  を適用した。原材料の混合は、工業応用の観点から大量生産への技術適用が比較的容易である、低速回転型の混合機を使用した[1,2]。MgB<sub>2</sub> 線材の作製には、工業応用の観点から長尺化が比較的容易な powder-in-tube 法と *in situ* 反応法を用いた。

### 3. 実験結果

Fig. 2 の挿入図に、625 °C の温度で焼結した MgB<sub>2</sub> 単芯線材の横断面図(の二次電子像)を示す。線材コアの形は、ややびつではあるが、形状対称性の良い円形になっていることがわかる。これは、工業応用の観点から、その適用が容易な線引き用丸ダイスのみを用いて、線材加工を実施したためである。また、そのコア内部には、小さな黒い点のような領域が数多く見られる。これらは空隙であり、焼結過程で Mg が硼素粉末の領域に拡散して反応すること(Diffusion reaction)により形成される。この空隙形成によるコアの低密度化の問題は、Mechanical milling (MM)や Mechanical alloying (MA)などによ

って、対処できることが良く知られている。ここで興味深いことは、無数の空隙が形成されるにもかかわらず、 $J_c$  が、温度 4.2 K と磁場 7 T の条件で、比較的高い値( $1.0 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>)に到達したことである(Fig. 2)。線材コア内の結晶粒の観察結果を Fig. 3 に示す。六角柱のような形状の粒が多数形成されており、六角形のサイズ(Hexagonal size)と高さ(Height)に大きな異方性が現れることがわかる。当日は、これらのサイズ異方性や結晶子サイズと格子歪みも含めて、構造乱れと  $J_c$  特性への影響[1]について詳細に報告する。

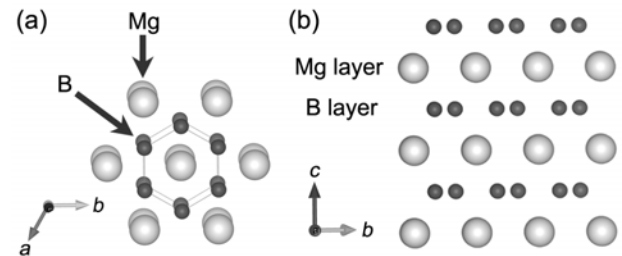


Fig. 1 Visualized images of crystal structure of MgB<sub>2</sub> [3].

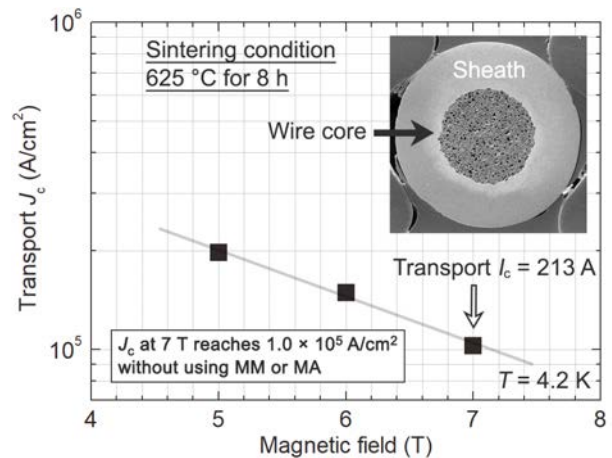


Fig. 2 Transport  $J_c$  properties at 4.2 K for MgB<sub>2</sub> wires [1].

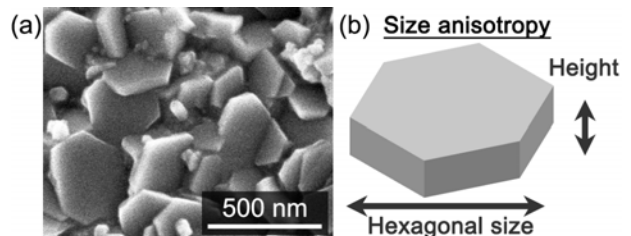


Fig. 3 Size anisotropy of crystal grains [1].

### 参考文献

1. M. Maeda, J.H. Choi, J.C. Knott, J.H. Kim, G. Hahn, H. Kang, S. Hahn, S. Choi, *Journal of alloys and compounds* 934 (2023) 167873.
2. M. Maeda, Y.-U. Heo, J.H. Choi, D. Patel, S.-H. Kim, S. Hahn, J.H. Kim, S. Choi, *Ceramics International* 48 (2022) 6539-6548.
3. K. Momma, F. Izumi, *Journal of applied crystallography* 44 (2011) 1272-1276.

# 加速器用 HTS マグネットの開発(10-1)

## —全体概要—

### Development of HTS Accelerator magnet (10-1)

#### —Overview of the present progress—

土屋 清澄, 王 旭東, 寺島 昭男, 有本 靖, 大内 徳人, 宗 占国, 増澤 美佳 (KEK);  
菊池 章弘 (NIMS); 藤田 真司(フジクラ)

TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xudong, TERASHIMA Akio, ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito,  
ZONG Zhanguo, MASUZAWA Mika (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.)

E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

#### 1. はじめに

我々は加速器用 HTS マグネットの基礎開発として 1) 加速器用 HTS マグネットの製作経験の蓄積とその特性調査、2) 高磁場マグネット設計のための基礎データ(REBCO 線材の電磁特性[1])の収集、3) 大電流ケーブルの基礎開発を進めている。本報では 1) で進めてきた特殊六極マグネット及び3) の大電流ケーブル開発の基礎的試みの概略について報告する。

#### 2. 特殊 REBCO 六極マグネットの開発

SuperKEKB 用特殊六極マグネット(ノーマルとスキューの六極磁場強度を独立に調節できる)を目標に REBCO 線材を用いた六極マグネットの開発を進めている[2, 3]。これまでに、ノーマル六極マグネットの製作・試験、及びスキュー六極コイルの製作を行った。今回、この両コイルを組合せた特殊六極マグネットの冷却、通電試験を行った。Table 1 にノーマル及びスキュー六極コイルの主要諸元を、Fig. 1 にノーマルとスキューのコイルを組み合わせた特殊六極マグネットの写真を示す。

得られた主要な結果は、1)ノーマル、スキューの6極磁場勾配は、ほぼ設計通りである(測定値/設計値 $\sim$ 1.01)、2)多極磁場成分(8極以上の多極磁場成分)は6極磁場の $\sim 5 \times 10^{-4}$ 以下@R=20mm)、3)2極成分は予想より大きく、その原因としてはコイル寸法のバラつき( $\sim$ 0.3 mm)が考えられる、4)コイル間の接続には REBCO テープを貼った”へ”の字形銅板を用いた。その一ヶ所当たりの接続抵抗値はノーマル6極で $\sim$ 0.15 mW @ 4.2K,  $\sim$ 2.2 mW @ 77K、スキュー6極で $\sim$ 0.58 mW @ 4.2K,  $\sim$ 4.8 mW @ 77K であった。これら結果の詳細については発表 3C-p02 特殊六極マグネットの励磁試験及び 3C-p03 特殊六極マグネットの磁場測定で報告する。

Table 1 Design parameters of the special sextupole Magnet

Parameter	Value
Bore radius	40 mm
Coil length	200 mm
Yoke radius(inner, outer), length	150.5, 195 mm, 200 mm
Normal sextupole coil	
Coil width (inner, outer), height	38.6, 83.6 mm, 8.8 mm
Number of turns	121 x 2 turns
Sextupole field gradient	211.7 T/m <sup>2</sup>
Operating current	250 A
Max B// on the conductor	2.45 T
Max B $\perp$ on the conductor	1.39 T
Inductance	72.0 mH
Skew sextupole coil	
Coil width (inner, outer), height	73.2, 102.0 mm, 8.8 mm
Number of turns	36 x 2 turns
Skew sextupole field gradient	23.6 T/m <sup>2</sup>
Operating current	250 A
Max B// on the conductor	1.09 T
Max B $\perp$ on the conductor	0.63 T
Inductance	10.1 mH

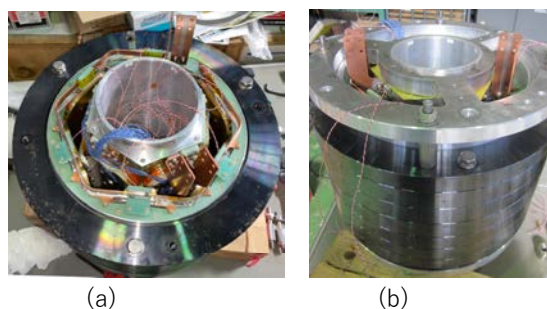


Fig. 1 Photographs of the special sextupole magnet before (a) and after (b) assembling the end plates

