



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.107 (2024)

第107回 2024年度春季

低温工学・超電導学会 研究発表会 講演概要集

2024年
5月23日，24日，25日

明星大学+WEB

〒191-8506 東京都日野市程久保2丁目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
後援 明星大学

107回

THE WORLD'S SMALLEST 2 Kelvin GM CRYOCOOLER

RDC-02K | 0.02W @ 2.3K

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



住友重機械工業株式会社 精密機器事業部

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

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

 Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

2024 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会

2024 年 5 月 23 日 (木) ~ 5 月 25 日 (土)

会 場： 明星大学 + WEB

所在地：〒 191-8506 東京都日野市程久保 2 丁目 1-1

参加費： お支払いは銀行振込になります。講演概要集代が含まれます。

期限内申込 (4 月 24 日 (水) ~ 5 月 8 日 (水) 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 8 日 (水) 17 時以後)

正会員 * 12,000 円, 賛助会員 ** 13,200 円, 協賛等団体会員個人 ***18,000 円, 学生 5,000 円,

非会員 (一般) 24,000 円, 非会員 (学生) 6,000 円

(講演概要集のみ: 正会員 * 5,000 円, 賛助会員 ** 5,000 円, 協賛等団体会員個人 *** 7,000 円,

学生 2,500 円, 非会員 (一般) 7,000 円, 非会員 (学生) 2,500 円)

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

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

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

懇親会： 5 月 24 日 (金) 18:00 - 20:00

28 号館食堂 (中華料理「美膳」ケータリング)

参加費：6,500 円

主 催： 公益社団法人 低温工学・超電導学会

電話：03-3818-4539 Fax：03-3818-4573

後 援： 明星大学

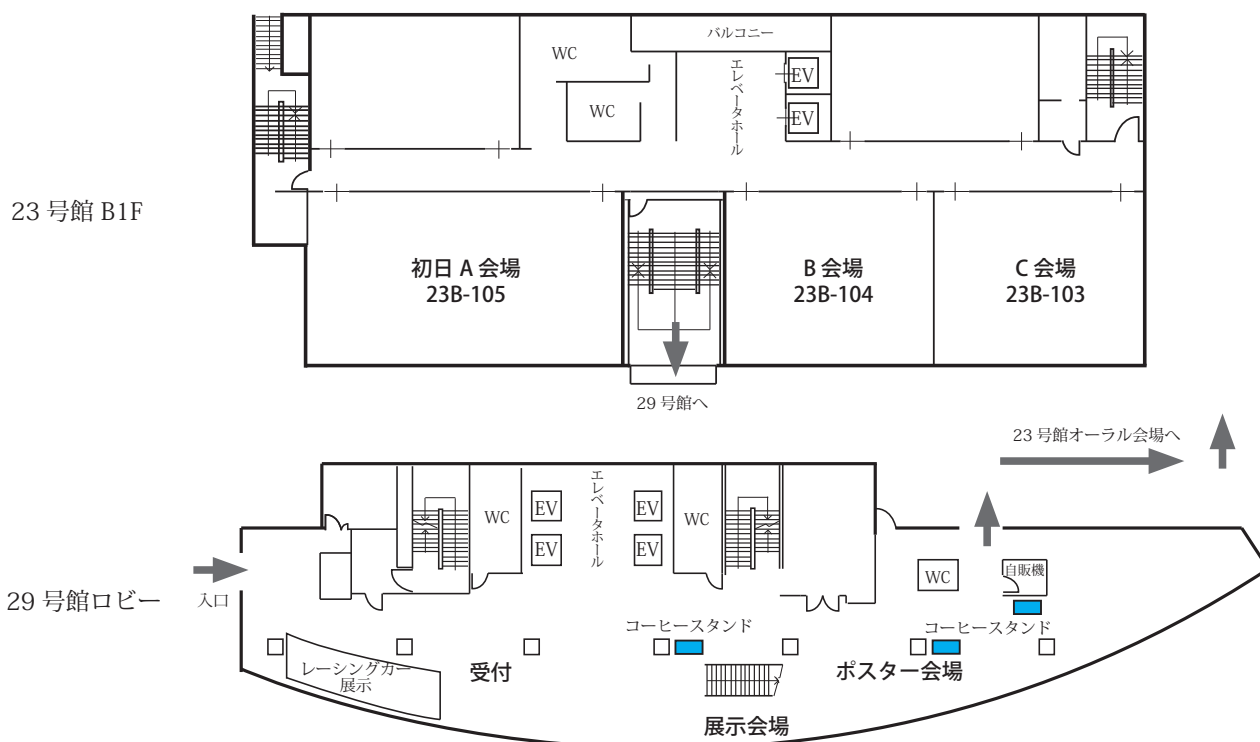
協 賛： 応用物理学会, 電気学会, 日本物理学会, 日本機械学会, 日本表面真空学会, 日本冷凍空調学会

交通案内：多摩モノレール「中央大学・明星大学駅」直結

京王線「多摩動物公園駅」から徒歩 8 分



会場配置図：明星大学



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/2024s/>

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

※口頭発表は、すべてWEB会場にて視聴できます。

ポスター講演：ポスター発表質疑応答は現地のみで行われます。WEB会場には資料のみ掲載されます。講演1件につき、幅140cm、高さ160cm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23日、5月25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。

2024 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会 セッションテーブル

	A 会場	B 会場	C 会場
5 月 23 日 (木)	受付 9:30 ~		
	9:45 - 11:30 SCSC ケーブル p. 1	10:15 - 11:30 HTS 線材 p. 20	10:00 - 11:30 冷却システム p. 38
	昼食		
	ポスター手短紹介 / 展示案内 12:30 - 13:15 (A 会場)		
	ポスターセッション I 13:15 - 14:30 (Poster 会場) 小型冷凍機・低温物性 p. 50, 低融点はんだ p. 54, 送電ケーブル・回転機 (1) p. 55, 医療用加速器 (1) p. 60		
	14:45 - 15:45 SMES・電力制御 p. 8	14:45 - 15:45 HTS 臨界電流 (1) p. 25	
	16:15 - 17:15 超電導・低抵抗接続技術 p. 12	16:00 - 17:15 流動・熱伝達 p. 29	
17:30 - 18:30 加速器・医療用加速器 (2) p. 16	17:30 - 18:30 計測 p. 34	17:00 - 18:30 HTS コイル・安定性 p. 44	
5 月 24 日 (金)	9:30 - 10:45 回転機 (2) p. 62	9:30 - 11:00 バルク作製 (1)・着磁特性 (1) p. 66	9:30 - 11:00 HTS 薄膜 p. 72
	コーヒーブレイク		
	特別セッション 11:30 - 12:15 (A 会場) フェロー塾「ピンチを乗り越えエンジニア」 熊倉 浩明 (筑波大学数理物質系名誉連携教授)		
	昼食		
	論文賞受賞記念講演 p. 78 13:15 - 14:00 (A 会場) 解説論文賞「電動推進航空機用超電導回転機の技術動向」 寺尾 悠 (東京大学)		
	コーヒーブレイク		
	特別セッション 14:30 - 16:15 (A 会場) 「チュートリアル」		
学会活動に関するアンケート結果の報告 16:20 - 16:30 (A 会場)			
社員総会・褒賞授与式 16:45 - 17:45 (A 会場)			
懇親会 28 号館食堂 (中華料理「美膳」ケータリング) 18:00 - 20:00			
5 月 25 日 (土)	9:30 - 10:15 A15 線材 p. 80	9:30 - 10:15 MgB ₂ p. 88	
	10:30 - 11:45 核融合 p. 83	10:30 - 12:00 磁場応用・産業応用 p. 91	10:00 - 11:45 デバイス応用 p. 97
	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) HTS 臨界電流 (2) p. 104, バルク作製 (2)・着磁特性 (2) p. 107, マグネット開発 p. 110, 大電流超電導開発 p. 113, 直流送電 p. 115		
小型核融合関連特別セッション 14:45 - 16:45 (A 会場) 「世界の高温超電導小型核融合ベンチャーに対抗する日本の取り組み」			

※プログラムの詳細は <https://csj.or.jp/conference/2024s/> をご覧ください。

2024 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会 実行委員会

現地実行委員会

委員長 星野 勉 明星大学
委員 齊藤 剛 明星大学
伊庭 健二 明星大学

プログラム編成担当委員会 / 企業展示担当委員会 (企画委員会)

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

オブザーバー

古瀬 充穂 産業技術総合研究所

特別セッション概要

■特別セッション「チュートリアル」

日時：5月24日（金）14:30～16:15

場所：A会場

プログラム：14:30～15:15 超電導マグネットの設計法

講師：石山 敦士（早稲田大学 電気・情報生命工学科）

座長：村上 陽之

15:15～15:45 ゼロからはじめるマテリアルズインフォマティクス

講師：石井 秋光（物質・材料研究機構 若手国際研究センター）

座長：伴野 信哉

15:45～16:15 水素ステーション関連の規制緩和と海外の規制動向

講師：高野 直幸（太陽日酸株式会社 工業ガスユニット）

座長：神谷 祥二

■小型核融合関連特別セッション

日時：5月25日（土）14:45～16:45

場所：A会場

「世界の高温超電導小型核融合ベンチャーに対抗する日本の取り組み」

小型核融合用 REBCO 導体とマグネットの実用化に関する調査研究会

講演予定：

1. 調査研究会の趣旨と挨拶 山田 穰（中部大学） 5分
2. 講演 各質疑応答5分含む
 - A. 「フュージョンエネルギー産業協議会の想定される役割と国民的期待」 30分
坂本 瑞樹（筑波大学プラズマ研究センター センター長）
 - B. 「日本のベンチャーの取組み」
 1. 京都フュージョニアリングの概要と取組み 20分
西村 美紀（京都フュージョニアリング）
 2. 京都フュージョニアリングにおける研究開発－ジャイロトロンなど 20分
岩井 貞憲（京都フュージョニアリング）
3. 最新技術動向（本調査研究会メンバーから） 30分
 1. 核融合マグネットにおける高温超電導導体・コイルの安定性
－ 米国 MIT-CFS 20T コイル試験他から － 植田 浩史（岡山大学）
 2. その他 世界の動向
4. 全体討議

5月23日(木)
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4分です。
(なお、発表資料の切替や登壇等の時間を考慮し、+1分
確保してプログラムを編成しています。)

プログラム番号の例

1A-a05: 1日目A会場の午前5番目

1B-p04: 1日目B会場の午後4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23日(木) A会場 9:45 - 18:30

SCSCケーブル 9:45 - 11:30 座長: 植田浩史

1A-a01	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(1):進捗概要と今後の展開-----	1
	雨宮尚之, 曾我部友輔(京大);手嶋雄太, 原英和(古河電工);坂本久樹(SuperPower)	
1A-a02	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(2):曲げ試験-----	2
	平野貴之, 高橋明, 藤野正人, 曾我部友輔, 雨宮尚之(京大)	
1A-a03	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(3):ミニチュア鞍型コイルの試作-----	3
	雨宮尚之, 上垣柊季, 平野貴之, 曾我部友輔(京大)	
1A-a04	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(4): 低渦電流損失コアを用いたSCSCケーブルの磁化損失測定-----	4
	重政茉於, 曾我部友輔, 上垣柊季, 雨宮尚之(京大)	
1A-a05	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(5):交流損失測定用コイルの設計-----	5
	上垣柊季, 曾我部友輔(京大);福井聡(新潟大);雨宮尚之(京大)	
1A-a06	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(6):SCSCケーブルにおける動的抵抗に関する検討-----	6
	曾我部友輔, 本多尚, 雨宮尚之(京大)	
1A-a07	SCSCケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(7): ケーブル形状及び保護条件とスパイラルケーブルの保護特性の関係-----	7
	曾我部友輔, 雨宮尚之(京大)	

昼食 11:30 - 12:30

SMES・電力制御 14:45 - 15:45 座長: 小川純

1A-p01	高温超電導磁力平衡ヘリカルコイル用試作巻線機の連続巻線試験-----	8
	橋本博正, 矢島健大, 許航, 野村新一(明治大);仁田旦三(東大);新富孝和(KEK); 平野直樹(NIFS)	
1A-p02	再生可能エネルギー電源出力の長期変動補償に適したSMESシステムの構成と入出力制御方法-----	9
	羽多野椋太, 大和田智也, 長崎陽, 津田理(東北大)	
1A-p03	大規模太陽光発電からの電力輸送を目指したSMESケーブルシステムの構成検討-----	10
	東川甲平, 田淵竜也, 木須隆暢(九大);MUYEEN S. M. (Qatar大)	
1A-p04	液体水素冷熱の有効利用とEVの急速充電を実現する超電導DCDCコンバータの開発-----	11
	谷貝剛(上智大);植田康博, 新富孝和(KEK);平野直樹(NIFS);濱島高太郎(東北大)	

休憩 15:45 - 16:15

超電導・低抵抗接続技術 16:15 - 17:15 座長: 筑本知子

1A-p06	REBCO超伝導接合の臨界電流の温度および磁場印加角度依存性-----	12
	武田泰明, 西島元(NIMS);元木貴則, 下山淳一(青学大);北口仁(NIMS)	
1A-p07	音波接合を用いたREBCO線材間の半田フリー接合における金属安定化層の違いによる	

	接合抵抗の変化と接合抵抗の制御に関する検討	13
	世良真也, 呉澤宇, 鈴木賢次, 東川甲平, 木須隆暢 (九大)	
1A-p08	高温超伝導線材の圧接における接合性能の挿入金属依存性	14
	伊藤 悟, 田村 怜於 (東北大); 山本 春海, 恩地 太紀, 富田 優 (鉄道総研)	
1A-p09	量産評価用ジョイントテスト装置の開発 (II) - HTS ジョイントテスト -	15
	横山 彰一, 齊藤 一功, 濱田 衛 (JASTEC)	

休憩 17:15 - 17:30

加速器・医療用加速器 (2) 17:30 - 18:30 座長：尾花 哲浩

1A-p10	加速器用 HTS マグネットの開発 (11)	
	- 銅層厚が異なる REBCO 線材で製作した丸型ケーブルの臨界電流特性 -	16
	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)	
1A-p11	EPICS に基づく Belle 超伝導ソレノイド用温度モニターの開発	17
	青木 香苗, 槇田 康博, 近藤 良也, 川井 正徳 (KEK)	
1A-p12	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年春)	
	- 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの過渡的電磁力解析 -	18
	植田 浩史, 山下 葵, 廣田 悠力, 南前 俊介, 井上 良太, 金 錫範 (岡山大); 野口 聡 (北大); 渡部 智則 (中部電力); 福田 光宏 (阪大); 石山 敦士 (早大)	
1A-p13	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年春):	
	1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの数値計算に基づく熱的過渡安定性解析・評価	19
	日浦 琢言, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)	

5月23日 (木) B会場 10:15 - 18:30

HTS 線材 10:15 - 11:30 座長：井上 昌睦

1B-a01	データ駆動型アプローチによる実規模の REBCO コート線材製造プロセスのモデリングと最適化への展開	20
	木須隆暢, 呉澤宇, 世良真也, 楊 墨, 田中 佑斗, 東川甲平 (九大); VALIKOV Roman, 中村 美幸, PETRYKIN Valery, LEE Sergey (Faraday Factory Japan)	
1B-a02	レーザースクライビング線材の磁場中臨界電流特性	21
	町 敬人, 廣瀬 陽代, 和泉 輝郎 (産総研), 中村 美幸, 蓮尾 信也, SERGEY Lee (Faraday Factory Japan)	
1B-a03	ツイストした RE 系コート線材の縦磁界下における臨界電流特性	22
	濱本 拓郎, 豊岡 寛大, 木内 勝 (九工大)	
1B-a04	断続的なマイクロクラックを導入した REBCO 多か線の開発研究	23
	金沢 新哲 (室蘭工大)	
1B-a05	Al ₂ O ₃ をパターニングした基板上での MOD-YBCO 薄膜のマルチフィラメント化	24
	藤本 大貴, 寺西 亮 (九大); 松本 明善, 大井 修一, 立木 実 (NIMS)	

昼食 11:30 - 12:30

HTS 臨界電流 (1) 14:45 - 15:45 座長：金沢 新哲

1B-p01	5kA パルス電流を用いた REBCO 線材の強磁場・可変温度中 I_c 測定	25
	土屋 雄司 (東北大); 水野 謙一郎 (MTL); 小濱 芳允 (東大); 淡路 智 (東北大)	
1B-p02	リール式磁気顕微計測と機械学習の融合による IBAD-PLD 法長尺 REBCO コート線材の電流阻害領域の解析: 異なるメーカーによる線材間の比較	26
	呉澤宇, 東川甲平, 木須隆暢 (九大)	

1B-p03	K-Ba122 多結晶体制製プロセスにおける J_c 増加および劣化要因	27
	亀谷 文健, LIMON Shah Alam, JANI Md Rafsun, SU Yi-Feng, MAO Sam, TARANTINI Chiara, HELLSTROM Eric (Florida 州立大)	
1B-p04	実用超電導テープ用高強度銅複合材の試作	28
	長村 光造 (応用科学研); 大塚 尚孝 (UACJ)	

休憩 15:45 - 16:00

流動・熱伝達 16:00 - 17:15 座長：槇田 康博

1B-p05	液体窒素浸漬冷却における T 型特殊フィンによる沸騰伝熱促進	29
	松尾 奏朗, 結城 光平, 結城 和久 (山東理大)	
1B-p06	平行溝を用いた液体窒素中のプール沸騰熱伝達の改善	30
	堀 伊吹, 吹場 活佳, 須田 公平 (静岡大)	
1B-p07	液体窒素中の水平上向き面における遷移沸騰熱伝達	31
	高畑 一也 (NIFS)	
1B-p08	細線周りの He II 沸騰におけるラムダ点ごく近傍の特徴的な振る舞い	32
	高田 卓, 濱口 真司 (NIFS); 岡村 崇弘 (KEK); 木村 誠宏 (東大); 村上 正秀 (筑波大)	
1B-p09	細管で生じる圧力損失の測定と相関式の適用性	33
	島崎 毅, 中川 久司 (産総研)	

休憩 17:15 - 17:30

計測 17:30 - 18:30 座長：島崎 毅

1B-p10	熱電対を用いた簡易液面計と熱侵入量見積	34
	神田 昌枝, 石川 未祈, 山口 作太郎 (中部大)	
1B-p11	低い超電導転移温度を持つ MgB ₂ 線材を用いた液体水素用外部加熱型液面センサーの性能評価	35
	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 (東京農工大); 松本 明善 (NIMS)	
1B-p12	液体窒素温度におけるフェライトおよびダストコアの磁気測定	36
	井上 良太, 白石 智也, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大)	
1B-p13	新型アナログ差分回路を用いた歪ゲージの高感度測定	37
	神田 昌枝, 山本 実奈, 山口 作太郎 (中部大)	

5月23日(木) C会場 10:00 - 18:30

冷却システム 10:00 - 11:30 座長：夏目 恭平

1C-a01	NMR マグネット向け冷媒蒸発抑制装置 (2)	38
	永濱 秀明 (JASTEC); 松本 拓也 (神戸製鋼); 福山 和宏, 谷 直俊, 横山 彰一, 伊藤 聡 (JASTEC); 濱津 順平 (日本電子)	
1C-a02	固体・液体水素のレーザー実験への応用	39
	岩本 晃史 (NIFS); 韋 添允, 余語 覚文 (阪大)	
1C-a03	超伝導体内部に侵入した水素のトンネル拡散による特性変化	40
	芳賀 雄仁, 太子周, 小池 健生, 志賀 雅亘, 橋爪 健一 (九大); 稲垣 祐次 (岡山理科大); 河江 達也 (九大)	
1C-a04	静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討 (2)	41
	脇 耕一郎, 恩地 太紀, 坂本 泰明, 富田 優 (鉄道総研); 平野 直樹, 小野寺 優太 (NIFS)	
1C-a05	共用イナータンスチューブ多段パルス管冷凍機	42

朱紹偉 (同済大)

1C-a06	超電導回転機におけるセルフポンピング効果の検討-----	43
	星野 勉, 井上 勇希, 竹内 亮郎, 齊藤 剛 (明星大)	

昼食 11:30 - 12:30

HTS コイル・安定性 17:00 - 18:30 座長：西島 元

1C-p01	深層学習を用いた REBCO パンケーキコイルのクエンチ予測に関する検討-----	44
	間藤 昂允, 中井 優介, 野口 聡 (北大)	
1C-p02	REBCO 3 ターンコイルの液体水素/窒素中の熱暴走実験についての考察-----	45
	今川 信作 (NIFS); 大屋 正義 (関西学院大); 白井 康之 (京大); 濱口 真司, 岩本 晃史 (NIFS); 小林 弘明 (JAXA)	
1C-p03	強磁場超伝導マグネットのクエンチ保護に向けた金属絶縁体転移材料特性-----	46
	櫻井 響介, 土屋 雄司, 岡田 達典 (東北大); 田橋 正浩, 後藤 英雄 (中部大); 淡路 智 (東北大)	
1C-p04	核融合マグネットを目指した単純積層 HTS テープ金属含浸導体の 20K 8T 条件下での通電特性-----	47
	成嶋 吉朗, 柳 長門, 濱口 真司, 小野寺 優太, 力石 浩孝, 馬場 智澄 (NIFS); GARFIAS-DÁVALOS Diego (総研大); 宮澤 順一, 後藤 拓也 (ヘリカルフュージョン)	
1C-p05	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における電磁現象の解析-----	48
	小林 宏泰, 大池 章太, 宮城 大輔 (千葉大); 津田 理 (東北大)	
1C-p06	多重極展開を用いた NI REBCO マグネットの局所的相互インダクタンス計算の高速化-----	49
	榊原 里樹 (北大); 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大)	

ポスター手短紹介 / 展示案内 12:30 - 13:15 (A 会場)

5月23日(木) ポスターセッションI Poster 会場 13:15 - 14:30

小型冷凍機・低温物性 13:15 - 14:30 座長：平山 貴士

1P-p01	能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMR) における水素凝縮熱交換器の熱特性-----	50
	白井 毅, 佐藤 瑛空, 石田 政義 (筑波大); 内田 公, 夏目 恭平, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)	
1P-p02	能動的蓄冷式磁気冷凍機 (AMR) のアクチュエータ負荷低減のためのばね機構-----	51
	佐藤 瑛空, 白井 毅, 石田 政義 (筑波大); 内田 公, 夏目 恭平, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)	
1P-p03	NMR マグネット向け冷媒蒸発抑制装置の冷却性能-----	52
	松本 拓也 (神戸製鋼); 永濱 秀明, 福山 和宏, 谷 直俊, 横山 彰一, 伊藤 聡 (JASTEC)	
1P-p04	CZ 法および EFG 法サファイアの極低温熱伝導率の比較-----	53
	山田 智宏 (KEK)	

低融点はんだ 13:15 - 14:30 座長：寺尾 泰昭

1P-p05	InBiSn 系および Pb, Cd 含有 InBiSn 系低融点金属の低温域における電気輸送特性-----	54
	松永 信之介, 武田 泰明, 夏目 恭平, 神谷 宏治 (NIMS)	

送電ケーブル・回転機 (1) 13:15 - 14:30 座長：山口 作太郎

1P-p06	過冷却下での単層縦磁界直流超電導ケーブルの通電特性-----	55
	山口 柊平, 木内 勝, 濱本 拓郎 (九工大)	
1P-p07	超電導電力ケーブルにおける超電導体部分の損失解析-----	56
	野地 英樹 (都城高専)	
1P-p08	液体水素ポンプ用モータの超電導化に関する基礎検討-----	57
	河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	
1P-p09	超伝導テープ線幅広面に垂直な変動磁界による並列導体内電流分布の均流化効果の検証-----	58

吉田 尚貴, 中川 心平, 安藤 綜一郎, 川越 明史 (鹿児島大); 宮崎 寛史, 三浦 峻, 岩熊 成卓 (九大)

1P-p10	直径 140 mm のリング状積層超電導体と永久磁石を用いた超電導磁気軸受の基礎特性-----	59
	寺尾 悠, 淵野 修一郎 (東大); 大屋 正義 (関西学院大)	

医療用加速器 (1) 13:15 - 14:30 座長: 村上 陽之

1P-p11	重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの3次元コイル形状設計-----	60
	尾花 哲浩 (NIFS)	
1P-p12	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年春): 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの数値計算に基づく励磁特性解析・評価-----	61
	折原 菜月, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)	

5月24日 (金) A会場 9:30 - 17:45

回転機 (2) 9:30 - 10:45 座長: 宮崎 寛史

2A-a01	液体水素冷却高温超電導発電機の開発 - プロジェクト概要 - -----	62
	小笠原 敦, 小畑 慶人, 石見 佳紀, 三浦 英明, 殿岡 俊 (三菱電機); 大屋 正義 (関西学院大); 白井 康之 (京大); 寺尾 悠 (東大); 坂本 織江 (上智大); 岡井 敬一, 田口 秀之, 小林 弘明 (JAXA)	
2A-a02	液体水素冷却高温超電導発電機デモ機の開発状況-----	63
	大屋 正義 (関西学院大); 殿岡 俊, 小笠原 敦, 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)	
2A-a03	高温超電導コイル圧縮時の可逆的臨界電流特性低下原因の究明-----	64
	大屋 正義, 村田 将一郎, 久保田 優志 (関西学院大); 三浦 英明, 小畑 慶人 (三菱電機)	
2A-a04	液体水素冷却高温超電導発電機向け高強度 REBCO コイルの検討-----	65
	小畑 慶人, 三浦 英明, 小笠原 敦, 殿岡 俊 (三菱電機); 大屋 正義 (関西学院大)	
2A-a05	(取り消し)	

5月24日 (金) B会場 9:30 - 11:00

バルク作製 (1)・着磁特性 (1) 9:30 - 11:00 座長: 原田 直幸

2B-a01	SDMG 法による YBCO バルク作製と捕捉磁場特性 - Y123/Y211 前駆体溶融条件の検討 - -----	66
	箱石 裕人, 齋藤 光希, 内藤 智之 (岩手大)	
2B-a02	マルチシード板上に育成した SDMG 法 REBCO 溶融凝固バルクにおける粒界ミスフィット角と 超伝導特性-----	67
	遠藤 淳, 元木 貴則, 國本 慧太, 下山 淳一 (青学大)	
2B-a03	一方向溶融成長 (SDMG) 法による 60 mm 級大型 REBCO バルクの育成-----	68
	元木 貴則, 遠藤 淳, 國本 慧太 (青学大); 中村 新一 (TEP); 下山 淳一 (青学大)	
2B-a04	グラファイト層間化合物 CaC ₆ の Na 触媒によるバルク体合成と超伝導特性-----	69
	伊豫 彰, 藤久 裕司, 後藤 義人, 石田 茂之, 永崎 洋, 荻野 拓 (産総研); 川島 健司 (イムラ・ジャパン)	
2B-a05	パルス着磁における GdBCO バルクの侵入磁束密度分布測定-----	70
	井田 徹哉, 川澄 渚, 今道 颯人, 土屋 美月, 高橋 圭太 (海洋大)	
2B-a06	特殊形状の軟鉄ヨークを用いたバルク磁石のパルス着磁特性の評価-----	71
	横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)	

5月24日 (金) C会場 9:30 - 11:00

HTS 薄膜 9:30 - 11:00 座長: 土屋 雄司

2C-a01	銅酸化物超伝導体原料を用いた FF-MOD 法原料溶液の特徴-----	72
	下山 淳一, 堀口 佳吾, 相楽 和豊, 元木 貴則 (青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一 (住友電工)	

2C-a02	酸化物原料を用いた FF-MOD 法 Y123 薄膜における不純物添加効果 -----	73
	相楽 和豊, 堀口 佳吾, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一 (住友電工)	
2C-a03	酸化物原料を用いた IBAD 基体上 FF-MOD 法 Gd123 薄膜の作製 -----	74
	堀口 佳吾, 相楽 和豊, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一 (住友電工)	
2C-a04	FF-MOD 法 Gd123 薄膜への Zr, Sn, Ce, Ti, Hf の共添加による高 J_c 化 -----	75
	石井 涼太, 佐藤 宏大, 三浦 大介 (都立大)	
2C-a05	ナノコンポジット REBCO 高温超伝導薄膜における局所歪と磁束ピン止め力 -----	76
	松本 要, 堀出 朋哉, 吉田 隆 (名大); 一瀬 中 (電中研)	
2C-a06	マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流 III -----	77
	毛利 誠一, 小田部 荘司 (九工大); 馬渡 康徳 (産総研)	

コーヒーブレイク 11:00 - 11:30

特別セッション 11:30 - 12:15 (A会場)

フェロー塾「ピンチを乗り切れエンジニア」
熊倉 浩明 (筑波大学数理物質系名誉連携教授)

昼食 12:15 - 13:15

論文賞受賞記念講演 13:15 - 14:00 座長：三戸 利行 (A会場)

2S-p01	電動推進航空機用超電導回転機の技術動向 -----	78
	寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	

コーヒーブレイク 14:00 - 14:30

特別セッション 14:30 - 16:15 (A会場)

「チュートリアル」

- 14:30 - 15:15 超電導マグネットの設計法
講師：石山 敦士 (早稲田大学 電気・情報生命工学科)
座長：村上 陽之
- 15:15 - 15:45 ゼロからはじめるマテリアルズインフォマティクス
講師：石井 秋光 (物質・材料研究機構 若手国際研究センター)
座長：伴野 信哉
- 15:45 - 16:15 水素ステーション関連の規制緩和と海外の規制動向
講師：高野 直幸 (太陽日酸株式会社 工業ガスユニット)
座長：神谷 祥二

学会活動に関するアンケート結果の報告 16:20 - 16:30 (A会場)

財政委員会委員長 平井 寛一 (太陽日酸)

社員総会・褒賞授与式 16:45 - 17:45 (A会場)

懇親会 18:00 - 20:00 28号館食堂 (中華料理「美膳」ケータリング)

5月25日 (土) A会場 9:30 - 16:45

A15線材 9:30 - 10:15 座長：杉本 昌弘

3A-a01	機械的曲げを持つ Nb ₃ Al 極細素線超伝導ケーブルの超伝導特性の研究-----	80
	植木 竜一, 大内 徳人 (KEK); 菊池 章弘 (NIMS); 山本 優 (日本超電導応用開発); 青木 和之, 有本 靖 (KEK)	
3A-a02	Nb ₃ Sn 層形成および超伝導特性に与える Zn および Mg 添加効果-----	81
	伴野 信哉 (NIMS); 浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大)	
3A-a03	Nb ₃ Sn 層形成および超伝導特性に与える Ti 添加場所の影響-----	82
	伴野 信哉 (NIMS); 浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大)	

休憩 10:15 - 10:30

核融合 10:30 - 11:45 座長：王 旭東

3A-a04	JT-60SA ポロイダル磁場コイルの通電結果-----	83
	村上 陽之, 土屋 勝彦, 福井 良磨, 大西 祥広, 河野 勝己, 薄井 勝富, 柏 好敏, 井口 将秀, 佐藤 稔, 本田 敦, 市毛 尚志, 阿部 太一, 櫻井 嶺太, 濱田 一弥 (量研機構)	
3A-a05	高温超伝導 STARS 導体を用いた 20 K / 20 T モデルコイルの設計と開発-----	84
	柳 長門 (NIFS), GARFIAS-DÁVALOS Diego (総研大), 成嶋 吉朗 (NIFS); 伊藤 悟 (東北大); 田村 仁, 小野寺 優太, 濱口 真司, 力石 浩孝, 平野 直樹 (NIFS)	
3A-a06	コイル形状がケーブルインコンジット導体の電流分布に及ぼす影響に関する基礎的検討-----	85
	佐藤 亮太, 小林 宏泰, 宮城 大輔 (千葉大); 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大)	
3A-a07	東北大学大洗センターの超伝導特性評価システムの高度化 - 50Hz 計測システムの導入 - -----	86
	西村 新, 菱沼 良光 (NIFS)	
3A-a08	Nb ₃ Sn 線材および ReBCO テープの超伝導特性に及ぼす中性子照射効果-----	87
	西村 新, 菱沼 良光 (NIFS)	

昼食 12:00 - 13:00

5月25日(土) B会場 9:30 - 12:00

MgB₂ 9:30 - 10:15 座長：木内 勝

3B-a01	微細な B 粉末を用いた MgB ₂ バルクの合成条件の最適化-----	88
	岩崎 響, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 末本 祐也, 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー)	
3B-a02	MgB ₂ 線材の熱処理時間が室温での印加ひずみ耐性に与える影響-----	89
	田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司 (日立); 菅野 未知央, DHAKARWAL Mukesh, 荻津 透 (KEK); 松本 明善, 西島 元 (NIMS)	
3B-a03	液体水素用液面センサーに適した超伝導 MgB ₂ 線材の断面観察-----	90
	大島 冬真 (神戸大); 福本 祥一, 高田 芳宏 (山本電機製作所); 武田 実, 前川 一真 (神戸大)	

休憩 10:15 - 10:30

磁場応用・産業応用 10:30 - 12:00 座長：井上 良太

3B-a04	常磁性物質の超伝導淘汰管磁気分離法に関する基礎的研究-----	91
	三島 史人, 野村 直希, 西嶋 茂宏 (福井工大)	
3B-a05	原子炉中で発生する CRUD 材の磁気分離に関する基礎的研究-----	92
	西嶋 茂宏, 野村 直希, 三島 史人 (福井工大); 関根 智一 (ICUS)	
3B-a06	小型冷凍機と高温超伝導バルク磁石による永久磁石の磁気浮上と非接触攪拌機への応用-----	93
	岡 徹雄 (芝浦工大); 関根 芸妍, 菊地 紘生, 横山 和哉 (足利大); 坂井 直道 (芝浦工大); 逸見 智和 (サーマルブロック)	

3B-a07	MDDS 向け複数の HTS コイルによる磁性粒子の局所集積・誘導に適した磁場形成	94
	野島 渉平, 長崎 陽, 津田 理 (東北大)	
3B-a08	アルミ押出成形用 750kW 級磁気加熱装置の開発 (1) - 装置概要	95
	緒方 康博, 伊東 徹也, 河島 裕, 正 孝幸 (テラル); 福井 聡, 小川 純 (新潟大)	
3B-a09	複数の HTS テープ線を用いた磁気浮上型超電導免震装置の浮上力・復元力特性	96
	鈴木 大心, 吉村 創, 長崎 陽, 津田 理 (東北大)	

昼食 12:00 - 13:00

5月25日(土) C会場 10:00 - 11:45

デバイス応用 10:00 - 11:45 座長: 明連 広昭

3C-a01	ジョセフソンパラメトリック発振器の特性評価と位相判別	97
	町村 至, 吉川 信行, 山梨 祐希 (横浜国大)	
3C-a02	断熱量子磁束パラメトロン回路を用いた同期式 4 ビットカウンターの設計と比較	98
	大森 結斗, AYALA Christopher, 吉川 信行 (横浜国大)	
3C-a03	時間依存 Ginzburg-Landau シミュレーションを用いた超伝導三端子素子のパルス電流動作におけるインピーダンス解析	99
	安川 直輝 (東京理科大); 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大); 西尾 太一郎 (東京理科大); 馬渡 康徳 (産総研)	
3C-a04	機械式冷凍機を用いた測定環境における雑音評価	100
	田中 雅光, 李 峰, 藤巻 朗 (名大)	
3C-a05	極低温における断熱量子磁束パラメトロン回路のビット誤り率シミュレーション	101
	永井 亜暉, 吉川 信行 (横浜国大)	
3C-a06	単一磁束量子回路を用いたスケーラブルなベイジアンネットワークの設計	102
	山中 陸央, 吉川 信行, 山梨 裕希 (横浜国大)	
3C-a07	超伝導ストカスティック関数演算回路の設計	103
	浅香 海斗, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)	

昼食 12:00 - 13:00

ポスター手短紹介 13:00 - 13:15 (A会場)

5月25日(土) ポスターセッションII Poster会場 13:15 - 14:30

HTS 臨界電流 (2) 13:15 - 14:30 座長: 馬渡 康徳

3P-p01	Zr をパターンニングした基板上に形成した REBa ₂ Cu ₃ O _y 薄膜の臨界電流特性	104
	関戸 真矢, 白土 裕一朗 (福岡工大); 松本 明善, 立木 実 (NIMS); 井上 昌睦 (福岡工大)	
3P-p02	REBCO 線材の臨界電流のねじり依存性と面内臨界電流密度分布	105
	隠崎 遼河, 三輪 歩夢, 井上 昌睦 (福岡工大)	
3P-p03	磁気光学イメージングを用いた超電導薄膜面内の臨界電流密度評価	106
	宇都宮 銀汰 (福岡工大); 大井 修一, 立木 実, 松本 明善 (NIMS); 井上 昌睦 (福岡工大)	

バルク作製 (2)・着磁特性 (2) 13:15 - 14:30 座長: 元木 貴則

3P-p04	アルミニウム鋳込み法による CaKFe ₄ As ₄ 超電導バルクの作製	107
	川島 健司, 神谷 良久 (イムラ・ジャパン); 石田 茂之, 荻野 拓, 鬼頭 聖, 伊豫 彰, 永崎 洋, 吉田 良行 (産総研)	
3P-p05	Al 鋳ぐるみ手法により作製した CaKFe ₄ As ₄ 超電導バルクの捕捉磁場特性	108

石田 茂之, 鬼頭 聖, 伊豫 彰, 永崎 洋, 吉田 良行, 荻野 拓 (産総研); 神谷 良久,
川島 健司 (イムラ・ジャパン)

3P-p06 幅が広い希土類系酸化物超伝導テープ線材を用いた擬似バルク超伝導体の捕捉磁場----- 109
原田 直幸, 高橋 慶, 末安 彰 (山口大)

マグネット開発 13:15 - 14:30 座長：高畑 一也

3P-p07 ILC 主線形加速器用 NbTi 伝導冷却超伝導四極磁石・双極複合磁石の開発状況----- 110
山田 智宏, 有本 靖, 山本 明, 大内 徳人 (KEK); SOLYAK Nikolay, SAINI Arun (FNAL);
堀井 弘幸, 野元 一宏 (三菱電機)

3P-p08 Transient voltages observed over a large-scale prototype of a cryogen-free HTS insert coil----- 111
ZAMPA Alexandre, 高橋 弘紀 (東北大); BADEL Arnaud (Grenoble Alpes 大); 土屋 雄司,
岡田 達典, 淡路 智 (東北大), 宇都 達郎, 武輪 裕之, 花井 哲, 井岡 茂,
稲垣 淳二 (東芝エネルギーシステムズ)

3P-p09 誘導エネルギー取出法によるクエンチ復旧時間短縮の実証試験----- 112
江原 悠太, 吉田 潤 (住重)

大電流導体開発 13:15 - 14:30 座長：伊藤 悟

3P-p10 REBCO 積層導体を収めた常電導ジャケットの渦電流損失----- 113
川越 明史, 摺木 惇人 (鹿児島大); 尾花 哲浩 (NIFS)

3P-p11 Faro shuffle 接続法を用いた積層高温超電導導体間における接続抵抗の評価----- 114
小野寺 優太, 成嶋 吉朗, 柳 長門 (NIFS); 宮澤 順一, 後藤 拓也, 中村 誠,
金田 健一 (ヘリカルフュージョン)

直流送電 13:15 - 14:30 座長：平野 直樹

3P-p12 太陽光発電と超電導直流送電システムの成立性に関する検討----- 115
星野 勉, 矢花 空宙, 森井 大晴, 伊庭 健二 (明星大)

休憩 14:30 - 14:45

小型核融合関連特別セッション 14:45 - 16:45 (A会場)

「世界の高温超電導小型核融合ベンチャーに対抗する日本の取り組み」

小型核融合用 REBCO 導体とマグネットの実用化に関する調査研究会

1. 調査研究会の趣旨と挨拶 山田 穰 (中部大学) 5分
2. 講演 各質疑応答5分含む
 - A. 「フュージョンエネルギー産業協議会の想定される役割と国民的期待」 30分
坂本 瑞樹 (筑波大学プラズマ研究センター センター長)
 - B. 「日本のベンチャーの取組み」
 1. 京都フュージョニアリングの概要と取組み 20分
西村 美紀 (京都フュージョニアリング)
 2. 京都フュージョニアリングにおける研究開発 - ジャイロトロンなど 20分
岩井 貞憲 (京都フュージョニアリング)
3. 最新技術動向 (本調査研究会メンバーから) 30分
 1. 核融合マグネットにおける高温超電導導体・コイルの安定性
- 米国 MIT-CFS 20T コイル試験他から - 植田 浩史 (岡山大学)
 2. その他 世界の動向
4. 全体討議

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年春)(1): 進捗概要と今後の展開

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (1): Overview and future perspective

雨宮 尚之, 曾我部 友輔(京大); 手嶋 雄太, 原 英和(古河電工); 坂本 久樹(SuperPower Inc.)
AMEMIYA Naoyuki, SOGABE Yusuke (Kyoto U.);
TEJIMA Yuta, Hara Hidekazu (Furukawa Electric); SAKAMOTO Hisaki (SuperPower)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、低交流損失でロバストな高温超伝導集合导体である SCSC cable (double “SC” cable; Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable)の研究開発を進めている。本発表では、2024 年春時点における進捗の概要と今後の展開について説明する。

2. 進捗の概要

2024 年 3 月まで、JST 未来社会創造事業低炭素領域探索研究として、导体(ケーブル)レベルの研究を実施した。探索研究の中盤までは、コアをリニアガイドで移動させつつ回転させて、その周りに線材を巻き取る方式の、短尺ケーブル作製機を用いており、長さ数十センチメートル以下の試料ケーブルしか作製できなかった。しかし、現在は、作製長に制約のないリール・トゥ・リール方式のケーブル作製機を用いて、ほとんどの試料ケーブルを作製している。Fig. 1 に作製した SCSC ケーブルの外観の一例を示す。このケーブルは、直径 3 mm の黄銅コアの周りに各層 3 本のマルチフィラメント線を 4 層にわたって巻いた外径約 4 mm のケーブルである。

SCSC ケーブルのコアとしては、多様な材料を用いることができるが、最近では、交流損失低減と保護性を折衷させた黄銅コア、柔軟性に優れた撚り線コアを主に使用している。それらのどちらを用いても、ケーブリング前の超伝導素線に比べて臨界電流を損なわないようなケーブルを作製できるようになっている。以下に概要を示す実験は、主に、黄銅コアを用いたケーブルを用いて行った。

まず、4 層ケーブルを用いて曲げ通電試験を液体窒素中で行った。ケーブリング後の直線状態におけるケーブルの $V-I$ 特性、曲げジグに沿わせて、順次、大きな曲げ径から小さな曲げ径に曲げていったケーブルの $V-I$ 特性を比較した。その結果、曲げ半径 20 mm まで曲げても $V-I$ 特性(臨界電流)の低下はほとんど見られなかった(1A-a02 で報告)。次に、超伝導線 1 本、銅テープ 2 本から構成される単層ケーブルを用いて、曲げ半径が 25 mm の 1 ターンの手のひらサイズのミニチュア鞍型コイルを試作した。この場合も、鞍型コイルに巻いたあとの $V-I$ 特性(臨界電流)は、コイルに巻く前のケーブルのそれと比較してほとんど低下しなかった(1A-a03 で報告)。また、SCSC ケーブルの交流損失に与えるコアの渦電流損失の影響を調べるために、様々なコアを用いて作製した 4 層ケーブルの磁化損失を比較した(1A-a04 で報告)。今後、コイルに巻いた状態の交流損失を評価する第一歩として、モノフィラメント線材で作製したスパイラル导体で巻いたコイルの交流損失を計画しているが、1 ターンコイルのような导体周方向磁界が支配的なコイルでは有意な実験はできない。そこで、どのようなコイルで実験するのが適切かという点から試験コイルの設計を行っている(1A-a05 で報告)。また、コイルに巻いて電流を輸送する SCSC ケーブルにおいては動的抵抗も問題になり得るので、これについても研究を進めている(1A-a06 で報告)。クエンチ保護に関しては、ケーブル形状及び保護条件とスパイラル导体の保護特性の関係について理論的に検討している(1A-a07 で報告)。

3. 今後の展開

2024 年 4 月からは、JST 戦略的創造研究推進事業先端的カーボンニュートラル技術開発 ALCA-Next 本格研究として、导体レベルからコイルレベルへ展開した研究開発に着手している。同本格研究では、研究開発実施体制も拡充し、SCSC ケーブルの利点ある、低交流損失、大電流量、異方性なく曲げられる巻線性について、技術実証コイル等を作製して実証する。さらに、本格研究においてコイルとしての技術を確立した後の展開を見据えて、SCSC ケーブルコイル(SCSC ケーブルで巻いたコイル)で構成される機器の設計検討も行う。本格研究の成果を生かした研究開発により、将来的には、SCSC ケーブルコイルを組み込んだ超伝導磁気エネルギー貯蔵装置、超伝導モータ、誘導加熱装置などの開発を可能にし、再生可能エネルギーの大量導入、電化を通じた化石燃料消費削減、様々な電気機器の効率向上を通して、カーボンニュートラル社会実現に貢献することを目指す。

また、国内外の外部機関と連携した、広がりのある研究開発を展開していく。一例として、航空機用モータの研究開発を行っているウェリントン・ビクトリア大学と京都大学は共同研究契約を締結済みで、当面は、モノフィラメント線材で構成されたスパイラル导体を京都大学で作製し、これを用いてウェリントン・ビクトリア大学でコイルを作製し、その特性評価を行う計画である。このほか、SCSC ケーブルやそのバリエーションは、核融合炉用导体、特に変動励磁が必要で交流損失が問題となる CS コイル用导体のサブケーブルや、高い磁界精度が要求される加速器用マグネットへの応用も期待できる。後者については、日米科学技術協力事業の枠組みのもとで、高エネルギー加速器研究機構、ローレンス・バークレー国立研究所、ブルックヘブン国立研究所などと連携して研究を行う準備を進めている。

謝辞

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 先端的カーボンニュートラル技術開発 (ALCA-Next) グラント番号 JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業グラント番号 JPMJMI19E1) の支援を受けたものである。

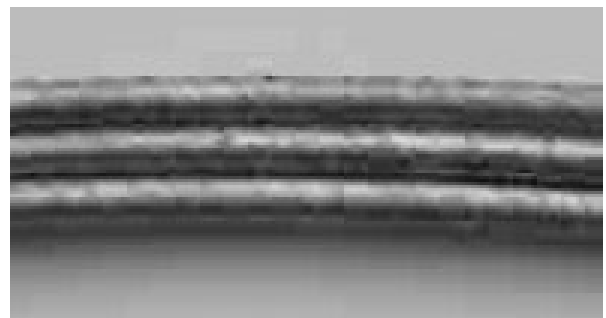


Fig. 1 SCSC cable fabricated by using reel-to-reel cabling machine.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年春)(2): 曲げ試験

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (2): Bending tests

平野 貴之, 高橋 明, 藤野 正人, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)
HIRANO Takayuki, TAKAHASHI Akira, FUJINO Masato, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

SCSC cable (double “SC” cable; Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable)を用いてコイルを巻くためには、その曲げ特性についての知見が必要である。SCSC ケーブルの曲げ試験に着手したので、実験結果について報告する。

2. ケーブルの曲げと通電特性

SCSC ケーブルにおいては、金属コア(現在の標準としては直径 3 mm)の周りにマルチフィラメント薄膜線材がスパイラル状に巻かれている。ケーブルの曲げと通電特性について考える場合、まず、スパイラル形状の線材が、さらに、ケーブルの曲げによって変形したときに、その通電特性がどのように変化するかが疑問点のひとつである。また、曲げの内側で隣接線材同士が接触するまでケーブルを曲げれば、線材が幅方向に座屈する可能性があり、この場合は、明らかに通電特性が劣化すると想像できる。さらに、SCSC ケーブルでは、マルチフィラメント薄膜線材が多層に巻かれているので、外側の層の線材が内側の層の線材を拘束し、これも曲げた場合の変形、ひいては通電特性に影響を与える可能性がある。

3. 偏流の影響を除くため超伝導線を 1 本のみ含んだケーブル曲げ試験

昨秋の研究発表会では、10 フィラメント超伝導線 1 本・銅テープ 2 本で構成され偏流の影響がなく、外層線材による拘束もない条件で、スパイラル形状の線材がケーブルの曲げに伴いさらに曲がった影響について調べ、曲げ半径 20 mm でもほとんど通電特性に劣化がみられないことを報告した。今回は、さらに、外層線材による拘束を加えた条件での通電特性を、偏流の影響がない状態で調べるために、4 層ケーブルの 12 本の線のうち 1 層目の 1 本だけが 10 フィラメント超伝導線で他の 11 本が銅テープのケーブル、2 層目の 1 本だけが 10 フィラメント超伝導線で他の 11 本が銅テープのケーブルの曲げ試験を行ったが、いずれも、曲げ半径 20 mm 以下でも、ほとんど通電特性に劣化がみられないことを確かめた。

4. 全て超伝導線から構成される 4 層ケーブルの曲げ試験

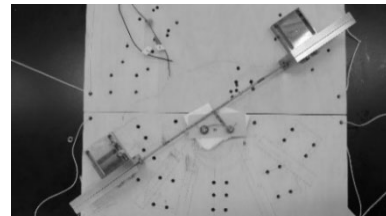
次に、各層 10 フィラメント超伝導線 3 本、層数 4 のケーブルの曲げ試験を行った。ケーブルは、曲げ半径 20 mm で曲げても、線材同士が接触しないように設計されている。ケーブルの両端には銅パイプの電流端子を取り付け、さらに、銅パイプの中に先端部だけ絶縁を剥離した銅線を挿入し、電圧タップとした。このほか、最外層の超伝導線 3 本のそれぞれにも別のタップを接触させ電圧を測定した。Fig. 1 に示すように曲げジグに沿わせて曲げ、曲げ半径を順次小さくして、液体窒素中で通電特性を評価した。Fig. 2 には、もっとも曲げ半径が小さい 20 mm になったときの様子を示す。

銅パイプの中に挿入した電圧タップにより測定した電圧から、銅パイプ内を埋めたはんだを流れる電流の影響による電流に比例する電圧成分を差し引いた電圧を用いた電界-電流特性を Fig. 3 に示す。曲げ半径 20 mm まで曲げてもほとんど通電特性は変化していない。一方、最外層の超伝導線のうち 1 本に接触させたタップで測定した電圧は、曲げ半径 20 mm のときに、低いケーブル電流値から電圧が立ち上がった。これ

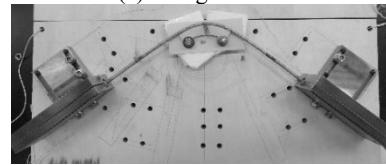
は、この線自身の劣化、もしくは、なんらかの原因によるこの線が分担する電流の増加に起因すると考えられる。いずれであるかは、各線の電流が測定できないため不明である。

謝辞

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 先端的カーボンニュートラル技術開発 (ALCA-Next) グラント番号 JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業グラント番号 JPMJMI19E1) の支援を受けたものである。



(a) Straight cable



(b) Cable bent using bending jig
Fig. 1 Bending cable using jig.

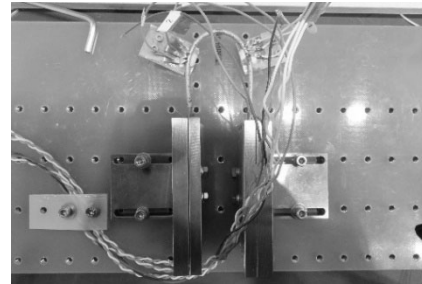


Fig. 2 Sample cable with bending radius of 20 mm.

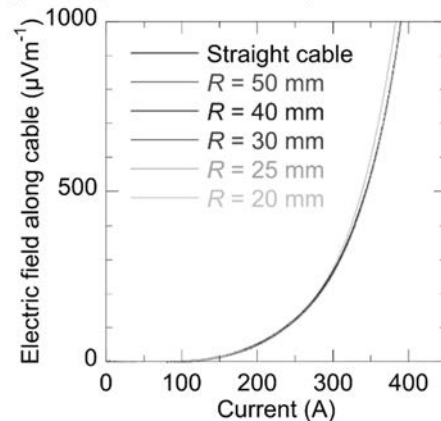


Fig. 3 E - I curves of a four-layer SCSC cable at various bending radii.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年春)(3): ミニチュア鞍型コイルの試作

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (3): Trial fabrication of miniature saddle-shape coils

雨宮 尚之, 上垣 柊季, 平野 貴之, 曾我部 友輔(京大)
 AMEMIYA Naoyuki, UEGAKI Hiiragi, HIRANO Takayuki, SOGABE Yusuke (Kyoto U.)
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

SCSC cable (double “SC” cable; Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable)の利点の一つは、あらゆる方向に等方的に曲げることが可能な点である。この利点の検証の第一歩として、手のひらに載るサイズのミニチュア鞍型コイルを試作したので、報告する。

2. 超伝導線 1 本・銅テープ 2 本から構成された単層ケーブルを用いた 1 ターン鞍型コイルの手巻き試作

10 フィラメント超伝導線 1 本・銅テープ 2 本から構成された単層ケーブルを用意し、この両端に Fig. 1 に示すように銅パイプの電流端子を取り付けた。銅パイプの中に挿入した銅線による電圧タップが VT1, VT4 であり、超伝導線に外側面に接触させた電圧タップが VT2, VT3 である。このケーブルを用いて、Fig. 2 に外観を示すような 1 ターン鞍型コイルを手巻きにより試作した。コイル端部における曲げ半径は 25 mm である。手でケーブルを押さえながら、3D プリンタで作製した巻き枠の溝にはめるようにして鞍型に成型した。ケーブルのコアは軟黄銅であるため、鞍型に成型すると塑性変形し、形状が保持される。

直線状態のケーブル、1 ターン鞍型コイルに巻いた状態のケーブルの通電特性を、液体窒素中において、VT1-VT4, VT2-VT3 を用いて調べた。Fig. 3 に示すように VT1-VT4 により測定した電圧には銅パイプ中のはんだに起因すると考えられる電流に比例する成分が含まれるが、これを引き去ると VT1-VT4 の電圧と VT2-VT3 の電圧はよく一致した。Fig. 4 に、ケーブル作製前の超伝導線の $E-I$ カーブ、直線ケーブルの $E-I$ カーブ、鞍型コイル巻き後の $E-I$ カーブを比較した。なお、この電界はいずれも、線材に沿った値(単位長さあたりの電圧)に換算した値である。この図を見ると、鞍型コイルに巻いても通電特性はほとんど劣化していないことがわかる。

3. 各層銅テープ 3 本×4 層の模擬ケーブルを用いた 3 ターン鞍型コイルの巻き線機による試作

次に、より実用的な巻き線機による試作のために、各層が銅テープ 3 本から構成される 4 層模擬ケーブルを用いて、3 ターン鞍型コイルを巻き線機により試し巻きした。試作したコイルの外観写真を Fig. 5 に示す。コイル端部における曲げ半径は 25 mm である。ケーブルに適当な張力を印加しながら 3D プリンタで作製した巻き枠を回転させ、ケーブルを巻き枠に巻き取っていった。直線部は、ジグにより成型しながら巻き線した。この場合も、ケーブルのコアは軟黄銅であるため塑性変形し、巻き枠に沿って鞍型に成型され、形状が保持されている様子がわかる。

謝辞

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 先端的カーボンニュートラル技術開発 (ALCA-Next) グラント番号 JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業グラント番号 JPMJMI19E1) の支援を受けたものである。

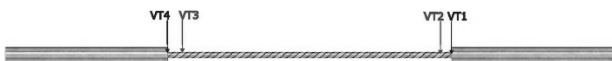


Fig. 1 Locations of voltage taps.

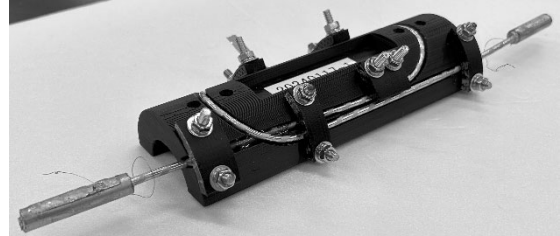


Fig. 2 One-turn saddle-shape coil wound with mono-layer cable consisting of one SC tape and two copper tapes.

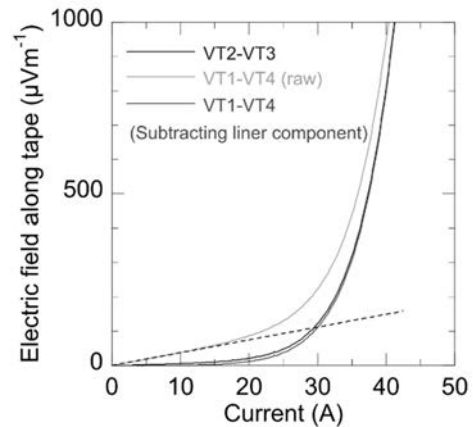


Fig. 3 Voltage measured taps VT1-VT4, which are in copper pipe and taps VT2-VT3 on SC tape.

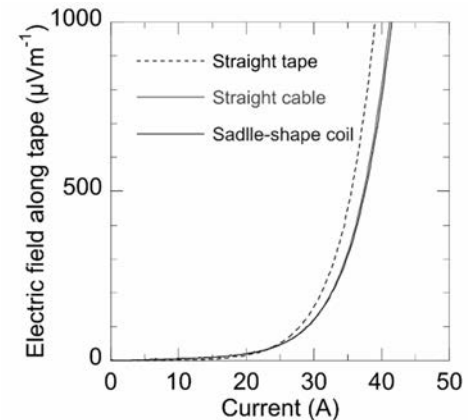


Fig. 4 $E-I$ curves of straight cable, cable wound into saddle-shape coil, and SC tape before cabling.

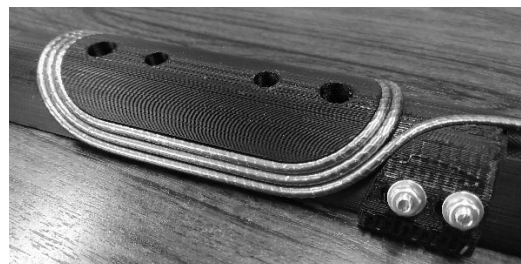


Fig. 5 Three-turn saddle-shape coil wound with four-layer mockup cable consisting of 12 copper tapes.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年春)(4): 低渦電流損失コアを用いた SCSC ケーブルの磁化損失測定

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (4):

Measurements of magnetization losses of SCSC cables with low-eddy-current-loss cores

重政 茉於, 曾我部 友輔, 上垣 冬季, 雨宮 尚之(京大)

SHIGEMASA Mao, SOGABE Yusuke, UEGAKI Hiiragi, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

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

1. はじめに

我々は低交流損失でかつロバスト性に優れた高温超伝導ケーブル(SCSC 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円断面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ることにより、フィラメントの結合を抑制している[1]。SCSC ケーブルにおける磁化損失には、銅複合多芯薄膜線材で発生するヒステリシス損失や結合損失に加え、コアにおいて発生する渦電流損失も含まれるため、低渦電流損失コアを使用することが望ましい。銅を主体とする低渦電流損失コア、黄銅コアや銅撚線コアなど様々なコアを使用した SCSC ケーブルの磁化損失を測定し、比較した。

2. 試料と実験方法

長さ 100 mm の低損失コアと銅、黄銅、絶縁された銅撚線(リッツ線)、裸銅撚線、そしてガラス繊維強化プラスチック(GFRP)をコアとして用いた SCSC ケーブルを作製し、それらの磁化損失を測定した。コアの直径は $D_c = 3$ mm、線材幅 w_t は 2 mm、フィラメント幅 w_f は 0.2 mm、フィラメント数 n_f は 10、銅層厚 t_{Cu} は 10 μm 、層数 n_L は 4、そして線材の本数 n_t は 12 である。試料を液体窒素で浸漬冷却し、横方向の交流磁界を印加し、コアに沿ったケーブル単位長さあたりの、磁界変化の一周期あたりの磁化損失 Q_m (J/m)を測定した。

3. 実験結果

Fig. 2 に、各種のコアを用いた SCSC ケーブルについて、周波数 65.44 Hz における磁化損失測定値 Q_m を磁界振幅に対してプロットした。図には、以下に示すような Brandt と Indenbom の理論に基づく、ケーブル単位長さあたりのヒステリシス損失 $(2/\pi)\beta n_f Q_{BL,f}' n_t$ も併せて示した。

$$Q_{BL,f}' = \frac{(\mu_0 H_m)^2 \pi w_t^2}{\mu_0} \frac{g(H_m/H_c)}{(H_m/H_c)}, \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{2}{x} \ln(\cosh x) - \tanh x, \quad (2)$$

$$H_c = \frac{I_c}{\pi w_c}, \quad (3)$$

$\mu_0 H_m$ は磁界振幅である。 I_c は線材の臨界電流であり、閾値 100 $\mu\text{V/m}$ における I_c はおよそ 20 A である。 β はスパイラルピッチによって決定される定数である。

Fig. 2 で示したケーブルは、いずれも臨界電流密度が小さいためヒステリシス損失が小さく、結合損失やコアでの渦電流損失がより支配的となるため、 Q_m は $(2/\pi)\beta n_f Q_{BL,f}' n_t$ に従わず、磁界振幅の二乗にほとんど比例して増加した。

Fig. 3 に、 I_c が Fig. 2 で示したものより高いケーブルについて、 Q_m および $(2/\pi)\beta n_f Q_{BL,f}' n_t$ を Fig. 2 と同様にプロットした。このケーブルでは、臨界電流密度が比較的高いためヒステリシス損失がより支配的であり、 Q_m は $(2/\pi)\beta n_f Q_{BL,f}' n_t$ に比較的近しい振る舞いを示し、式(1)中の項 $g(H_m/H_c)/(H_m/H_c)$ が最大となる磁界振幅 20 mT 付近で Q_m は $(2/\pi)\beta n_f Q_{BL,f}' n_t$ にほぼ一致した。

謝辞

本研究は JST ALCA-Next JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業 JPMJMI19E1) の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] N. Amemiya et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 35, no.2 (2022), Art. no. 025003, doi: 10.1088/1361-6668/ac3f9c

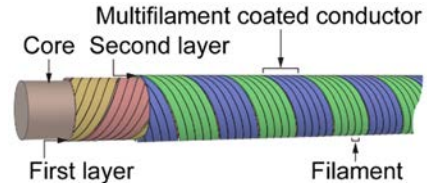


Fig. 1 Schematic view of the SCSC cable [1].

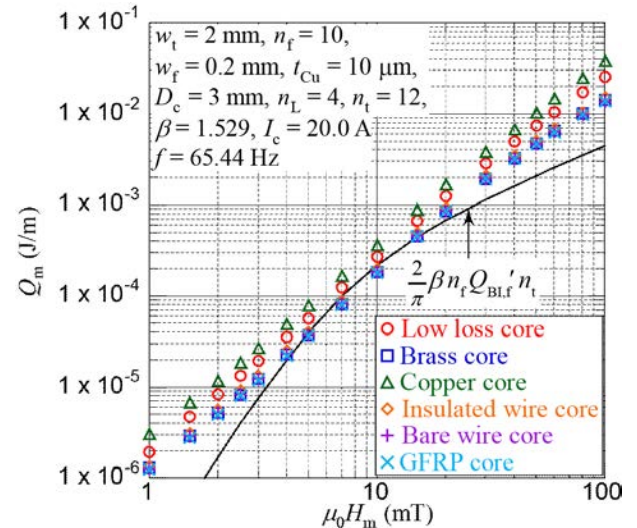


Fig. 2 Magnetization loss of SCSC cables with various cores.

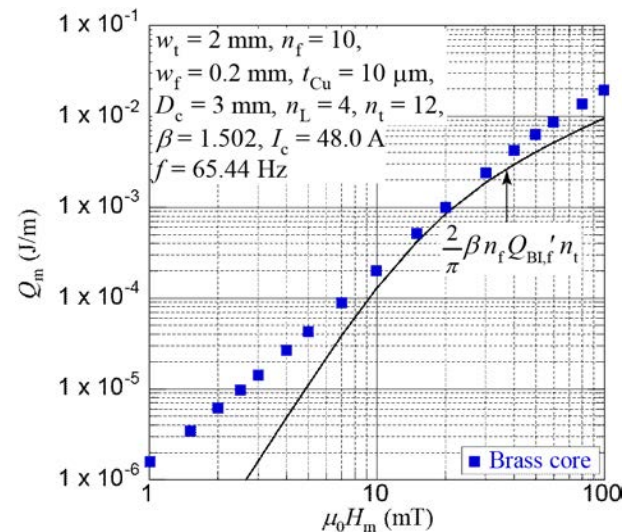


Fig. 3 Magnetization loss of SCSC cable with high critical current.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年春)(5): 交流損失測定用コイルの設計

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (5): Design of coils for ac loss measurements

上垣 柊季, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大); 福井 聡(新潟大)
UEGAKI Hiiragi, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki(Kyoto U.); FUKUI Satoshi (Niigata U.)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

薄膜高温超伝導線を円断面コアの周りにスパイラル状に巻いたスパイラル導体(CORC®ケーブル、SCSC ケーブル)は任意の方向に曲げることが容易で、コイル設計の自由度が大幅に向上する。我々はこのようなスパイラル導体で作製したコイルの交流損失を実験によって評価することを目指している。

2. 設計の考え方

直線状ケーブルや 1 ターンコイルに通電するとき、ケーブルが経験する磁界は Fig. 1(a)のように周方向の自己磁界が支配的となる。一方、多くの電気機器やマグネットは巻き数が多くなるため、ケーブルが経験する磁界は Fig. 1(b)のような横磁界が支配的となる。スパイラル導体を電気機器へ応用するには、スパイラル導体の横磁界に対する交流損失特性を明らかにすることが求められる。以上の理由よりスパイラル導体を用いて作製したコイルの交流損失特性を実験によって評価するには、コイル断面においてできるだけ横磁界を経験する領域が広がる形状のコイルを設計することが望ましい。また、実験機器の制約によって通電可能な電流、周波数はコイルのインダクタンスによって制限されてしまう。それらの条件を考慮して交流損失を評価するためのコイルを設計する必要がある。

3. 横磁界によって生じる交流損失

直線状の薄膜高温超伝導線において、テープ面に垂直な磁界に対して、単位長さあたり、磁界変化 1 周期あたりで生じる磁化損失 $Q_{h,strip}$ は式(1)に示す Brandt の式によって求められる[1]。一方、スパイラル導体に横磁界が印加されると、Fig. 2 のようにテープが経験する磁界は場所によって変化する。テープ面に対して角度を持つ磁界に対する交流損失は主に垂直成分によって決まることが知られている。そのため、スパイラル導体の磁化損失 Q_m は Brandt の式を磁界印加角度によって積み付けした式(2)によって評価できる[2]。

$$Q_{h,strip} = \mu_0 w I_c H_e g \left(\frac{H_e}{H_c} \right) \quad (1)$$

$$H_c = I_c / w \pi$$

$$g(x) = \left(\frac{2}{x} \right) \ln(\cosh x) - \tanh x$$

$$Q_m = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha=0}^{\frac{\pi}{2}} Q_{h,strip} \cos \alpha d\alpha \quad (2)$$

ここで、 H_e は印加磁界、 w はテープ幅、 I_c は臨界電流である。また、ケーブルは円断面であるため、損失は横磁界の大きさのみによって決まる。

4. コイル断面形状の評価

コイル断面形状と横磁界によって生じる損失の大きさの関係を解析によって評価する。Fig. 3 に解析モデルを示す。総巻き数、内径を固定した円形コイルについてコイル断面の形状を変化させ、50 A を通電した際にコイル断面の巻線が経験する磁界分布を電磁界解析によって計算した。巻線として臨界電流 100 A、4 mm 幅のモノフィラメント線をスパイラル状に巻いたスパイラル導体を想定し、巻線で生じる磁化損失を計算した。通電損失やその他の損失については考慮していない。ケーブル長さは断面形状によって変化するが、ケーブル長さ当たりの損失について比較を行う。磁化損失の計算結果を

Fig. 4 に示す。コイル断面が正方形に近いコイルで横磁界による磁化損失が大きくなるのがわかる。断面が正方形に近づくほど、ソレノイドコイルやパンケーキコイル形状と比べて横磁界を経験する領域が広くなり、交流損失測定用コイルとして望ましいと考える。また、Fig. 4 にそれぞれのコイル形状でのインダクタンスを示す。インダクタンスはソレノイド形状に近づけるほど小さくなるのが分かる。

謝辞

本研究は JST ALCA-Next JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業 JPMJMI19E1) の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] E. H. Brandt and M. Indenbom, Physical Review B, vol. 48, no.17 (1993)
- [2] N. Amemiya et.al, Supercond. Sci. Technol., vol. 35, no.2 (2022)

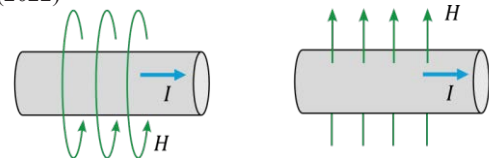


Fig. 1 Self-magnetic field and transverse magnetic field around the cable.

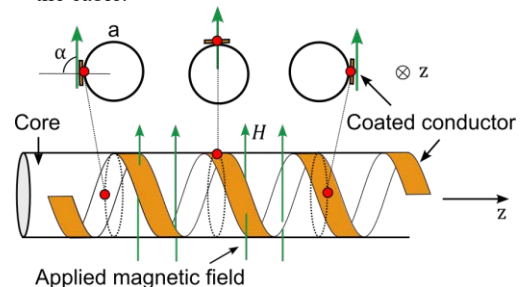


Fig. 2 Schematic view of the spiral-coated-conductor cable.

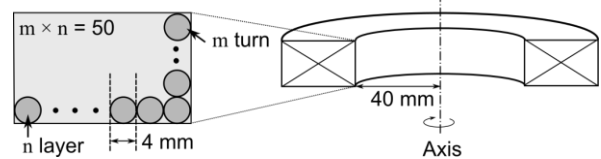


Fig. 3 Analysis model

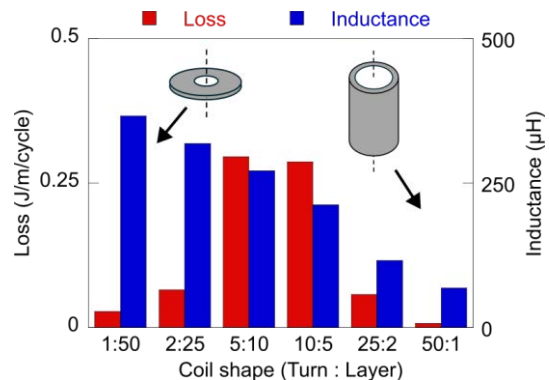


Fig. 4 Calculated magnetization loss and inductance

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年春)(6): SCSC ケーブルにおける動的抵抗に関する検討

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (6): Dynamic resistivities in SCSC cables

曽我部 友輔, 本多 尚, 雨宮 尚之(京都大学)

SOGABE Yusuke, HONDA Sho, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: y-sogabe@asl.kuec.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

直流電流を通电している薄膜高温超伝導線に交流磁界が印加されると、動的抵抗と呼ばれる抵抗が発生する。動的抵抗は磁束ポンプなどの応用において問題視されており、低減手法の確立が期待されている。

我々はこれまで、直線状・スパイラル状の薄膜線材を対象とした動的抵抗測定を通して、スパイラル状の銅複合多芯薄膜線材において動的抵抗が低減されることを示した[1]。今回我々は、交流外部磁界下で直流電流を通电している直線状及びスパイラル状の銅複合多芯薄膜線材の電磁気的振舞いを数値電磁界解析によって評価し、試料形状が動的抵抗特性に与える影響を調べた。

2. 数値電磁界解析手法・解析対象

超伝導スラブ(無限平板)を対象とし、Bean モデルを仮定した場合の電磁界分布は Fig. 1 のようになる。このとき、超伝導スラブ中心部には常に正方向の電流密度が存在する一方で磁束密度が変化している領域が存在しており、この領域において動的損失が発生する。この領域を動的領域と呼ぶ。数値電磁界解析においては、電流ベクトルポテンシャルを用いた T 法に薄板近似を適用した[2]。線材に直流電流を通电している状態で外部交流磁界を印加するという条件で解析を行った。交流磁界一周中に線材内の電流密度 J の長手方向成分の正負が変化しない領域を動的領域とみなし、この領域において発生する損失を動的損失とした。得られた動的損失を I^2 で除したものを動的抵抗として計算した。

4 種類の形状の線材を対象として解析を行った。それぞれの線材の諸元を Table 1 に示す。直線状の単芯線材及び多芯線材、スパイラル状の単芯線材及び多芯線材を解析対象とした。多芯線材については、銅分流層がすべての超伝導フィラメントを覆うようにめっきされているとし、モデル化した。超伝導フィラメント間の常伝導部の導電率には、過去の結合損失測定と数値電磁界解析の比較から得られた値を使用した。

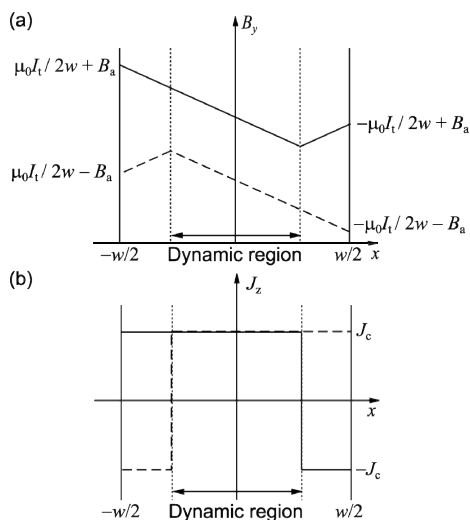


Fig. 1 Electromagnetic field distribution in a superconductor slab carrying dc current I_t under time-varying external magnetic field B_a ; (a) magnetic flux density distribution and (b) current density distribution.

3. 動的抵抗の試料形状依存性

Fig. 2 に 4 種の試料における動的抵抗の外部磁界に対する依存性を示している。ただし、試料の臨界電流の違い及び経験外部磁界の方向の影響を排除するための規格化を行っている。この結果より、スパイラル化した銅複合多芯薄膜高温超伝導線においては動的抵抗が大きく低減されることを数値計算によっても確認することができた。

Table 1 Specifications of analyzed coated conductors.

Straight coated conductors		
Name of coated conductor	STF1	STF10
Number of filaments	1	10
Copper thickness per side		10 μm
Substrate thickness		30 μm
Tape width		2 mm
Sample length		130 mm
Spiral samples		
Name of coated conductor	SPF1	SPF10
Number of filaments	1	10
Copper thickness per side		10 μm
Substrate thickness		30 μm
Tape width		2 mm
Core diameter		3 mm
Spiral angle		55°

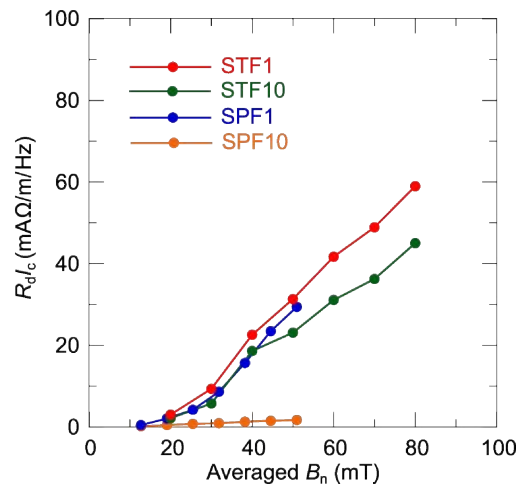


Fig. 2 Products of dynamic resistance R_d and critical current I_c against averaged perpendicular magnetic field to tapes.

謝辞

本研究の一部は JST 戦略的創造研究推進事業 先端的一次元ニュートラル技術開発 (ALCA-Next) グラント番号 JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業 グラント番号 JPMJMI19E1)、一部は JSPS 科研費 JP20H00245 の助成を受けたものである。

参考文献

- Y. Sogabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 101
- T. Mifune, et al.: SUST, Vol. 32 (2019) 094002

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024年春)(7): 数値解析による SCSC ケーブルの保護特性の基礎的評価

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2024 (7): Influence of cable geometry and protection conditions on protection characteristics of spiral HTS cables

曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)
SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)
E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

SCSC ケーブルは、導電性の円断面コアの周りにスパイラル状に複数の銅分流層複合マルチフィラメント高温超伝導線を多層に巻き付けた複雑な形状をもつ (Fig. 1) [1]。我々はこれまでに、超伝導線及びコアをそれぞれ長手方向の温度分布のみ考慮するとし、ケーブル構造を反映した層間及びコアと超伝導線間の電気的・熱的接触抵抗を考慮した SCSC ケーブルの保護特性解析手法を構築した。この保護特性解析手法を用い、SCSC ケーブルの形状及び保護条件を変化させ、それらが保護特性に与える影響を調査した。

2. SCSC ケーブルの保護特性解析手法

SCSC ケーブルのクエンチ・熱暴走に対する保護特性を議論するために、超伝導線及びコアをそれぞれ一次元線要素の集合としてモデル化した[2]。この手法では、コア並びにそれぞれの超伝導線における長手方向温度分布を一次元熱伝導方程式によって求め、超伝導線及びコア間の電流分布を回路方程式によって計算する。また、スパイラル構造による超伝導線間の接触領域を考慮している。

また、保護特性解析においては、ケーブル全長において発生する電圧を監視し、この電圧が閾値電圧(検出電圧)を超えた後に一定の時定数で電流が減衰するとして、クエンチ時の検出及び保護を模擬している。

3. 層数が異なる SCSC ケーブルの保護特性比較

ここでは、2層 SCSC ケーブルと4層 SCSC ケーブルを構成する超伝導線のうち、最内層の1本に劣化が生じ、局所的に臨界電流が減少したという条件で保護特性を調べた。解析対象としたケーブルの諸元を Table 1 に示す。

Fig. 2 に、クエンチ過程における2層目の超伝導線の長手方向中心位置における温度と電流を示す。 $t = 5.5$ s 付近で2層目の超伝導線に流れている電流が増加しているのは、劣化部を含む1層目の超伝導線に流れていた電流が分流したためである。その後、接触抵抗を介した分流によってケーブル各所において温度上昇が発生し、劣化部を含まない超伝導線の臨界電流が低下することでコアへの分流が進み、クエンチ検出直前に電流が激減している。2層 SCSC ケーブルと4層 SCSC ケーブルでは、2層 SCSC ケーブルの方がクエンチに至る速度が速く、かつ到達温度も高いことが確認された。

参考文献

1. N. Amemiya, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 35 (2022) 025003
2. Y. Sogabe, et al., Abstract of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 11

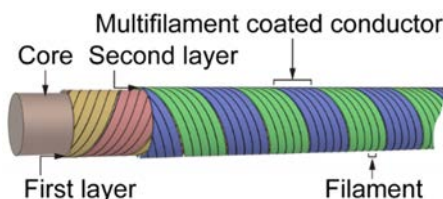


Fig. 1 Schematic of a multilayered SCSC cable [1]

Table 1 Specifications of analyzed SCSC cables and analysis conditions.

Number of layers	2 or 4	Number of tapes per layer	2
Spiral pitch	10 mm	Cable length	100 mm
Core diameter	3 mm	Tape width	2 mm
Thickness of Cu layer (one side)	10 μm	Thickness of Ag layer	2 μm
Thickness of SC layer	1 μm	Thickness of substrate	30 μm
Initial temp.	77 K	Tape I_c @ 77 K	50 A
Cable current	160 A or 320 A	n value	20
Terminal resistances at tapes	$10^{-5} \Omega$	Terminal resistances at core	1 Ω
Contact resistivity	$10^{-4} \Omega\text{-mm}^2$	Heat transfer coefficient at contacts	$1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{-K}$
Location of I_c degradation area	Longitudinal center of L1-T1	Detection electric field	0.1 V/m
Delay after detection	0.1 s	Decay time constant	0.5 s

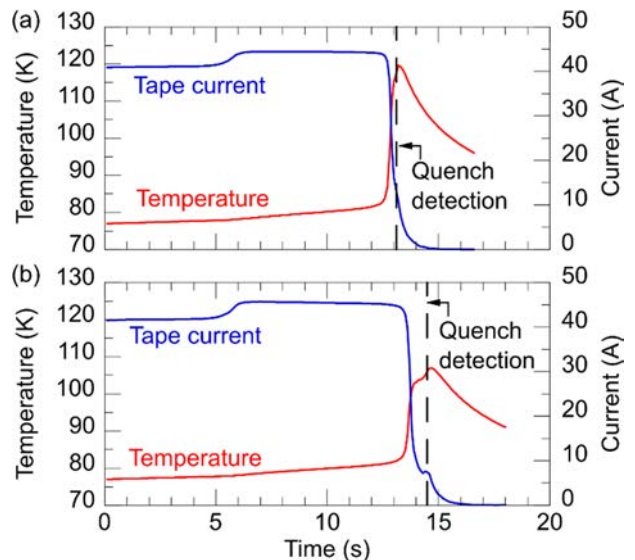


Fig. 2 Time-evolution of temperature and current in a tape of layer 2 during quench; (a) 2-layer SCSC cable and (b) 4-layer SCSC cable.

謝辞

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 先端的カーボンニュートラル技術開発 (ALCA-Next) グラント番号 JPMJAN24G1 (JST 未来社会創造事業グラント番号 JPMJMI19E1) の支援を受けたものである。

高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイル用試作巻線機の連続巻線試験 Continuous Winding Test of a Prototype Winding Machine for High-Temperature Superconducting Force-balanced Helical Coils

橋本 博正, 矢島 健大, 許 航, 野村 新一 (明治大); 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS); 仁田 旦三 (東大)
Hashimoto Hiromasa, Yajima Kenta, Xu Hang, Nomura Shinichi (Meiji Univ.); Shintomi Takakazu (KEK);
Hirano Naoki (NIFS); Nitta Tanzo (Tokyo Univ.)