#### 3. REBCO 丸型ケーブルの基礎開発

加速器用大電流 REBCO ケーブルを目指して、フレキシブルな芯線の上に多層の REBCO 線材を巻きつけた CORC タイプのケーブル試作を行った。芯線には 37 本燃りの導体を用い、その外径は 1.8 mm である。その上に SuperPower 社の Hastelloy 厚 30 mm, 2 mm 幅テープ線材を巻き付けてケーブルを製作した。ケーブルの特性評価は液体窒素中で直線状および曲げ状態(R= 40, 30, 20 mm)で行った。Fig. 2 にテープ線材を2枚 x3層巻いたケーブルの特性を示す。試作ケーブルとその特性測定の詳細については発表 3C-p04 加速器用 REBCO 丸型ケーブルの基礎開発 で報告する。

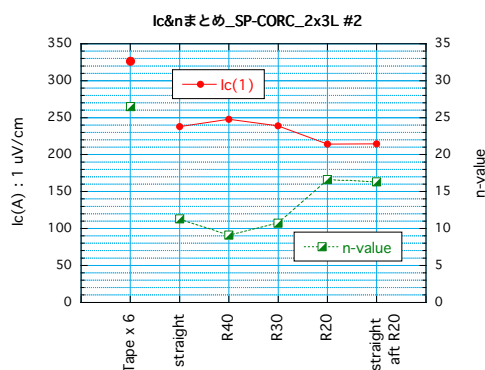


Fig. 2 Ic & n-values of 2 tape x 3 layer REBCO cable at 77 K.

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667,19H01911)の助成により実施したものである。

#### 参考文献

1. K. Tsuchiya *et al.*, SUST 34(2021) 105005.
2. K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 29 (2019) 4002604.
3. X. Wang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 30 (2020) 4600304.

# 加速器用 HTS マグネットの開発(10-2) -特殊六極マグネットの励磁試験-

## Development of HTS Accelerator magnet (10-2) -Excitation Test of a Special Sextupole Magnet-

王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男, 有本 靖, 大内 徳人, 宗 占国(KEK);  
菊池 章弘(NIMS); 藤田 真司(フジクラ)

WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito, ZONG Zhanguo (KEK);  
KIKUCHI Akihiro (NIMS); FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.)

E-mail: wanxdon@post.kek.jp

### 1. はじめに

我々はノーマルとスキューの六極磁場を同時に発生する特殊な六極マグネットの開発を行っている。この六極マグネットは REBCO 線材を用いた矩形コイルで構成されており、これまでに実機サイズの試作と実験評価を行ってきた[1-5]。本発表は、ノーマルコイルとスキューコイルを組合せた実機サイズの六極マグネットについて、液体ヘリウム浸漬冷却下(4.2 K)で行った励磁試験について報告する。

### 2. 六極マグネットの励磁試験と遮断試験

Fig. 1 に示すノーマル六極コイルとスキュー六極コイルおよび鉄ヨークを組み合わせて六極マグネットを構成した。ノーマル六極とスキュー六極は、それぞれ6個(coil #1-#6)の矩形レーストラック形状の REBCO コイルで構成されている。REBCO コイルは2層のパンケーキ構造であり、エポキシ含浸されている。六極マグネットを縦型のクライオスタット内に吊り下げて、設計電流値 250 A までの励磁試験と遮断試験を行いマグネットの健全性を確認した。同時にインダクタンスとコイル間接続抵抗を測定評価した。クエンチ保護は、先行研究の設計に基づいて最大温度が 300 K 以内となるように外部保護抵抗(0.75 Ω)と検出器を用いて構成した[4]。

ノーマル六極とスキュー六極の励磁試験結果を Fig. 2 に示す。両方とも 1 A/s の掃引速度で 250 A まで励磁を行い、トレーニングや異常な電圧上昇は発生しなかった。スキュー六極の電圧は、電源制御が不安定であったために 100 A 未満の領域でノイズが他より大きくなっている。ノイズが少ない小型電源を用いて、Fig. 3 に示す掃引時の電圧からインダクタンスを評価した。ノーマル六極が 71.3 mH、スキュー六極が 10.2 mH となり、設計値との誤差は 1% 未満である。また、ナノボルトメータで測定したコイル間接続抵抗を Table 1 に示す。コイル間は REBCO 線材をはんだ付けした銅板を用いて接続しており、1.0 μΩ 未満であることが確認できた。励磁試験後に 250 A 通電状態から遮断試験を行った結果を Fig. 4 に示す。ノーマル六極とスキュー六極の両端電圧は、遮断時に設計した 200 V 以内に収まっており、それぞれの電流減衰の時定数はノーマルが 94.6 ms でスキューが 11.4 ms である。遮断試験後に再励磁を行い、マグネットの健全性を確認した。

### 3. まとめ

試作した実機サイズの六極マグネットについて励磁試験を行い、設計通りの通電性能を達成できた。遮断試験後も異常なく再励磁を確認できた。

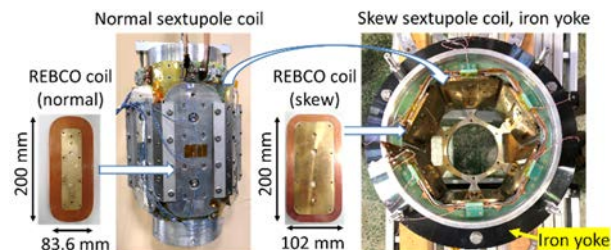


Fig. 1 Normal and skew sextupole coils and iron yoke. The normal sextupole coil is installed inside the skew sextupole coil and the iron yoke.

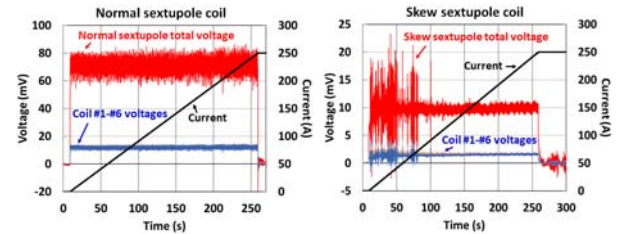


Fig. 2 Excitation test results of the normal and skew sextupole coils at 4.2 K. The maximum current and ramp rate are 250 A and 1 A/s, respectively.

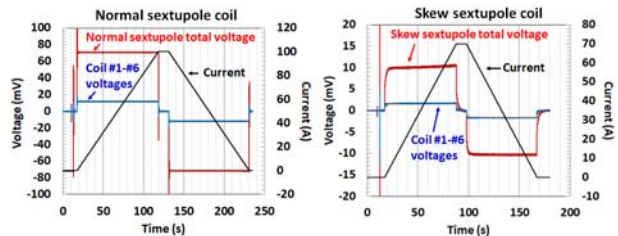


Fig. 3 Inductance measurements of the normal and skew sextupole coils with a ramp rate of 1 A/s.

Table 1 Joint resistances between coils at 4.2 K

Coil	#1-#2	#2-#3	#3-#4	#4-#5	#5-#6
Normal	0.17 μΩ	0.14 μΩ	0.16 μΩ	0.13 μΩ	0.17 μΩ
Skew	0.58 μΩ	0.61 μΩ	0.65 μΩ	0.43 μΩ	0.63 μΩ

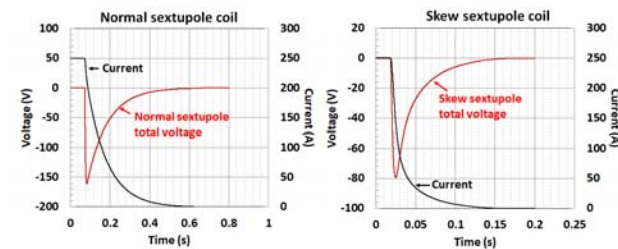


Fig. 4 Dump test results of the normal and skew sextupole coils at an operating current of 250 A.

### 謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667, 19H01911)の助成により実施したものである。

### 参考文献

1. K. Tsuchiya, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 26 (2016) 4100904
2. K. Tsuchiya, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 29 (2019) 4002604
3. X. Wang, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 30 (2020) 4600304
4. X. Wang, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 32 (2022) 4005305
5. S. Fujita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.120

## 加速器用 HTS マグネットの開発 (10-3)

### — 特殊六極マグネットの磁場測定 —

#### Development of the HTS accelerator magnet (10-3)

#### - Magnetic measurement of a special sextupole magnet -

有本 達, 大内 徳人, 王 旭東, 宗 占国, 寺島 昭男, 土屋 清澄 (KEK/総研大)

ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito, WANG Xudong, ZONG Zhanguo, TERASHIMA Akio,

TSUCHIYA Kiyosumi (KEK/SOKENDAI)

E-mail: yasushi.arimoto@kek.jp

### 1. はじめに

我々は高温超伝導 (HTS) 磁石の基礎開発として SuperKEKB 加速器への利用をターゲットに HTS6 極磁石を開発している [1][2]. SuperKEKB は 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子との衝突型加速器であるが, この磁石は衝突点で発生する色収差等を補正するためのもの (局所色収差補正 6 極磁石) である. 我々はこれまでに REBCO 線材を用いた 6 極磁石 (ノーマル 6 極磁石) を製作し, 低温試験を行ってきた. 今回この 6 極磁石の中間磁場平面の角度を微調整するための 6 極磁石 (スキュー 6 極磁石) を製作し, ノーマル 6 極磁石に組み込んだ. このスキュー磁石を加えた磁場性能を評価するため, ハーモニックコイルを使った磁場測定を行なった.

### 2. 磁場測定装置

使用するハーモニックコイルには軸方向の磁場分布を測定するための軸方向の長さ 20 mm のショートコイルと, 磁場積分値を測定するための長さ 600 mm のロングコイルが備えられている. これらのコイル半径 ( $R$ ) はいずれも 20 mm である. 磁石本体は液体ヘリウムクライオスタット内に設置され, 浸漬冷却 (温度: 4.2 K) される. 磁石のボア内は真空断熱された 2 重管が挿入されて, 大気とつながっており, その 2 重管内にハーモニックコイルは挿入される. 磁場測定では, ノーマル, スキュー磁石ともに定格電流の 250 A まで通電した.

### 3. 磁場測定結果

ショートコイルで測定されたノーマル磁石とスキュー磁石の軸方向プロファイルをそれぞれ, 図 1, 図 2 に示す. 磁石軸方向の位置を関数として  $R = 20$  mm での各磁石の主成分 (6 極磁場成分) の強さをプロットした. 赤丸は測定値, 実線は 3 次元計算値である. プロファイルの形状は計算値をほぼ再現している. ショートコイルの測定値の積分がロングコイルの測定値に合うように規格化している. ロングコイルによる測定値はノーマル磁石の  $B_3$  成分は  $1.463 \times 10^{-2}$  Tm, スキュー磁石の  $A_3$  成分は  $0.1823 \times 10^{-2}$  Tm であった. 一方計算値は, ノーマル磁石  $B_3$ , スキュー磁石  $A_3$  の積分値はそれぞれ,  $1.484 \times 10^{-2}$  Tm,  $0.1822 \times 10^{-2}$  Tm であった.

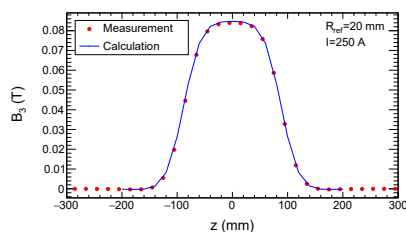


Fig. 1. The axial profile of the sextupole component for the normal sextupole magnet. The magnet is energized at 250 A. Closed points: Measurement. Solid curve: 3D calculation.

図 3 はロングコイルで測定した高次の磁場成分である. 左の図がノーマル磁石, 右の図がスキュー磁石のものである. 縦軸は  $R = 20$  mm における 6 極磁場成分に対する多極磁場成分の比である. 誤差棒は測定値の統計誤差を表わしている. 励磁電流はどちらの磁石も 250 A である. ノーマル磁石については Allowed multipole で

ある  $n = 9$  の成分が他と比べて大きい, それでも  $4 \times 10^{-4}$  以下である. また, スキュー磁石については,  $n = 4$  の成分が  $4 \times 10^{-4}$  程発生しているが, 計算値よりも小さい.

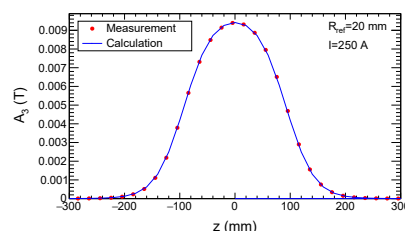


Fig. 2. The axial profile of the sextupole component for the skew sextupole magnet. The magnet is energized at 250 A. Closed points: Measurement. Solid curve: 3D calculation.

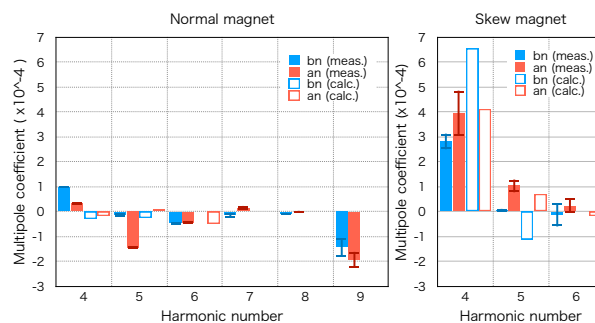


Fig. 3. Multipole coefficients for the normal magnet and skew magnet at  $R = 20$  mm. Left: The normal magnet. Right: The skew magnet. The both magnets are energized at 250 A. Blue bars and red bars are the ratios of multipole components to the sextupole component for the normal component and skew component, respectively. The white bars with blue and red line are the obtained coefficients by 3d model calculation for normal and skew components, respectively.

### 4. まとめ

試作された HTS6 極磁石の磁場性能評価のためにハーモニックコイルを用いた磁場測定を行った. 軸方向のプロファイルについては計算値をほぼ再現し, また, 6 極磁場強度については, ノーマル磁石の場合, 計算値に対して約 1% 小さい値が得られた. また,  $R = 20$  mm において, ノーマル磁石とスキュー磁石の両方について, 6 極磁場成分に対する多極磁場成分の強さの比が  $5 \times 10^{-4}$  以下であることが確認された.

### 謝辞

本研究は科学研究費補助金 (15H03667, 19H01911) の助成により実施したものである.

### 参考文献

1. K. Tsuchiya, *et. al.*, IEEE Trans. Appl. Sup., **29** (2019) 4002604
2. X. Wang, *et. al.*, IEEE Trans. Appl. Sup., **30** (2020) 4600304

# 加速器用 HTS マグネットの開発(10-4) -加速器用 REBCO 丸型ケーブルの基礎研究-

## Development of HTS Accelerator magnet (10-4)

### -Fundamental study on REBCO round cables for accelerators-

王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男(KEK); 田邊 豪, 根岸 伸行(潤工社); 菊池 章弘(NIMS)

WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio (KEK);

TANABE Suguru, NEGISHI Nobuyuki (Junkosha Inc.); KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: wanxdon@post.kek.jp

#### 1. はじめに

次世代加速器を想定した高磁場用 HTS マグネットの開発には kA 級の大電流ケーブルが求められる。これまでに REBCO 線材を用いた様々なケーブル構造が考案されてきた [1-3]。我々は、高磁場下で 1 kA 以上の電流容量と優れた曲げ性能を有するケーブルを目指して、REBCO 線材を用いたフレキシブルな丸型ケーブルの開発を行っている。本発表は、試作ケーブルの臨界電流と曲げ特性を報告する。

#### 2. 臨界電流特性

SuperPower 社製の REBCO 線材(SCS2030-AP)を用いて Fig. 1 に示す 5 本の丸型ケーブルを試作した。使用した REBCO 線材は、幅 2 mm、厚み 0.12 mm (ハステロイ®: 30  $\mu\text{m}$ 、銅メッキ: 40  $\mu\text{m}/\text{side}$ ) である。77 K 自己磁場下の線材  $I_c$  は 54 A であり、4.2 K の  $I_c$  磁場依存性を Fig. 2 に示す。丸型ケーブルは、直径 1.8 mm の銅撚線コアに REBCO 線材を 35-45 度の角度で巻付けて試作した。試作ケーブルの諸元を Table 1 に示す。ケーブル  $I_c$  は、Fig. 3 (a) に示す 77 K 自己磁場下の  $I$ - $V$  カーブからケーブル長に対する 1.0  $\mu\text{V}/\text{cm}$  基準で評価した。4.2 K と 18 T におけるケーブル臨界電流密度  $J_c$  は、Fig. 2 (b) の lift factor より 77 K の  $I_c$  の 1.58 倍を用いて、ケーブル直径から計算した断面積で割って評価した。線材 11 本を用いた試作ケーブル #5 は、4.2 K と 18 T での推定  $I_c$  が 784 A となり、 $J_c$  が 110  $\text{A}/\text{mm}^2$  を超える特性を示した。これより 1 kA 以上を達成するには線材 15 本以上が必要となり、7 層の外径 3.48 mm 以上のケーブル仕様となることが予想される。しかし、Fig. 3 (b) に示す線材厚み 0.12 mm で試作したケーブルの  $J_c$  (プロット) と予測  $J_c$  (実線) は、ケーブル外径の増大に対してその上昇は鈍い。一方、線材厚みを半分の 0.06 mm (Fig. 3 (b) の点線) にすると、1 kA 以上を満足する 7 層ケーブルの外径が 2.64 mm で  $J_c$  が 245  $\text{A}/\text{mm}^2$  となり、線材厚み 0.12 mm による同外径のケーブルに対して 2.5 倍近い  $J_c$  を達成できる。つまり、よりコンパクトなコイル設計が可能となり、実用性の高いケーブルとなる。