E-mail: ce241064@meiji.ac.jp@meiji.ac.jp

1 はじめに

本研究では、REBCO 線材を用いた電磁力平衡ヘリカルコイル (FBC) の製作実現性を検討するために、Fig. 1 に示す大半径 120 mm、小半径 30 mm の 1 T 級モデルコイル用小型巻線機開発を進めている。FBC は電磁力を大幅に低減させ、軽量化が期待されるコイルである。これまで、REBCO 線材収納ポピンと巻線ヘッドを一体化した試作機を開発し、巻線機のゼロ点ならびに巻線位置の検出と補正制御に成功している [1]。その後、線材収納ポピンと巻線ヘッドを分割して線材をヘリカルコイルの軌道に応じて線材収納ポピンから送り出すことを検証できた。しかし、巻線に緩みが生じてしまい、多層連続巻線ができていない。本稿では、その解決策として巻線張力を印加する機構の開発進捗状況および線材収納ポピンから送り出す際の巻線張力の定量的な評価結果について報告する。

2 巻線張力を印加する機構

REBCO 線材を用いた FBC の製作において巻線張力は通電時の発生最大応力による線材の変位抑制のため下限値は 12 N、REBCO 線材の臨界電流値を低下させない応力の上限値は 28 N となる [2]。圧縮コイルばねを用いて巻線ヘッドに張力を印加するための機構を設置し、所定の巻線張力が得られることを試験で確かめた。Fig.2 に張力を印加するための機構およびポピンから線材を送り出す際の巻線張力を測定するための装置の写真を示す。ポピンは装置の一端に固定し、REBCO 線材を模擬した幅 5 mm のステンレスリボン線は先端を引張用ロードセルに固定し、ポピンから一定速度で直線状に引き出される。線材収納ポピンから線材を送り出す速度を 1 mm/s から 10 mm/s まで 1 mm/s ごとに増加させて線材に印加される巻線張力を測定したところ、その大きさは 15.04 N から 18.12 N となり、巻線張力の限界範囲内となることが確認された。

3 θ 角速度を一定にした場合の巻線張力分布

巻線機の 4 つの制御角 (ϕ , β , γ , α) [2] はポロイダル角 θ の関数で与えられる。FBC は変調ヘリカル巻線軌道を有しているため、巻線機を θ の角速度が一定となるように動作させた場合、ポピンから巻線を送り出す速度は一定とならない。巻線状況を観察しやすくするために、 θ の角速度を 5 deg/s にした。Fig.3 に θ の角速度が 5 deg/s で一定のとき θ に対する巻線の送り出し速度の変化を示した。巻線の送り出し速度は最大で 3.507 mm/s、最小で 2.855 mm/s となることがわかった。さらに、 θ の角速度が 5 deg/s で一定のとき、巻線張力試験で確認された巻線速度と巻線張力の関係を用いて、 θ に対する巻線張力の変化を推定すると Fig.3 のようになった。Fig.3 より巻線張力の推定値は θ が 0 または 2π のとき 16.90 N で最大となり、 θ が π のとき 16.80 N で最小となることがわかった。当日は、REBCO 線材を模擬した幅 5 mm のステンレスリボン線を用いた連続巻線試験の結果を報告する。

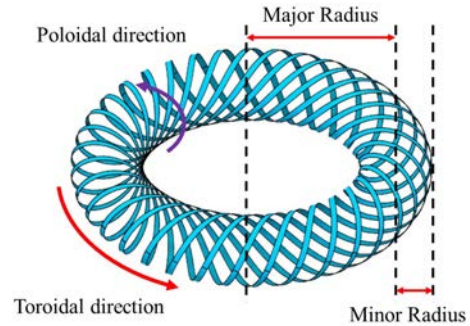


Fig. 1. Superconducting force-balanced helical coils.

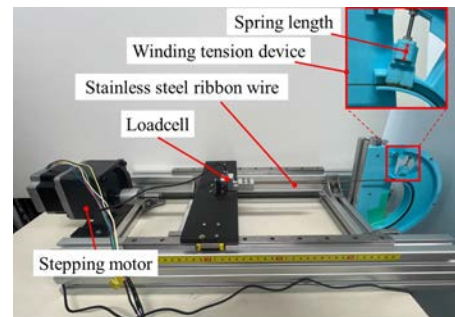


Fig. 2. Experimental device for the evaluation of the winding tension using a stainless ribbon wire provided from the winding bobbin.

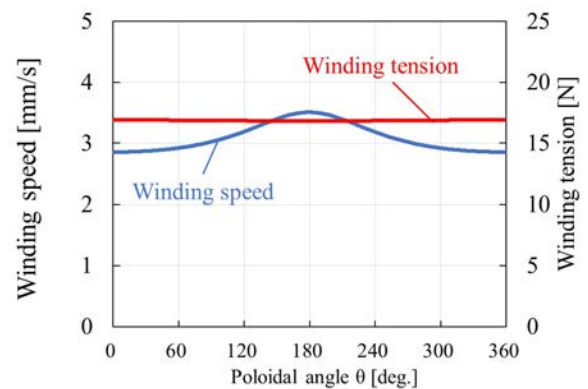


Fig. 3. Distributions of the winding speed and the winding tension as a function of the poloidal angle.

参考文献

- [1] Hoshina et al.: in Proc. 2023 Annual Meeting IEEJ, pp. 253-254.
- [2] 鎌田太陽, "エネルギー貯蔵用電磁力平衡ヘリカルコイルの高温超電導コイル化技術", 明治大学大学院学位論文, 2021年, pp.84-87.

再生可能エネルギー電源出力の長期変動補償に適した SMES システムの構成と入出力制御方法

SMES system configuration and input/output control method for long-term compensation of renewable energy fluctuations

羽多野 椋太, 大和田 智也, 長崎 陽, 津田 理(東北大)

HATANO Ryota, OWADA Tomoya, NAGASAKI Yoh, TSUDA makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: hatano.ryota.t3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化対策として再生可能エネルギー電源の導入を拡大するには、再エネ電源の発電出力と負荷消費電力のアンバランスを補償する電力需給調整システムを新たに構築する必要がある。そこで、即応性に優れる電力貯蔵と大容量性に優れる水素貯蔵を組み合わせた「電力・水素複合エネルギー貯蔵システム(Hybrid Energy Storage System : 以下, HESS)[1]」を提案し、これまでにその有効性を検証している。

本システムにおける電力貯蔵装置としては、小容量なシステムでは電気二重層キャパシタが適しているが、大容量なシステムではコンパクト性や制御性に優れる超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)が適している。しかし、長期間の変動補償を行うには、SMES のくり返し充放電の切り替えに伴う損失等を考慮して、増減するエネルギー残量のある一定範囲内に保持する必要がある。そこで、本検討では HESS の長期間変動補償を可能にする SMES システムの構成と入出力制御方法について検討した。

2. 実験方法

Fig. 1 に HESS の構成例を示す。

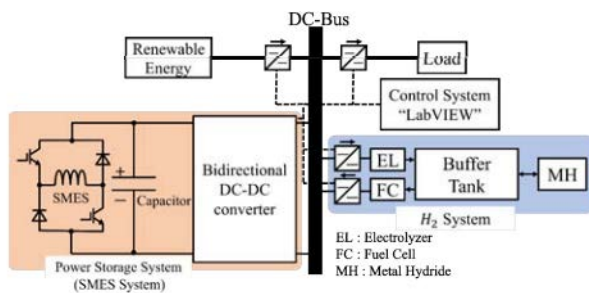


Fig. 1 Schematic illustration of a Hybrid Energy Storage System

Fig. 1 の SMES システムでは、SMES の充放電の制御に半導体スイッチとダイオードを用いている。本検討では、高耐圧・大電流に強みを持つ SiC 素子の適用を想定し、その素子の許容電圧範囲と定格電流から素子の直並列数を決定した。これらの素子で発生する通電損失を考慮して長期変動補償を実現するために、SOC-FB(State of charge-feed back)制御を適用し、SMES システムの残存エネルギー量をある一定範囲内に保つ方法について検討した。具体的には、SMES コイルにおけるエネルギー貯蔵量の基準値からの過不足分を水素貯蔵装置により補償するとした。ただし、SMES システムの電力貯蔵量だけでなく水素貯蔵量もある一定範囲内に維持する必要があり SOC-FB 制御を適用するため、2つの SOC-FB 制御間で相互干渉が生じないように SOC-FB 制御の更新時間を選択することが重要となる。そこで、水素貯蔵の更新時間を 60s、SMES システムの更新時間をパラメータとした場合における最適な更新時間について検討した。

なお、HESS で SMES を適用する場合、即応性と大容量性が重要となるが、即応性向上にはインダクタンスの低減が必要となるのに対して、大容量性向上にはインダクタンスの増

加が必要になる。このように即応性と大容量性はトレードオフの関係があるが、単一のコイルでは両条件を満足するコイルの選択肢が少なくなる。そこで、SMES コイルの並列化を考え、並列数が長期変動補償に及ぼす影響について検討した。本検討は MATLAB 及び Simulink を用いた電力需給調整シミュレーションを通じて行い、電力需要については電気学会が提供している実測データを用い、太陽光発電出力については標準的な時系列データを使用した。なお、Fig.1 の SMES システムに含まれるキャパシタは、SMES システムとコンバータ用の電力の受け渡しの役割を担っており、キャパシタの両端電圧をコンバータの動作範囲内にとどめる必要がある。

3. 実験結果

解析の結果のうち、SMES コイルの並列数が 3 で SMES の SOC-FB の更新時間を 10 秒とした場合と、SOC-FB を適用していない場合のキャパシタ両端電圧と SMES コイル電流を Fig. 2 に示す。これより、SOC-FB によって、キャパシタ両端電圧を動作範囲内に保持できることがわかる。また、SMES コイル電流値が減衰しておらず、SMES コイルに貯蔵されているエネルギー量を維持できていることがわかる。また、SMES コイルの並列数が少ない場合は急峻な電力変動に対応できず、応答性向上には並列数を多くする必要があることを確認した。しかし、並列通が多い場合は、コイル一つあたりの電流の増減が大きくなるため、交流損失が増大することが考えられる。また、並列数が少ない場合でも SOC-FB の更新時間を短くすることで、長期変動補償が可能になることを確認した。

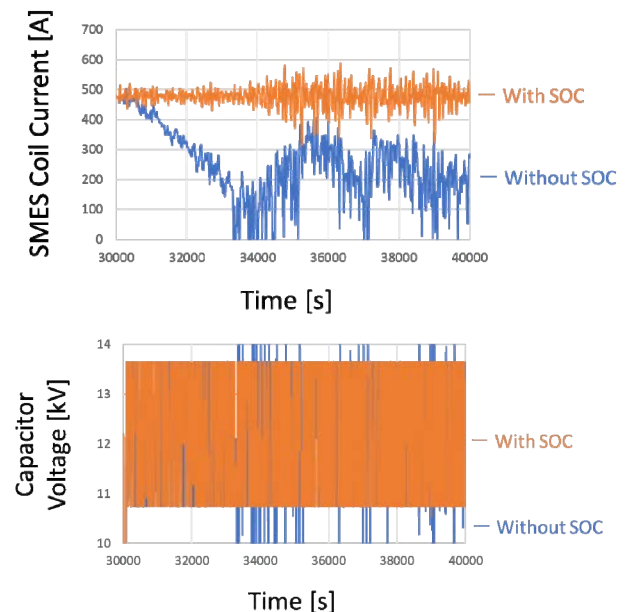


Fig. 2 Effect of SOC-FB on capacitor voltage and SMES coil current

参考文献

1. T.Hamajima, et al.:IEEE Trans.Appl.Supercond,vol.22, No3, 5701704 (2012)

大規模太陽光発電からの電力輸送を目指した SMES ケーブルシステムの構成検討

Study on optimal power supply configuration for DC microgrids with SMES cables

東川 甲平, 田淵 竜也, 木須 隆暢 (九大); S. M. Muyeen (カタール大)
 HIGASHIKAWA Kohei, TABUCHI Tatsuya, KISS Takanobu (Kyushu Univ.); MUYEEN S. M. (Qatar Univ.)
 E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまでに、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) を提案しており、電力輸送を兼ねるケーブルそのものが、再生可能エネルギーの激しい出力変動の影響を大幅に緩和できること、またその経済効果について報告してきた^{[1],[3]}。一方、再生可能エネルギーから同ケーブルへの電力供給については、簡易的な電源モデルでの記述しか行っていなかったため、本研究では具体的な電力変換方式や制御手法について検討した。

2. 方法

太陽光発電からの電力輸送を想定した 10 MW 級 SMES ケーブルシステムの概略図を Fig. 1 に示す。定格を 10 kA, 1 kV とするように、太陽電池パネルの並列数と直列数を設定した。Fig. 2 に示すように、太陽光発電では電流と電圧の組み合わせによって取り出せる電力が大きく変わるため、最大電力点追従制御 (Maximum Power Point Tracking: MPPT) を行うべく、DC-DC コンバータを適用する。本項では最も簡便な例として、昇圧コンバータに山登り法による MPPT を適用する例を示している。SMES ケーブルは、以前の概念設計の結果から 20 H のインダクタンスを有するものとする^[1]。SMES ケーブルを通して送られる電力は、一定電圧での負荷での受電や他のシステムへ電力融通を想定し 1 kV の電圧源として考慮している。太陽光発電において最も激しい出力変動となる晴れ時々曇りの日の日射量の時間変化を与え、この際に SMES ケーブルを通して得られる電力の時間変化を MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションによって評価した。

3. 結果・考察

シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。日射量 (右軸) の時間変化は、太陽光発電からの発電量にほぼ比例することが知られているが、それに比較して SMES ケーブルを通して負荷や他のシステムで受電される電力 (左軸) の時間変化は大きく抑制されていることがわかる。特に、同図には DC-DC コンバータによる MPPT を用いずに直接に太陽電池パネルを SMES ケーブルに接続した場合の結果も青色で示しているが、この場合の変動はとりわけ抑制されていることがわかる。一方で、DC-DC コンバータを用いて MPPT を適用した場合の結果を紫色で示しているが、変動は少し大きくなるものの、やはりこちらの方が多くの電力を利用できることが示されている。以上のように、これまでの簡易的な電源モデルではなく、太陽電池パネルの特性や電力変換器とその制御まで考慮しても、期待された出力変動補償の効果を見られることが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、Qatar-Japan Research Collaboration Program Grant Number M-QJRC-2023-317 の一環として行ったものである。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 29 (2019) 5402204.
- [2] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 33 (2023) 5400405.
- [3] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 33 (2024) 5700205.

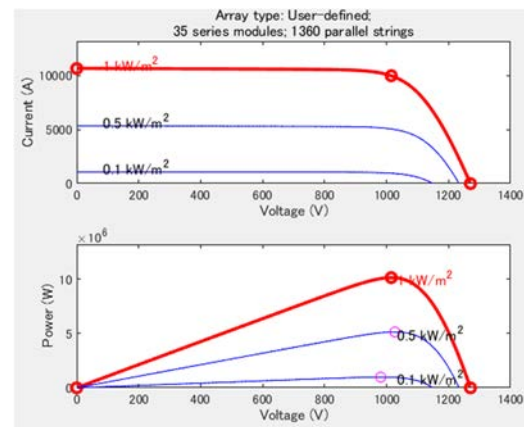


Fig. 2. Assumed properties of the photovoltaic array on the simulation based on MATLAB/Simulink.

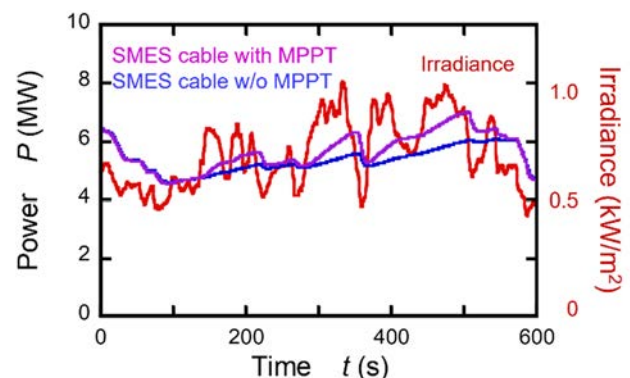


Fig. 3. Simulation results on the mitigation of photovoltaic output power fluctuation for the SMES cable system. The left vertical axis indicates the power received by a load or another system.

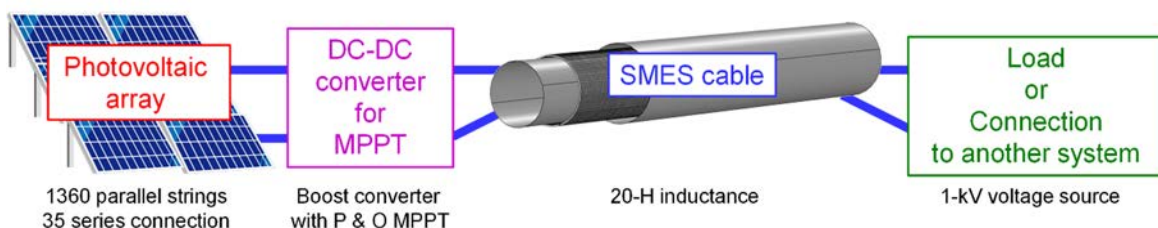


Fig. 1. Schematic diagram and the corresponding assumptions on a 10-MW-class DC system with SMES cable.

液体水素冷熱の有効利用とEVの急速充電を実現する 超電導 DCDC コンバータの開発

Development of Superconducting DCDC Converter for Ultra-Fast Charge to Electric Vehicle with Liquid Hydrogen Cooling

谷貝 剛(上智大学); 榎田 康博, 新富 孝和(KEK); 平野 直樹(NIFS); 濱島 高太郎(東北大学)
YAGAI Tsuyoshi (Sophia University); MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); HIRANO Naoki (NIFS);
HAHAMAJIMA Takataro (Tohoku University)
E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

1. はじめに

エネルギー転換および運輸部門で CO₂ 排出全体の半分近くを占めており、排出抑制には、これら部門の低炭素化のインパクトは大きい。運輸部門の排出量のうち、さらに半分近くを占める自家用車の排出抑制は重要であり、Electric Vehicle(EV)の普及が効果的である。しかし、依然長い充電時間が普及を妨げる要因のひとつになっており、インフラ整備としての急速充電器の設置数増は必須である。日本で導入されている急速充電規格は 90 kW 最大 200 A であり、容量数 10kWh の自家用車充電に 30 分程度を要する。2022 年には、充電の新規格 CHAdeMO3.0 に対応した最大 350 kW の充電実証が開始されるなど(例えば[1])、より短時間の充電需要の増大に対応するEV充電器の開発が加速すると考えられる。変換回路は商用交流系統から三相 400 V 受電して直流に変換する ACDC コンバータを採用しており、変換器単体の効率は 90%を超えるものの、発電から系統送電・需要家充電までの変換効率はエネルギー変換と電力変換回数にも依存するため高くない。そこで本グループでは、直流 200V 程度の太陽光発電電力から直接EVに給電して変換回数を減少させ、さらに変換器単体の高効率化も図れる超電導DCDCコンバータを新たに提案し、高出力・高効率化を目指して開発を行ってきた。

2. 超電導昇圧DCDCコンバータ

平易なスイッチング制御で実現できる非同期整流昇圧コンバータのインダクタ部品として超電導コイルを導入した。Fig. 1 は、Bi2223 コイルを用いたコンバータ回路の写真とその回路図である。Bi2223 コイルは内径・外径が各々 100 mm、200 mm 厚み 9.4 mm のダブルパンケーキコイルでインダクタンス L は約 12 mH、77 K のコイル I_c は約 109 A である[2]。一般的な

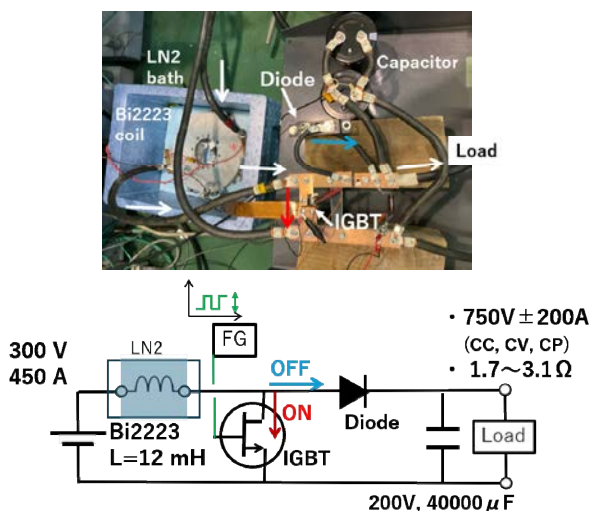


Fig.1 Photo of Superconducting DCDC converter and its circuit diagram

DCDCコンバータはインダクタ素子の高L化・大電流化が難しく、高効率化にはスイッチング周波数を数 100 kHz に設定するのが一般的である。L が大きく大電流通電可能な超電導コイルでは、その 1/1000 程度の周波数で良いため、交流損失も最小限に抑えられる。スイッチング素子は 600 V 耐圧 320 A の IGBT を、整流素子として 400 V 160 A のパワーダイオードを用い、スイッチング周波数は 50~300Hz として 2 倍昇圧の回路を組んだ。これは 200 V 入力を EV バッテリー電圧 380 V 以上にして充電する事を想定したためである。Bi2223 コイルの I_c 制約などから Fig. 1 の装置の変換電力は最大 10 kW 程度となるため、次フェーズでは水素冷却 (20 K) で 600 A 定格 MgB₂ コイルを用いる予定である。

3. 実験結果

Fig. 2 は、入力電力 4 kW ~ 7.5 kW 付近で昇圧試験を行った変換効率 [%] の結果である。直流入力電圧 45 V ~ 78 V であり、コイルの最大電流が I_c を超えない範囲でコンバータ動作するようにスイッチング周波数を最適化している。負荷は定電流(CC)モードでは 750V±200 A 直流電子負荷を、バッテリー充電抵抗に近い定抵抗 (1.7 Ω ~ 3.1 Ω) モードはグリッド形抵抗体を多数直列接続して用いた。コンバータ動作の比較として 2 mm×3.5 mm 断面の NbTi 線 (銅比10) 用いた内・外径 各々 160 mm、185 mm、高さ 130 mm、インダクタンス 15 mH のレイヤー巻き銅コイルを 77 K で冷却したコンバータ試験結果も示した。Fig. 2 の○および△は Bi2223 コイルの結果であり、各マークの濃淡はコイル I_c に対するコイル電流 (= 入力電流) の比、すなわち負荷率を示している。高入力電力では負荷率も高く、濃いマークだが、それでも 95 %を超える効率を達成している。一方、銅コイルは 90 % 止まりであり、実測 40 mΩ の直流抵抗による損失が効率を下げる要因のひとつと考えられる。講演ではさらに詳細な解析結果を報告する。

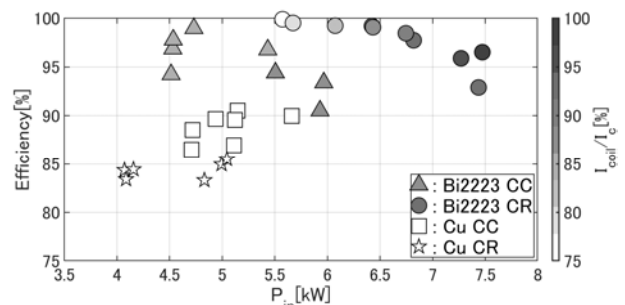


Fig. 2 Bi2223 converter system efficiency vs. input power, comparing the circuit with Cu coil.

参考文献

- 日立インダストリアルプロダクツ・ニュースリリース
<https://www.hitachi-ip.co.jp/release/20221006.html>
- Y. Makida, et al.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 101 (2015) 012028.

REBCO 超伝導接合の I_c の温度および磁場印加角度依存性

Temperature and field angular dependence of critical current for REBCO superconducting joints

武田 泰明, 西島 元 (NIMS); 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 北口 仁 (NIMS)
 TAKEDA Yasuaki, NISHIJIMA Gen (NIMS); MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);
 KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: TAKEDA.Yasuaki@nims.go.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 永久電流マグネットの実現にむけた超伝導接合の研究開発が進んでいる[1]。住友電工が開発した intermediate grown superconducting (iGS) 接合[2]は高い接合 I_c (I_{cj}) と低い接合抵抗を示し、iGS 接合を持つ REBCO 内挿コイルを使った NMR マグネットの永久電流運転も実証された[3]。iGS 接合は永久電流マグネットへの応用が最も期待されている REBCO 線材間の超伝導接合である。

永久電流マグネットの運転電流は I_{cj} よりも低くする必要があるので、 I_{cj} の温度や磁場の依存性を把握することは重要である。我々は最近、超伝導接合を持つ閉ループの電流減衰から低電圧 (10^{-8} V) 基準での I_{cj} を評価している[4]。前回の報告[5]の通り、我々が開発した接合抵抗評価装置[6]にスプリットマグネットと試料回転機構を導入したことで、 I_{cj} の磁場印加角度依存性が評価できるようになった。今回は iGS 接合を持つ REBCO 閉ループ試料を使った I_{cj} の評価を行った。iGS 接合の I_{cj} の温度 (T)、磁場 (B)、および磁場印加角度 (θ) 依存性を報告する。

2. 実験方法

1本のREBCO線材からなり、iGS接合を持つ1ターンの閉ループ試料(直径100mm, 自己インダクタンス(L)0.47μH)を用いた。我々の接合抵抗評価装置[6]を用いて、4–77Kで電流減衰測定を行った。ループの中心に配置した銅コイルを用いてループ電流(I_{loop})を試料に誘導し、 I_{loop} の時間依存性($I_{loop}-t$)を調べた。得られた $I_{loop}-t$ から電圧 $V = -L(\Delta I_{loop}/\Delta t)$ を計算することで、電圧基準 $V_c = 10^{-8}$ V の I_{cj} を評価した。0.1–2.0 T の磁場は接合部のみに印加した。 $\theta = 0$ および 90° がそれぞれ $B \parallel c$ および $B \parallel ab$ に相当する。

3. 結果と考察

Figure 1 に、ある閉ループ試料で測定された 50–77 K, 0.1–1.5 T における I_{cj} の磁場印加角度依存性を示す。この試料の 77 K 自己磁場での I_{cj} は 47.5 A であった。先行研究[3]と同様に、温度もしくは磁場が低いと I_{cj} は高く、また $\theta = 0$ ($B \parallel c$) よりも 90° ($B \parallel ab$) の方が I_{cj} は高かった。

測定された $I_{cj}-\theta$ は、 c 軸相関ピンが導入されていない REBCO 線材の典型的な $J_c-\theta$ [7]と同様に、温度および磁場によらず 90° ($B \parallel ab$) でピークを示した。Figure 1 の実線はそれぞれの温度・磁場における $I_{cj}-\theta$ を REBCO 線材の $J_c-\theta$ を記述するのに使われるモデル[8]でフィッティングした計算値である。適切なフィッティングパラメータを使った計算結果は実験値とよく一致した。

各 θ での I_{cj} の温度・磁場依存性も評価している。 $I_{cj}-T$ および $I_{cj}-B$ も、REBCO 線材の J_c を記述するのに使われるモデル ($I_{cj}(T) = I_{cj}(0)\exp(-T/T^*)$ および $I_{cj} \propto B^{-n}$) [9] でフィッティン

グできることがわかった。さらに、これらの式のフィッティングパラメータである T^* と n の絶対値や振る舞いは REBCO 線材の J_c をフィッティングした場合と同様であることもわかった。

以上より、iGS 接合の $I_{cj}(\theta, B, T)$ は REBCO 線材の典型的な $J_c(\theta, B, T)$ とよく似た特徴を持つことが明らかになった。このことは、REBCO 永久電流マグネットの設計において、iGS 接合は線材と同様に取り扱いがよいことを示唆している。当日は iGS 接合におけるピンニング機構や I_{cj} の決定因子についても考察する予定である。

謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 および科研費 22K14482 の支援を受けたものです。試料をご提供いただいたジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社の濱田様、および住友電気工業株式会社の大木様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 043002.
- [2] K. Ohki *et al.*, *SuST* **30** (2017) 115017.
- [3] Y. Yanagisawa *et al.*, *SuST* **34** (2021) 115006.
- [4] Y. Takeda *et al.*, *SuST* **36** (2023) 125010.
- [5] Y. Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **106** (2023) 132.
- [6] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30** (2020) 9000204.
- [7] K. Tsuchiya *et al.*, *IEEE TAS* **27** (2017) 6600205.
- [8] S. Muto *et al.*, *IEEE TAS* **34** (2024) 4603105.
- [9] C. Senatore *et al.*, *SuST* **29** (2016) 014002.

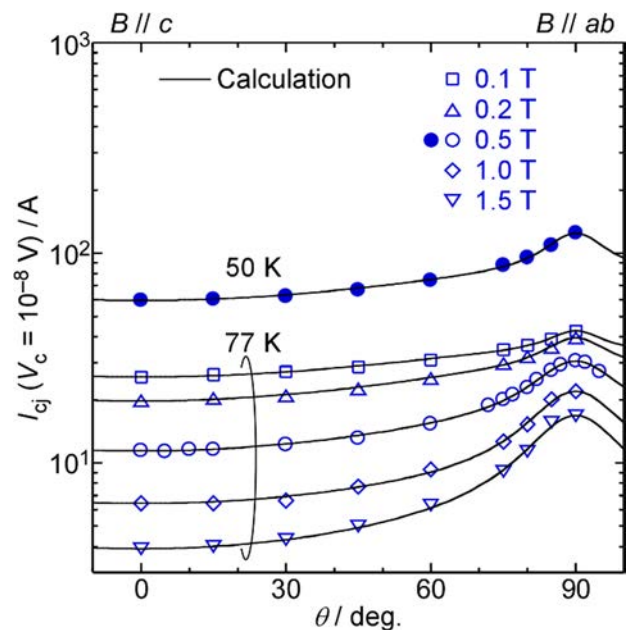


Fig. 1 Field angular dependence of I_{cj} at 50–77 K and 0.1–1.5 T for a REBCO closed-loop sample.

音波接合を用いた REBCO 線材間の半田フリー接合における金属安定化層の違いによる接合抵抗の変化と接合抵抗の制御に関する検討

Controllability of Joint Resistivity and Influence of Metal Stabilization Layers in Solder-free REBCO Coated Conductor Joints Using Sonic Bonding

世良 真也, 呉 澤宇, 鈴木 賢次, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)

SERA Shinya, WU Zeyu, SUZUKI Kenji, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu University)

E-mail: s.sera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系(REBCO)線材の実応用化には、素線間の接合技術が必要不可欠であり、低抵抗で優れた作業性および再現性を有することが求められる。最も一般的に用いられる半田接合の界面抵抗率(ρ_j)は 40-50 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 程度に留まっている。また、熱処理による超伝導特性低下の可能性もある。本研究では、これらの問題を解決し得る手法として、音波接合による半田フリー接合について検討した。音波接合では、積層した REBCO 線材試料を加圧しながら高周波振動(一般には 20 kHz 以上の超音波)を印加することで、加熱処理を行うことなく、最表面の金属界面に拡散接合を形成することができる。しかし、先行研究では接合界面に生じたボイドによって接合面積が制限され、 ρ_j は 100 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ と半田に比べ高くなった[1]。ボイド改善のために、半田処理の併用[1]や In 箔の挿入[2]が試みられ、それぞれ 39, 32 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ を達成している。しかし、これらのハイブリット方式では、本来の利点である前処理や熱処理が不要な点、拡散接合による低抵抗が十分に活かしていない。本研究では、音波振動のみで低抵抗接合の実現と、最表面の金属安定化層による ρ_j の変化について調査・検討した。

2. 実験方法

試料には、最表面に厚さ 20 μm の Cu 層を有する PLD 法により作製された 3 mm 幅 REBCO 線材 ($I_c \geq 140 \text{ A}@77 \text{ K}$) と Cu 層を堆積しない厚さ約 2 μm の Ag 層のみの 4 mm 幅 REBCO 線材 ($I_c \geq 50 \text{ A}@77 \text{ K}$) の 2 種類を用いた。これらの試料を重ね合わせ、1750 N の荷重を加えながらホーンにより可聴域の 15 kHz の音波振動を印加した。本研究では、ホーンへの入力パワーを積分して得たエネルギー、ホーンの振幅をパラメータとして用いた。同種金属 (Cu-Cu, Ag-Ag) 接合および異種金属 (Ag-Cu) 接合試料を作製し、各試料の接合抵抗を評価した。

3. 実験結果・考察

Fig. 1 に Cu-Cu, Ag-Cu, Ag-Ag 接合試料の接合抵抗率 ρ_j の各振幅に対するエネルギー依存性を示す。接合時の投入エネルギーの増大と共に ρ_j は減少し、Cu-Cu 接合では、600 J/cm^2 投入すれば半田接合の半分以下である 20 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ を下回る十分な低抵抗が達成できた。Cu-Ag 接合では Cu 間の接合に比べ、 ρ_j は 3 倍程度に増加した。また、Ag-Ag 接合においては、さらに ρ_j は増加し振幅 20% では Cu 間の 10 倍程度であったが、振幅を 25% に増加させると 3 倍程度まで低下した。この結果、 ρ_j は振幅すなわち入力パワーとエネルギーによって決定されることが分かった。

また、接合時の欠陥の有無を調べるため、各接合試料を磁化させ、磁気顕微鏡により磁化電流分布の計測を行った。Fig. 2 に Cu-Cu 接合の例を示す。同図に示す通り、接合時のピークパワーが約 190 W を超えると I_c の局所劣化が生じることが分かった。ピークパワーの閾値は材料の組み合わせによって異なり、Ag-Cu では 100 W, Ag-Ag では 80 W であった。

以上の検討により、Cu-Cu, Ag-Cu, Ag-Ag のそれぞれにおいて、局所劣化なく 17.3, 46.9, 324 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ を達成した。

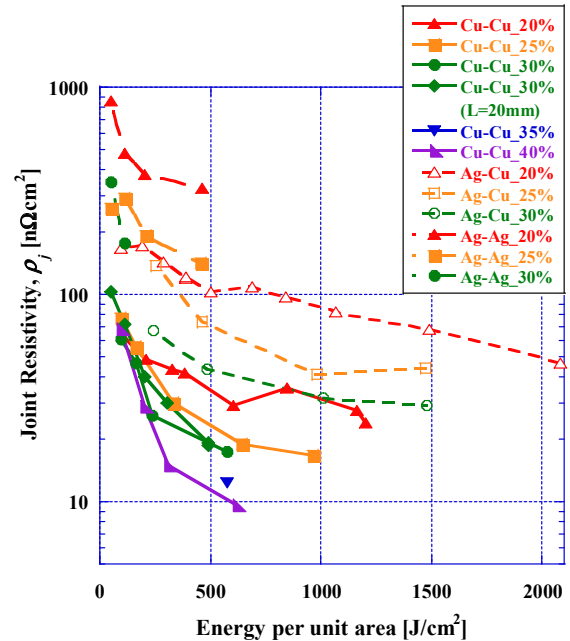


Fig. 1 Joint resistivity between metal stabilization layers for REBCO coated conductors. Results of Cu-Cu, Ag-Cu, Ag-Ag joints. The joint resistivity is determined by input energy per unit area and horn amplitude (input power).

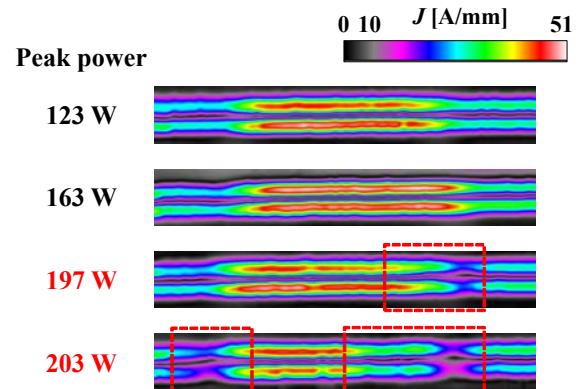


Fig. 2 Magnetization current distribution of Cu-Cu joints processed with different peak powers. Local defects were observed when peak power exceeded 190 W.

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617 ならびに JP24H00320 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] H. S. Shin et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26, 6601704 (2016).
- [2] S. Ito et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 29, 6600405 (2019).

高温超伝導線材の圧接における接合性能の挿入金属依存性

Insert metal dependency of joint performance in press welding between high-temperature superconducting tapes

伊藤 悟, 田村 怜於(東北大); 山本 春海, 恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研)

ITO Satoshi, TAMURA Reo (Tohoku Univ.); YAMAMOTO Haruumi, ONJI Taiki, TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: satoshi.ito.e3@tohoku.ac.jp

1. はじめに

鉄道用高温超伝導き電ケーブル[1]の単位長さは輸送の制約から400~500 mとされており[2], 夜間の限られた時間でオンサイト接合し, 数 km にわたるシステムを構築することが求められる。そのため, 接合抵抗や機械強度の要求値を満たしつつ, 短時間で接合する技術が求められる。我々は, 鉄道き電ケーブルの中間接合部オンサイト接合技術の候補の1つとして, In 箔をケーブル接合部に挿入し, 常温・大気環境で一括で圧接する技術を検討し, 小型の円形モデルケーブルにおいて, 目標とする接合抵抗, 機械強度(77 K)を得ることに成功した[3]。一方で, 常温環境下での接合部製作・ケーブル敷設を考えた場合, クリーブ変形により接合部が分離することが懸念される。そこで, In 以外の低融点金属等を用いた常温圧接の検討を行うことにした。本発表では, 挿入金属を変更した場合の常温圧接の可否や, 製作した接合サンプルの抵抗特性について報告する。

2. 実験方法

鉄道用高温超伝導き電ケーブルの接合部においては, ケーブルを構成する高温超伝導線材の寸法・配置のばらつきがあるため, 常温圧接用の挿入金属としては, ある程度, 軟らかい金属であることが望ましい。そこで, 本研究では, 候補となる挿入金属材料として In 箔(100 μm 厚)に加えて Sn 箔(100 μm 厚)と In52Sn48 箔 (~250 μm 厚)を用意した。各金属の 77 K における体積抵抗率は, $1.8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, $2.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, $12.5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ [4]である。また, In, Sn, In(それぞれ 100 μm 厚)の順に重ね, 層間に Flux (SUSSOL-F, Hakko: ZnCl (35~45%), NH_3Cl (<10%))を塗布して指圧で接合して作製した In/Sn/In 箔も用意した。被接合物となる高温超伝導線材としては, 銅合金ラミネート BSCCO 線材 (DI-BSCCO Type HT-CA, 住友電工), 銅安定化層付き REBCO 線材 (SCS4050-AP, SuperPower) の 2 種類を用意した。圧接方法としては, 先行研究[3]で上記 BSCCO 線材の接合に適用した簡易圧接を適用した。本手法では, 高温超伝導線材表面および金属箔をエタノール洗浄し(研磨なし), 線材・金属箔の接合面に上述の Flux を塗布して重ね合わせて指圧を加え, その後にプレス機を用いて常温・大気環境で加圧する(1 分間)。本研究では, まず指圧を加えた場合の各サンプルの接着状態を確認した。続いてプレス機で加圧して接合した各サンプル(加圧後に金属層厚さを評価するため, 接合部の厚さをマイクロメータで測定)の通電試験(液体窒素冷却, 自己磁場)を行い, 臨界電流以下の電流電圧の線形特性から接合抵抗を評価した。

3. 結果と考察

In 箔および In/Sn/In 箔を用いた場合, BSCCO 線材, REBCO 線材のいずれの場合においても, 指圧を加えただけで, 仮接着(常温で手で引っ張る程度では接合部は分離しない)が可能であることを確認した。一方で, In52Sn48 箔を用いた場合, 指圧での仮接着の可否はサンプルごとにばらついた。また Sn 箔を用いた場合は指圧での仮接着はできなかった。加えて Sn 箔を用いた場合は, BSCCO 線材, REBCO 線材のいずれに対しても, プレス機で接合圧力 100 MPa を加えた後でも一部のサンプルで接合部が分離してしまった。

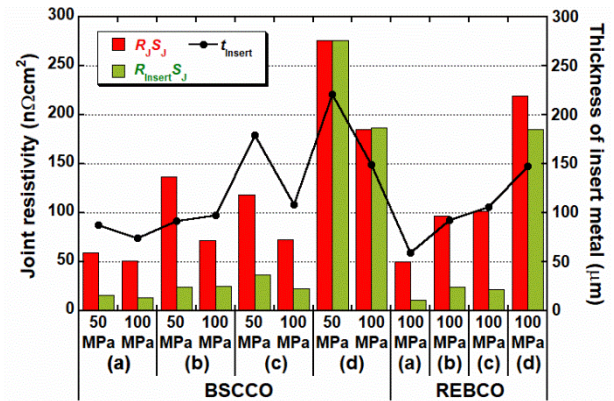


Fig. 1 Joint resistivity ($R_j S_j$), contribution of insert metals for the joint resistance ($R_{\text{insert}} S_j$) and thickness of insert metals (t_{insert}) where (a) In, (b) Sn, (c) In/Sn/In, and (d) In52Sn48.

Fig. 1 に, BSCCO 線材を接合圧力 50 MPa, 100 MPa として, また REBCO 線材を接合圧力 100 MPa として製作した各サンプルの接合抵抗率(=接合抵抗×接合面積)と, 挿入金属の体積抵抗率と接合後の厚さから求めた接合抵抗率への寄与を示す。なお, In/Sn/In 箔の場合は, 接合後の In と Sn の厚さの割合が接合前と同じと仮定して, 有効体積抵抗率を算出し, 接合抵抗率への寄与を計算した。なお各条件に対してサンプル数は 1~3 であり, 平均値をグラフに示している。In の場合, 50 MPa から 100 MPa の範囲では, 接合圧力依存性が小さいのに対して, その他の挿入金属では接合圧力依存性が大きくなった。また, Sn と In/Sn/In の両者は同等の接合抵抗率を示す傾向にあり, BSCCO 線材の接合の場合では, 接合圧力 100 MPa の場合に Sn, In/Sn/In でも In の場合と比較的近い接合抵抗率を達成している。一方で, REBCO 線材の接合の場合, 両者に倍程度の差があることがわかる。In52Sn48 を用いた場合, In52Sn48 自体の高い抵抗率が接合抵抗率に大きく影響した。現状の評価では, In52Sn48 自体の抵抗が接合抵抗を上回る矛盾した結果になっており, 使用した In52Sn48 の抵抗率の再評価を行う必要がある。

今後は, In/Sn/In 箔の In, Sn の厚さの構成を変更した場合の接合抵抗の評価や, 各接合における接合抵抗の接合圧力依存性をより詳細に評価する。また作製した接合サンプルの 77 K での機械特性および常温でのクリーブ変形特性を評価して, クリーブ変形を抑制できる接合法を選定する予定である。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 の支援を受けたものです。

参考文献

1. M. Tomita, et al.: Energy, Vol. 209 (2020) Art. no. 118318
2. H. Maeda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) Art. no. 4602409
3. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33 (2023) Art. no. 4800405
4. Y. Tsui, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 29 (2016) Art. no. 075005

量産評価用ジョイントテスト装置の開発(Ⅱ)～HTS ジョイントテスト～

Development of joint test equipment for mass production evaluation. -Joint test for HTS-

横山 彰一, 齊藤一功, 濱田 衛 (JASTEC)

YOKOYAMA Shoichi, SAITO Kazuyoshi, HAMADA Mamoru (JASTEC)

E-mail: Yokoyama.shoichi@kobelco.com

1. はじめに

現在、JST 未来社会創造事業で開発が進められている1.3 GHz(30.5 T)NMR(Nuclear Magnetic Resonance)マグネットには高温超電導線(HTS)が用いられる。本開発の1.3GHzNMRマグネットは永久電流運転のため、HTS間は $1 \times 10^{-12} \Omega$ /カ所以下の超電導接続を行う。超電導接続技術を確立するためにジョイントテスト装置での評価が必要である。短時間で複数同時測定するために開発した量産評価用ジョイントテスト装置[1]を用いてHTSの評価にも適用できるホルダーを開発、評価し良好な結果が得られた。本報告ではREBCO-REBCO(RR)ジョイントの測定例を紹介する。

2. HTS用ジョイントテスト試料ホルダー

我々は、ホール素子を用いた電流センサと1ターンループを組み合わせ、小型非対称の試料ホルダーにより複数同時短時間測定が可能で量産評価用ジョイントテスト装置を用いNbTi線(LTS)のジョイントテストを実施し、10分程度で $1 \times 10^{-13} \Omega$ を評価した[1]。一方、HTSジョイントは臨界温度が約100Kと高いため永久電流スイッチ(PCS)部の断熱と加熱構成を工夫した。またPCS部の線長が長くなりインダクタンスが増えるため電流低減率が大きくなる。そこで、ループインダクタンスを同等に増やすため2個のループ部を設置した。Table 1にLTSとHTSのジョイントテスト装置の諸元を示す。

LTSに比べHTSではループインダクタンスが約2倍となり測定時間も2倍となったが、判定基準の $1 \times 10^{-12} \Omega$ は数分で評価できる。Fig.1にHTSジョイント試料の構成図と外観写真を示す。RRジョイントについては、ジョイント形状の関係で垂直磁場の場合は 180° ツイスト部が存在するため局所的な応力が加わらないよう注意をして試料を作成した。

3. RRジョイント試料の評価結果

RRジョイントは、大木らが開発した接続用薄膜を線材超電導層面に加温圧接する手法[2]で作成。液体ヘリウム中でFig.2のように通電し、永久電流モードへの電流低減率は約10%であった。Fig.2の右下に2試料の拡大した規格化電流を示したように20分で $1 \times 10^{-13} \Omega$ の判定ができた。図はゼロ磁場の測定例を示したが、垂直磁場2.8Tまで印加し測定した。77K自己磁場での臨界電流 I_c が45A以上の複数の合格判定試料をジョイントテストした結果、実機マグネットの定格電流付近240Aで、いずれも1.1Tで $1 \times 10^{-12} \Omega$ 以下の目標値が得られていることを確認した。

謝辞

本発表内容の一部はJST未来社会創造事業(Grant Number JPMJMI17A2)の支援を受けて行われたものです。

参考文献

- Shoichi Yokoyama, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p. 129
- 大木康太郎ら: SEIテクニカルレビュー、第192号(2018)P113-118

Table 1 Specifications of joint test equipment.

Item	For LTS	For HTS
Measurement Sensor	Hall sensor	
Sensor Sensitivity β	$<10^{-3}$ (0.1%)	
Joint loop inductance	$3 \times 10^{-7} \text{H}$	$7 \times 10^{-7} \text{H}$
Sensitivity (per hour)	$<1 \times 10^{-14} \Omega$	
Measurement time ($1 \times 10^{-13} \Omega$)	10 minutes	20 minutes
Number of samples	4 (2) *	2
Sample energization method	Direct energization	

*Numbers in parentheses are for vertical magnetic field measurement.

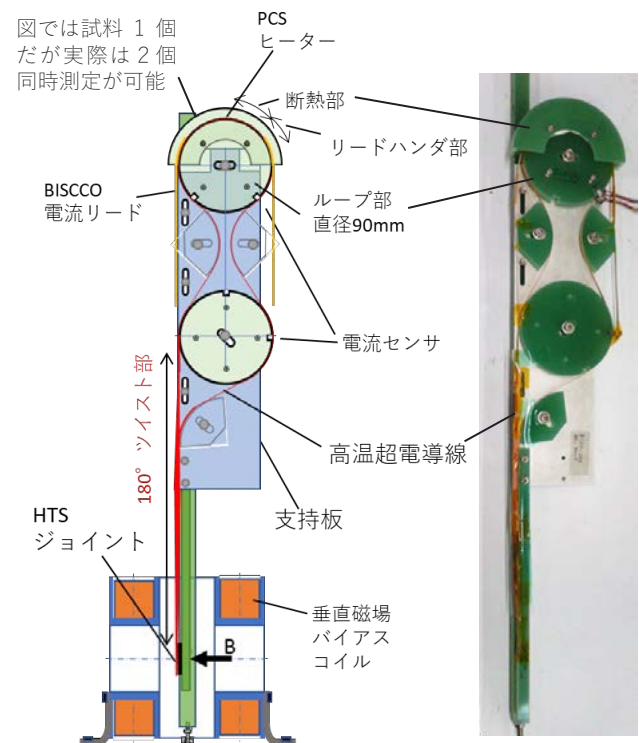


Fig.1 Sectional diagram and photo of the developed joint test equipment for HTS joint.

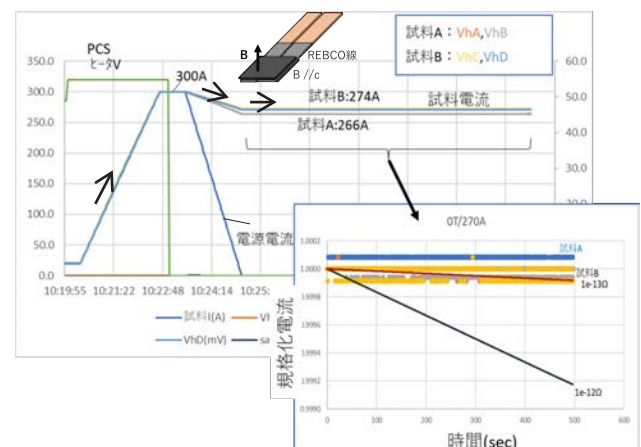


Fig.2 Joint test results of two HTS joint samples.

加速器用 HTS マグネットの開発(11)

-銅層厚が異なる REBCO 線材で製作した丸型ケーブルの臨界電流特性-

Development of HTS Accelerator Magnet (11)

-Critical Current Characteristics of Round Cables Made from REBCO Conductors with Different Copper Layer Thicknesses-

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必要である。REBCO 線材を用いた大電流ケーブルの導体構造は様々提案されており、丸線コアに REBCO 線材をスパイラル状に巻付ける CORC®と STAR®は加速器用 REBCO ケーブルの導体候補として期待されている[1-3]。これらの丸型ケーブル構造を参考に、我々は高磁場下で kA 級の電流容量と高い曲げ性能を有する加速器用 REBCO ケーブルの開発を行っている[4]。本発表は、異なる銅層厚を有する REBCO 線材を用いて丸型ケーブルを製作し、臨界電流 I_c と丸線コア直径との関係を測定評価したので報告する。

2. REBCO 線材の磁場中 I_c 特性

銅メッキの厚みが 5, 10, 20 $\mu\text{m}/\text{side}$ (メーカー仕様) の 3 種類の SuperPower 社製 REBCO 線材 (SCS2030) を用いて 1 層 1 テープのケーブルを製作した。それぞれの線材断面画像 (幅方向中央部) を Fig. 1 に示す。3 種類すべての幅が約 2 mm、ハステロイ®の厚みが約 30 μm 、画像から推定した線材の厚みが 48-57 μm 、超伝導層と線材中立軸との距離が約 13 μm である。77 K 自己磁場下の線材 I_c は 55-60 A であり、4.2 K の I_c と Lift factor ($I_c(4.2 \text{ K}, B//c) / I_c(77 \text{ K}, \text{self-field})$) の磁場依存性を Fig. 2 に示す。銅メッキ 5 $\mu\text{m}/\text{side}$ の線材は磁場特性が高い HM タイプ、他は AP タイプである。測定結果から外挿した 4.2 K と 20 T での lift factor は、HM タイプが 2.99、AP タイプが 1.36 と 1.49 と推定される。

3. ケーブル I_c とコア直径の関係

上記 3 種類の REBCO 線材を用いて、直径 1.8-5 mm の丸線銅コアの表面に超伝導層が内側となる (圧縮ひずみがかかる) ように巻きつけて 1 層 1 テープのケーブルを製作した。製作時の張力は約 4 N で、巻きつけ角度はケーブル長手方向に対して約 40 度である。77 K 自己磁場下で測定した各ケーブルの I_c とコア直径との関係、 I_c と超伝導層に加わる線材長手方向に沿った圧縮ひずみの推定値との関係を Fig. 3 に示す。超伝導層に加わる圧縮ひずみは、巻付け 1 ピッチ当たりの線材中立軸でのテープ長 $L_{\text{tape}} = (p^2 + \pi^2(d+t)^2)^{1/2}$ と、超伝導層でのテープ長 $L_{\text{sc}} = (p^2 + \pi^2(d+t-s)^2)^{1/2}$ を用いて、 $(L_{\text{sc}} - L_{\text{tape}}) / L_{\text{tape}}$ で表すことができる。ここで、 p と d は実測した巻付け 1 ピッチ分のケーブル長とコア直径、 t と s は Fig. 1 から推定した線材厚みおよび超伝導層と中立軸との距離である。銅メッキ 5 $\mu\text{m}/\text{side}$ の HM タイプはコア直径 2.4-2.6 mm、ひずみ -0.5% 付近で顕著な I_c 劣化が生じたのに対して、銅メッキ 10 と 20 $\mu\text{m}/\text{side}$ の AP タイプは 1.8-2 mm、-0.6% 付近で劣化が見られた。HM タイプのコア直径に対する劣化の様子は先行研究[2]とよく一致しているのに対して、AP タイプはより細いコアでのケーブル製作が期待できる。

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものである。

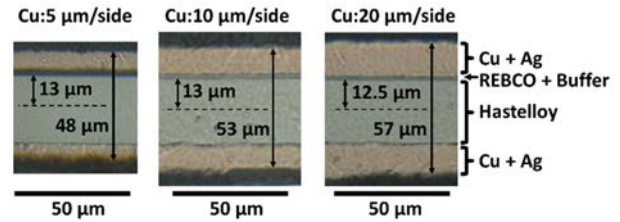


Fig. 1 Cross-sectional images of the REBCO tapes with three types of copper plating of 5, 10, and 20 $\mu\text{m}/\text{side}$. These images were taken near the center in the tape width direction. The estimated distance between the REBCO layer and the neutral axis of the tape (short arrow line) and the estimated thickness of the tape (long arrow line) are marked in the figures.

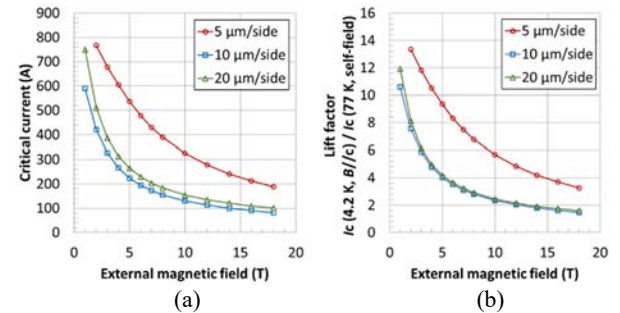


Fig. 2 Magnetic field dependence of the (a) tape I_c and (b) lift factor at 4.2 K. The tape I_c was determined by 1.0 $\mu\text{V}/\text{cm}$.

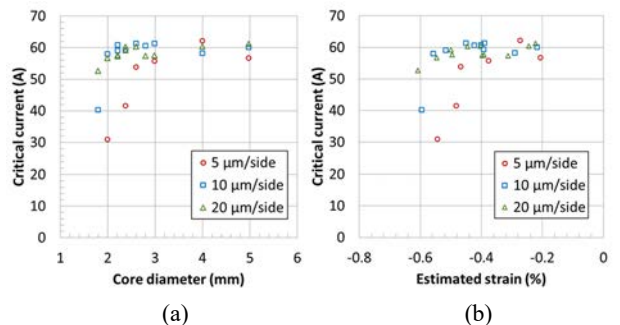


Fig. 3 Cable I_c measured at 77 K and self-field as a function of (a) core diameter and (b) estimated strain of the REBCO layer. The cable I_c was determined by 1.0 $\mu\text{V}/\text{cm}$ using the tape length.

参考文献

1. D C van der Laan, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, 24 (2011) 042001
2. J. D. Weiss, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, 30 (2017) 014002
3. S. Kar, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, 32 (2019) 10LT01
4. X. Wang, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 34 (2024) 4801205

EPICSに基づく Belle 超伝導ソレノイド用温度モニターの開発

Development of temperature monitor 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。2022年7月からの検出器及び加速器の改良のための休止期間(LS1)を経て、2024年1月から実験が再開された。

ビーム衝突点近傍の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)に関して、我々は、以前に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)を使用してモニターを開発し報告を行った。これらのデータは、総合計装システム日立 EX-8000 を介してデータ収集、アーカイブされたものである。

Belle ソレノイドにおいては、EX-8000 に入りきらない歪、温度計等のデータをデータロガーで収集していたが、この度の開発で、これらのデータも EPICS 化された。そのうち、歪に関しては、専用ブリッジボックスを開発してデータ収集を行っており、先行して昨年報告を行っている[1]。

今回は、さらに Belle ソレノイドの残りの温度計(3 種; Pt, Pt-Co, CGR)に関してもデータ収集、EPICS 化を完了した。これをもって、Belle ソレノイドの slow data はすべて EPICS 化されたことになる。

2. Belle 超伝導ソレノイド

1997年に製作完了、その後 Belle 実験に使用され、引き続き Belle II 実験でも使用されている。コイル部分とその上のチムニー、チムニーポッドから成る。

冷凍システムの運転に必要な温度計などのデータは、EX-8000 に直接入力されている。その他モニター用の温度計、歪ゲージなどのデータは以下のものがあり、昨年の歪ゲージ(以下の 1)と 2))に引き続き今回残りの温度計の EPICS 化を行った。

- 1) 2 gauge 式歪ゲージ 24 個
- 2) 1 gauge 式歪ゲージ 25 個
- 3) Pt 温度計 9 個
- 4) Pt-Co 温度計 22 個
- 5) CGR 温度計 31 個
- 6) その他、温度計への供給電流値モニター 3 個

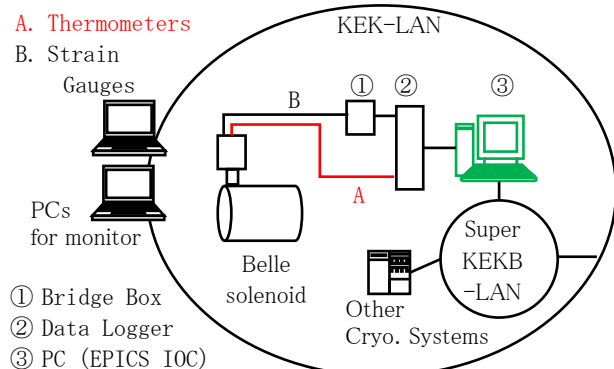


Fig.1 Schematic diagram

3. ハードウェア

既存のデータロガー(旧 Agilent Technologies 社・現 Keysight 社 34980A)を使用している。1 枚目の電圧測定用モジュール(34922A)で、歪ゲージデータ計 49 個を、2 枚目のモジュール 34922A で残りの温度計等のデータ計 65 個の電圧を測定している。このデータロガーからのデータ収集とアーカイブ、モニター画面を EPICS を用いて作成した(Fig.1)。

4. ソフトウェアの開発

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。歪ゲージデータと同じく、測定された電圧値は、この IOC で温度へ変換される。温度への変換に際しては、複雑な計算が多く、特に CGR などは個々に Chebychev 多項式の計算も行わなくてはならない。そのため、温度変換は、IOC からあらかじめ登録した C 言語の function を呼び出す形で実現させた。

これらの変換したデータを、EPICS のアーカイバーに登録すると、LAN 上の PC から CSS (Control System Studio) 上でのモニターが可能となる。この CSS 上でのモニターグラフ、グラフィックスを作成した。Fig.2 に例を示す。

モニターの sampling speed は、今回は入出力から来る制限で 10 秒毎であった。

5. まとめ

Belle 超伝導ソレノイドのクエンチなどの早いデータを除いた slow data の EPICS 化が完了した。モニターとしては、他ルートからの EPICS データとの参照、統合も容易であり、CSS の多機能が使用可能で、便利で高機能なものとなっている。

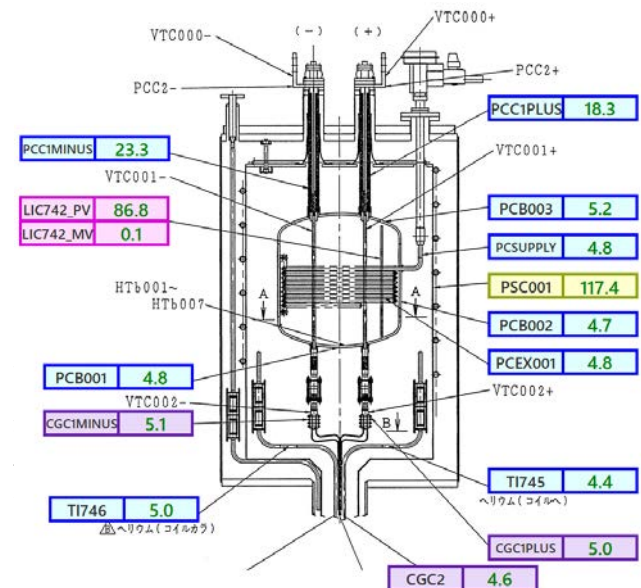


Fig.2 Temperature monitor display of Chimney pod (unit: K)

参考文献

1. K. Aoki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.44

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年春)

— 1/2 スケール実証用 REBCO コイルシステムの過渡的電磁力解析 —

Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Spring 2024): Numerical analysis on transient electromagnetic force behavior in 1/2 scale demonstration REBCO coil system

植田 浩史, 山下 葵, 廣田 悠力, 南前 俊介, 井上 良太, 金 錫範 (岡山大); 野口 聡 (北大);
渡部 智則 (中部電力); 福田 光宏 (阪大); 石山 敦士 (早大)

UEDA Hiroshi, YAMASHITA Aoi, HIROTA Yuri, MINAMIMAE Shunsuke, INOUE Ryota, KIM SeokBeom (Okayama Univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power);
FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)
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[1-3]。コイルシステムは、円形コイルと非円形コイルを組み合わせたもので、常電導転移時、保護動作時の電磁的、機械的挙動は複雑になると考えられる。今回は数値解析により保護動作時の電磁的・機械的挙動を評価したので報告する。

2. 解析モデル

図 1 に示すような UBSC 用 REBCO コイルシステムでクエンチが起きたことを想定し、その際に非円形 Sector コイルに流れる電流分布を算出し、それに基づいた電磁力・電磁応力解析を行った。本解析では 4 積層されている非円形 Sector コイルの下段のコイルがクエンチしたことを想定し、マルチコイルシステム全体に励磁が完了した後、クエンチが起こったコイルの臨界電流 I_c を本来の 20% に低下させることで、クエンチを模擬した。

3. 解析結果

周方向電流分布を図 2 に示す。クエンチを起こした時刻を $t = 1$ s とする。クエンチを起こした下段パンケーキコイルに流れていた周方向電流が I_c の低下のため減衰していく。これに起因して正の方向に径方向電流が増加する。他の巻線やコイルにおいて相互インダクタンスによる誘導起電力が生じ、コイルに流れる周方向電流が増加することになる。さらに、周方向電流の増加に伴い、負の向きの径方向電流が各コイルに生じる。これにより、想定されている運転電流である 540 A を大きく上回る周方向電流が巻線に流れることになる。sector コイル#1 以外の sector コイル#2, #3, main コイル#1~#4 の周方向電流を図 3 に示す。sector コイル#1 の下段のクエンチによって、sector コイル#1 の外側に配置されている main コイル#3 においても、相互インダクタンスによる誘導起電力が生じ、設計通電電流値である 540 A よりも周方向電流が増加している。sector コイル#2, #3 及び main コイル#1, #2, #4 においては、main コイル#3 ほどクエンチの影響が表れていない。周方向電流クエンチしたコイルの周方向電流の値が、クエンチを起こす前の値の 1% まで減衰したときの時刻を $t = t_3$ とした。その間の過程に $t = t_1$ と $t = t_2$ の 2 点をとり、以上 3 つの時刻において電磁力及び電磁応力を評価した。一例として、図 4 にクエンチ前とクエンチ後の $t = t_2$ 時点の周方向応力分布を示す。詳細な結果については当日報告する。

参考文献

- 2023 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a01 (2023)
- 2023 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a02 (2023)
- 2023 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a04 (2023)

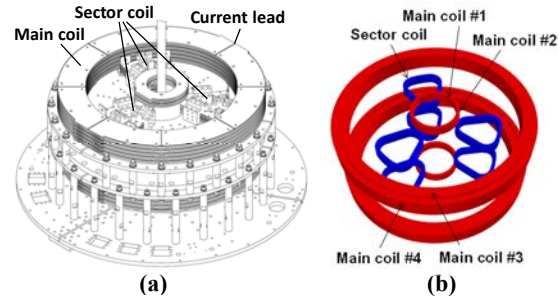


Fig.1 Drawing of Ultra-Baby Cyclotron and (b) Coil arrangement

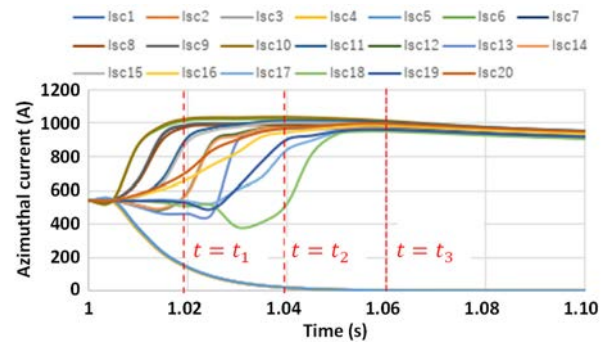


Fig. 2 (a) Azimuthal current distribution of subdivided coils in sector coil at quenching.

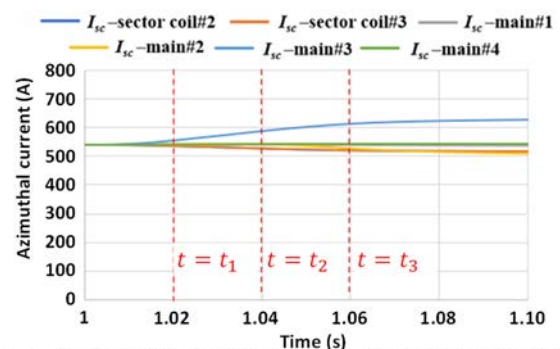


Fig. 3 (a) Azimuthal current distribution of main coils and other sector coils at quenching in a sector coil.

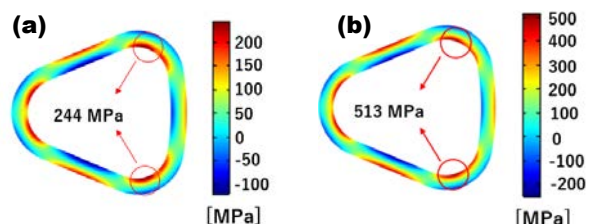


Fig. 4 Longitudinal electromagnetic stress distribution in sector pancake coils (a) before quench and (b) after quench ($t = t_2$).

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年春): 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの 数値計算に基づく熱的過渡安定性解析・評価

Development of REBCO coil system for Skelton Cyclotron (Spring 2024) :
Numerical analysis and evaluation of transient thermal Stability of
a 1/2-scale demonstration no-insulation REBCO coil system

日浦 琢言, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大);植田 浩史(岡山大)

HIURA Takuto, ISHIYAMA Atsushi(Waseda Univ.);NOGUCHI So(Hokkaido Univ.);UEDA Hiroshi(Okayama Univ.)

E-mail: takufish208@fuji.waseda.jp

1. はじめに

標的 α 線核医学治療のための α 線放出 RI (^{211}At) 製造用「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を進めている[1]。本装置は、空芯の無絶縁 REBCO コイルシステムのみにより粒子加速に必要な磁場を発生するという特徴を持つ。このコイルシステムは、等時性磁場発生用の大小円形同軸コイルと AVF 発生用非円形セクターコイルから構成されている。今回は、実機の 1/2 スケール実証用モデル[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 の複数の円形・非円形かつ同軸・非同軸の無絶縁 REBCO コイルシステムを対象として、コイルの一部に局所的な劣化が生じたときのコイル間の磁気的相互作用と、各コイル内の過渡的な電流および温度分布を数値計算に基づいて解析・評価したので報告する。

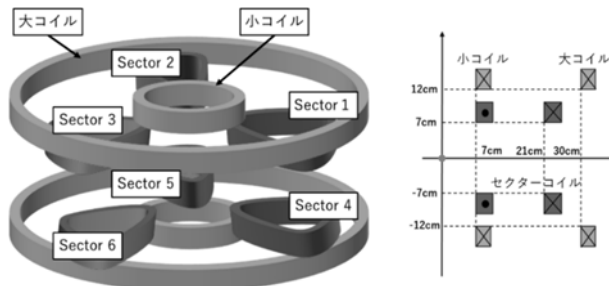


Fig.1 Schematic diagram of the coil system for analysis

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。コイルの諸元および解析条件は UBSC に基づいている。劣化発生コイルと層間電気抵抗値を変化させたときの以下の 6 通りについて解析を行った。

Table 1 Analysis conditions

Deterioration occurring coil	Interlayer electrical resistance [$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$]	
Small coil	0.2	2
Large coil	0.2	2
Sector coil	0.2	2

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]。

3. 解析結果

例として、小コイルに局所的劣化が生じた場合(層間電気抵抗値 $0.2\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)について、Fig.2 に各コイルの両端電圧の時間変化を、Fig.3 に各コイルが作る中心磁場の変化量を

示す。劣化のある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、他の 3 つの円形コイルの作る磁場が増加し、負の電圧が生じた。しかし、下段のセクターコイルでは、上向き中心磁場がわずかに減少した。これは、小コイルの影響よりも同軸の上段セクターコイルの影響を強く受けたためであると考えられる。セクターコイルの磁場は増加しているため、負の電圧が生じた。また熱的安定性については、小コイル劣化であるこの例において、転流による発熱が支配的となり、熱的安定性が保てた。他の場合も含めた詳細は、発表で報告する。

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。

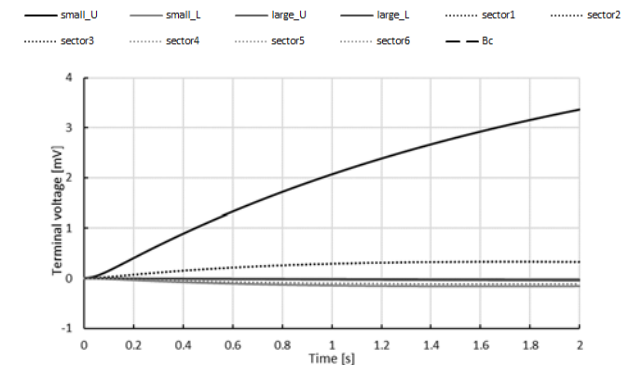


Fig.2 Both-end voltage of each coil

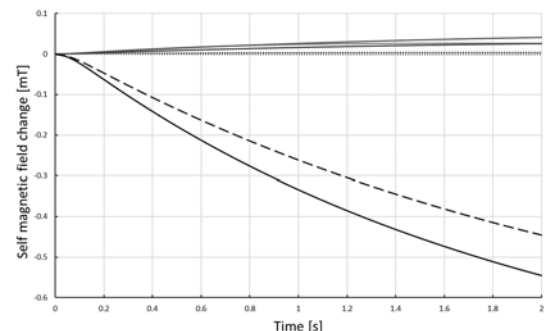


Fig.3 Central magnetic field generated by each coil

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

データ駆動型アプローチによる実規模の REBCO コート線材製造プロセスのモデリングと最適化への展開

A Data-Driven Approach to Modeling and Optimization of Full-Scale REBCO Coated Conductor Production Process

本須 隆暢, 呉 澤宇, 世良 真也, 楊 墨, 田中 佑斗, 東川 甲平 (九大);
 ロマン ヴァリコフ, 中村 美幸, バレリー ペトリキン, セルゲイリー (FFJ)

KISS Takanobu, WU Zeyu, SERA Shinya, YANG Mo, TANAKA Yuto, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu University);
 VALIKOV Roman, NAKAMURA Miyuki, PETRYKIN Valery, LEE Sergey (FFJ)
 E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材を用いた小型核融合炉への適用など、応用の進展に伴って REBCO コート線材のニーズが高まっており、REBCO 線材の製造は量産プロセスに移りつつある。一方で、線材製造時のプロセスパラメータの組み合わせは多岐にわたり、線材性能、歩留まり、信頼性、コストを担保した本格的な量産や事業化のためにはまだ不十分であり、線材製造技術の革新が喫緊の課題となっている。本研究では、筆者らがこれまでに開発した、REBCO 線材の臨界電流を非破壊・非接触かつ高速に評価可能なリール式磁気顕微計測と機械学習を融合したデータ駆動型アプローチを実規模の REBCO 線材プロセスに適用し、複雑なプロセスの挙動を機械学習を用いてモデリングし、線材特性とプロセス条件との関係を明確化した。

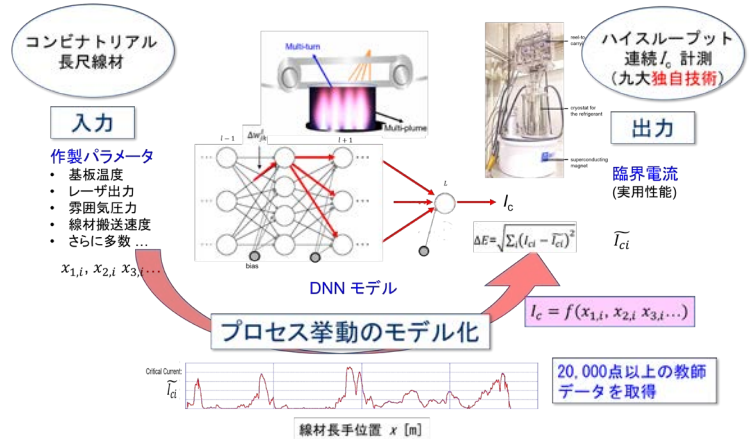


Fig. 1 A novel data-driven approach for modeling full-scale REBCO coated conductor PLD production process.

2. 実験方法

現在 REBCO 線材の商用生産に用いられている実規模のリール式 PLD 成膜装置を用いて、製造条件を系統的に変化させながら長尺のコンビナトリアル試料を作製した。Fig. 1 に示す様に、コンビナトリアル試料の臨界電流 I_c をリール式磁気顕微鏡によって、非破壊・非接触にかつ高速、高解像度に連続測定することによって作製条件と臨界電流との関係について 20,000 点以上のデータを取得した。得られたデータを用いて、Deep Neural Network (DNN) モデルを用いて複雑な PLD 成膜プロセスの挙動を学習し、作製時の制御パラメータと線材の I_c 値の関係を記述する回帰モデルを作成した。

3. 実験結果・考察

液体ヘリウム温度 4.2 K、0.5 T の外部磁界中で取得した I_c のプロセス条件による変化の様子を、Fig. 2 に実測結果 (青点) とモデル推定 (黒点) を比較して示す。機械学習によって得られたモデル推定値は実測結果を定量的に良く再現している事が分かる。本結果は、一般には計測が困難な、数 1000 A 級の大電流領域となる液体ヘリウム浸漬冷却において、外部磁界下で I_c の連続測定に成功したことに加え、従来、トライ&エラーで作製条件の最適化を行っていた線材製造の方法論を根本から覆すものとして、REBCO 線材の臨界電流に関する学理並びに工学的応用の両面において重要な成果といえる。すなわち、実用環境下の性能を最適化するための材料組織の明確化や、線材製造条件を最適化するためのリードタイムの短縮や線材性能の再現性・制御性を大幅に向上するための製造技術として、今後の展開が大きく期待できる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617 ならびに JP24H00320 の助成を受けて実施したものである。

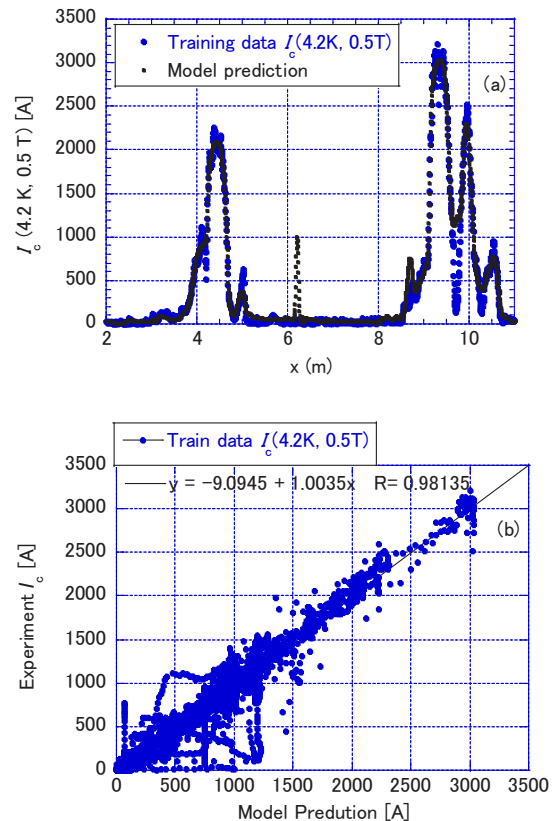


Fig. 2 Modeling of REBCO coated conductor deposition process by DNN. (a) Critical current I_c (4.2 K, 0.5 T) in a combinatorial sample as a function of processing conditions. (b) Comparison between model-predicted and observed I_c over 20,000 conditions.

レーザースクライビング線材の磁場中臨界電流特性

Critical current characteristics in magnetic field on laser scribed REBCO tapes

町 敬人, 廣瀬 陽代, 和泉 輝郎 (産総研); 中村 美幸, 蓮尾 信也 (Faraday Factory Japan)
 MACHI Takato, HIROSE Hishiro, IZUMI Teruo (AIST); NAKAMURA Miyuki, HASUO Shinya (FFJ)
 E-mail: t.machi@aist.go.jp

1. はじめに

我々は、航空機の推進システムを開発する研究の一環として、全超電導回転機の実現を目指している。全超電導回転機では線材に交流が印加されるので、交流損失の低減が必須である。REBCO 線材の交流損失はヒステリシス損失とカップリング損失が主であるため、この両方を低減するためには、フィラメント化により REBCO 層を細線化するとともに、フィラメント間の絶縁の確保の両立が求められる。レーザースクライビング加工は REBCO 線材のヒステリシス損失およびカップリング損失を低減することができるかと期待されており、今回は細線化された REBCO 線材の磁場中臨界電流特性が、加工によってどのような影響を受けるかを評価した結果を報告する。

2. 実験

実験には EuBCO に BaHfO のピン止めセンターが添加された REBCO 線材(12mm 幅)を用いた。安定化層は Ag 層のみの線材である。77K, 自己磁場で測定した I_c は 635 A であった。この線材を 7psec パルス幅の UV レーザーを用いたスクライビングによって 10 フィラメントに分割する加工を行なった。ガルバノスキャナを用いた 10 分割同時加工で、10m/h の速度で加工した。フィラメント 1 とフィラメント 10 が線材の裏側の Hastelloy や安定化層で導通しないように、幅方向端部にもレーザー掘削(縁切り加工)を行ってあるため、厳密には 11 フィラメントに分割されている。

カップリング損失はフィラメント間の抵抗に反比例するので、まずはフィラメント間抵抗を室温にて評価した。

10 フィラメント全体の磁場中の臨界電流 I_c は、磁場の向きを $H//c$ として 77K および 70K で 3T まで評価した。

3. 実験結果と考察

加工長 800mm で抵抗測定長 635mm のフィラメント間抵抗の測定結果を表 1 に示す。抵抗率の平均値は $1.01 \times 10^6 \Omega \text{cm}$ であり、カップリング損失低減には十分な値が確保されたと考えている。

Table 1 Resistance and resistivity between filaments

Between filaments	Resistance [Ω]	Resistivity [Ωcm]
F1-F2	3.51E+03	2.23E+05
F2-F3	7.70E+04	4.89E+06
F3-F4	1.58E+03	1.00E+05
F4-F5	6.80E+02	4.32E+04
F5-F6	2.43E+04	1.54E+06
F6-F7	2.93E+03	1.86E+05
F7-F8	1.37E+03	8.70E+04
F8-F9	2.88E+04	1.83E+06
F9-F10	2.51E+03	1.59E+05
F10-F1	2.00E+04	1.27E+06
Average	1.63E+04	1.03E+06

次に磁場中臨界電流 $I_c(B)$ の磁場依存性の測定結果を図 1 に示す。白点 (□:77K, ○:70K) が分割加工前、黒点 (■:77K, ●:70K) が 10 分割線材の磁場中 I_c の結果である。10 分割線材の 70K, 1.2T の I_c は 363 A であり、これを 10mm 幅に換算すると 302 A となった。分割加工前の 1.0T のデータが欠如しているのは使用した電源の最大電流 500A を越えてしまったためである。1.2T で未加工線材に比した 10 フィラメント線材の I_c は約 79% であり、 I_c 低下率は 21% であった。スクライビング加工による面積低下率は約 15% であったので、加工による I_c 低下率は溝 1 本あたり 0.6% 程度に抑えることができた。これはスクライビングの加工品質の向上によると考えられる。

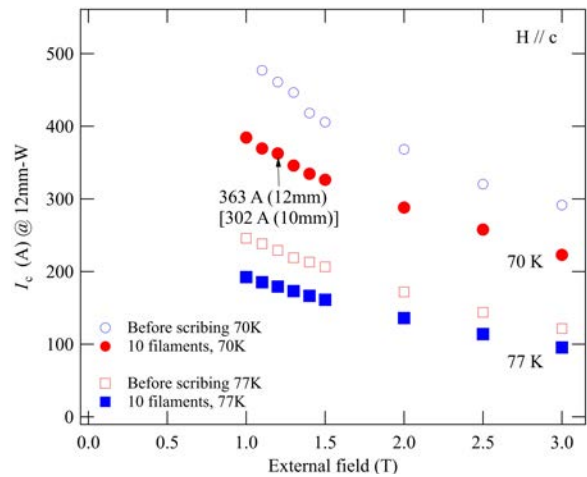


Fig. 1 $I_c(B)$ results of un-scribed(open marks) and scribed into 10 filaments(closed marks) coated conductors.