#### 3. 曲げ特性

試作ケーブル #1-#4 を用いて半径 40 mm、30 mm、20 mm の曲げ試験を行った。測定装置と規格化したケーブル  $I_c$  の曲げ特性を Fig. 4 に示す。ケーブル #1 と #2 (1 層) は半径 20 mm まで曲げてもほぼ劣化はなく、#3 (2 層) は 5% 程度劣化、#4 (3 層) は 10% 程度劣化する結果となった。この傾向は層数の増加に伴いケーブル外径が増えて、外層側の曲げひずみが増大するためと考えられる。コア外径を小さくすることや線材厚みを薄くすることが曲げによる劣化の抑制に効果的であると予想される。これはケーブル  $J_c$  の向上にも寄与する。

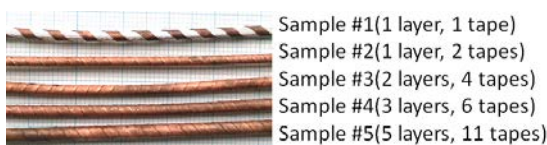


Fig. 1 REBCO round cables made of 2 mm wide REBCO tapes and 1.8 mm diameter stranded copper core.

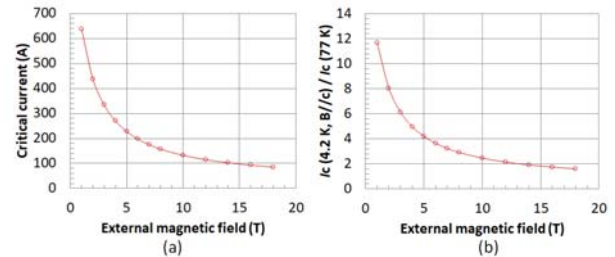


Fig. 2 (a) Magnetic field dependence of the REBCO tape  $I_c$  at 4.2 K, (b) lift factor of 4.2 K  $I_c$  relative to 77 K  $I_c$ .

Table 1 REBCO round cable properties

Cable	# of layers	# of tapes	Cable diameter (mm)	Cable $I_c$ @77 K (A)	Cable $J_c$ @4.2 K, 18 T ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )
#1	1	1	2.05	51	24
#2	1	2	2.05	106	51
#3	2	4	2.25	170	67
#4	3	6	2.50	238	77
#5	5	11	3.00	496	111

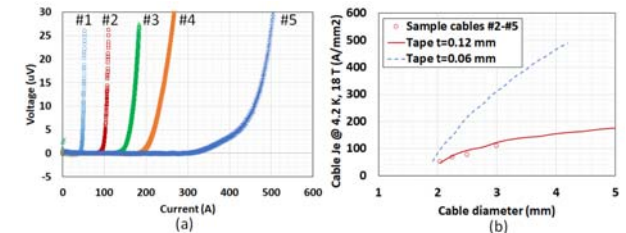


Fig. 3 (a)  $I$ - $V$  curves of the sample cables #1-#5 at 77 K, (b) cable diameter dependence of the cable  $J_c$  at 4.2 K and 18 T calculated with a lift factor of 1.58. The plots are samples #2-#5 and the lines are two estimates calculated by a REBCO tape  $I_c$  of 50 A at 77 K.

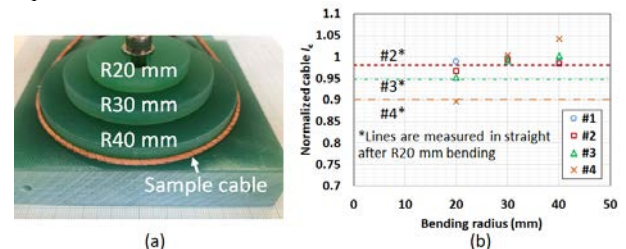


Fig. 4 (a) Bending test apparatus, (b) bending radius dependence of the normalized cable  $I_c$  at 77 K.

本研究は科学研究費補助金 (19H01911) の助成により実施したものである。

#### 参考文献

- W. Goldacker, et al.: Supercond. Sci. Technol., 27 (2014) 093001
- J. D. Weiss, et al.: Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 014002
- S. Kar, et al.: Supercond. Sci. Technol., 32 (2019) 10LT01



(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>			藤田 真司	(フジクラ)	63, 125, 126
秋山 庸子	(阪大)	22, 55, 100	福田 光宏	(阪大)	56, 57, 58, 59, 60
天野 一樹	(早大)	50	福井 聡	(新潟大)	5, 7, 24, 60
雨宮 尚之	(京大)	6, 7, 8, 9, 10, 11	福本 祥一	(山本電機製作所)	43
青木 香苗	(KEK)	44	福島 武人	(東芝 ESS)	31, 32
荒川 仁	(三菱電機)	99	福山 和宏	(JASTEC)	33
荒川 慶彦	(住重)	61	舟山 智歌子	(三菱重工)	3
有本 靖	(KEK)	125, 126, 127	古瀬 充穂	(産総研)	24, 108
有吉 誠一郎	(豊橋技科大)	29	府山 伸行	(広島総技研)	24
浅井 航希	(上智大)	78, 79			
淡路 智	(東北大)	12, 17, 19, 81	<b>G</b>		
<b>B</b>			GAO Yunfei	(京大)	1
馬場 智澄	(NIFS)	112	GARFIAS-DÁVALOS Diego Armando	(総研大)	101, 112, 115
伴野 信哉	(NIMS)	78, 79, 99, 102, 121	耿 智輝	(東海大)	86
辺 文浩	(九大)	105	GHIGNA Tommaso	(KEK)	77
<b>C</b>			後藤 芳隆	(京大)	4
CAUNES Antomne	(海洋大)	70	GUO Zimeng	(九大)	65
力石 浩孝	(NIFS)	101, 112	<b>H</b>		
筑本 知子	(中部大)	116	芳賀 雄仁	(九大)	41
長 史典	(東北大)	53	箱石 裕人	(岩手大)	69
CHOI Jun Hyuk	(Sam Dong)	124	濱田 一弥	(量研機構)	103
崔 世鎔	(Kangwon 国立大)	124	濱口 真司	(NIFS)	101, 112, 120
荘 俊謙	(阪大)	60	濱島 高太郎	(東北大)	93
<b>D</b>			濱本 拓郎	(九工大)	83, 106
大保 雅載	(フジクラ)	63	濱津 順平	(日本電子)	33
<b>E</b>			原 徹	(NIMS)	78
江畑 敦志	(豊橋技科大)	29	原島 郁弥	(東大)	92
越前谷 大介	(三菱電機)	99	長谷部 孝	(東大)	77
江口 実穂	(中部大)	104	長谷川 満	(三菱電機)	99
<b>F</b>			橋本 篤	(住重)	61
淵野 修一郎	(東大)	91	波多 聡	(九大)	65
藤井 剛	(産総研)	27	早川 直樹	(名大)	116
藤井 里至	(元阪大)	22	林 幹二	(豊橋技科大)	29
藤本 大貴	(九大)	65	東川 甲平	(九大)	13, 105, 113
藤野 正人	(京大)	6	平井 正明	(有沢製作所)	100
藤田 寛和	(京大)	8	平野 直樹	(NIFS)	93, 101
			平岡 耕一	(愛媛大)	35, 46
			廣瀬 政宣	(日本電子)	33
			廣芝 伸哉	(大工大)	29