4. 謝辞

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

ツイストした RE 系コート線材の縦磁界下における臨界電流特性

Critical current characteristics in longitudinal magnetic field of twisted RE conductors

濱本 拓郎, 豊岡 寛大, 木内 勝(九工大)

HAMAMOTO Takuro, TOYOOKA Hiromasa, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.)

E-mail: hamamoto.takuro771@mail.kyutech.jp

1. はじめに

超電導線材の電流 I の通電方向に平行に磁界 B を加えた縦磁界 ($B \parallel I$) では、垂直に B を加えた横磁界 ($B \perp I$) よりも臨界電流 I_c が増加する。現在応用機器への利用が期待される RE 系コート線材でも I_c の増加が報告されているが、その増加率は小さい。この小さな増加率は、大きな自己磁界や酸化物の二次元的な電流の流れが原因として考えられる。

一方で RE 系コート線材はテープ形状であるが、線材にツイストを加えることで、電流の流れを二次元的から三次元的に変えることができる。これにより磁界と電流の平行度が向上し、 I_c の大きな増加率が得られる可能性がある。

そこで本研究では、市販 RE 系コート線材にツイストを加え、縦磁界下における I_c を直流四端子法で測定し、ツイストが臨界電流特性にどのような影響を与えるかを調べた。

2. 実験方法

本研究で使用した RE 系コート線材はフジクラ社製の人工ピンなし・あり線材、Faraday Factory Japan 社製線材、および住友電気工業社製線材である。線材の幅はすべて 4 mm で、 I_c 、線材の厚さ、人工ピンの種類を Table 1 に示す。ツイストしたときの 1 ピッチの線材長さをツイストピッチ TP とした。ツイストの方向は電流通電による自己磁界を考慮して、Z 巻き方向とした。また特性比較のためにツイストしていないフラットな線材は no TP として、同様な評価を行った。

液体窒素中での電界 E -電流 I 特性は、直流四端子法を用いて測定した。 I_c は 1.0×10^{-4} V/m の電界基準で決定した。磁界は電流の通電方向に平行に、Bi2223 超電導コイルを用いて 0.30 T まで加えた。

3. 測定結果

Fig. 1 に各線材の no TP の自己磁界における臨界電流 I_c^{flat} で I_c を規格化した I_c/I_c^{flat} の TP 依存性を示す。TP=200 mm はすべての線材で I_c の劣化は無いが、TP の減少と共に I_c は緩やかに減少し、TP=100 mm では 0.6 I_c^{flat} まで劣化する線材もある。このような I_c が劣化する特性になるのは、ツイストによって超電導層に割れや歪が加わることで電流路が制限されるため、同様な特性が報告されている[1,2]。

ここでは、ツイストによる I_c の劣化の無い TP=200 mm に注目する。Fig. 2(a)と(b)にフジクラ社製の人工ピンなし・あり線材の TP=200 mm、no TP における自己磁界の臨界電流 I_c^{self} で I_c を規格化した I_c/I_c^{self} の縦磁界特性をそれぞれ示す。Fig. 2(a)のフジクラ人工ピンなし線材の no TP は I_c^{self} からの増加はないが、TP=200 mm では I_c が 0.20 T で I_c^{self} から 1.6% 増加した。また、Fig. 2(b)のフジクラ人工ピンあり線材も no TP では I_c^{self} からの増加はないが、TP=200 mm では 0.03 T で I_c が 0.8% 増加し、人工ピンありとなしで異なる振舞いになった。また、Faraday Factory Japan 社製線材、住友電気工業社製線材は、フジクラ人工ピンあり線材と似た特性になり、ツイストすることで、 I_c の増加が確認できた。すなわち、今回注目した TP=200 mm では I_c^{self} は劣化していないが、ツイストにより線材端部は引張歪、中央は圧縮歪を受け[3]、電流のパスが変化することが予想される。このパスの変化より一部の電流と磁界の平行度が向上したことで no TP よりも I_c の増加が得られた

ものと考えられる。

Table 1 Specifications of the RE conductors.

	I_c^{self} [A]	Thickness [mm]	APC
Fujikura (no APC)	270	0.13	—
Fujikura (with APC)	165	0.11	BHO
Faraday Factory	250	0.07	Y_2O_3
Sumitomo	225	0.19	—

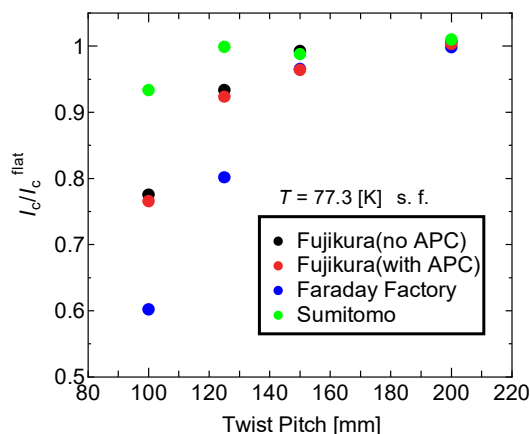


Fig. 1 Twist pitch dependence of I_c/I_c^{flat} of RE coated conductor.

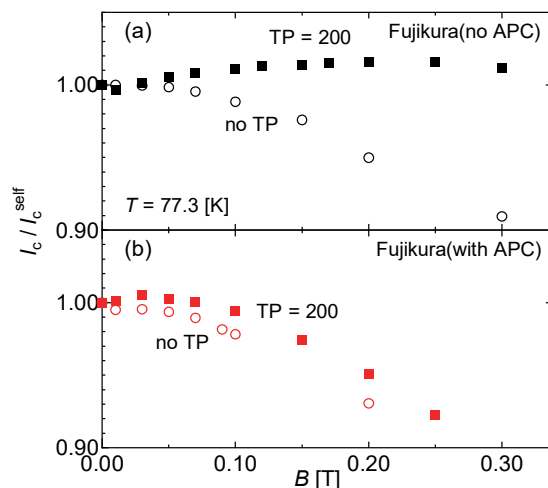


Fig. 2 Longitudinal magnetic field dependence of I_c/I_c^{self} for TP=200 mm, no TP at 77.3 K. (a) Fujikura (no APC), (b) Fujikura (with APC).

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費:21H01872からの助成を受けて実施した。

参考文献

1. Y. Tanaka *et al.*, Abstract of CSSJ Conference Vol. 104 (2022) p. 52
2. X. Li *et al.*, Cryogenics 126 (2022) 103523
3. M. Takayasu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 014011

断続的なマイクロクラックを導入した REBCO 多か線の開発研究

Study on multi-cracked REBCO tapes with intermittent microcracks introduced

金沢 新哲 (室工大)

KANAZAWA Shintetsu (MIT)

E-mail: shintetsu_kanazawa@muroran-it.ac.jp

1. はじめに

REBCO テープ線材の多芯化は、遮蔽電流磁場や、交流損失などの改善に有効であることから多くの開発が行われていたが、芯線加工による線材の臨界電流の降下が現れることが大きな課題となり、マイクロフィラメントへの開発は進んでいない現状である。芯間のブリッジがない完全な分離となれば、各々の芯の臨界電流を維持することが求められ、原理的にも大きな壁がある。

本研究では、損失改善などの多芯効果を有しながら、臨界電流を維持可能な人工クラック入り単芯テープ線材を考案した。テープの超電導層には多くの断続的なマイクロクラックを導入し、多芯のような完全な分割をしないことで、全体的に細網のような構造を持つ。このような人工クラック(ひび(罅))入り線材を多か(罅)線と名付ける[1]。超伝導層に注目すると、このような線材は多芯線のような芯を有しておらず、クラックによって枝のように分岐されることから、多岐線と名付ける。

2. 実験

REBCO テープ線材は、(株)フジクラ製の幅は 4 mm、厚さは 75 μm (銅メッキなし、人口ピンなし)である。加工装置は Fig. 1 に示めた加工装置を使用した。厚さ 0.1mm の丸刃を 37 枚重ねて使用し、すべて 3 セットを取り付けた。表 1 はスプリット線の作製条件を示し、超伝導層側の Ag 層が若干切断される程度に加工した。

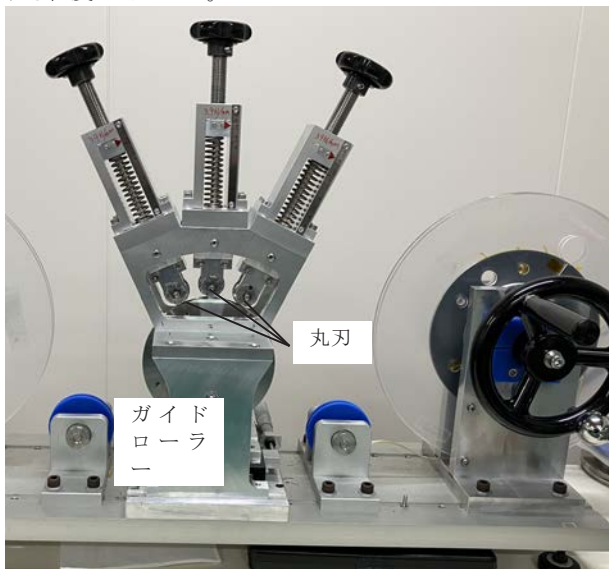


Fig. 1 Multi-splitter to fabricate multi-cracked REBCO tape

表1 スプリット線材の作製条件

加工方法	応力集中
丸刃の本数(枚×セット)	37×3 = 111
応力の印加表面	Ag(超伝導層側)
ローリングの加工回数	10

3. 実験結果とまとめ

超電導層を観察するため、Ag 保護層を除去し、電子顕微鏡により Fig.2 のような写真が得られた。図の横方向が線材の

長手方向であり、縦方向が線材の幅方向である。線材の長手方向に白い破線がみられ、これが丸刃での加工した内部スプリットである。白線の長さは様々で、100 μm 程度とその以下もあり、マイクロレベルに短いことがわかる。幅は丸刃の刃先の幅 20 μm と同じ程度に細い。

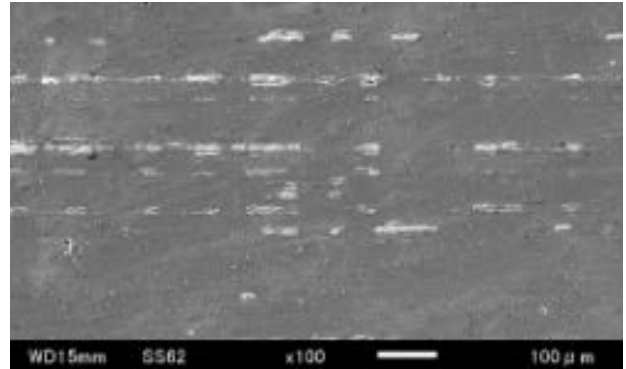


Fig. 2 REBCO surface of the fabricated sample

臨界電流の測定により、線材の臨界電流が加工回数10回で20%近く上昇するサンプルもあり、大きな改善が得られた。この結果については、原理を含め、当日に発表する。

交流損失については、線材の磁化測定およびコイルにおけるシミュレーションにより評価した。線材の磁化測定の結果では、磁化損失が2分の1よりさらに改善されることが見られた。コイルでの損失は、線材の磁化損失の結果を利用してシミュレーションした。コイルのモデルは下記の Fig. 3 に示し、まず FEM による磁場分布を計算し、その磁場に対する各ターンの線材の損失を合計して、コイル全体の損失を計算した。

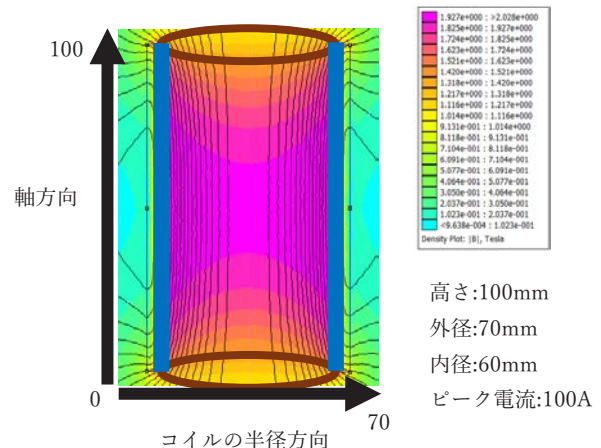


Fig. 3 Model of coil with magnetic field distribution

参考文献

[1] 金 新哲, 川村 幸裕, 「高温超伝導線材, その製造方法および製造装置」, 特許第 7349128 号, 登録日: 2023.09.13

Al₂O₃をパターニングした基板上的でのMOD-YBCO 薄膜のマルチフィラメント化

Multifilamentation of MOD-YBCO thin films on Al₂O₃ patterned substrates

藤本大貴, 寺西 亮 (九大); 松本明善, 大井修一, 立木 実 (NIMS)

FUJIMOTO Hiroki, TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.);

MATSUMOTO Akiyoshi, OOI Shuuichi, TACHIKI Minoru (NIMS)

E-mail: fujimoto.hiroki.779@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_y (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[1,2]。我々はその方法として、基板を修飾して成膜することによる超伝導層の結晶配列化に注目している[3,4]。これまでZrを細線状にパターニングしたSrTiO₃(STO)基板上にYBCOを成膜すると、YBCOはSTO上では3軸配向し、Zr上では結晶配向が乱れることから、細線状に結晶配列化することを報告している。

本報告では、新たにAl₂O₃をパターニングした基板上でYBCOを成膜し、材料の違いによる磁束の侵入幅への影響について考察することを目的とした。

2. 実験方法

基板にはフォトリソグラフィーにてZrおよびAl₂O₃を幅8 μmおよび5 μm程度でそれぞれ個別に基板中央から端部方向へ100、200、500 μmの間隔で細線状にパターニングしたSrTiO₃(STO)を用い、TFA-MOD法にて膜厚約600 nmのYBCOを成膜した。次に、それぞれの試料について冷却温度10 Kの条件下で外部磁場を0~400 Oeの各条件で磁気光学顕微鏡(MO)観察し、得られたMO像にて代表的な細線パターン1列に注目して、磁束の侵入幅(Fig.3 挿入写真Aの部分)をその1列の3箇所測定することにより磁束の侵入幅の変化を評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1(a)と(b)はZrとAl₂O₃をパターニングしたそれぞれの基板上的YBCO膜表面の20 OeにおけるMO像であり、磁束が膜中に侵入するほど色が明るくなる。Zr試料ではMO像の上下方向に複数の明るい線が観察され、磁束の侵入が認められたが、Al₂O₃試料では大部分で暗くなっており、磁束の侵入がほとんど観察されなかった。この結果から、磁束の侵入部では、Fig.2の模式図のようにZr直上の膜内に異相や配向が乱れたYBCO結晶が生成していることが示唆され[5]、Zr上に比べてAl₂O₃上では異相や配向が乱れたYBCO結晶の割合が小さいことが考えられる。

Fig. 3は、Fig. 1のそれぞれのMO像の左端1本の明るい線に注目し、挿入写真の模式図のようにMO観察時の磁束の侵入幅(A)と外部磁場(B)の関係を示す。外部磁場が大きいくほど磁束の侵入幅が大きくなるが観察され、ZrやAl₂O₃のパターン周辺およびパターン直上の膜内に超伝導の弱いYBCO結晶や異相が多く存在していることが考えられる[5]。また2つの試料間で比較すると、同一の外部磁場下ではZrに比べてAl₂O₃をパターニングした試料の方が磁束の侵入幅は小さい傾向にあること、また同一の磁束侵入幅ではZrに比べてAl₂O₃をパターニングした試料の方がより大きい外部磁場が必要である傾向にあることが観察された。この結果は、Zr上の膜よりAl₂O₃上の膜の方がより強い超伝導性を示すものと考えられる。

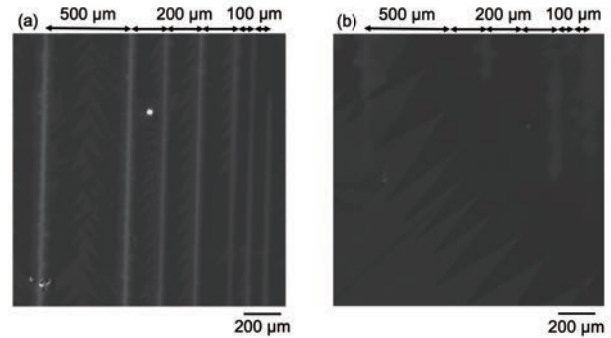


Fig. 1 MO image of YBCO film surface on Zr (a) and Al₂O₃ patterning (b) at 10 K and 20 Oe.

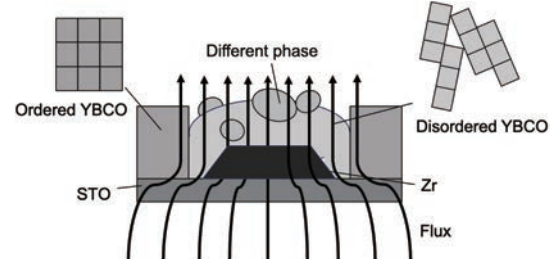


Fig. 2 Schematic image of flux penetration and YBCO film on STO and Zr.

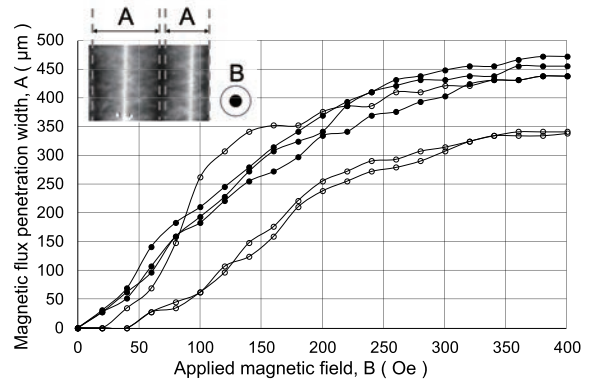


Fig. 3 Relationship between applied magnetic field and magnetic flux penetration width at 10 K.

謝辞

本研究はJSPS科研費21K18831および22H02019、ならびに(国研)物質・材料研究機構のJoint Research Hub Program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] F. Grilli et al., Supercond. Sci. Technol., 29 (2016) 083002.
- [3] A. Matsumoto et al., IEEE TAS., 33, 5 (2023) 7500404.
- [4] H. Fujimoto et al., IEEE TAS., 34, 3 (2024) 7500604.
- [5] 藤本 大貴ら, 第106回低温工学・超伝導学会研究発表会.

5 kA パルス電流を用いた REBCO 線材の強磁場・可変温度中 I_c 測定 I_c measurement of REBCO tapes in high magnetic fields and variable temperature using 5 kA pulsed current

土屋 雄司, 淡路 智(東北大); 水野 謙一郎 (MTL); 小濱 芳允 (東大)

TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi(Tohoku Univ.); MIZUNO Kenichiro (MTL); KOHAMA Yoshimitsu (Univ. Tokyo)

E-mail: tsuchiya@tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年、希土類系銅酸化物(REBCO)高温超伝導線材は、30 T 以上の強磁場発生や、20 K 程度の中温領域での高パフォーマンス運用が注目されている。また、運転温度域での線材の臨界電流 I_c が向上しており、機器設計に向けて kA 級の通電試験が必要である。しかし、低温強磁場では空間・冷却能力が限られており、 I_c 測定が困難である。そこで、精密温度調節[1]などの手法が開発されている。

我々のグループでは、パルス電流に着目し、低温強磁場中で発熱を抑制した大電流 I_c 評価手法を開発してきた[2]。また、ロングパルス磁場発生[3]などで注目されているスーパーキャパシタを用いて電流容量 2 kA のパルス電源を開発し、REBCO 線材における I_c の磁場・温度依存性を測定した[4]。しかし、REBCO 線材の I_c は 4.2 K 自己磁場で 3-4 kA 程度であり、さらなる電流増強が課題であった。

本研究では、スーパーキャパシタの直列および並列化によりパルス電源の電流容量を 5 kA まで増強し、REBCO 線材における自己磁場から 25 T 強磁場まで、4.2 K から 77 K の可変温度中での I_c 測定を行なった。

2. 実験方法

図 1 内挿図に、パルス電源に用いたニッケミ社製スーパーキャパシタユニット(DLCAP, 24 直列、2 並列、67 V、内部抵抗 6 mΩ 以下)を示す。さらに、容量 5 kA の電流レギュレータ、低インダクタンス測定プローブを用いて、パルス電流発生回路を作製した。測定系の詳細は参考文献[2,4]に示す。パルス電流の幅は 5 ms、電流スweep速度は 0.5 MA/s とした。

試料は、フジクラ社製の REBCO 線材(FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、Cu 安定化層厚 40 μm)を用いた。25T 無冷媒超伝導マグネットおよび試料空間φ33 mm の He フロー型クライオスタットを用いて、低温強磁場(4.2-77 K、自己磁場-25 T)でパルス電流を用いた I_c 測定を行なった。

3. 実験結果及び考察

図 1(a)に、短絡回路での約 5 kA の発生波形を示す。2 MA/s で電流スweep後、50 A のオーバーシュートを示し、4964±1.5 A で安定したパルス電流が得られた。

図 2(a)に、4.2 K、自己磁場におけるパルス電流発生時の電流および試料電圧波形を示す。電流は、0.5 MA/s で電流スweep後、3 A のオーバーシュートを示して安定した。電圧は電流増加とともに増加し、3280 A 以上では通電中に電圧が増加した。これは、発熱により I_c が低下したためと考えられる。定電流通電ではこのような条件で焼損が懸念されるが、パルス通電では発熱が抑制され試料の劣化がないことを確認した。

図 2(b)に、4.2-40 K、自己磁場におけるパルス電流を用いて測定した電流-電圧特性を示す。容量が 5 kA に増強されたことにより、4.2 K、自己磁場においても I_c 測定に成功した。 I_c 以下の電流では、電流に比例する電圧が現れた。これは、電流端子付近の電流流れ込み時の電圧が測定さ

れたためだと考えられる。また、自己磁場での電圧ノイズは約 1 μV(1.6 μV/cm)であった。25 T の外部磁場中ではノイズは約 2 μV と増加したが、十分な測定精度が得られた。

当日は、磁場、温度依存性の測定結果、今後の機械特性、磁場印加角度回転などとの組み合わせについて報告する。

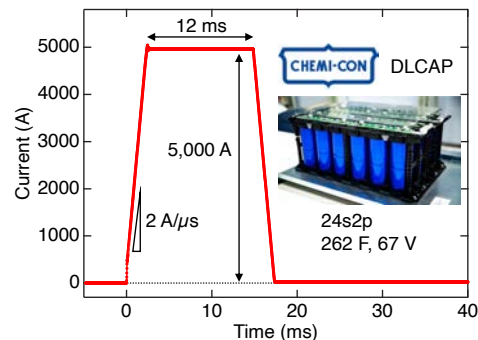


Fig. 1 Waveform of pulsed current of 5 kA by using a supercapacitor (CHEMI-CON, DLCAP).

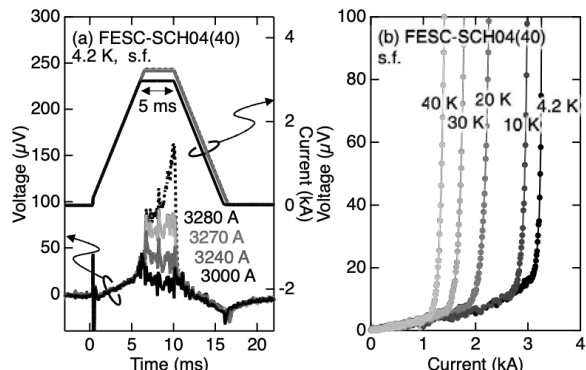


Fig. 2 (a) Waveforms of current and voltage during pulsed currents at 4.2 K and self-field. (b) Current-voltage curves measured with pulsed currents at temperatures from 4.2 K to 40 K and at self-field.

謝辞

本研究の一部は、科研費 (22H00104, 22H01522)、NEDO の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。A. Badel 博士及び F. Sirois 博士には有益な議論をいただきました。

参考文献

- [1] C. Barth *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28** (2018) 9500206.
- [2] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33** (2023) 8001105.
- [3] K. Matsui *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **92** (2021) 024711.
- [4] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **34** (2024) 9500207.

リール式磁気顕微計測と機械学習の融合による IBAD-PLD 法長尺 REBCO コート線材の電流障害領域の解析: 異なるメーカーによる線材間の比較

Analysis of Obstacles in Long-length REBCO Coated Conductor Made by IBAD-PLD Process Based on Reel-to-reel Scanning Hall-probe Microscopy Combined with Machine Learning: Comparison the Wires from Different Manufacturers

呉 澤宇, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)
 WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.)
 E-mail: z.wu@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO高温超伝導テープ線材の空間均一性は実用において重要な特性である。大きな n 値すなわち、非線形性の強い電界電流特性によって、わずかな電流障害領域による電流不均一性が、局所的な電界集中を引き起こすことが指摘されている[1]。長尺線材の空間均一性を評価するために、Tapestar™を用いた連続長手方向 I_c 測定が一般的である。我々は先行研究において、長尺線材 I_c のパラつきに埋もれるような電流障害領域は、十分に検出されていないことを指摘した。REBCO線材のテープ面内磁化電流密度 (J) の空間分布を高解像度で計測するリール式走査型ホール素子磁気顕微法と機械学習を用いた画像解析の融合によって、 J が低下する不均一領域を自動的に検出すると共に、電流障害領域の空間分布およびサイズなどの統計事象、さらに I_c に対する影響を定量的に評価する手法を提案した[2, 3]。

本研究では、本手法と用いて異なるメーカーによる線材に適用することで、自動検出モデルの汎用性を検証すると共に、線材内の局所不均一性の差異について考察を行った。

2. 実験方法

今回対象とした試料はいずれもIBAD-PLD法によって作製された長尺のREBCO線材を用いた。ただし、メーカーが異なる2種類の線材(線材A, 線材Bとする)を用いた。まず、両方の長尺線材のテープ面内磁化電流(J)分布をリール式磁気顕微観察により計測した。次に、線材Aの結果に対して、 J 低下ドメインの特徴に着目し、独立に存在する領域: Isolate Obstacleと複数のドメインが複合的に存在する領域: Cluster of Obstaclesの2種類のラベルを定義し、97個 Isolated Obstacleと57個Cluster of Obstaclesを教師データとしてObject detectionモデルを作成した[3]。得られたモデルは、線材Aの J マップに対し、各ラベリングのAccuracyは99%、物体領域を正確に検出する指標であるIoU (Intersection over Union)が89%と高い検出精度であった。さらに、当該モデルを用いて異なるメーカーによる線材Bの解析を行った。

3. 結果と考察

線材Bの J マップに対する当該モデルの検出結果の一例をFig. 1に示す。線材Bの J マップは、機械学習のトレーニングにはまったく用いられていないが、線材Aと同じ特徴のIsolated ObstacleとCluster of Obstacleの領域が検出された。検出精度とBounding Boxの位置精度はConfidenceも高く、正しく検出されたことが分かる。Fig. 2に二種類obstacleのサイズ分布を比較した。両線材とも40 mmまで及ぶ範囲に分布し、最頻値は約2 mmであることが分かった。また、線材BにおいてClusterタイプの頻度が相対的に高いことが分かった。これらの結果より、IBAD-PLD法による線材は、電流障害領域の特徴が類似することから、当該モデルによる検出と解析が異なる

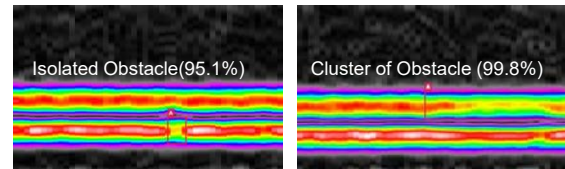


Fig. 1. Object detection results of Isolated Obstacle and Cluster of Obstacles for manufacturer B IBAD-PLD tape, by Object Detection model based on manufacturer A IBAD-PLD tape.

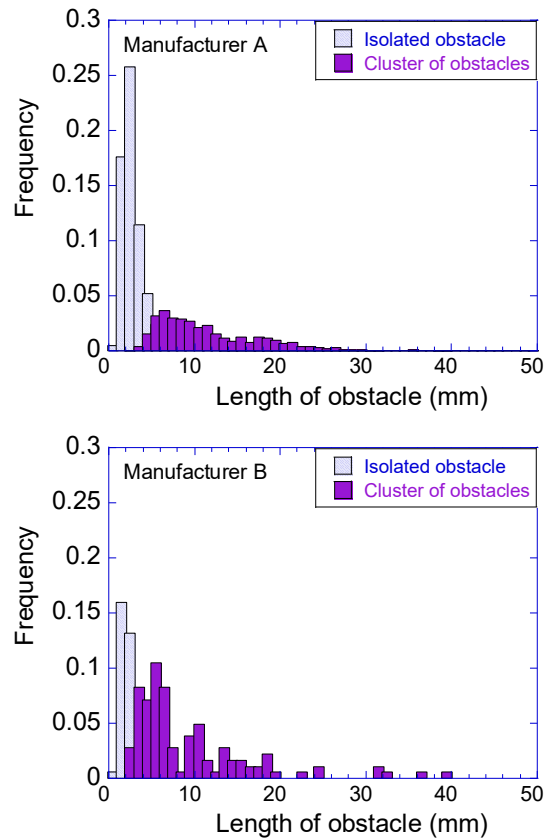


Fig. 2. Statistical distribution of obstacles length between long-length tapes from manufacturer A and B.

メーカーやロット間の空間均一性の差異の評価にも適用できると考えられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617, JP24H00320, JP23K13368 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] M. Friesen and A. Gurevich, *Physical Review B* 63, 064521 (2001).
- [2] N. Somjaijaroen et al., *IEEE TAS*. 32 6601504 (2022).
- [3] 呉 et al., 低温秋予稿集(2023), 3B-a01.

K-Ba122 多結晶体作製プロセスにおける J_c 増加および劣化要因

Mechanisms of J_c increment and degradation in the fabrication processing of K-doped Ba122 polycrystals

亀谷 文健, LIMON S., JANI M. R., SU Y., MAO S., TARANTINI C., HELLSTROM E. (フロリダ州立大)
 F. Kametani, S. A. Limon, M. R. Jani, Y. Su, S. Mao, C. Tarantini, E. Hellstrom (Florida State U.)
 E-mail: kametani@asc.magnet.fsu.edu

1. はじめに

鉄系超伝導体(FBS)Kドーパ Ba122 (K-Ba122)が真の意味で高磁場応用に適した超伝導線材となるには、いまだに科学的・技術的ハードルが多く存在する。特に、ランダム多結晶もしくは一軸配向された K-Ba122 テープ線材の臨界電流密度 J_c は、中国グループが最近示した訳 150%の J_c 増加(テープ線材で 4.2K, 10T で $J_c = 2.6 \times 10^5$ A/cm² 達成)を加味しても、単結晶 J_c と比較して大きく及ばないのが現状である。多結晶体の J_c を考慮するとき重要なのが粒界における超伝導結合性であり、究極的には材料そのものの特性である内的因子由来の結合性が多結晶 J_c を支配するはずである。しかしながら、現在に至るまで、種々の外的因子による粒界結合性劣化を完全に除外した K-Ba122 は、バルク材・線材を問わず報告されていないのが現状と思われる。本稿では種々の大きく J_c の異なる K-Ba122 多結晶材料の総括的なナノ組織観察を元に、様々な外的粒界結合性劣化因子を示し、それらが作製プロセスにおいてどのように現れ、またどのように軽減できるかを議論する。

2. 実験方法

以前報告した手順に従って[1]、Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ 多結晶バルク体を作製した。原材料の一時混合の際のボールミリングエネルギー E_{BM} を 65, 100, 200 MJ/kg と変化させた。また、外部シース構造と作製プロセスの異なる、ほぼ同等の J_c を持つ K-Ba122 テープ線材を用意した。ナノ組織観察は、JEOL ARM200cF 透過型電子顕微鏡を用いた。

3. 結果及び考察

ナノ組織観察によって、いずれの試料も K-Ba122 の外的粒界結合性劣化因子 (CLF) は、主に GB ナノクラックや、Ba-O からなる絶縁相、FeAs からなる金属相で構成されていることがわかった。これらの CLF と J_c との相関性を議論する際に問題となるのは、これらの CLF がしばしば結晶粒配向度や多結晶バルクや線材中の超伝導フィラメントコアの密度などの他の微細組織要因によって過小評価されうる。しかしながら、高純度の原料を使用し、高性能のグローブボックスで調製されたバルク試料では、10 T, 4.2 K で J_c が 10^4 A/cm² を超えるが、一時混合の際のボールミリングエネルギー E_{BM} によって J_c が大きく異なることがわかった (Fig.1)。二次焼結において 172MPa で熱等方圧縮(HIP)されたにもかかわらず、低 J_c のバルク試料では、より多くの GB ナノクラックが形成されている

ことがわかった。実際、クリーンな合成環境下でも、この低 J_c 試料は粒界上に酸素元素が多くトラップされていることが明らかになった。さらに、 J_c が $1.4\text{--}1.5 \times 10^5$ A/cm² の二種類の K-122 テープの結晶粒組織および粒界ナノ構造を調べたところ、銀シースを使用し熱プレスで製造されたテープは、より大きく平板状の穀粒を持ち、c 軸の整列が良好であるが、FeAs や Ba-O によってより多くの粒界の結合性劣化が見られた。一方、Ag-Sn/ステンレス鋼のシースを用いて冷プレスで製造されたテープ線材は、平板状の結晶粒が少なく配向度も弱いが、物理的によく接続されたクリーンな粒界による連続した電流経路が存在することがわかった (Fig. 2)。

参考文献

1. C. Pak, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) p.084010

謝辞

本研究は、米国エネルギー省高エネルギー物理局の助成金番号 DE-SC0018750、国立科学財団 (NSF/DMR-1644779) の下で国立高磁場研究所、およびフロリダ州の助成を受けて実施したものである。また、物質・材料研究機構 (NIMS) の松本博士、熊倉博士、戸叶博士、および中国科学院 (CAS) の黄教授、馬教授との有益な議論と K-122 テープサンプルの提供に感謝するものである。

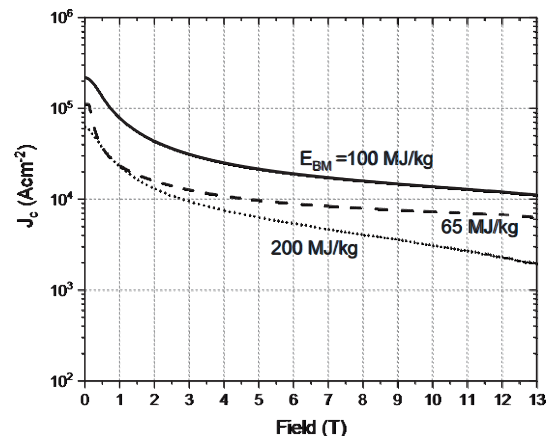


Fig. 1 J_c variation of K-Ba122 polycrystalline bulks caused by E_{BM} during the 1st milling.

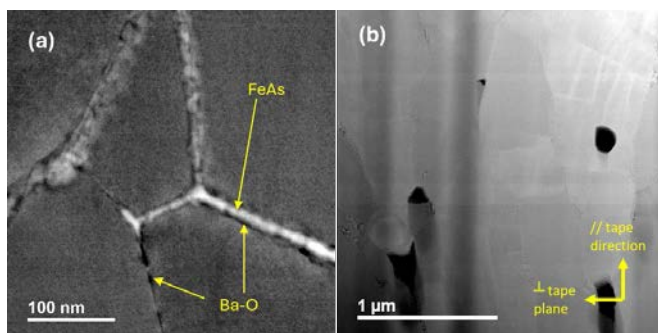


Fig. 2 High-angle annular dark-field scanning transmission electron microscope (HAADF-STEM) images comparing the grain and grain boundary (GB) nanostructures in the two different yet high J_c K-Ba122 tapes. (a) FeAs and Ba-O block the GBs in Hot-pressed Ag-sheathed K-Ba122 tape. (b) Physically well-connected, clean GBs found in Stainless Steel out-sheathed K-Ba122 tape. Both tapes exhibit high J_c of $1.4\text{--}1.5 \times 10^5$ A/cm² at 4.2 K, 10 T.

実用超電導テープ用高強度銅複合材の試作

Prototype of high strength Cu composite for a practical SC tape

長村光造 (応用科研); 大塚尚孝(UACJ)
 OSAMURA Kozo (RIAS); OHTSUKA Naotaka (UACJ))
 E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

実用超電導テープでは脆性な高温超電導フィラメントまたはフィルムを金属マトリックスに縫合した構造となっている。その主な理由と効果は超電導電流が遮断されるとき引張荷重は強化層の付与により無い場合のほぼ4～6倍に改良することが可能なこと、強化層の必要性はさらに熱膨張係数の最適化実現することである。高温での熱処理を行い複合超電導/金属マトリックス/強化各層のヤング率と熱膨張係数の組み合わせにより、超電導層に大きな圧縮の残留歪を発生させることである。このような引張破断荷重を最大化させるために用いられる強化層材料として、従来から高強度材の SUS304, Hastelloy C276等が用いられてきている。

そこで本報告では、実用超電導テープの特性をさらに改良するため、とくに BSCCO テープについて強化層に新たに開発した Brass-WC 高強度銅複合材を適用した時の効果について報告する。

2. 実験方法

本開発の目的のためには Brass にセラミックス WC を分散させることが最適な素材になることが予測されていたが、次のような工夫によりバルク体を作製することができた。

出発材料の brass(7/3)及び WC の粒度を種々変更した結果、brass は10 μm 以下、WC はサブミクロン以下であることが求められた。両素材の比重が異なることから混合粉碎の条件を最適化した。高温での加圧焼結は適切な雰囲気下で450～650 $^{\circ}\text{C}$ 、3～6 ton の条件を試みた。

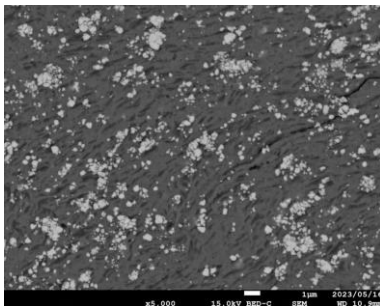


Photo 1 Microstructure of sintered brass-WC composite

SEM により供試料の組織観察を行い、ヤング率、比抵抗、熱膨張係数の諸特性の評価をそれぞれ行った。なお熱膨張測定には歪ゲージを用いた。

3. 実験結果と考察

試料断面組織を写真1に示す。微細な WC 粒子が均質に分布するのが観察され。このように作製条件を最適化することにより、結果的に数十 nm 程度の WC が均質・微細分散する焼結材料を開発することに成功した。

図1に引張試験により得られた、低荷重範囲における応力-歪曲線を示す。この勾配からヤング率126GPa が求められた。これより Brass の110GPa に比べて高い値であることがわかった。

次に電気抵抗測定から比抵抗 $2.9\mu\Omega\text{cm}$ が求められるが、これは WC の分散する材料でありながら、Brass の

5.0 $\mu\Omega\text{cm}$ に比べて低い値となった。

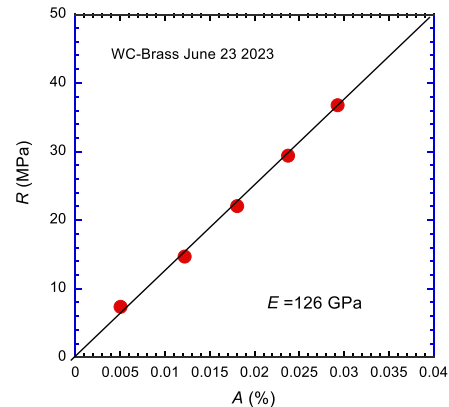


Fig. 1 Stress vs strain curve

図2に室温から約140 $^{\circ}\text{C}$ の間で測定した熱歪を示す。銅、Brass、WC-Brass に対する結果が示されている。熱膨張係数は順に17.6, 19.9, 12.3 $\times 10^{-6}/\text{K}$ であった。Bi2223テープの熱膨張係数は15.4 $\times 10^{-6}/\text{K}$ であり、WC-Brass の値に近く、また WC の体積分率を減らすことにより熱膨張係数をあわせることは可能である。

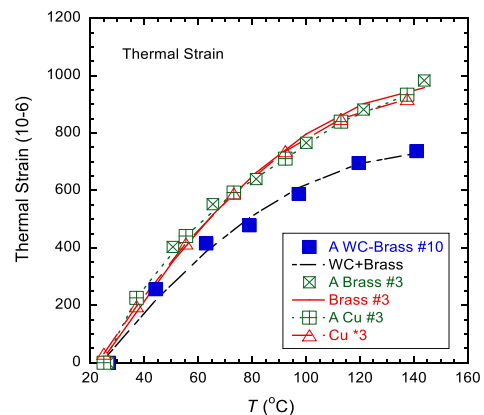


Fig. 2 Temperature dependence of thermal strain

このように複合 BSCCO テープの特性を左右するヤング率、比抵抗、熱膨張係数の値を最適化すること、さらに WC の含有量により特性の設計が可能であることが示された。

本研究の対象は複合高温超電導テープの開発が主目的であり、材料要素としては物性の異なる3系統の材料を複合化し最適な物性を実現させることにある。特に重要な強化材料は粉末混合材料であるため、大幅に連続して特性を変更できるという自由度を得られていることは重要な点である。本研究の主要な対象は BSCCO テープの製造に関する技術要素に焦点を絞って記述してきたが、構造の多少異なる REBCO テープについて全く同様にこの技術を適用することができる。謝辞：組織観察にご協力頂いた町屋修太郎先生に感謝申し上げます。

液体窒素浸漬冷却における T 型特殊フィンによる沸騰伝熱促進

Boiling heat transfer enhancement by T-shaped fin in immersion cooling of liquid nitrogen

松尾 泰朗, 結城 光平, 結城 和久(山東理大)
 MATSUO Fumiaki, YUKI Kohei, YUKI Kazuhisa (SOCU)
 E-mail: fl24619@ed.socu.ac.jp

1. はじめに

極低温機器の配管の予冷や生体細胞の凍結, 超伝導限流器などの超伝導応用機器には液体窒素による急冷が利用される. 先行研究[1][2]では, 超伝導限流器の事故後の超伝導復帰時間の短縮を目的に, 希土類系銅酸化物超伝導体 (REBCO) 線材上にフィンや金属多孔質体を接合することで膜沸騰を抑制することが急冷時の除熱性能の向上に効果的であることを示している. そこで本研究では蒸気膜が発生した際にも冷却液の保持と供給を可能とする T 型特殊フィンを提案し, その冷却性能を評価する.

2. 実験方法

伝熱試験部の構成図を Fig. 1, 実際の試験体の写真を Fig. 2 に示す. 加熱体は幅 4 mm, 厚さ 0.3 mm の SUS304 製の平板であり, 試験体中央 50 mm 間の電圧を測定する. 加熱平板上に厚さ 55 μm のエポキシ系接着剤を塗布し, その上に T 型特殊フィンを接合する. 本実験では T 型フィンの空隙部高さ t をパラメータとし, 0.5, 1.0, 1.5 mm とした. 液体窒素に浸漬した試験体を 45 A の電流により通電加熱した後の試験体の最高温度と冷却時間 (加熱終了後から再度 77 K に冷却されるまでの時間) の関係を取得した. ここで, 試験体の最高温度は通電時間により制御し, 試験体の温度は SUS304 の電気抵抗と温度の関係[3]から計算した. また, リファレンスデータとして T 型フィンとエポキシ系接着剤を利用しない試験体の結果を併せて取得している.

3. 実験結果及び考察

Fig. 3 に各空隙部高さにおける最大温度と冷却時間の関係を示す. フィンを接合することでリファレンスデータと比較し冷却時間が大きく短縮されている. これはフィンによる伝熱面積の拡大効果に加え, 蒸気がフィン空隙部 (Fig. 1 網掛け領域) に侵入しづらいことで冷却液が保持され, 供給可能であったためであると考えられる.

また, 空隙部高さ t により冷却時間は変化し, 最高温度が 430 K 以下では t が 0.5 mm で最も冷却性能が高い. これは Fig. 4(a) に示すように t が大きい場合, 蒸気がフィン空隙部に侵入しやすいのに対し, t が小さくなることで Fig. 4(b) のようにフィン空隙部への蒸気の侵入を抑制し, 冷却液保持量が増加するためであると考えられる. ここでフィンの伝熱面積拡大効果は t が 0.5 mm の場合に最小であることを考えると, T 型フィンの冷却液の保持と供給効果が冷却性能に対しより大きな影響を持つことが示唆された. 一方, 最高温度が 430 K を超えると t が 0.5 mm の場合には急激に冷却時間が増加している. これは, 温度が高くなるに伴い蒸気膜が厚くなり T 型フィンの空隙部が蒸気で満たされ, 冷却液を保持する効果が失われたためであると考えられる.

4. まとめ

本研究では液体窒素浸漬冷却における T 型フィンの冷却性能評価を行った. その結果, T 型フィン空隙部における冷却液の保持・供給効果により伝熱面に膜沸騰が形成される環境での冷却性能が高まり, 冷却時間が短縮されることを確認した.

謝辞

本研究はJSPS科研費JP23K13267の助成を受けたものです.

参考文献

1. K. Yuki, et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 33 (2020) 034002.
2. Y. Shirai, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26 (2016) pp. 1–4.
3. J. W. Ekin, “Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements,” Colorado: Oxford university press (2006) p.589.

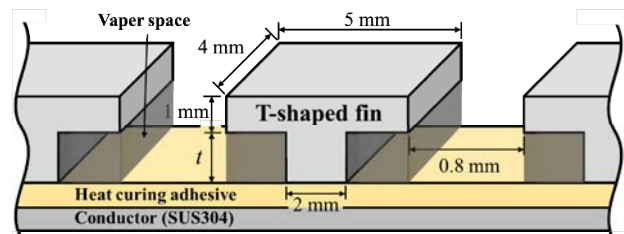


Fig. 1 Configuration diagram of test section.



Fig. 2 Experimental sample.

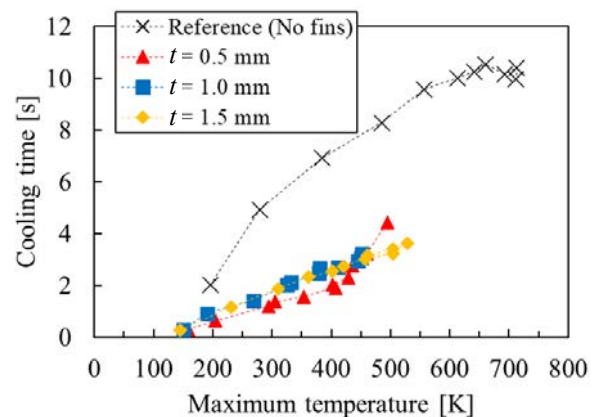
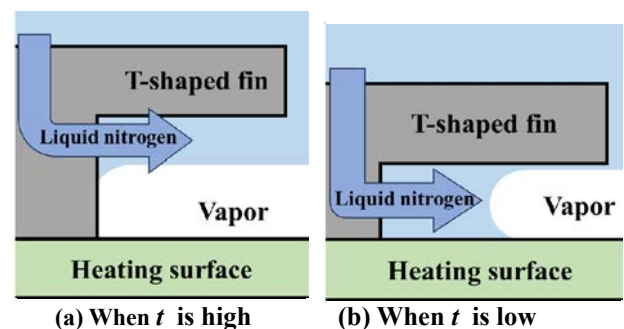


Fig. 3 Relationship between maximum sample temperature and cooling time.



(a) When t is high (b) When t is low

Fig. 4 Schematic of vapor behavior around T-shaped fin.

平行溝を用いた液体窒素中のプール沸騰熱伝達の改善

Pool Boiling Heat Transfer Enhancement in Liquid Nitrogen Using Parallel Grooves

堀 伊吹, 吹場 活佳, 須田 公平(静岡大)
 HORI Ibuki, FUKIBA Katsuyoshi, SUDA Kohei (Shizuoka University)
 E-mail: hori.ibuki.19@shizuoka.ac.jp

1. 序論

液体水素はロケットエンジン用燃料としても使用される極低温流体である。通常常温である配管系に流入する際には急激な沸騰現象が発生する。これを防止するために、ロケット打上げ時には流量を絞った燃料を流すことで配管系を燃料の沸点付近にまで予冷する。しかし、配管予冷には数時間単位の長時間を要し、エンジン燃焼とは別に膨大な燃料を消費する。本研究では液体窒素中の金属板の沸騰熱伝達を促進する方法を提案し、評価した。この方法は、金属板表面に平行溝を施し、その溝に低熱伝導率材料を充填するものである。

2. 実験方法

Fig.1 に表面加工を施した銅板を示す。t6×50×50 mm の銅板表面に深さ 0.4 mm の平行溝を施し、その溝にシリコンシーラント(コニシ株式会社, バスボンド Q) を充填した。銅板には温度測定のために T 型熱電対を挿入し、伝熱面以外の面は厚さ 30 mm のポリスチレンフォームで覆い断熱した。また、冷媒である極低温流体には安全性と利便性の観点から液体窒素を使用した。本実験では、平行溝の間隔および伝熱面積に対する銅の表面積比を変化させた。Fig.1 に示すように、溝間隔(ピッチ)を p 、銅の露出幅を w とし、伝熱面積に対する銅の表面積比を $\phi = w/p$ と定義する。なお、再現性を確認するために各ケース 3 回以上の実験を行い、サンプリング周期 20 ms で温度を収録した。また、一部のケースでは冷却実験中の伝熱面の様子を撮影した。

3. 実験結果

Fig.2 に各供試体温度の時間変化を示す。シリコンシーラントを充填した供試体では無加工に比べて冷却時間が大きく減少し、最大で約 1/4 まで短縮された。また、平行溝のピッチが小さいほど大きな冷却促進効果が得られた。冷却時間が減少した要因は、シリコンシーラントを一定間隔で配置したことにより熱伝達を阻害する蒸気膜の崩壊が促進され、特に冷却初期の膜沸騰領域において熱伝達が活発になったからである。また、冷却促進効果に対するピッチの影響に関して、エポキシ樹脂を用いて核沸騰領域での水中加熱実験を行った Rahman ら[1]は、伝熱面からの気泡の離脱直径とピッチが近い値であるほど熱伝達が促進されたと報告している。

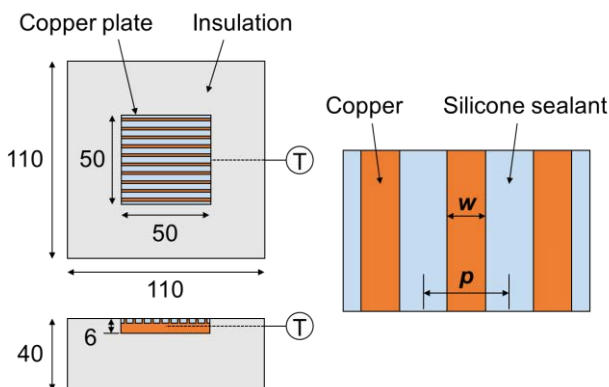


Fig.1 Dimensions of the specimens.

Fig.3 に冷却中の銅板表面の様子を示す。なお、写真は供試体温度が 173 K 付近において撮影したものである。無加工の場合では、伝熱面全体が蒸気膜に覆われており、伝熱面上で膜沸騰が生じていることが分かる。一方で、シリコンシーラントを平行溝に充填した場合には、伝熱面上に蒸気膜は確認されなかった。また、気泡の発生数が顕著に増加しており、上述したように、シリコンシーラントの配置により蒸気膜の崩壊が促進されたことが分かる。以上より、表面の溝にシリコンシーラントを充填した伝熱面は、蒸気膜の崩壊を促進し伝熱面からの気泡離脱を活発化させ、特に膜沸騰領域の熱伝達を大幅に向上させることが分かった。

4. 結論

本研究では金属板の冷却時間短縮を目的として、表面に施した溝にシリコンシーラントを充填した供試体を作製し、液体窒素を用いたプール沸騰冷却実験により冷却性能を評価した。シリコンシーラントの配置により銅板の冷却は最大で 4 倍まで促進され、平行溝のピッチが小さいほど大きな冷却促進効果が得られた。特に、膜沸騰により熱伝達が阻害される冷却初期における熱伝達が大幅に改善された。また、シリコンシーラントを配置した伝熱面では気泡の発生量が著しく増加した。なお、伝熱面積に占める銅の表面積の割合は冷却時間に大きな影響を与えなかった。

参考文献

1. M. Mahamudur Rahman, J. Pollack, M. McCarthy: Increasing boiling heat transfer using low conductivity materials, Sci. Rep. 5, (2015)

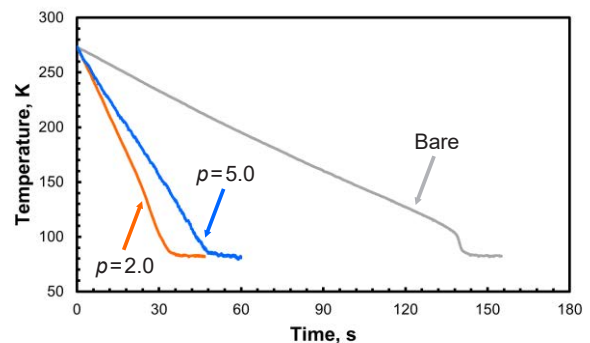


Fig.2 Temperature histories of bare and textured plates.

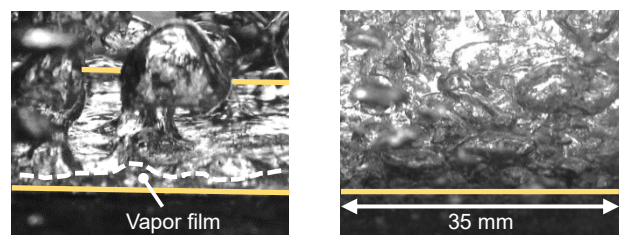


Fig.3 Photographs of a copper plate boiling over. (right) a bare plate. (left) a plate with parallel grooves filled with sealant. Both plates had the same temperature of 173 K.

液体窒素中の水平上向き面における遷移沸騰熱伝達

Transition boiling heat transfer on a horizontal upward-facing surface in liquid nitrogen

高畑 一也 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya (NIFS)

E-mail: takahata.kazuya@nifs.ac.jp

1. はじめに

プール沸騰において、過熱度が小さい領域に現れる核沸騰と過熱度が大きい領域に現れる膜沸騰との間に、核沸騰と膜沸騰が混在する領域が存在することが知られている。この領域を遷移沸騰と呼ぶ。遷移沸騰は、過熱度を増加すると熱流束が減少する不安定な状態であり、定常状態の沸騰熱伝達を測定することが困難である。実際、液体窒素についての遷移沸騰熱伝達の定常データを探したが見つからなかった。

一般に遷移沸騰熱伝達が工学的に重要となることは少ないが、ヒステリシスの有無など未解決の研究課題があること、急冷促進のための伝熱面高性能化において重要となることから、液体窒素中の遷移沸騰熱伝達の測定を試みた。

2. 実験計画

金属球等を液体中に投下する急冷(クエンチ)する実験では、遷移沸騰を含む全温度領域の沸騰曲線が得られる。しかし、あくまでも過渡的なデータであり、冷却速度の影響を受けたり、ヒステリシスが現れたりする。一方、定常(または準定常)的な遷移沸騰領域のデータを得るためには、熱流束ではなく、温度を制御する必要があり、これまでにいくつかの方法が提案されている。Berenson は、銅ブロックの片端で水を凝縮させ、槽内の圧力で温度を制御した[1]。Auracher らは、ヒータを用いて温度コントローラによる温度制御を実験に導入した[2]。一方、Ohtake らは、銅ブロックを大きくすることで温度変化を平滑化し、温度コントローラを用いずに実験を行った[3]。いずれの実験も冷媒は、水またはフロン冷媒である。本研究では、過去の実験を参考に、長さ 100 mm の比較的大きな銅シリンダの片端を上向きの伝熱面とし、もう一方の端部にカートリッジヒータを取り付け、市販の温度コントローラで温度制御する方法を採用した。つまり文献[2]と[3]の折衷である。

3. 実験方法

図 1 に実験装置を示す。20 mm ϕ \times 100 mm の銅シリンダを垂直に置き、上向き面に液体窒素の容器を取り付けた。下端には 50 Ω のカートリッジヒータを差し込んだ。セルノックス温度計を伝熱面から 25 mm、50 mm 下方のシリンダ表面に取り付け、伝熱面の温度をフーリエの法則で求めた。銅シリンダの側面と下面は 70 mm ϕ のスタイロフォームで熱絶縁し、さらにその外周を 0.3 mm 厚の銅板で覆い、その下端を液体窒素に浸漬した。なお、下端を液体窒素に浸漬したのは、過熱度が 100 K 以下のときである。伝熱面以外へのヒートリークは、予め伝熱面をコルク栓で断熱した状態で測定した。

上部の容器に液体窒素を投入し、上部温度計の指示をコントローラで制御した。そして 3 分間、温度変動が 0.1 K 以下を維持した時点を定常状態とした。使用したコントローラは Lake Shore[®] 332 型である。なお、核沸騰領域は最大熱流束がコントローラの最大出力を超えたため、別電源を使用し、温度制御は行わなかった。

4. 実験結果

測定した液体窒素の沸騰曲線を図 2 に示す。Run 1 から 3 は、室温から徐々に設定温度を下げたときの 3 回分のデータである。最小熱流束点を越えてさらに温度を下げて、定常状態を実現することができた。ただし、過熱度 ΔT が 12 K に

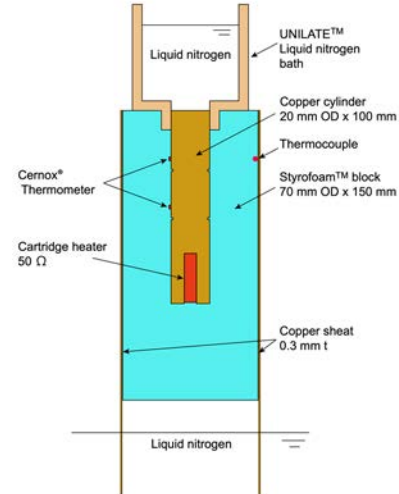


Fig. 1 Experimental setup for measuring boiling heat transfer in liquid nitrogen.

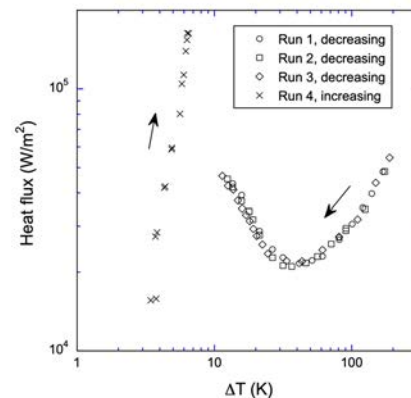


Fig. 2 Steady-state pool boiling heat transfer in liquid nitrogen.

なると制御不能になり、温度減少により核沸騰に遷移した。制御中にヒータ出力が最大(50 W)に達してしまっただけで、負の傾きが急峻になったことが制御不能の原因と考えられる。Run 毎の温度のバラツキは 3 K 程度で、十分な再現性が得られた。これにより、液体窒素中においても温度コントローラを用いることで、遷移沸騰熱伝達が測定できることが分かった。今後は、PID 定数の最適化、温度計位置の変更、伝熱面積の減少などの改良を加え、測定できる温度領域を拡大する計画である。発表では、急冷実験のデータとの比較、伝熱面をフッ素樹脂でコーティングした場合の実験結果についても報告する。

参考文献

1. P.J. Berenson, Int. J. Heat Mass Transfer. 5 (1962) 985-999.
2. H. Auracher and W. Marquardt, Int. J. Heat Fluid Flow 25 (2004) 223-242.
3. H. Ohtake and Y. Koizumi, JSME Int. J., Ser. B 49 (2006) 343-351.

細線周りの He II 沸騰におけるラムダ点ごく近傍の特徴的な振る舞い

Characteristic feature of He II boiling around wire heater at vicinity of lambda point

高田 卓, 濱口 真司(NIFS); 岡村 崇弘(KEK); 木村 誠宏(東大); 村上 正秀(筑波大)
 TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji (NIFS); OKAMURA Takahiro(KEK);
 KIMURA Nobuhiro (U. Tokyo); MURAKAMI Masahide (U. Tsukuba)
 E-mail: takada.suguru@nifs.ac.jp

1. はじめに

筆者らは過去に超流動ヘリウム(He II)中の沸騰現象について微小重力実験を行った。その際にラムダ点近傍では気泡が不安定かつ非常に小さくなるという特異な現象を発見した(Fig.1)[1]。地上実験を含め過去にこうした知見はなかったため、本実験では地上実験においてラムダ点近傍について集中的に特異な沸騰が起きるのかを調査した。

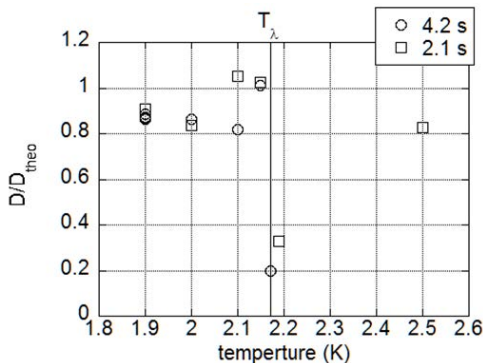


Fig. 1 微小重力落下中の単一気泡の成長における。気体分子運動論に基づいた理論予想との比。λ点近傍のみ予測に反して非常に小さい気泡であることが分かる。通電開始から2.1s, 4.2s後の気泡サイズについてグラフ化してある [1]

2. 実験方法

ガラスデュウに液体ヘリウムを溜め、ロータリーポンプによる排気をバルブ制御することによって飽和 He II 中の沸騰について実験した。マンガニン細線ヒータ(φ 50μm)を水平方向に張ったテストセクションを上下させることで液面からヒータの距離を変更することが出来るようにしており、液頭圧の変化が可能なセットアップとなっている。(模式図 Fig.2)

通常、He II 温度制御はバルブの PID 制御による圧力制御によって実現するが、λ点のごく近傍では比熱異常に起因して圧力制御が困難である。そのため、2.17K程度のHe II 温度に制御した後、バルブ開度を固定し他後に、マンガニン細線ヒータに通電をし、緩やかに圧力が上昇する中で沸騰熱伝達がどのように変化するかを測定した。圧力上昇は5~10分間で10mK 上昇するようなペースである。ヒータのマンガニンには電気抵抗の温度依存性がある為、抵抗からマンガニン細線の平均温度を算出している。

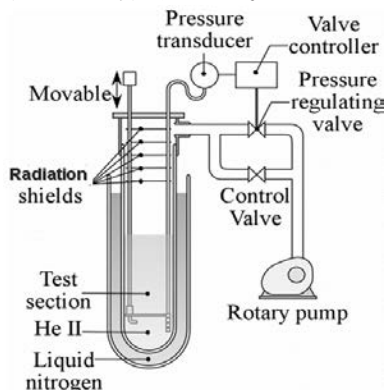


Fig.2 実験セットアップの概念図

3. 実験結果と考察

前述の通り、λ点のごく近傍では温度制御は難しいが、比較的過去の実験例が多い2.15 Kを含むバルブ制御でHe II 温度が±1mK の範囲で制御可能である。そうした2.15~2.17K程度の領域において、He II 温度一定の条件の元沸騰曲線を比較したが、この範囲ではこれまでの知見通りの傾向しか見られず、特異性は見当たらなかった。

一方で、ヒータ電流一定で加熱を続け、バルブ開度を固定すると2.17 K から徐々に飽和温度が変化し中の沸騰熱伝達が測定可能となる。Fig.3 に沸騰中のヒータ温度と飽和温度の関係を示す。なお、λ点のごく近傍において沸騰を起こすと僅かな液頭圧によってヒータにはλ 圧力を超えた圧力がかかっている。そうした状況のため、過去の野澤らの知見通り高い音響ノイズを伴う弱サブクール膜沸騰モード[2]が現れている。ヒータ温度は2こぶの山を持ち、2.175Kあたりで急降下を起こすという傾向が異なる液面高さの実験でも共通して現れた。Fig.3 では見やすさの為2 ケースのみを表示しているが、他の液面高さでも共通してこうしたヒータ温度の履歴をたどる。液面高さの違いによって僅かにサブクール度が異なることを反映してより液面高さが高い184 mmの方が低いヒータ温度であるというような液面高さの影響はみられるものの、ヒータにかかる液頭圧によってこの2こぶのピークや2.175 Kにおける温度の急降下は整理することが出来ず、もっぱらバルク He II 温度の影響によるモノであることが分かる。

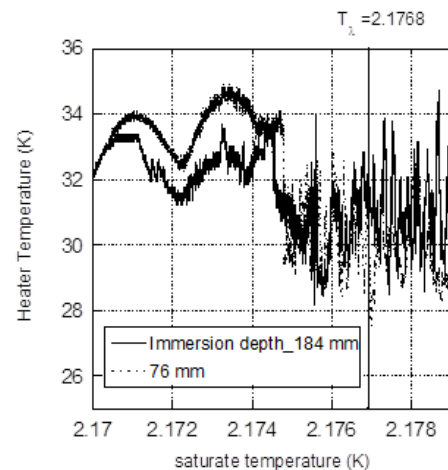


Fig.3 He II 沸騰中のλ点近傍における準定常ヒータ温度変化。ヒータ電流は一定(≒0.168W)。

4. まとめ

λ点近傍においてHe II 沸騰は地上重力下においても奇妙な振る舞いを見せるが、その範囲は非常に狭いことが分かった。現在の所、何故このような現象が起こるのかについての考察は出来ておらず、実験を継続している。

謝辞

本研究は科研費20K04930の支援を受けて遂行された。

参考文献

1. S. Takada, N. Kimura, S. Pietrowicz, K. Grunt, M. Murakami, T. Okamura, Cryogenics 89 (2018) pp.157-162
2. M. Nozawa, N. Kimura, M. Murakami, S. Takada, Cryogenics 49, Pages 583-588 (2009)

細管で生じる圧力損失の測定と相関式の適用性

Measurement of pressure drop in capillary and applicability of existing correlations

島崎 毅, 中川久司(産総研)

SHIMAZAKI Takeshi, NAKAGAWA Hisashi (AIST)

E-mail: t.shimazaki@aist.go.jp

1. はじめに

我々は小型 JT 冷凍機に関する研究を行っている。JT 冷凍機などのガス循環系の運転特性の向上を検討する中で、熱交換器など細管を利用した機器で生じる圧力損失を見積もりたい場合がある。一見単純な現象であるが、流れの状態や細管をコイル状に巻いた場合など、条件に応じた種々の相関式が提案されている。本研究では、螺旋コイル状に巻いた、内径が概ね 1 mm 以下の細管に注目して圧力損失を測定し、機器製作の観点から既存の相関式の適用性について調べた。

2. 管内流の圧力損失

円管内の十分に発達した流れでの圧力損失 ΔP は、一般的にダルシー・ワイズバッハの式から、下記で与えられる[1]。

$$\Delta P = \frac{f_D L \rho V^2}{2D} \quad (1)$$

ここで、 L は管の長さ、 D は管の内径、 ρ は流体の密度、 V は管内平均流速、 f_D は管摩擦係数である。内面の滑らかな円形断面である直管内の層流(ハーゲン・ポアズイユ流れ)では、 $f_D = 64/Re$ と解析的に求まる(Re :レイノルズ数)。一方、流れが層流から乱流に遷移した場合や、流路が曲がっている場合などは、 f_D を解析的に求めることが難しくなる[1]。例えば、螺旋コイル状に巻かれた流路では、遠心力により流路内に二次流れが生じ、圧力損失が直管に比して増大することが知られている。そして、複数の研究グループから、実験や数値計算に基づいた複数の相関式が提案されている[2]。 Re などの無次元数を指標として、値の範囲で相関式の適用条件を提示している場合も多い。しかし、相関式が導出された条件と、実際に相関式を適用したい流れや流路の状態が適用範囲に収まるのか迷うこともある。特に管内径が小さな場合、それらの指標で評価しきれない内面や形状の影響も考え得る。そこで、流路試料を作成して圧力損失を実測し、相関式による計算値との比較を試みた。

3. 流路試料の作成と測定

Fig. 1 に、流路試料を示す。公称内径 0.1mm~0.7 mm の 4 種類のスチレンス 304 製細管、長さ 2 m を、直径 8.3 mm の螺旋コイル状に巻いた。コイル巻き部両端に長さ 100 mm の直管部を設け、それぞれ先端に 1/4 インチ配管用継手を銀ろう付けし、圧力損失測定系との接続に備えた。試料ガスとして、室温の窒素、ヘリウム、そして液体窒素で 77 K に冷却したヘリウムを流し、生じる圧力損失を測定した。

4. 測定結果と考察

Fig. 2 に測定結果の一例を示す。横軸は Re を示す。縦軸は、4 種類の相関式による圧力損失の計算値から実測値を引いて、その差を実測値に対する百分率で示した。相関式として、上述のハーゲン・ポアズイユ流れの式に加えて、曲がり管の効果を考慮した Manlapaz and Churchill の式、Schmidt の式、Ghobadi の式を使用した[2-3]。小型の JT 冷凍機の動作領域に近い、 Re が比較的低い領域で圧力損失を測定した。曲がり管の効果を考慮した 3 式の方が、 Re の増大に伴う実測値からの乖離の変化は小さい。また、管内径が変わると、傾向は保たれるが、乖離の大きさが式によって変化した。以上の

結果を考慮し、Manlapaz and Churchill の式、Schmidt の式を圧力損失の見積りに使用している。

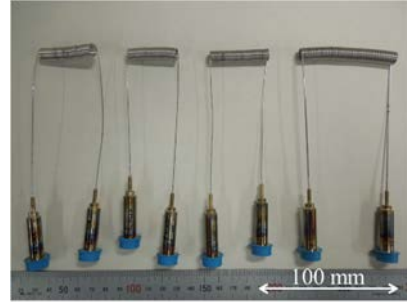


Fig.1 Samples of helically coiled capillary for pressure drop measurements. Both ends of capillaries are joined with pipe fittings by silver brazing. Inner diameters of the capillaries are 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.7 mm from left to right, respectively.

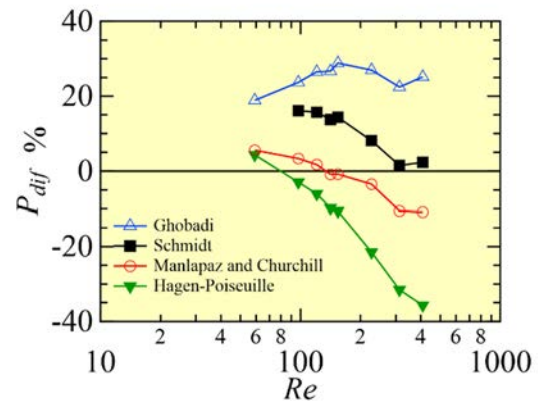


Fig.2 Differences of calculated pressure drops from measured values. Pressure drops are measured for capillary of 0.3 mm in inner diameter with helium at 77 K. Calculated pressure drops are obtained by Hagen-Poiseuille flow model, correlations proposed by Manlapaz and Churchill, Schmidt, and Ghobadi.

$$\Delta P_{dif} = ((\Delta P_{cal} - \Delta P_{mea}) / \Delta P_{mea}) \times 100,$$

where ΔP_{cal} : calculated pressure drop, ΔP_{mea} : measured pressure drop.

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費20K04319、24K07368の助成を受けたものです。

参考文献

1. JSME テキストシリーズ 流体力学、日本機械学会 (2005)
2. Ali, S., Fluid Dyn. Res., 28 (2001), p. 295-310
3. Schmidt, E. F., Chem. Eng. Technol., 39 (1967), p. 781-789
4. M. Ghobadi, et al., Exp. Therm Fluid Sci., 57 (2014), p. 57-64

熱電対を用いた簡易液面計と熱侵入量見積

Simple level meter using a thermocouple and heat leak estimation

神田 昌枝, 石川 未祈, 山口 作太郎 (中部大学)

KANDA Masae, ISHIKAWA Miki, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

超伝導機器は低温保持用の断熱容器の性能が基本的な性能を決めるので、低い熱侵入量を達成するための各種低温工学に関連する基礎研究を行っている。その際、市販の静電式液面計を使用している。同軸構造の電極中に液体窒素(LN₂)が液面の高さまで入る市販の静電式液面計は、液体窒素と窒素ガスの誘電率が異なることを利用して液面長を求めている。このため、異なる機器に取り付ける度に液面校正が必要になる。また、金属電極を用いるため、熱侵入量も小さくないと考えている。本研究では、設置位置変更時の液面校正が不要、熱侵入量が小さい安価な簡易液面計の試作を行った。そして、市販のステンレス・クライオスタットに試作した簡易液面計を設置し、クライオスタットの熱侵入量をガス流量計で測定し、液面の位置と比較した。

2. 簡易液面計の試作と実験方法

簡易液面計は、熱収縮率と熱伝導率が低い竹ひご(φ3 mm)に先端から5 mmの位置にT型熱電対(TC(T))を温度精度の比較のために1本、5 mm間隔でK型熱電対(TC(K))を5本取り付けられた構成である。各熱電対の素線はφ0.1 mmである。尚、TC(T)は銅とコンスタンタンの組合せのため、銅による熱侵入量が大きく、実機ではTC(K)のみの利用を想定している。

図1にステンレス製のクライオスタットにバッフル板を設置し、ガス流量計を取り付けた模式図を示す。クライオスタットにLN₂を0.15 kg入れ、3層のバッフル板(φ63 mm)を設置して密閉し、熱侵入により液面が下がっていく状況を液面計とガス流量計で測定した。なお、低温保持用の断熱容器は通常、密閉容器で使われることが多いので、それを模擬する為に本実験でもクライオスタットに発泡スチロールの蓋を取り付けて、実験を行った。

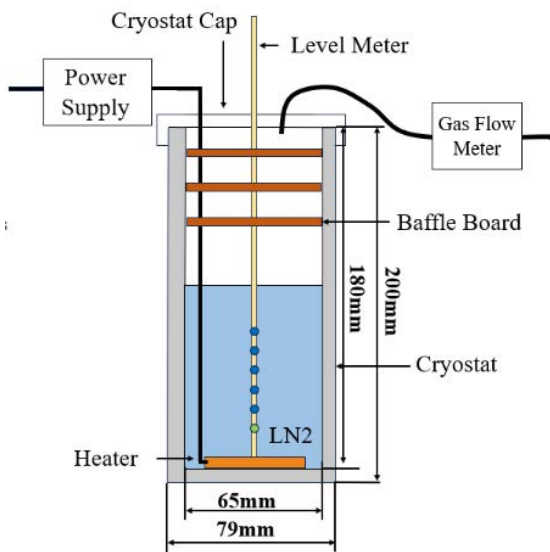


Fig. 1 Experimental setup for measuring the level and heat leak with Baffle Board

液体窒素中に熱電対があると、測定温度は液体窒素温度になるが、液体窒素の液面から熱電対が出ると短時間で温度が上昇する。これは液体と気体の熱伝達率の大きな差と熱電対常温度側からの熱侵入によって生じる現象である。つまり、温度上昇時が熱電対を取り付けた位置を通過する時間に対応する。

3. 実験結果と考察

各熱電対の温度を図2に示す。熱電対付近のLN₂が蒸発すると温度の上昇が見られる。この上昇から液面位置を確認した。バッフル板を設置することにより、LN₂温度からの立ち上がり位置(=時間、矢印で表示)がより明確に分かるようになった。熱電対は竹ひごに直接、取り付けられているので、液面位置は特に校正する必要なく利用できる。

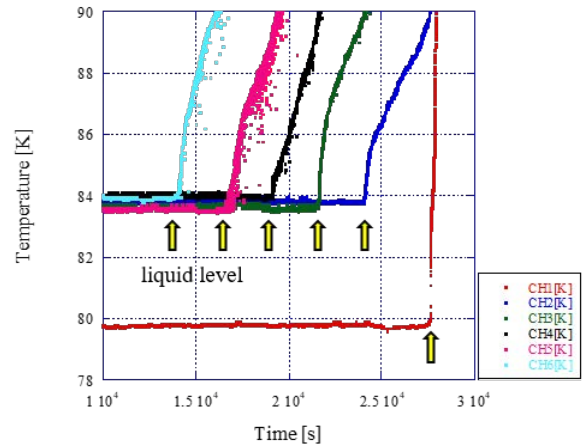


Fig. 2 Rising position from LN₂ temperature

4. まとめ

本研究では、設置位置変更時の液面校正が不要、熱侵入量が小さい、安価な簡易液面計の試作を行った。実験結果は、試作した簡易小型液面計は十分に計測可能であることが分かった。また、バッフル板を併せて設置することにより、さらに精度良く測定できることが分かった。

以上の結果より、実験室での小規模実験に利用できると考えている。これは熱侵入量が静電式液面計に比べて1/1000ほど低くなったので、液体窒素の利用量が少ない小型実験でもこれを組み込んで大きな影響を与えないからである。特に試作液面計は熱電対を使うため、実験室で多用する通常の高端子デジタル計測器が使える。

今後の課題は、実時間でデータ収集を行い、液面出力信号を実時間で出力する機器の試作がある。

参考文献

- 石川 他: 簡易液面計とガス流量計による各種断熱容器の熱侵入量, 令和五年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 (2023) A3-5

低い超電導転移温度を持つ MgB₂ 線材を用いた 液体水素用外部加熱型液面センサーの性能評価

Performance evaluation of external-heating-type liquid hydrogen level sensor
using MgB₂ wire with low superconducting transition temperature

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(東京農工大); 松本 明善(NIMS)
FUKUMOTO Shoichi, TAKADA Yoshihiro (Yamamoto Electric Works); TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.);
KUMAKURA Hiroaki (TUAT); MATSUMOTO 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。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 MgB₂(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]。液面計測に対するガス温度の影響をなくするために非超電導線材を追加して性能評価を行った結果、誤差の低減が認められた[2]。さらなる精度向上のために、より液体水素温度に近づけて低い T_c を持つ MgB₂ 線材を開発して、これを用いた液面センサーを試作、評価した。

2. 低い T_c を持つ MgB₂ 線材の試作

これまで様々な条件で MgB₂ 線材を試作したが、すべて T_c は 36 K を超える結果となった[1]。そこで、本研究では材料粉末の粒径に着目して線材を試作した。作製方法は Powder-in-tube 法である。使用したホウ素粉末はアモルファスホウ素が 4 種類(粒径 0.7、1、10 μm 、-325 mesh)と結晶性ホウ素が 1 種類(40 μm)である。これまでと同様に C を添加するために SiC を加えて混合した粉末を、Cu-Ni 合金(7:3)のパイプに詰めて 1 mm 角まで伸線した。熱処理は 600 $^{\circ}\text{C}$ 、1 時間行った。作製した線材から 20 mm のショートサンプルを切り出し、超電導特性試験を行った。試験結果を Fig. 1 に示す。ホウ素粉末の粒径が大きいほど線材の T_c が下がることが示唆された[3]。

3. MgB₂ 液面センサーの試作と評価

上記の結果より、最も低い T_c を持つ E 線材と同じ条件で直径 0.3 mm の MgB₂ 線材を作製した。また、同じく直径 0.3 mm の非超電導線材も作製して、液面センサーを試作した。センサー長は 500 mm、ヒーター線としてマンガン線を 2 mm 間隔で両線材に巻き付けた。この試作液面センサーを神戸大学の光学クライオスタットに挿入して評価した。光学クライオスタットは耐圧力 0.4 MPaG で、液面を目視で確認できる観測用窓が設置されている。液面センサーを設置して、液面を計測しながら内圧を大気圧から 0.4 MPaG まで上下させた。ヒーター入力値は 6 W、9 W、12 W で行った。目視で確認した液面高さと同様に液面センサーの計測結果を Fig. 2、3 に示す。内圧の上昇に伴って誤差が大きくなったが、ヒーター入力値を上げることで、誤差は減少した。また、前回発表した T_c が高い線材を用いた結果と比較すると、同じヒーター入力値では誤差が小さくなったことが確認された。詳細は当日発表する。

4. まとめと今後の課題

MgB₂ 線材の T_c を下げることで液面センサーの誤差を小さくすることに成功した。これはヒーター入力値を減少できることも示唆する。一般的に液体水素タンクの常用圧力は大気圧から 1 MPaG であるため、今後はより高圧下での液面センサーの誤差を確認する必要がある。

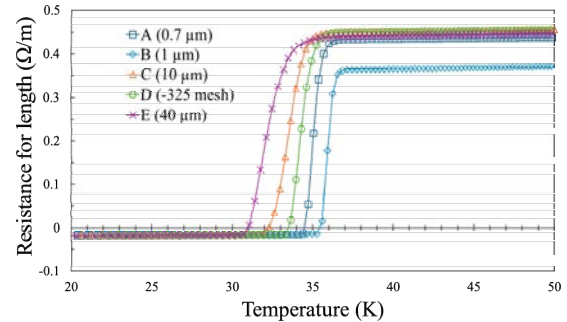


Fig.1 Temperature dependence of electric resistance for unit length of MgB₂ wires.

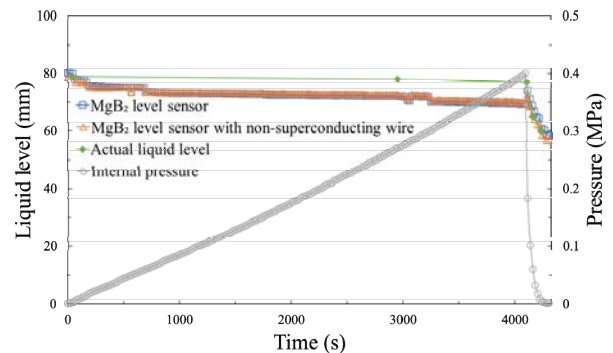


Fig.2 Actual liquid level by visual observation and measurement result of MgB₂ liquid level sensor with/without non-superconducting wire at a heater input of 6 W.

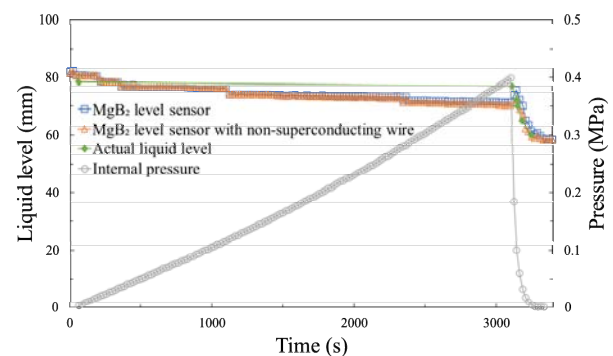


Fig.3 Actual liquid level by visual observation and measurement result of MgB₂ liquid level sensor with/without non-superconducting wire at a heater input of 12 W.

参考文献

1. S. Fukumoto, *et al.*: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 57, No. 1(2022) p.39
2. S. Fukumoto, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, Vol.105 (2023) p.43
3. T. Oshima, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, Vol.106 (2023) p.88

液体窒素温度におけるフェライトおよびダストコアの磁気測定

Measurement of magnetic properties of ferrite and dust cores at liquid nitrogen temperature

井上 良太, 白石 智也, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大)

INOUE Ryota, SHIRAISHI Tomoya, 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, 100 kW 級の大容量非接触給電システムの開発が求められている。そこで本研究では, 地上側に高温超電導コイルを用いた大容量非接触給電システムを提案している。本提案システムにおいて, 高エネルギー密度で大電力伝送するためには, コイル背面に軟磁性材料を設置する必要がある。特に, 地上側超電導コイルでは, 軟磁性材料を含めて冷却することも考えられるため, 低温下において高透磁率かつ高飽和磁束密度の低損失な軟磁性材料が必要である。その一方で, 低温下での軟磁性材料の磁気特性評価は, 十分に検討されていないのが現状である[1]。そのため, 提案する大容量非接触給電システムに適した軟磁性材料が不明確であった。そこで, 本発表では, 一般的な非接触給電システムのバックヨークに用いられるフェライトおよびダストコアの環状試料に着目し, 液体窒素温度下における磁気特性評価を行った。

2. 実験条件

Table.1に, フェライトおよびダストコアの環状試料の諸元を示す。環状試料には, N_b ターンの探りコイル(Bコイル)を直巻きし, その上から, N_c ターンの励磁コイルを巻き付けた。ここで, 最大磁束密度 B_m に対する鉄損 W および比透磁率 μ_r の測定では, 高磁場領域における磁気特性を評価するために, Bコイルの電圧波形制御(Bコイルの電圧波形が正弦波となるように励磁電流波形を制御)を行った。また, 周波数 f に対する鉄損 W は, 高周波領域において測定精度の高い電力計を用いて, 励磁電流値およびBコイルの電圧値から測定した。なお, 電力計を用いる場合には, Bコイルの電圧波形が正弦波となる低磁場領域で測定した(Bコイルの電圧波形制御は行わない)。また, 最大磁束密度 B_m は, Bコイルの平均値整流実効値(平均値応答型の電圧値)から測定した。なお, 励磁用電源は, 試料の直流偏磁を防ぐためにACカップリングとした。

3. 結果および考察

Fig.1およびFig.2に, 常温(RT)下および液体窒素温度(77 K)下におけるフェライトおよびダストコアの磁気特性の比較結果を示す。ここで, Fig.1(a)およびFig.2(a)は, フェライトおよびダストコアの最大磁束密度 B_m に対する鉄損 W を示し, Fig.1(b)およびFig.2(b)は, フェライトおよびダストコアの最大磁束密度 B_m に対する比透磁率 μ_r を示す。Fig.1より, 77 K下におけるフェライトコアの飽和磁束密度は常温時に比べて増加した。その一方で, 77 K下におけるフェライトコアの鉄損 W は, 0.3 T付近で常温時の約6倍に増加した。また, 77 K下におけるフェライトコアの比透磁率 μ_r は, 0.3 T付近において常温時の約2分の1以下に減少した。また, Fig.2より, 77 K下におけるダストコアの鉄損 W は, 0.25 T付近で常温時の約3倍に増加することがわかった。一方, 77 K下におけるダストコアの比透磁率 μ_r は, 常温時に比べて減少するものの, その減少率は僅かであることが明らかになった。

Fig.3に, ダストコアにおける1サイクルあたりの鉄損 W/f の周波数依存性を示す。Fig.3より, 約5 kHz以下の鉄損 W/f は, 77 K下および常温下に関わらず, 周波数に対して概ね一定となった。これは, 低周波領域において, 渦電流損に比べてヒステリシス損が支配的であるためと考えられる。また, 約5 kHz

以上の鉄損 W/f は, 僅かに増加した。これは, 周波数の増加と共に, 77 K下および常温下に関わらず, ダストコア内の渦電流損が増加したためと考えられる。以上より, ダストコアにおける低温下の鉄損の増加は, 渦電流損に比べてヒステリシス損が支配的であることがわかった。なお, 温度変化によるヒステリシス損の増加原因については, 今後十分に検討する必要がある。

Table.1 Specifications of the ferrite and dust cores

Material	Ferrite core	Dust core
	Mn-Zn	Fe-Si-Al (Sendust)
Outer diameter (mm)	51	33
Inner diameter (mm)	31	20
Height (mm)	13	11
Density (kg/ m ³)	4800	6100
Number of turns of magnetizing coil N_c	60	40
Number of turns of B coil N_b	30	30

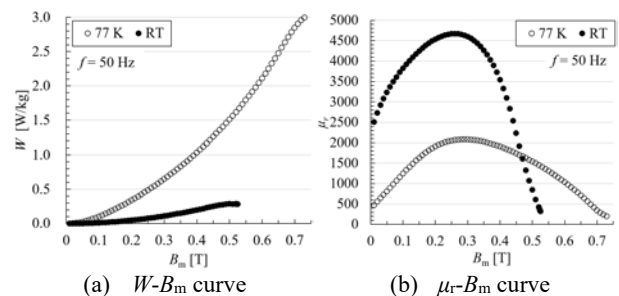


Fig.1 Magnetic properties of the ferrite core at RT and 77 K.

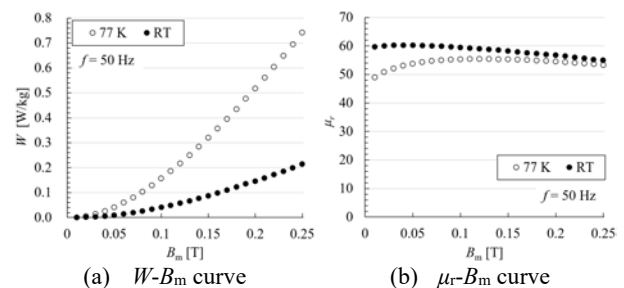


Fig.2 Magnetic properties of the dust core at RT and 77 K.

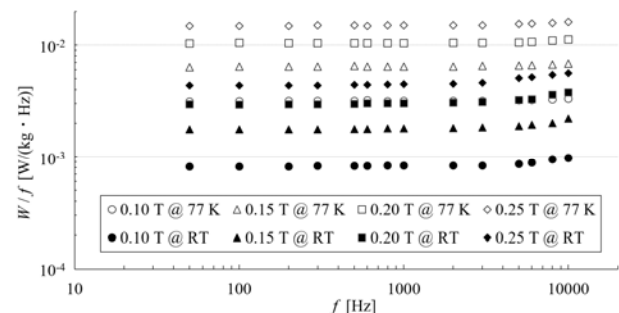


Fig.3 Experimental result of iron loss in the dust core as functions of frequency at RT and 77 K.

参考文献

- O. Daizaburo, et al., The papers of Technical meeting on magnetic, IEE Japan, MAG-08-78, (2008) pp. 7-12

新型アナログ差分回路を用いた歪ゲージの高感度測定

High sensitivity measurement of strain gauge by a new analog-difference circuit

神田 昌枝, 山本 実奈, 山口 作太郎 (中部大学)

KANDA Masae, YAMAMOTO Mina, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

新型アナログ差分回路を用いた高感度・高精度の歪ゲージ計測の研究・開発¹⁾を行って来ている。これはブリッジ回路の代わりに、可変定電圧電源を用いたアナログ差分回路を使う。これによって、従来の測定より4倍大きな感度を得られること²⁾、測定環境と温度差がある時の測定では、歪ゲージ測定が精度良く行える³⁾。本研究では、同じアナログ差分回路で電流を10 mAから30 mAに上げて、測定感度を従来の12倍にした結果を報告する。

2. アナログ差分回路と用いた歪ゲージの種類

図1に共和電業から市販されている4つの歪ゲージを示す。どれも120 Ωの内部抵抗である。市販の定電流電源には出力電流をスイッチで簡単に変更できて、1 mA, 3 mA, 10 mA, 30 mAのように電流を選択できる。したがって、規格である10 mAではなくて、30 mAを流せば、同じ歪に対して発生する電圧は3倍になる。そして、新アナログ差分回路の感度が従来のブリッジ回路に比べて4倍の感度のため、電流が3倍になると、最終的には12倍になる。

一方、歪ゲージは被測定対象に比べてサイズが小さいが、図1のように歪ゲージは種類によってサイズはかなり異なる。このため、同じ電流に対して小さい歪ゲージの発熱密度は大きく、サイズの大きな歪ゲージでは低い。図1の歪ゲージA, Dの比較では、発熱部面積は91倍ほど異なり、3倍大きな電流を流しても、Dの発熱密度はAの発熱密度の1/9ほどになり、歪ゲージの電流が流れる金属箔が発熱によって温度上昇につながり、歪ゲージ計測結果に影響はほぼないと考えられる。尚、歪ゲージの被計測物は歪ゲージより遙かに大きい質量があるため、被計測物温度には全く影響を与えないと思われる。これが歪ゲージ電流を大きくして感度を上げることを狙う基本的な理由である。

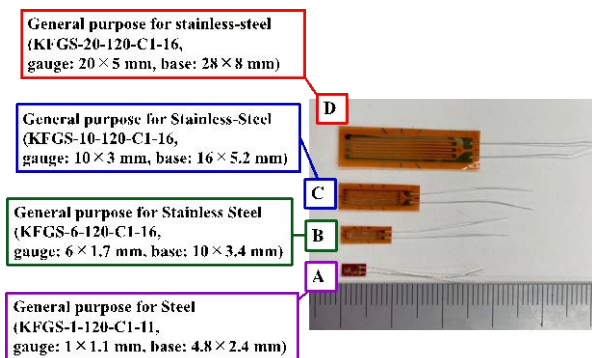


Fig. 1 Four strain gauges for the test

3. 歪ゲージの測定結果と温度測定

図2にブリッジ回路に10 mA流したとき、新回路に10 mA, 30 mAを流したときの歪ゲージBの出力電圧を示している。横軸は被測定物に印加した重量であり、縦軸は歪ゲージの出力電圧である。尚、アナログ差分回路で重量がゼロの時の出力電圧でゼロ設定をそれぞれ行っている。新アナログ差分回路で10 mA流すと、従来のブリッジ回路に比べて4倍の出力電圧、そして30 mA流したときは、12倍になっていることが実証された。尚、被測定物は1 tの銅板である。

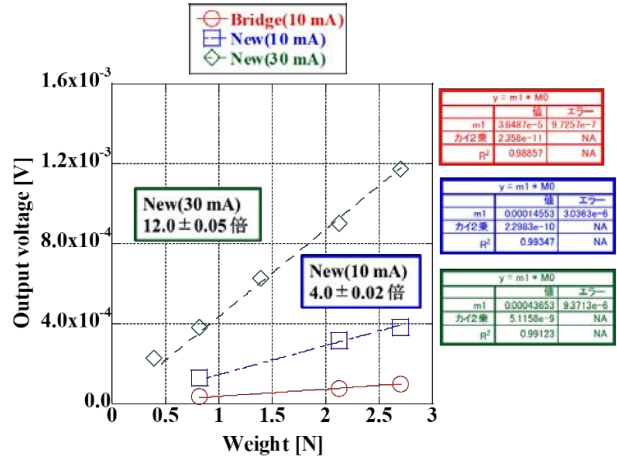


Fig. 2 Four strain gauges for the test

表1に歪ゲージに電流を流したときの歪ゲージと銅板温度を熱電対(TC)で測定し、その温度差を示す。歪ゲージA, Bでは30 mA流すと、銅板と歪ゲージの温度差はそれぞれ5.7 K, 1.25 Kほどになるが、それ以外の条件ではTCの計測精度以下の温度上昇になった。

Table 1 Temperature differences between strain gauges and copper plate

current [mA]	1	10	30
A	≦ 0.25	≦ 0.65	? 5.7
B	≦ 0.25	≦ 0.50	? 1.25
C	≦ 0.125	≦ 0.25	≦ 0.50
D	≦ 0.125	≦ 0.125	≦ 0.25

4. まとめ

以上の結果から、歪ゲージAに10 mAを流した時の発熱密度で歪ゲージDに電流を流すと、電流は95 mAまで上げることができるため、感度はブリッジ回路で10 mA流した時の測定に対して38倍まで感度が高くなると推測される。この感度は箔ひずみゲージのゲージ・ファクタ(GF)が2.0に対して、市販の半導体歪ゲージのGFが120ほどであるため、感度比は60倍であり、半導体歪ゲージ的な感度となることを意味する。そして、もし半導体歪ゲージにも同様な手法が利用可能であれば、従来の測定に比べて240倍~2000倍以上の感度を有する歪ゲージ測定が可能になる。このため、引き続き開発を進めている。

参考文献

- 特願 2022-052746 (特許査定2023年3月16日)
- M. Kanda et al., "High-sensitivity measurements of various materials at low temperature using strain gauges," 2C-a02, Cryogenics and Superconductivity Society of Japan Conference, Vol. 105(2023), 2C-a02.
- 山本 他: 温度差がある時の歪ゲージの高感度・高精度測定, 令和五年度 電気学会全国大会(2024) 1-041.

NMR マグネット向け冷媒蒸発抑制装置(2) Cryogen Reclamation System for NMR Magnets (2)

永濱 秀明, 福山 和宏, 谷 直俊, 横山 彰一, 伊藤 聡(JASTEC);
松本 拓也(神戸製鋼所); 濱津 順平(日本電子)

Hideaki Nagahama, Kazuhiro Fukuyama, Naotoshi Tani, Shoichi Yokoyama, Satoshi Ito (JASTEC);
Takuya Matsumoto (Kobe Steel, Ltd.); Jumpei Hamatsu (JEOL)
E-mail: nagahama.hideaki-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]。2023年度から販売を開始した製品機は既に10台以上を納品している。

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 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。振動の低減(制振)と伝達の抑制(防振)のための架台構造と移送管にフレキシブルホースを用いている。GM 冷凍機の往復運動周期の約 1Hz の機械振動を NMR 測定に支障がないレベルにしている。

貯液槽内を正圧に維持するための制御系を有する。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。

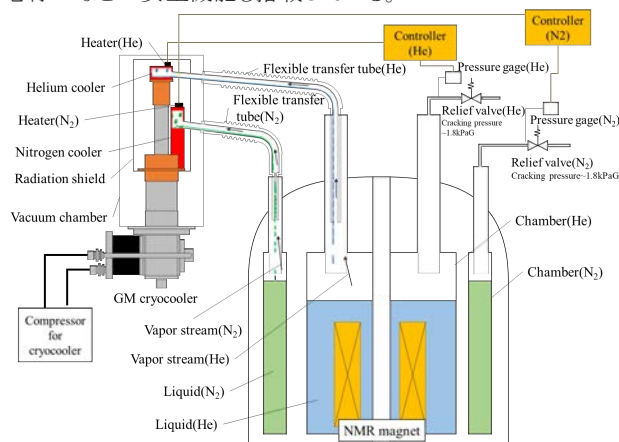


Fig.1 Cryogen Reclamation System.

3. 性能試験

本装置の性能を評価するためにテストクライオを作成した。NMRマグネットのクライオを利用し、各貯液槽にヒータを設置した。装置の仕様値を満たすようにテストクライオ内ヒータを加熱することで蒸発量を調整し、装置の冷却室に取り付けたヒータの余力を測定し性能を評価した。蒸発量ゼロにおけるヘリウム槽熱負荷0.38W(蒸発量180cc/h以上)、窒素槽熱負荷

17.6W(蒸発量360cc/h以上)に調整したテストクライオに本装置を取り付けて運転した製品直近10台の各冷凍機の2ndステージと1stステージのヒータ量(冷凍余力)をFig.3、4にそれぞれ示す。2ndのヒータ量の平均は0.96Wであり、1stのヒータ量の平均は62.4Wである。各装置のヒータ量のバラツキは小さく、冷凍機の能力による差であると考えられる。

Cryogen reclamation system



Fig.2 Photo of the Cryogen Reclamation System attached to an NMR magnet.

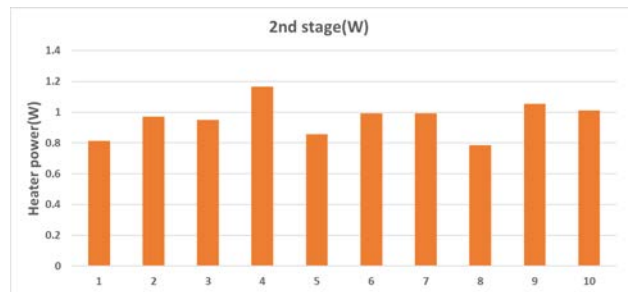


Fig.3 Test results of heat power on second stage of each product

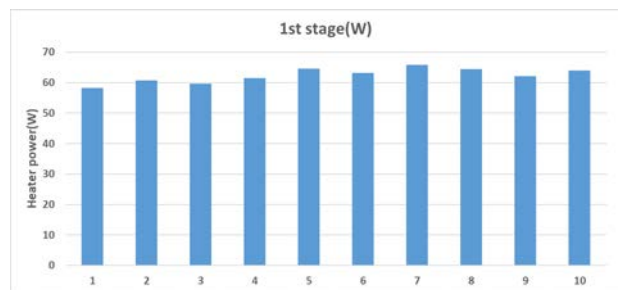


Fig.4 Test results of heat power on first stage of each product

参考文献

1. S. YOSHIDA: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 56, No. 3 (2021) p.135-141
2. T. Matsumoto, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.105(2023) p33

固体・液体水素のレーザー実験への応用

Application of solid and liquid hydrogen for laser experiments

岩本 晃史(核融合研); 韋 添允, 田邊 大貴, 石本 崇, MIRFAYZI S. Reza 余語 寛文(阪大レーザー研);
竹下 昌利, 寺坂 竜海(鈴木商館)

IWAMOTO Akifumi (NIFS); WEI Tianyun, TANABE Daiki, ISHIMOTO Takashi, MIRFAYZI S. Reza,
YOGO Akifumi (ILE Osaka Univ.); TAKESHITA Masatoshi, TERASAKA Tatsumi (Suzukishokan)
E-mail: iwamoto.akifumi@nifs.ac.jp

1. はじめに

高出力レーザーを用いた高エネルギー密度科学の分野では、レーザー駆動粒子加速やレーザー核融合などの物理研究のために固体・液体水素をターゲットとする実験がいくつか提案され、その一部はすでに実施されている。阪大レーザー研におけるレーザー実験に使用する固体・液体水素の応用例: 中性子モデレータ、陽子加速用ターゲット、核融合実験用ターゲット、について紹介する。

2. 高出力レーザー

阪大レーザー研では 2 つの高出力レーザーを使用して実験が行われている。激光 XII 号は 10 kJ 級のナノ秒レーザーで球対称に配置された 12 本のレーザービームを使った実験が可能である。LFEX は kJ 級のピコ秒レーザーでピークパワーは 2 PW を超える。

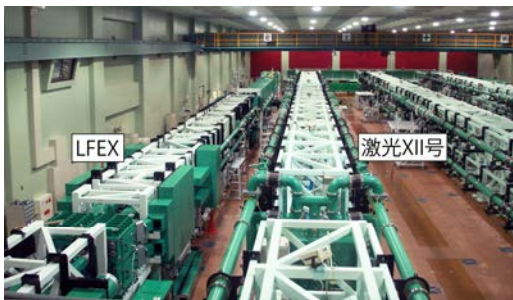


Fig.1 Gekko XII and LFEX.

3. 中性子モデレータ

LFEX のレーザー光をピッチャーとなる重水素化ポリスチレン薄膜などに照射し陽子や重陽子を発生・加速、キャッチャーとなる Be などに照射すると中性子が発生するピッチャーキャッチャー法[1]を使用してレーザー駆動中性子源の開発が進められている。冷中性子 (25 meV 以下) をイメージング応用などに利用することを目的として固体水素モデレータの開発を行った。モデレータは固体水素空間 20 mm x 32 mm x 50 mm を持つ銅製である。レーザー光路調整時にはモデレータ部をレーザー照射軸線上から上方に待避させることができる (Fig.2)。冷却には 4.2 K 1.5 W 小型 GM 冷凍機(住友重機械工業製)を使用した。最低到達温度は約 12 K で固体水素の形成が可能な温度に達成している。実験ではモデレータ部に液体水素を溜め、その後温度を下げ固化させる過程を採用した。固体水素モデレータを使った実験を行い冷中性子の観測に成功した[2]。

4. 純粋陽子・重陽子加速用固体水素・重水素薄膜ターゲット

高出力レーザーを固体水素・重水素薄膜に照射すると純粋な陽子・重陽子が加速される。これまでの加速実験では 100 MeV 程度の陽子加速実証にとどまっている。そこで、LFEX を使い 200 MeV を超えるエネルギーを目指して研究が進められている。レーザー加速実験に理想的な固体水素又は重水素の膜厚は数 μm ~ 数 $10 \mu\text{m}$ で、それを実験に供給すべく装置を製作した(今回の実験では重水素を使用した)。

レーザー照射用のターゲット真空容器は 1.33×10^{-3} Pa の真空中に保たれており、その真空中で固体重水素薄膜を直接形成することはできない。そこでインジウムシール構造の小室内に冷却された数 $10 \mu\text{m}$ 厚の銅板オリフィスを配置し、そのオリフィスに重水素ガスを吹き付け、ガスから直接固体薄膜を生成した。固体重水素薄膜が形成された後、小室からターゲット真空容器中へ露出し、固体重水素薄膜部がレーザー照射点上になるように調整後、レーザーを照射した。固体重水素薄膜をターゲット真空容器内に露出後、レーザー照射まで数分間必要であるが、その間、固体重水素薄膜を維持することができた。この実験により純粋重陽子の加速に成功している[3]。

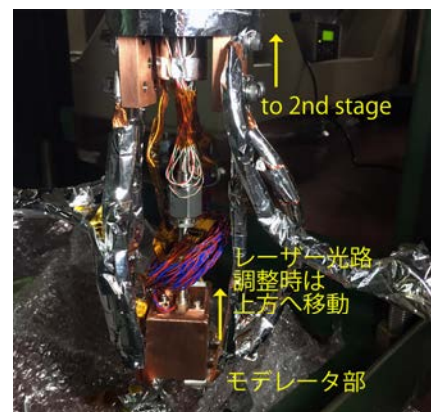


Fig.2 Solid hydrogen moderator.



Fig.3 Thin film solid D₂ target.

5. 高速点火レーザー核融合実験用液体水素ターゲット

激光XII号とLFEXを使用するレーザー核融合実験を計画している。直径200 μm プラスチックシェル内に液体水素を充填する中実球ターゲットを実験に供給する装置開発を行っている。

謝辞: 本研究は阪大レーザー研共同研究 2022B2-042, 2023B2-010, 2023B2-051, JSPS 科研費 22H00118 の支援の下実施された。

参考文献

1. A. Yogo, et al., Phys. Rev. X 13 (2023), 011011.
2. S. R. Mirfayzi, et al., Sci. Rep. 10 (2020), 20157.
3. T. Wei, et al., to be published in Jpn. J. Appl. Phys. (2024).

超伝導体内部に侵入した水素のトンネル拡散による特性変化

Quantum tunneling of hydrogen atoms in superconductor

芳賀 雄仁, 太子周, 小池 健生, 志賀 雅亘, 河江 達也(九大工); 橋爪 健一(九大総理工); 稲垣 祐次(岡山理科大)
 HAGA Yuto, TAI Zizhou, KOIKE Takeru, SHIGA Masanobu, KAWAE Tatsuya(Kyushu Inst. of Tech.);
 HASHIZUME Ken-ichi, INAGAKI Yuji
 E-mail: t.kawae.122@m.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

ヘリウムガスの入手が困難になり、液体ヘリウムの代替寒剤として液体水素を利用した超伝導磁石の冷却が検討されている。水素は質量が最も小さいためヘリウムと並んで強い量子性を示す。例えば金属内に侵入した水素は、離散的エネルギー準位の形成やトンネル拡散などの量子的振る舞いを示すことが常伝導状態では確認されている。一方、母金属が超伝導転移するとフェルミ面に超伝導ギャップが出現するため、水素が周囲の電子系より受ける相互作用は大きく低減する [1,2]。これにより超伝導体中の水素が示す量子的振る舞いも、常伝導状態から大きく変化すると予想される。例えばトンネル拡散については常伝導状態に比べ指数関数的に増大すると理論的には指摘されている[1,2]。しかし、超伝導転移した金属内の水素の量子的振る舞いについての実験的研究はほとんどない。そこで、我々はこれを明らかにするため、超伝導ジョセフソン接合に水素を吸着あるいは吸蔵させ、そのジョセフソン電流の変化より水素の量子的振る舞いを調べてきた。その結果、ジョセフソン電流は水素の存在で大きく変化することがわかり、これは水素の量子性に起因すると考えられる[3,4]。

そこで本研究では理論で指摘されるように、超伝導転移により金属内水素のトンネル拡散が劇的に増大するのか明らかにすることを目的に、下記に説明する振動ワイヤ法(VW法)を用いて水素吸蔵超伝導金属の機械的特性の変化を調べた[5]。本講演ではその結果について報告する。

2. 実験方法および実験装置

まず本実験で利用した VW 法について説明する。図 1 に示すように試料ワイヤを磁場 H 中に置く。ワイヤに流す交流電流の周波数とワイヤの固有振動数が一致した時、共振が発生して誘導起電力が極大となる。つまり、交流電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ワイヤの共振を観測できる。ワイヤ内で水素がトンネル拡散する場合、周囲の格子や電子系と相互作用することにより内部摩擦が発生するため、摩擦係数 γ は大きくなると予想される。したがって常伝導状態から超伝導状態に転移することで、理論的に指摘されるように水素トンネルが増大すればワイヤ内の γ 値は大きくなるはずなので、共振の線幅は広がると予想される。そこで水素の有無による共振曲線の変化を追跡する。

試料は線径 0.05mm の Nb ワイヤ(超伝導転移温度 $T_c \sim 9.2\text{K}$)および高温で水素吸蔵させた $\text{NbH}_{0.02}$ ワイヤを用いた。磁場は試料ワイヤ上部にネオジウム磁石を設置して発生させている。信号検出は、発振器で発生した交流電流を振動ワイヤに送り込み、ワイヤ両端で発生した電圧をロックインアンプで読み込むという方法で行っている。

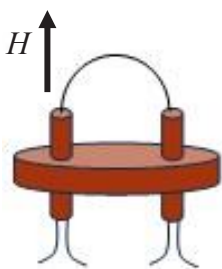


図 1 : VW 装置模式図

3. 実験結果

図 2 に代表的温度における VW 測定信号を示す。超伝導転移温度より高温側($T=9.5\text{K}$)では両試料ともにシャープな共振信号を示すが、両試料の共振周波数には大きな差があるが、これは水素が吸蔵されるとヤング率が変化することにより起きたと考えられる。超伝導転移すると、ワイヤ試料内への磁束の侵入により信号が急激に抑制されるとともに共振の線幅が広がる。これは試料内に侵入した磁束量子(渦糸)が液体のように運動するため、これが内部摩擦となったために発生したと考えられる。さらに低温まで冷却すると信号は再びシャープになって行く。これは渦糸が液体状態からガラス状態に転移し、渦糸運動が抑制されることに起因すると考えられる。つまり信号線幅の温度変化は超伝導体の磁場中相図より理解できる。

次に超伝導転移後の両試料における線幅の広がり进行比较する。常伝導領域の信号に対する超伝導転移後の信号は、各温度域ともに $\text{NbH}_{0.02}$ の方が Pure Nb と比較して線幅の広がりがわずかに大きい。これは $\text{NbH}_{0.02}$ の方が Pure Nb より内部摩擦が大きいことを示している。つまり水素トンネル拡散のために線幅が広がったことを示唆している。講演では以上について詳しく報告する。

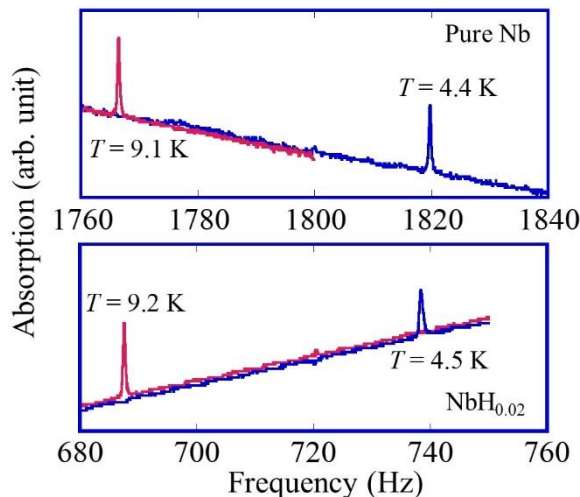


図 2 : Pure Nb, $\text{PdH}_{0.02}$ の VW 吸収曲線

参考文献

- [1] M. Matsumoto and Y. Ohashi, J. Phys. Soc. Jpn. **62**, 2088 (1993).
- [2] Y. Ohashi and M. Matsumoto, J. Phys. Soc. Jpn. **62**, 3532 (1993).
- [3] K. Miyakawa *et al.*, Appl. Phys. Exp. **15**, 013002 (2022).
- [4] Md. S. Islam, *et al.*, ACS Nano, **16**, 14149 (2022).
- [5] Y. Inagaki *et al.*, Appl. Phys. Exp. **8**, 095502 (2015).
- [6] R. Konig *et al.*, Phys. Rev. B **51**, 11424 (1995).

静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討(2) Pre-study on Excitation System for Static Magnetic Refrigerator (2)

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

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

1. はじめに

液体水素の長期間の貯蔵を果たすため、20K 付近の温度域を高効率に冷却する技術が期待されている。この候補に、超電導コイルを用いた磁気冷凍技術がある[1]。この内、静止型磁気冷凍は、磁気冷凍において必要な、磁性材料への磁場変化(励・消磁)の繰返しが、超電導コイルの電流変化の繰返しによるものである[2]。前講演では、静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討として、超電導コイルの電流変化の繰返しが、常温域コンデンサと組合せた電流共振によって得られること、及び共振回路における交流抵抗を確認した[3]。本講演では、超電導コイルを電源と接続せず、交流抵抗などに伴う損失の補填を誘導によることとして検討した。

2. 誘導回路

誘導回路の構成を図 1 に示す。前講演の共振回路(共振周波数 16Hz)の内、超電導コイル(インダクタンス 4mH)と常温域コンデンサ(容量 25mF)が繋がれた部分を 2 次側とした。また、同じ仕様で別の超電導コイルを電源と繋いで 1 次側とした(別の仕様のコイルでもよいが、検討を容易にするため)。

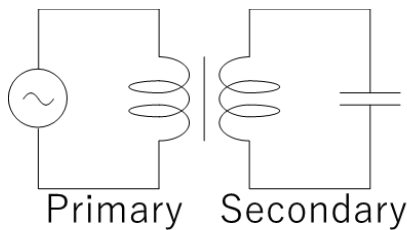


Fig.1 Composition of induction circuit

3. 解析による予測

図 1 の誘導回路において、電磁気的な結合係数がコイル中心間距離に応じて変化するので、電磁界解析ソフト ELF/MAGIC を使って計算した(図 2)。また、図 2 の抜粋の 3 点について、1 次電源電圧 1V とした場合の 2 次平衡電流を計算した(表 1)。なお、電圧と電流が初期状態から過渡状態を経て平衡状態へ遷移する様子を確認するため、この計算には非接触給電[4]のシミュレーターを用いた。これより、2 次平衡電流を大きくするのに最適な結合係数すなわちコイル中心間距離の存在することが予測できた。

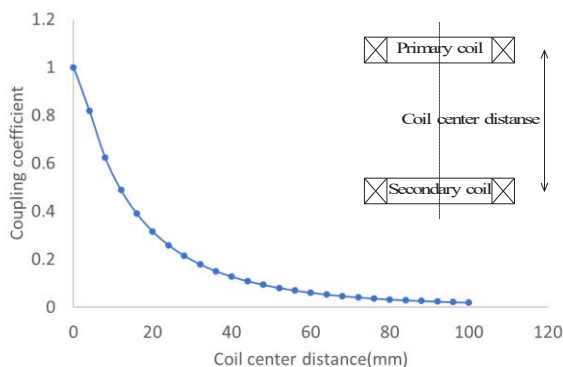


Fig.2 Coupling coefficient depending on coil center distance

Table 1 Coupling coefficient and balanced secondary current depending on coil center distance(excited primary voltage 1V)

Coil center distance(mm)	Coupling coefficient	Balanced secondary current(A)
12	0.5	5
46	0.1	8
100	0.018	2

4. 実験による確認

表 1 に準じてコイル中心間距離を 17.0mm・46.5mm・99.0mm とし、前講演と同様の液体窒素による浸漬冷却方式で実験すると、2 次平衡電流が 1 次電源電圧に応じて図 3 のように変化した。図 3 における近似曲線から、1 次電源電圧 1V とした場合の 2 次平衡電流を導出した(表 2)。表 1 と比べて小さめながら、2 次平衡電流を大きくするのに最適なコイル中心間距離の存在することが確認できた。

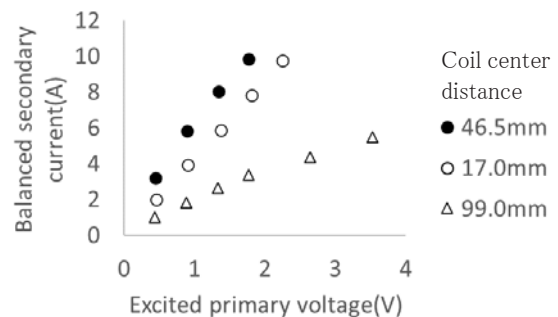


Fig.3 Balanced secondary current depending on excited primary voltage

Table 2 Balanced secondary current depending on coil center distance(excited primary voltage 1V)

Coil center distance (mm)	Balanced secondary current (A)
17.0	4.3
46.5	6.2
99.0	2.0

5. おわりに

前講演に引き続いて静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの基本動作を確認することができた。今後は、交流抵抗などに伴う損失の補填を誘導のような間接的なものによることとしてだけでなく、常温域コンデンサへの電源の接続のような直接的なものによることとしても検討する。

参考文献

1. K. Kamiya, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 58 No. 2 (2023) 63-68
2. N. Hirano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 No. 6 (2022) 0500105
3. K. Waki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.48
4. K. Ukita, et al.: IEEJ Trans. IA, Vol. 137 No. 6 (2017) 518-525

共用イナータンスチューブ多段パルス管冷凍機

Shared inertance tube multi-stage pulse tube refrigerator

朱 紹偉(同濟大学)

ZHU Shaowei (Tongji University)

E-mail: sw_zhu@163.com

1. INTRODUCTION

In general, the lower the expansion power of the pulse tube is, the less effective the phase shifting ability of the inertance tube is, resulting in reduced refrigeration efficiency. For achieving low refrigeration temperatures, a higher phase shifting ability is essential. Therefore, complex phase shifters, such as cold inertance tube, moving piston and displacer are used in multi-stage pulse tube refrigerator. Shared inertance tube multi-stage pulse tube refrigerator driven by a step piston compressor has the advantage of getting higher efficiency with a simple structure, which is discussed theoretically.

2. STRUCTURE

In Figure 1, the step piston generates two compression spaces. Each compression space connects one stage, all pulse tubes connect one inertance tube. The function of the step piston is to distribute input power to each stage, and to re-distribute the phase shifting ability to each stage with the help of a phase adjusting buffer. An inertance tube which is shared by all pulse tubes can generate higher phase shifting ability and the lower temperature stage can get phase shifting ability ratio more than its expansion power ratio, so that it could get higher efficiency.

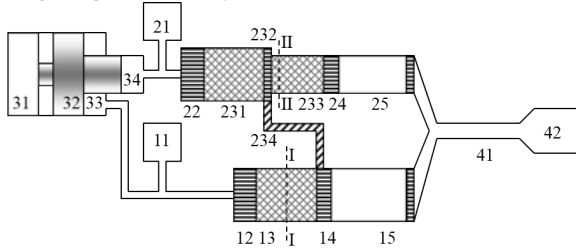


Figure 1 Shared inertance tube pulse tube refrigerator

11.first phase adjusting buffer 12.first after cooler 13.first regenerator 14.first cold heat exchanger 15.first pulse tube
21.second phase adjusting buffer 22.second after cooler
231.second regenerator hot part 232.second regenerator pre-cooling heat exchanger 233.second regenerator cold part 234.heat bridge
24.second cold heat exchanger 25.second pulse tube 31.linear motor 32.step piston 33.first cylinder 34.second cylinder
41.shared inertance tube 42.buffer

3. POWER DISTRIBUTION

Assume it is isothermal and no pressure drops from the compressor to the cold gas at the cold end of the pulse tubes.

The piston step ratio is equal to the swept volume ratio.

$$\alpha = \frac{d^2}{D^2 - d^2} = \frac{0.5\pi x_0 d^2}{0.5\pi x_0 (D^2 - d^2)} = \frac{V_{C20}}{V_{C10}} \quad (1)$$

α is the piston step ratio, D is step piston first diameter, d is the step piston second diameter, x_0 is the step piston amplitude, V_{C10} is the first swept volume, V_{C20} is the second swept volume.

Power ratio of each stage is expressed as

$$W_2/W_1 = \frac{1}{\tau} \oint P dV_{C2} / \frac{1}{\tau} \oint P dV_{C1} = \alpha \quad (2)$$

W_1 is the output power of first stage, W_2 is the output power for second stage, P is the pressure, τ is the period.

4. PHASE SHIFTING ABILITY RE-DISTRIBUTION

Mass flow rate ratio :

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \alpha \quad (3)$$

\dot{m}_1 and \dot{m}_2 are mass flow rates of the first and second cylinder, respectively.

By mass conservation

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{1-1} + \frac{d}{dt} \left(\frac{PV_{B1}}{RT_{B1}} + \frac{PV_{HEX1}}{RT_{HEX1}} + \frac{PV_{R1H}}{RT_{R1H}} \right) \quad (4)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{2-2} + \frac{d}{dt} \left(\frac{PV_{B2}}{RT_{B2}} + \frac{PV_{HEX2}}{RT_{HEX2}} + \frac{PV_{R2H}}{RT_{R2H}} \right) \quad (5)$$

\dot{m}_{1-1} and \dot{m}_{2-2} are the mass flow rates at dot line I-I and II-II where mass flow rate and pressure are in phase, respectively. t is time. R is gas constant. V_{B1} and V_{B2} are the volume of the first and second phase adjusting buffers, respectively. V_{HEX1} and V_{HEX2} are the volume of the first and second after cooler, respectively. V_{R1H} and V_{R2H} are the volume of part of the regenerators at the left of dot line I-I and II-II, respectively. T_{B1} and T_{B2} are the temperature of the first and second phase adjusting buffer, respectively. T_{HEX1} and T_{HEX2} are the temperature of the first and second after cooler, respectively. T_{R1H} and T_{R2H} are the average temperature of part of the regenerators at the left of the dot line I-I and II-II, respectively.

Put Equation (4) and (5) to Equation (3), and re-arrange the terms in phase with pressure and in 90 degrees with pressure, then

$$\frac{V_{B2}}{T_{B2}} + \frac{V_{HX2}}{T_{HX2}} + \frac{V_{R2H}}{T_{R2H}} = \alpha \left(\frac{V_{B1}}{T_{B1}} + \frac{V_{HX1}}{T_{HX1}} + \frac{V_{R1H}}{T_{R1H}} \right) \quad (6)$$

The buffer, inertance tube, and the total volume from dot line I-I and II-II to the hot ends of the pulse tubes form an imagined Helmholtz resonator. So the total volume from dot line I-I and II-II to the hot ends of the pulse tubes is almost constant, then

$$V_{R2C} + V_{R1C} = C1 \quad (7)$$

$$V_{R2H} + V_{R1H} = C \quad (8)$$

V_{R1C} and V_{R2C} are the volume of the part of regenerators at the right of dot line I-I and II-II, respectively.

$$\frac{V_{B2}}{T_{B2}} + \frac{V_{HX2}}{T_{HX2}} + \frac{V_{R2H}}{T_{R2H}} + \frac{\alpha V_{R2H}}{T_{R1H}} = \alpha \left(\frac{V_{B1}}{T_{B1}} + \frac{V_{HX1}}{T_{HX1}} + \frac{C}{T_{R1H}} \right) \quad (9)$$

The dot line II-II is moved to the left, and the dot line I-I is moved to the right when the volume of the second phase adjusting buffer is increased or the first phase adjusting buffer volume is decreased. It means that phase shifting ability can be re-distributed to optimum for low temperature cold head.

5. CONCLUSION

The piston step ratio controls power output of each cylinder, and re-distribute phase shifting ability with the help of a phase adjusting buffer, so that the low temperature cold head can get optimum phase shifting ability for higher refrigeration efficiency.

REFERENCE

1. Shaowei ZHU. Multi-stage pulse tube refrigerator, Chinese patent 2016104936077.

超電導回転機におけるセルフポンピング効果の検討

Self-Pumping Effect in Superconducting Rotating Machine

星野 勉, 井上 勇希, 竹内 亮郎, 齊藤 剛 (明星大)

HOSHINO Tsutomu, INOUE Yuki, TAKEUCHI, SAITO Takeshi (Meisei Univ.)

E-mail: thoshino@ee.meisei-u.ac.jp

1. はじめに SuperGM プロジェクトで LHe 冷媒についてセルフポンピング効果があることが、実証されている。超電導回転機において、伝導冷却のほかに種々の冷媒による浸漬冷却も提案されている。簡易回転子モデルを用いて、He, H₂, Ne, N₂ について、セルフポンピング効果が得られるかを検討したので、その概要を報告する。

2. 解析モデルと解析法 セルフポンピング効果を検証するための簡易回転子モデルを Fig. 1 に示す。回転子外形を破線で示す。回転子モデルには位置番号 0~9 が振ってある。冷媒は位置番号 0 から回転子に入って、位置番号 9 から回転子外に排出される。冷媒は軸中心から注入され、位置 1 から 2 で冷媒は外周部に向かい、位置 2 で回転子貯槽に入る。回転子貯槽には、冷却対象である超電導界磁コイルがある。界磁コイル等の発熱 Q_0 を受けて、冷媒は気化する。位置 3 は回転子貯槽内の気液境界である。気化した冷媒は、位置 4 のパイプで回転子貯槽から位置 5 に向かって流出し、位置 6~7 の熱交換器に入り、極低温部への熱侵入を防ぐよう熱交換し、出口温度が室温となるよう、必要に応じて加温されるものとする。冷媒は回転シールを介して位置 9 から排出される。

解析を簡単にするため、熱交換部を除いて、冷媒への外部からの熱侵入は無視する。また、冷媒流による圧力損失も無視する。さらに、熱負荷 Q_0 は冷媒の潜熱のみで吸収することとする。ここで、冷媒の各部回転半径を r_i ($i = 0, \dots, 9$)、回転角周波数を ω 、熱交換器での吸熱を Q 、冷媒の質量流量を \dot{m} とする。各部の状態量 (温度 T_i , 圧力 P_i , 比エントロピー S_i , 比エンタルピー H_i) に関する関係式は前報で示した [1]。

本論では、冷媒流路は十分大きく、冷媒流慮の圧力損失を無視できるとした。出口の温度 T_9 , 圧力 P_9 を決め、順次位置 7 の状態量まで与えられる。入り口圧力 P_0 を決めれば、位置 6 の状態量が得られる。位置 6 と 7 の圧力が同じとなる入口圧力 P_1 を繰返し計算して求めた。

3. 計算例 前報 [1] で回転数の低い風力発電用回転機では、セルフポンピング効果が期待できないことを示した。本稿では、航空機用回転機 (回転数 5000 rpm, 回転子半径 60 mm) を対象とし [2], Fig. 1 に示す回転子モデルの各位置の回転半径を Table1 に示すように仮定した。出口温度 300 K, 出口圧力 1.1 ata として、各冷媒について、入口圧力を求めた。Ne では、各位置における温度と圧力は Fig. 2 に示すようになる。入口圧力は明らかに負圧になっており、セルフポンピング効果が期待できることが明らかとなった。一方、H₂ は入口の比エンタルピーが大きく、回転によるエンタルピー変化が相対的に小さくなるため、顕著な減圧は見られなかった。

Fig. 3 に分子量と出入口圧力差の関係を示す。混合冷媒の検討が待たれるところである。減圧とエントロピーの関係なども検討できる。

4. むすび 窒素温度以下の冷媒について、セルフポンピング効果を計算した。熱伝導や冷媒流圧力損失を無視した概算であり、冷媒により、減圧効果が期待できないものがあることが明らかとなった。今後、他所で行われている実験結果の顕彰を行い

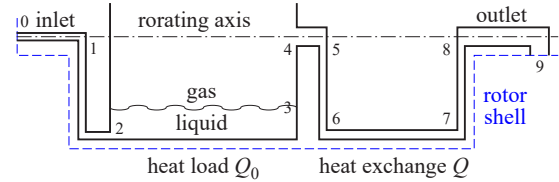


Fig.1 Rotor Model

Table1 Rotation radius of each part of model rotor

r_0	2 mm	r_1	2 mm	r_2	55 mm	r_3	40 mm
r_4	5 mm	r_5	5 mm	r_6	55 mm	r_7	55 mm
r_8	5 mm	r_9	10 mm				

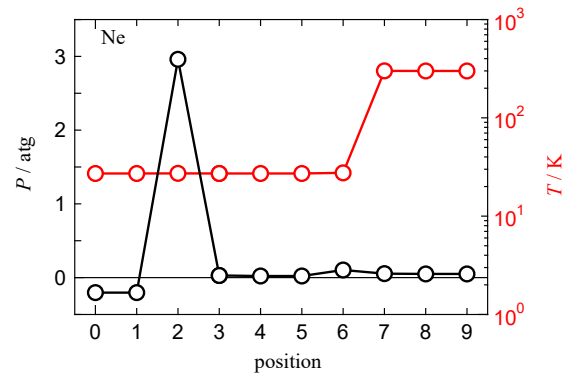


Fig.2 Profiles of temperature T and pressure P (Ne refrigerant)

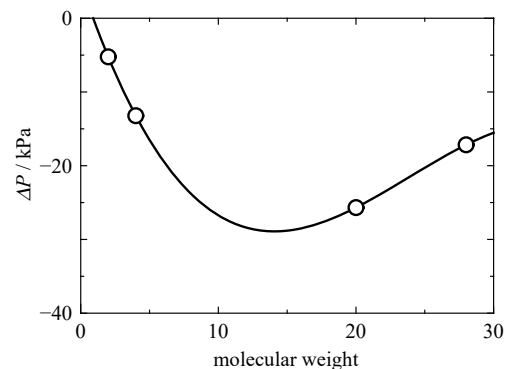


Fig.3 Relationship between refrigerant molecular weight and reduced pressure

たい。

参考文献

1. T. Hoshino.: "Self pumping effect on hydrogen or neon cooled rotating machine", Abstracts of CSJ Conference, Vol. 104, No. 1A-p04 (2022) p. 13
2. Y. Terao, et al.: "Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Electric Aircraft Propulsion", IEEE Trans. ASC, Vol. 28 (2018) 5208005

深層学習を用いた REBCO パンケーキコイルのクエンチ予測に関する検討

Investigation of quench prediction using deep learning for REBCO pancake coils

間藤 昂允, 中井 優介, 野口 聡(北大)

MATO Takanobu, NAKAI Yusuke, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

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

1. はじめに

超電導マグネットを保護するためには、クエンチの予兆を速やかに検知することが有効な手段である。しかし、一般的に、高温超電導(HTS: high temperature superconducting)マグネットのクエンチ予測は困難である。HTS 線材の高い比熱および遅い熱伝導率に起因して常電導領域が速やかに広がらず、常電導領域の電圧検知が遅れるためである。様々な技術開発がなされてきており、誘導成分を打ち消す共巻き法やバランス電圧法、音響信号や光ファイバーを利用する方法など多種多様な検出手法が開発された。それらの中でバランス電圧法は最もよく使われている手法であるが、閾値電圧を決める必要性や装置がやや複雑化する欠点も少なからずある。新たなクエンチ検出手法を開発する必要性は依然として存在する。

そこで、本研究では、深層学習によりコイル電圧の予測器を構築し、クエンチ検出に対する有効性を検証する。今回は深層学習の一つである畳み込みニューラルネットワーク(CNN: convolutional neural network)を採用する。部分要素等価回路(PEEC: partial element equivalent circuit)法によってターン間絶縁 REBCO (rare-earth barium copper oxide)パンケーキコイルをシミュレーションし、得られたコイル電圧を予測器に学習させる。テスト用データの 5 秒間の電圧波形を入力し、さらに先 5 秒間の電圧を予測する。

2. 学習データ(コイル電圧)の収集

径方向分割 PEEC により電圧波形をシミュレーションする。解析対象は表 1 に示すターン間絶縁 REBCO パンケーキコイルであり、熱を投入することで擬似的に常電導転移が模倣される。投入箇所はコイル中央付近の 2 ターンであり、投入熱量は 4.0-4.5 W の範囲内とした。実際に得られた波形の例(5 波形)を図 1 に示す。t = 5 秒から加熱を開始し、12 秒以降に常電導転移を開始(コイル電圧が基準電圧に到達)する。今回は熱の投入量と投入箇所の組み合わせを変更し、1970 波形を学習用、499 波形をテスト用データとして収集した。学習には入力 5 秒、出力 5 秒からなる波形を 1 データとして、10 ミリ秒ずつずらすことにより約 10 万データを作成し学習させた。

3. CNN による学習器の構築とテスト結果

図 2 に今回使用する CNN の構成を示す。10 ミリ秒おきにサンプリングされた波形が入力されると、3 層の畳み込み層によって 16×16 の潜在空間に圧縮される。最後に全結合層を経て 500 サンプルデータ(5 秒)を出力する構成となっている。今回、学習の安定化を目的として各層に dropout 処理を導入している。また、本予測器のパラメータ総数は 140708 である。

本予測器の性能をテスト用データにより検証する。まず、テスト用データからクエンチする場合としない場合の波形を 2 つ選択する。5-10 秒を予測器に入力して、正しい波形を予測できるかテストする。結果を図 3 に示す。クエンチする場合としない

場合の両者とも精度よく予測できている。特に、クエンチする場合に電圧の立ち上がり時刻がよく再現できており、4.3 秒ほど事前にクエンチを察知することができた。入力波形を見ると、クエンチする場合としない場合の時刻 10 秒時点における電圧差自体は小さい。しかし、畳み込みの過程で電圧値だけでなく、その時間的変化量を学習しているため、クエンチ予測の精度が他手法に比べて高いと考えられる。今後は実験機器への実装を考え、より高速かつ低パラメータ数の予測器を構築する必要がある。

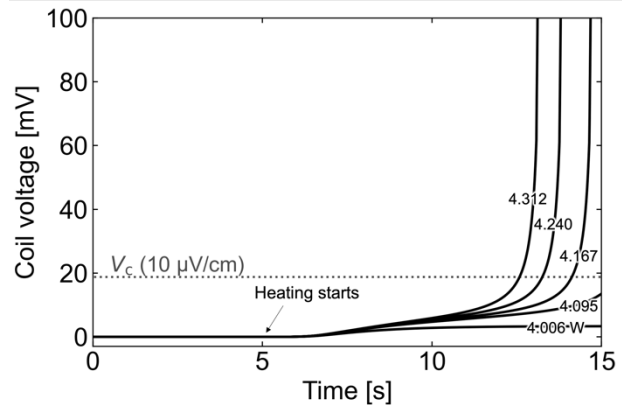


Fig. 1. Several examples of gathered coil voltages.

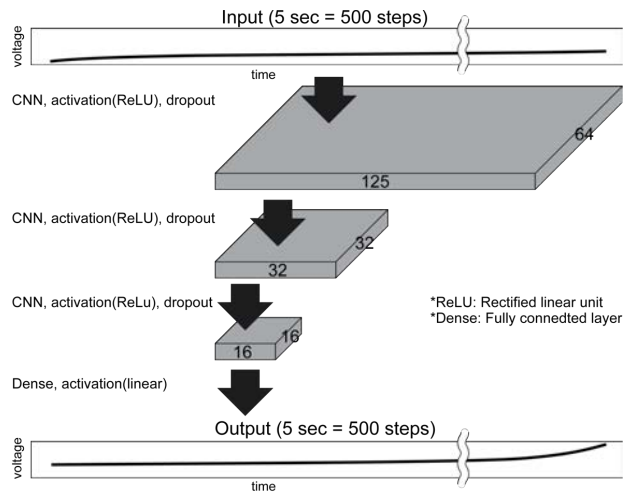


Fig. 2. Structure of CNN-based voltage predictor.

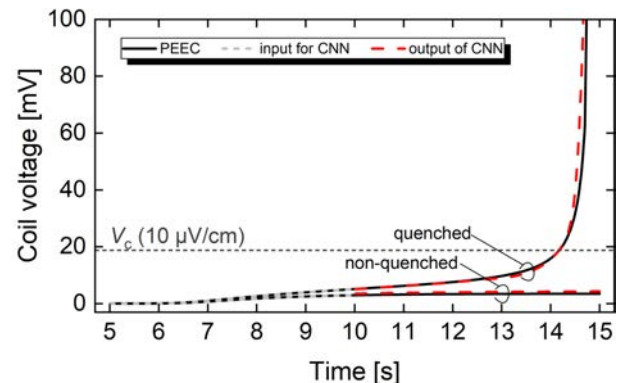


Fig. 3. Prediction results of coil voltage with CNN.

TABLE I
COIL SPECIFICATIONS

Parameters	Value
Coil inner diameter [m]	50
Coil outer diameter [m]	70
Number of turns [turn]	100
Winding method	Insulated
Operating temperature [K]	77 (liquid nitrogen)
Operating current [A]	50

REBCO 3ターンコイルの液体水素／窒素中の熱暴走実験についての考察

Investigation on the thermal runaway experiments of REBCO 3 turn coils cooled with liquid hydrogen/nitrogen

今川 信作, 濱口 真司, 岩本 晃史(NIFS); 大屋 正義(関西学院大); 白井 康之(京都大); 小林 弘明(JAXA)
 IMAGAWA Shinsaku, HAMAGUCHI Shinji, IWAMOTO Akifumi (NIFS); OHYA Masayoshi (Kwansei Gakuin Univ.);
 SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)
 E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

1. はじめに

液体水素で直接冷却することによりクエンチ保護が可能な電圧発生まで冷却安定な高温超伝導コイルの開発を目指している。局所的に劣化させた REBCO テープ線材を用いて、内径 160 mm の 3 ターンコイルを製作し、液体窒素および液体水素中において熱暴走実験を実施した。試験体は、厚さ 8 mm の GFRP 板に加工した深さ 4 mm の溝に 3 ターンコイルを挿入し、片面の幅方向のみが冷媒で冷却される構造とし、REBCO 線のみ試験体と 0.2 mm 厚の銅テープを共巻きした試験体を比較した。液体窒素および液体水素中のどちらにおいても、熱暴走は最大熱流束よりも低い発熱密度で始まっており、線材の温度上昇に伴う I_c 低下だけでなく安定化材抵抗率の上昇も重要な因子である。

2. BEBCO 線のみのコイルの熱暴走

REBCO 線のみ試験体は、液体窒素中では 55 A 付近で劣化部 0.1 m の電圧が 10 mV に近づくと電圧上昇が速くなり、劣化部以外への常伝導伝播の前に熱暴走に至る。液体水素中では、8 mV あたりから電圧上昇が速くなり、同様に劣化部以外への常伝導伝播の前に熱暴走に至る。熱暴走開始時点の導体温度上昇は数 K 程度であり、REBCO 線の温度上昇に伴う磁束フロー抵抗の増加による発熱増加が冷却増加を上回るようになったことが熱暴走開始の主要因と考えられる。

3. 銅テープ共巻きコイルの熱暴走

銅テープを共巻きした試験体 (Sample 1, Fig. 1 参照) は、液体水素中では劣化部の REBCO 線の電圧 V2 が 11-15 mV を超えると V2 と温度の上昇が速くなり、熱暴走に至る。減磁が遅れると常伝導部の拡大伝播を伴って電圧と温度の上昇が加速する。一方、液体窒素中では 60 A 近傍で 10 mV を超えると常伝導部が拡大伝播し、V2 は 60 mV 程度まで高くなって停滞する。そこから 80 A 程度までは電流値を高くしても導体温度は停滞し、V2 はむしろ低下する (Fig. 2 参照)。そこからさらに電流値を高くすると電圧も温度が上昇するが、105 A 程度までは熱平衡が成立し、臨界温度を超えていることから完全安定条件を満足するといえる。107 A では電圧上昇が次第に加速することから、熱暴走開始と判断できる。臨界温度を超えてからの熱暴走なので、銅の温度上昇に伴う抵抗値増大による発熱増加が冷却増加を上回るようになることが原因と考えられる。

Fig. 2 の 500 s 付近までを横軸を V1 として Fig. 3 に示す。V1 と V2 が等しい範囲では常伝導部が劣化部に停留しており、常伝導部の拡大伝播と共に V2 が低下して V3 が緩やかに上昇、すなわち、銅テープの電流分担比が高くなることから分かる。V2 が低下する範囲では電流値と温度の変化は小さいので、電流値を 75 A、温度を 95 K で一定とし、常伝導部の長さを変数として REBCO 線と銅テープの電流分流を計算した結果を Fig. 4 に示す。線材間の接触抵抗を 0.005 Ωm とすると、V2 は実験と良く一致するが、V3 は低めに評価される。実際には接触抵抗や温度が分布しており、その効果を考慮する必要があると考えている。

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

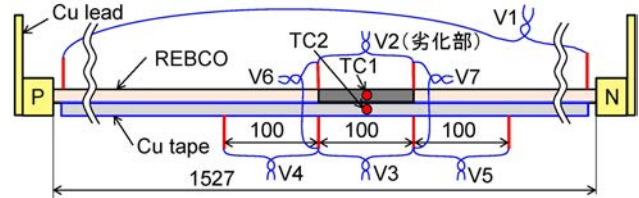


Fig. 1. Sensors of a sample 1 (REBCO + Cu tape). TC1 and TC2 are AuFe-Normal Ag thermocouples. TC1 was damaged.

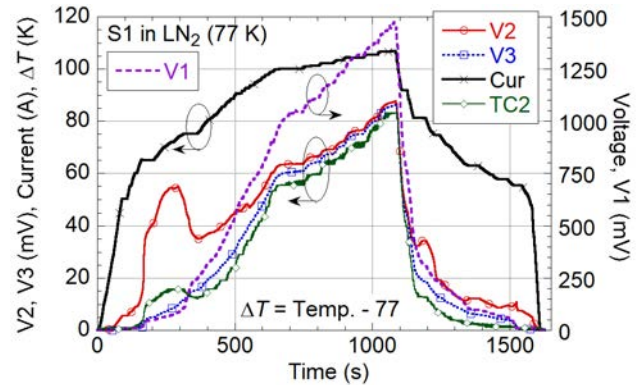


Fig. 2. Voltage, current, and temperature rise of Sample 1 during excitation up to 105 A in LN₂ at 77 K without external field.

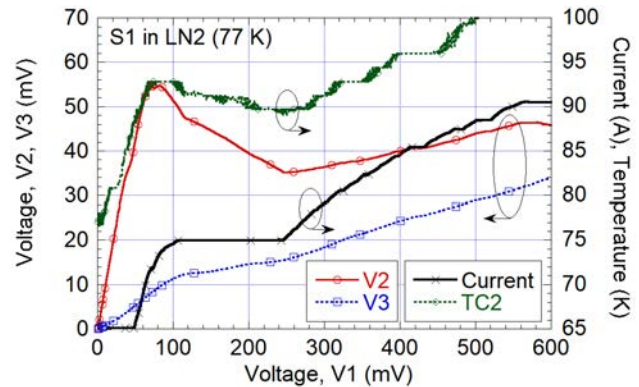


Fig. 3. Dependence of V2, V3, current, and temperature versus V1 of Sample 1 shown in Fig. 2.

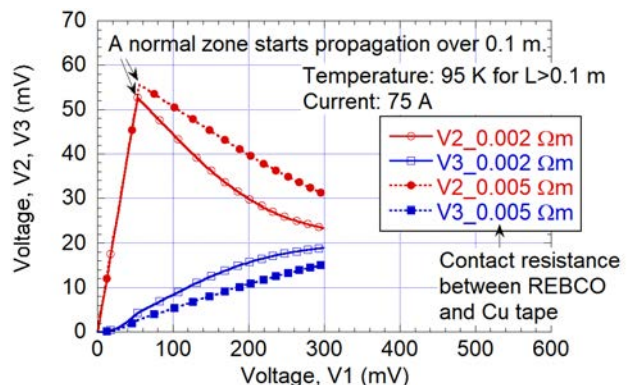


Fig. 4. Calculated voltages of Sample 1 with a model where REBCO and a Cu tape are contacted with constant resistance.

強磁場超伝導マグネットのクエンチ保護に向けた 金属絶縁体転移材料特性 Metal-insulator transition material properties for quench protection of high field superconducting magnets

櫻井 響介, 土屋 雄司, 岡田 達典, 淡路 智 (東北大); 田橋 正浩, 後藤 英雄 (中部大)
SAKURAI Kyosuke, TSUCHIYA Yuji, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku University);
TAHASHI Masahiro, GOTO Hideo (Chubu University)
E-mail: sakurai.kyosuke.s6@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材は、臨界電流が強磁場中で高く、線材長手方向への引っ張り強度に優れているため、強磁場超伝導マグネットへの応用が期待される。通常、強磁場マグネット用の REBCO コイルは、ターン間に絶縁層を設ける絶縁コイル構造を用いる。この構造は、発生する磁場が安定する一方で、クエンチ伝播速度が遅いため、局所的な欠陥によってホットスポットが発生し焼損するリスクがある。このクエンチ保護の問題を解決するために、無絶縁コイル(NI コイル)が提案されている [1]。しかし、この構造では、超伝導線材間を絶縁しないためにターン間電流が生じ、励消磁が遅延する課題がある。

近年、絶縁コイルと NI コイルの欠点を克服するため、スマート絶縁コイル (SI コイル) が提案された[2]。SI コイルの特徴は、電気抵抗率が温度上昇により絶縁体から金属的な特性へ変わる金属-絶縁体相転移材料を絶縁層に用いることである。そのため、通常運転時は絶縁コイルとして振る舞い、クエンチ時は絶縁層が金属に相転移し、無絶縁コイルのように振る舞う。我々は、SI コイルの実現に向けて、昇温により電気抵抗率 ρ が 3 桁減少する金属-絶縁体相転移材料として、ペロブスカイト型 Co 酸化物 $(\text{Pr}_{1-y}\text{Sm}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ (PSCCO)に着目した[3]。本研究では、この物質を絶縁層に用いるのに最適な組成の探索を目的とし、電気抵抗率 ρ の温度依存性を詳細に測定した。

2. 実験方法

$(\text{Pr}_{1-y}\text{Sm}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ 多結晶試料をゾル-ゲル法によって作製した[4]。組成は、単相試料が得られ金属-絶縁体相転移温度が広く変化するように、 $x=0.4, y=0-0.5$ とした。直流 4 端子法を用いて、 ρ の温度依存性を温度 10-270 K の範囲で測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に、PSCCO($x=0.4, y=0-0.25$)における ρ の温度依存性を示す。 $y=0, 0.1$ では、金属絶縁体相転移が現れなかった。一方で、 $y=0.2, 0.25$ では、昇温に伴い ρ が急峻に減少し、金属絶縁体相転移を示した。Fig. 2 に、PSCCO ($x=0.4, y=0.4, 0.5$)における ρ の温度依存性を示す。 $y=0.4, 0.5$ では、昇温に伴い ρ は緩やかに減少し、金属絶縁体相転移を示した。これらの結果から、PSCCO ($x=0.4, y=0.2$)が、金属絶縁体転移の転移温度の幅が最も小さく、 ρ が 3 桁変化するため、SI コイルに使用する金属-絶縁体相転移材料として適していると考えられる。

次に、先述の最適組成に対して得られた ρ から、SI コイルに用いる際のターン間コンタクト抵抗 R_{ct} について考察する。10 K と 100 K における ρ は、それぞれ 3300 m Ω cm と 9.7 m Ω cmであった。これらの値を用いて、絶縁層の厚みを 50 μ m と仮定し、 R_{ct} を見積ると、10 K では 167.7 $\mu\Omega$ cm²、100 K では 0.4 $\mu\Omega$ cm² と昇温によって 3 桁ほど減少する。先行研究[5]では、NI コイルの R_{ct} は、77 K において 19.2-100 $\mu\Omega$ cm² と報告されている。 R_{ct} が、界面とそ

の間に挟まれた絶縁材料の抵抗の直列和であると仮定すると、SI コイルの R_{ct} は、NI コイルの R_{ct} と PSCCO の ρ との和となる。したがって、PSCCO を用いた SI コイルでは、PSCCO の ρ の温度変化を利用して R_{ct} の温度制御を行うことができる。当日は、SI コイルおよび NI コイル、さらに金属絶縁コイル[5]の R_{ct} とを比較して議論する。

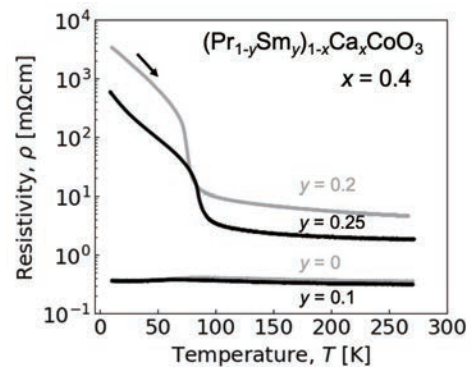


Fig. 1 Temperature dependence of electrical resistivity of $(\text{Pr}_{1-y}\text{Sm}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ ($x=0.4, y=0-0.25$).

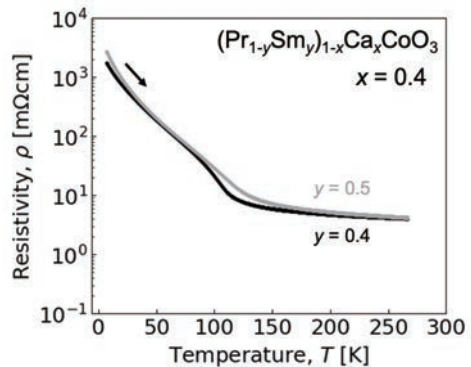


Fig. 2 Temperature dependence of electrical resistivity of $(\text{Pr}_{1-y}\text{Sm}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ ($x=0.4, y=0.4, 0.5$).

謝辞

本研究は、JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2102 の支援を受けたものです。

参考文献

1. S. Hahn *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 1592 (2011).
2. H.-W. Kim *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 461704 (2017).
3. T. Fujita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **74** 2294 (2005).
4. M. Tahashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 018003 (2022).
5. T. L ecrevisse *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **35** 074004 (2022).

核融合マグネット用単純積層 HTS テープ金属含浸導体の 20K 8T 条件下での通電特性

Characteristics of Simple Stacked HTS Tape Metal Impregnated Conductor for Fusion Magnet under 20K 8T Condition

成嶋 吉朗, 濱口 真司, 力石 浩孝, 柳 長門(核融合研, 総研大); GARFIAS-DAVALOS Diego(総研大);
小野寺 優太, 馬場 智澄(核融合研); 宮澤 順一, 後藤 拓也(ヘリカルフュージョン)
NARUSHIMA Yoshiro, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAIISHI Hiroataka, YANAGI Nagato (NIFS, SOKENDAI);
GARFIAS-DAVALOS Diego (SOKENDAI); ONODERA Yuta, BABA Tomosumi (NIFS);
MIYAZAWA Junichi, GOTO Takuya (Helical Fusion)
E-mail: narushima.yoshiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

磁場閉じ込め核融合炉マグネットに高温超伝導(HTS)を用いることは、冷却コスト削減による経済的な運転と、高磁場生成によるプラズマ性能向上が期待できる。そのため、HTS 導体開発が世界各国で進められているが、導体巻き線の困難さ及び冷却や通電サイクルによる導体の劣化など、解決すべき課題が多くある。我々は単純積層した REBCO テープを巻き線後に金属含浸することで巻き線を容易にする概念を採用した導体(以後 WISE 導体と呼ぶ)[1, 2]のヘリカル型核融合炉マグネットへの適用を視野に研究を進めている。本研究では高磁場下における WISE 導体の通電試験を実施し、ヘリカルマグネットへの適用可能性を評価することを目的とする。

2. 試験装置概要

図 1 に WISE 導体の概念図を示す。幅 12 mm の REBCO テープ($I_c = 250$ A @77 K, s.f.)を 60 枚積層した直線型の導体を U 字型に折り曲げた後に低融点金属で含浸する。冷却効率の改善を狙い、REBCO テープに沿って冷却配管を配置しヘリウムガスで冷却する方式を採用した。この WISE 導体を核融合科学研究所の大型導体試験装置に設置し、最大中心磁場 $B = 8$ T、温度 $T = 20$ K の条件下で通電試験を実施した。HTS 導体部の電圧タップ V_{04} は磁場最大(8 T)となる位置にあり、 V_{02} の電圧タップ位置では $B = 0.3$ T となる。

3. 通電試験結果

高磁場中における大電流を要求されるヘリカル型核融合マグネットの通電を想定し、定常通電と繰返し通電を実施した。通電電流 19 kA、通電時間 360 s の定常通電波形を図 2 に示す。定常状態($t = 100$ s – 460 s)の間、超伝導部の電圧(V_{02} 、 V_{04})の増加は磁場の値によらず観測されず、導体温度(T)も $T \sim 20$ K が維持された。最大電流 18 kA、電流変化速度 $|dI/dt| = 1$ kA/s の条件下で 1875 s にわたり 30 回繰返し通電した結果を図 3 に示す。通電電流の変化に伴う 0.1 mV 程度の誘導電圧の変化は現れたが、長期的な電圧と温度の増加は観測されなかった。

4. まとめと今後の課題

$B = 8$ T、 $T = 20$ K の条件下における WISE 導体の通電試験を実施した結果、19 kA の 360 s 定常通電ではクエンチは観測されず、18 kA の繰返し通電では顕著な導体の劣化無しに安定的に通電できることが確認された。以上の条件の範囲内では導体の健全性は維持された判断できるが、この導体の限界を知るためには臨界電流値や n 値の同定が必要である。より高い電流の通電や、より高い温度・磁場での通電試験を実施し、臨界電流や n 値を同定する予定である。

本研究は核融合科学研究所共同研究予算(PASU1482 共民/HF7)により実施された。

参考文献

1. Y. Narushima, et al.: PFR **17**, 2405006 (2022)
2. Y. Narushima et al.: J. Phys. Conf. Ser. **2545** 012009 (2023)

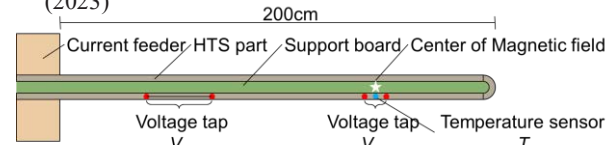


Fig. 1. Schematic view of Simple Stacked HTS Tape Metal Impregnated Conductor

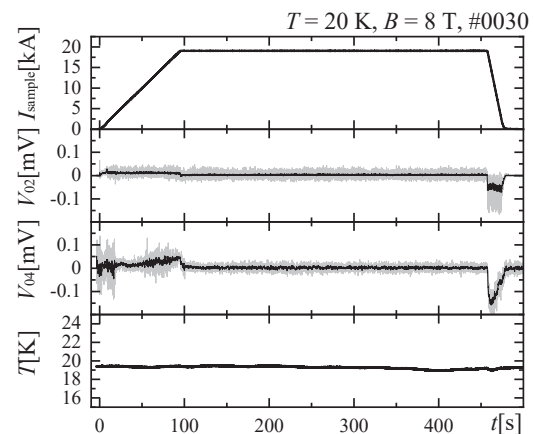


Fig. 2. Waveforms of the sample current, voltage on the HTS part, and temperature during 360 s steady energization with 19 kA.

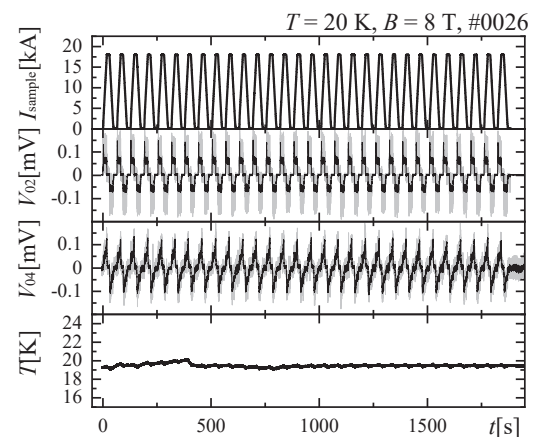


Fig. 3. Waveforms of the sample current, voltage on the HTS part, and temperature during 30 cycles of repetitive energizations for about 1800 s.

並列高温超電導体を用いた無絶縁コイルの 外部磁場変動時における電磁現象の解析

A Study on Electromagnetic Phenomena in No-Insulation Coils with Parallel HTS Tapes Under External Magnetic Field Fluctuation

小林 宏泰, 大池 章太, 宮城 大輔(千葉大); 津田 理 (東北大)

KOBAYASHI Hiroyasu, OIKE Shota, MIYAGI Daisuke (Chiba Univ.); TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: h.kobayashi@chiba-u.jp

1. はじめに

高い安定性を有する高温超電導 (HTS) 導体を用いた無絶縁 (NI) コイルについて, 大電流容量化や励磁遅れ低減のために, 並列導体を用いたコイル構造が提案されている[1]。しかし, 外部磁場の変動や電源遮断により, 並列 HTS 導体を用いた NI コイル内には, 大きな誘導電流が発生する。この大きな誘導電流の経路にある接触抵抗での発熱が大きくなり, 焼損に至る可能性がある。近年, 高磁場マグネットへの並列 HTS 導体を用いた NI コイルの適用が盛んに検討されているが, 熱的安定性が損なわれた報告[2]もあり, コイル内の電磁現象に基づく詳細な解析が必要である。本報告では, 外部磁場変動時の NI コイル内の電磁現象について, 部分要素等価回路 (PEEC) モデル[3]を用いて解析した。また, コイル内の電流分布が熱安定性に与える影響を評価するために熱伝導解析との連成解析を行い, NI コイルの熱的安定性を評価したので, これを報告する。

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, 高温超電導体の E - J 特性には n 値モデルを用い, 臨界電流の磁場・角度・温度依存性[4]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 HTS 導体を用いた NI コイルの諸元, 及び解析条件を Table 1 に示す。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 $t = 0$ [s]から 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 および B の周方向電流分布を, Fig. 1 および Fig. 2 にそれぞれ示す。Fig. 1(a)および 2(a)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流れた。これは, 最も抵抗が低い経路を誘導電流が流れたためであると考えられる。また, 外部磁場変動による誘導電流は, Model A よりも Model B において大きくなるのが分かる。これは, 並列導体数の増加による NI コイルのインダクタンス低減によるものと考えられる。また, Fig. 1(b)および 2(b)の周方向電流分布より, 最内ターンおよび最外ターンにおいて, 局所的にターン間を渡る径方向電流が増加しているのが分かる。これは, NI コイルにおける誘導電流がコイル内の 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ためであり, これが外部磁場変動時には大きな発熱要因となる可能性がある。Fig. 3 にコイル内最大温度の時間推移を示す。Fig. 3 より, Model C では最大 679.5K まで温度上昇しており, 誘導電流経路内の接触抵抗における発熱のために, 並列導体を用いた NI コイル構造が超電導線材に不可逆的なダメージを及ぼすリスクがある可能性があることが示された。

参考文献

1. J. Geng, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.32, No.8, 084002 (2019).

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
L_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		
Coil i.d. [m]	0.5		
n value	33		
External magnetic field B_{ex} [T]	10		
Decrease rate of B_{ex} [T/s]	100		

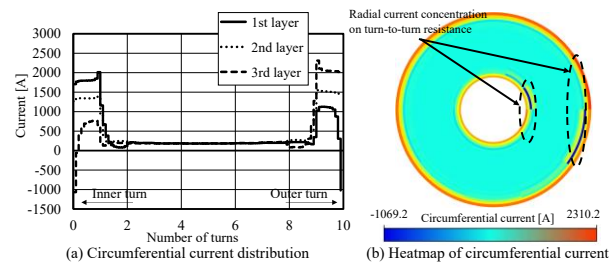


Fig. 1. (a) Circumferential current distribution and (b) heatmap in Model A when the external magnetic field is reduced by 1% ($t = 0.001$ [s]).

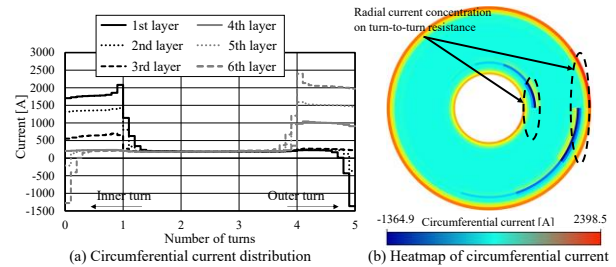


Fig. 2. (a) Circumferential current distribution and (b) heatmap in Model B when the external magnetic field is reduced by 1% ($t = 0.001$ [s]).

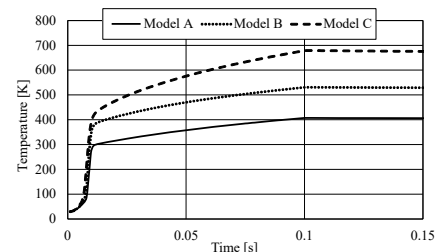


Fig. 3. Maximum temperature profile of Model A-C.