日浦 琢言	(早大)	50	川井 正徳	(KEK)	44
HOANG Thuong Duc	(東大)	77	川合 修平	(中部大)	104
本田 元気	(住友電工)	17	河野 勝己	(量研機構)	103
星野 壮太	(上智大)	102	河野 亮介	(東大)	88, 89
細川 貴弘	(東京農工大)	121	川崎 玲	(東京農工大)	68
胡 栄沢	(同済大)	37	河島 裕	(テラル)	24
			菊池 章弘	(NIMS)	2, 93, 125, 128
	I		菊池 翔	(芝浦工大)	25
井田 徹哉	(海洋大)	70	菊地 貴大	(産総研)	27
飯田 光人	(たすく)	77	金正 鎬	(Wollongong 大)	124
飯島 康裕	(フジクラ)	63	金 錫範	(岡山大)	23
今川 信作	(NIFS)	100, 119, 120	金 諒太	(岡山大)	59
今道 颯人	(海洋大)	70	木須 隆暢	(九大)	13, 105, 113
今村 和孝	(九大)	113	北川 佳廣	(日本電気)	28
稲葉 勇人	(青学大)	109, 110	北口 仁	(NIMS)	110
稲垣 祐次	(岡山理科大)	41	木内 勝	(九工大)	83, 106
井上 昌睦	(福岡工大)	14, 84, 85	小林 弘明	(JAXA)	95
井上 良太	(岡山大)	23, 59	小林 宏泰	(千葉大)	118
犬塚 俊康	(三菱重工)	3	小林 賢介	(理研)	117
石田 道由	(上智大)	102	小林 慎一	(住友電工)	17
石井 秋光	(NIMS)	121	小林 東矢	(中部大)	34
石山 敦士	(早大)	5, 47, 48, 50, 56, 59, 60	公文 麻人	(九大)	97
伊藤 聡	(JASTEC)	33	児玉 一宗	(日立)	122, 123
伊藤 悟	(東北大)	101	古賀 大揮	(福岡工大)	14
伊東 徹也	(テラル)	24	小濱 芳允	(東大)	12, 45
IVANOV Yury	(中部大)	104	公平 龍之介	(青学大)	16
岩熊 成卓	(九大)	84, 90, 96, 97, 107	鯉沼 秀臣	(SCT 社)	74
岩本 晃史	(NIFS)	100	小泉 結	(学習院大)	54
岩本 貴大	(岡山大)	23	小島 有志	(量研機構)	103
岩崎 響	(青学大)	122	小前 諒太	(岡山大)	59
岩田 暢祐	(SCT 社)	74	駒込 敏弘	(前川)	93
和泉 充	(海洋大)	70	小松 功典	(日本電子)	33
			薦田 遥暉	(岡山大)	23
	K		近藤 莉帆	(青学大)	67
梶谷 秀樹	(量研機構)	103	近藤 良也	(KEK)	44
神谷 宏治	(NIMS)	36, 40	小瀧 博司	(日立)	123
金谷 和長	(東芝 ESS)	31, 32	久我 響暉	(福岡工大)	14
金沢 新哲	(室蘭工大)	64, 111	熊谷 墨	(早大)	56, 57, 58, 59
神田 昌枝	(中部大)	34, 74, 104	熊倉 浩明	(NIMS)	43
金木 大祐	(岩手大)	80	栗山 透	(東芝 ESS)	31, 32, 75
蟹江 澄志	(東北大)	17			
柏原 優樹	(愛媛大)	35		L	
片山 伸彦	(東大)	77, 92	LEE Dong Gun	(Sam Dong)	124
河江 達也	(九大)	41	李 陽	(京大)	8, 10
川越 明史	(鹿兒島大)	90, 96, 97, 107	呂 高泰	(東大)	52
川口 秀樹	(室蘭工大)	64			

## M

町屋 修太郎	(大同大)	15	永石 竜起	(住友電工)	17
前田 穂	(Kangwon 国立大)	124	長岡 孝	(広島総技研)	24
前川 一真	(神戸大)	42, 43, 73	長崎 陽	(東北大)	26, 53, 118
槇田 康博	(KEK)	44, 93	長屋 重夫	(阪大)	24, 56
真鍋 勇一郎	(阪大)	22, 55	内藤 智之	(岩手大)	69, 80
増田 陽平	(九大)	97	中川 潤	(三菱電機)	77
増山 新二	(大島商船高専)	36	中川 心平	(鹿児島大)	96
増澤 美佳	(KEK)	125	中井 優亨	(青学大)	109, 110
間藤 昂允	(北大)	49	中島 昭	(産総研)	27
松田 拓也	(三菱電機)	99	中本 美緒	(量研機構)	103
松本 明善	(NIMS)	43, 65, 85, 93, 121, 123	中村 大翔	(東大)	89
松本 圭介	(愛媛大)	35, 46	中村 一稀	(九大)	97
松本 伸	(富士電機)	39	仲村 高志	(理研)	25
松本 拓也	(JASTEC)	33	中村 武恒	(京大)	1, 2, 3, 4
松村 知岳	(東大)	77, 92	中村 太郎	(早大)	50
松波 成行	(NIMS)	121	中崎 竜介	(古河電工)	6
松野 哲也	(有明高専)	87	中島 隆芳	(住友電工)	16, 109
松下 照男	(九工大)	116	中山 泰輔	(福岡工大)	14
馬渡 康德	(産総研)	20	成嶋 吉朗	(NIFS)	101, 112, 115
三島 史人	(福井工大)	21	縄稚 典生	(広島総技研)	24
三戸 利行	(NIFS)	114, 116	根岸 伸行	(潤工社)	128
三浦 英明	(三菱電機)	62, 95, 99	二ノ宮 晃	(明治大)	104
三浦 峻	(九大)	90, 96, 97, 107	西島 元	(NIMS)	59, 93, 110, 116, 121, 123
三輪 将也	(青学大)	67	西嶋 茂宏	(福井工大)	21, 99, 100
宮城 大輔	(千葉大)	118	西川 怜志	(阪大)	55
宮川 一慶	(九大)	41	野口 聡	(北大)	48, 49, 50, 56, 57, 58, 59, 60
宮本 哲雄	(日本電子)	33	野口 剛志	(埼玉大)	27
宮本 能伸	(青学大)	16	野地 英樹	(都城高専)	51
宮下 拓也	(住重)	61	野島 涉平	(東北大)	26
宮戸 祐治	(龍谷大)	29	野元 一宏	(三菱電機)	99
宮崎 寛史	(九大)	90, 96, 97, 107	野村 直希	(福井工大)	21, 100
宮崎 佳樹	(鉄道総研)	98	沼澤 健則	(NIMS)	36
溝口 義則	(富士電機)	39			
水野 謙一郎	(MTL)	12			
森江 孝明	(住重)	61			
森下 勇樹	(広島総技研)	24			
諸永 拓	(NIMS)	78			
元木 貴則	(青学大)	16, 66, 67, 109, 110, 122			
向山 晋一	(日本電線工業会)	116			
村上 陽之	(量研機構)	103			
武藤 翔吾	(フジクラ)	63			

## N

長濱 葵	(福井工大)	21	尾花 哲浩	(NIFS)	120
永濱 秀明	(JASTEC)	33	小畑 慶人	(三菱電機)	62, 95
			緒方 康博	(テラル)	24
			小川 純	(新潟大)	5, 24
			小椋 隆平	(愛媛大)	46
			小黒 英俊	(東海大)	81, 86
			大橋 克也	(東海大)	81
			大池 章太	(千葉大)	118
			大石 崇史	(早大)	47
			岡 徹雄	(芝浦工大)	25, 71, 72, 82
			岡田 達典	(東北大)	12, 17, 19

## O

岡井 敬一	(JAXA)	95	志賀 雅亘	(九大)	41
岡村 哲至	(東工大)	25	重政 榮於	(京大)	8, 9
大久保 明希	(学習院大)	54	志岐 成友	(産総研)	27
奥村 皐月	(東大)	89, 92	島田 亜緒	(早大)	58
温 謙	(九工大)	87	島本 知輝	(総研大)	120
大西 漠	(豊橋技科大)	29	下山 淳一	(青学大)	16, 66, 67, 109, 110, 122
大西 理志	(豊橋技科大)	29	新富 孝和	(KEK)	93
大西 祥広	(量研機構)	103	塩澤 勇太郎	(新潟大)	5
小野 友輝	(京大)	2	白旗 知暉	(東京農工大)	68
小野寺 優太	(NIFS)	101, 112, 114	白井 康之	(京大)	95
大井 修一	(NIMS)	65	白土 裕一朗	(福岡工大)	85
折原 菜月	(早大)	57	正 孝幸	(テラル)	24
長田 智樹	(名大)	114	祖父江 卓哉	(京大)	8
大崎 博之	(東大)	52, 88, 89, 92	曾我部 友輔	(京大)	6, 7, 8, 9, 10, 11
長村 光造	(応用科学研)	15, 116	須藤 正照	(芝浦工大)	82
押川 昌樹	(鹿児島大)	107	未松 浩人	(日本電子)	33
太田 海斗	(早大)	48	未富 佑	(理研)	117
小田部 荘司	(九工大)	87	杉原 弥悠加	(神戸大)	73
大内 徳人	(KEK)	125, 126, 127	杉本 昌弘	(古河電工)	99
大屋 正義	(関西学院大)	62, 91, 95, 116	砂川 武義	(福井工大)	100
			鈴木 孝明	(日立)	123