- Zachary S. Hartwig *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.34, No. 2, 0600316 (2024).
- T. Wang *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.25, No. 3, 4603409 (2015).
- V. Selvamanickam, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* Vol.25, No.12, 125013 (2012)

多重極展開を用いた NI REBCO マグネットの局所的相互インダクタンス計算の高速化

Fast Computation of Local Mutual Inductances of NI REBCO Magnets Using Multipole Expansion

榎原 里樹(北大); 石山 敦士(早大); 野口 聡(北大)

SAKAKIBARA Riki (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

E-mail: sakakibara.riki.i8@elms.hokudai.ac.jp

1. はじめに

2011年にREBCO(rare-earth barium copper oxide)パンケーキコイルへの無絶縁(NI: no-insulation)巻線技術が提案され、REBCO マグネットの熱的安定性を飛躍的に向上させることに成功した。NI REBCO マグネットは小型核融合炉など高磁場装置への応用が求められているが、遮蔽電流によって誘起される磁場や、過度な機械的応力による臨界電流の低下など、解決すべき問題が残存している。このような問題を調査するためには、コイル内の局所的な現象変化が、コイル全体に及ぼす影響を調べる必要がある。部分要素等価回路(PEEC: partial element equivalent circuit)モデルはコイル内の局所的な抵抗やインダクタンスを考慮したモデルであり、局所的電磁現象をシミュレーションするために広く使用されている。

PEEC モデルを用いたマグネットの解析には、局所的な自己・相互インダクタンスを多数求める必要があるが、この計算量は要素数の増加に伴い指数的に増加する。さらに、REBCO パンケーキコイルのインダクタンス値は、コイルが変形するたびに再計算する必要がある[1]。このような理由から、局所的相互インダクタンス算出の高速化が求められている。

本研究では、相互インダクタンスの積分計算にガウス求積を使用し、ここに多重極展開法を導入することで計算の高速化を図る[2]。そして、計算時間と計算精度の観点からこの提案手法の有用性を確認する。

2. 相互インダクタンス計算への多重極展開の導入

REBCO 線材はテープ幅に比べテープ厚が非常に薄いいため、テープ厚方向の積分値を一定と考えると、相互インダクタンス M の算出はガウス求積を適応し、式(1)のように表せる。

$$M = \frac{1}{I' \sum_l \sum_k} \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \sum_j \sum_i \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}'_{i,j}) \cdot \mathbf{r}' \cdot \mathbf{t}' \cdot W_{\theta'_i} W_{z'_j}}{|\mathbf{r}_{k,l} - \mathbf{r}'_{i,j}|} \right) \quad (1)$$

$$\cdot \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}_{k,l}) \cdot \mathbf{r} \cdot \mathbf{t} \cdot W_{\theta_k} W_{z_l}}{|\mathbf{r}_{k,l} - \mathbf{r}'_{i,j}|}$$

ここで、 $I, I', r, r', t, t', \mathbf{J}, \mu_0$ はそれぞれソース側要素およびターゲット側要素の電流と円筒座標系における半径、REBCO 線材のテープ厚、電流密度、真空透磁率である。さらに、 $\mathbf{r}'_{i,j}$ と $\mathbf{r}_{k,l}$ はガウス積分点の座標、 $W_{\theta'_i}, W_{z'_j}, W_{\theta_k}, W_{z_l}$ はガウス求積の重みである。

本来、多重極展開法(MEM: multipole expansion method)は、多点粒子問題(粒子の静電相互作用など)を効果的に解く手法である。本研究では、ガウス求積の積分点を一つの粒子と見立て、電流のベクトルポテンシャルを多重極展開により求めることで、相互インダクタンス算出の高速化を図る。図1にこの手法のイメージを示す。以下に、相互インダクタンス算出へ多重極展開を適応する手法を示す。

まず、式(2)のように、ソース側の積分点 $\mathbf{r}'_{i,j}$ に関わる量を粒子 $\mathbf{p}(\mathbf{r}'_{i,j})$ と置く。

$$\mathbf{p}(\mathbf{r}'_{i,j}) = \frac{1}{I'} \mathbf{J}(\mathbf{r}'_{i,j}) \cdot \mathbf{r}' \cdot \mathbf{t}' \cdot W_{\theta'_i} W_{z'_j} \quad (2)$$

次に、式(3)から(5)にそれぞれ示す、P2M 関数、M2L 関数、L2P 関数を用い、ターゲット側要素におけるソース側要素が持つ粒子 $\mathbf{p}(\mathbf{r}'_{i,j})$ の効果を計算し、各積分点におけるベクトルポテンシャル \mathbf{A} を求める。

$$\mathbf{M}_\lambda^\mu = \sum_j \sum_i \mathbf{p}(\mathbf{r}'_{i,j}) \cdot R_\lambda^\mu(\mathbf{r}_M - \mathbf{r}'_{i,j}) \quad (3)$$

$$\mathbf{L}_\lambda^\mu = \sum_{\lambda=0}^{\lambda_{\max}} \sum_{\mu=-\lambda}^{\lambda} \mathbf{M}_\lambda^\mu \cdot I_{\lambda+\lambda'}^{-\mu+\mu'}(\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_M) \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \sum_{\lambda=0}^{\lambda_{\max}} \sum_{\mu=-\lambda}^{\lambda} \mathbf{L}_\lambda^\mu \cdot R_\lambda^\mu(\mathbf{r}_{k,l} - \mathbf{r}_L) \quad (5)$$

ここで、 $\lambda_{\max}, \mathbf{r}_M, \mathbf{r}_L$ はそれぞれ多重極展開の計算次数、ソース要素およびターゲット要素の重心座標である。また、 $R_\lambda^\mu, I_\lambda^\mu$ はそれぞれ regular solid harmonics と irregular solid harmonics であり式(6), (7)のように表される。

$$R_\lambda^\mu(r, \theta, \phi) = \frac{r^\lambda}{(\lambda + \mu)!} P_\lambda^\mu(\cos \theta) e^{i\mu\phi} \quad (6)$$

$$I_\lambda^\mu(r, \theta, \phi) = (-1)^{\lambda+\mu} \frac{(\lambda - \mu)!}{r^{\lambda+1}} P_\lambda^\mu(\cos \theta) e^{i\mu\phi} \quad (7)$$

ここで、 P_λ^μ はルジャンドル陪関数であり式(8)で与えられる。

$$P_\lambda^\mu(x) = (-1)^\mu \frac{1}{2^\lambda \lambda!} (1-x^2)^{\frac{\lambda}{2}} \frac{d^{\lambda+\mu}}{dx^{\lambda+\mu}} (x^2-1)^\lambda \quad (8)$$

3. 相互インダクタンスの算出結果

表1に相互インダクタンスを算出したNI REBCO マグネットの仕様と計算条件を示す。マグネットの仕様は2017年に45.5Tの直流磁場を記録したマグネットの情報を用いている[3]。表2に算出したコイル全体のインダクタンスと計算時間を示す。この結果を見ると、計算時間が約50%削減できていることがわかる。さらに、コイル全体のインダクタンスの誤差は十分に小さいことが確認できる。

参考文献

- [1] S. Noguchi, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **33**(5), 2023, 4300405.
- [2] L. Greengard, *et al.*, *Acta Numerica*, **6**, 229–269, 1997.
- [3] S. Hahn, *et al.*, *Nature*, **570**, 496–499, 2019.

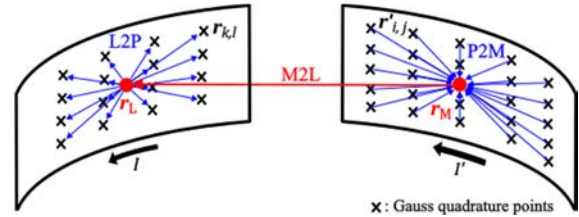


Fig. 1. Computation diagram of mutual inductances using multipole expansion.

TABLE I SPECIFICATIONS OF NI REBCO PANCAKE COILS AND CONDITIONS FOR INDUCTANCE COMPUTATION

Number of SP coils	12
Coil inner diameter [mm]	14
Number of turns each SP coil [turn]	226
REBCO tape width [mm]	4.02
REBCO tape thickness [mm]	0.043
Number of circumferential divisions of SP coil	12
Maximum order of multipole expansion computation	2
Number of Gauss quadrature points on source side	255
Number of Gauss quadrature points on target side	144

TABLE II TOTAL INDUCTANCE AND COMPUTATION TIME

Method	Total inductance	Computation time
Gauss quadrature	47.800 mH	17268 s
MEM	47.722 mH	8507 s

能動的蓄冷式磁気冷凍(AMR)における水素凝縮熱交換器の熱特性

The thermal characteristics of hydrogen exchanger in Active Magnetic Regenerative Refrigeration (AMR)

白井 毅, 佐藤 瑛空, 石田 政義(筑波大学); 内田 公, 夏目 恭平, 神谷 宏治, 沼澤 健則(物材機構)
 SHIRAI Tsuyoshi, SATO Eiku, ISHIDA Masayoshi (Tsukuba University); UCHIDA Akira, NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji,
 NUMAZAWA Takenori (NIMS)
 E-mail: s2320865@u.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

NIMS では、原理的に高い液化効率が期待される磁気冷凍による水素液化に着目し、研究を行っている[1]。我々が開発している能動的蓄冷式磁気冷凍(以下「AMR」という。)による水素液化では、磁気熱量効果を用いてヘリウムガスを冷却し、水素ガスとの熱交換を行う。AMR での高効率な水素液化を実現するためには、ヘリウムガスと水素の熱交換を担う水素凝縮熱交換器の性能向上が不可欠である。この熱交換を担う水素凝縮熱交換器の最適化のためいくつかの凝縮熱交換器について性能の比較のために計算を行った[2]。本講演では、実際にこれらの凝縮熱交換器を製作し、装置に組み込んで熱特性を計測した結果を報告する。

2. 凝縮熱交換器

Fig. 1 に製作した水素凝縮熱交換器を示す。この水素凝縮熱交換器は水素液化量 10 kg/day の伝熱量を満足するよう設計されている。コイル状の配管の中に水素が流れ、配管の周りにヘリウムが流れるいわゆるハンブソン式熱交換器を採用した。液化した水素は水素用配管の中心に配置された貯液槽に貯められる構造になっている。貯液槽には内部にアクセスするための蓋を取り付けており、インジウムシールによって気密性を確保している。貯液槽の中には液面計および冷凍能力を測定するためのヒーターを設置した。

3. 実験装置

磁気冷凍は、磁性体の磁気熱量効果を利用した冷凍サイクルである。磁気熱量効果は、磁場の印加(励磁)により、磁性体の磁気モーメントのエントロピーが減少し発熱し、反対に磁性体から磁場を取り去る(消磁)と磁気モーメントのエントロピーが増大し、吸熱するという現象である。AMRは、磁気熱量効果に蓄冷効果を加えることで冷却温度幅を広げる磁気冷凍法の一つである。磁気冷凍によって得られた冷熱を効率よく水素と熱交換させ、液化を行うのが水素凝縮熱交換器である。今回の測定では熱交換器単体の性能試験を行うため、磁気冷凍は行わずに、GM 冷凍機とヒーターを用いて熱交換流体と水素の温度調整を行うことで、熱特性を計測する。熱交換に必要なヘリウムの往復流は、ペロウズ式低温ポンプによってつくられる[3]。Fig. 2. に実験装置の概念図を示す。ポンプ(図中左の「Piston」)を出たヘリウムは GM 冷凍機(GM ref. 1)のコールドヘッドに取り付けられた熱交換器(HEX1)によって冷却され、水素凝縮熱交換器(HEX5)を通り、GM 冷凍機に同じく取り付けられた熱交換器(HEX2)を通してペロウズ式低温ポンプに戻る。水素は室温にあるバッファタンクから圧力によって一方向流を生み出し、GM 冷凍機に取り付けられた熱交換器(HEX3)を通して水素凝縮熱交換器(HEX5)を通り、GM 冷凍機に同じく取り付けられた熱交換器(HEX4)を通して大気に放出する。

4. 測定方法

GM 冷凍機に取り付けられた熱交換器の前後の配管に取り付けられた温度センサによって流体の温度を測定し、水素凝縮熱交換器の出入口温度を測定し、ペロウズ式低温ポン

プの吐出、吸入配管に取り付けられた圧力センサによってヘリウムの圧力を測定する。ヘリウムの流量はペロウズ式低温ポンプのアクチュエータ移動量および移動速度、ペロウズの底面積、ヘリウムの密度によって算出される。水素凝縮熱交換器の伝熱量は水素の液化量によって測定する。水素の液化量は貯液槽内部の液面計とヒーターによって液面を一定に保ち、そのときのヒーターの出力を水素の液化量すなわち水素凝縮熱交換器の伝熱量として測定を行う。

5. 計算結果との比較

1次元計算を行った結果はヘリウムの質量流量 20 g/s、入口温度 16.5 K、出口温度 17.1 K、水素の質量流量 0.12 g/s、入口温度 35 K の条件で水素凝縮熱交換器の伝熱量は 74.6 W であった。これを満たしているかを実験によって確認する。測定結果は当日報告する。

本研究は、JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術(JPMJMI18A3)の助成を受けたものである。

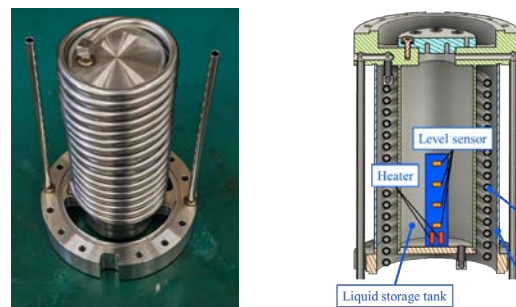


Fig. 1 Appearance of hydrogen exchanger without shell (Left)
 Cross-sectional view of 3D model of hydrogen exchanger (Right)

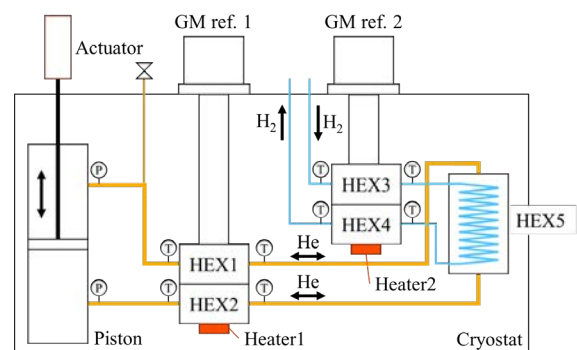


Fig. 2 Schematic diagram of experimental equipment

参考文献

1. Koji Kamiya, et al.: *Appl. Phys. Exp.* 053001 (2022) p. 15
2. T. Shirai, et al.: *Abst. of CSSJ conf.*, **106** (2023) p.92
3. S. Nishioka, et al.: *Abst. of CSSJ conf.*, **106** (2023) p.93
4. Kamiya et al.: *Proc. Int. Cong. Refrig.* (2023) p.46-60

能動的蓄冷式磁気冷凍機(AMR)のアクチュエータ負荷低減のためのばね機構

Spring mechanism for reducing actuator load in active magnetic regenerative refrigerator

佐藤 瑛空, 白井 毅, 石田 政義(筑波大);

内田 公, 夏目 恭平, 神谷 宏治, 沼澤 健則(NIMS)

SATO Eiku, SHIRAI Tsuyoshi, ISHIDA Masayoshi(Tsukuba Univ.);

UCHIDA Akira, NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori(NIMS)

E-mail: s2320861@u.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向け、水素の効率的な利用を可能にする技術の1つとして、能動的蓄冷式磁気冷凍(AMR)の研究を進めている。我々の開発した AMR は、アクチュエータによって磁性体を超電導コイル内部に出し入れすることで磁気熱量効果を得る¹⁾。ばねによるアクチュエータの負荷の低減方法をより定量的に検討するため、超電導磁石と磁性体との間の磁気力を測定した。

2. ばね機構による回生

本装置では Fig. 1 のように、上下 2 つの磁性体(図中の Upper AMR と Lower AMR)とその間に挟まれた液化槽(図中の Cold stage)が一体となり、超電導コイル内外を往復する。磁性体とコイルが引き合う磁気力は、磁場 B と磁場勾配 dB/dx に比例して生じる。磁性体が往復運動する時、この磁気力がアクチュエータの負荷となり、それが消費電力と正の相関を持つ。この低減は AMR の効率改善とコスト削減につながる。

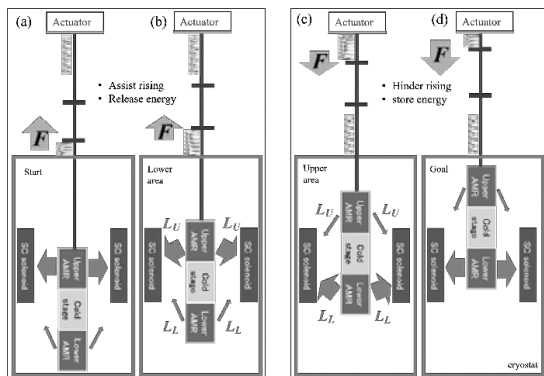


Fig. 1 Principle of method for reducing actuator load by springs in AMR

本来、電磁力は保存力であるため、電気エネルギーを回生することができれば、理想的な消費電力は磁性体の磁化のために消費する分のみである。そこで、磁気エネルギーをばねの弾性エネルギーとして蓄積・再利用することを検討する。ばねは、アクチュエータによる磁性体の減速を補助しながらエネルギーを蓄える。蓄えたエネルギーは、次に磁性体を加速するアクチュエータ補助に用いる。本サイクルを通して、ばねの弾性力による回生が消費電力を低減する。これまでの研究では、本装置において磁性体が移動範囲の中央にいる時にばねが自然長となるように導入した場合を仮定し、ばね定数を変数として 1 サイクルのアクチュエータの仕事量を計算した。ばね定数を 11000 N/m としたとき、仕事量は従来から最大で約 16%低減できる可能性を確認できた²⁾。

3. 磁気力測定

本研究で測定したアクチュエータ負荷と移動する磁性体位置の関係を Fig. 2 に示す。磁性体位置が 0 mm の地点は Fig. 1 における(a)の状態であり、運転では 200 mm 上方に移動して折り返す。

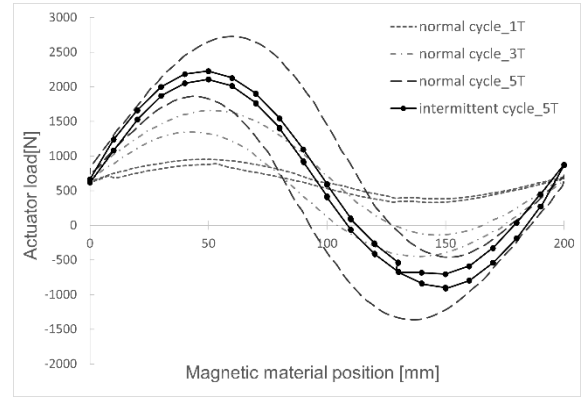


Fig. 2 Relation between actuator load and magnetic material position in AMR operation

アクチュエータ負荷は、アクチュエータ上端に取り付けたミネベア製の小型圧縮引張型ロードセル(UMM1R-500K)を用いて、超電導コイルの中心磁場が 1, 3, 5 T となる条件で測定を実施した。磁場の強さに伴ってヒステリシスが拡大し、アクチュエータ負荷は増加していることがわかる。また、点線の曲線は連続的に計測した値であるのに対し、実線の曲線は磁性体をその位置に停止させ計測することを繰り返して得られた値であり、5 T での結果を比較するとヒステリシスの大きさに差がある。この差は、磁性体容器と超電導コイルを保護するガイドとの間の摩擦力に起因するものと考えられる。次に、超電導コイルが磁性体を与える磁気力のみを得るため、超電導コイルを支える支柱の引っ張り/圧縮ひずみを測定することを考えた。Fig. 3 に取り付けたいひずみゲージの写真を示す。ひずみゲージは、共和電業製のひずみゲージ KFGS-2-120-C1-5 を使用し、貼布には同社製の接着剤を用いた。支柱一本につき、5 か所(うち 2 か所は温度補償用および、横軸方向の応力キャンセル用)を貼付して、測定した。

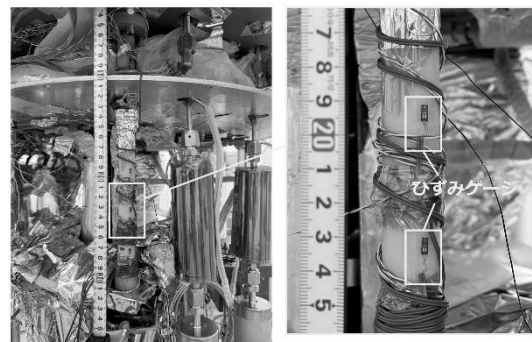


Fig. 3 Strain gages on coil strut

4. まとめ

AMR における超電導コイルと磁性体との間の磁気力を測定した。詳細な測定方法及び結果は当日本会にて報告する。

本研究は、JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術(JPMJMI18A3)の助成を受けたものである。

参考文献

1. K. Kamiya, et al.: *Appl. Phys. Express* **15** 053001(2022)
2. S. Omae, et al.: *Abstract of CSSJ conf.*, Vol.106 (2023) p.91

NMR マグネット向け冷媒蒸発抑制装置の冷却性能

Cooling Performance of Cryogen Reclamation System for NMR Magnets

松本 拓也(神戸製鋼所); 永濱 秀明, 福山 和宏, 谷 直俊, 横山 彰一, 伊藤 聡(JASTEC)

MATSUMOTO Takuya (Kobe Steel, Ltd.); NAGAHAMA Hideaki, FUKUYAMA Kazuhiro, TANI Naotoshi, YOKOYAMA Shoichi, ITO Satoshi (JASTEC)

E-mail: Matsumoto.takuya-1@kobelco.com

1. はじめに

ヘリウムの世界的な需要増加と供給不足により、その価格高騰や入手困難な状況が続いている。その中で、NMR(Nuclear Magnetic Resonance)マグネットは液体窒素と液体ヘリウムを用いて超電導コイルを極低温状態に保持しているが、いずれも蒸発ガスを大気へ放出しており、定期的な補充が必要であることから、冷媒の持続可能な運用が求められている[1]。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、2023年4月より販売を開始した[2]。

JASTEC 製 NMR マグネットの一例と蒸発量の仕様値を Table1 に示す。大型の高磁場マグネットほど冷媒の蒸発量が多くなり、冷媒蒸発抑制装置の適用が望まれる。そこで、量産機として最も大きい 800MHz マグネットに本装置を搭載し、冷却特性などの評価を行った。

2. 蒸発抑制状態におけるヘリウム槽の熱負荷

本装置に求められる蒸発抑制能力は、蒸発ガス冷却がある通常の蒸発量から単純に決めることができず、蒸発ガス無し状態における熱侵入で検討する必要がある。蒸発有無における熱計算の概念図を Fig.1 に示す。蒸発抑制時はガス冷却の寄与が消失するため、ネックチューブ等からの熱伝導が増加する。さらに Gas Cooled Shield(GCS)の温度も上昇するため、ヘリウム槽への輻射熱も増加する。

これらの影響を考慮し、ヘリウム槽への熱侵入を計算した結果を Table1 の下段に示す。蒸発抑制時の蒸発量はガス冷却がある時と比べて、約 10 倍以上増える結果が得られた。

Table1 Liquid helium evaporation rate of NMR magnets.

Liquid helium evaporation rate	400MHz	600MHz	800MHz
Spec value	13.7 cc/h (0.01 W)	22.9 cc/h (0.02 W)	55 cc/h (0.04 W)
Calculated value at evaporation suppressed	292 cc/h (0.21 W)	358 cc/h (0.25 W)	530 cc/h (0.38 W)

3. 性能試験

大型マグネットへの適用検証のため、800MHz マグネットに搭載し評価試験を行った。抑制開始からの経過データを Fig.2 に示す。本装置はヘリウム槽の圧力が一定となるよう、冷凍機2ndステージに搭載したヒータ出力を制御している。抑制開始直後は、GCS温度が30Kに冷えており熱負荷が少なく、2ndステージのヒータ出力が1.1Wと比較的大きい。ガス冷却が無くなり、GCS温度が上昇するにつれ、2ndステージのヒータ出力は減少しており、ヘリウム槽への入熱が増加した分、冷凍機のヒータ出力が小さくなる状況が確認できた。なお、ヒータ出力は気圧変化にも影響を受ける。これはヘリウム槽の圧力制御を絶対圧ではなく大気圧差のゲージ圧で行っているため、気圧降下時は内部圧力が相対的に高くなり、ヒータ出力を下げて調整している。

GCS温度が約66Kで一定となった210h時点においても、ヒータ出力は0.7W程度を有しており、800MHz マグネットにお

いても液体ヘリウムの蒸発抑制が可能であることが確かめられた。

また、蒸発ガス冷却有無における熱負荷の差は、蒸発抑制開始時と GCS 温度安定時におけるヒータ出力の差に相当する。本試験で得られたヒータ出力の差分は 0.4W に対して、計算値(Table1 中下段の差)は 0.34W であり、おおよそ一致する結果が得られ、計算の妥当性も確認できた。

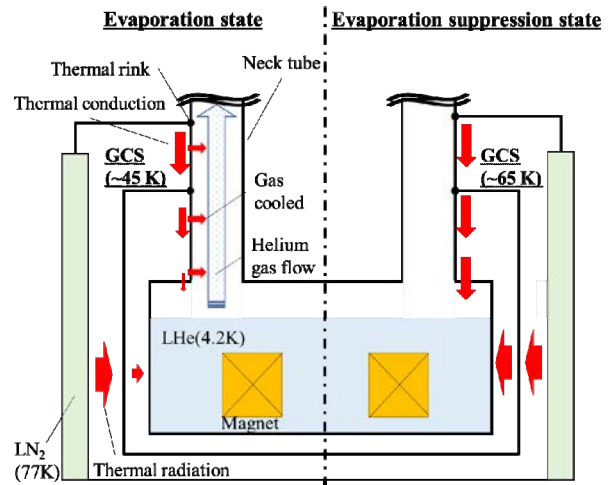


Fig.1 Schematic diagram of thermal calculation in NMR magnet. Left side is evaporation state, right side is evaporation suppression state.

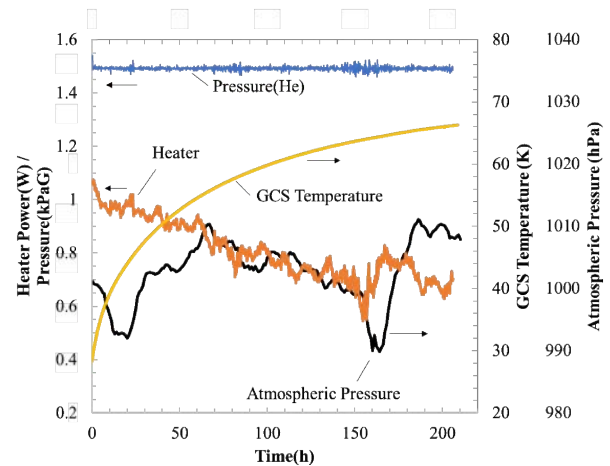


Fig.2 Cooling characteristics installed in 800MHz NMR magnet. Heater is attached to the second stage and Pressure is inside the helium chamber.

参考文献

- S. YOSHIDA: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 56, No. 3 (2021) p.135-141
- T. Matsumoto, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.105 (2023) p.33

CZ 法および EFG 法サファイアの極低温熱伝導率の比較

Comparison of cryogenic thermal conductivity of CZ and EFG sapphire

山田 智宏 (KEK)
YAMADA Tomohiro (KEK)
E-mail: ytomohi@post.kek.jp

1. 概要

サファイアはその硬度や機械強度、光特性の良さから、半導体分野や LED 基板、真空窓材など様々な場面で広く用いられている。さらに、電気絶縁体でありながら極低温での熱伝導特性が非常に高いことから、極低温用温度計の基板や超伝導磁石の電流リード用サーマルアンカーなどにも用いられている。一方で、サファイアには様々な結晶製法がありつつも、製法ごとの極低温熱伝導率の比較はあまり行われてこなかった。この度、京セラ株式会社(以下、京セラ)より CZ 法および EFG 法で製作したサファイアの提供を受け、高エネルギー加速器研究機構で 4K から 100K までの熱伝導率を測定した。その結果、CZ 法と EFG 法のサファイアでは熱伝導率に大きな違いはなく、実際の利用においては、その部品形状の製作に適した結晶育成方法を採用することが可能であることがわかった。

2. CZ 法と EFG 法の特徴

CZ 法(Czochralski Method)と EFG 法(Edge-defined Film-fed Growth Method)は、ともに引き上げながらサファイアの結晶を育成する方法であり、それぞれ以下のような特徴を持つ。
CZ 法: 丸型仕様(円板、円柱)に適している、面方位調整がインゴット単位で可能(工数少)、長尺化することでさらなる効率向上が可能。

EFG 法: 角型仕様(角板)に適している、育成速度が CZ 法と比べて速い(京セラでは)、任意の面方位で育成可能(切り出し不要)。

3. 測定セットアップ

測定サンプルの形状は、幅 7mm、厚み 1.5mm、長さ 150mm であり、CZ 法および EFG 法それぞれ 2 本ずつ測定した。また、7×150 面はすべて鏡面研磨仕上げである。

測定手法としては Fig.1 に示すような定常熱流法を用いた。サンプルの途中におよそ 100mm ほど離して 2 つの校正済み Cernox 温度計を設置し、最下部の温度勾配ヒーターでサンプル内に温度勾配をつけ、その温度勾配から熱伝導率を算出する。温度勾配ヒーターでの発熱量を P 、温度計間の距離を l 、サンプルの断面積を S 、2 つの温度計の温度差を ΔT とすると、熱伝導率 κ は以下のように求められる。

$$\kappa = \frac{P \cdot l}{S \cdot \Delta T}$$

サンプル全体は冷却装置(住友重機械工業製 GM 冷凍機 RDE-418D4)を用いて冷却し、ベースヒーターで全体の温度を調整しながら 4K から 100K まで熱伝導率を測定した。 ΔT はおよそ 500mK 程度である。

4. 測定結果

熱伝導率測定結果は Fig.2 のようになった。CZ 法および EFG 法で値に明確な違いは見られず、ピーク値はおよそ 20,000W/m/K@約 30K であった。10K 以下でも数 100W/m/K から数 1000W/m/K と非常に熱伝導率が良いことが分かった。

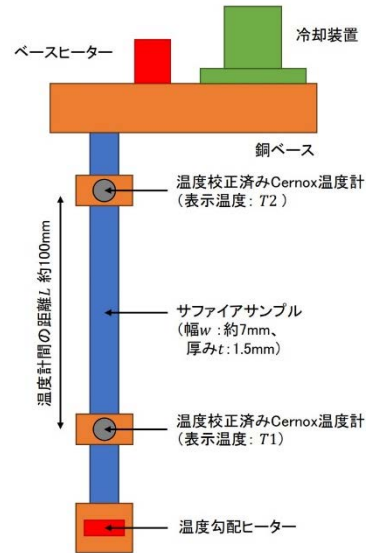


Fig.1 Schematic diagram of thermal conductivity measurement setup

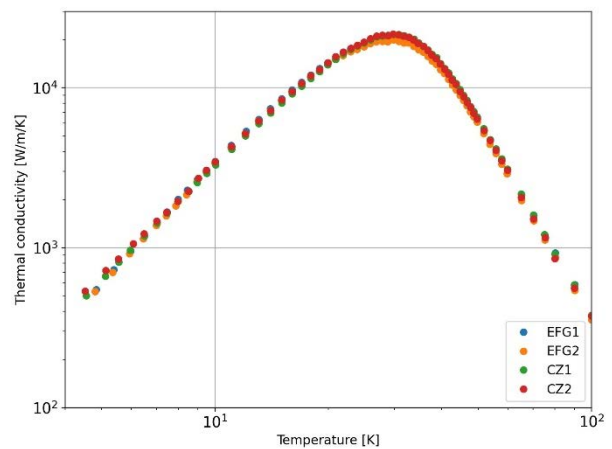


Fig.2 Measured thermal conductivity data

5. まとめ

CZ法とEFG法の2種類のサファイア(形状:幅7mm,厚み1.5mm,長さ150mm,京セラ製)について、4Kから100Kの熱伝導率を測定した。ピーク値は30K付近でおよそ20,000W/m/Kと非常に高く、また2種類の結晶育成方法で熱伝導特性の違いは見られなかった。サーマルアンカーなどの極低温伝熱体として用いる場合の伝熱特性は、CZ法やEFG法とどちらでも変わらず、それぞれの育成方法の得意な形状や製品の目的に合わせた方法を選択可能であることが分かった。

謝辞

本研究では京セラ株式会社からサファイアサンプルの提供を受けました。この場をお借りして感謝申し上げます。

InBiSn 系および Pb, Cd 含有 InBiSn 系低融点金属の低温域における電気輸送特性

Electrical Transport Characteristic of InBiSn and (Pb, Cd)-containing InBiSn Low Melting-point Alloys at Low Temperatures

松永 信之介, 武田 泰明, 夏目 恭平, 神谷 宏治(NIMS)

MATSUNAGA Shinnosuke, TAKEDA Yasuaki, NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji(NIMS)

E-mail: matsunaga.shinnosuke@nims.go.jp

1. はじめに

インジウム(In), ビスマス(Bi), 錫(Sn)から成る共晶金属は最低値が 60°Cになるほど低い融点を持つことが知られている。このような低融点金属は REBCO 線材に対するはんだ付けや REBCO コイルの含浸材といった用途で使われはじめています。その他、超伝導バルクのコーキング剤や超伝導接合材料として既に実績があり、実は本学会において馴染みのある材料である[1][2]。一方、低融点金属の低温域(4-270 K 程度)における諸特性は体系的に取得されていない。そこで、諸特性を整理すると共に不足するデータの測定に取り組んでいる。今回、典型的な低融点金属の電気輸送特性について調査したので報告する。

2. 調査対象

Table 1に今回調査した低融点金属(アサヒメタルグループ製)の一覧を示す。U-60, U-72, U-78, U-109, U-138 の5種は In, Bi, Sn のうち2元素または3元素から構成される共晶金属(InBiSn 系)である。U-48とU-80はさらに鉛(Pb)とカドミウム(Cd)を含有する。

3. 電気輸送特性の測定方法

測定には日本カンタム・デザイン(株)製の Physical Properties Measurement System DynaCool™ を使用した。室温から約 2.5 K までの温度で 10 mA の交流 4 端子法により電気抵抗を測定した。試料に対しては 9 T までの縦磁場を印加した。

試料は横 4 mm×縦 2.5 mm×長さ 9 mm 程度の直方体に成型し、4 mm 程度の測定長から電気抵抗率を評価した。寸法はノギスで直接測定した。それぞれの試料について、電気抵抗率の温度・磁場依存性を調査した。

4. 電気輸送特性データ

Fig. 1 に 10-300 K における電気抵抗率の温度依存性を示す。U-109 のみ 50 K 以上で比較的大きな電気抵抗率を示した。10 K 以下における縦磁場中の電気抵抗率を Fig. 2 に示す。InBiSn 系は無磁場で 4-7 K 程度の超伝導転移温度を示した。U-109 は 2.5 K 以上で超伝導転移は観測されなかった。U-48 と U-80 は典型的な鉛ビスマスはんだに似た超伝導特性を示し、転移温度・臨界磁場は InBiSn 系に比べて高い。

磁気抵抗効果は InBiSn 系において 9 T の縦磁場印加下で 1%以下であった。U-48 と U-80 は 50 K 以下に限り 9 T の縦磁場下で最大 40%の電気抵抗率の上昇がみられた。

謝辞

当研究の一部は JST 未来社会創造事業(JPMJMI18A3)および科学研究費助成事業(22K14482)の支援を受けて実施された。

物質・材料研究機構材料(NIMS)技術開発・共用部門(RNFS)創製・評価プラットフォーム強磁場計測ユニットのスタッフ各位の技術支援に対して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] M. Tomita, et al.: Nature, Vol. 421 (2003), pp. 517-520
 [2] 向山 晋一: 低温工学, vol. 55, no. 4 (2020), p. 255-261

Table 1 Investigated low melting-point alloys

Product	MP	Constituent elements
U-60	60°C	In, Bi, Sn (In-rich)
U-72	72°C	In, Bi
U-78	78°C	In, Bi, Sn (Bi-rich)
U-109	109°C	In, Bi
U-138	138°C	Bi, Sn
U-48	48°C	In, Bi, Sn, Pb, Cd
U-80	80°C	Bi, Sn, Pb, Cd

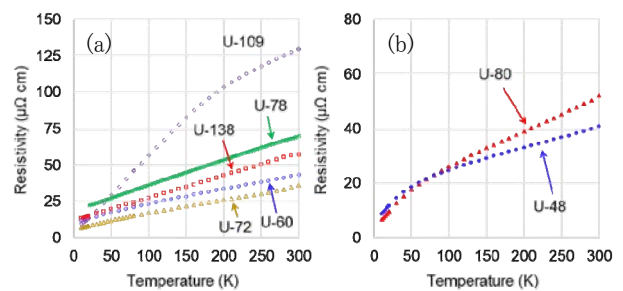


Fig. 1 Temperature dependences of electrical resistivity of (a) InBiSn and (b) (Pb, Cd)-containing InBiSn alloys.

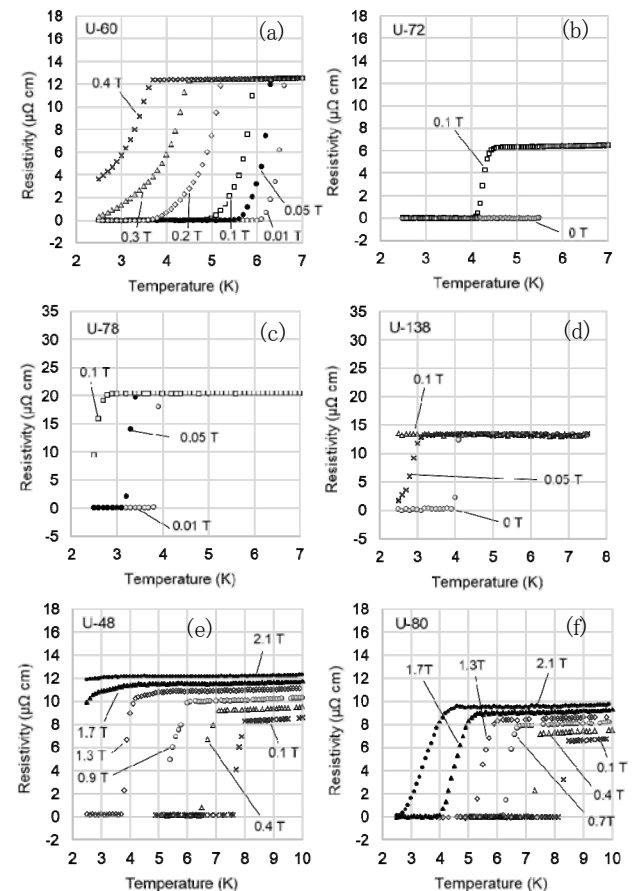


Fig. 2 Superconducting transition characteristics of certain low melting-point alloys: (a) U-60, (b) U-72, (c) U-78, (d) U-138, (e) U-48, and (f) U-80.

過冷却下での単層縦磁界直流超電導ケーブルの通電特性

Current-carrying characteristics of single-layer longitudinal magnetic field DC superconducting cable under supercooling

山口 柊平, 木内 勝, 濱本 拓郎 (九工大)

YAMAGUCHI Shuhei, KIUCHI Masaru, HAMAMOTO Takuro (Kyushu Inst. of Tech.)

E-mail: kiuchi@phys.kyutech.ac.jp

1. はじめに

超電導応用への利用が期待される RE 系コート線材でも、電流の通電方向と平行に磁界 B が加わる縦磁界下では、一般の横磁界と比べて臨界電流 I_c が増加する。この特性を利用した直流の電力輸送ケーブルの開発が進められている[1]。このような超電導ケーブルは、地中に埋設された断熱二重層の管路内に敷設して運用され、この管路内は減圧された液体窒素の冷却状態になる。従って、この温度下での縦磁界直流超電導ケーブルの特性の把握が重要になる。

これまでに、単層の縦磁界直流超電導ケーブルの内側導体を設計及び作製し、過冷却液体窒素下の通電特性評価を報告してきた[2]。ただし、線材劣化及びジュール熱の原因で、設計値の半分の電流容量しか得られていない。ここでは、ケーブル作製を見直し、再度ケーブルを作製し、過冷却窒素下での通電特性評価を行った。

2. 実験

ケーブル作製には、市販されている RE 系コート線材の中でも縦磁界下で大きい I_c が得られるフジクラ社製人工ピンなし RE 系超電導線材を用いた。線材幅は 4 mm で、液体窒素下で自己磁界中の I_c は 230 A 程度である。

はじめに RE 系コート線材の I_c の縦磁界特性を、液体窒素及び過冷却下で四端子法を用いて測定した。得られた I_c 特性を考慮して、フォーマ径が 10 mm の場合のケーブル軸に対する線材巻きつけ角度 θ を解析した[3]。得られた結果から、 $\theta = 5^\circ$ のときケーブルの電流容量 I_{ct} が最も大きくなったが、 $\theta = 10^\circ$ との違いは 4 A だったので、線材の巻き付けやすさを考慮して、ここでは $\theta = 10^\circ$ とした。

設計に基づいて作製したケーブルは、電流端子部を含む全長は 660 mm でケーブル部が 300 mm である。Fig. 1 に作製したケーブルを示す。ケーブル作製に用いた RE 系コート線材は 8 枚である。特に電流端子部の発熱を抑えるために、4 mm 幅の Bi-2223 の銀シーステープ線材を電流端子と RE 系コート線材の接続部に低温はんだで取り付けた。

通電特性評価は液体窒素過冷却容器内で、直流四端子法を用いて測定を行った。測定温度は液体窒素: 77 K と過冷却液体窒素: 67 K である。また、本ケーブルは内側導体のみなので、シールド層が作る縦磁界は Bi-2223 超電導マグネットを用いて加えた。ケーブルへのスイープレートは 10 A/s で、 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m を用いてケーブルの電流容量 I_{ct} を求めた。

3. 結果及び検討

Fig. 2 に 77 K と 67 K の自己磁界下での電界 E - 電流 I 曲線を示す。 E_c で決定した I_{ct} は 77 K で 1992 A、67 K で 3938 A となり、10 K の温度低下で 2 倍の電流容量になった。2 つの曲線はシャープな電圧の立ち上がりを示し、 $E = 5.0 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ V/m で決定した n 値は 31 と 33 で、67 K の方が若干大きな値になった。

Fig. 3 に I_{ct} の縦磁界依存性を示す。設計値を点線で示すが、実験結果とのよい一致が得られた。また、磁界の増加と共に I_{ct} が増加し、77 K では 0.15 T、67 K では 0.25 T ピークを持つことがわかる。自己磁界からピーク磁界までの I_{ct} の

増加率は、77 K で 3.1 %、67 K で 4.2 % 程度の増加であるが、0.1 T 近傍でも自己磁界からの増加が得られることが確認できた。

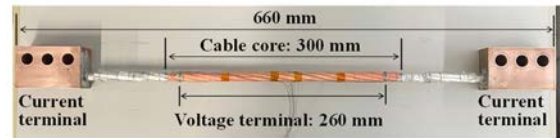


Fig. 1 Photograph of single longitudinal magnetic field DC superconducting cable.

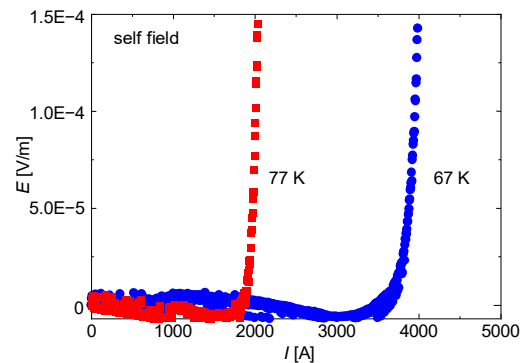


Fig. 2 Current vs. electric field curve at 67 K and 77 K.

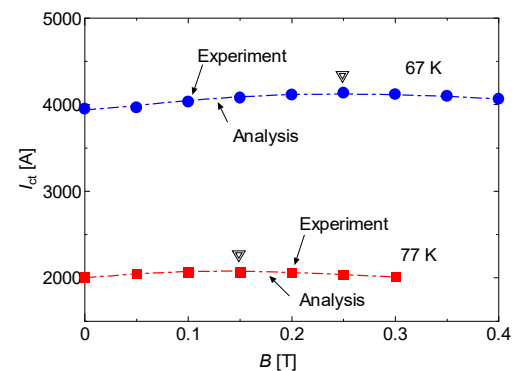


Fig. 3 Longitudinal magnetic field dependence of current-carrying capacity. Symbols show experimental results, and dashed lines show analysis values.

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費:21H01872からの助成を受けて実施した。

参考文献

1. T. Matsushita *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 125009 (8pp).
2. S. Yamaguchi, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p. 147
3. V.S. Vyatkin, *et al.*: Physica C 494 (2013) 135–139

超電導電力ケーブルにおける超電導部分の損失解析

Loss analysis of superconducting portions in superconducting power cables

野地 英樹 (都城高専)
 NOJI Hideki (NITMC)
 E-mail: noji@cc.miyakonojo-nct.ac.jp

1. はじめに

本研究では、4層導体+2層磁気シールドケーブル(フジクラ製) [1]を研究対象として交流損失解析を行った。このケーブルは 66 kV-5 kA 級ケーブルである。前回の発表では、通電電流 5 kA_{rms}のときの損失計算値が測定値より大きかったため、今回は次の3点を修正し再計算した:①臨界電流密度 J_c の磁束密度 B 依存性を考慮した、②ケーブルを構成する REBCO テープの各層における巻き付けピッチを調整した、③測定結果に合わせてテープの臨界電流値を修正した。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

電気回路モデル[2]により数式処理ソフト Mathematica を使ってプログラミングし、総当たり式アルゴリズムによりケーブル構成パラメーターを決定した。総当たり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、各層電流ができるだけ均一になるようなケーブル構成パラメーターを決定した。

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ーを初期値として、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 H formulation [3]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。 H formulation による計算を高速化するために、COMSOL の計算パラメーターを調整した。ケーブル各層の巻き付け方向は固定し、巻き付けピッチを変化させて3次元電磁界解析を行うことにより、各層の交流損失および層電流を算出し、最適なケーブル構成パラメーターを導出した。

3. 結果と考察

表1に、今回の計算に使用したケーブルの仕様と、導出した最適なケーブル構成パラメーター(超電導テープの巻き付け方向と巻き付けピッチ)を示す。また、図1にケーブルの通電電流に対する損失の特性を示す。フジクラの測定結果が白丸であり、今回の計算結果は実丸で示してある。前回の結果は、高電流側で計算値が測定値より高く、 $I_{con} = 5$ kA_{rms}で計算値が 4.9 W/m、測定値が 1.4 W/mであった。それに対して今回

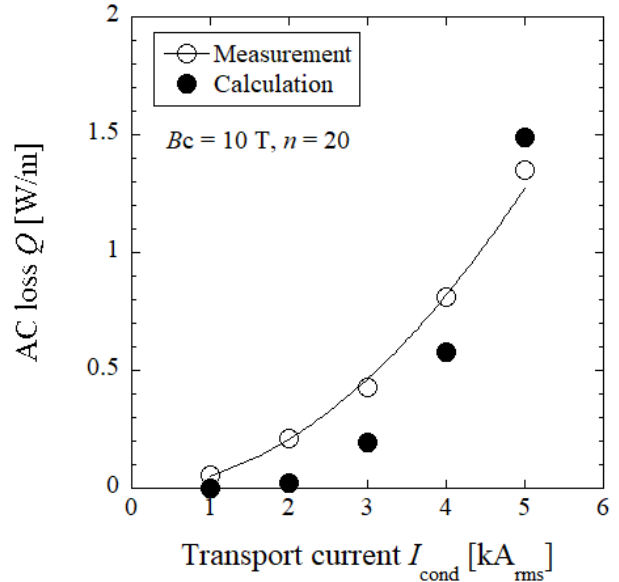


Fig.1 AC loss vs. transport current characteristics

の計算値は 1.5 W/mと測定値とほぼ一致している。ケーブルの損失は、低電流側では誘電体損失等の損失が優位であり、超電導部分の損失は高電流側である 5 kA_{rms}で優位であるから、今回の計算結果は正しいものと判断できる。

各層の損失を比較してみると、前回の結果では第6層の損失が支配的であり、これがケーブル全体の損失を増加させていた。しかし今回の結果では、導体層では各層の損失は差が小さく、シールド層では各層の損失が小さくなっていた。これがケーブル全体の損失を低減させているものと考えられる。

4. おわりに

通電電流 5 kA_{rms}の損失は超電導部分の損失が優位であり、ケーブルの損失を低減するためには超電導部分の損失を低減する必要がある。次回は、超電導部分の損失を低減する方法について報告する。

参考文献

1. M. Daibo et al., *Physics Procedia*, 58 (2014) 314
2. H. Noji et al., *Physics Procedia*, 58 (2014) 322
3. R. Brambilla et al., *Supercond. Sci. Technol.*, 20 (2007) 16

Table 1 Specifications of high-temperature superconducting power cable for calculation

Layer number m	Inner diameter D_m [mm]	Tape numbers N_m	Critical current I_{cm} [A]	Helical pitch P_m [m] (helical direction)
1	20.5	14	3,644	0.14 (S)
2	22.0	14	3,644	0.99 (Z)
3	23.5	15	3,905	0.15 (Z)
4	25.0	15	3,905	0.08 (Z)
5	37.0	25	6,038	0.30 (S)
6	38.5	28	6,762	0.38 (Z)

液体水素ポンプへの適用を目指した超電導同期モータにおける 常電導同期モータとの比較検討

Comparison of Superconducting Synchronous Motor with Normal Conducting Synchronous Motor for Application to Liquid Hydrogen Pump

河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)

KAWANO Ryosuke, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: kawano.ryosuke23@ae.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年燃料として注目されている液体水素は極低温(20 K)の冷媒でもあり、超電導モータでサブマージドモータポンプを構成して液体水素浸漬冷却下で運転することで、従来よりも高効率な燃料供給システムを構築できる可能性がある。モータの超電導化に際しては、出力 750 W においては重量や発熱の面で軸方向に長い形状が有利であることを既に報告した[1]。

これまでの結果を基に、引き続き重量と発熱の2点に着目したうえで、液体水素浸漬下で運転する電機子超電導同期モータについてより具体的に仕様の検討を行った。また同出力の常電導同期モータの設計を行った。超電導と常電導の両モータモデルについて、有限要素法を用いた二次元電磁界解析を行い、それを基に超電導化による利点を考察した結果を報告する。

2. 電機子巻線の電流密度と電流の限界値

電機子巻線において、通常の銅線を用いた常電導モータでは電流密度 25 A/mm² 程度の設計が限度である。一方で、MgB₂は Hyper Tech Research Inc.の直径 0.84 mm の線材を例にとると、超電導部分における 1 T の磁界印加時の臨界電流密度は 20 K で 3150 A/mm² と極めて大きい値を取る[2]ことから、電流値を大きくすることが可能である。通電可能な電流の限界値を考えると、外径 1.1 mm の銅線では電流密度 23.8 A である一方、MgB₂線材の臨界電流は 240 A と 10 倍近い値を取る。本研究で検討する液体水素ポンプ用モータは自動車への搭載を想定しているため、車載用バッテリーの容量(DC 24 V)によって駆動電圧が制限される。そのため、電流の限界値は実現可能な出力と密接に関係している。

3. モータ仕様と電磁界解析

液体水素を冷媒に用いる MgB₂ 電機子巻線を適用した出力 3 kW のモータを設計した。モータの仕様を Table 1 に示す。回転数は自動車用液体水素ポンプに必要な 290 g/min の吐出圧[3]および超電導モータポンプ試験の先行研究[4]を参考にした。永久磁石は残留密度を 1 T とするが、20 K まで冷却すると 5 %ほど性能が悪化することが知られている[5]。そのため、本解析においては残留密度 0.94 T の永久磁石をモデル化して適用した。

解析においてはトルクが定格値かつ電圧値が制限を超えていないことを確認した上で、鉄損値や重量の計算を行った。この超電導モータにおいては鉄損が損失の大部分を占める[1]ため、鉄損の値に注目してモデルの比較を行った。Fig. 1 に示す超電導モータの場合の鉄損は 24.8 W である一方、交流損失の値はわずか 0.3 W ほどである。液体水素の許容発熱量[1]から運転可能時間を計算すると 5.2 時間となり、この時のアクティブマスは 10.5 kg である。

今回設計したモータの仕様は、従来の銅線の電流の限界値 23.8 A と駆動電圧 24 V では実現不可能な値となっており、この仕様のモータは超電導線材を用いることで初めて達成できると言える。

4. まとめと今後の課題

本研究では、液体水素ポンプ用のモータとして 3 kW の出力を持つ電機子超電導同期モータの設計を行い、電磁界解析から損失と重量について検討を行った。超電導線材を電機子巻線に用いたモータとして、仕様を満足する複数のモデルが設計可能であるため、今後は発熱と重量が与える影響を明確にし、液体水素ポンプ用のモータ仕様として最適な設計を考えていく必要がある。

参考文献

1. R. Kawano, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.68.
2. Hyper Tech Research Inc. MgB₂ and Nb₃Sn brochure rev 10, Jun. 2019.
3. T. Nose, et al.: *J. Hydro. Ene. Sys. Soc. Jpn.* Vol. 22 No. 1 (1997) pp.39-45.
4. K. Kajikawa, et al.: *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.* Vol. 51 No. 5 (2016) pp.155-163.
5. Y. Sakurai, et al.: *Proc. of 29th IEEE International Symposium on Space THz Technology*. 2018.

Table 1. Motor specifications

Rated output	3.0 kW
Rotation speed	1350 rpm
Number of poles	4
Line to line voltage (maximum)	24 V
Cooling temperature	20 K
Armature winding	MgB ₂ wire
Field magnet	NdFeB

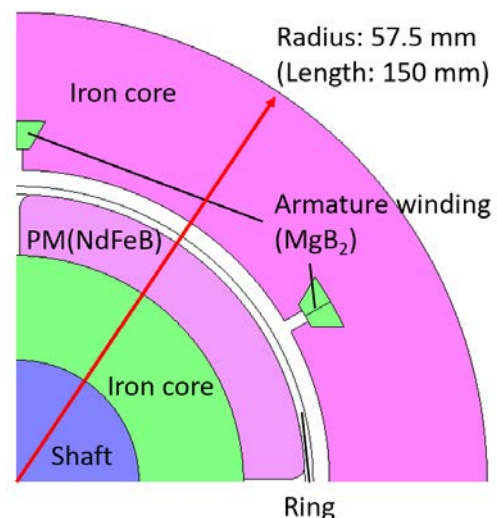


Fig. 1. A superconducting motor configuration

超伝導テープ線幅広面に垂直な変動磁界による 並列導体内電流分布の均流化効果の検証

Verification of the effect to make uniform current distribution in parallel conductors due to a changing magnetic field perpendicular to a flat face of superconducting tape

吉田 尚貴, 中川 心平, 安藤 綜一郎, 川越 明史(鹿大); 宮崎 寛史, 三浦 峻, 岩熊 成卓(九大)

YOSHIDA Masataka, NAKAGAWA Shinpei, ANDO Soichiro, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ);

MIYAZAKI Hiroshi, MIURA Syun, IWAKUMA Masataka (Kyusyu Univ)

E-mail: k0534132@kadai.jp

1. はじめに

超伝導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。この導体では、テープ線形状やコイル形状等の制約を考慮した最適な転位位置・回数を求めることが一つの課題となっている[1]。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、主として、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。電気的中性線の位置がテープ中心からシフトするために、垂直磁界は電流分布に影響を及ぼす。これまで、数値解析によって、この影響を調べた[2]。今回は、実験的な検証を行った結果を報告する。

2. 垂直磁界が電流分布を均流化するメカニズム

Fig.1(a)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を示す。(b)、(c)はそれぞれ、テープ線の磁束密度分布を示し、(b)は輸送電流なし、(c)は電流ありで、偏流している状態を示す。折れ曲がり点を線材長手方向に結んだ線は、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(c)では、各テープ線の電気的中性線は揃わないため、破線で示した範囲に外部磁界が鎖交する。この結果、テープ線の電気的中性線が揃う方向に遮蔽電流が流れ、均流化する。

3. 実験方法

Fig.2 に実験装置を示す。サンプルコイルとして、Bi2223 テープ線材 3 本の並列導体を用いて、レーストラック状のダブルパンケーキコイルを作製した。中央で転位を施している。転位は、最外側と最内側のテープの入れ替えのみとし、3 本のテープを均流化させるには不十分なものとした。このサンプルに交流電流(90A, 10Hz)を行い、テープ面に垂直になるように変動磁界を印加し、同時掃引を行った。変動磁界の振幅は 0.1T, 周波数は 10Hz とした。このときに各テープ線の電流をログスキャーコイルで測定した。

4. 実験結果

測定結果を Fig.3 に示す。(a)がサンプル電流のみ、(b)が同時掃引の結果である。外部磁界がない場合は、電流分布が不均一になっている。tape2 は 3 本のうち、2 本に挟まれた真ん中のテープを表している。一方で、外部磁界が印加されると、3 本の線材の電流分布はほぼ均流化していることがわかる。このことから、複数の並列導体に対するテープ面垂直方向の外部磁界は、導体間の電流分布を均流化させる効果があることが実験的検証によって明らかになった。

参考文献

1. A.Kobun, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.62
2. M. Oshikawa, et al.: Abstract of CSSF Conference, Vol. 105 (2023) p. 107

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。

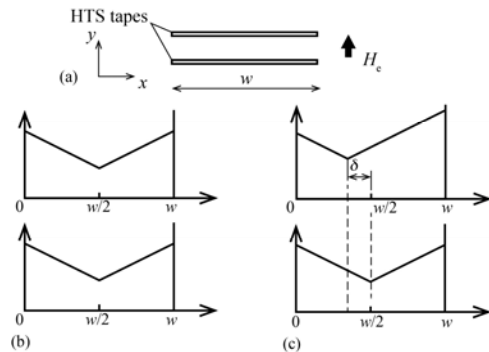


Fig. 1 The magnetic flux density distributions and the electrical neutral line in each tape in the parallel conductors composed of two tapes. b and c represent two cases without transport current and with current, respectively.

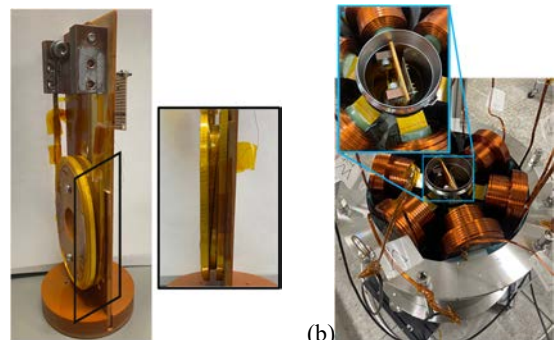


Fig.2 (a) Sample coil, (b) Experimental setup. The Sample coil was wound with the parallel conductor composed of 3 Bi2223 tapes in a racetrack shape. The external magnetic field was applied to the sample coil. The magnetic field direction is perpendicular to the flat face of the tapes in the sample coils.

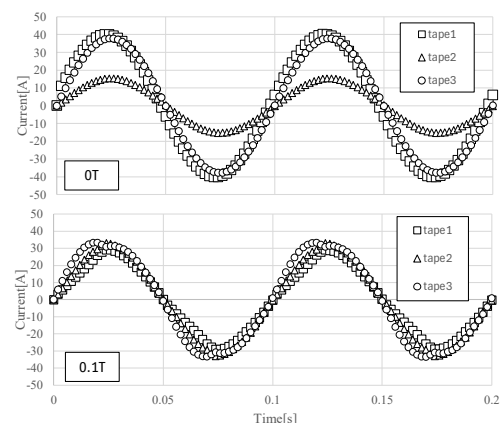


Fig. 3 Experimental Results. Current distributions between three tapes under external magnetic fields, a and b represent results @0T, 0.1T, respectively.

直径 140 mm のリング状積層超電導体と永久磁石を用いた超電導磁気軸受の基礎特性

Basic characteristics of magnetic bearings with a 140 mm diameter ring-shaped laminated superconductor and a permanent magnet

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

モータをはじめとした回転機の軸受における機械的摩擦は機械損の要因となり、サブマージドポンプ等では直接的な発熱源の一つである。この様な中で超電導磁気軸受は機械的な接触なしで回転が可能であり機械損の低減が期待できる。

我々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φ46 mm の磁気軸受を構成し、回転特性試験結果等を発表してきたが[1]-[2]、本発表では、φ140 mm と大型の磁気軸受に関して基礎実験を行った結果を報告する。

2. φ140 mm の積層超電導体による磁気軸受の概要

Fig. 1 に、今回製作した磁気軸受の概念図と構成部品を示す。超電導線材は Faraday Factory 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 (安定化銅層なし)。これをリング状に巻き、FRP 等で補強して内径 64 mm、外径 140 mm に成型した積層超電導体 (Fig. 1 (a)) と、径方向着磁かつ内径 48 mm、外径 60 mm のリング磁石 (PM) で構成されている。リング PM の表面磁束密度は約 0.25 T である。

3. 電磁力及び回転特性の測定結果

Fig. 2 に示す様に、液体窒素 (77 K) への浸漬環境中で ±9 mm の範囲を、リング PM のみラックアンドピニオンで静的に上下させ、ロードセルで測定した結果、プラス方向で最大 41.7 N、マイナス方向で最大 40 N のスラスト力が得られた。続いて Fig. 3 (a) に回転試験を行う実験装置の概要を示す。基本的な構成は以前の装置 [1]-[2] と変わらないが、構成する積層超電導体とリング PM のサイズが大きくなったことに伴い、治具等は前回の物よりも大きい。そして Fig. 3(b) に示す様に回転試験の結果、多少の速度変動があるものの、1800 rpm で回転していることが分かる。

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リング PM で φ140 mm の磁気軸受を構成し、基礎特性の測定を行った。

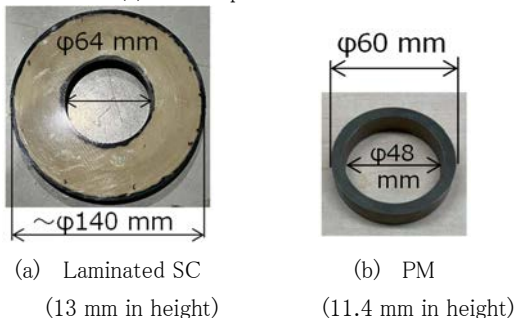
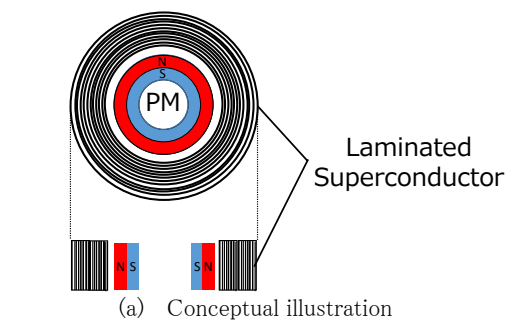


Fig. 1 A superconducting (SC) magnetic bearing

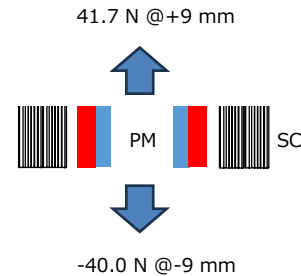
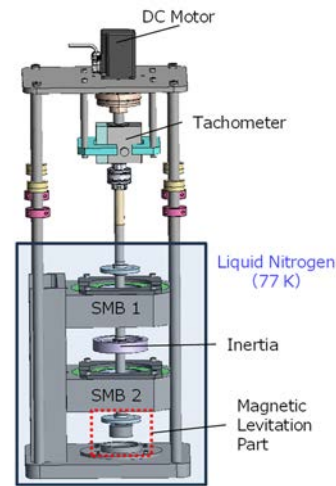
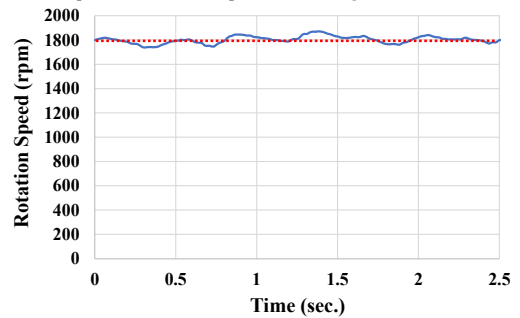


Fig. 2. Thrust force measurement results of a magnetic bearing



(a) Experimental setup for rotating characteristics



(b) Rotation speed as a function of time

Fig. 3. Experimental result of rotation characteristics

磁気軸受1個で最大約 40 N のスラスト力が得られ、さらに 1800 rpm で回転することを確認し、成立の可能性を示した。

今後は回転子に搭載してより実際の回転機に近い状態で実験を行っていく。

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. Y. Terao, et al.: *TEION KOGAKU*, Vol. 58, Issue 5 (2023) pp. 245-251.
2. Y. Terao, et al.: *Physica C*, Vol. 614 (2023) p. 1354401.

重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの 3次元コイル形状設計

Design study of three-dimensional coil configurations for a superconducting magnet
with active shielding in a heavy ion rotating gantry

尾花 哲浩 (NIFS)

OBANA Tetsuhiro (NIFS)

E-mail: obana.tetsuhiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

QST 病院にて現在稼働中の重粒子線用回転ガントリーには、鉄ヨークを用いた超伝導マグネットが使用されている[1]。マグネットの重量は鉄ヨークが支配的となり、1台のマグネット重量は数トンになる。本回転ガントリーでは、10台のマグネットを使用しているため、数10トンの重量物が強固なフレームに搭載された状態となり、非常に困難な制御が求められている。そこで、マグネットの軽量化により、回転ガントリーの制御系と支持構造を簡素化するため、鉄ヨークを使用しないアクティブシールド型超伝導マグネットの設計研究を進めている[2,3]。本講演では、アクティブシールド型超伝導マグネットのための3次元コイル形状の設計研究について発表する。

2. 3次元コイル形状

アクティブシールド型超伝導マグネットは、ダイポールコイルの外周にアクティブシールドコイルを配置した構造である。各コイルには、径1mm程のNbTi素線を使用する。Table 1に、各コイルの詳細を示す。本研究では、2次元での最適化設計によって得られたコイル断面(Fig.1)を基に、3次元コイル形状の設計を行った。その際、コイル長による磁場分布への影響を調べるために、コイル長が異なる3種類のコイル形状を設計した。コイル長は、それぞれ、1m, 1.5m, 2mである。Fig.2に、1層目ダイポールコイル(コイル長:1m)の平面図を示す。

3. 磁場計算結果

3次元形状設計によって得られたダイポールコイルとアクティブシールドコイルを用いて、磁場計算を行った。Fig.3に、ダイポールコイルとシールドコイルの長手方向における磁場分布をコイル長ごとに加算した結果を示す。コイル長の異なる3種類のコイルの磁場分布を比較すると、コイル電流が同じでもコイル中心($z=0$ m)での磁場の強度が異なる。また、コイル巻線内の磁場の均一性も異なる結果となった。

マグネットの径方向における漏れ磁場、及びコイルの設置誤差による電磁力への影響等について、学会当日に報告する。

Table 1 Details of the dipole and the shielding coils.

	Dipole coil	Shielding coil
Inner radius [mm]	90	300
Outer radius [mm]	210	350
Layers	61	25
Turn	6954	3000
Coil current [A]	217	249

謝辞

本研究は、JSPS科研費19K04364とパワーアカデミーの助成を受けたものです。

参考文献

1. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.104

2. T. Obana : IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 32 (2022) 4400304
3. T. Obana : IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 34 (2024) 4401105

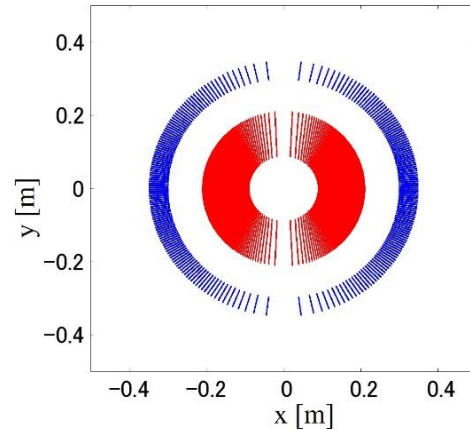


Fig. 1 Cross-section of the superconducting coils for the rotating gantry. The inner and outer coils are the dipole and the active shielding coils, respectively.

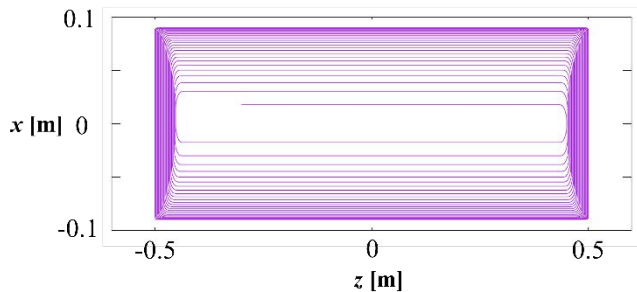


Fig. 2 The top view of the first layer dipole coil.

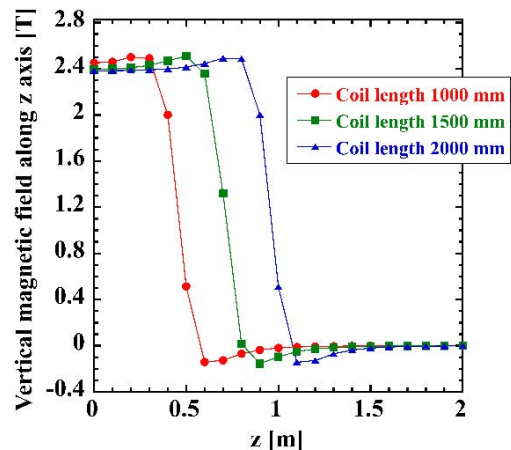


Fig. 3 The calculation results of summing the vertical (y-axis) magnetic field distributions along the z-axis of the dipole and shielding coils for each coil length.

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(2024 年春): 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの 数値計算に基づく励磁特性解析・評価

Development of REBCO coil system for Skelton Cyclotron (Spring 2024): Numerical analysis
and evaluation of excitation characteristics of
a 1/2-scale demonstration no-insulation REBCO coil system

折原 菜月, 石山 敦士(早大); 野口 聡(北大); 植田 浩史(岡山大)
ORIYHARA Natsuki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
NOGUUCHI So (Hokkaido University); UEDA Hiroshi (Okayama University)
E-mail: no_n2k10@akane.waseda.jp

1. はじめに

標的 α 線核医学治療に用いる α 線放出 RI (^{211}At) の安定製造を可能とする「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を進めている。本装置は、粒子加速に必要な磁場を空芯無絶縁 REBCO コイルシステムのみで発生させる。しかし、無絶縁 REBCO コイルでは、特有の現象である遮蔽電流磁場と励磁遅れが同時に発生し、磁場精度を乱す原因となる。そこで、上述の 2 つの現象を同時に考慮するため、回路解析のみに基づく新たな数値解析手法を開発し[1]、試作した 1/2 スケール小型実証モデルコイルシステム (Fig.1)[2] の励磁特性実験と解析結果を比較・検討した。

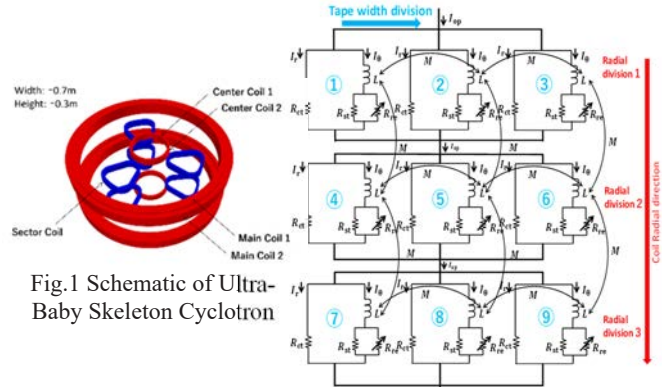


Fig.1 Schematic of Ultra-Baby Skeleton Cyclotron

Fig.2 Proposed bidirectional circuit

2. 双方向分割回路型解析手法

本解析手法では、磁束侵入と遮蔽電流磁場を考慮するため、パンケーキコイルを半径方向に分割するだけでなく、REBCO テープ幅方向にも分割している。なお、今回の解析では、コイル半径方向に 5 分割、REBCO テープ幅方向に 7 分割した。そして、Fig.2 に示すように各要素に等価回路を割り当て、各要素において成立する以下に示す回路方程式(1), (2), (3)を全要素で素連立して解く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。これにより、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)により表現することで、励磁遅れと磁束侵入の影響を同時に考慮している。

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

$$\sum_{i=1}^{div_z} (I_{\theta i} + I_{cti}) = I_{op} \quad (2)$$

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

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

3. 解析結果例

層間電気抵抗 R_{ct} をパラメータとして、掃引速度 0.083A/s で 100A まで励磁したときの挙動の計算例として、上段メインコイルと下段メインコイルの両端電圧波形を実験と比較した結果を Fig.3 と Fig.4 に示す。これらを見ると、上段メインコイルでは $R_{ct} = 700 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、下段メインコイルでは $R_{ct} = 1000 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ としたときに実験波形を良く再現できていることがわかる。他のコイルについても同様に、コイル両端電圧波形の比較から、各コイルの層間電気抵抗 R_{ct} を推定できる可能性があることがわかった。HTS-SC 用無絶縁 REBCO コイルシステムのビーム加速面の発生磁場分布の時間変化や劣化発生時の電磁的・熱的挙動を正確に予測するためには、層間電気抵抗値の推定が重要であり、そのために本解析手法が有効となると考える。

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

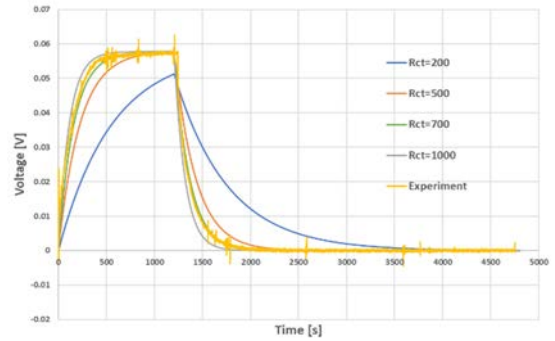


Fig.3 Voltage of upper main coil

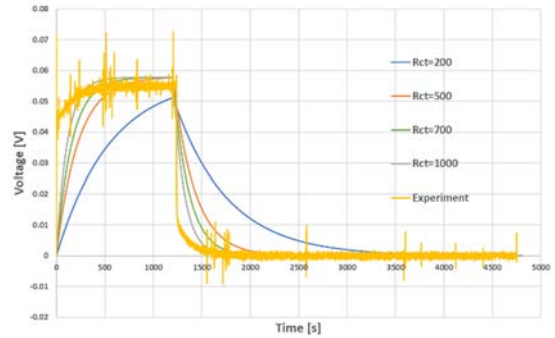


Fig.4 Voltage of under main coil bidirectional circuit

参考文献

- S.Ueda, et al., IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.31, 4601405, 2021
- Yuta Miyake, et al., "Numerical Evaluation on Mechanical Behavior of No-Insulation REBCO Pancake Coils in Small-Scale Model of Skeleton Cyclotron," IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 32, NO. 6, SEPTEMBER 2022.

液体水素冷却高温超電導発電機の開発 —プロジェクト概要—

Development of Liquid Hydrogen Cooled High-Temperature Superconducting Generators —Project Overview—

小笠原 敦, 小畑 慶人, 石見 佳紀, 三浦 英明, 殿岡 俊(三菱電機);

大屋 正義(関西学院大); 白井 康之(京大); 寺尾 悠(東大);

坂本 織江(上智大); 岡井 敬一, 田口 秀之, 小林 弘明(JAXA)

OGASAHARA Atsushi, OBATA Keito, IWAMI Yoshiki, MIURA Hideaki, TONOOKA Shun (Mitsubishi Electric Corp.);

OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.); SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); TERAU Yutaka (Univ. of Tokyo);

SAKAMOTO Ori (Sophia Univ.); OKAI Keiichi, TAGUCHI Hideyuki, KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)

E-mail: Ogasahara.Atsushi@ak.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体水素冷却高温超電導発電機の社会実装に向け、NEDO 先導研究「液体水素冷却高温超電導発電機の開発」(2022~2024 年度)を実施している。液体水素で超電導界磁コイルを冷却し、蒸発したガスは常電導電機子を冷却した後、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]。研究項目は、「高強度コイル化技術の開発」「超電導発電機システムの開発」「高温超電導発電機の実用化検討」の3項目である。本報では、各項目の概要を紹介する。

2. 高強度コイル化技術の開発

600MW 級発電機の回転子を 3600rpm で回転させた際に発生する遠心力約 $8000 \times g$ (圧縮応力は 50 MPa 相当)に耐える高強度な REBCO コイルを開発した。前報[2]では 73~164 MPa でコイル最内層が座屈し、超電導特性が劣化した。この結果から、応力支持ができるコイルケースを小型コイルとデモ機用コイル向けに試作し、液体窒素中でコイル全面に 50 MPa を印加しても、コイルに劣化は生じないことを確認した[3][4]。

液水供給停止時におけるコイルの通電継続時間を検証した。コイルに対し液体水素の液面を下げた際の温度変化を測定した結果、液体水素冷却環境下では REBCO コイルが液面から露出しても、通電を継続できる可能性があることが分かった[5]。

3. 超電導発電機システムの開発

10kW 級・1800rpm 回転の液体水素冷却高温超電導発電機デモ機を試作し、JAXA 能代ロケット試験場において発電実証を行う予定である[6]。300 ターンのレーストラック型ダブルパンケーキコイルを4個配置して4極の界磁巻線とする。本回転子を 1,800 rpm で回転させ、10 kW 級の発電検証を行う。発電デモ機の製作は完了しており、工場出荷試験を実施後、JAXA 能代ロケット試験場に持ち込み、無負荷試験、三相短絡試験、定格運転試験を予定している[7]。

超電導発電機要素技術の研究では、これまでにないリング状に巻いた超電導線材と永久磁石による直径 140mm 以上の超電導軸受を試作し、液体窒素中 (77 K) でスラスト力特性と 1,800rpm での回転特性を検証の結果、上記構成の超電導軸受が成立する可能性が示された[8]。

4. 高温超電導発電機の実用化検討

高温超電導発電機の実用化に向け、600MW 級発電機の概略設計を実施した。設計結果を表 1 に示す。常電導体を用いた従来の発電機と比較して、発電機効率は約 0.3 ポイント向上した。定格時の電流負荷率を 70%(低温超電導発電機では 60%)とする設計とすることで超電導発電機のコスト削減を図った。併せて、液体水素冷却高温超電導発電機の実用化に向けた技術課題をまとめた。

超電導発電機を電力系統へ導入した際の、従来機に対する優位性を定量化した。臨界事故除去時間と限界送電電力を系統解析で算出し、系統安定性のために超電導発電機に要求される仕様を得た。

液体水素冷却の高温超電導発電機は、航空機推進への応用が期待される。推進用電動モータの高効率化・軽量化にむけ燃料として消費する液体水素の冷熱を用いた冷凍機レス全超電導発電機を想定し、水素ガスタービンと発電機のモデルを作成して熱収支を評価した。その結果、燃料として消費する液体水素燃料で超電導冷却量を賄うことが出来る設計・構成を見出すことが出来た。

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

- Y. Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1 (2020) pp. 44-52
- K. Obata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.62
- M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 107 (2024) 2A-a03
- K. Obata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 107 (2024) 2A-a04
- Y. Ishida et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 106 (2022) 1P-p18
- M. Ohya et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 104 (2022) 1A-p02
- M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 107 (2024) 2A-a02
- Y. Terao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 107 (2024) 1P-p10

Table 1 Specifications of 600MW-class high-temperature superconducting generators

Output	600MW
Voltage / Current	24kV/16kA
Synchronous reactance	0.6p.u.※
Outer diameter of rotor	1100mm
Length of magnetic shield	2600mm
B_{max}	5.0T
Current load factor at rating	70%
Efficiency of generator	99.4%

※The base power value is 667MVA.

液体水素冷却高温超電導発電デモ機の開発状況

Development Status of Liquid Hydrogen Cooled High Temperature Superconducting Power Generation Demonstrator

大屋 正義(関学); 殿岡 俊, 小笠原 敦, 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)

OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.);

TONOOKA Shun, OGASAHARA Atsushi, MIURA Hideaki, OBATA Keito (Mitsubishi Electric);

TERAO Yutaka (Univ. of Tokyo); SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); KOBAYASHI Hiroaki, OKAI Keiichi (JAXA)

E-mail: Masayoshi-Ohya@kwansei.ac.jp

1. はじめに

NEDO 先導研究において、液体水素冷却高温超電導発電機の研究開発を行っている。液体水素で超電導界磁コイルを冷却し、蒸発したガスは常電導電機子を冷却した後、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回転励磁検証を行う予定である[2]。本報では、発電デモ機の設計および製作状況について報告する。

2. 発電デモ機設計

液体水素冷却高温超電導発電デモ機の概要を図1に、諸元を表1に示す。回転子の界磁コイルを超電導化して液体水素で直接冷却する界磁超電導型発電機であり、300 ターンのレーストラック型ダブルパンケーキコイルを4個配置して4極の界磁巻線とする。本回転子を1,800 rpmで回転させ、10 kW 級の発電検証を行う。

回転する液体水素槽の外径が 263 mm、静止する真空槽の外径が 316 mm、固定子の外径が 480 mm である。今回は外クライオを静止させるため、渦電流対策として FRP 製とした。なお、固定子には既存の常電導電機子コイルを採用した。

3. 発電デモ機製作状況

超電導界磁コイルの諸元を表2に示す。150 ターンのシングルパンケーキコイル2枚を接続し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。直線部の長さは 200 mm、定格電流値は 63 A である。使用した線材は、Faraday Factory Japan 社製の 4 mm 幅の REBCO 線材であり、臨界電流 (I_c) の仕様は 150 A 以上である。購入した線材は全て TapeStar 装置を用いて受入検査を行い、合格したロットのみをコイル製作に使用した。ダブルパンケーキコイル製作完了後に、液体窒素冷却下で測定した各コイルの I - V 特性を図2に示す。縦軸のコイル電圧は、所定の通電電流値でホールドした際の時間平均値を示している。例えば、Coil 1 に使用した線材の I_c は約 200 A であり、予想されるコイルの I - V 特性とほぼ一致した。これらのコイルはヒートサイクル試験を実施した後に回転子に組み込んだ。

液体水素槽までの組立が完了した後、0.1 MPa のヘリウムガスを充填して気密試験を行い、漏れがないことを確認した。次に、回転試験を行ってバランス調整した結果、1,000 rpm 回転時の残留不釣合いを等級 G2.5 以下に収めた。さらに、真空槽組立後に気密性を確認した。現在は、能代ロケット試験場へ出荷する前の最終回転検証および冷却試験を実施中である。

4. まとめ

10 kW級の発電検証を行うため、液体水素冷却高温超電導発電デモ機の製作を行っている。4極の超電導界磁コイルを製作し、液体窒素冷却下で通電特性を検証した。本コイルを組み込んだ回転子を組み立て、気密試験および回転バラ

ンス試験を完了した。現在は、出荷前の最終回転検証および冷却試験を実施中である。

Table 1 Specifications of HTS power generation demonstrator

Output power	10 kW
Rotation speed	1,800 rpm
Number of poles	4
Field coil	REBCO (LH2 cooling)

Table 2 Specifications of field coil (1 pole)

Width of REBCO wire	4 mm
Effective length of double pancake coil	200 mm
Turn number of double pancake coil	300
Rated current	63 A

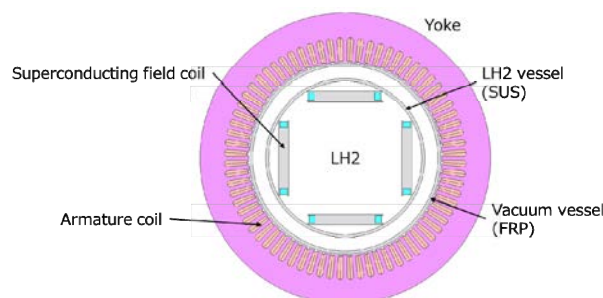


Fig.1 Illustration of HTS power generation demonstrator

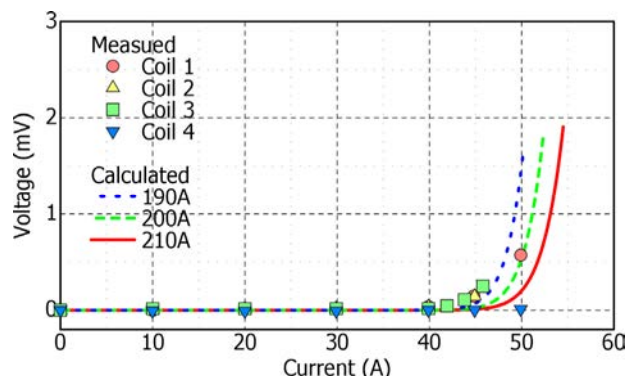


Fig.2 Transport current result of field coils immersed in LN2

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

- Y. Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1 (2020) pp. 44-52
- M. Ohya et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 104 (2022) 1A-p02

高温超電導コイル圧縮時の可逆的臨界電流特性低下原因の究明

Investigation of reversible degradation of critical current characteristics during compression of high-temperature superconducting coils

大屋 正義, 村田 将一郎, 久保田 優志(関学); 三浦 英明, 小畑 慶人(三菱電機)

OHYA Masayoshi, MURATA Shoichiro, KUBOTA Yushi (Kwansei Univ.); MIURA Hideaki, OBATA Keito (Mitsubishi Electric)

E-mail: Masayoshi-Ohya@kwansei.ac.jp

1. はじめに

NEDO 先導研究において、液体水素冷却高温超電導発電機の研究開発を行っている。液体水素で超電導界磁コイルを冷却し、蒸発したガスは常電導電機子を冷却した後に水素ガスタービンに送って発電するシステムの構築を目指す[1]。大型で高速回転する高温超電導界磁コイルの実現に向けた課題の1つは、REBCO 線材およびコイルの機械的な脆弱性である。600 MW 機において遠心力によって発生する推定圧縮応力 50 MPa に対し、先行研究では 10 MPa 程度から通電特性が可逆的に低下することが報告されており[2]、原因の究明に取り組んだ結果について報告する。

2. コイル諸元

超電導線材の緒元を表 1 に示す。フジクラ社製の REBCO 線材で、内層にフッ素コートポリイミドテープ、外層にポリイミドテープが突き合わせで巻かれている。

製作したダブルパンケーキ (DP) コイルの緒元を表 2 に示す。SUS 製の巻枠の内周に銅テープを張り付けて内周電極とした。シングルパンケーキ (SP) コイル間には厚さ 1 mm の FRP 仕切板を挿入した。コイルはエポキシ樹脂等で含浸はせず、コイル外周に半田付けした電流リードを SUS ケースの貫通穴から引き出した。ケース込みの寸法は、内径が 83 mm、外径が 99 mm である。

3. 圧縮通電試験結果

試験構成① (Case 1) では、試験コイルを厚さ 10 mm の FRP 板で挟み、圧縮試験装置にセットして液体窒素で冷却した。初期の I - V 特性を図 1 に赤丸で示す。また、SP コイル間の内周接続模擬サンプルの I - V 特性を赤破線で示す。試験コイル通電開始直後から発生した電圧は、SP コイル間の接続抵抗と判断した。

次に、SUS 治具を用いて上部から 1 t (4.3 MPa) で圧縮した際の I - V 特性の時間変化を図 1 に示す。1 t の圧力を印加したただけで通電特性は時間経過とともに低下したが、荷重を除去してしばらくすると、青丸に示すように I - V 特性は初期特性に戻る可逆的な通電特性の低下が確認された。荷重除去時にコイル内周空間からのガスの噴き出しが確認され、コイル内周の密閉空間がガス溜まりになっていると推察した。

試験構成② (Case 2) では、上面の FRP を半分に切断し、5 mm の隙間を設けて配置した。再び液体窒素で冷却し、圧縮荷重を印加した状態で測定した I - V 特性を図 2 に示す。本構成では荷重を印加しても通電特性は低下せず、最大 12 ton (51.4 MPa) を印加した状態でも初期特性と同等の I - V 波形が得られた。本結果から、可逆的な通電特性の低下は、荷重印加時に密閉されたコイル内周空間の液体窒素がガス化して圧力および温度が上昇したことが原因と考察した。コイルケース補強により、目標としている 50 MPa の圧縮応力を印加しても通電特性は低下せず、高強度コイル化技術の目途を得た。

4. まとめ

SUS ケース補強した小径のダブルパンケーキコイルを製作して全面圧縮試験を実施した。先行研究と同様に、低荷重印加時から可逆的な通電特性の低下が発生したが、コイル内周

空間からのガス抜きパスを設けることによって可逆的な通電特性の低下は解決した。また、目標としている 50 MPa の圧縮応力を印加してもコイルの通電特性は低下せず、高強度コイル化技術の目途を得た。

Table 1 Specifications of REBCO wire

Layer	Material	Thickness (μm)
Substrate	Hastelloy	50.0
Buffar	Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , MgO	0.13
Superconductor	REBCO	2.5
Protection	Ag	5.2
Stabilization	Cu	20.0
Insulation	Polyimide	27.5

Table 2 Specifications of double pancake coil

Inner diameter (mm)	85.0
Outer diameter (mm)	95.0
Height (mm)	9.2
Turn number	30

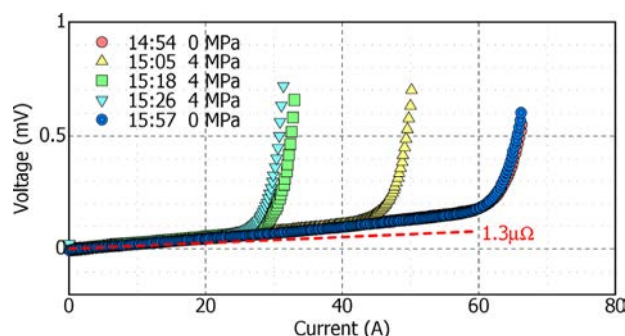


Fig.1 Compression test results (Case 1)

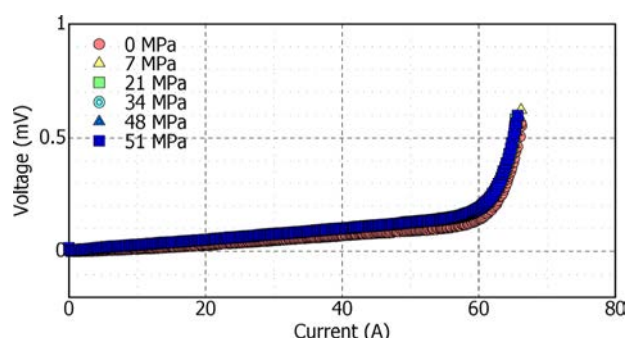


Fig.2 Compression test results (Case 2)

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

- Y. Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1 (2020) pp. 44-52
- N. Nagasaki et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31 no. 5 (2021) 8400405

液体水素冷却高温超電導発電機向け高強度 REBCO コイルの検討

Study of High-Strength REBCO Coil for Liquid Hydrogen-Cooled High-Temperature Superconducting Generator

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省エネルギー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、 $8000 \times g$ 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程度から臨界電流 I_c 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、コイルの軸方向圧縮圧力下でのREBCOコイルの臨界電流特性を測定したので報告する。

2. 部分圧縮による臨界電流特性の取得方法

まず、軸方向圧縮応力を印加した際のコイルの劣化メカニズムを明らかにするために、コイルの一部に圧縮応力を印加した際の I_c 測定を行った。4mm幅のREBCO線材で内径85 mm、外形95 mmの樹脂含浸したシングルパンケーキコイルを作製し、図1のような油圧ジャッキを用いた圧縮装置によって、コイル周方向5 mmの部分に圧縮応力を印加して、 I_c を取得した。

3. 部分圧縮による臨界電流の評価

図2に各コイルで測定された I_c の軸方向圧縮応力依存性を示す。いずれのコイルにおいても、コイル最内層がコイル中心側に座屈することで I_c が低下するという劣化過程は共通であった。したがって、コイル内層が座屈しないように支持することでコイル強度の向上が期待できる。一方、ダブルパンケーキコイルに対し全面に圧縮応力を印加して評価を行っていた先行研究では10 MPa程度の低圧縮圧力下においても I_c の低下が見られていたのに対し、本試験では座屈という機械的な破壊が生じるまで I_c の低下が見られなかった点は大きな差異である。この原因については全面圧縮と部分圧縮の差異による可能性も考えられる。

4. 結びと今後

超電導発電機の信頼性に大きく関わる、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 I_c 測定を行っている。部分圧縮圧力下での試験では、最内層が座屈し、 I_c が急激に低下する劣化過程が明らかになった。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。一方、コイル全面に圧縮応力を印加し評価している先行研究との差異もあり、実機環境により近い全面圧縮による評価が重要となる。現在、図3に示すような10 kW発電デモ機に使用するレーストラック型のREBCOコイルに対して全面に圧縮応力を印加しながら臨界電流特性を評価できる試験系の構築を行っており、本発表でもその結果について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す。

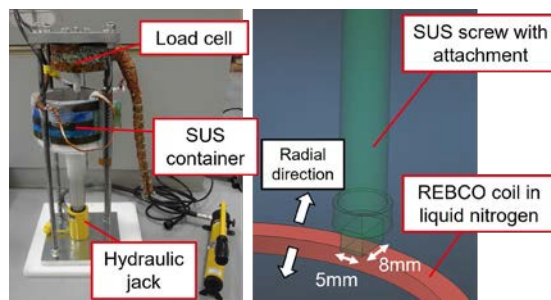


Fig.1 Appearance of compression system and REBCO coil compressed in liquid nitrogen

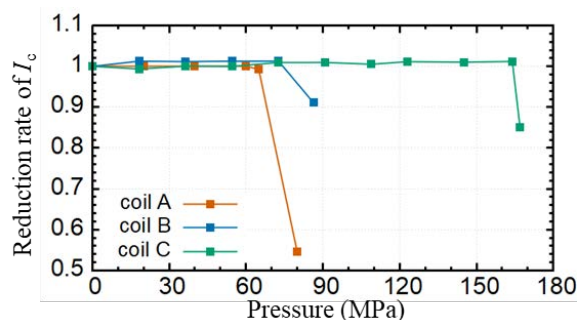


Fig.2 Compressive stress dependence of I_c

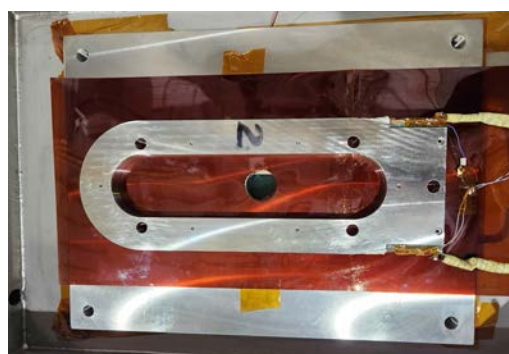


Fig.3 Race-track REBCO coil protected by SUS case for 10 kW superconducting generator

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).

SDMG法によるYBCOバルク作製と捕捉磁場特性 -Y123/Y211前駆体溶融条件の検討-

Fabrication and trapped field characteristics of YBCO bulk by SDMG method

-Investigation of Y123/Y211 precursor melting conditions-

箱石 裕人, 齋藤 光希, 内藤 智之 (岩手大)

HAKOISHI Hiroto, SAITO Koki, 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装置などへの応用が期待されている。最近、TSMG (Top Seeded Melt Growth) 法により作製された大きなバルクを種結晶として使用したSDMG (Single Direction Melt Growth) 法が注目されている[1]。SDMG法は結晶成長方向が1方向のみであるためバルク作製時間がバルク直径に依存しないというメリットがある。SDMG法はTSMG法で作製したバルクを種結晶として使用するが、包晶温度 T_p の高いNdBCOやSmBCOの大型バルクの作製が難しいため、 T_p が比較的安く大型化が比較的容易なEuBCOやGdBCOバルクを種結晶として用いている。そのためTSMG法ほど最高溶融温度を上げることができず、ターゲットとなるRE123の溶融が不十分となる可能性がある。そこで本研究では種結晶にGdBCOバルク($T_p=1035^\circ\text{C}$)を使用してSDMG法によりYBCOバルク($T_p=1005^\circ\text{C}$)を作製し、SDMG法における前駆体の溶融条件の最適化とTSMG法バルクとの捕捉磁場特性の比較を行った。

2. 実験方法

原料粉末は豊島製作所製の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123)と Y_2BaCuO_5 (Y211)を使用し、100wt%[Y123:Y211=7:3 (mol)]+ 0.5wt% CeO_2 となるように秤量・混合を行った。混合粉末 15g を 50 MPa で1軸プレスし、 $\Phi 20\text{mm}\text{-t}13\text{mm}$ の圧粉体に成型した後、TSMG法で作製したGdBCOバルクの上に配置して結晶成長を行った。Y123の溶融条件の最適化のため、最高溶融温度 T_{max} は1020~1050 $^\circ\text{C}$ 、保持時間は1~4 hで変化した。得られたバルクは T_c 制御のため酸素雰囲気下で450 $^\circ\text{C}$ -150hの酸素富化処理を行った。またSDMG法との比較のためTSMG法YBCOバルク(種結晶:MgO添加NdBCO劈開バルク($T_p=1085^\circ\text{C}$), $T_{\text{max}}=1060^\circ\text{C}$ -1 h)も作製した。

作製したYBCOバルクは磁場中冷却着磁法により着磁を行い、Hall素子を用いて捕捉磁場を測定した。またYBCOバルクから切り出した小片試料を用いてSQUID磁束計による磁化測定を行い、 J_c は拡張型ピンモデルを用いて算出した。

3. 結果と考察

SDMG法における T_{max} での保持時間を一般的なTSMG法同様に1時間に設定したところ、 $T_{\text{max}}=1020\sim 1040^\circ\text{C}$ では未溶融Y123由来の不均質核生成が発生し、 $T_{\text{max}}=1050^\circ\text{C}$ では種結晶GdBCOバルクが溶融してしまった。 $T_{\text{max}}=1040^\circ\text{C}$ はGdBCOの T_p 以上であるが、保持時間が短時間であったため潜熱の影響により完全に溶融しきらなかったと考えている。実際に $T_{\text{max}}=1040^\circ\text{C}$ -2 hではGdBCOバルクの溶融が確認された。そこでGdBCOバルクが溶融しない1030 $^\circ\text{C}$ で保持時間を延ばしたところ、 $T_{\text{max}}=1030^\circ\text{C}$ -2 hでは $T_{\text{max}}=1030^\circ\text{C}$ -1 hよりも不均質核生成の数が減少し、 $T_{\text{max}}=1030^\circ\text{C}$ -4 hでは不均質核生成のない単一粒YBCOバルクの作製に成功した。SDMG法における前駆体の溶融は T_{max} を高くできないため保持時間を長くする必要があることが分かった。

Fig. 1にSDMGバルク($T_{\text{max}}=1030^\circ\text{C}$ -4 h)とTSMGバルクの

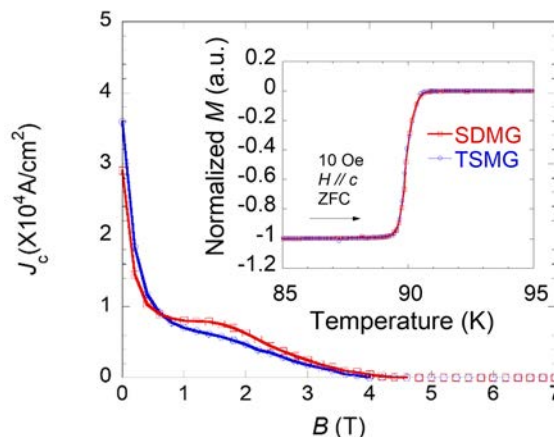


Fig.1 J_c - B curves at 77 K (main panel) and M - T curves at 10 Oe (inset) of both the TSMG and SDMG YBCO bulks.

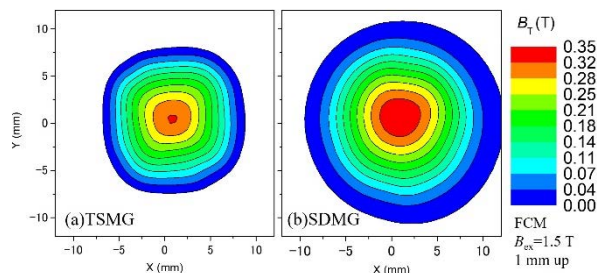


Fig.2 Trapped field distributions of (a) TSMG and (b) SDMG YBCO bulks at 77 K.

磁化の温度依存性と77Kにおける J_c の磁場依存性を示す。SDMGバルクとTSMGバルクの T_c はどちらも約90 Kであり、77 Kにおける J_c もSDMGバルクとTSMGバルクでほとんど違いは見られなかった。

Fig. 2に77KにおけるSDMGバルク($T_{\text{max}}=1030^\circ\text{C}$ -4 h)とTSMGバルクの捉磁場分布を示す。SDMGバルクは円柱のバルク形状を反映した同心円状の分布を示したのに対し、TSMGバルクは四角形の分布を示した。SDMG法は成長方向が c 軸方向のみであるため不純物(Y211や液相)がバルク上部(c 軸端)のみにプッシングされるが、TSMG法は a 軸と c 軸の2方向の成長方向があるため不純物はバルク下部(c 軸端)と外周部(a 軸端)にプッシングされる。本研究ではバルク外周部の研削加工は行っていないため、TSMGバルクの捕捉磁場分布形状は不純物の影響により四角形となった。また最大捕捉磁場値 B_z はTSMGバルク(0.32T)よりSDMGバルク(0.35T)のほう僅かに高かった。 B_z は J_c とバルク直径に比例するが、磁化測定による J_c はほぼ同じであったため、 B_z の違いは不純物による超伝導領域(=バルク直径)の違いによるものと考えられる。

参考文献

1. T. Motoki *et al.*, Appl. Phys. Express **13** (2020) 093002

マルチドシード板上に育成した SDMG 法 REBCO 溶融凝固バルクにおける 粒界ミスフィット角と超伝導特性

Misfit angles and superconducting properties of REBCO melt-textured bulks grown on multiple seed plates by the SDMG method

遠藤 淳, 元木 貴則, 國本 慧太, 下山 淳一 (青学大)

ENDO Jun, MOTOKI Takanori, KUNIMOTO Keita, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5624043@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, 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、高磁場下においても高い J_c を示す。REBCO 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、強力超伝導磁石を用いた卓上 NMR などへの応用が期待されている[1]。REBCO 溶融凝固バルクの一般的な作製法である Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法では、バルクの大型化に伴い結晶成長時間が急激に増大する。一方、作製するバルクより包晶温度(T_p)の高い REBCO を用いたバルクを種基板に用いて結晶成長させる Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法は、成長するバルクが単一の結晶成長領域からなり、径方向のサイズに依らず短時間で均質なバルク育成が可能である[2][3]。SDMG 法を用いた種基板のサイズを上回る大型バルクの作製手法として、Fig. 1 のように複数の種基板を隙間なく並べる方法が考えられるが、種基板間の結晶方位のミスフィット角によって超伝導特性の劣化を招く可能性がある。この結晶方位のミスフィット角と J_c の関係は REBCO エピタキシャル薄膜においてはよく知られているが[4]、溶融凝固バルクにおけるミスフィット許容角はわかっていない。

2. 実験方法

本研究では、TEP 社製 YBCO 混合粉末を 100 MPa の一軸プレスにより一辺が 16 mm の角柱状にペレット成型し、バルクの緻密化のため短時間の事前溶融を行った。続いて Fig. 2 に示すように 0-45°までの面内ミスフィット角 θ をつけた 2 枚の EuBCO 種基板上に YBCO 前駆体ペレットを置き、約 100 h の徐冷過程を含む溶融凝固を行った。得られた溶融凝固バルクを種基板から切り出した後、Y/Ba 固溶を低減するため適当な還元雰囲気中でポストアニールを行い、最後に O₂ 気流中、400°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。作製した試料の種基板側表面に対する XRD による面内ミスフィット角の評価と ab 研磨面の微細組織観察及び元素マッピングを行った後、磁場中冷却法で液体窒素浸漬下で着磁し、捕捉磁場特性、種基板界面上の粒界部を含む小片試料の VSM による磁化測定を行った。

3. 結果と考察

捕捉磁場測定から 77 K, 低磁場下におけるミスフィット許容角は ~5° 程度であり、ミスフィット角が 10° 以上では界面が弱結合となり、超伝導電流がバルク全体を周回しないことがわかった。また、粒界を含む試料と含まない小片試料の磁化ヒステリシス幅の解析から粒界を流れる J_c (J_c^{inter}) を推定した。Fig. 3 にミスフィット角と $J_c^{\text{inter}}/J_c^{\text{intra}}$ の関係を示す。ミスフィット角が ~5° で粒内 J_c (J_c^{intra}) の 2 割程度まで減少し、15° 以上では粒間に超伝導電流がほとんど流れないことがわかった。粒間 J_c とミスフィット角の関係はエピタキシャル薄膜における報告と定性的には一致している。微細組織観察からミスフィット角の大きい試料では界面に銀が凝集して析出している箇所が存在しており、このような銀の堆積も粒界におけるマクロな電流パスを制限すると考えられる。以上より隣接する種基板間のミスフィット角はできるだけ小さく、少なくとも 5° 以下とすることが必須であると結論できる。

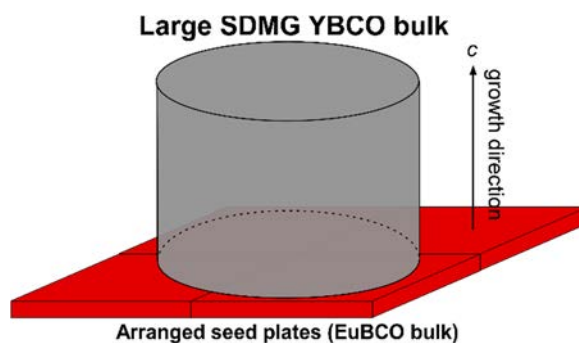


Fig. 1. Schematic illustration of a large REBCO bulk grown on multiple seed plates by the SDMG method.

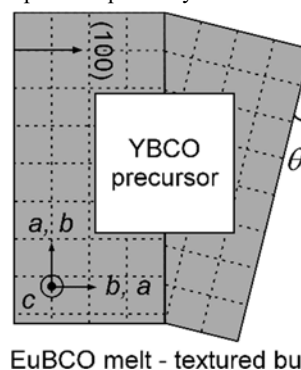


Fig. 2. Schematic illustration of the SDMG-processed YBCO bulks grown on multiple EuBCO seed plates with an in-plane misfit angle of θ .

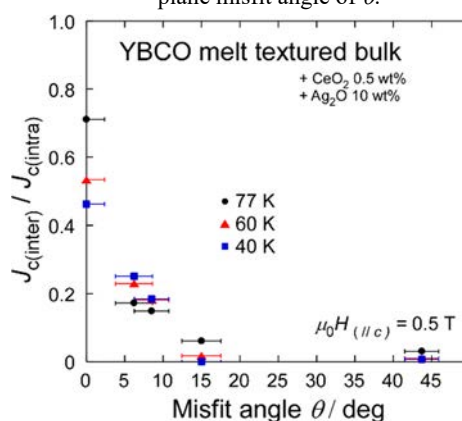


Fig. 3. Relationship between in-plane misfit angle and $J_c^{\text{inter}}/J_c^{\text{intra}}$ for SDMG-YBCO bulks prepared on multiple seed plates with various misfit angles.

参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, *J. Magn. Reson.* **259** (2015) 68.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13** (2020) 093002.
- [3] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003.
- [4] D. Dimos *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**(1988)219.

一方向溶融成長(SDMG)法による 60 mm 級大型 REBCO バルクの育成

Fabrication of 60 mm class large REBCO bulks by the Single-Direction Melt Growth (SDMG) method

元木 貴則, 遠藤 淳, 國本 慧太, 下山 淳一 (青学大); 中村 新一 (TEP)

MOTOKI Takanori, ENDO Jun, KUNIMOTO Keita, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

NAKAMURA Shin-ichi (TEP)

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

1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。溶融凝固バルクは通常、Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法に代表されるバルク上面に設置した種結晶を起点として徐冷による溶融凝固で育成されており、バルク NMR 応用等に適するリング形状のバルクは育成後の円柱状バルクの中心部を機械的に加工して作製されている。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^[1]。本手法は、バルクが鉛直方向に一次的に結晶成長するため、原理的にリング形状のような複雑形状であっても直接育成が可能である。これまでに小型の SDMG 法 DyBCO リングバルクにおいて TSMG 法に比べて高いリング内磁場 ~1.8 T (77 K) を報告している^[2]。今回、外径 60 mm を超える大型のバルク育成に着手したので報告する。

2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO 溶融凝固バルクを [001] 方位が鉛直方向になるよう切り出した平板を seed plate とし、その上に外径 80 mm のディスク形状にペレット成型した YBCO もしくは GdBCO を、緻密化のための前熱処理を行った後に設置し、seed plate の包晶温度以下で結晶成長させることでバルク全体が c-growth 領域からなる大型バルクを育成した。なお、REBCO ペレットには、TEP 社製の RE123+RE211 混合粉に 10 wt% の Ag₂O および 0.5 wt% の CeO₂ をそれぞれ混合したものをを用いている。溶融凝固後に直径 60 mm を超える YBCO (~18 mm²) および GdBCO (~4 mm²) バルクが得られ、得られたバルクは seed plate から切り離した後、弱い還元アニールと長時間の酸素アニールを行った。液体窒素浸漬下で 2 T までの磁場中冷却後、バルク表面の捕捉磁場分布を評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 (a), (b) に作製した YBCO および GdBCO バルクの外観それぞれを示す。SDMG 法では鉛直方向のみに結晶成長が進行するため原理的に結晶成長時間が径方向のサイズに依存しない。今回、60 mmφ を超える大型バルクにおいても小型バルク同様の約一週間という短時間の結晶成長で育成することに成功した。YBCO および GdBCO バルクの 77 K における seed plate 側表面の捕捉磁場分布を Fig. 2, Fig. 3 にそれぞれ示す。YBCO に関しては捕捉磁場が乱れているものの、クラック等による顕著なピークの分裂は見られなかった。GdBCO では形状を反映して同心円に近い捕捉磁場分布を示しており、大型バルクにおいても結晶成長が均一に進行したことが示唆され、SDMG 法が大型バルクの短時間育成に有用であることが示された。発表では、これらのバルクの結晶性や、大型リングバルクの

直接育成の試みについても報告する予定である。

[1] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** 094003 (2022)

[2] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **16** 095501 (2023)

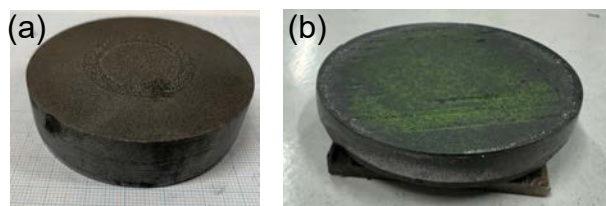


Fig. 1. Appearance of SDMG-processed YBCO (a) and GdBCO (b) melt-textured bulks fabricated from 80 mmφ disk-shaped pellets.

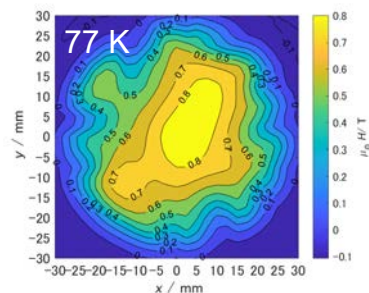


Fig. 2. Trapped field distribution at 77 K of the 60 mm class YBCO bulk (Fig.1 (a)). Trapped fields were evaluated on the seed side surface of the bulk.

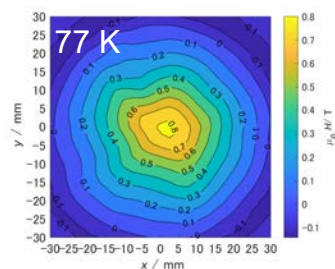


Fig. 3. Trapped field distribution at 77 K of the 60 mm class GdBCO bulk (Fig.1 (b)). Trapped fields were evaluated on the seed side surface of the bulk.

謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)の結果得られたものである。

グラファイト層間化合物 CaC_6 の Na 触媒によるバルク体合成と超伝導特性

Na-catalyzed bulk synthesis and superconducting properties of graphite interlayer compound CaC_6

伊豫 彰, 藤久 裕司, 後藤 義人, 石田 茂之, 永崎 洋, 荻野 拓 (産総研); 川島 健司 (イムラ・ジャパン)

IYO Akira, FUJIHISA Hiroshi, GOTOH Yoshito, ISHIDA Shigeyuki,
EISAKI Hiroshi, OGINO Hiraku (AIST); KAWASHIMA Kenji (IMRA JAPAN)

E-mail: iyo-akira@aist.go.jp

1. はじめに

グラフェンの積層から成るグラファイトの層間には、様々な原子や分子が挿入(インターカレート)される。挿入により生じた物質をグラファイト層間化合物(Graphite Intercalation Compound, GIC)という。リチウムが挿入された GIC は、リチウムイオン二次電池の負極材料として利用されている。カルシウム (Ca) が挿入された GIC (CaC_6) は、比較的高い超伝導転移温度 ($T_c = 11.5 \text{ K}$) を示す[1]。 CaC_6 試料は、これまで気相法[1]や溶融塩法[2]で作製されてきたが、長時間 (~1 週間) の加熱が必要であり、しかも均一なバルク試料が得にくい。このため、 CaC_6 に関する研究開発が十分に行われていないのが現状である。我々は、ナトリウム (Na) を原料に加えることにより、アルカリ金属やアルカリ土類金属の GIC 生成が劇的に進行することを発見した[3]。本講演では、触媒として機能する Na を用いた CaC_6 バルク試料合成方法とその超伝導特性について述べる[4]。

2. Na 触媒法によるバルク CaC_6 合成

Fig. 1 に概要を示すように、次の(1)-(3)のプロセスによりバルク試料が合成可能である。(1) Ca 粉末とグラファイト (C) 粉末に Na を加え、乳鉢で約 15 分間混合 (Ca : C : Na = 1 : 6 : 2) (Fig. 1a-b)。この時、Na と C が反応して触媒の反応中間体の GIC (NaC_x) が形成される[3,4]。(2) 試料をステンレス (SUS) 管に封入し、 250°C で合計 4 時間加熱 (中間混合含む) (Fig. 1c)。 NaC_x が Ca と反応して CaC_6 が生成。(3) 試料に残留する Na の除去のために、試料を 150°C (Na の融点以上) で加熱したペレット成形器で Na を圧搾、さらに試料の石英管中での加熱により Na を蒸発させる (Fig. 1d-e)。 Fig. 1f に示すように、試料中の Na が低減 (Na: Ca = ~3: 97) した金色の CaC_6 のペレットが得られる。

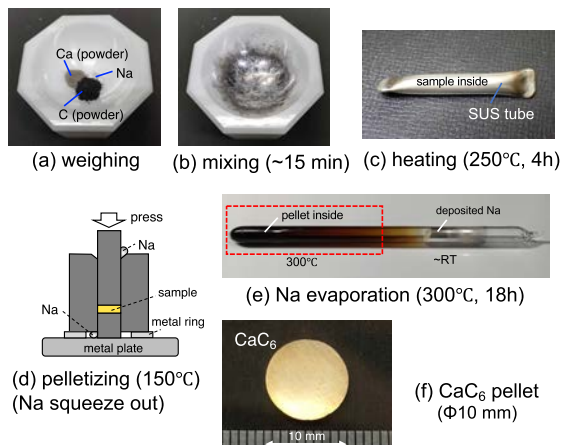


Fig. 1 Synthesis process of CaC_6 bulk sample by Na-catalyzed method.

3. CaC_6 バルクの超伝導特性

CaC_6 バルク試料の電気抵抗率 (ρ) の温度 (T) 依存性を Fig. 2a に示す。インセットに磁場中を含む超伝導転移を示すように約 11 K で鋭い超伝導転移、および磁場中での概ね平行な転移のシフトが観測された。この振る舞いは、試料が均一で焼結性が良いことを示している。 Fig. 2b に、超伝導転移の midpoint から決定した上部臨界磁場 (H_{c2}) の温度依存性を、これまでに報告されたデータ (高配向熱分解グラファイト (HOPG) を元に合成された CaC_6 の測定による) と共に示す[4]。 CaC_6 バルク試料で得られた $H_{c2}(0)$ 値は、HOPG ベースの CaC_6 の値よりも約 3 倍大きかった。粉末 X 線回折パターンの分析により、Na 触媒法により急速に合成された CaC_6 には Ca 層の積層配列の乱れがあることが示唆された。 H_{c2} の増強は、積層配列の乱れによるコヒーレンス長 ξ の短縮に起因すると考えられる。

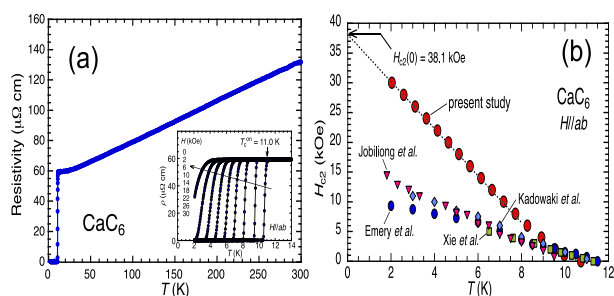


Fig. 2 T -dependent (a) resistivity and (b) upper critical field (H_{c2}) determined from midpoint T_c .

4. まとめ

Na 触媒法により、従来の方法よりも格段に簡単かつ高速にバルク CaC_6 の大量合成が可能になった。本方法で合成された CaC_6 は、従来法で合成された HOPG ベースの CaC_6 と比較して約 3 倍 $H_{c2}(0)$ が増強した。今後、 CaC_6 バルク試料のさらなる物性評価と、超伝導材料や電池材料などとしての応用可能性を検討する。

参考文献

1. T. E. Weller, M. Ellerby, S. S. Saxena, R. P. Smith, and N. T. Skipper, Nature Physics 1 (2005) 39.
2. S. Cahen, I. El-Hajj, L. Speyer, P. Berger, G. Medjahdi, P. Lagrange, G. Lamurac and C. Hérold, New J. Chem., 2020, 44, 10050.
3. A. Iyo, H. Ogino, S. Ishida, H. Eisaki, Advanced Materials 35 (2023) 2209964.
4. A. Iyo, H. Fujihisa, Y. Gotoh, S. Ishida, H. Eisaki, H. Ogino, K. Kawashima, Carbon 215 (2023) 118381.

パルス着磁における GdBCO バルクの侵入磁束密度分布測定

Measurement of Penetration Magnetic Flux Density Distribution in GdBCO Bulk during Pulse Field Magnetization

井田 徹哉, 川澄 渚, 今道 颯人, 土屋 美月, 高橋 圭太(東京海洋大)

IDA Tetsuya, KAWASUMI Nagisa, IMAMICHI Hayato, TSUCHIYA Mizuki, TAKAHASHI Keita (TUMSAT)

E-mail: tida000@kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

高温超電導バルク材料は永久磁石を大きく上回る捕捉磁束密度を達成可能なことから、モータや発電機、NMR といった強磁場応用に期待が寄せられている。強磁場捕捉のために、外部から磁場を印加した際にバルクへ侵入する磁束の振る舞いについては以前から理論的にも実験的にも議論がなされてきた。しかし、バルク表面で侵入磁束密度の過渡的な変化について実験的に明らかにした報告は少ない [1, 2]。本講演では、我々が開発した 2 次元磁場センサを用いて磁束密度の過渡的な変化をバルク表面で測定した結果を示す。

2. 2 次元磁場センサ

我々は侵入磁束密度分布の過渡的な変化をバルク表面で測定するために、多数のホール素子を等間隔にバルク表面に配置した 2 次元磁場センサを開発した [3-5]。70mm 四方に 5mm 間隔で並べた 225 個のホール素子は 15 個の定電流源によってホール電圧を AD コンバータへ送り、バルク表面での 2 次元磁束密度分布を 1ms 毎に測定することを可能にする。2 次元磁場センサはパルス着磁だけでなく、静磁場着磁における長時間の侵入磁束密度分布測定や、回転機の界磁や電機子の発する磁束密度分布の動的な測定にも役立つ。

3. 実験結果

我々は直径 45 mm、厚さ 19 mm の GdBCO バルク（日本製鉄製）を 2 個の渦巻型銅コイルで挟み、77 K でパルス着磁を行い、表面から 2mm 上に設けた 2 次元磁場センサによって侵入磁束密度分布と捕捉磁束密度分布の測定を行った (Fig. 1)。Fig. 2 は 2.65 kJ の着磁エネルギーで 0.72 T の捕捉磁束密度を得たパルス着磁実験と、3.99 kJ で 0.48 T を得た場合について、パルス磁場の印加を始めてから 5 ms から 9 ms までに測定した侵入磁束密度分布をそれぞれ示す。着磁エネルギーの大小関係と捕捉磁束密度から、77 K に冷却されたこのバルクにとって 3.99 kJ の着磁エネルギーは過剰であったと考えられる。Fig. 2(a) では 2.65 kJ の着磁によって印加磁場の一部がバルクの外周部から時間経過に従って順当に侵入する様子が示されている。一方、3.99 kJ の着磁を示した Fig. 2(b) では、5 ms から 7 ms に達する間でフラックスジャンプを生じて磁場が急激にバルクへ侵入し、多くの磁束がバルクの中心まで達してピークを形成しつつある様子が見て取れる。9 ms 経過後にはバルクの中心に近い結晶成長境界上で磁束密度のピークが明確に現れている。

4. 結論

本研究では 2 次元磁場センサを用いて、パルス着磁の間に発生したフラックスジャンプによる侵入磁束密度分布の変化を測定した。今後は様々な着磁条件において高

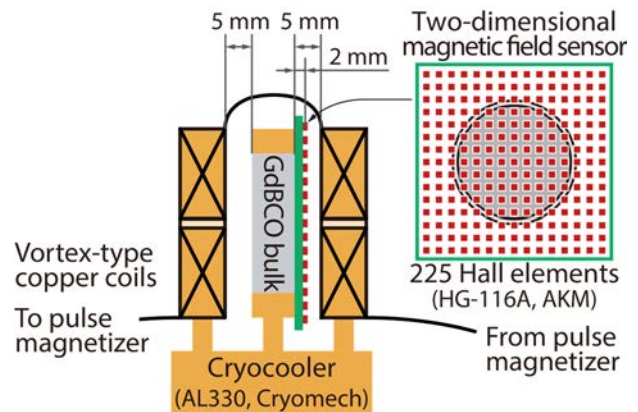


Fig. 1 Configuration of GdBCO sample and magnetic field sensor in pulsed field magnetizer. The blue dashed line

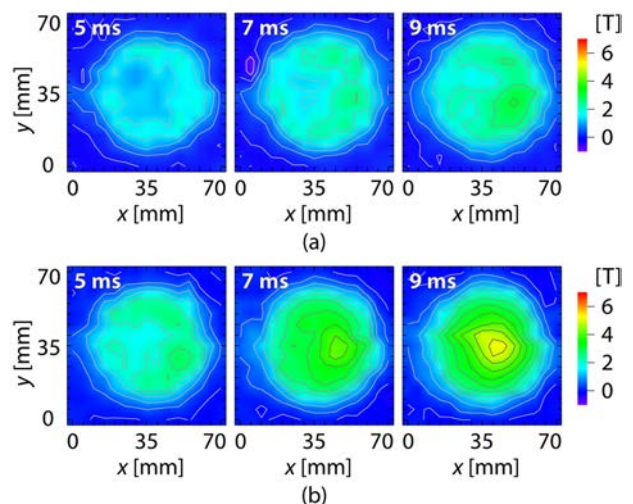


Fig. 2 Transient magnetic flux density distribution penetrating the GdBCO bulk during pulse field magnetization at 77 K. (a) 2.65 kJ, (b) 3.99 kJ.

温超電導バルク材料への侵入磁束密度分布を評価し、パルス着磁条件の最適化を図る。

参考文献

1. R. Shiraishi and H. Ohsaki: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 [2] (2007) pp. 3664-3667
2. H. Nishikawa, S. Torii and K. Yuasa: Physica C, Vol. 426-431 (2005) pp. 693-698
3. T. Ida: Jpn. Coll. Technol. Educ. J., Vol. 32 (2009) pp. 105-110
4. T. Ida, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26 [3] (2016) Art. no. 9001404
5. N. Kawasumi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 34 [3] (2024) Art. no. 10452275

特殊形状の軟鉄ヨークを用いたバルク磁石のパルス着磁特性の評価

Evaluation of pulse-field magnetization characteristics of a bulk magnet with specially shaped soft-iron yokes

横山 和哉(足利大);岡 徹雄(芝浦工大)

YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: yokoyama.kazuya@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

REBCO バルク磁石の発電機・モータ応用において、機器の小型・軽量化が重要である。また、磁化方法においてはオンサイトで、瞬時に着磁できるパルス磁化法(PFM)が実用的であると考えられる。通常の PFM ではパルス幅が数 ms~数十 ms と短いために、小さな磁場しか捕捉できない。そこで、軟鉄ヨークを用いてパルス幅を延ばすことによって、バルク体に効率的に磁場を捕捉させることができる。本研究は、軟鉄ヨークの形状を工夫することにより、捕捉磁場を維持しつつ、装置の軽量化を図ることとする。これまでに、従来用いていた円柱型のほかに円筒型、クロス型について検討を行い、クロス型ヨークで優位性を確認した。本文では、新たに八足型及び Y 字型軟鉄ヨークを考案し、それらを用いたパルス着磁実験を行った。前者は、バルク体のすべての GSB と GSR に軟鉄部分が配置されるため、すべての GSB 及び GSR から磁束を侵入させることができる。後者は、1 つの GSB (又は GSR) と 2 つの GSR (又は GSB) に軟鉄部分が配置されるため、一部の GSB と GSR から磁束を侵入させることができる。

2. 実験方法

Fig. 1 に、これまでに検討したクロス型ヨーク及び新たに考案・作製した八足型、Y 字型ヨークの写真を示す。これらを着磁コイルのフランジに固定し、それをバルク磁石装置の磁極に取り付ける。

実験は、 $\phi 60 \times 20$ mm の GdBCO バルク体(日本製鉄製)をサンプルステージに配置し、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 30 及び 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、試料表面中央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 における総磁束量の印加磁場依存性を示す。いずれの温度でも、八足型ヨークの場合と Y 字型ヨークの場合ではほぼ同じ値となっており、両者の形状で捕捉磁場に大きな差がない結果となった。

Fig. 3 に単位重量当たりの総磁束量の印加磁場依存性を示す。Fig. 2 の総磁束量の値を八足型ヨークの重量 0.4 kg 及び Y 字型ヨークの重量 0.3 kg で割った値である。これらの結果、八足型に比べて Y 字型ヨークが 30 K で最大 56%、50 K で最大 50%大きな値となった。

4. まとめ

本文は、REBCO バルク磁石の捕捉磁場の向上と着磁効率の改善を目的として、パルス着磁の際に用いる軟鉄ヨークに注目し、新たに八足型及び Y 字型ヨークを作製し、パルス着磁実験により着磁特性を評価した。単位重量当たりの総磁束量を比較した結果、Y 字型ヨークで優位性を確認した。今後、実験及び数値解析により、さらなる形状の最適化について検討する予定である。

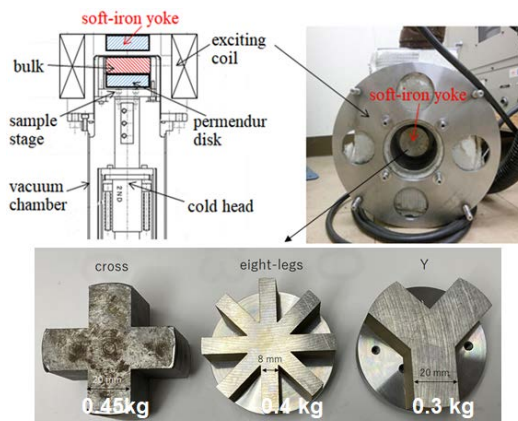


Fig. 1. Schematic of bulk PFM system and photograph of cross-, eight-legs- and Y-hasped soft-iron yokes

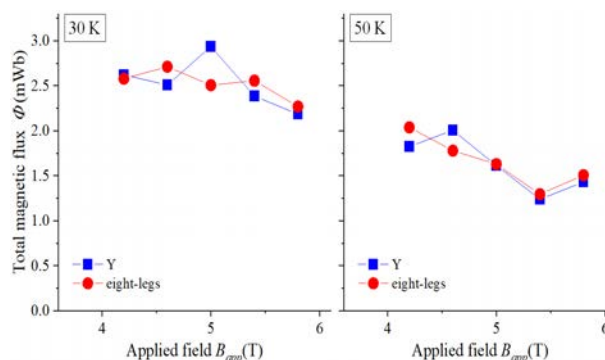


Fig. 2. Applied field dependence of total magnetic flux

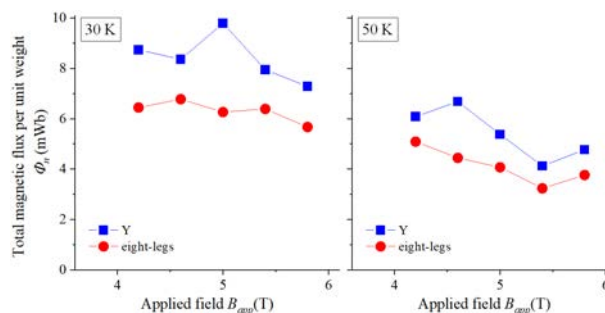


Fig. 3. Applied field dependence of total magnetic flux per unit weight

銅酸化物超伝導体原料を用いた FF-MOD 法原料溶液の特徴

Characteristics of Fluorine-Free MOD Solution Prepared from Superconducting Cuprates

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

SHIMOYAMA Jun-ichi, Horiguchi Keigo, SAGARA Kazutoyo, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.);

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

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

1. はじめに

様々な RE123 薄膜の作製方法のなかで、フッ素フリー有機酸塩塗布熱分解(FF-MOD)法は大気圧下焼成、高速結晶成長、低い原料ロス率、複数回焼成による厚膜化が可能など薄膜線材開発に最も適した方法である。しかし、結晶性が高く有効なピンニングセンターが少ないことから磁場中での臨界電流特性は他の方法で得られる RE123 薄膜より劣っていた。ところが、最近、100 m 級の長尺でかつ微小な非超伝導析出物を含む Gd123 線材が開発され^[1]、FF-MOD 法線材開発は新しい段階に入ったと言える。さらに、原料溶液への Cl 添加によって焼成時の昇温中に生成する 2 軸配向 Ba₂Cu₃O₄Cl₂ 結晶が RE123 薄膜のエピタキシャル成長条件を広げることもわかっている^[2]。しかし、実用に十分な I_c を有する RE123 線材の開発では、膜厚を 2 μm 以上にすることが必要であり、FF-MOD 法では複数回の塗布、仮焼を行った後に焼成する工程を所定の膜厚になるまで繰り返さなければならない。これは原料溶液中の総カチオン濃度が低いことに起因するものである。また、これまでの FF-MOD 法 RE123 薄膜の作製では、各構成金属の酢酸塩またはアセチルアセトン錯体が原料として用いられ、これらを所定のモル比になるように秤量し有機溶媒に溶かしていたが、原料の多くが水和物であるなど、精密な化学組成の調整には原料の分析が必要であった。以上の背景のもと、本研究では簡便かつ化学組成制御が容易な FF-MOD 法 RE123 薄膜用の原料溶液調製方法の開発に取り組んでいる。以下ではプロピオン酸にあらかじめ作製した RE123 焼結体、またはこれを粉砕した粉末を溶解する新しい工程から作製した FF-MOD 法 RE123 原料溶液の特徴について記す。

2. 実験

プロピオン酸(CH₃CH₂COOH)は、FF-MOD 法の有機溶媒に使われることが多い弱酸で、沸点は 141°C である。この酸に対して、一般的な RE123 焼結体の原料である RE₂O₃、BaCO₃、CuO は室温で溶解しない。ところが RE123 焼結体の粉末は室温でもプロピオン酸に溶解し、50~130°C に加熱することによってより速やかに、総カチオン濃度として最高 1.8 mol/l まで溶解することを見出した。FF-MOD 用原料溶液はこの溶液を乾燥して得られた RE, Ba, Cu のモル比が 1:2:3 のプロピオン酸塩をメタノール、ブタノール、水の混合溶媒に溶かすことにより調製した。RE123 薄膜は SrTiO₃ 単結晶または CeO₂ が最表層の IBA 基板において、スピコート法による塗布、仮焼を繰り返した後、本焼成することにより作製した。

3. 結果と考察

これまでに、RE 元素が Y, La, Nd, Sm, Gd, Dy について RE123 の組成比のプロピオン酸塩が得られることを確認

しており、Eu123 など他の RE123 についてもプロピオン酸塩の合成は可能と考えられる。このほか、Ca ドープ Y123 および RE124 (RE= Y, Dy)、さらに Bi2223、Bi2212 の組成のプロピオン酸塩も合成できた。プロピオン酸塩を用いた原料溶液から作製した Y123 薄膜は、77 K 自己磁場下で 2 MA/cm² を超える J_c を示したが、従来の原料溶液を用いた場合よりも広い焼成条件、特に低い焼成温度(740°C)でも高い J_c を示す薄膜が非常に再現性良く得られることがわかった。また、Cl を添加しなくても、Gd123 薄膜では最下層に Y123 を設けなくても高 J_c のエピタキシャル薄膜が再現性良く得られた。これは仮焼時の熱分解過程において RE, Ba, Cu の膜厚方向の組成ムラが生じておらず、エピタキシャル成長がより起こりやすくなったことを示唆する結果である。Fig. 1 に Y₂O₃、BaCO₃、CuO、Y123、Y₂Cu₂O₅、BaCuO₂ から作製したプロピオン酸塩の粉末 XRD パターンを示す。この XRD パターンでは Cu プロピオン酸塩によるピークが消失し、Y123、Y₂Cu₂O₅ では 8° 付近にブロードなピークが現れるなど、プロピオン酸塩結晶のなかでカチオンが混ざり合っていることがわかる。講演では 1 回の塗布当たりの膜厚増加を目指したメタノール、ブタノール、水の溶媒成分の比やプロピオン酸塩粉末に対する溶媒の量を変えた溶液の調製、およびそれを用いた RE123 薄膜の試作結果についても報告する。

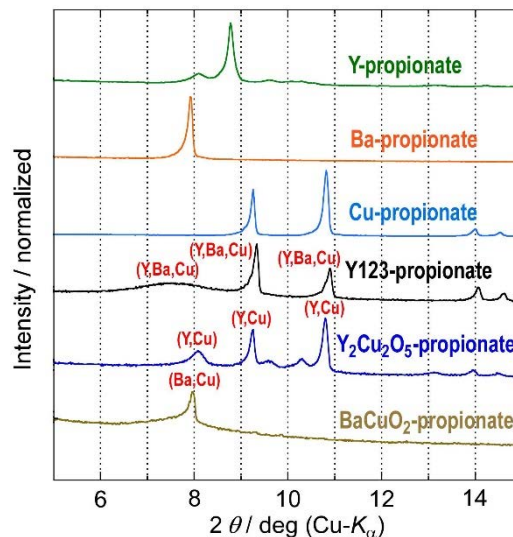


Fig. 1 Powder XRD patterns of various propionates.

参考文献

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

酸化物原料を用いた FF-MOD 法 Y123 薄膜における不純物添加効果

Effects of impurity doping for Y123 thin films by FF-MOD method starting from oxides

相楽 和豊, 堀口 佳吾, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大); 吉原 健彦, 本田 元気, 小林 慎一(住友電工)
 SAGARA kazutoyo, HORIGUCHI Keigo, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);
 YOSHIHARA Tatsuhiko, HONDA Genki, KOBAYASHI Shinichi (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 E-mail: c5624050@aoyama.jp

1. はじめに

RE123 薄膜の作製方法の一つであるフッ素フリー有機塩塗布熱分解(FF-MOD)法は、RE123 結晶の成長が非常に速く [1]、常圧下の簡便な焼成装置のみで作製できるため、本質的には量産性が高く、最も工業化に適した手法である。しかし、有効なピンニングセンターが少なく、他の成膜方法で得られる RE123 薄膜に比べて磁場中の J_c が低いことが課題である。我々のこれまでの研究により、Y123 薄膜に Cl と不純物金属 M ($M = \text{Zr}, \text{Sn}, \text{Hf}$) を共添加することにより、膜中に生成する非超伝導の BaMO_3 (BMO) 微粒子が有効なピンニングセンターとして働き、磁場中 J_c が向上することがわかっている [2]。本研究では、あらかじめ固相反応法によって合成した Y123 粉末から調製した新しい FF-MOD 法原料溶液を用い Y123 薄膜を作製し、不純物金属添加効果が臨界電流特性に及ぼす効果を調べた。

2. 実験方法

Y123 粉末を直接プロピオン酸に溶解し、乾固後に溶媒を加えて作製した自作溶液に Zr, Hf の EMOD 塗布型材料を添加することにより M ($M = \text{Zr}, \text{Hf}$) 添加 Y123 原料溶液を調製した。これを SrTiO_3 (100) 単結晶または IBAD 基板上にスピコート法により塗布した後、仮焼を行った。 M 添加 Y123 薄膜はこの塗布と仮焼を 3 回繰り返す、最終膜厚が約 450 nm になるように制御した後、様々な焼成温度で本焼成を行い、最後に酸素アニールにより酸素量を制御することにより作製した。得られた試料について、XRD による相同定、光学顕微鏡による微細組織観察を行い、臨界電流特性は誘導法による永久磁石上での磁場中 J_c の測定および SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に温度、時間を変えて本焼成した試料の誘導法により測定した 77 K, 自己磁場下における J_c を示す。幅広い条件で高い J_c を有する試料が得られ、比較的低温側でより J_c が高くなる傾向にあった。特に、IBAD 基板上、740 - 760°C で本焼成した試料は再現性良く高い J_c を示した。Fig. 2 に共添加 Y123 薄膜 (Cl, M2-3: 仮焼膜の 2, 3 層目に M を Y に対して 1% 添加) の XRD パターンを示す。Y123 の鋭く強い 001 ピークが確認できた。Fig. 3 に Zr(1%), Hf(1%) 共添加試料と無添加試料の J_c の磁場依存性を示す。Zr, Hf 共添加試料は無添加試料に比べ、磁場中での J_c の減衰が小さく、 BaMO_3 が有効なピンニングセンターとして働いていることが示唆された。講演では、さらに作製条件の最適化を進めた (Cl, M) 共添加 Y123 薄膜の臨界電流特性、厚膜化の試みについても報告する。

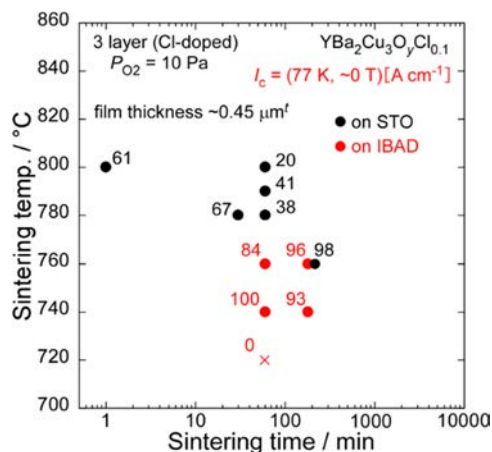


Fig. 1. J_c (77 K, ~ 0 T) map of Y123 thin films as functions of sintering conditions, temperature and time.

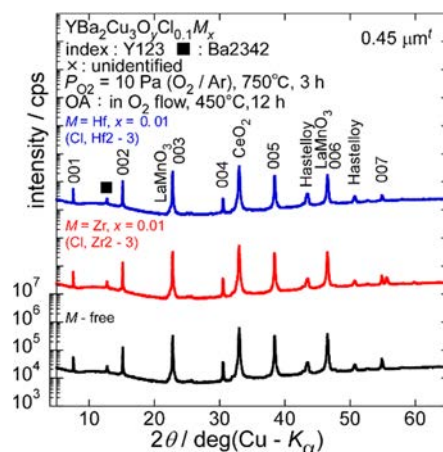


Fig. 2. XRD patterns of Y123 thin films

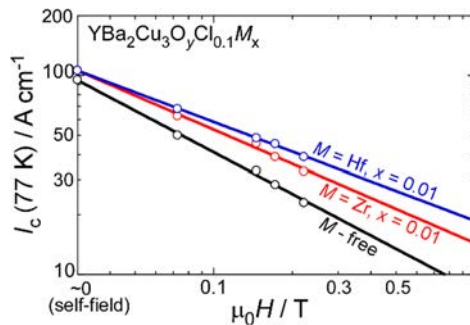


Fig. 3. Relationship between J_c and magnetic field of Y123 thin films measured at 77 K.

参考文献

- [1] Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804
- [2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 015006

酸化物原料を用いた IBAD 基体上 FF-MOD 法 Gd123 薄膜の作製

Synthesis of Gd123 thin films on IBAD substrate by FF-MOD method starting from oxides

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

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

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

E-mail: c5623071@aoyama.jp

1. 緒言

RE123 薄膜線材は、高い磁場中臨界電流特性を生かした強磁場発生コイル等への応用が進められているが、広範な普及にはさらなる低コスト化が求められている。有機酸塩塗布熱分解(MOD)法は RE123 薄膜線材の作製方法のなかでも常圧プロセスで金属組成比制御が比較的容易であり、特にフッ素フリーMOD (FF-MOD)法は結晶成長が速く複数回焼成による厚膜化が可能であることから低コスト、量産に最も適した成膜法である[1]。さらに、原料溶液中に微量の Cl を添加することで $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$ (Ba2342)微結晶が RE123 より先に成長するため、2 軸配向薄膜生成条件が拡大するとともに、 T_c の低下なく J_c が向上することがわかっている[2]。本方法での線材開発はやや遅れていたが、実用レベルの臨界電流特性を有する Gd123 長尺線材開発が始まっている[3]。以上の背景のもと、本研究では、新たに調製法を開発した酸化物原料を用いた前駆体溶液を用いることによる、FF-MOD 法 Gd123 薄膜線材の臨界電流特性の向上を試みた。

2. 実験方法

金属組成比がモル比で $\text{Gd} : \text{Ba} : \text{Cu} : \text{Cl} = 1 : 2 : 3 : 0.1$ の Gd123 溶液を作製し、2 軸配向 CeO_2 層表面を有する IBAD 基板上にスピコートにより溶液を塗布し仮焼した。この塗布と仮焼を 3 回繰り返した後、様々な条件で本焼成し、最後に酸素アニールを行うことで酸素量を制御した。さらに、これらの工程を繰り返し行う複数回焼成法により厚膜化した。Gd123 薄膜の最終膜厚は塗布を 3 回行った 3 層膜で約 450 nm である。得られた試料に対して XRD による結晶性評価、SEM による微細組織観察を行い、誘導法により液体窒素浸漬下における J_c を評価した。

3. 結果と考察

作製した 3 層の Gd123 薄膜の表面 XRD パターンを Fig. 1 に示す。いずれの試料においても鋭い 00l ピークが見られ、幅広い焼成条件で高い結晶性を有する Gd123 薄膜が生成することを確認した。また、幅 1 cm 当たりの液体窒素浸漬(77 K)における J_c は、 $P_{\text{O}_2} = 3 \text{ Pa}$, 780°C , 1 h 焼成試料で最も高く 110 A cm^{-1} となった。この 3 層薄膜上に再度溶液の塗布と仮焼を繰り返すことで 6 層に厚膜化したところ、 J_c は 110 A cm^{-1} から 129 A cm^{-1} となり、厚膜化による大きな J_c の向上はなかったが、Fig. 2 に二次電子像を示すように 3 層膜、6 層膜とも比較的平坦な良好な表面を有していた。

講演では Cl 添加 Gd123 薄膜の本焼成条件、特に厚膜化した試料に対する最適化、さらに仮焼の雰囲気を変えた Gd123 薄膜の特性についても報告する。

参考文献

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

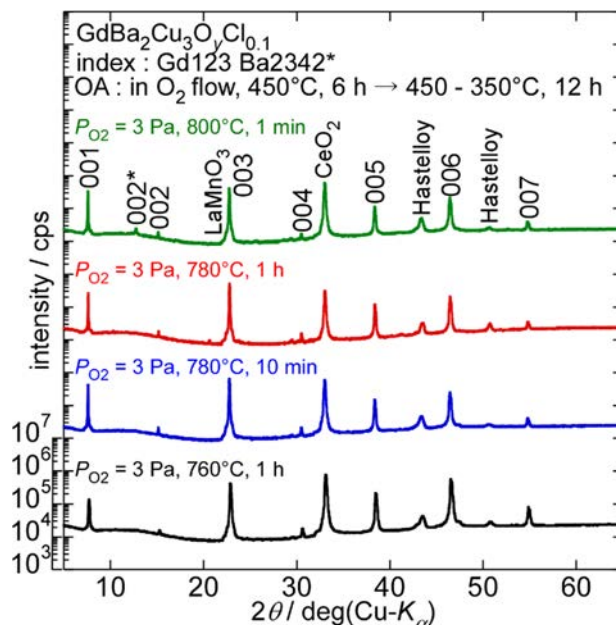


Fig. 1. XRD patterns of FF-MOD processed Gd123 thin films prepared under various sintering conditions.

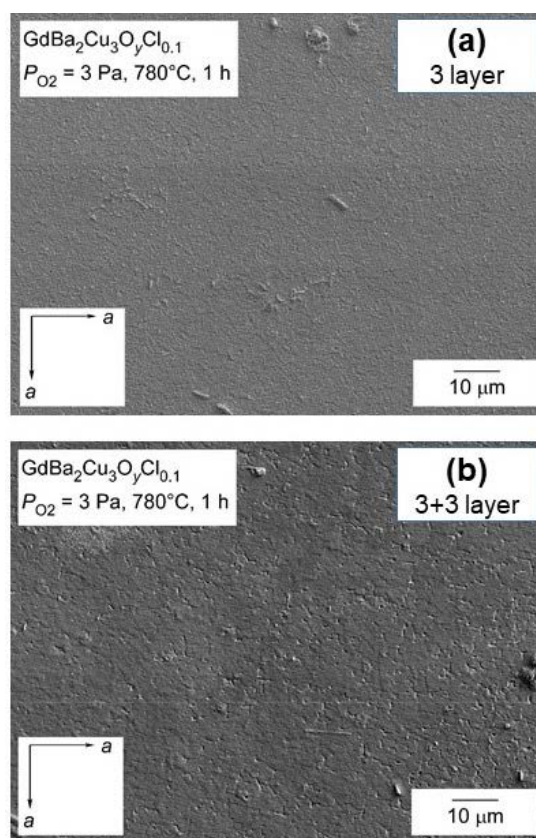


Fig. 2. Secondary electron images of the surface of Gd123 thin films, (a) 3 layered, (b) 3+3.layered.

FF-MOD 法 Gd123 薄膜への Zr, Sn, Ce, Ti, Hf の共添加による高 J_c 化

Enhancement of critical current densities by co-doping with Zr, Sn, Ce, Ti and Hf for Gd123 thin films fabricated by fluorine-free MOD method

石井 涼太, 佐藤 宏大, 三浦大介 (都立大)

ISHII Ryota, SATO Kodai, MIURA Osuke (Toritu Univ.)

E-mail: ishii-ryota@ed.tmu.ac.jp

1. はじめに

高度医療に欠くことのできない医療用 MRI 用コイルのために、より高温高磁場の環境下で大きな無損失電流を流すことのできる超伝導線材の開発が求められている。その中でも $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Gd123)は、他の超伝導体と比較して転移温度(T_c)が高く、磁場中での高い臨界電流密度(J_c)を有することから次世代の線材として期待されている。

磁場中高 J_c 化のため、母材に金属元素を添加して、母材と同じペロブスカイト構造を有する常伝導 $BaMO_3$ (BMO)を析出させ人工ピンニングセクタ(APC)として導入する研究が行われている[1]。しかし、導入量増加に伴い BMO が粗大化し、母材の結晶性を悪化させることで高 J_c 化を妨げてしまうという課題がある[1]。

本研究では Gd123 薄膜に異なる格子定数を有する複数種の BMO を同時に導入することで、それぞれの BMO の結晶成長に必要な Ba が共有され、互いに結晶成長を阻害し合うことで微細な APC として導入されることを目指した。

2. 作製方法及び評価方法

FF-MOD 法を用いて複数種の BMO を同時に導入した Gd123 薄膜を作製した。塗布溶液は、Gd:Ba:Cu = 1:2:3 の比で混合し、同時に複数種類の金属元素を等割合で 1mol%~5mol%加えることで調製した。基板上へ溶液を滴下した後、スピンドクターを用いて 3500 rpm で 30 秒間回転させ均一に塗布した。次に 120 °C で 30 分間乾燥させ、600 °C で 30 分間仮焼した。スピンドクターから仮焼までのプロセスを 3 回繰り返して、マルチコーティングにより前駆体を作製した。この前駆体を、880 °C で酸素分圧 $PO_2 = 10^{-2}$ kPa 下の N_2 雰囲気中で焼成を行った。焼成した薄膜は最後に O_2 雰囲気中、350 °C で 6 時間のアニールを行った。これにより得られた薄膜の厚さは 300 nm であった。

試料の結晶性の評価は X 線回折(XRD : X-Ray Diffraction)により行われた。結晶内部の観察は走査透過型電子顕微鏡(STEM : Scanning Transmission Electron Microscopy)を用いた。超伝導転移温度 T_c 及び臨界電流密度 J_c の測定には、超伝導量子干渉計(SQUID : Superconducting Quantum Interference device)を用いた。磁化の温度依存性は ZFC-FC 測定により算出した。0 T から 6.8 T の臨界電流密度は磁化の磁場依存性を測定し、得られた M-H 曲線の磁化の幅 ΔM から Bean model を用いて推定した [2]。APC として作用している領域(有効ピン密度: n_{eff})や単位当たりに磁束線に作用するピン力(要素的ピン力: f_p)は、シングルボルトクス理論に基づき、測定された B^* から見積もった [3]。 B^* の定義は自己磁場の J_c に対して $J_c(B^*) = 0.9 \cdot J_c(0)$ となる磁場の値を用いた。

3. 実験結果と考察

図 1 は BMO を 4.0mol%共添加した薄膜の 30K と 60K と 77.3K での臨界電流密度(J_c)の磁場依存性である。いずれの温度と磁場においても、BMO ドープサンプルは Non-dope サンプルを上回る J_c を得た。30 K では同時に導入する BMO の種類を増やすほど磁場中での J_c が顕著に向上した。その最大 J_c 値は 3 種類の BMO を導入した薄膜で得られ、その値は

3.0 T で 1.969 MA/cm² であった。これは共添加により APC が微細に導入された結果であると考えられる。

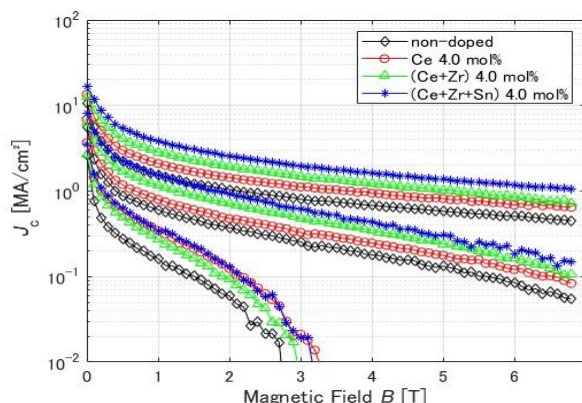


Figure 1. Magnetic field dependence of critical current density (J_c) at several temperatures for each $BaMO_3$ 4.0 mol% co-doped film compared to non-doped one.

4. 結論

本研究で我々は、異なる格子定数とヤング率を有する複数種類の $BaMO_3$ 型(M= Zr, Sn, Ce)人工ピンを 2.0 mol%から 5.0 mol%まで共添加した $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 薄膜を、FF-MOD 法を用いて $LaAlO_3$ 単結晶基板上に作製することに初めて成功した。その結果、同時に導入する $BaMO_3$ の種類を増やすにつれて、 $BaMO_3$ が微細かつ高密度に導入され、磁場中での臨界電流密度(J_c)が顕著に向上した。最大値は 3 種類の $BaMO_3$ を導入した薄膜で得られ、その値は 30 K, 0 T で 16.57 MA/cm², 3 T で 1.97 MA/cm² であった。これは、1 種類の $BaMO_3$ を導入した薄膜と比較してそれぞれ 1.22 倍、1.76 倍であった。本研究は、新たな J_c 向上のための方針を示した。今後、同時に導入する $BaMO_3$ の種類を増やしたり、ヤング率とミスフィットを考慮して元素 M の組み合わせや割合を変化させたりすることで、さらなる J_c 向上が見込める。

参考文献

1. M. Satou, Ph.D. dissertation, Seikei Graduate School of Science and Engineering, Dept. Science and Engineering, Seikei Univ., Tokyo, Japan, 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10928/1030>
2. C. P. Bean, Rev. Mod. Phys. 36 (1964) 31.
3. B. Dam, J. M. Huijbregtse, F. C. Klaassen, R. C. F. van der Geest, G. Doornbos, J. H. Rector, A. M. Testa, S. Freisem, J. C. Martinez, B. Stäuble-Pümpin, and R. Griessen, Nature, vol. 399, no. 6735, 1999, pp. 439-442. A. Sato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 63 (2000) p.44

ナノコンポジット REBCO 高温超伝導薄膜における局所歪と磁束ピン止め力

Local strain and flux pinning in nanocomposite REBCO high- T_c superconducting thin films

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

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

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

1. はじめに

REBCO コーテッドコンダクターの開発が進んでおり、動作温度が 20 K や 65 K 近傍における機器応用を目指した超伝導特性(J_c)の向上が望まれている。この目的のためには REBCO 薄膜中への人工ピン止め中心 (APC) の導入が有効である。その際、磁場中で生じる量子化磁束を効率的にピン止めするために、強いピン止め点となる APC を、母材となる超伝導特性を劣化させずに高密度で導入することが望まれる。しかしながら、現時点では REBCO 薄膜中の APC 濃度の上限は 5-10% 程度であることは実験的にわかっている。^{1), 2)} その一方で、NbTi 金属系線材の主要なピン止め中心は α -Ti 常伝導析出物であり、その体積分率の上限は 25-30% であることも知られている。³⁾ この違いは、金属材料と酸化物材料の結晶構造の性質の違いに起因する。金属材料はフェルミエネルギー E_F も大きく、歪による転位導入に対しても結晶構造が大きく乱れることなく、 α -Ti/NbTi 界面が電子構造に与える影響は小さい。一方で、酸化物材料では転位が動きづらく結晶構造を大きく乱し、また E_F も小さいことから歪導入による電子構造への影響が大きい。このため、転位や界面、格子欠陥の中心近傍においては局所的にキャリア密度が減少し、超伝導相に変わって反強磁性相がむき出しになることが予想される。例えば、APC 導入に伴うエピタキシャル歪は酸素欠損形成エネルギーの低下を招き、APC 近傍での臨界温度 T_c の低下を引き起こす。^{4), 5)} また、積層欠陥や点欠陥、転位等も母材中に導入されるため、APC と REBCO 界面の超伝導秩序パラメータ ψ の変化が緩慢になり、要素的ピン止め力 f_p の低下が生じる可能性もある。このような複雑・不均一構造の条件下で、応用に最適な APC 構造を見出すことは大変難しい。そこで本研究では、まず、APC 濃度の上限近傍における REBCO 薄膜の微細組織とエピタキシャル歪が及ぼす超伝導性能劣化について調べ、APC 体積分率の上限問題を解決するための糸口を得ることを目指す。

2. 実験方法および解析法

本研究では、PLD 法により BHO ナノロッド APC を導入した GdBCO 薄膜を IBAD-CeO₂ 基板上に作製した。ターゲットは 4.0、4.5、5.0、5.5 wt% BHO 添加 GdBCO を使用した。作製

した試料は XRD による構造解析、PPMS による J_c 、 T_c 等の超伝導特性評価、TEM、STEM による微細組織観察を行った。薄膜中のエピタキシャル歪に関しては、マイクロメカニクス理論に基づく変位場モデルによって調べた。

3. 結果と考察

BHO が低濃度側濃度では、 c 軸に平行なナノロッドの成長が観察されたが、より高濃度側ではナノロッド構造が崩れ、基板面に水平方向の層状構造が現れることが TEM 観察により確認された。このとき T_c の低下と共に J_c 特性の劣化も起こる。このような現象は内部に導入されたエピタキシャル歪に起因する。ここで、変位場モデルに基づいて、APC 導入による歪分布の可視化を行った。Fig. 1 は BHO 体積分率が 3% と 6% の場合の APC 周辺のひずみ (ϵ_{zz}) を比較したものである。APC 周辺では歪が大きく、体積分率増大に伴って歪場が重なり合い、 T_c や J_c に対して大きな影響を与えることが予想される。詳細については当日報告する。

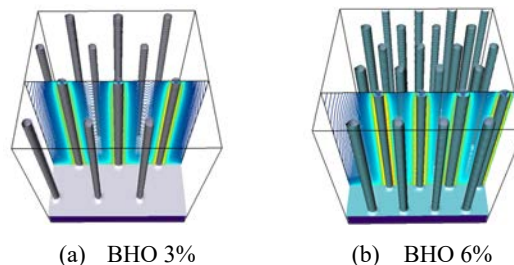


Fig.1 Visualization of strain field (ϵ_{zz}) due to introduction of BHO-APC based on displacement field model. (a) BHO 3%, (b) BHO 6%.

謝辞

本研究の一部は、JST-CRESTの支援を受けたものである。

参考文献

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

マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流 III

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

(M2) 毛利 誠一, 小田部 荘司(九工大情報工); 馬渡 康徳(産総研)
S. MORI, E. S. Otabe(Kyushu Inst. of Tech.); Y. Mawatari(AIST)
E-mail: mouri.seiichi178@mail.kyutech.jp

1. はじめに

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

我々は、膜面に平行な磁場中の超伝導膜に通電し、マイスナー状態が安定である(すなわち量子化磁束線が発生しない)通電電流の上限として定義した臨界電流について、理論的・数値的に研究を行っている[1, 2]。前回の講演会では、臨界電流密度 J_c の磁場 B_a および膜厚 d_s 依存性について、時間依存 Ginzburg-Landau(GL)方程式に基づく数値シミュレーションにより考察したが[2]、高い磁場での振る舞いが不自然であった。それを明らかにするために、本研究では、第二種超伝導薄膜に横磁場と縦磁場を印加した場合のマイスナー状態における臨界電流密度 J_c の磁場 B_a および膜厚 d_s 依存性について、GL 方程式に基づく数値シミュレーションを行った。

2. 一次元 Ginzburg-Landau モデル

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

超伝導薄膜内に量子化磁束が存在しないマイスナー状態は一次元 GL 方程式で記述され、極端な第二種超伝導体の場合は非線形 London 方程式が導かれる[3]。これを通電電流および外部磁場に関連する境界条件の下で解析して、マイスナー状態が安定である限界として定義される過熱磁場 B_{sh} および臨界電流密度 J_c について考察する。

3. 計算結果及び考察

様々な膜厚の超伝導薄膜における縦磁場中の臨界電流密度の磁場依存性を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 では、縦軸は対破壊電流 J_d で規格化した臨界電流密度 J_c/J_d 、横軸は熱力学的臨界磁場 B_c で規格化した外部磁場 B_a/B_c である。また、Fig. 2 では、縦軸はゼロ磁場での臨界電流密度 J_{c0} で規格した臨界電流密度 J_c/J_{c0} 、横軸は過熱磁場 B_{sh} で規格化した外部磁場 B_a/B_{sh} である。

縦磁場中 J_c は、横磁場中 J_c より常に大きい。縦磁場中では、膜厚が薄い場合の J_c は、ゼロ磁場付近では、 $J_c \sim J_d$ であり、外部磁場 B_a に対して緩やかに減少する。Fig. 2 で d_s/λ が 0.2, 0.5 の場合はほぼ一致する。薄膜で J_c の磁場依存性が弱いのは、 B_{sh} が大きく、高い磁場までマイスナー状態が維持されるためである。一方、膜厚が厚い場合、ゼロ磁場での J_c は小さく、磁場の増加に対して J_c は急激に減少する。Fig. 2 で d_s/λ が 4.0, 5.0 の場合はほぼ一致し、厚膜の J_c の B_a 依存性は、以下の理論式の理論によく合う。

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

この理論式は、London モデルで表面電流密度が J_d に達するときの輸送電流密度を J_c と定義すると、定性的に導くことができる。

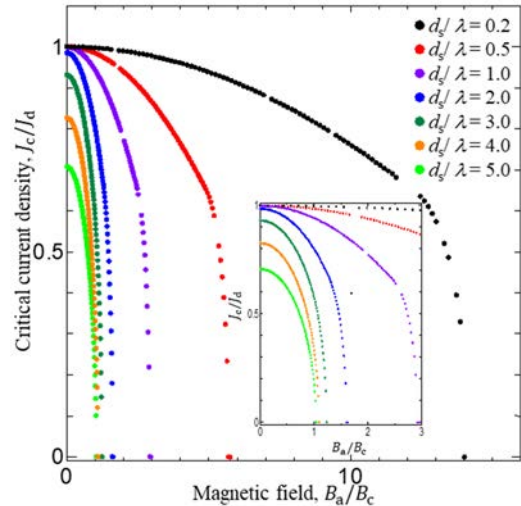


Fig. 1: Dependence of the critical current density J_c on the longitudinal magnetic field B_a , where J_c is scaled by J_d and B_a is scaled by B_c .

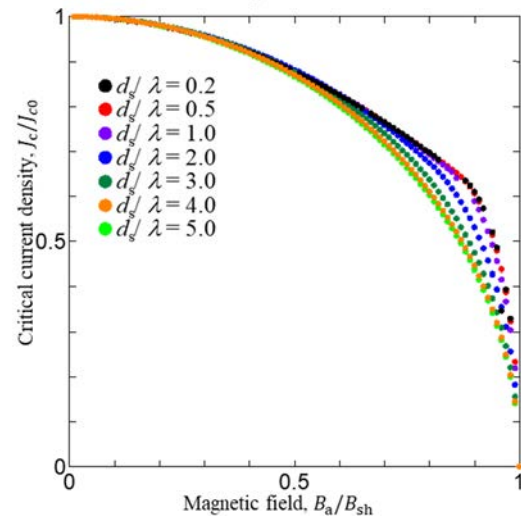


Fig. 2: Dependence of the critical current density J_c on the longitudinal magnetic field B_a , where J_c is scaled by J_{c0} and B_a is scaled by B_{sh} .

4. まとめ

第二種超伝導薄膜に横磁場および縦磁場を印加して通電した状態について、一次元 GL 方程式による数値シミュレーションを行い、マイスナー状態が安定である限界として定義した臨界電流密度 J_c の磁場 B_a 依存性および膜厚 d_s 依存性について考察した。

本研究は、JSPS科研費20K05314の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 馬渡康徳, 2023年度春季第105回低温工学・超電導学会研究発表会, 1B-a05 (2023).
- [2] 毛利誠一, 小田部荘司, 馬渡康徳, 2023年度秋季第106回低温工学・超電導学会研究発表会, 1P-p02 (2023).
- [3] P. G. de Gennes, Solid Stat. Commun. **3**, 127 (1965).