## S

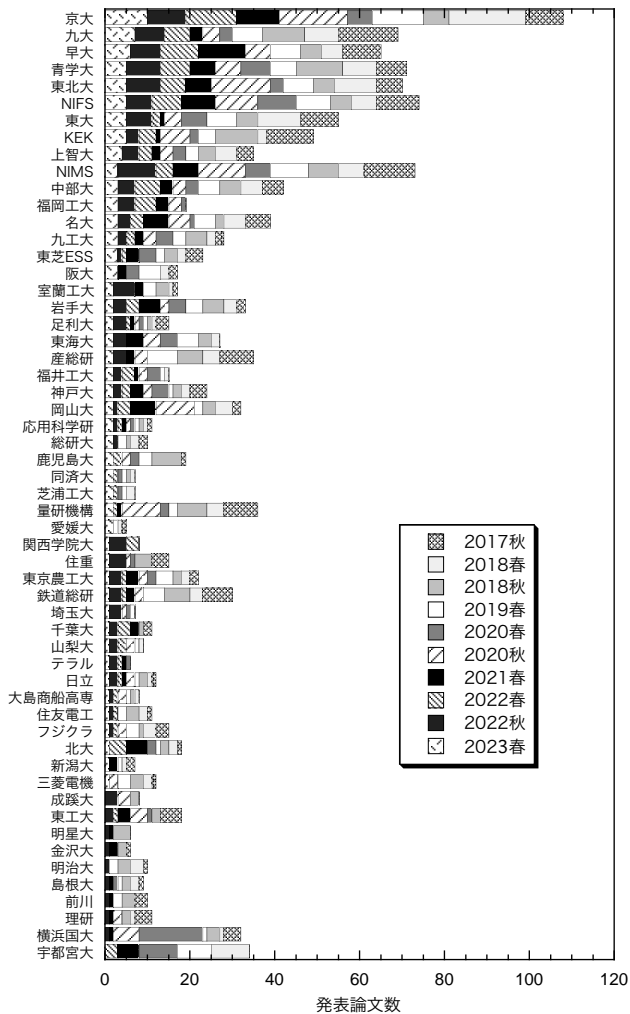
斎藤 涼夫	(中部大)	104
坂藤 正樹	(芝浦工大)	25, 82
坂井 巖	(名大)	45, 114
坂井 直道	(芝浦工大)	25, 82
酒井 秀哉	(福岡工大)	85
坂本 久樹	(SuperPower Inc.)	6
坂本 泰明	(鉄道総研)	98
坂本 宜照	(量研機構)	99, 100, 102
作間 啓太	(山梨大)	30
桜井 貴夫	(三菱重工)	3
桜井 雄基	(岡山大)	77, 92
早乙女 英夫	(千葉大)	118
佐々 滉太	(九大)	90, 97
佐藤 文信	(阪大)	22, 55
佐藤 更	(神戸大)	42, 73
佐藤 誠樹	(九大)	90, 97
佐藤 哲朗	(日本電気)	28
関口 直希	(青学大)	122
関根 ちひろ	(室蘭工大)	64
關谷 尚人	(山梨大)	30
仙波 実怜	(青学大)	66, 67
SHANG Jiahao	(足利大)	71, 72
柴崎 大我	(埼玉大)	27
柴田 將史	(富士電機)	39

## T

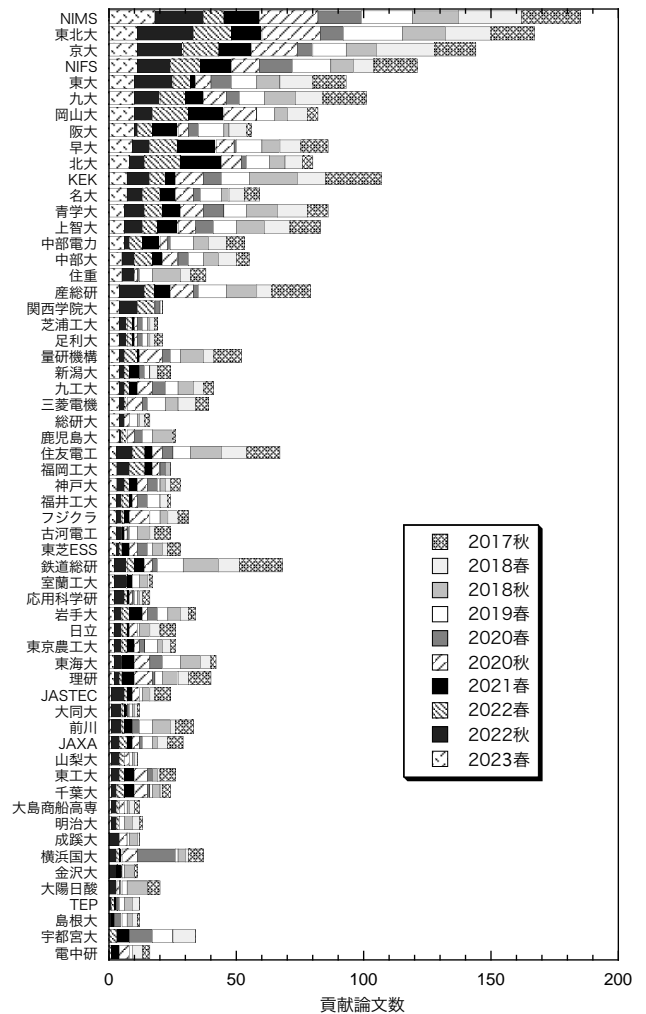
太子周	(九大)	41
田井野 徹	(埼玉大)	27
高田 卓	(NIFS)	40, 101, 120
高田 芳宏	(山本電機製作所)	43
高木 紀和	(東芝 ESS)	31, 32, 75
高橋 明	(京大)	6, 8, 9
高橋 圭太	(学習院大)	54
高橋 雅史	(上智大)	93
高橋 政彦	(東芝 ESS)	31, 32, 75
高橋 正希	(福岡工大)	84
高橋 雅人	(理研)	25
高畑 一也	(NIFS)	76, 100, 101
高久 諒太	(東大)	77
高尾 智明	(上智大)	93, 117
高島 敦史	(九大)	90
高島 浩	(産総研)	108
武田 航太郎	(山梨大)	30
武田 実	(神戸大)	42, 43, 73
武田 宗一郎	(住友電工)	16
武田 泰明	(NIMS)	110
竹村 賢人	(芝浦工大)	25, 82
田邊 豪	(潤工社)	128
田中 秀樹	(日立)	122, 123

田中 雅光	(名大)	28	许 爽	(同済大)	38
田中 三郎	(豊橋技科大)	29			
田中 祥貴	(福岡工大)	84, 85			<b>Y</b>
田中 湧也	(上智大)	117	谷貝 剛	(上智大)	78, 79, <b>93</b> , 99, <b>102</b>
谷 直俊	(JASTEC)	33	柳生 進二郎	(NIMS)	121
TENDONGAFAC Regobert	(足利大)	71, 72	山田 寛之	(名大)	114
寺西 亮	(九大)	65	山田 穰	(中部大)	14
寺尾 悠	(東大)	52, 88, 89, <b>91</b> , 92, 95	山口 作太郎	(中部大)	34, 74, <b>104</b>
寺島 昭男	(KEK)	125, 126, 127, 128	山口 章	(青学大)	<b>109</b> , 110
寺崎 拓也	(九大)	113	山口 柗平	(九工大)	<b>83</b>
戸田 良彦	(有沢製作所)	100	山本 明保	(東京農工大)	68, 121
富田 優	(鉄道総研)	98, 116	山本 航輝	(東工大)	25
殿岡 俊	(三菱電機)	62, 95	山本 実奈	(中部大)	74
鳥居 龍ノ介	(鹿児島大)	<b>96</b>	山本 聡	(量研機構)	103
遠山 喜克	(昌立工業)	100	山本 拓実	(名大)	<b>18</b>
土屋 勝彦	(量研機構)	103	山本 剛	(日本電気)	28
土屋 清澄	(KEK)	<b>125</b> , 126, 127, 128	山中 淳彦	(名大)	100
土屋 美月	(海洋大)	70	山野 聡士	(古河電工)	6, 7
土屋 雄司	(東北大)	<b>12</b> , <b>45</b> , 114	山下 葵	(岡山大)	59
津田 理	(東北大)	26, 53, 118	山下 知久	(鉄道総研)	98
塚田 耀太	(東北大)	53	山崎 浩平	(住友電工)	16, 109
塚原 柗弥	(福岡工大)	14	山崎 春太郎	(名大)	106, 114
鶴留 武尚	(住重)	61	柳 長門	(NIFS)	<b>101</b> , 112, 115
			柳澤 吉紀	(理研)	117
	<b>U</b>		保川 幸雄	(富士電機)	<b>39</b>
内山 誠士郎	(早大)	48	横山 和哉	(足利大)	25, <b>71</b> , 72, 82
植田 浩史	(岡山大)	23, 48, 50, 56, 57, 58, <b>59</b> , 60	横山 彰一	(JASTEC)	33
上田 紘司	(東芝 ESS)	31, 32	吉田 潤	(住重)	56, 57, 59, 60, <b>61</b>
上田 天馬	(九工大)	87	吉田 幸市	(九大)	90, 97
上野 航生	(東芝 ESS)	31, 32, <b>75</b>	吉田 尚貴	(鹿児島大)	107
宇藤 裕康	(量研機構)	<b>99</b> , 100, 102	吉田 偲生	(新潟大)	5
上床 美也	(東大)	35	吉田 良行	(産総研)	108
			吉田 隆	(名大)	18, 45, 106, <b>114</b>
			吉藤 夢来	(早大)	<b>48</b>
	<b>W</b>		吉原 健彦	(住友電工)	<b>17</b>
王 旭東	(KEK)	125, <b>126</b> , 127, <b>128</b>	吉澤 侑希	(東海大)	81
渡邊 裕文	(中部大)	<b>34</b>			<b>Z</b>
渡邊 匡人	(学習院大)	54	ZAMPA Alexandre	(東北大)	12
渡部 智則	(中部電力)	24, 56, 57, 58, 59, 60	章 誠豫	(神戸大)	<b>42</b>
呉 澤宇	(九大)	<b>13</b> , 113	鄭 依城	(九大)	13
			朱 紹偉	(同済大)	37, 38
	<b>X</b>		宗 占国	(KEK)	125, 126, 127
許 光煒	(京大)	<b>10</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 105 回 2023 年度春季

低温工学・超電導学会講演概要集

2023 年 5 月 31 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 バレドール本郷 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

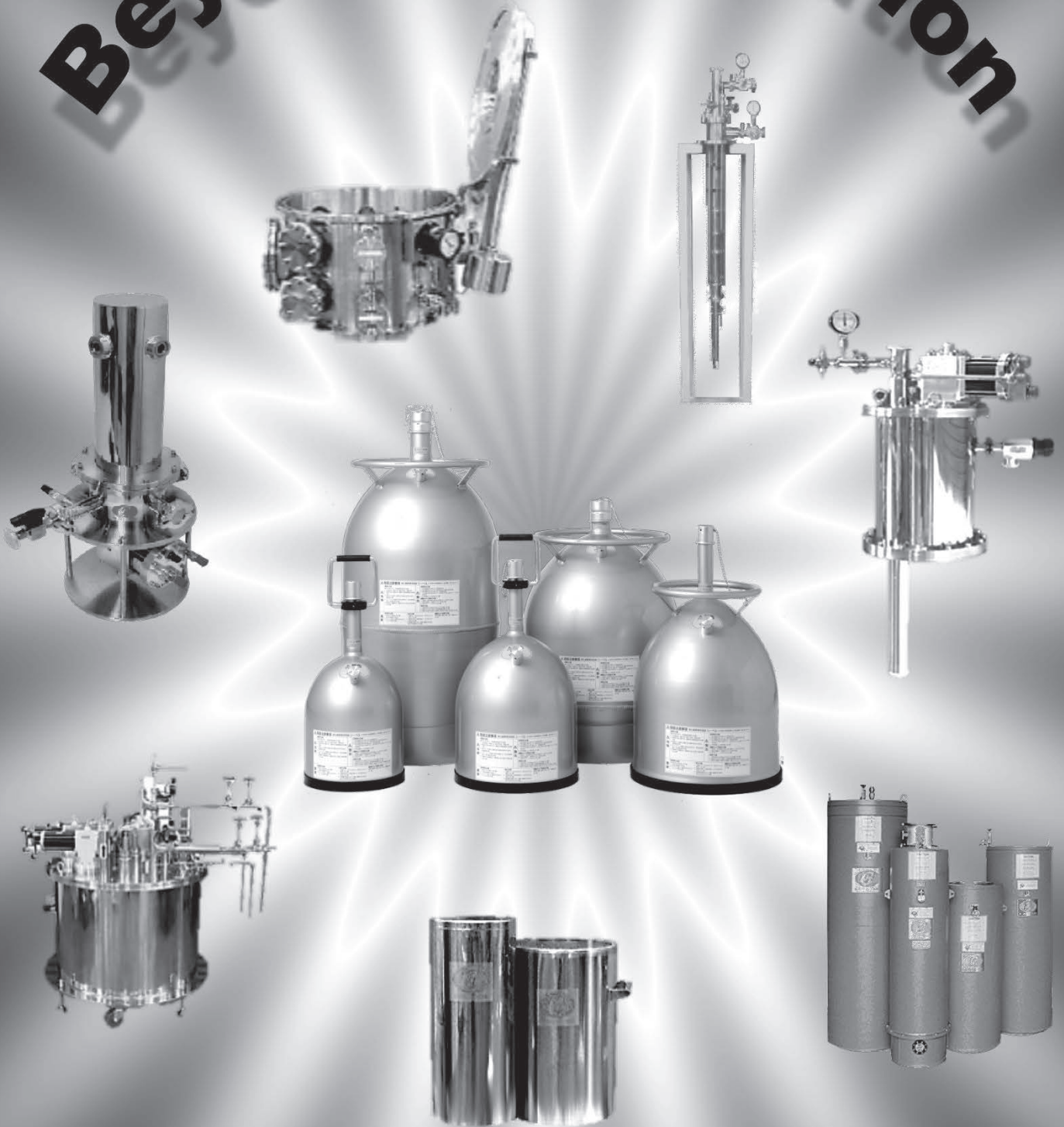
印刷／松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438 番地





# Beyond Imagination



**株式会社ジェック東理社**

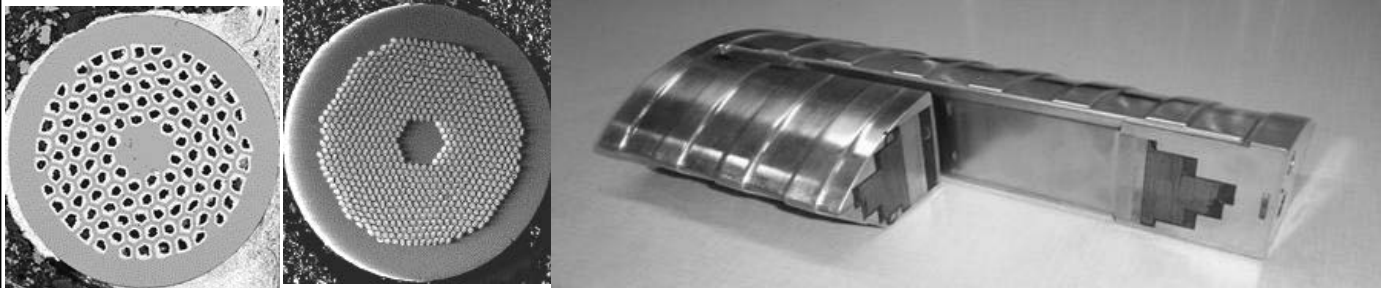
埼玉県川越市芳野台2丁目8番52号

Tel: 049-225-7555 FAX: 049-225-7558

<http://www.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

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

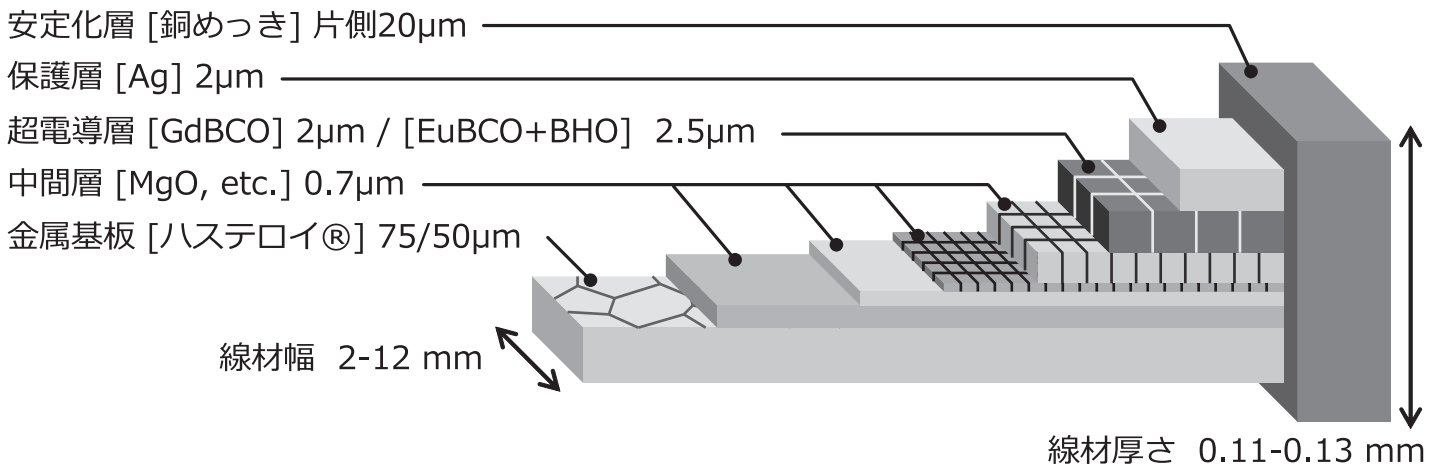
# Fujikura レアアース系高温超電導線材

## ■ 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



## ■ 製品ラインアップ

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	$\geq 30$	257	銀保護層 <sup>*1</sup>
FESC-SCH03	3	0.11	50	20	$\geq 63$	497	人工ピン <sup>*2</sup>
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	$\geq 85$	663	人工ピン <sup>*2</sup>
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	$\geq 250$	1,990	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