電動推進航空機用超電導回転機の技術動向

Technology Trends of Superconducting Rotating Machines for Aircraft Propulsion Systems

寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

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

1. はじめに

近年、温室効果ガス排出抑制の議論は様々な分野に及んでおり、中でも輸送・交通分野において化石燃料の消費を伴う自動車や航空機等は技術的な転換を迫られている。特に航空機は、離陸時・飛行中における機体の推進力を得るためのターボファンエンジンにおいて、ジェット燃料を燃焼させた際の温室効果ガスの排出量低減が要求されている。これに伴って国際航空運送協会 IATA (International Air Transportation Association) は、2050年までにCO₂の排出量を2005年比で50%まで低減すると声明を出している [1]。

上記を達成する為の具体的な手段としては、持続可能な航空燃料(Sustainable Aviation Fuel: SAF)の使用や液体水素燃料等を用いたシステムが検討される一方、推進システムにモータや発電機、電力変換器を推進機構に使用した「航空機の電動化」が注目されている。

しかし回転機(モータ/発電機)は「鉄と銅の塊」であり、定性的にもかなりの重量があることは明らかであり、これは重量制限の厳しい航空機にとっては解決すべき非常に大きな問題の一つである。よって電動推進システム部分を構成する機器重量を現状のターボファンエンジン並にするには、これらの「高出力密度化」が求められている。達成すべき数字の指標としてLukasikらは、電動航空機に搭載する発電機/モータや電力変換器に関してそれぞれ16 kW/kg、19 kW/kg以上の達成が必要であると分析しており[2]、これを達成するために世界各国で研究開発が行われている。そしてこの中で、冷却を行うことで高電流密度の巻線として使用可能な超電導材料の使用に注目が集まっており、回転機(発電機/モータ)への使用が検討されている。

本稿では、将来の電動航空機の推進システムへ適用が検討されている超電導回転機及び、それらを用いて構成された推進システムの研究動向に関して紹介する。

2. 超電導回転機のメリット

一般に回転機の出力 P [W] は、下記の様に表される。

$$P = T \times \frac{2\pi N_{rot}}{60} \\ = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \times k_w \times B_{max} \times A_s \times D^2 \times l_{eff} \times \frac{N_{rot}}{60} \quad (1)$$

ただし、 T [Nm]: トルク、 N_{rot} [rpm]: 回転数、 k_w : 巻線係数、 B_{max} [T]: 磁束密度振幅、 A_s [A/m]: 比電気装荷、 D [m]: 電機子直径、 l_{eff} [m]: 有効長である。この式(1)をベースとして回転機の超電導化のメリットを考える。

一般に超電導回転機は、超電導界磁+銅電機子巻線の「界磁超電導型」もしくは、超電導界磁+超電導電機子巻線の「全超電導型」の二通りが存在する。界磁側は、冷却温度によって銅線よりも数十~数百倍の電流密度を持つ超電導線材を使用するもしくは永久磁石以上の磁界を発生可能なバルク超電導体を使用することにより、巻線重量や磁気回路を形成する固定子鉄心(主にティース部分)使用量の低減が可能となる。特に、 B_{max} は電機子巻線部分に界磁が作りだす磁束密度分布の振幅値であるが、常電導機の場合は、固定子鉄心の飽和磁束密度や巻線体積の

限界により約1.0 Tで設計がされている。

しかし、超電導回転機は高電流密度による高磁界が発生可能であり、さらに鉄心使用量が削減可能なことで B_{max} を通常と比較して2倍以上にすることが可能となる。また、 A_s は電機子巻線の使用量と通電電流に関連した物理量であるが、これも常電導技術では水冷銅線で約120 kA/m程度の値であるが、超電導電機子巻線の場合は高電流密度の特徴を生かして数倍(200~500 kA/m)の設計数値を採用することも可能である[3]。すなわち超電導材料を適用することにより、同じ出力 P に対して B_{max} と A_s が大きくなり、結果として D と l_{eff} が相対的に小さくなるため、回転機部分の軽量・コンパクト化が可能となる。

その一方、電機子巻線に超電導線材を採用する場合には超電導体特有の「交流損失」の低減を考慮した設計が求められる。また、Fig. 1に示す様に超電導回転機(図は界磁超電導型)は、真空断熱領域に超電導巻線を配置して冷却するためのクライオスタットや外部からの侵入熱を防ぐためのトルクチューブなど、超電導機器特有のコンポーネントが複数使用されている。また冷却システムの扱い等を含めて従来の回転機にはない技術要素を数多く含んでいるため、研究開発には様々な分野の知識や技術ノウハウが必要とされる。

3. 電動航空機の推進システムへの超電導回転機への応用

超電導技術の航空機向け応用の歴史は意外にも長く、1970年代後半に回転子の界磁巻線に超電導線材を使用して液体ヘリウムで冷却する発電機の研究開発が行われていた。しかし当時は回転子内のシーリング技術が不十分であり、ヘリウムの漏洩が発生し超電導界磁巻線を完全に冷却することが出来ず、失敗に終わっている[4]。

上記から半世紀が経過した今日では、世界中において複数の研究グループが電動航空機向けの推進用超電導モータの研究を行っており、Table 1に示す様に実際に超電導モータを製作する研究グループも出てきている。但し、まだ実際に試作して試験を行っているという段階であり、設計の最適化による出力密度の向上に関する研究開発は現在進行中のものが殆どである。

イギリスの Univ. of Strathclyde は HTS 線材を電機子

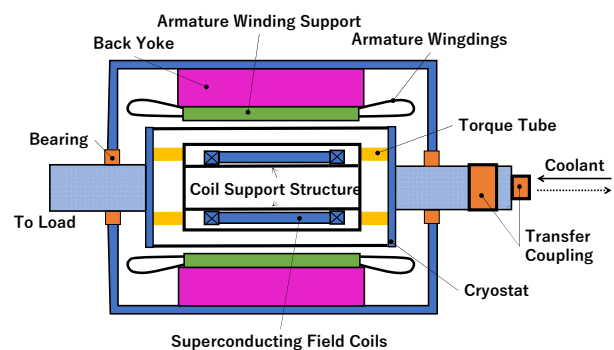


Fig. 1 Conceptual illustration of a superconducting (SC) rotating machine using SC field coils.

Table 1. Actual designed superconducting demonstrators from 2019-2023

Research Groups	SC Materials	Operating Temperature (Coolant)	Power	Rotation Speed	Others	Ref.
Univ. of Strathclyde	HTS wire	77 K (LN2)	-	300 rpm	-	(5)
Univ. of Lorraine	Bulk and DI-BSSCO*	30 K (He Gas)	50 kW	5,000 rpm	-	(6)
Toshiba Energy Systems	N/A	N/A	2 MW	N/A	Diameter: ϕ 500 mm Length: \sim 700 mm	(7)
Kyushu Univ.	REBCO	65 K (LN2)	400 kW	\sim 460 rpm	-	(8)

巻線 (U相のみ) に使用し、回転子に永久磁石を使用したアキシヤルギャップ型の超電導モータの研究を行っている[5]。本モータ構造は実際の実用化を目指したのではなく交流電流を通電するモータ用の超電導電機子巻線をどのように製作し、冷却系中の回転系でどのように交流損失を測定するかという要素試験の意味合いが強い研究例であるが、超電導モータとしての回転系を構築して電機子巻線の交流損失を測定した例は少なく、今後の進展が期待される。

フランスの Univ. of Lorraine は、モータの直流界磁に DI-BSSCO*超電導線材及びバルク超電導体を使用した 50 kW 級超電導モータの研究を行っている[6]。ギフォード-マクマホン (GM) 型冷凍機で冷却された He ガスにより超電導界磁部分を 30 K 程度まで冷却して運転することを前提に行っており、ここ数年で第 2 号機の製作・試験の状況を複数回発表している。

東芝エネルギーシステムズ (株) は、2022 年に 2 MW 級超電導モータの開発を行ったことを公表した[7]。本モータは回転子部分に超電導界磁巻線を使用しており、重量に関しては同等の出力の常電導モータと比べると 10% 以下の軽量・小型化を実現したとしている。現状では電動航空機向けの推進用モータとしては世界最大級の出力である。

上記に示した以外にも九州大学の研究グループが電機子巻線及び界磁巻線を希土類系銅酸化物 (REBCO) 超電導線材で構成した 400 kW 級の全超電導モータを開発して数百 rpm での回転試験を行う[8]など、超電導技術を用いた電動航空機の推進用モータの開発も活発化している。すなわち今後はいかに実機を製作して超電導モータの特性試験を行い、技術的な課題を明確にして最終的に搭載する推進システムを模擬した環境で実験を行い、実際の航空機へ搭載しての実証試験に持ち込んでいくかの道筋をつけていくことが重要である。

4. 超電導推進システムの最新の研究動向

2023 年に開催された European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2023) では、Airbus Upnext 及び、Florida State University の Cooley により、欧州と米国それぞれにおける超電導推進システムの開発プロジェクトについての紹介が行われた。前者の ASCEND プロジェクトでは、推進用のモータは永久磁石 (PM) 回転子と高温超電導電機子巻線で構成されており、ヘリウムガスをを用いて冷却温度 30-40 K での運転を考慮している。モータ等の損失を抜熱したガスの再度冷却を行う際には、タ

ンクから供給される液体水素の冷熱により熱交換器にて再冷却される。そして熱交換後のガス化した水素は、インバータを駆動する燃料電池へと供給される[9]。一方の IZEA プロジェクトでは、液体水素がタービン燃料として使用されている。さらに、タービンに接続された超電導発電機の冷却や、機内搭載の燃料電池へ高圧タービンからガス化した水素を供給するなど、複数の経路を液体水素使用の候補として挙げている。本システムにおいては、推進用モータとして常電導モータの使用が検討されている[10]。

5. おわりに

近年、研究開発が盛んに行われている電動航空機の推進用超電導回転機及びそれらを搭載した推進システムに関して、ここ数年の研究動向をまとめた。推進システムの電動化は、常電導・超電導技術併せて、現在超電導の応用分野において最も関心度の高いトピックの一つであり、電気工学分野や航空工学分野をはじめとして複数分野の関係者が集まって議論し、高い技術レベルで融合させることが求められている。言い換えれば、我々は電気機器学や超電導工学等を前提とした電気機器設計技術を向上・成熟させる一方、航空分野の専門家らと電動推進系への要求事項 (回転数、電圧、冗長性、etc. ...) を詳細に議論し、「システム」として超電導技術をどのように組み込み、まとめあげていくかという視点で今後も研究開発を行っていく必要がある。

参考文献

1. IATA: <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2019-12-12-01/> (参照 2024-04-11) .
2. B. Lukasiak: Proc. in the ASME Turbo Expo 2017 (2017) pp 1-8 GT2017-63834.
3. P. Tixador, et. al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 7 (1997) pp. 3858-3865.
4. C. E. Oberly: *IEEE Trans. Mag.* Vol. 13 (1977) pp. 260-268.
5. F. Weng, et. al.: *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 33 (2020) p. 104002.
6. A. Colle, et. al.: *Journal Phys. : Conf. Series* Vol. 1590 (2020) p. 012052.
7. 東芝エネルギーシステムズ (株) : <https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/06/news-20220623-01.html> (参照 2024-04-11)
8. M. Iwakuma, et. al.: ISS 2023 (2023) AP-2-1-INV.
9. L. Ybanez: EUCAS 2023 (2023) 1-LS-ST-01I.
10. L. Cooley: EUCAS 2023 (2023) 1-LS-ST-02I.

機械的曲げを持つ Nb₃Al 極細素線超伝導ケーブルの超伝導特性の研究

Studies of bent ultra-fine strands Nb₃Al cables on the superconducting performance

植木 竜一, 大内 徳人(KEK); 菊池 章弘(NIMS); 山本 優(JSA); 青木 和之, 有本 靖(KEK)
 UEKI Ryuichi, OHUCHI Norihito (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); YAMAMOTO Masaru (JSA); AOKI Kazuyuki, ARIMOTO
 Yasushi (KEK)
 E-mail: uekiryu@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、SuperKEKB 加速器 [1]を使った電子・陽電子衝突実験が行われている。2018年3月より本格的なビーム衝突実験が開始され、2022年6月には、前身のKEKB加速器の2倍以上となる 4.65×10^{34} のピークルミノシティを達成した[2]。さらなる衝突性能向上を目指して常伝導六極電磁石の超伝導磁石化が検討されている。設計上超伝導電磁石は小型冷凍機で冷却されるため、NbTiよりも高い臨界温度を持つ A15 化合物超伝導線材を用いた React & Wind 超伝導電磁石の製作を検討している。これまで我々は、直径 50 μm 超細線 Nb₃Al スtrand線で構成された超伝導ケーブルの直線状の臨界電流値の温度・磁場依存性を調査してきた[3]。React & Wind 電磁石製作時に、Nb₃Al 超伝導ケーブルの機械的曲げの許容量を調査するために、曲げ半径パラメータとして臨界電流値の温度依存性を測定した。本研究では、Nb₃Al 超伝導ケーブルの臨界電流値の機械的曲げの曲率半径と温度に対する依存性を報告する。

2. 超細線 Nb₃Al スtrandケーブル

今回用いた Nb₃Al 超伝導ケーブルは、Nb と Al のシートをジェリーロール法で製作したビレットを線径 ϕ 50 μm まで伸線加工し、7本のstrand線を撚り線にして ϕ 150 μm のケーブルを作製し、さらに、この150 μm のケーブルを7本撚り合わせた49本撚りケーブルを作製した。撚線加工後、ケーブルは800度、10時間(昇温4時間)の熱処理が行われた。Fig. 1に ϕ 0.6 mmと ϕ 50 μm まで伸線加工されたstrandの断面形状を示した。

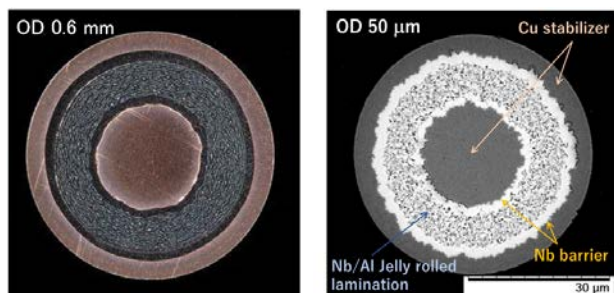


Fig.1 Cross sections of the Nb₃Al wire. The left is the ϕ 0.6 mm wire during drawing process, and the right is the ϕ 50 μm wire.

3. 49本(7×7)Nb₃Alケーブルの臨界電流測定

49本(7×7)撚りstrandケーブルの機械的曲げに対する超伝導特性を測定するために、Fig.2に示すような25 mmから10 mmまで2.5 mmごとにケーブルの曲率半径を変えられるフォルダを用意した。フォルダの溝に ϕ 0.7 mmの安定化銅ワイヤを設置した後、その上に超伝導ケーブルをセットした。シートヒーターを取り付けた銅板をU字に曲がっている部分に取り付け、超伝導ケーブルの上に温度計を配置し、試料全体が均一な温度になるように温度計の値をもとにヒーターを制御し、15Kから4.3Kの各温度における臨界電流値の測定を行った。

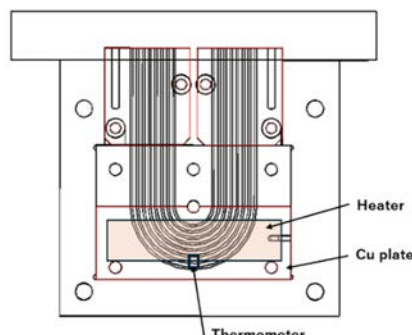


Fig.2 Nb₃Al cable sample test holder.

測定結果をFig.3に示す。曲率半径が25 mmから15 mmまでは目立った劣化は見られなかった。しかし、曲率半径が12.5 mmおよび10 mmでは明らかな臨界電流の低下がみられた。

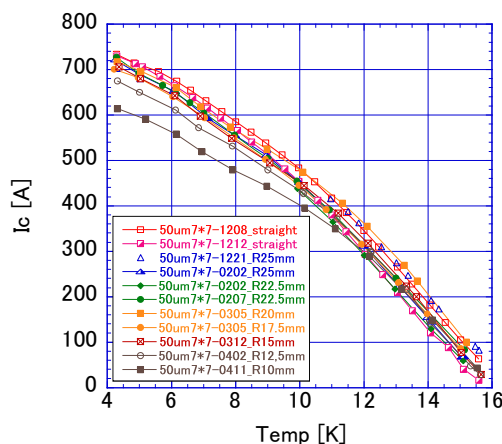


Fig.3 Temperature and mechanical bending dependence of Nb₃Al cable Ics.

謝辞

本研究は、科研費(23K25130)と(22H03876)の研究費助成事業のサポートを受けている。

参考文献

1. K. Akai and H. Koiso, "SuperKEKB Accelerator", J. PASJ, Vol. 15, No. 4, 2018, pp. 213-220
2. Y. Ohnishi et al., "Recent status of SuperKEKB operation", Proceedings of the 19th Annual Meeting of PASJ, Oct. 18-21, 2022, TFP001.
3. N. Ohuchi et al., "Development of Super Fine Strand Nb₃Al Cable for SuperKEKB Superconducting Sextupole Magnet System", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.33, no 5 Aug. 2023, Art. no. 6000305.

Nb₃Sn 層形成および超電導特性に与える Zn および Mg 添加効果

Impact of Zn and Mg addition on Nb₃Sn layer formation and its superconducting property

伴野 信哉 (NIMS); 浅井 航希 (上智大学, NIMS); 谷貝 剛 (上智大学)
 BANNO Nobuya, (NIMS); ASAI Koki (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

近年、Nb₃Sn 超電導線材の高性能化への要望は、高エネルギー加速器、核融合炉などの高磁場マグネット応用においてますます高まっている。高 J_c 化の突破口として、Nb 母相の内部酸化や Nb 母相の微細組織を利用した Nb₃Sn 結晶粒径の微細化が注目されているが、一方で Sn 拡散駆動力や熱力学的観点から Nb₃Sn 層の成長促進を図ることも十分な高 J_c 化の余地がある。こうした研究は、Nb₃Sn 層形成メカニズムの理解を深める手助けにもなる。本研究では、内部スズ法をベースに、Cu 母材への Zn および Mg 添加効果、および Ti の添加場所の効果を、単芯のシンプルな拡散構造を持つ線材を用いて明瞭に調べた。その結果、Zn や Mg の添加によって Nb₃Sn 層形成が劇的に変化することを確かめた。

2. 実験方法

基本的な線材作製手順を以下に概説する。外径 3.3 mm の Sn 芯 (もしくは Sn 合金芯) を Cu (もしくは Cu 合金) 管 (od/id=5/3.4 mm) に挿入し、それを Nb (もしくは Nb 合金) 管 (od/id=12/5.1 mm) に挿入、さらに安定化材として Cu 管 (od/id=12/5.1 mm) に挿入する。その複合材をスエーディング並びにダイス伸線により Ø0.6 mm まで加工する。得られた前駆体線材は、500 °C×100 h の予備熱処理後、650 °C×150 h もしくは 685 °C×100 h の Nb₃Sn 生成熱処理を施す。また相形成過程を調べるために、4 h 昇温で 650 °C まで加熱し、その後保持する過程で、適宜サンプリングした試料の断面観察を行った。

試料として添加元素・場所の異なる以下の 4 種類を準備した。

- A. N-C-ST: Nb/Cu/Sn=1.6wt%Ti
- B. N-CZ-ST: Nb/Cu-15wt%Zn/Sn-1.6wt%Ti
- C. N-CZM-ST: Nb/Cu-14wt%Zn-0.2wt%Mg/Sn-1.6wt%Ti
- D. NT-C-S: Nb-0.8wt%Ti/Cu/Sn

断面写真例を Fig. 1 に示す。通電測定をしたのち、臨界電流を画像解析により導出した超電導層面積で除すことで、臨界電流密度 (Layer J_c) を求めた。

3. 実験結果と考察

650 °C×150 h の熱処理した各試料の反応界面の SEM 像を Fig. 2 に示す。試料 A に比べて、Zn 添加によって Nb₃Sn 層厚が大きく成長していることがわかる (B)。無添加 (A) では反応界面に 4 元化合物が生成するが、Zn 添加ではそれらが分離しはじめ、代わりに粗大な Nb₃Sn 層が薄く形成されている。これは Sn 拡散駆動力が増大していることの結果と考えられる [1]。一方さらに Mg を共添加すると (C)、Sn 拡散駆動力が若干低下し、ちょうど無添加と Zn 添加の間のような組織が得られる。Ti を Nb に添加すると (D)、界面の 4 元化合物が生成しなくなり Sn 拡散駆動力が増大するが、かえって粗大な Nb₃Sn 層の生成が促進されてしまい、微細 Nb₃Sn 層の成長は小さかった。

Fig. 3 に各試料の Layer J_c 測定結果を示す。今回の実験では、Nb/Sn 拡散長が大きく、また Sn 拡散駆動力に依

じた熱処理条件も最適化されていないことから、一概には比較できないが、Layer J_c の観点では、Zn と Mg 共添加が高い J_c を示す傾向がみられた。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K04453 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] N. Banno, Low-temperature superconductors: Nb₃Sn, Nb₃Al, and NbTi, Superconductivity 6 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2023.100047>

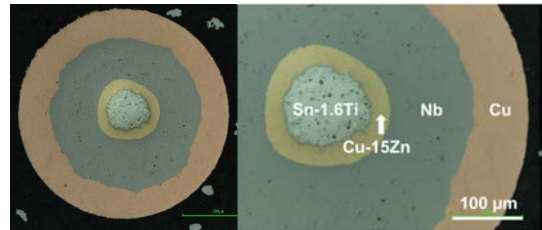


Fig.1. Cross-section of sample B with 15wt%Zn addition to Cu intermediate layer.

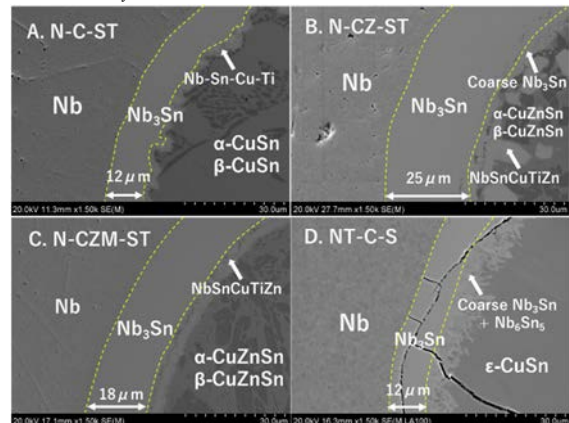


Fig.2. SEM images of the specimens at reaction interface after 500 °C × 100 h + 650 °C × 150 h.

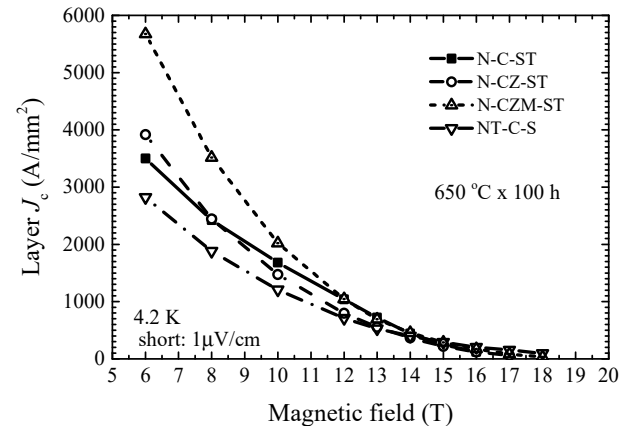


Fig. 3. Layer J_c of each specimen.

Nb₃Sn 層形成および超電導特性に与える Ti 添加場所の影響

Impact of Ti-doping position on Nb₃Sn layer formation and its superconducting property

伴野 信哉 (NIMS); 浅井 航希 (上智大学, NIMS); 谷貝 剛 (上智大学)
 Banno Nobuya, (NIMS); ASAI Koki (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

核融合炉や粒子加速器マグネットにおいて、Nb₃Sn 線材はキーコンポーネントであり、性能向上が切望されている。Nb₃Sn の高磁場特性を向上させる添加元素として Ti は極めて有効でこれまで多くの研究がなされてきた。しかし Ti は Nb₃Sn 層形成過程に非常に大きな影響を与える元素であり、その添加場所によって層形成が劇的に変わる。最近の研究では、Sn 芯に Ti 添加した場合、Nb₃Sn 形成層と Cu-Sn 層との界面で Ti を多く含む化合物層が形成され、Nb₃Sn 層成長の抑制因子となることが明らかとなっている。本研究ではその抑制につながる、Ti 添加場所を検討するため、ラボラトリースケールの内部スズ法 Nb₃Sn 多芯線材を作製して、Nb₃Sn 層形成および超電導特性に与える影響を調べた。

2. 断面設計コンセプト

線材は基本的には分散スズの設計とする。線材作製手順を以下に概説する。まず 1 mm 高さの六角形状 Cu 被覆 Nb 単芯線 (18/16mm Cu パイプ/15.5mm Nb ロッドを伸線) を作製、121 本束ねたのち、15/12.4mm Cu パイプに挿入して高さ 0.8 mm の六角形状まで伸線し Nb モジュールとする。一方で、高さ 0.8 mm の Sn 単芯線 (13/10 mm Cu パイプ/9.5mm Sn ロッドを伸線) を準備する。その後、Nb モジュールを 12 本、Sn 単芯線を 7 本、Fig. 1 のような配置で組み込み、Nb バリア用パイプ (6.5/4.5 mm) と Cu パイプ (8/6.6 mm) に挿入して Φ0.6 mm まで伸線する。Nb バリア内の組成比は Cu:Nb:Sn=52:35:13 (at%) である。

Ti 添加の場所として、2 通りを検討した (Fig. 1: Sn 芯添加、および Cu 母材添加)。ただし Cu 母材添加のポイントは、Ti 添加を Nb フィラメント周囲の Cu 母材に限ったことである (つまり Nb モジュールの外皮には Ti を添加しない)。単一拡散対を用いた過去の研究では、Nb の Cu 外皮に Ti 添加すると、Nb モジュール周囲に Ti を含む化合物層が形成されることが確かめられている [1]。そこで今回は外皮の Ti 添加を無くすことで、多芯線において Ti 化合物が抑制させるかを調べた。

作製した線材は 4 h で 685°C まで昇温その後保持して Nb₃Sn 層を形成させた。熱処理過程で適宜、サンプルを取り出して水冷し、SEM により Nb₃Sn 層形成過程を観察した。

3. 実験結果と考察

伸線加工性については、Ti を Sn 芯に添加した場合に断面が崩れていったのに対して Cu 母材に添加した方は良好であった。Nb と Cu との硬さのバランスが取れたことが要因と考えられる。Fig. 2 に、両試料において、予備加熱なしで 650°C まで昇温しそのまま 50h 保持した後の EDS マップを示す。Ti の母材添加で、明らかに良好な Sn 拡散が見られた。一方 Ti の Sn 芯添加では Ti コントラストが Nb モジュール外側で薄っすら強い様子が見られており、Ti の偏析があったことがうかがえる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K04453 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] T. Morita, T. Yagai, N. Banno, JALCOM 848 (2020) 155465, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155465>

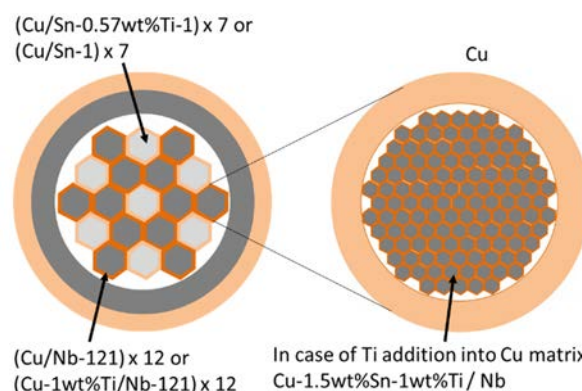


Fig.1. Cross-sectional design for distributed-Sn type Nb₃Sn precursor wires.

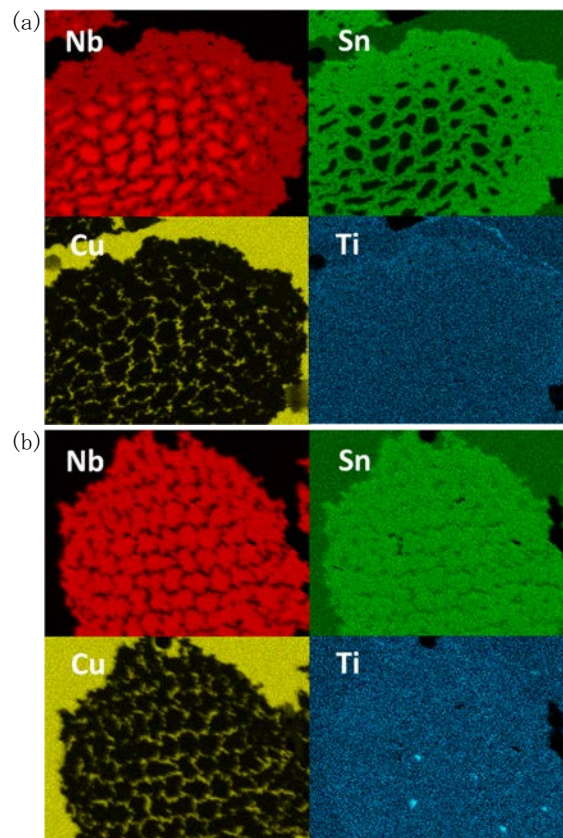


Fig.2. EDS maps of Nb module in case of (a) Ti-addition in Sn and (b) Ti addition in Cu matrix after 685 °C for 50 h.

JT-60SA ポロイダル磁場コイルの通電結果

Second operation result of JT-60SA superconducting coil

村上 陽之, 土屋 勝彦, 福井 良磨, 大西 祥広, 河野 勝己, 薄井 勝富, 柏 好敏, 井口 将秀,
佐藤 稔, 本田 敦, 市毛 尚志, 阿部 太一, 櫻井 嶺太, 濱田 一弥(量研)

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

1. はじめに

トカマク型核融合実験装置(JT-60SA)プロジェクトは欧州と日本が共同で進めており、超電導コイルを含む装置の組み立て[1]が2020年3月に完了した。2023年8月より第二回運転における超電導コイルの通電運転を開始し、10月にファーストプラズマを達成した[2]。通電試験は、コイル単独での通電から始め、全コイルを励磁する統合運転試験、そしてプラズマ運転と進んだ。本発表では、第二回運転を通して得られたポロイダル磁場コイルのクエンチ検出電圧の測定結果について報告する。

2. JT-60SA ポロイダル磁場コイルのクエンチ検出電圧

ポロイダル磁場コイルのクエンチ検出は、ピックアップコイルを用いて誘導電圧を除去し、クエンチによって発生する抵抗性の電圧を検出する方法である(図1)。クエンチ検出電圧の調整は、まず容量の大きい可変抵抗器(0-100 k Ω)を現場で動かし粗調を行い、その後遠隔で操作可能な小さな可変抵抗器(0-1 k Ω)で微調を行う構成である。

ノイズ除去のために取り付けられたフィルタ回路のコンデンサが影響し、電圧変化時(電流立ち上げや電流立下げ時)にスパイク状のノイズが生じることが確認されており、コンデンサの容量も精度よく調整する必要がある[2]。図1の可変コンデンサの部分に小容量のコンデンサ(22 nF, 33 nF, 55 nF, 155 nF)を追加した時のクエンチ検出電圧の変化を図2に示す。本試験はEF2コイルを用いて行われ、コイルへの印加電圧は ± 335 Vで、 ± 700 A/sで電流を変化させた。誘導電圧の除去が不十分で0.6 V程度の誘導電圧が観測されているが、コンデンサの変更により、電圧変化時に生じるスパイク状の電圧ノイズが大きく変化することが分かった。

3. 回路解析によるクエンチ検出電圧評価

スパイク状に発生する電圧の原因を調査するため、図3に示す回路モデルを構築し解析を行った。その結果、図4に示す通り、試験で発生したスパイク状の電圧を非常によく再現できることが分かった。そこで本回路解析を用いて、コイルの印加電圧が定格値の5 kVの時に発生するスパイク状ノイズの評価を行った(図5)。ここでは図3の2.177 μ Fのコンデンサ容量を2.2043 μ Fと精度よく調整したことで、スパイク状ノイズを0.1V程度以下と大きく軽減できている。また、最適値から ± 1 nFでコンデンサの容量を変化させて感度解析を実施した結果、クエンチ判定基準の1.0V \sim 2.0Vに対し、それより低い0.5V程度にスパイク状ノイズを抑えられていることが分かる。以上の結果より、次回運転に向けたクエンチ検出器の改良として1 nF程度以下で容量を調整できる可変コンデンサのシステムを追加する計画である。

参考文献

- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.65
- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.30

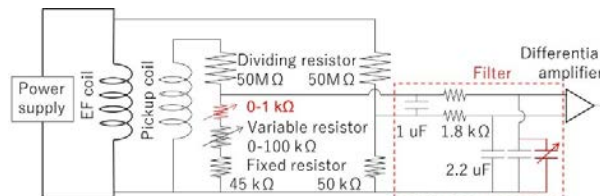


Fig. 1 Quench detector for EF coils

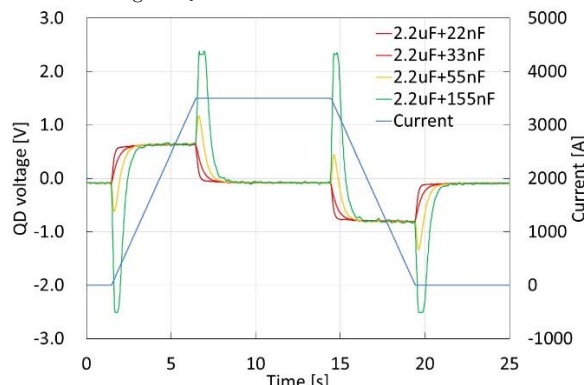


Fig. 2 Dependency of quench voltage on variable capacitor

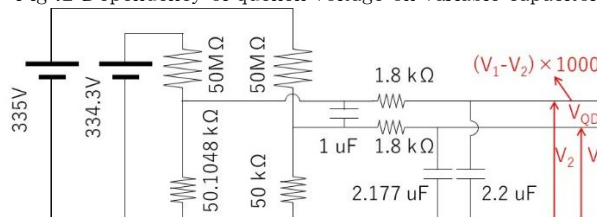


Fig. 3 Circuit model for quench voltage analysis

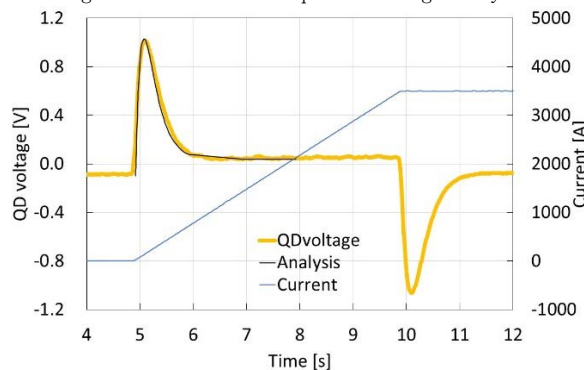


Fig. 4 Analysis result of quench voltage

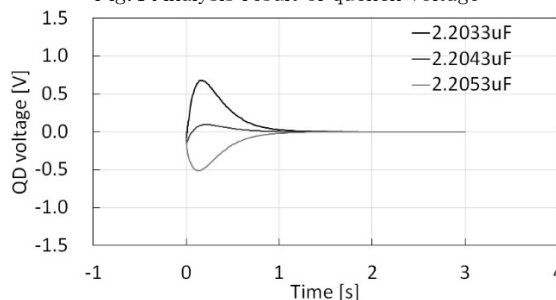


Fig. 5 Analysis result under 5.0 kV operation

高温超伝導 STARS 導体を用いた20 K / 20 Tモデルコイルの設計と開発

Design and development of a 20 K / 20 T model coil using HTS STARS conductor

柳 長門, 成嶋 吉朗, 田村 仁, 濱口 真司, 力石 浩孝, 平野 直樹(核融合研, 総研大);
小野寺 優太(核融合研); Diego Garfias-Dávalos(総研大); 伊藤 悟(東北大)

YANAGI Nagato, NARUSHIMA Yoshiro, TAMURA Hitoshi, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hirota, HIRANO Naoki(NIFS, SOKENDAI); ONODERA Yuta(NIFS); GARFIAS-DÁVALOS Diego(SOKENDAI); ITO Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yanagi@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所(NIFS)では将来の核融合炉と次世代のプラズマ核融合実験装置の大型マグネットへの適用をめざし、内部構造の異なる3種類の大電流高温超伝導(HTS)導体 STARS、FAIR、WISE の開発を行ってきた。このうち、STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体は多数枚の REBCO 線材を単純に積層して安定化銅ケーシングに収納、外側をステンレスジャケット(レーザービーム溶接)で覆うことで耐電磁力特性に優れた仕様となっている。また、銅とステンレスの間に電気絶縁を仕込んだ内部絶縁方式という他にない特徴も持っている。2019年からは、20 kA 級で実用となる導体の開発を進めている。

2. 20 kA 級 STARS 導体の性能

20 kA 級 STARS 導体では、12 mm 幅の REBCO 線材 15 枚を積層している。これを用いて、直径 600 mm、3 ターンのソレノイドコイル形状サンプル(導体長さ: 6 m)を製作し、NIFS の大口径高磁場導体試験装置に取りつけて冷却励磁試験を行い、1 kA/s の高速励磁を 200 回繰り返すなど、良好な結果を得た。試験では超時定数の残留磁場が観測された。これは、単純積層された線材間のインダクタンスの違いから線材間を渡る循環電流が流れることによるものと解釈され、数値計算によってうまく説明できる。循環電流は非一様電流分布の形成と等価であり、そのような条件となるものの、極めて安定に通電できることが確認された[1]。

3. 20 kA 級 STARS 導体を用いた R&D コイルの設計

STARS 導体の開発の次段階として、実際にこの導体を用いたコイルを製作し、冷却励磁試験を行うことでこの導体の巻線性能を実証することを計画している。このためのコイルの構造と主要諸元について、図 1 および表 1 に示す。表 1 では、SPARC のトロイダル磁場モデルコイル[4]との対比も示している。導体の巻線法として通常巻線に加え、接続巻線法[3]も採用し、これにロボットを用いた自動施工を行うことを検討している。コイルは、中心において最大 20 T の磁場強度となり、冷却温度は 20 K を想定する。現在、有限要素法を用いた電磁力解析を行い、巻線部の応力が問題のないレベルになるよう、コイル容器の厚みや形状を最適化している。これらの詳細について報告する。

参考文献

- [1] N. Yanagi et al., Journal of Physics Conference Series 2545.1 (2023) 012008.
[2] D. Whyte et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 34 (2024) 0600218.
[3] S. Ito et al., Fusion Eng. Des. 146 (2019) 590.

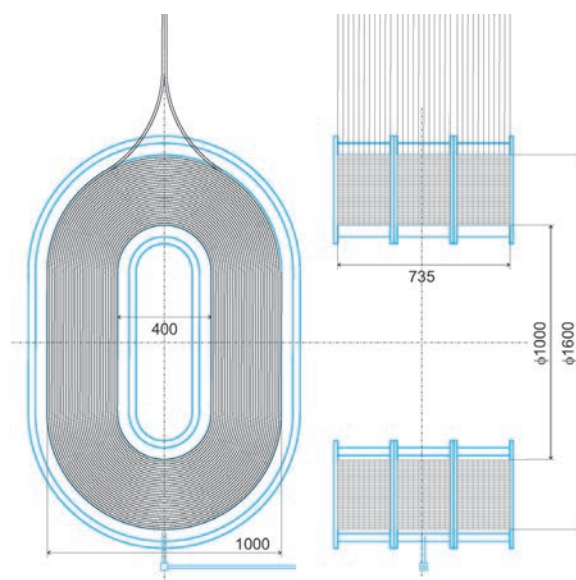


Fig. 1 Plan and cross-sectional views of the designed R&D coil using the STARS conductor.

Table 1 Major specifications of the designed R&D coil using the STARS conductor in comparison to the SPARC TF Model Coil.

	STARS R&D	SPARC TFMC
Rated Current	18 kA	40 kA
No. of turns	900	256
Inner radius	300 mm	530 mm
Outer radius	1100 × 1800 mm	1890 × 2890 mm
Total current	16.2 MA	10.24 MA
Current density	80 A/mm ²	153 A/mm ²
Maximum Field	20.3 T	20.1 T
Operation Temp.	20 K	20 K
Coolant	Helium gas	Supercritical helium
REBCO tape length	47 km	270 km
Inductance	650 mH	140 mH
Stored energy	105 MJ	110 MJ
Winding method	STARS conductor with long-length winding / joint winding	Spiral-grooved, stacked-plate tape winding with solder impregnation
Electrical insulation	Internal insulation	No-insulation

コイル形状がケーブルインコンジット導体の電流分布に及ぼす影響に関する基礎的検討

Basic study on the effect of coil geometry on current distribution in cable-in-conduit conductors

佐藤 亮太, 小林 宏泰, 宮城 大輔(千葉大学); 津田 理, 濱島 高太郎(東北大学)

SATO Ryota, KOBAYASHI Hiroyasu, MIYAGI Daisuke (Chiba University); TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)
E-mail: dmiyagi@chiba-u.jp

1. はじめに

核融合用超電導コイルの安定性能を高めるためには、CICC 内の電流分布を均一にする必要がある。著者らはこれまでに、直線形状の CICC の素線軌跡を計算し、各素線の自己インダクタンスと相互インダクタンスを求めることで、撚りピッチと電流分布の関係について検討を行ってきた^[1]。しかし、実際のコイル形状では隣接導体がつくる外部磁場が印加されるため、直線形状の CICC で偏流を抑制する撚りピッチがコイル形状においても偏流を抑制できるかを検討する必要がある。

本報告では、コイル形状の CICC において撚りピッチが電流分布に与える影響^[2]について検討し、直線形状の CICC の電流分布解析結果と比較を行うことで、コイル形状での隣接導体の影響が電流分布に及ぼす影響について検討を行った。さらに、直線形状の CICC での偏流を抑制する撚りピッチの検討がコイル形状においても有用であるかの基礎的検討を行ったので報告する。

2. 解析手法^[2]

各素線・素線間の自己・相互インダクタンスを計算するため、コイル形状とした CICC 内の全ての素線軌跡を計算により推定した。導体の長手方向に対して、直線形状の 2mm 毎の断面において素線配置を推定し、その結果をコイル形状としたときの断面と仮定し、各断面中心間の距離が概ね 2mm となるようにそれら断面をコイル形状に配置した。

各素線を 2mm 毎の素線要素に分割し、各素線の自己インダクタンスは各素線要素の自己インダクタンスと各素線要素間の相互インダクタンスの和として求めた。また、各素線間の相互インダクタンスは各素線要素の中心線間の相互インダクタンスの和として求めた。各素線の自己インダクタンスと各素線間の相互インダクタンスを考慮して導体端部でのみ各素線が短絡された等価回路モデルを作成し、各素線に流れる電流を計算した。実際の CICC の各素線は絶縁されていないが、各素線間の接触抵抗は、各素線のインピーダンスに比べて十分に大きいと仮定し、各素線が絶縁されているモデルとして電流分布の解析を行った。

3. 解析結果と考察

直線形状の CICC を用いて各次数の撚りピッチと電流分布の関係を検討した結果、偏流を抑制できる撚りピッチの組合せの一例として、1 次ケーブルの撚りピッチが短く、各次数の撚りピッチの最小公倍数長さが十分に長いときであることがわかっている^[1]。Fig. 1, 2 に直線形状で偏流が抑制された撚りピッチ 80/160/240/280/400 mm の CICC を 3 ターン巻いたコイルの内径を 3, 5, 7 m とする場合と、内径 5m としてターン数を 3, 5, 7 とした場合の各素線に流れる電流の標準偏差を示す。3 ターンのコイルでは、コイル内径が CICC の電流分布にほとんど影響しないことが示された。一方で、内径 5m でターン数が 5 ターン以上のコイルにおいて直線形状の CICC よりも各素線に流れる電流の標準偏差が少し大きくなることが明らかとなった。また、Fig. 3 に直線形状で偏流が抑制された撚りピッチ 80/160/240/280/400 mm の CICC と、偏流が顕著で

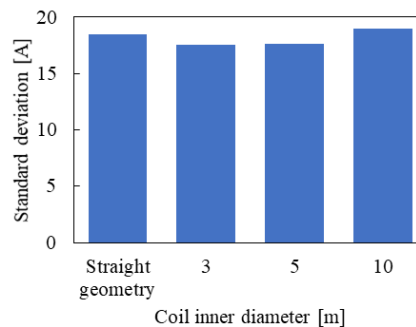


Fig. 1. Relationship between the number of turns and the standard deviation of the current in each strand in a 3-turns coil.

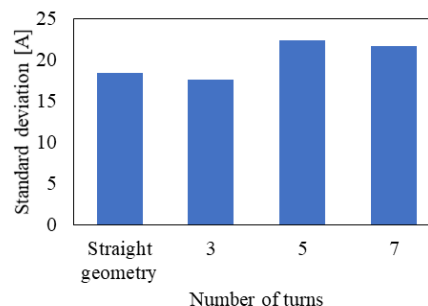


Fig. 2. Relationship between the number of turns and the standard deviation of the current for each strand in a coil with an inner diameter of 5 m.

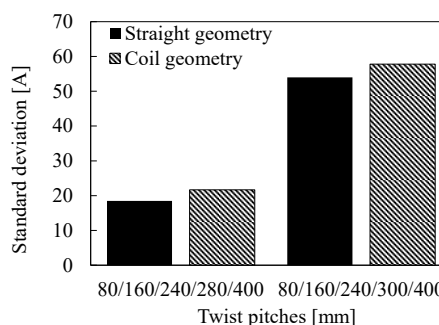


Fig. 3. Comparison of the standard deviation of the current flowing in each strand between CICC in straight geometry and CICC in coil geometry.

あった撚りピッチ 80/160/240/300/400 mm の CICC について、直線形状とコイル形状(内径 5 m, ターン数 7)の場合の各素線に流れる電流の標準偏差を示す。結果より、直線形状で偏流抑制を検討した撚りピッチ構成はコイル形状でも有用である可能性があることがわかった。

参考文献

- Ryota Sato, Kichizo Abe, et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., 4802605, Vol.: 34, Issue: 5, Aug. (2024)
- 佐藤亮太, 他: 電気学会研究会資料金属・セラミックス/超電導機器合同研究会, MC-24-005/ASC-24-005, (2024)

東北大学大洗センターの超伝導特性評価システムの高度化 —50Hz 計測システムの導入—

Improvement of superconducting property evaluation system at Oarai Center in Tohoku University –Installation of 50 Hz data acquisition system–

西村 新, 菱沼 良光(核融合研)
NISHIMURA Arata, HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS)
E-mail: nishimura.arata@toki-fs.jp

1. はじめに

2012 年に東北大学金属材料研究所大洗センターに 15.5T 超伝導磁石と温度可変インサート(VTI)が導入されて以来、Nb₃Sn 線材の超伝導特性に及ぼす中性子照射効果に関する研究が続けられてきた。導入された VTI は熱伝導冷却が採用されているため、試料に通電するとジュール発熱が生じ電極、試料温度が上昇する。

試料ホルダーの模式図を Fig. 1 に示す。G-M 冷凍機の第 2 ステージにつながる高純度アルミロッドがあり、このアルミロッドを挟み込むようにバスバーがある。バスバーの先には電極があり、試料はこの電極の先に半田付けされる。輻射熱、ジュール熱は高純度アルミロッドによって排出されるが、試料温度が約 10 K 以下では、試料通電時に+電極、-電極それぞれに若干の温度上昇が生じる。この温度上昇時の臨界電流(I_c)を 4.2K での I_c (4.2)に換算する手法を検討した。

2. 測定した I_c から 4.2K での I_c への変換

A. Godeke ら[1]の Nb₃Sn 線材を対象とした臨界曲面の式から、T K での I_c(I_c(T))は次式によって 4.2 K での I_c(I_c(4.2))に変換できる。

$$I_c(4.2)/I_c(T) = (1-t_{4.2}^{1.5})(1-t_{4.2}^2)/(1-t^{1.5})(1-t^2) \quad (1)$$

ここで、t は T/T_c(0)で、T_c(0)は 0 T での臨界温度(T_c)である。0 K での B_{c2} (B_{c2}(0))と 0 T での T_c (T_c(0))の間には次の関係がある[2]。

$$B_{c2}(T) = B_{c2}(0) \times (1 - (T/T_c(0))^v)$$

ここで、v は Universal parameter で 1.5 である。Fig. 2 に測定した B_{c2}(0)と T_c(0)^{1.5}の関係を示す。良好な線形関係がある。

50Hz で Sampling した電流、Nb₃Sn 試料中央部電圧、正負電極温度、平均温度の変化の一例を Fig. 3 に示す。試料電流の増加速度を 43 A/s とした場合の結果で、電極温度が徐々に上昇しているのがわかる。1 μV/cm の電圧発生時(直前)の電流値を I_c とし、その時の試料温度を電極の平均温度とした。この I_c と試料温度から、4.2 K での I_c を求めた。その結果の一例を Fig. 4 に示す。△は測定データ、○は測定 I_c を 4.2 K に換算したデータ、■は液体 He 中での測定データである。液体 He 中でのデータは緩やかな電圧の立ち上がりが見られるが、VTI での結果では急激な電圧の立ち上がりとなる。これは液体 He 冷却と伝導冷却との違いに起因している。しか

しながら、I_c の 4.2 K への変換により、ほぼ同じ V-I 曲線が得られており、4.2 K での I_c への換算が可能であり、かつ相互の比較評価が可能であることがわかる。

参考文献

1. A. Godeke, et. al, SuST, 19 (2006) R100. doi:10.1088/0953-2048/19/10/R02.
2. Xifeng Lu and D. P. Hampshire, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 2009 p2619-2623

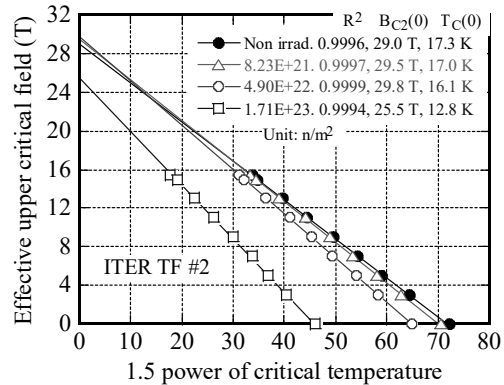


Fig. 2 Relation between B_{c2}(T) and T_c(0)^{1.5}.

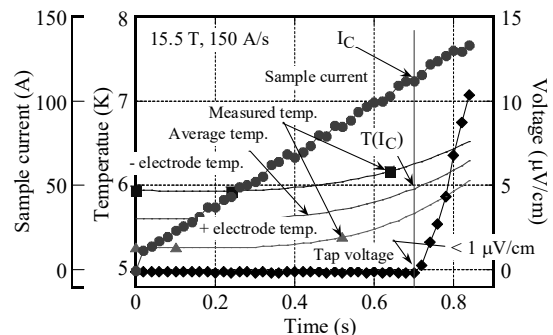


Fig.3 Changes in sample current, sample voltage, temperatures of electrodes, average temperature.

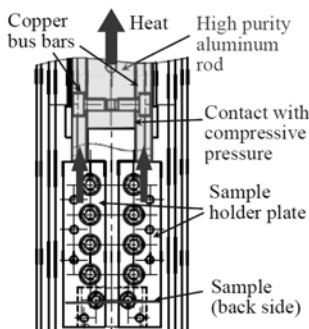


Fig. 1 Illustration of sample holder

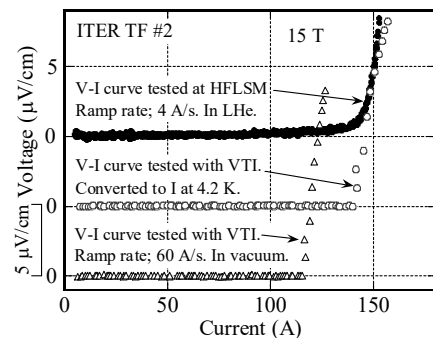


Fig.4 Comparison of modified V-I curve with temperature and test results in liquid helium.

Nb₃Sn 線材および ReBCO テープの超伝導特性に及ぼす中性子照射効果

Neutron irradiation effect on superconductivity of Nb₃Sn wires and ReBCO tapes

西村 新, 菱沼良光 (NIFS)

NISHIMURA Arata, HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS)

E-mail: nishimura.arata@toki-fs.jp

1. はじめに

ITER TF コイル用に開発された Nb₃Sn 線材を用いた中性子照射効果に関する研究が継続されており、ReBCO テープの中性子照射効果も同時に進められている。ここでは、Nb₃Sn 線材の照射効果について最近の成果を報告する。

中性子照射はベルギーの BR2 で実施し、0.1MeV 以上の中性子線量が 8.23x10²¹ n/m²、4.90x10²² n/m²、1.71x10²³ n/m² となる照射を行った。8.23x10²¹ n/m² の照射は BAMI system で実施し、そのほかの二つは LIBERTY system で実施した。これらの system では、試料が設置される場所が異なり、中性子エネルギー分布は異なっている。しかし、詳細な Envelope は公表されていないので、0.1MeV 以下の中性子線量は不明である。

BR2 での照射後、東北大学大洗センターに設置されている 15.5 T 超伝導マグネットと温度可変インサート(VTI)を用いて超伝導特性を評価した。

2. 中性子照射による超伝導特性の変化

伝導冷却による試料ホルダーの冷却のため、+電極と-電極間に温度差が生じる。その温度の影響を少なくするため、4.2 K での臨界電流(I_c)に換算して照射効果を議論することとした[1]。0 K での臨界磁場 B_{c2} (B_{c2}(0))と 0 T での臨界温度 T_c (T_c(0))の間には次の関係がある[2]。

$$B_{c2}(T) = B_{c2}(0) \times (1 - (T/T_{c}(0))^{\nu})$$

ここで、 ν は Universal parameter で 1.5 である。

横軸を T_c(T)の 1.5 乗に取り、両者の関係を示したものが Fig. 1 である。図中に評価した B_{c2}(0)、T_c(0)の値を示す。1.71x10²³ n/m² の照射では明らかに B_{c2}(0)、T_c(0)ともに低下するが、それ以外の照射では B_{c2}(0)の低下は顕著ではないものの T_c(0)は単調に低下している。

外部磁場に対する I_c の測定結果、変換した I_c(4.2) および I_c/I_{c0} の一例を Fig. 2 に示す。この結果は中性子線量が 4.90E+22 n/m²、通電速度 150 A/s の結果である。測定結果(△)は低磁場側上昇する。4.2 K に換算した結果(○)は低磁場側で大きく増加するが、未照射材の I_c に対する照射材の I_c(I_c/I_{c0}(4.2))は低磁場側で低下する。すなわち、低磁場側の方が中性子照射による劣化が大きいことになる。これは B_{c2}(0)が照射により大きく変化しないことに関係している。

中性子照射線量を変えた場合の I_c/I_{c0} の磁場依存性を Fig. 3 に示す。同図中には通電速度を変えた場合の結果も同時に示す。中性子線量を 8.23E+21 n/m² とした場合、線量が 4.90E+22 n/m² の場合に比べ I_c の劣化が大きくなった。BR2 の中性子照射では、BAMI system と LIBERTY system の二つを利用した。それぞれの照射においては試料を保持する位置が異なり、中性子のエネルギー分布が同じではない。従って、0.1 MeV 以上の中性子線量はここに示したような値となっているものの、0.1 MeV 以下の線量は大きく異なり、それらの中性子が I_c 特性を劣化させている可能性がある。低エネルギー側の中性子線量を低下させた場合の結果については後日報告する。

同時に、ReBCO テープの中性子照射効果を検討している。特に GdBCO では、Gd が低エネルギーの中性子を大変良く吸収するため、その吸収による超伝導特性の劣化が詳細に検討される必要がある。中性子被ばく保護に

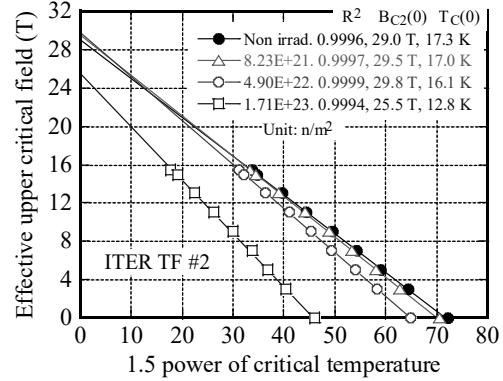


Fig. 1 Relation between B_{c2}(T) and T_c(0)^{1.5}

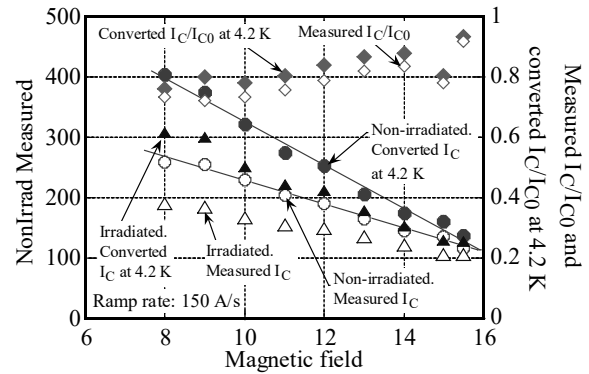


Fig. 2 Change in critical current and I_c/I_{c0}(4.2) of non-irradiated and irradiated Nb₃Sn wire against magnetic field. (4.90E+22 n/m², 150 A/s)

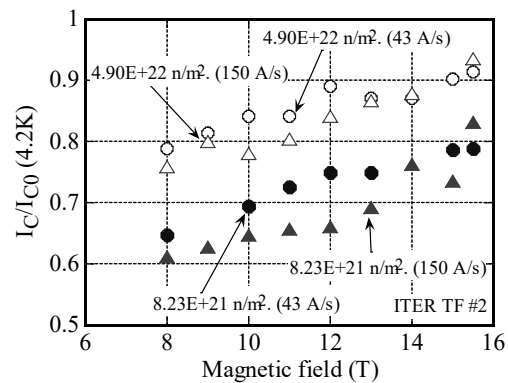


Fig. 3 Change in I_c/I_{c0}(4.2K) of 4.90E+22 (BAMI) and 8.23E+21 (LIBERTY) n/m² irradiation.

関する検討も含め、最近の研究成果の一端を発表当日報告する。

参考文献

1. A. Nishimura and Y. Hishinuma, 3A-a07, CSJ Spring Conference (2024)
2. Xifeng Lu and D. P. Hampshire, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 2009 p2619-2623

微細な B 粉末を用いた MgB₂ バルクの合成条件の最適化

Optimization of synthesis conditions for MgB₂ bulks prepared from fine B powder

岩崎 響, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 末本 祐也, 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー(株))

IWASAKI Hibiki, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

SUEMOTO Yuya, AKIIKE Ryo, MESUDA Masami (Tosoh Corporation)

E-mail: c5623056@aoyama.jp

1. 緒言

MgB₂は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度 $T_c \sim 39$ K を有し、化学的に安定で合成が容易、かつ原料が比較的安価であることから、液体ヘリウムフリーの冷凍機冷却による 10-20 K 付近での応用が期待されている。しかし、MgB₂は磁場の増大とともに臨界電流密度 J_c が急激に低下する問題があり、これが改善できれば医療用高分解能 MRI など広範な応用が可能になる。MgB₂材料の磁場中 J_c の改善には MgB₂の主なピンニングセンターである粒界密度の高密度化が有効な指針の一つである。MgB₂は B の粒子内に Mg が拡散することによって生成することから、原料となる B 粉末が高純度かつ粒径の小さいものであるほど微細な MgB₂結晶が生成しやすく、粒界密度が向上することが報告されている^[1]。しかし、このような B 粉末は高価であり材料普及の障害になっている。そこで本研究では、我々が開発中の B 原料を用い、高臨界電流特性を有する MgB₂バルクの作製を目指した。我々は前回、開発中の B 粉末と安価なフルウチ社製 B 粉末を混合した粉末を用いて Premix 拡散法 MgB₂バルクを作製し、市販の高価な B 粉末を用いて同条件で作製した MgB₂バルクよりも高い臨界電流特性を示すことを報告した。今回は新たに試作した開発中の B 粉末を用いた MgB₂バルクの作製条件の最適化を目指し、フルウチ社製 B との混合比の探求や焼成条件の検討を試みた。

2. 実験方法

MgB₂多結晶バルクの作製には MgB₂粉末(フルウチ化学社製)と B 粉末(フルウチ化学社製、粒径 ~ 48 μm もしくは開発中の粒径 ~ 100 nm)の混合粉末に外部から Mg 粉末(100#)を拡散させる Premix PICT 拡散法を用いた。なお、開発中の B はフルウチ社製 B と比較して粒径は小さいが、酸素含有量比較的多く、Al、Mn など微量の金属不純物を含んでいる。試料作製の際には Mg : B : MgB₂ = 1.2 : 2 : 1 のモル比となるようそれぞれの原料粉末を秤量し、SUS316 管に封入、 ~ 1.5 GPa の中間一軸プレスを施し、さらに石英管封管内で焼成した。Premix した MgB₂はフルウチ製の市販試薬である。構成相の同定は XRD 回折法、微細組織は SEM 観察、超伝導特性評価は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。 J_c は磁化ヒステリシス幅から拡張 Bean モデルを用いて算出した。

3. 結果と考察

今回新たに試作した B 原料(2403-6 B)を用いて作製した MgB₂バルクと、前回報告した B 原料(1G B)を用いた MgB₂バルクの比較を行った。Fig.1 に各試料の研磨面二次電子像を示す。2403-6 B を用いた試料は 1G B を用いた試料と同様に緻密な組織を有しており、結晶粒界の白い MgO が少ない領域が存在することがわかった。Fig.2 に両試料の 15 K における J_c の磁場依存性を示す。2403-6 B を用いた試料は 0 T 付近・磁場中のいずれにおいても 1G B を用いた試料を上回る J_c を示すことがわかった。発表では、2403-6 B とフルウチ社製 B の混合比率を系統的に変えた混合粉末を用いて作製した試料や、異なる焼成条件で作製した試料の微細組織と超伝導特性についても報告する。

参考文献

[1] Y. Katsura *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **43** (2006) 119-122

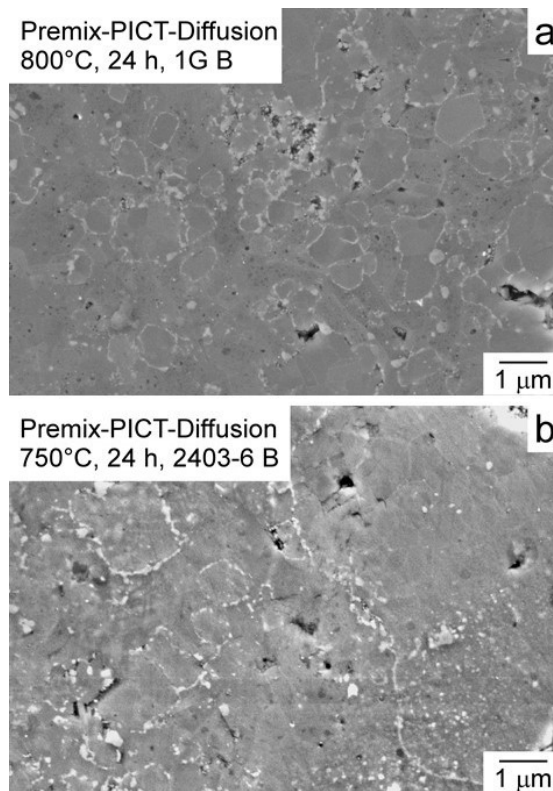


Fig.1 Scanning electron microscope images of MgB₂ bulks synthesized by Premix-PICT-Diffusion method using new B powder. 1G B (a), 2403-6 B(b).

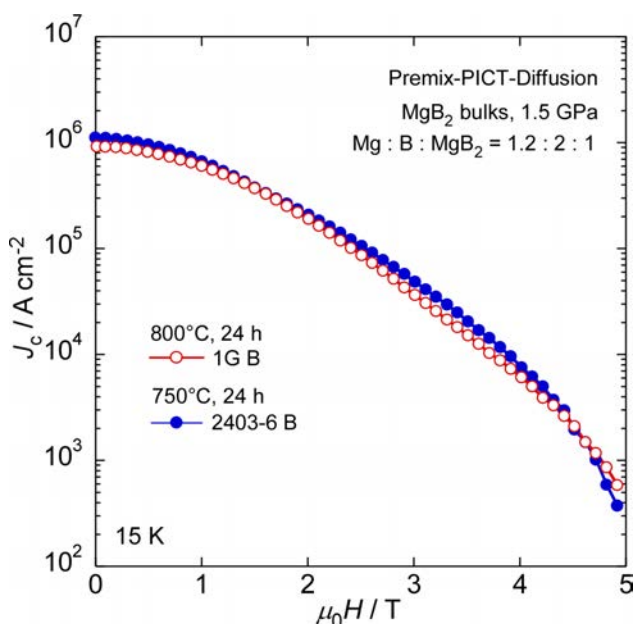


Fig.2 $J_c - H$ curves at 15 K of MgB₂ bulks synthesized by Premix-PICT-Diffusion method using new B reagents.

MgB₂ 線材の熱処理時間が室温での印加ひずみ耐性に与える影響

Effect of heat treatment time of MgB₂ wire on strain tolerance at room temperature

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立);

菅野 未知央, ダカルワル ムケシュ, 荻津 透(KEK); 西島 元, 松本 明善(NIMS)

TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi);

SUGANO Michinaka, Mukesh DHAKARWAL, OGITSU Toru (KEK); NISHIJIMA Gen, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂線材は Wind & React 法で磁石が作製されるなど実用化に近づいているが、その応用拡大のために React & Wind 法で使用可能な線材が期待されている。React & Wind 法においてはまず、コイル巻線時の印加ひずみによる I_c劣化を防ぐ必要がある。室温における MgB₂線材のひずみ耐性は主に、MgB₂生成時の熱処理温度から室温への冷却に伴って MgB₂部へ加えられる残留圧縮ひずみで決まると考えられている。一方で前回の報告で、MgB₂線材のひずみ耐性が熱処理時間の長時間化で向上する可能性が実験的に示唆された[1]。MgB₂フィラメントに加わる残留圧縮ひずみが、単に構成材料の占積率、線膨張係数、ヤング率で決まる場合、その大きさは熱処理時間の影響を受けない。本報告ではひずみ耐性を決める要因に関し、熱処理時間の長時間化が構成金属およびフィラメントに与える影響を検討した結果を報告する。

2. ひずみ耐性向上の確認

Fig.1 に 600°C×12 時間または 48 時間で熱処理した MgB₂線材の断面写真を、Fig.2 に室温でのひずみ耐性評価結果を示す。線径は 1.52 mm、占積率は MgB₂:26%、Fe:37%、Cu:21%、Monel:17%である。グラフ中の横軸は室温で加えた最大印加ひずみを、縦軸は負荷なしでの値で規格化した I_cを示している。Fig.2 (a)および(b)はそれぞれ曲げおよび引張りにより様々な負荷を加えた後に除荷したサンプル群を 4.2K で評価した結果であり、わずかではあるが確実に 48 時間熱処理線材のほうがひずみ耐性が高い。また曲げと引張りで得られた不可逆ひずみはおよそ一致する結果が得られた。

3. 長時間熱処理による構成金属の変化

検討対象の MgB₂線材の金属層は Fe, Cu, Monel であるが、熱処理温度 600°Cの継続時間ではこれらの降伏応力・ひずみが変わり得る。これまでに MgB₂線材の構成金属種類や熱処理温度がひずみ耐性に与える影響は議論されてきたが、構成金属の降伏に関する検討は少ない。他の線材では例えば、降伏応力が小さな Ag の降伏点を考慮した Bi2223 線材での残留圧縮ひずみの検討が報告されている[2]。

Cu も Ag 同様に降伏しやすい材料である。Fe, Monel の降伏応力はそれぞれ 150-250 MPa[3], 180-300 MPa[4]程度である。これらの降伏応力に対し、600°Cから室温への冷却における各構成材料に加わる応力を求めると Fe, Monel は 600°Cから室温への冷却では降伏に至らないことが分かる。よって本検討の範囲では、熱処理時間の長時間化による残留圧縮ひずみは有意義には変わらないと言える。参考文献[2]を参考にした詳細数値などは当日報告する。

4. 長時間熱処理によるフィラメントの変化

まず、本線材で I_cの値を優先する場合の熱処理条件は 600°C×12時間であり、熱処理時間の短/長時間化により緩やかに I_cが低下する。MgB₂線材の主なピンニングセンターは粒界であるため[5]、I_cを優先して熱処理されたフィラメント中では結果として未反応の Mg や B 粉末が残っている[6]。本報告で

検討した48時間熱処理線材では、12時間熱処理と比べ、MgB₂への反応が進むことで未反応粉末が減少し、その結果フィラメント自身の強度が向上したと考えられる。一方で I_c-B-T 特性を実測して比較した結果、熱処理時間の長時間化により I_cは20%以上低下していた。よって熱処理時間の長時間化によるひずみ耐性向上は、実際の応用では自己磁場～低磁場機器への適用に限られるが、MgB₂線材のひずみ耐性のメカニズム解明において重要な知見と考えられる。

参考文献

1. H. Tanaka, et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.106 (2023) p.82
2. M. Sugano et al. : Physica C 412-414 (2004) 1114-1119
3. NIST Technical Note 1879 (2015)
http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1879
4. O. Marenych et al. : Sciences Papers Part B, (2020)
University of Wollongong Research Online
5. M. Kodama et al. : SuST. 27 (2014) 055003
6. M. Kodama et al. : SuST. 30 (2017) 044006

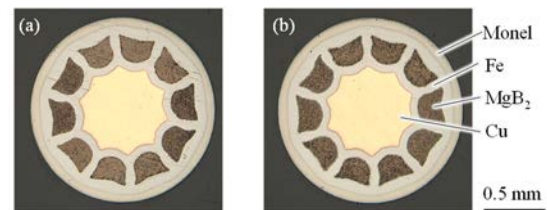


Fig.1 Cross-section views of 10-filament MgB₂ wires sintered by 600°C for (a) 12 hr and (b) 48 hr, respectively.

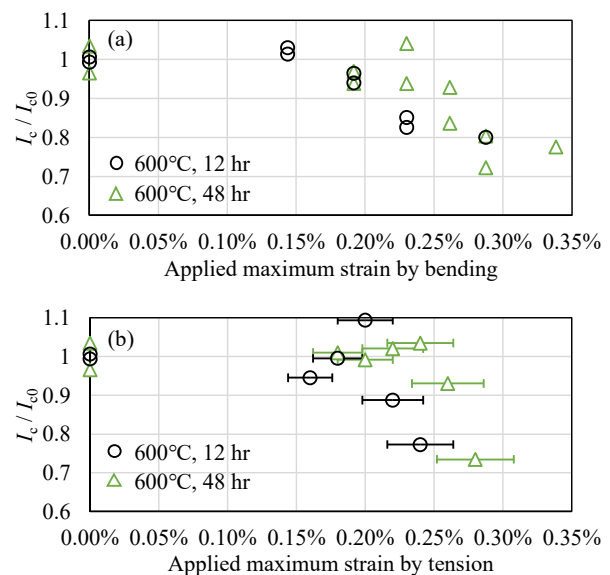


Fig.2 Normalized I_c obtained from 12 hr and 48 hr sintered sample wires as a function of applied maximum strain by (a) bending and (b) tension, respectively.

液体水素用液面センサーに適した超伝導 MgB₂ 線材の断面観察

Cross-sectional observation of superconducting MgB₂ wires suitable for liquid hydrogen level sensor

大島 冬真, 武田 実, 前川 一真 (神戸大); 福本 祥一, 高田 芳宏 (山本電機製作所)
 OSHIMA Toma, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.);
 FUKUMOTO Shoichi, TAKADA Yoshihiro (Yamamoto Electric Works)
 E-mail:227w601w@cloud.kobe-u.jp

1. はじめに

化石燃料や原子力に替わるクリーンなエネルギーとして、近年水素が注目されている。水素エネルギー社会実現のためには水素を大量に輸送・貯蔵する必要があり、これには気体水素の800分の1の体積となる液体水素(沸点20 K)が適している。しかし現在、液体水素用に開発された液面センサーは少なく、測定精度や応答性に優れた液面センサーが求められている。そこで我々は、超伝導MgB₂(二ホウ化マグネシウム)液面センサーに着目し、液体水素用液面センサーの高性能化に関する研究開発を行っている。

我々は、外部加熱型液面センサーに着目しているが、液面センサーとして高精度に働くためには、液面直上で速やかに超伝導状態から常伝導状態にシフトしなければならず、MgB₂線材の超伝導転移温度 T_c が液体水素温度に近くなくてはならない。過去の研究[1]で、MgB₂線材の T_c を下げるため、様々な条件でMgB₂線材を作製し、その超伝導特性を検証した。その中で、ホウ素の粒径を変えて作製したMgB₂線材の T_c が変化することが示唆された。そこで、様々な粒径のホウ素を用いてMgB₂線材を作製し、その超伝導特性試験を行うとともに、線材の断面観察を行ったので報告する。

2. 様々な粒径のホウ素を用いたMgB₂線材の作製と評価

本研究で作製したMgB₂線材の組成と作製条件を Table 1 に示す。線材は Powder-in-tube 法で作製し、1 mm 角線、数十 cm に伸線した。熱処理は 600 °C・1 時間で行なった。 T_c を下げるための不純物として SiC を添加した。シース材には Cu-Ni 合金(7:3)を使用した。さらに各条件で作製した線材から 20 mm のショートサンプルを切り出し、超伝導特性試験を行った。試験結果をFig.1 に示す。結果よりホウ素の粒径が大きいほど T_c の値が低下する傾向が見られた。ホウ素の粒径とMgB₂線材の超伝導特性の関係の詳細を調べるため、ホウ素粉末のレーザー回折式粒度分布測定と作製した線材のXRD試験を行った。粒度分布測定より、購入先記載通りの大小関係があることを確認した。XRD試験より、ホウ素の粒径が大きいほど格子定数 a が小さく、C置換が起きやすいことが確認できた[2]。次に、電子顕微鏡を用い、線材の断面観察を行い、結晶相の分布と更なる詳細を調べている。

3. MgB₂線材の電子顕微鏡による断面観察

断面観察の事前試験として別途液面センサー用に作製していた線材で断面観察を行った。使用した線材の作成条件をTable 2 に示す。線材は ϕ 0.3 mm、ホウ素には結晶性のもを使用し、SiC は添加しなかった。その他の作製条件はTable 1 と同様である。電子顕微鏡(SEM)で行った断面観察の結果をFig.2 に示す。Fig.2 で示す通り、最も黒い構造である未反応のBやその周りの灰色のMgB₂等が確認できた。これにより断面観察が可能であることがわかった。

4. まとめ

ホウ素の粒径が MgB₂ 線材の T_c に影響を与えることが確認できた。事前試験によって、SEM を用いた観察が問題なく実施できたため、超伝導特性試験で使用した線材の断面観察を行い、その結果を発表する。

Table 1 Composition and fabrication conditions of MgB₂ wires.

Series	A	B	C	D
Boron particle size [μ m]	0.7	1.0	10	44
Additive SiC amount [%]	10			
Heat treatment temp [°C] and time [h]	600 1			

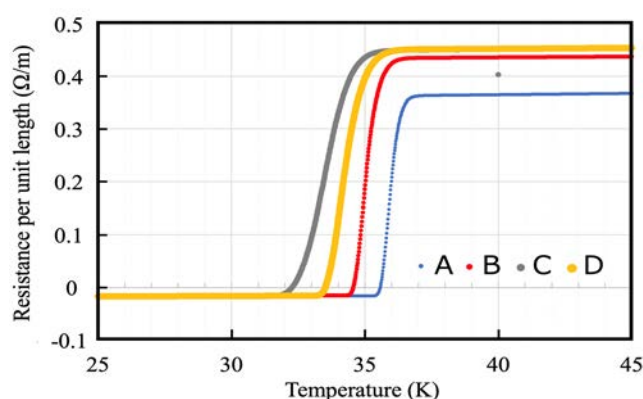


Fig.1 Relationship between resistances per unit length and temperature of the 20-mm-long MgB₂ wires.

Table 2 Fabrication conditions of MgB₂ wires for pretest of cross-sectional observation.

Series	X	Y	Z
Boron particle size [μ m]	44	5.0	1.0
Additive SiC amount [%]	Crystalline		
Crystalline or Amorphous			

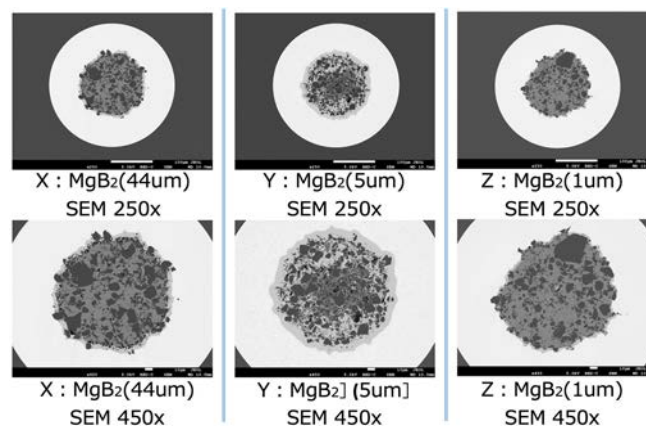


Fig.2 Cross-sectional observation of MgB₂ wires using SEM.

参考文献

- S. Fukumoto, *et al.*: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 57, (2022) p.39-45
- T. Oshima, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.88

常磁性物質の超電導淘汰管磁気分離法に関する基礎的研究

Fundamental study on superconducting magnetic separation of paramagnetic materials using a selection tube

三島 史人, 野村 直希, 西嶋 茂宏 (福井工業大学)

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

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

1. はじめに

常磁性物質の磁気分離には、従来5T以上の強磁場と高勾配磁場の適用が必要とされている。しかし磁気分離装置の現場での使用として考えると、できる限り強磁場を使用せず分離効率を上げることが求められている。そこで我々は淘汰管底部から上昇流により、分離対象物に作用する重力とドラッグ力を制御し、浮遊状態にした常磁性物質(分離対象物)を低磁場で淘汰管磁気分離してきた。さらに淘汰管内に高勾配磁気フィルタを適用することで、さらに印加磁場を低磁場化することが可能である。

本研究ではこの淘汰管磁気分離手法の磁場発生源としてソレノイド超電導磁石を用い、淘汰管磁気分離実験を行い、磁場内の任意の領域に目的の粒子を停留し、磁気分離できたので、その結果について報告する。

2. 淘汰管および淘汰管磁気分離の原理

淘汰管は粒子の沈降速度と装置下部から流入した懸濁液の上昇速度との関係により、微粒子を粒径により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、浮力と重力が働く。この粒子に作用する合力を式(1)に示す。また、この式から流体の速度 $v_f=0$ 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。

$$F = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f) - 6\pi\eta r(v_f - v_p) \quad (1)$$

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

ここで、 r は粒子半径 [m]、 ρ_p は粒子の密度 [kg/m³]、 ρ_f は流体の密度 [kg/m³]、 η は流体の粘度 [Pa·s]、 v_f は流体の速度 [m/s]、 v_p は粒子の速度 [m/s]を示す。

粒子の沈降終端速度 v_s が、流体の上昇速度 v_f よりも大きいまたは一致する場合、淘汰管で粒子は浮遊または沈降して、装置内に停留する。一方、 v_s が、 v_f よりも小さい場合、粒子は流体の流れにより淘汰管の系外に排出されることになる。

見かけ無重力状態に浮遊した分離対象粒子に磁場を印加する(粒子に作用するドラッグ力 $=0$ で磁気力が支配的となり)ことで、低磁場で磁気分離するのが淘汰管磁気分離である。

3. 超電導磁石を利用した淘汰管磁気分離実験

層流下においては管内に浮遊する粒子の粒度分布は、その流速分布(流線)に依存する。磁気力により、その粒度分布幅を小さく精密に制御できる。我々はこれまでの研究で磁場発生源にソレノイド型超電導磁石を用い、淘汰管内に磁気フィルタを配置し、粒子に作用する鉛直下向きの磁気力を制御することで、より精密な分離が可能であることを計算から示してきた。

しかし、実際に淘汰管磁気分離をするには、超電導磁石のボア内の任意な磁場領域に、分離目的対象粒子を(自動的に誘導し)浮遊させることが必要であり、我々はこれについて淘汰管を多段化することで、分離対象粒子を任意の位置に浮遊させることに成功した。[1], [2]

そこで、本研究では、磁場発生源に超電導ソレノイド磁石を適用し淘汰管磁気分離実験を実施した。

ふるい分けしたパーミキュライト粒子(体積磁化率 7.0×10^{-4})を粒度分布測定装置で測定し、 $1 \mu\text{m}$ 以下と $4 \mu\text{m}$ にピークを確認した。そして分離対象粒子の平均粒径を $4 \mu\text{m}$ として計算から管内の流速を 3.3mm/s (磁気フィルタ無しでは粒子径は10倍程の粒子が停留)と決定した。

実験体系を図1に示す。俵型にした磁気フィルタ(SUS430製の線径 0.6mm)を淘汰管内に配置し、外部磁場 2T を印加した。その際の淘汰管は2段として目的対象粒子を分離対象領域内で浮遊させた。

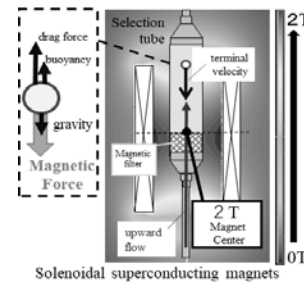


Fig.1 Concept illustration of magnetic selection tube applied Superconducting magnet. The selection tube is located above the center of the maximum magnetic field. Magnetic flux density (B_{max}) about 2T.