[www.linkedin.com/company/fujikura-superconductor](http://www.linkedin.com/company/fujikura-superconductor)

# 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

- IONOS250

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、各種クライオスタット、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 SANSO 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

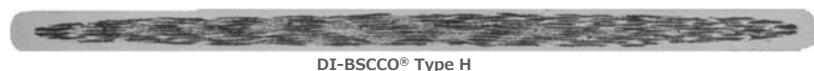
TEL03-5875-5045 FAX03-5875-5496

DI-BSCCO®	Type H	Type G	Type HT-SS	Type HT-CA	Type HT-NX
	大電流密度線材	低熱伝導率線材	異なる補強材を用いた高強度線材		
応用例		電流リード	マグネット	電力ケーブル	高磁場マグネット
補強材(厚さ)	-	-	ステンレス (0.02mm <sup>t</sup> )	Cu 合金 (0.05mm <sup>t</sup> )	Ni 合金 (0.03mm <sup>t</sup> )
平均幅	4.2+/- 0.2mm	4.2+/- 0.2mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.2mm
平均厚さ	0.23+/- 0.01mm	0.23+/- 0.01mm	0.29+/- 0.02mm	0.35+/- 0.02mm	0.31+/- 0.03mm
許容引張強度* 77K, I <sub>c</sub> 維持率 95%	130 MPa *	130 MPa *	270 MPa *	250 MPa *	400 MPa *
許容両曲げ直径* RT, I <sub>c</sub> 維持率 95%	80mm *	80mm *	60mm *	60mm *	40mm *
臨界電流, I <sub>c</sub> 77K, 自己磁場	170A, 180A, 190A, 200A				

## DI-BSCCO® 線材断面

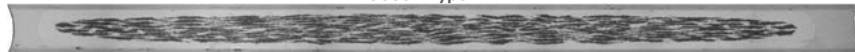
\* 参考値

DI-BSCCO® Type H, Type G



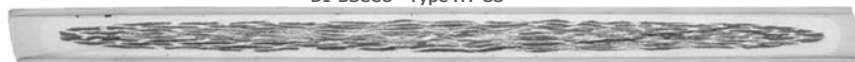
DI-BSCCO® Type H

DI-BSCCO® Type HT-SS, HT-CA



DI-BSCCO® Type HT-SS

DI-BSCCO® Type HT-NX



DI-BSCCO® Type HT-NX

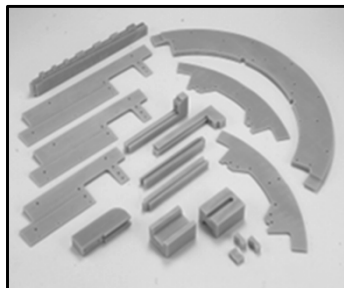
e-mail : [hts@info.sei.co.jp](mailto:hts@info.sei.co.jp)

<https://sumitomelectric.com/jp/products/super>

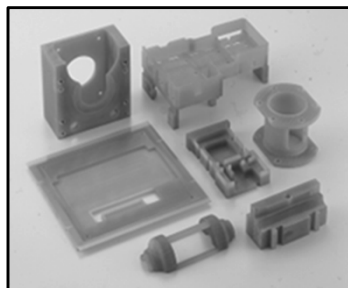
# 低温下で使用する樹脂加工品販売

## GFRP(G10)・プラスチック材料の加工

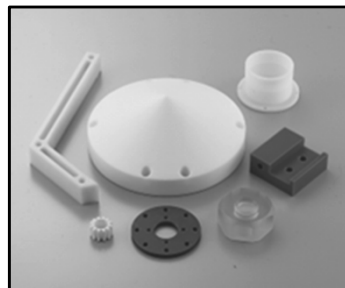
75年以上の歴史とその中で培った加工技術、技術提案力と圧倒的な先端機械設備をフル活用し、切削加工によるモノづくりを行っています。小ロットの合成樹脂、プラスチックの精密機械加工、複雑な3次元形状の製品加工にも対応しています。材料選定からお気軽にご相談下さい。



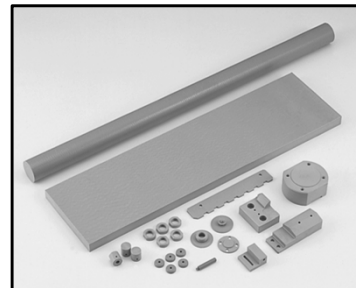
GFRP加工品



GFRP加工品



エンプラ加工品



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](mailto:shoritsu@arion.ocn.ne.jp)

【東京営業所】

〒230-0061

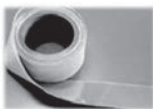
神奈川県横浜市鶴見区佃野町1丁目7番

# 「織る」「塗る」「形づくる」のコア技術で Dreams to Reality を実現します

複合材料総合メーカーの**アリサワ**が  
これまで培ってきた**極低温超電導技術**で  
様々なご要望にお応えします

## 《取り扱い品目》

1. 絶縁材料(耐放射線性含む) 超電導コイル用絶縁テープ、スペーサー
2. 各種複合材料及び加工製品(耐放射線性、非磁性含む)  
プリプレグ、CFRP・GFRP・AFRP、積層板、FWパイプ、3次元加工品、接着組立品



絶縁テープ



プリプレグ



スーパーインシュレーション  
資材および縫製品



積層板



CFRP



クロス巻き  
パイプ



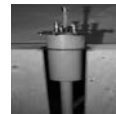
FWパイプ



オートクレーブ  
成形品



3次元加工品



インサートデュウ



## 《採用実績》

核融合実験炉、素粒子加速器・検出器  
非磁性クライオスタット  
小型コイル巻き線

お問い合わせは、(株)有沢製作所 東京支店まで

TEL : 03-3861-2141  
E-mail : denzetsu@arisawa.co.jp



当社のロゴが 100 年ぶりに新しくなりました。



## アルバック・クライオの冷凍機が 極低温・超電導の技術に貢献します

幅広い温度領域に応じて様々な種類の冷凍機の中からお選びいただけます

4KGM  
冷凍機



HE05

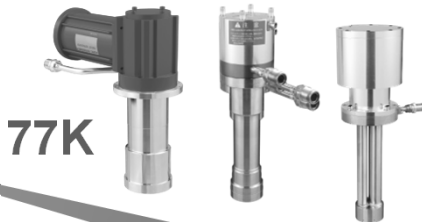


UHE10



UHE15

極低温冷凍機



77K



20K

10K

全自動無冷媒 [開発中]  
希釈冷凍機



4K

<10mK



液体窒素ジェネレーター



クライオポンプ

冷凍機を応用したクライオポンプ及び低温機器製品の  
設計・製造・販売・サービスまで一貫体制で提供します



# 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。

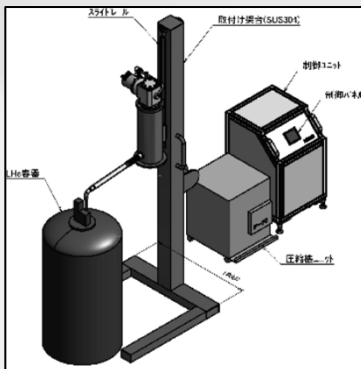
## DSシリーズ

GM冷凍機モデル

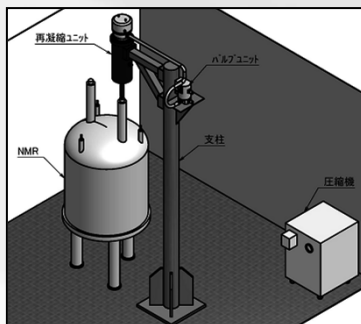


型式	TRG-375DS	TRG-340DS
再凝縮能力 ※1)	18 liter/day	10 liter/day
電源	3相 200V ,50/60 Hz	
電力 ※2)	13.2/15 kW, 50/60 Hz	
冷却水 ※2), ※3)	14-20L/min (28°C)	
メンテナンスサイクル	制御盤 : 10,000時間/毎 冷凍機 : 10,000時間/毎 圧縮機 : 30,000時間/毎	

- ※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)