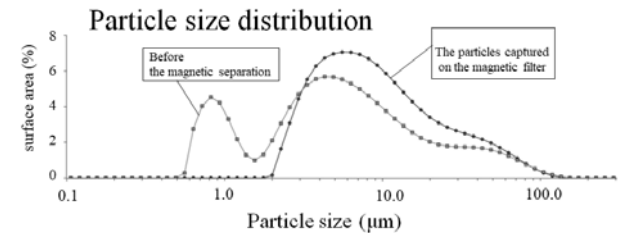


Fig.2 Particle size distribution of the results of the selection tube magnetic separation experiment

淘汰管内に投入した粒子と磁気フィルタ捕捉されたパーミキュライト粒子の粒度分布測定の結果を図2に示す。

図2に示すように、投入時の粒子パーミキュライト粒子に対し、磁気フィルタに捕捉された粒子には $4 \sim 7 \mu\text{m}$ 付近にピークが見られ、計算から決定した流速に対する目的対象粒子径のパーミキュライトが捕捉されたことが確認できた。

4. まとめ

小規模な淘汰管を用いて低磁場印加条件の高勾配磁気分離実験を実施した。最大印加磁場 2T で粒子径数ミクロンの常磁性粒子の磁気分離が可能であり、淘汰管を用いた磁気分離法が常磁性体の分離に有効であることが示された。今後は、強磁性細線フィルタの線径・形状や特に淘汰管内での配置方法などを詳細に検討してゆく予定である。

参考文献

- [1]Nagahama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.149
- [2]F.Mishima, et. al.: Progress in Superconductivity and Cryogenics,25, (3), pp13-17, (2023)

原子炉中で発生する CRUD 材の磁気分離に関する基礎的研究

Basic research on magnetic separation of CRUD materials generated in nuclear reactors

西嶋 茂宏, 野村 直希, 三島 史人 (福井工大); 関根 智一 (ICUS)
 NISHIJIMA Shigehiro, NOMURA Naoki, MISHIMA Fumihito (FUT); SEKINE Tomokazu (ICUS)
 E-mail: nishijima@fukui-ut.ac.jp

1. はじめに

原子炉内の給水系配管には高耐食性の材料が選択されているが、高温・高圧環境下ではわずかではあるが腐食が発生する。この腐食生成物は冷却材とともに給水系内を循環し、一部、炉心に付着する。炉心には中性子が存在するため、その付着した腐食生成物は中性子で照射されて放射化する。

放射化した腐食生成物もまたその一部は剥離し、再び系内を循環し、配管等に付着する。原子炉水中または配管系に付着したこのような腐食生成物はクラッド (CRUD) と呼ばれている。配管系の中でも付着・蓄積しやすい部分は決まっているため、この放射性の付着したクラッドが周囲の放射線レベルを増加させ、原子力作業員の放射線被ばくを高くする原因となっている。このためクラッド除去技術を確認することは重要なテーマの一つとなっている。

一方で、廃炉作業 (廃止措置) では、洗う、待つ、解体するの順序で作業が進められるが、この最初の作業の「洗う」が重要で、その後の作業効率に影響する。この「洗う」は、配管や容器内にある放射性物質を除去することで、クラッドの除去や回収が重要となっている。このための新たな技術開発も望まれている。我々は、原子炉内のクラッドの分離技術として、磁気分離の可能性を検討してきたが、その結果について報告する。

2. クラッド (CRUD)

クラッドは 0.45 μm 以上の金属酸化物の総称とされており、表 1 に示すように¹⁾、いろいろな酸化物が存在するが、主成分は PWR でマグネタイト、BWR でヘマタイトである。CRUD の名前は“Chalk River Unidentified Deposits”由来であり、カナダのチョークリバー原子炉で初めて見つけられた当時は同定されていなかった沈殿物である。

3. 現在の処理法

3.1 BWR

BWR では原子炉冷却材浄化系が備えられており、全冷却材の 1-2% を処理している。プレコートフィルターやイオン交換樹脂が使用されているが、ここに放射化したクラッドが吸着される。ここでは運転中は高温高圧のため (~285℃、~7MPa) 利用できず、冷却が必要である。このため当該システムを利用する場合、原子炉の稼働率の低下をもたらす問題が起こっている。そこでヨーロッパ等では電磁石による磁気的フィルターを設置して高温高圧下でも稼働させる試みもな

されている。しかしながら前述したようにクラッドの主成分がヘマタイト (常磁性体) であるため、分離効率は低いものとなっている。この代替装置として超伝導磁気分離装置の適用の可能性があると考えている。

3.2 PWR

PWR では放射性クラッドの量は BWR と比較するとその 1/2-1/3 と少ない (数 ppb) もの、やはり空間線量を増加させる。このためクラッドの除去のために一次冷却系の化学体積制御が設置されている。図 1 に PWR の給水系の模式図を示したが、図中の Purification system がそれである。図からも分かるが、PWR では一次、二次冷却系に分かれており、基本的には放射性のクラッドは一次冷却系で発生するものである。この浄化設備は冷却水の一部 (~10%) を処理するのであるが、クラッドの分離のためにイオン交換樹脂が利用されており、これが高濃度放射性廃棄物となる。

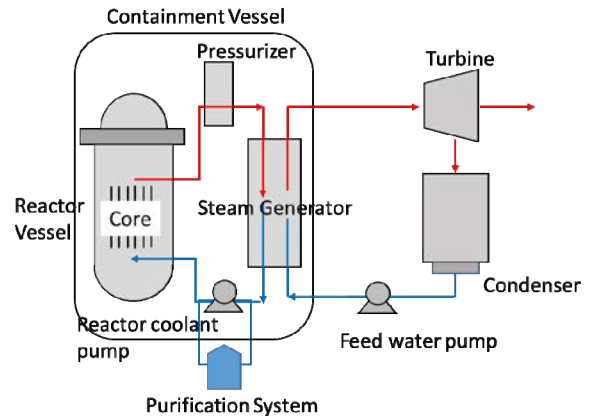


図 1 PWR 給水系の模式図

このイオン交換樹脂の処理は、基本的に焼却で減容化し埋設処理されることになる。焼却前は RI の減衰を待つ必要がある。なぜなら焼却は RI を濃縮化させるからである。これを待機せずに RI の分離が可能となれば、早期に焼却が可能となり、廃イオン交換樹脂の保管も不要となりメリットは大きい。そこで、本研究では PWR を対象にした放射性イオン交換樹脂からの RI の分離を酸洗浄で行い、強磁性吸着材で RI を吸着させ磁気分離することを検討している。なお長期目標としては、BWR への磁気分離システムの導入を設定している。

4. 結論

本研究では原子炉中給水中に発生する放射性クラッドの

磁気分離の可能性を検討した。PWR の化学体積制御設備で使われるイオン交換樹脂からの RI イオン (コバルト) の洗浄・吸着・分離に磁気分離法が使用できる可能性を見出した。

参考文献

[1] 山本大輔: 日本金属学会会報 23 (1986)733-738

表 1 BWR と PWR 中に発生するクラッドの組成

Reactor type			BWR	PWR		
Wetted area ratio of structural materials			Stainless steel	38~42%	Inconel	65~70%
			Carbon steel	16~20%	Zircaloy	25~28%
			Zircaloy	40~44%	Stainless steel	4~6%
			Inconel	<1%	Other alloys	<1%
CRUD	Chemical form	Outer layer	α-Fe ₂ O ₃ (Major), Fe ₃ O ₄ , NiFe ₂ O ₄		Fe ₃ O ₄ (Major), NiFe ₂ O ₄ , FeCr ₂ O ₄	
		Inner layer	Fe ₃ O ₄ (Major), α-Fe ₂ O ₃ , NiFe ₂ O ₄ , FeCr ₂ O ₄		FeCr ₂ O ₄ , Fe ₂ CrO ₄	
chemical composition ratio			Fe	80~90%	Cr+Ni	60~80%
			Cr+Ni	10~20%	Fe	20~40%

小型冷凍機と高温超電導バルク磁石による永久磁石の磁気浮上と非接触攪拌機への応用

Magnetic levitation of permanent magnets using a small refrigerator and HTS bulk magnets and application to non-contact stirrer

岡 徹雄(芝浦工大); 関根 芸妍, 菊地 紘生, 横山 和哉(足利大); 坂井 直道(芝浦工大); 逸見 智和(サーマルブロック)
 OKA Tetsuo (SIT); SEKINE Iyan, KIKUCHI Hiroki, YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); SAKAI Naomichi (SIT);
 HEMMI Tomokazu (Thermal Block Co.)
 E-mail: superoka49@gmail.com

1. はじめに

感染症対策など情勢変化によって、製薬産業などでは外部から異物混入がない、完全隔離のプロセスが求められる。小型冷凍機によって冷却した高温超電導バルク体(以下バルク磁石)がもつピン止め効果を利用すれば、希土類磁石を浮上させる非接触の磁気軸受が実現できる[1]。磁場中冷却したバルク磁石を安定浮上させ、その性能から、実用レベルの性能が非接触攪拌機として実用化され、その市場拡大が期待される[2]。実際にバルク磁石を使った攪拌機として製作され性能評価がなされつつある。

2. 実験方法

実験装置とその概要をFig. 1に示す。バルク磁石はGd系の123相と呼ばれる円柱状($\phi 60 \times t20$)の日本製鉄製である。これをサンパワー社製スターリング冷凍機CryoTel-CT(11 W at 77 K)の冷凍部に軟鉄ヨークを介して取り付けました。真空断熱した冷凍部は67 Kまで冷却され、銅板のスペーサを介して11 mmと8 mmのギャップを保ってNd系永久磁石($\phi 40 \times t20$, 4200G)1個がセットされた。磁石の浮上状態において磁極の水平方向と鉛直方向の離脱時の応力と圧縮時の荷重を、磁石に糸を取付けて引張り、バネ秤で測定した。

3. 実験結果

外部の力による磁気カップリングの離脱に対し、水平抗力、垂直引張力、垂直圧縮力の実験結果をTable1, 2に示す。それぞれの浮上距離は9.5 mmと7 mmであった。水平抗力の測定には、離脱時の磁石の回転を非磁性板で抑制した。水平抗力は当面の性能目標である10 Nを超える応力が得られ、これは浮上距離に大きく依存した。垂直方向では10 Nを大きく超える引張応力が得られた。今回の単極試験での性能評価に続き、攪拌機としてトルク向上に向けては、多極化が必要であり、今後は磁石形状とともにバルク形状や複数配置の方法などに工夫が必要である。

本実験で使用した小型冷凍機はその冷却部を中心軸にしたバルク磁石を取り付けたままで回転可能な構造となっている。低速での回転が可能であり、実際に製作した非接触攪拌機をFig. 2に示す。これは佐竹マルチミクス社製シングルユースミキサーHSMLシリーズとして実用化されつつある。

4. 結論

着磁の必要がなく冷却するだけで永久磁石を非接触に浮上できる非接触攪拌機に応用の可能性を見いだせた。浮上性能をさらに発展させ、技術と市場の広がりが期待される。

謝辞

本発表への佐竹マルチミクス株の協力に感謝します。

参考文献

1. 秋山慎一, クリーンテクノロジー, 63-65, 2002
2. <https://www.sartorius.com/en/products/fluid-management/mixing>.

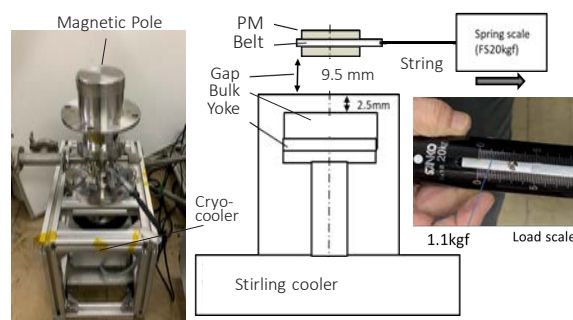


Fig. 1 Experimental setup and load scale

Table 1 Horizontal drag force

Horizontal drag force (9.5 mm)			Horizontal drag force (7 mm)		
direction	force (kgf)	Stress (N)	direction	force (kgf)	Stress (N)
W	1.03	10.1	W	1.40	13.7
S	1.00	9.80	S	1.40	13.7
E	1.12	11.0	E	1.40	13.7
N	1.07	10.5	N	1.40	13.7
Ave.	1.05	10.3	Ave.	1.40	13.7

Table 2 Vertical stresses

Vertical tensile stress			Vertical compressive stress		
Gap (mm)	Vertical tensile force (kgf)	Vertical tensile Stress (N)	Gap (mm)	Load (kgf)	Force (N)
9.5	1.2	11.8	9.5	2.5	24.5
7	1.4	13.7	7	3.2	31.4

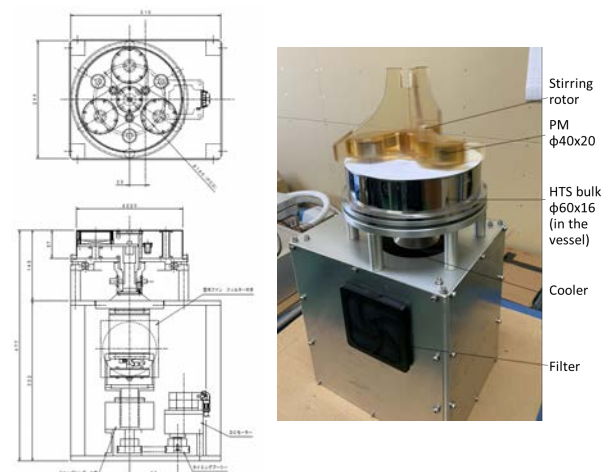


Fig. 2 Construction of non-contact stirrer

MDDS 向け複数の HTS コイルによる磁性粒子の局所集積・誘導に適した磁場形成

Magnetic field suitable for local accumulation and navigation of magnetic particles using multiple HTS coils for MDDS.

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)の実現に向け、磁性薬剤を局所的に集積させ、血管長手方向に誘導することで、体内深部にある標的部まで送達する方法を検討している。従来の単一の磁場源では、血管表面と垂直方向の磁気力(磁性薬剤と血管壁の間に働く摩擦力)が非常に大きいため、磁性薬剤を局所集積させ、誘導することは困難であった。一方、先行研究では、HTS コイル内部にスリットを持つ円筒状 HTS バルク体を配置することで、水平方向の磁気力(磁気勾配)増加と垂直方向の磁気力(磁気勾配)低減を可能にした^[1]。しかし、HTS バルク体には大型化が困難でコストが高いという課題がある。そこで、本検討では、スリットを持つ円筒状 HTS バルク体を2つの HTS コイルで置換することを考え、3つの HTS コイルで構成される磁場源を製作し、磁場分布および磁性粒子の集積・誘導特性について検討した。

2. 実験方法

先行研究では、HTS コイルの内部に、スリットを持つ円筒状 HTS バルク体を配置することで、水平方向の磁気勾配 $|\partial B/\partial r|$ 増加と垂直方向の磁気勾配 $|\partial B/\partial z|$ 低減を同時に実現した^[1]。しかし、HTS バルク体は大型化が困難で高価である。そこで、本検討では、円筒状 HTS バルク体内部を流れる遮蔽電流分布を基に、円筒状 HTS バルク体を2つの HTS コイルで置換することを試みた。また、先行研究では、円筒状 HTS バルク体の内・外径の調節により ∇B を調整したが、本検討では、HTS コイルの通電電流の調節により、 ∇B を変化させることを考えた。今回製作した磁場源の構成と諸元を Fig. 1, Table. 1 に示す。ただし、今回製作した磁場源の大きさは、先行研究の遮蔽電流分布より得たパラメータを 40~50%に縮小したものである。まず、3つ HTS コイルで構成される磁場源を用いることで、磁性粒子の局所集積・誘導が可能になるかを明らかにするために、Model A, B(従来の磁場源と提案する磁場源)における磁性粒子の集積・誘導特性を比較した。本実験では、製作した磁場源上空20mmに、 Fe_3O_4 粒子水溶液(粒子径250nm)が入ったシャーレを配置し、磁性粒子の集積特性(通電時の磁性粒子の集積径)・誘導特性(集積後、磁場源を動かした際の集積位置)を評価した。次に、 $|\partial B/\partial r|$ と $|\partial B/\partial z|$ が磁性粒子の集積・誘導特性に及ぼす影響を明らかにするために、Model B, C, D, すなわち、Inner coilとOuter coilの通電電流を変化させた場合の集積・誘導特性を評価した。

3. 実験結果

Fig. 2 に、Model A~D における、磁場印加後の磁性粒子の集積の様子と集積径、そして、磁場源移動後の誘導の様子と集積位置の中心軸からの距離を示す。まず、Model A, B の比較より、提案する複数の HTS コイルで構成される磁場源を用いることで、磁性粒子の局所集積・誘導が可能であることがわかった。これは、従来の磁場源と比較して、 $|\partial B/\partial r|$ をほぼ変化させないまま、 $|\partial B/\partial z|$ を低減させることができ、磁性粒子とシャーレの間に働く摩擦力を抑制できたためである。次に、Model B, C の比較より、Model B の方が磁性粒子の集積・誘導特性が良いことがわかった。これは、 $|\partial B/\partial r|$ はほぼ同じだが、Model B の方が $|\partial B/\partial z|$ (摩擦力)を大きく低減できたため

ある。また、Model B, D の比較より、Model B の方が磁性粒子の集積・誘導特性が良いことがわかった。これは、 $|\partial B/\partial z|$ はほぼ同じだが、Model B の方が $|\partial B/\partial r|$ が大きく、中心方向に働く力が大きくなったためである。以上より、3つの HTS コイルで構成される磁場源の通電電流を調整し、 $|\partial B/\partial r|$ の増加と $|\partial B/\partial z|$ の低減を同時に実現することで、磁性粒子の局所集積・誘導が実現可能となることを明らかにした。

Table. 1 Specifications of the multiple HTS coils.

Model	A	B	C	D
Inner radius of Inner coil R_{in} [mm]		10		
Number of Inner coil turns		2×52		
Inner radius of Outer coil R_{out} [mm]	—		40	
Number of Outer coil turns	—		2×52	
Inner radius of Outer-most coil R_{outer} [mm]	—		65	
Number of Outer-most coil turns	—		2×78	
Height of Coil H_{coil} [mm]		8.0		
Gap between the coil top surface and petri dish h [mm]		20		
Current in Inner coil I_{in} [mm]	70	70	70	50
Current in Outer coil I_{out} [mm]	—	100	60	60
Current in Outer-most coil I_{outer} [mm]	—		80	

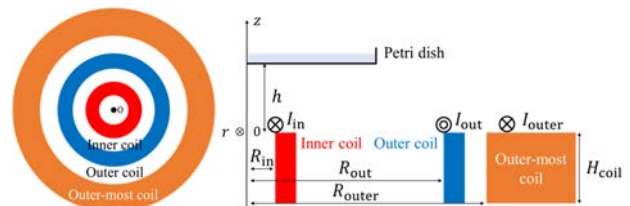


Fig. 1 Schematic illustration of the fabricated magnetic field source composed of three HTS coils.

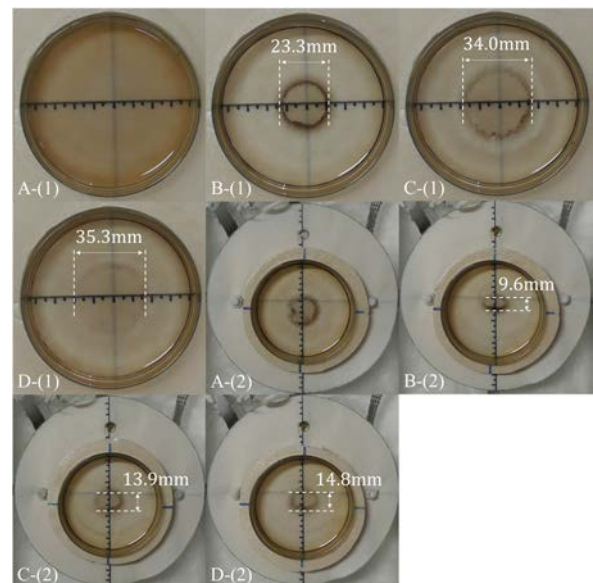


Fig. 2 (1) Local accumulation and (2) navigation of magnetic particle in Models A, B, C, and D.

参考文献

- S. Nojima, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 34 (2024) p.1-5

アルミ押出成形用 750kW 級磁気加熱装置の開発(1) – 装置概要

Development of 750kW-class induction heating device for aluminum extrusion molding using HTS magnets (1) – Device overview

緒方 康博, 伊東 徹也, 河島 裕, 正 孝幸(テラル); 福井 聡, 小川 純(新潟大)

OGATA Yasuhiro, ITO Tetsuya, KAWASHIMA Hiroshi, SHO Takayuki (TERAL Inc.); FUKUI Satoshi, OGAWA Jun (Niigata University)

E-mail: ogata00@teral.co.jp

1. はじめに

我々は、HTS マグネットを用いたアルミ押出成形用のアルミビレット加熱装置の開発を進めており、これまでに 400 kW 級実証装置に関する試験結果を報告[1]している。現在、実用化に向けてエンドユーザーによる実際の運用環境での性能検証を行うため、750 kW 級の商用試作装置を開発中である。この装置の概要と、コイル単体での試験結果について報告する。

2. 装置概要

開発中の装置仕様を Table.1 に示した。

本装置では、7 インチのアルミビレットを対象とし、ビレット長は 250 mm から 700 mm に対応する。加熱所要時間は押出加工のサイクル時間に応じる必要があり、ビレット長 500 mm において 60 秒以下とすることを目標とした。この加熱時間を実現するための所要加熱量をシミュレーションにより検討し、加熱能力は最大 750 kW とした。

装置の構成を Fig.1 に示した。アルミビレットは装置中央上部で受渡しされ、磁場発生部内で両端を把持され強制回転することで加熱する。磁場発生部は、2 組の HTS コイルを対向配置し、それぞれの背部を継鉄で接続している。HTS コイルは、断熱容器に収容し、2 段式 GM 冷凍機で伝導冷却する。その他、電動機や制御盤を共通架台上に配置することで、据付時の調整作業や配線作業の作業性の向上を図っている。

Table.1 Machine Specifications

Billet material	Aluminum alloy A6063-T5
Billet diameter	180 mm (7")
Billet length	250 - 700 mm
Heating time (@ Billet Length = 500 mm)	< 60 s
Total cycle time	< 90 s
Taper heating	10 K/100 mm
Heating capacity	750 kW
Magnetic field generator	HTS Coil
Magnetic flux density in heating area	> 1 Tesla
Machine external dimensions	L 6 m × H 2.5 m × W 2.5 m
Machine weight	Approx. 30 t

3. HTS コイル

本研究開発で設計した HTS コイルの仕様を Table.2 に示した。当該コイルは、アルミビレットに温度勾配をつけて加熱することを考慮した形状としている。

製作した HTS コイル単体について、鉄心と組み合わせていない状態で実施した液体窒素温度下での $I-V$ 試験結果の一部を Fig.2 に示した。測定位置を Fig.3 に示した。なお、この試験は羽衣電機製作所にて実施されたものである。

HTS コイルは約 80 A 付近で電圧が立ち上がっている。当該コイルの 80 A 通電時の垂直磁場は、解析値で約 1 T であ

り、本 HTS コイルに使用している線材と同等の線材(幅 4 mm)77 K、1 T の I_c はおおよそ 32 A である。本コイルの線材幅は 10 mm であるため、2.5 倍すると約 80 A となり、 $I-V$ 試験結果とほぼ一致することから、性能劣化することなくコイル化できていることを確認した。

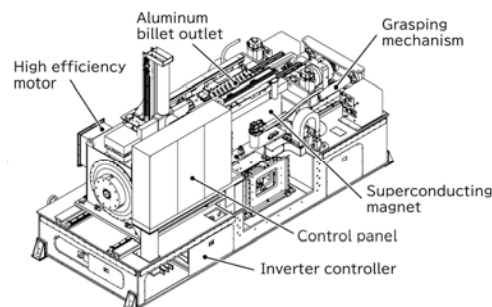


Fig.1 Aluminum billet heater

Table.2 Specifications of HTS coil

HTS Wire	REBCO 10 mm *1
Rated current	330 A
Number of turns	266 turns/coil
Number of coils	2 (series)
Total length of wire	around 2.8 km

*1) Faraday Factory Japan LLC

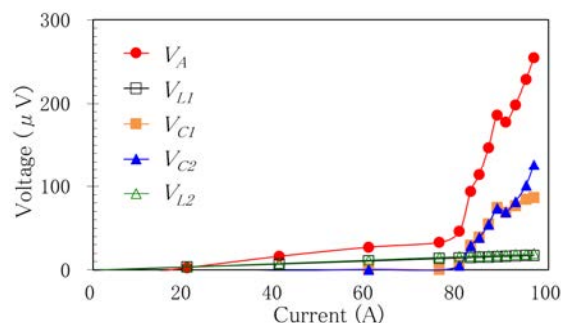


Fig.2 HTS Coil $I-V$ test results at 77 K

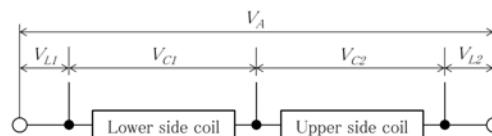


Fig.3 Voltage measurement position in $I-V$ test

4. 開発スケジュール

2024 年 6 月より順次組立を開始し、各種試験を実施したのち、12 月にアルミニウム押出加工業者の製造ラインに据え付ける予定である。実証試験は、2025 年 1 月から約 1 年間実施する計画である。

参考文献

1. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.108

複数の HTS テープ線を用いた磁気浮上型超電導免震装置の浮上力・復元力特性

Levitation and Restoring Force Characteristics of Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device using HTS tapes

鈴木 大心, 吉村 創, 長崎 陽, 津田 理(東北大)

SUZUKI Daishin, Yoshimura Tsukuru, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ)

E-mail: suzuki.daishin.r7@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

磁気浮上型超電導免震装置とは、超電導体と永久磁石レールによって構成され、ピン止め効果によって免震対象物を浮上させることで、任意の水平方向振動の伝達を除去する装置である[1]。従来の装置では高温超電導体 (HTS) バルク体を用いられていたが、磁気力密度向上やコストが高いという課題があった。先行研究では、HTS バルク体の代わりに複数の HTS テープ線を用いることが提案され、バルク体を用いる場合よりも磁気力密度が向上し、軽量化と低コスト化に有効であることが明らかにされている[2]。しかし、免震装置として機能するには、永久磁石レールから逸脱しないようにする必要があり、これにはバルク体の代わりに複数の HTS テープ線を用いる場合の浮上力特性だけでなく、復元力特性も明らかにする必要がある。そこで、本検討では、複数のテープ線を積層して永久磁石レール上で浮上させた場合の復元力特性と浮上力特性を実験的に評価した。

2. 実験方法

本実験で使用した HTS テープ線材は線材幅 5 mm、線材厚さ 0.15 mm、超電導層厚さ 2.5 μm の Gd 系テープ線材である。HTS テープ線の構成としては、Fig.1 に示す復元力向上に適した構成と Fig.2 に示す浮上力向上に適した構成を採用し、これらの復元力と浮上力を測定した。

復元力については、永久磁石中央上空 20 mm で固定後、冷却して着磁をしてから上空 10 mm まで降下させ、そこから水平方向に 1 mm ずつ最大 10 mm まで変位させた場合の復元力を、ロードセルを用いて測定した。

浮上力については、永久磁石中央上空 20 mm で固定後、冷却して着磁をしてから、鉛直方向に 1 mm ずつ最大 10 mm まで降下させた場合の浮上力を、ロードセルを用いて測定した。

3. 実験結果

各配置方法における水平方向変位に対する復元力の測定結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より、 $0 \leq \Delta x \leq 5.5\text{mm}$ の範囲では、Fig.1 の構成の復元力が Fig.2 の構成よりも大きな復元力が得られることがわかった。特に、 $\Delta x \leq 2\text{mm}$ では、Fig.1 の構成の復元力が Fig.2 の構成の復元力の約 2 倍で、Fig.1 の配置における免震動作時の永久磁石レールと HTS テープ間の相対変位は、Fig.2 の配置の半分以下となるため、より安定に動作することが考えられる。

各配置方法における浮上力の測定結果を Fig.4 に示す。Fig.4 より、どちらも永久磁石レールに近づくにつれて、浮上力が指数関数的に増加しているが、Fig.1 の構成の方が Fig.2 の構成に比べて浮上力の増加量が少なく、 $\Delta z = 10\text{mm}$ での Fig.1 の構成の浮上力は Fig.2 の構成の約 1/3 倍であった。ただし、Fig.1 と Fig.2 の構成とは、使用している HTS テープ線材量や永久磁石レールと対向している面積 (底面積) が異なる。そこで、使用テープ線材量を同じにした場合について比較したところ、Fig.1 の構成の復元力と浮上力は、Fig.2 の構成に対してそれぞれ 4 倍、0.7 倍となった。また、HTS テープ線の底面積を同じにした

場合の Fig.1 の構成の復元力と浮上力は、Fig.2 の構成に対してそれぞれ 2 倍、0.3 倍となった。

以上の様に、浮上力と復元力にはトレードオフの関係であるため、想定される状況に応じて構成方法の調整が必要であるものの、Fig.1 と Fig.2 とでは Fig.2 の方が小型化や低コスト化の観点で有効であると考えられる。

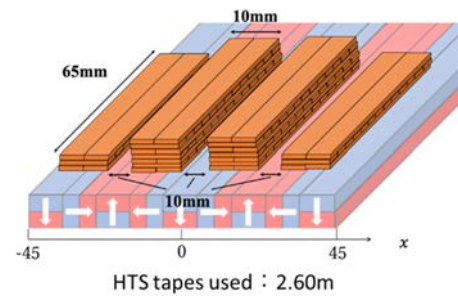


Fig.1 Configuration suitable for restoring force.

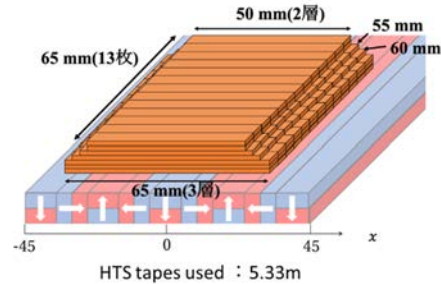


Fig.2 Configuration suitable for levitation force.

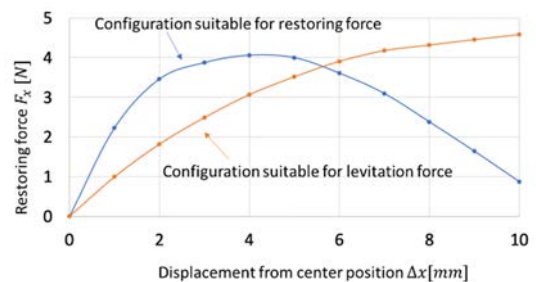


Fig.3 Restoring force characteristics.

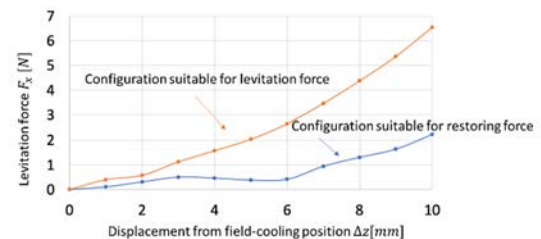


Fig.4 Levitation force characteristics.

参考文献

1. M. Tsuda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 17(2007)2059-2062
2. 吉村創ほか、第 104 回 2022 年度秋季低温工学・超電導学会 2P-p13

ジョセフソンパラメトリック発振器の特性評価と発振電流の位相判別

Characterization of a Josephson parametric oscillator and phase discrimination in oscillation current

町村 至, 吉川 信行, 山梨 裕希 (横浜国大)

MACHIMURA Itaru, YOSHIKAWA Nobuyuki, YAMANASHI Yuki (YNU)

E-mail: machimura-itaru-yb@ynu.jp

1. はじめに

近年、古典コンピュータでは有効時間内に解を求めることの出来ない、組合せ最適化問題の解決が課題となっている。そして、そのような問題を解くための有効なアプローチが量子コンピュータである。量子コンピュータは1bitで“0”と“1”の重ね合わせを表現できるため、N bitで 2^N 個の状態を表現できる。よって、組合せ最適化問題などの解を有効時間内に求めることができる。しかし、計算の大規模化をするためには多くの量子ビットを扱う必要があるが量子ビットは極低温環境[1]、制御回路や読み出し回路が室温環境にあるため、量子ビットの数が増えるにつれマイクロ波線数が増大してしまうという問題がある。そこで我々は極低温環境において量子ビットの制御および読み出しを行うインターフェースの研究開発を目指している。本研究では極低温環境で動作する量子ビットとしてジョセフソンパラメトリック発振器 (JPO)[2]に注目し、その動作の特性および断熱磁束量子回路 (AQFP)[3] による発振電流の位相判別の可能性の検討を行った。

2. JPO のシミュレーション

JPO の回路図を Fig 1 に示す。この時、各素子の値を $R_p = R_{dc} = R_{in} = 50 \Omega, C_{in} = 10 \text{ pF}, C_1 = 5 \text{ pF}, L_p = L_{dc} = 53.5 \text{ pH}, L_1 = L_2 = 0.535 \text{ pH}, J_1 = J_2 = 50 \mu\text{A}, L_q = 43.8 \text{ pH}$ とし、JPO の共振周波数が $f_0 = 10 \text{ GHz}$ となるように設定した。また入力電流 I_{in} としてを振幅 $1 \mu\text{A}$ で周波数 10 GHz の交流電流を、パラメトリック発振に必要なポンプ電流 I_p として振幅 $50 \mu\text{A}$ で周波数 20 GHz の交流電流および直流バイアス電流 $I_{dc} = 340 \mu\text{A}$ を加えた。JPO の発振の様子は Fig 2 のようになり発振が確認できた。

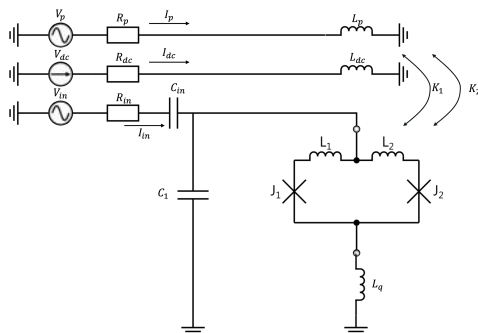


Fig.1 Circuit diagram of JPO

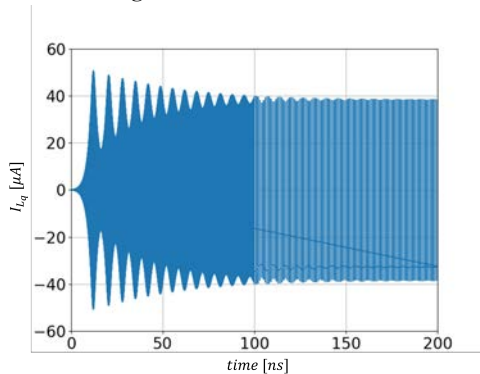


Fig.2 Oscillation current waveform of JPO

3. JPO の発振位相

前述の通り、JPO はパラメトリック発振器であるため、発振電流は入力電流の位相によって π だけ異なる 2 状態を取る。このことをシミュレーションで確認するため、入力電流の位相を $0-2\pi$ で変化させると、発振電流の位相は Fig 3 のように π だけ異なる 2 状態を取ることが確認できた。

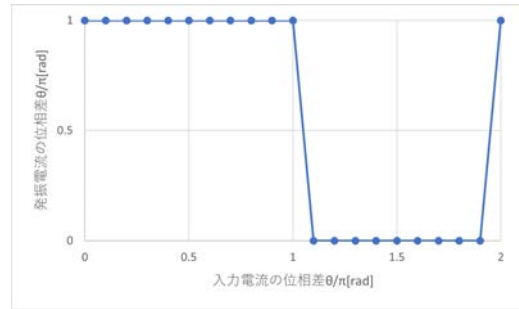


Fig.3 Phase change of the oscillation current as a function of the phase of the input current

4. AQFP による位相判別

JPO の発振電流の位相を、AQFP を用いて判別する。この時、JPO を構成するインダクタンス L_q を AQFP の入力インダクタンスにカップリングさせ AQFP buffer へと発振電流を印加する。この時カップリング係数を $K_3 = 0.1$ 、インダクタンスを $L_5 = 100 \text{ pH}$ としてシミュレーションを行った。この時 3 段目の AQFP buffer において Fig 4 のように正しく論理が伝播していることが確認できた。

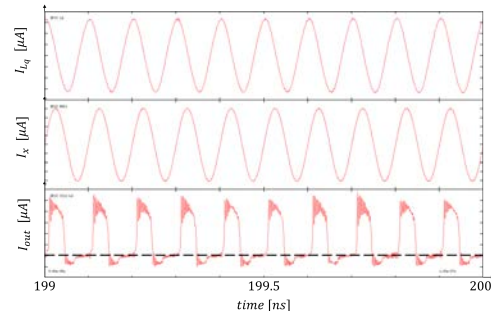


Fig.4 Phase Discrimination of a JPO oscillation by AQFP

参考文献

1. J. Bardin, et al., “Design and characterization of a 28-nm bulk-cmos cryogenic quantum controller dissipating less than 2 mw at 3 k”, IEEE J. Solid-State Circuits, pp.54,3043–3060, (2019)
2. Puri, S., et al., “Engineering the quantum states of light in a Kerr-nonlinear resonator by two-photon driving,” npj Quant. Informa. 3, 18 (2017)
3. N. Takeuchi, et al., “An adiabatic quantum flux parametric as an ultra-low-power logic device,” Supercond. Sci.Technol., vol. 26, no. 3, 035010, Jan. (2013)

断熱量子磁束パラメトロン回路を用いた同期式 4 ビットカウンターの設計と比較

Design and Comparison of Synchronous 4-Bit Counters
Using Adiabatic Quantum Flux Parametron Circuits

大森 結斗, Christopher L. Ayala, 吉川 信行 (横浜国立大学)
OMORI Yuto, CHRISTOPHER L. Ayala, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)
E-mail: kumakumamori.0212@gmail.com

1. はじめに

断熱量子磁束パラメトロン(AQFP)は超伝導ロジックファミリーの一つであり、優れたエネルギー効率で知られている。本研究では、AQFP ロジック用の 2 種類の D ラッチを設計し比較した。1 つはフィードバックを組み込んだもので、もう 1 つは量子磁束パラメトロンラッチ(QFPL)と呼ばれる双安定素子を用いたものである。これらの D ラッチの効率を評価するため、D ラッチを用いたカウンターを設計した。その結果、QFPL を用いて設計した D ラッチカウンターが、レイテンシ、消費エネルギー、回路面積の点で優れていることがわかった。

我々は CMOS 回路に取って代わる、高速動作が可能で低消費電力性に優れた超伝導集積回路に注目している。量子磁束パラメトロン(Quantum-Flux-Parametron : QFP)回路[1]は、超伝導集積回路の 1 つであり、5 GHz で動作する高速動作性と低消費電力性が特徴である。我々は、QFP 回路を断熱的に動作させた断熱量子磁束パラメトロン(Adiabatic Quantum-Flux-Parametron : AQFP)回路の研究を行っており、CMOS 回路と比較して 5、6 桁低い消費電力で駆動できるという特徴がある[2]。これまでに、AQFP 回路の熱雑音エネルギー近くの低消費エネルギー特性の実証や、マイクロプロセッサの動作実証が行われている。

今後、AQFP 回路を用いて、複雑な Finite State Machine (FSM) の研究を行いたいと考えている。FSM は、論理回路の数学的なモデルであり、内部状態を定義して入力条件によって遷移させる。今回は 2 種類の D ラッチを設計した。1 つが、フィードバックを利用した D ラッチであり、もう 1 つが 2 安定状態を持つ quantum parametron latch (QFPL) を利用した D ラッチである。本研究では、AQFP を用いた FSM の検討の第一歩として、簡単な FSM であるカウンターの設計を行った。フィードバックタイプと QFPL タイプの 2 種類の D ラッチを用いた同期式 4 ビットカウンターを設計し、設計した 2 種類のカウンターの性能を比較した。

2. D ラッチ

まず、カウンターの基盤となる D ラッチをフィードバックタイプと QFPL タイプの 2 種類設計した[Fig1]。D ラッチとは、Enable 入力端子(E 端子)と Data 入力端子(D 端子)の 2 つの入力端子と、出力端子である Q 端子を持つ。E 端子が 1 のときは、D 端子の入力によって Q 端子の状態を更新し、D 端子の入力が 1 の場合に Q 端子には 1、D 端子の入力が 0 の場合に Q 端子には 0 を出力する。E 端子が 0 のときは、D 端子の入力に関わらず、Q 端子の現在の状態を保持する。

D ラッチとして機能するために、フィードバックタイプは 4 段を必要とするが、QFPL タイプは 3 段である。また、横幅も buffer 1 つ分削減されているため面積がフィードバックタイプと比べて QFPL タイプは小さく設計されている。

また、2 種類の D ラッチにおいてそれぞれ消費エネルギーをシミュレーションによって計算した。本研究では、E = 1, D = 0, 1, 0, 1, と繰り返し、内部状態を“0, 1, 0, 1, ”と変化させた場合の消費エネルギーを計算した[Fig2]。

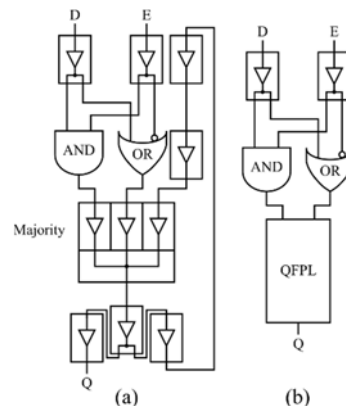


Fig1. D-latch (a) feedback-type (b) QFPL-type

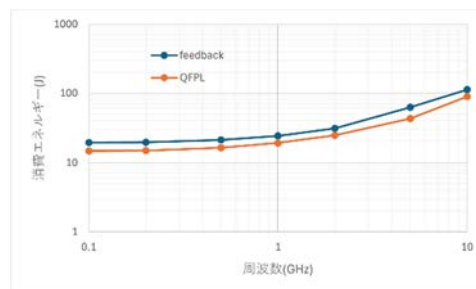


Fig2. Dependence of energy consumption of D-latches on operation frequency

3. まとめと比較

フィードバックタイプと QFPL タイプの 2 種類の同期式 4 ビットカウンターを設計し、JJ 数、AC/DC マージンについて比較した[Table1]。JJ 数が少ないほど、低消費電力で動作が可能である。マージンは大きいほど、動作可能な電流の範囲が広がる。結果を見ると、QFPL タイプの方が JJ 数が少ない。マージンに関しては大きな差はなく、フィードバックタイプの方が大きな電流に偏り、QFPL タイプの方が小さな電流に偏りがあることが解った。

Table 1. Comparison of synchronous 4-bit counter

	Feedback-type	QFPL-type
JJ	352	306
AC	0.560-1.15 mA	0.478-1.03 mA
0.811 mA	-31 42%	-41 27%
DC	0.949-1.55 mA	0.904-1.45 mA
1.130 mA	-16 37%	-20 28%

参考文献

- M. Hosoya, et al, “Quantum flux parametron: A single quantum flux device for Josephson supercomputer” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 1, no. 2, pp. 77-89, 1991.
- N. Takeuchi, et al, “An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device” Superconductor Science and Technology, vol. 26, no. 3, p. 035010, 2013.

時間依存 Ginzburg-Landau シミュレーションを用いた超伝導三端子素子のパルス電流動作におけるインピーダンス解析

Impedance analysis of pulse current operations of a superconducting three-terminal device by using time-dependent Ginzburg-Landau simulation

安川 直輝 (東理大); 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大); 西尾 太郎 (東理大); 馬渡 康徳 (産総研)
 YASUKAWA Naoki (Tokyo Univ. of Sci.); YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama National Univ.);
 NISHIO Taichiro (Tokyo Univ. of Sci.); MAWATARI Yasunori (AIST)
 E-mail: 1224703@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

超高速性と超低損失性を持つ超伝導(SFQ)回路と高集積性を持つ半導体(CMOS)回路を組合せたハイブリッドデバイスのインターフェースとして、超伝導三端子素子[1]が期待されている。しかしながら、パルス電流三端子動作特性の理解が不十分であるため、本研究では数値解析シミュレーションにより、三端子動作特性を明らかにし、インピーダンス解析を行ったので報告する。

2. 実験方法

本研究では、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL)方程式と熱拡散方程式を連立させ[2]、有限要素法により数値的に解くシミュレーションを行った。超伝導状態にある三端子素子のチャンネルに直流のバイアス電流(I_{bias})を印加して、ゲートから矩形波状のゲート電流(I_{gate})を入力したときのチャンネル電圧(V_{ch})応答を調べた(Fig. 1 参照)。また、三端子素子に並列に接続される負荷抵抗(R_L)の三端子動作特性に与える影響を評価するために負荷抵抗は50 Ω と500 Ω に設定し、シミュレーションを行った。

3. 実験結果

Fig. 2(a)は $I_{\text{bias}} = 70 \mu\text{A}$ としてパルス電流(波高 $I_{\text{gate}} = 15 \mu\text{A}$, 幅 5 ps)を入力したときの三端子素子の超伝導(黒)-常伝導(白)転移の時間変化である。なお、 $R_L = 50 \Omega$ に設定した。また、Fig. 2(b)は I_{gate} の波形及び V_{ch} の数値計算結果である。 I_{gate} の入力により三端子素子のゲート及びチャンネルのくびれ部分から常伝導転移が起こり、 V_{ch} が発生した。この条件では、一旦常伝導状態に転移したチャンネルが超伝導状態に戻り、ゼロ電圧状態になることを確認した。他方、 $R_L = 500 \Omega$ に設定したときは、チャンネルが常伝導状態に転移したあと、超伝導状態に復帰することなく常伝導状態を維持し続けた。

4. 考察

パルス電流入力による常伝導転移後のチャンネルの状態により、三端子動作には2種類のモードがある[3]。それは超伝導状態へ復帰する自己復帰モードと常伝導状態を維持するラッチモードである。今回のシミュレーションでは、 R_L の大小により2つのモードが再現された。 $R_L = 50 \Omega$ のとき、チャンネルの常伝導領域で発生する抵抗より R_L が小さいため、チャンネルに流れる I_{bias} が負荷抵抗へ容易に分流し、チャンネルでの常伝導状態が維持されずに超伝導状態へと復帰したと考えられる。一方で $R_L = 500 \Omega$ のときは、チャンネルに流れる I_{bias} が負荷抵抗へ分流する割合が少なく、チャンネルに流れ続けるためチャンネルでは常伝導状態が維持される。

パルス電流入力時のゲート電圧は20 mVであり、入力インピーダンスは、1.33 k Ω 程度であった。これは SFQ 回路と比べ、2桁以上大きく、インピーダンスを下げる設計を考える必要がある。今後は外部回路との接続を考慮したインピーダンス整合について検討し、シミュレーションを行っていく。

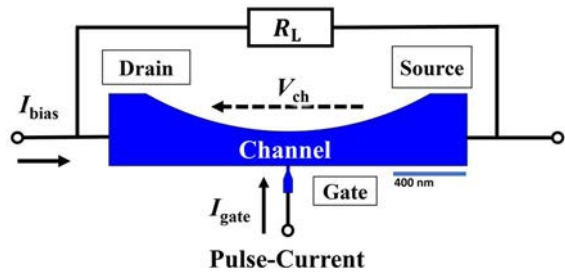


Fig.1 Schematic of three-terminal device as modeled in the simulation software.

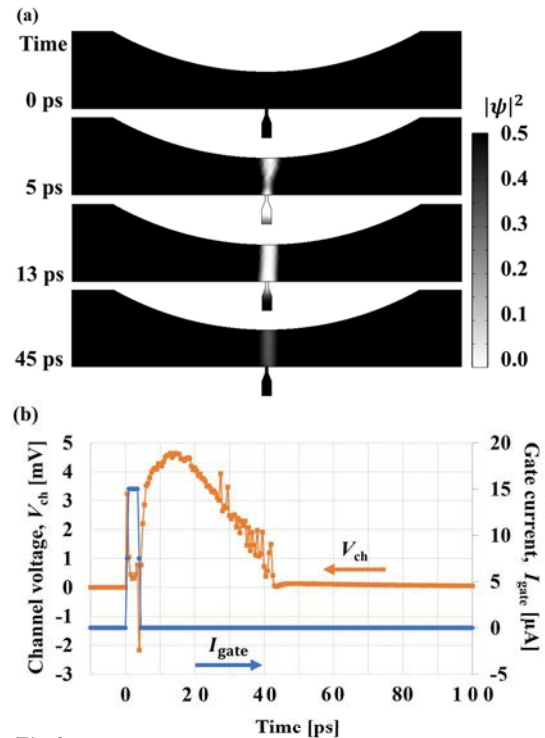


Fig.2
 (a) Evolution of the superconducting region (Black) and the normal region (White) in the three-terminal device.
 (b) Output characteristics of the three-terminal device when a pulse wave was injected to the gate for 5 ps.

謝辞

本研究はJSPS科研費JP20K05314の助成を受けたものです。

参考文献

1. A. N. McCaughan and K. K. Berggren, Nano Lett., Vol. 14 (2014) 5748
2. A. N. Zotova and D. Y. Vodolozov, Phys. Rev. B, Vol. 85 (2012) 024509
3. Q.-Y. Zhao et al, Supercond. Sci. Technol. Vol 30 (2017) 044002

機械式冷凍機を用いた測定環境における雑音評価

Evaluation of Noise in Measurement Environments Using Mechanical Cryocoolers

田中 雅光, 李 峰, 藤巻 朗(名大)
 TANAKA Masamitsu, LI Feng, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.)
 E-mail: masami_t@nagoya-u.jp

1. はじめに

我々は、磁性体を用いて実現する π シフトジョセフソン接合を含む超伝導量子干渉素子(π -SQUID)を用い、新たな計算回路の研究を進めている。 π -SQUIDには自発的に周回電流が誘起され、見かけの臨界電流値が下がる。換言すると、より小さな駆動力でスイッチング動作が可能になり、従来の単一磁束量子回路よりも1桁以上低消費電力動作が可能なデジタル回路(半磁束量子回路[1])が構成できる。熱雑音などの外来雑音の影響を受けやすくなると誤り率が上昇するため、見かけの臨界電流値は閾値には下げられないが、 π -SQUIDのループインダクタンスを精密に調整することで信号エネルギーを制御し、また、回路の誤りをアルゴリズムやアプリケーションのレベルで隠蔽することで、物理限界に迫るような領域での動作が可能となる。また、自発電流の方向をスピンと見立て、相互に結合して全体の最小エネルギーを探索することを目的計算と対応付けるハードウェアはアニーラと呼ばれ、量子揺らぎを用いる量子アニーラ[2]が注目を集めている。ここでも、熱揺らぎの効果を導入することで高速化や解の高品質化が得られる可能性が示唆されており、超伝導回路における熱雑音の把握と積極活用は新たな情報処理の糸口となる。

しかし、実際の実験環境でデバイス等を評価する際には、熱雑音のほかにも電磁波やケーブルを介して侵入する様々なノイズの影響を同時に受けると考えられる。我々は、機械式冷凍機を用いた測定環境における熱雑音の寄与を明らかにすることを目的に、雑音評価を試みた。

2. 実験方法と結果

シャント抵抗を並列に接続してオーバダンプ型の特性としたジョセフソン接合において、臨界電流値 I_c 近傍の電圧の立ち上がりは熱雑音の影響を受けると I_c より低い電流から電圧が生じ始める[3]。本研究では、臨界電流密度 250 A/cm^2 のプロセス[4]で作製した I_c の小さなNb/AlO_x/Nbジョセフソン接合を用い、³He冷凍機において0.3Kまでの冷却過程での電流-電圧特性評価を行った。冷凍機は真空チャンバ内で50Kと4Kステージの輻射シールドで覆われており、4Kステージの輻射シールドには二重の磁気シールドを取り付けてある。信号線はシールド線またはツイスト線を用い、4Kステージにカットオフ周波数50kHzのRC型ローパスフィルタを設置した。

Fig. 1に I_c が約 $1.8\mu\text{A}$ の接合を0.3–4Kの温度範囲で測定した結果を示す。3–4Kでは I_c の立ち上がりに明瞭なラウンディングが見られるが、温度が下がるにつれて立ち上がりが鋭くなり、1K未満ではほとんどラウンディングが観測されなくなるため、この測定環境では主に熱雑音によりラウンディングが起きていると考えられる。Fig. 2は I_c (出力電圧が $50\mu\text{V}$ 現れた点で定義)と、ゼロ電圧状態における I_c の減少量 ΔI_c の温度依存性である。4Kでは I_c の揺らぎは $0.26\mu\text{A}$ あり、このような小さな接合に対しては無視できない大きさと考えられる。

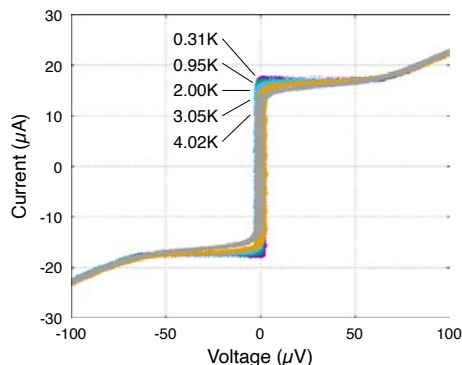


Fig. 1 Current-voltage characteristics of a shunted Josephson junction at different temperatures. (JJ size: $0.94 \times 0.94 \mu\text{m}^2$)

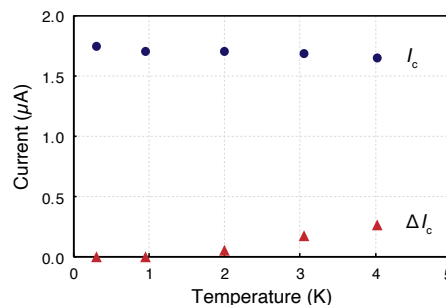


Fig. 2 Temperature dependence of critical currents (I_c) and reduction in the zero-voltage current (ΔI_c).

0.3Kでは4Kに比べ I_c が6%大きく見えている。この増加量は過去の実験結果[4]とも概ね一致する。 I_c の温度依存性も考慮しつつ、実験結果に基づく熱雑音の寄与の定量的な評価については詳細な解析を進めている。

参考文献

1. T. Kamiya, M. Tanaka, K. Sano, and A. Fujimaki, "Energy/space-efficient rapid single-flux-quantum circuits by using π -shifted Josephson junctions," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E101-C, no. 5, pp. 385–390, May 2018.
2. M. W. Johnson et al., "Quantum annealing with manufactured spins," *Nature*, vol. 473, no. 7346, pp. 194–198, May 2011.
3. V. Ambegaokar and B. I. Halperin, "Voltage due to thermal noise in the dc Josephson effect," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 22, no. 25, pp. 1364–1366, Jun. 1969.
4. 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.

謝辞

本研究はJSPS科研費(JP23H05447, JP22H01548), JST CREST(JPMJCR20C5), 及び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Qufabにおいて試作した。試作を行うにあたり、日本電気の北川佳廣氏・佐藤哲朗氏・山本剛氏及び産業技術総合研究所の永沢秀一氏・日高睦夫氏に感謝する。

極低温における断熱量子磁束パラメトロン回路のビット誤り率シミュレーション

Bit error rate simulation of adiabatic quantum flux parametron circuits in cryogenic temperatures

永井 亜暉, 吉川 信行 (横浜国立大学)

NAGAI Aki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama National University)

E-mail: nagai-aki-bt@ynu.jp

1. はじめに

情報化社会において重要な役割を担っている CMOS 回路は微細化・高性能化が進められてきたが、近年微細化は限界を迎えつつあり、消費電力の増大が課題として挙げられる。上記の課題を解決するため、我々は低消費電力性・高速動作性を特徴とする超伝導回路に着目した。本研究ではその中でも断熱量子磁束パラメトロン回路(AQFP 回路)[1]に着目した。AQFP 回路はポテンシャルエネルギーの変化を断熱的に行うことで動的消費電力の低減に成功しており、CMOS 回路と比較して 5-6 桁低い消費電力で 5-10 GHz での高速動作が可能な回路となっている[1]。

AQFP 回路においてスイッチング素子の役割を担う Josephson 接合ではその接合抵抗より熱雑音電流が発生してしまい、それによって回路間のデータ伝搬が正しく行われな可能性もある。そのため、AQFP 回路のデータ伝搬の安定性を示す指標としてビット誤り率が用いられる。そこで、本研究では今後 AQFP 回路が極低温環境(10-20 mK)での動作が想定されているため、極低温環境における AQFP 回路のビット誤り率のシミュレーションを行った。

2. ビット誤り率(BER)

AQFP 回路のデータ伝搬の安定性を示す指標として、ビット誤り率(BER)が存在する。BER はデータ伝搬の回数に対して、誤りが生じた回数を確率で表現した指標である。熱雑音電流の振幅分布は平均が 0 の正規分布に従い、入力電流は熱雑音電流の大きさだけゆらぐと考えることができる。その結果、論理の出現確率は、熱雑音電流によるゆらぎを加味した入力電流に対する正規分布の積分で得られる。よって、論理が誤って伝搬してしまう確率、即ち BER は正規分布の積分によって得られると考えられるため、以下の式をもって BER を表現できる。

$$BER = \text{erfc}(\alpha \times I_{in}) \times 0.5 \quad (1)$$

上式(1)において、 $\text{erfc}(x)$ は相補誤差関数、 I_{in} は AQFP 回路に流れる入力電流、 α は正の実数定数である。

3. 極低温環境におけるビット誤り率シミュレーション

AQFP 回路においてデータを伝搬する役割を持つ Buffer を用いて 9 段の BufferChain を作成し、4 段目と 5 段目の間に入力電流調整用のインダクタンスを挿入することで入力電流に対する BER をシミュレーションした。このとき回路の動作周波数は 5GHz であり、温度は 20mK とした。シミュレーションで得られた結果に対して、式(1)を用いてフィッティングを行ったところ Fig.1 のようにシミュレーション結果(プロット)に対してフィッティング結果(実線)の傾向が一致していないことが確認された。このため、熱雑音の影響の低い極低温環境においては、他の要因によってエラーが変化していると考えられる。

ここで、入力パターンとエラー回数の関係を Fig.2 に示す。シミュレーションにおいて、32bit の入力データを 10000-1000000 回試行して BER を計算した。Fig.2 より、論理が”0”→”1”のように、エラーは入力論理が変化する際に集中して発生していることが確認できた。これより物理的なエラー要因

は後段の回路から前段に流れるバックアクション電流であると考えられ、これによって入力電流が変化しエラーが大きくなったと考えられる。そこで、式(1)にバックアクション電流の影響を無次元量 γ として考慮した式(2)を導入した。

$$BER = \text{erfc}(\alpha \times I_{in} - \gamma) \times 0.5 \quad (2)$$

式(2)を用いてシミュレーションした結果を Fig.1 に示す。式(2)を用いた結果(点線)とシミュレーション結果(プロット)の傾向が一致することが確認でき、極低温環境におけるビット誤り率を入力電流に対して拡張することが可能となった。

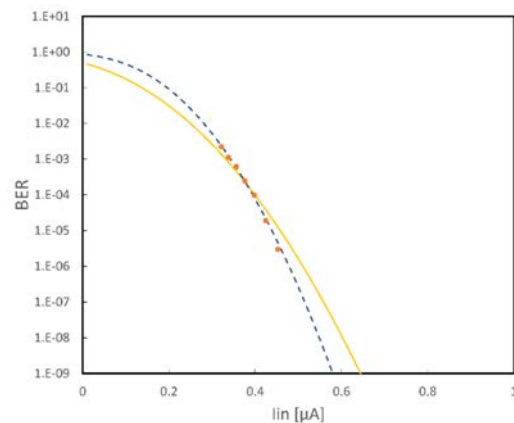


Fig.1 BER of an AQFP buffer chain at cryogenic temperatures

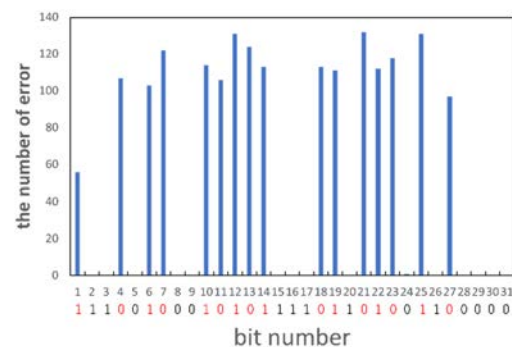


Fig.2 Relationship of bit pattern and errors

参考文献

1. N. Takeuchi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26_(2013) p.035010.

単一磁束量子回路を用いたスケーラブルなベイジアンネットワークの設計

Design of scalable Bayesian networks using single flux quantum circuits

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

1. はじめに

確率を用いたモデリング手法の一つであるベイジアンネットワーク(Bayesian Networks: BN)は、その視覚的容易性から予測や診断など多くの分野で応用されている。BN は事象を表すノードとノード間の因果関係を示すアークで構成され、子ノードには親ノードに依存した条件付き確率表(Conditional Probabilities Table: CPT)が付随する。現在、BN は汎用コンピュータを用いたソフトウェア的な手法を用いて解析されている。しかし、大規模な BN の解析は NP 困難[1]に分類され、膨大な計算時間とパワーを必要とする。そこで、BN をハードウェアで直接実装・解析することが、これらの問題を解決する有効なアプローチの一つとして期待されている。これまで我々は単一磁束量子回路を用いた BN のハードウェア実装について研究してきた。しかしノードの結合数が増加するにつれて回路のレイアウトが複雑になり大規模な BN の実装が難しいという課題があった。本研究では、大規模な BN の解析にも応用可能な拡張性を持つ回路構成を紹介する。

2. スケーラブルな BN 専用プロセッサ

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

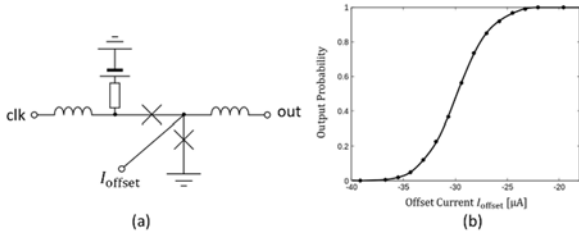


Fig.1 Schematic of SRNG (a), Output Probability Characteristic (b)

親ノードは SRNG 単体で表現する。子ノードは CPT に従った複数の確率を表現する必要がある。Fig.2 に親ノードが n 個に対し子ノードが一つの BN とそのハードウェア的設計手法を示す。BN において、CPT の持つ情報量はそのノードの結合数 n に対し、 2^n 個になる。その一つ一つが異なる条件付き確率であるが、それを表現するため本研究ではその条件付き確率の数分の SRNG を用意し個々の確率に制御させることで CPT の持つ情報を表現する。

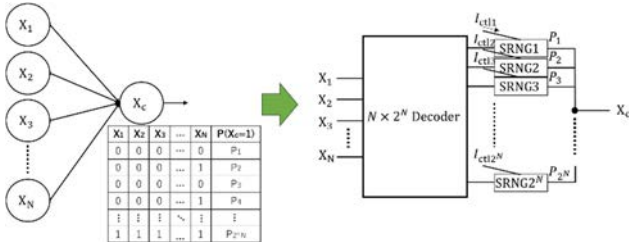


Fig.2 Architecture of BN with SRNG and decoder

提案した回路を用いてノード数が二つのBNを設計し、アナログシミュレーションを行った。シミュレーションにはJoSIMを用いて、想定したプロセスはHSTPであり4.2 Kにおける熱雑音を入れた状態でシミュレーションを行った。Fig.3に想定したBNとそれを実現するためのブロック図を示す。単結合の場合に必要なデコーダは1入力2出力のものでNOTゲートを用いて設計した。Fig.4は各入出力の電圧波形を示したシミュレーション結果である。5つの電圧波形は上からクロック、SRNG1の出力、SRNG2の出力、SRNG3の出力、 X_2 の出力である。ベイズの定理より導き出される X_2 の出力確率の理論値が0.6であるのに対し、シミュレーションにより得られた $P(X_2)$ は0.56であったことから、設計した回路が正常動作したことを確認した。

回路の最高動作周波数はSRNGに依存し40 GHz以上の動作が可能である。従来手法ではデジタルアナログ変換器に依存して5 GHz程度であったことから本設計手法は高速動作性にも優れる。

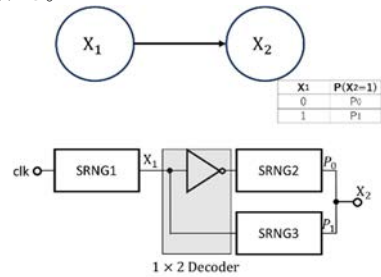


Fig.3 Assumed BN and block diagram of the circuit

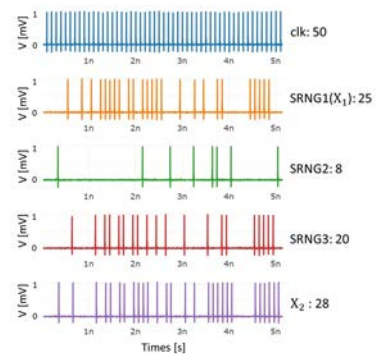


Fig.4 Simulation results (voltage waveforms for each input/output)

3. 結論

本研究では、回路の拡張性と高速動作性に優れるBNの回路構成を紹介した。ノード数が二つのBNを設計し、アナログ回路シミュレータを用いて正常動作することを確認した。

参考文献

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

超伝導ストカスティック関数演算回路の設計

Design of superconducting stochastic function arithmetic circuits

浅香 海斗, 吉川 信行, 山梨 裕希(横浜国立大学)

ASAKA Kaito, YOSHIKAWA Nobuyuki, YAMANASHI Yuki (YNU)

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

1. はじめに

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

SC において、その演算方式から、同一回路内で同じストカスティック数列(Stochastic Number Train: SNT)を持つストカスティック数(Stochastic Number: SN)を複数回用いると、SNT 同士の相関により演算誤差を引き起こす問題がある。そのため、相関の無い SN を使用するために、SNT の bit 列が異なる SN を信号分岐する必要がある。この要件を実現する回路として、超伝導数生成器(Superconductive Random Number Generator: SRNG)[1]を用いたストカスティック数信号分岐回路(Stochastic Number Splitter: SNS)[2]を我々は設計した。

今回は、設計した SNS を用いて $\exp(-x)$ 関数演算回路を設計し、性能評価を行った。

2. ストカスティック信号分岐回路

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

SNS の動作を説明する。入力 SN を SFQ パルス列として JTL に入力する。すると、周波数同期現象[3]により、JTL に入力される SFQ パルス列の平均電圧と SRNG から出力される SFQ パルスの平均電圧が等しくなるように SRNG へ流入する制御電流が調整される。SRNG から出力される SFQ パルス列全体の平均電圧は、出力する SN の“1”の存在確率に対応しているため、その値は clock 周波数を f 、“1”の存在確率を P 、単一磁束量子の大きさを Φ_0 とすると、 $Pf\Phi_0$ で表される。接続した JTL と出力側の SRNG で平均電圧が等しくなるため、出力側の SRNG での出力確率が等しくなり、SNT の bit 列が異なる SN を信号分岐することができる。

3. 超伝導ストカスティック関数演算回路の設計

信号分岐を必要とするベンチマーク回路に SNS を用いることで、SC における算術関数演算回路の設計を行った。

本研究では、信号分岐を必要とするベンチマーク回路として $\exp(-x)$ 関数演算回路を構築することを考える。

$\exp(-x)$ の 3 次近似関数は

$$\begin{aligned} \exp(-x) &= 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} \dots \\ &\approx 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} \\ &= 1 - x \left(1 - \frac{x}{2} \left(1 - \frac{x}{3} \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

で表される。(1)式を 3 出力 SNS, AND ゲート, NAND ゲートで構築したものが Fig.2 である。Fig.2 で示す回路について、シミュレーションにより得られた SN の入出力特性を Fig.3 に示す。このシミュレーションでは産業技術総合研究所の High-speed Standard Process(HSTP)[4]の使用を仮定した。SN の bit 長は 4095 bit とし、入力 SN の値を 0.0, 0.1, 0.2, ..., 1.0 と変化させてシミュレーションを行った。比較対象には $\exp(-x)$ 関数の理論値、 $\exp(-x)$ の 3 次近似関数の理論値を用いている。Fig.3 より、シミュレーション値と $\exp(-x)$ の 3 次近似関数の理論値はほぼ一致しており、シミュレーション値と $\exp(-x)$ 関数の理論値は入力 SN が 1.0 に近づくほど近似誤差の影響が表れることがわかった。

発表では、 $\exp(-x)$ 関数演算回路のより詳細な性能評価を述べる。

4. 謝辞

本研究はJSPS科研費JP22H01542の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, IEEE Trans Appl. Supercond., vol. 19, 2009
- [2] Y. Yamanashi, K. Asaka, and N. Yoshikawa, 電子情報通信学会総合大会, 芝浦工業大学, 2023.
- [3] Y. Yamanashi, R. Kinoshita, and N. Yoshikawa, Supercond. Sci. Technol., vol. 34, 2021.
- [4] M. Hidaka and S. Nagasawa, IEICE Trans. Electron., vol. E104-C, 2021.

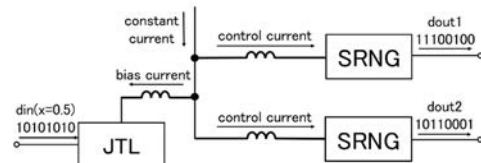


Fig. 1 Block diagram of SNS using SRNG

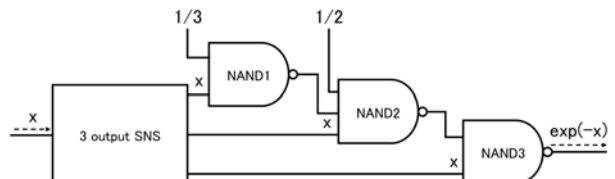


Fig. 2 $\exp(-x)$ function arithmetic circuit using 3 output SNS

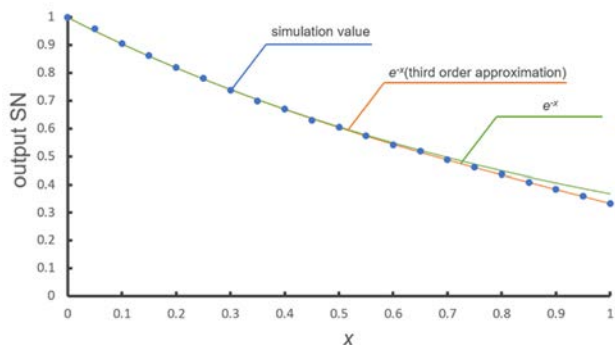


Fig. 3 $\exp(-x)$ function arithmetic circuit input/output characteristics

Zr をパターンニングした基板上に形成した REBa₂Cu₃O_y 薄膜の臨界電流特性

Critical current characteristics of REBa₂Cu₃O_y thin films deposited on a Zr-patterned substrates

関戸 真矢, 白土 裕一郎(福岡工大); 松本 明善, 立木 実(NIMS); 井上 昌睦(福岡工大)

SEKITO Shinya, SHIRATSUCHI Yuichiro (Fukuoka Inst. Tech); MATSUMOTO Akiyoshi, TACHIKI Minoru (NIMS);
INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech)

E-mail: mem24105@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 線材の交流損失低減には細線化が有効である[1][2]。我々は、細線化手法の一つとして基板上に線状の金属 (Zr Nb 等) をパターンニングし、その後 REBCO を成膜することで細線分離を行う手法に取り組んでいる。本研究ではフォトリソグラフィによって Zr を SrTiO₃ (STO) 基板上に線状に形成した後、REBCO を成膜した薄膜の Zr 近傍での臨界電流特性の変化を調べ、Zr による分離の効果について検証した。

2. 実験方法

本研究では 5 mm 角の STO 基板上に幅 100 μm スリットを有するマスクパターンを形成し、スパッタリングによって幅 106 μm, 高さ 550 nm の Zr を線状に形成した。その後、REBCO 膜をパルスレーザー蒸着法にて成膜した。作製した薄膜の捕捉磁場分布を走査型ホール素子磁気顕微鏡 (Scanning Hall-Probe Microscopy, SHPM) にて測定し、得られた磁場分布より面内 J_c 分布を求めた。次に、薄膜にマイクロブリッジ加工を行った。Zr に対して垂直及び平行なマイクロブリッジと Zr を含まないマイクロブリッジの 3 本で、その模式図を Fig. 1 に示す。作製したマイクロブリッジは幅が 200 μm, 長さが 500 μm であり、それぞれの電流電圧 (I - V) 特性を物理特性測定システム (Physical Properties Measurement System, PPMS) にて測定した。

3. 結果及び考察

SHPM による捕捉磁場分布及び面内 J_c 分布の測定結果を Fig. 2 に示す。分布内の白の破線は Zr の位置と対応している。捕捉磁場分布の結果より、幅 106 μm の Zr があると予想される部分の磁場強度は低下しているが、超電導層が完全に分離している様子は確認できなかった。これは SHPM の空間分解能による制限である可能性が考えられる。さらに、面内 J_c 分布の結果より、Zr よりも左側の領域では周回電流が確認できるが、右側の領域では電流密度の低い領域が見られた。

各マイクロブリッジにおける I - V 特性の測定結果を Fig. 3 に示す。 T_c 以上の 100 K ではいずれのマイクロブリッジも線形抵抗を示し、常電導抵抗は同程度であることが分かる。そこで温度を下げていき、89 K とすると、いずれも明確な超電導特性を示していることが分かる。ここで、電界基準 0.1 V/m における Zr に対し平行及び垂直なマイクロブリッジの I_c 値は、それぞれ約 4×10^4 A, 約 1.5×10^4 A であり、Zr に対し垂直なマイクロブリッジのほうが、 I_c 値が低下していることが確認できる。このとき、Zr の抵抗は観察している領域においては十分に小さいことを考慮すれば、Zr 周辺の REBCO 膜の超電導特性が低下していることが考えられる。考察の詳細については当日報告する。

謝辞

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。

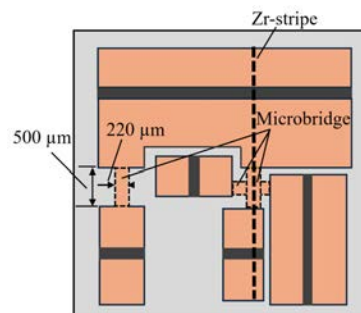


Fig. 1 Schematic diagram of the micro-bridges

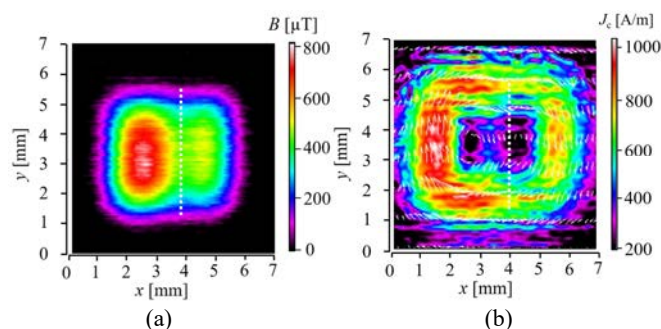


Fig. 2 (a) Trapped magnetic field distribution and (b) J_c distribution at 77K.

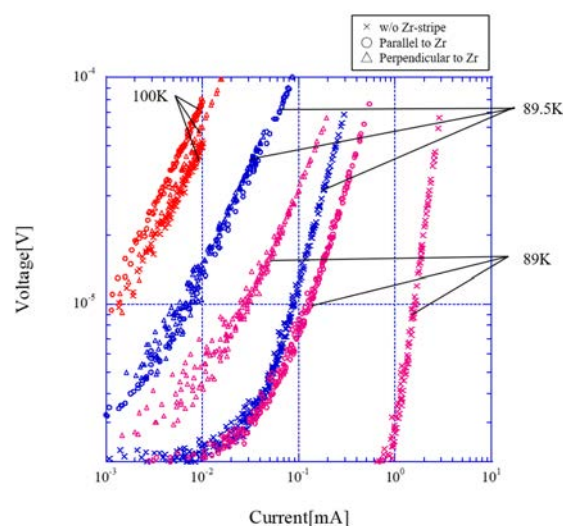


Fig. 3 Current-Voltage characteristics measurements of micro-bridges

参考文献

- [1]. A. Matsumoto, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 18
- [2]. Y. SHIRATSUCHI, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p. 56

REBCO 線材の臨界電流のねじり依存性と面内臨界電流密度分布

Torsion dependence on critical current and in-plane J_c distribution of REBCO coated conductor

隠崎 遼河, 三輪 歩夢, 井上 昌睦(福岡工大)

KAKUREZAKI Ryoga, MIWA Ayumu, INOUE Masayoshi(Fukuoka Inst. Tech.)

E-mail: mem24103@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超電導 (REBCO, RE=Rare Earth) 線材は交流損失低減のため、細線化加工やツイスト加工が施される [1]。そこで、我々はねじりが臨界電流 (I_c) に与える影響について着目し、 I_c のねじり依存性を調べている。今回、ねじりにより臨界電流が低下した REBCO 線材の面内の臨界電流密度 (J_c) 分布を調べるとともに走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験方法

今回使用した線材は幅 2 mm、厚さ 43 μm の REBCO 線材で、線材全体が銅でコーティングされている。同線材を 100 mm 程度切り出した後、電圧端子用の直径 0.12 mm の銅線を線材にはんだ付けし、電流端子兼線材固定治具である 2 つの銅ブロックに固定した。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で線材にねじりを印加している。

ねじり角度を増加させながら、パルス電流を用いた直流 4 端子法により I_c 測定を行った。ねじり角度印加前の I_c の約 3 割になったところで測定を終了し、走査型ホール素子磁気顕微鏡 (Scanning Hall-probe Microscopy, SHPM) により捕捉磁場分布及び面内 J_c の解析を行い、局所的に磁場強度及び J_c の低下が見られた箇所に対し SEM による組織観察を行った。

3. 実験結果及び考察

ねじり試験により得られた I_c のねじり角度依存性を Fig. 1 に示す。ねじり角度 270° 付近から I_c が徐々に低下していき、540° で初期 I_c の 3 割程度まで低下した。

540° までねじった線材を 0° に戻し、装置から取り出した後、電圧端子間内の線材を 40 mm 程度切り出して SHPM による捕捉磁場分布測定を行った。Fig. 2 に (a) 捕捉磁場分布及び (b) 面内 J_c 分布を示す。Fig. 2 (a) を見てみると $y=14\sim 16$ mm, $y=24\sim 26$ mm, $y=33\sim 37$ mm、付近で磁場分布が低下していることが分かる。そこに対応する面内 J_c 分布を見てみると同様に J_c は低下していた。そこで、最も磁場強度が弱くなっている $y=33\sim 37$ mm 付近に着目し、この箇所に対して SEM による組織観察を行った。

Fig. 2 (a) に示した領域 (I) の組織観察の結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (1) では、矢印で示すように線材長手方向に断続的に伸びたクラックが確認できる。また、このクラック同士が繋がる様子も確認できていることから、これらが電流の流れを阻害していると思われる。Fig. 3 (2) では、Fig. 3 (1) で観察できたクラックは観察されなかったが、矢印で示すような結晶粒の剥離が確認された。このような剥離も電流を阻害する欠陥となる。以上より、ねじりにより生じたクラックと結晶粒の剥離が I_c 低下の原因になったものと考えられる。

謝辞

本研究の成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務、並びに JSPS 科研費 JP22H02021, JP22H02019 の支援により得られたものである。

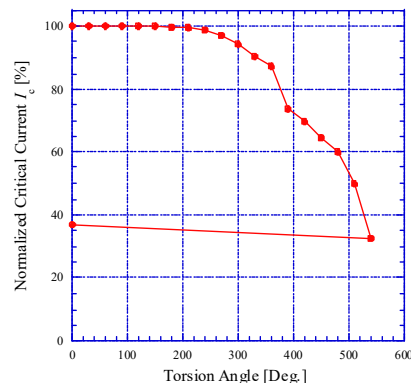
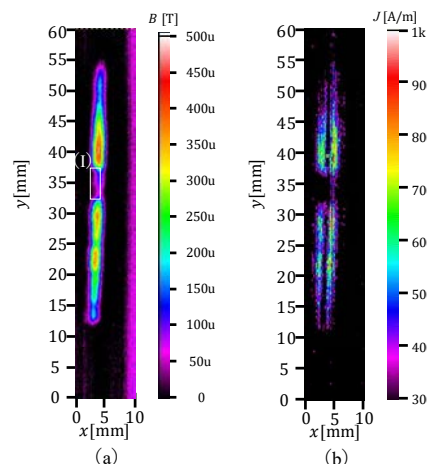
Fig. 1 Torsion angle dependence of I_c at 77K

Fig. 2 (a) Magnetic field distribution and (b) critical current density distribution obtained by SHPM

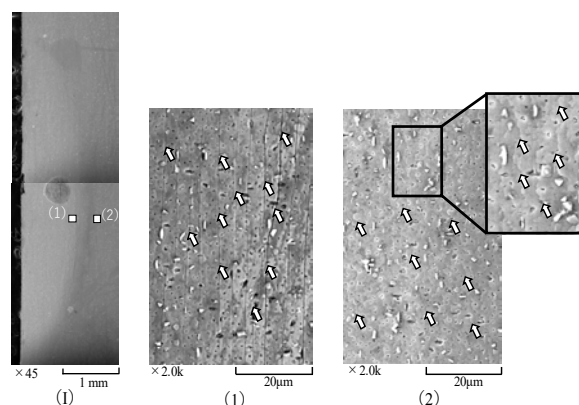


Fig. 3 SEM images of area-(I) shown in Fig. 2

参考文献

1. N. Amemiya, *J. Cryo. Soc. Jpn.* Vol. 45 (2010) 376

磁気光学イメージングを用いた超電導薄膜面内の臨界電流密度評価

Critical current density distribution measurement in REBa₂Cu₃O_y superconducting thin films using magneto-optical imaging

宇都宮 銀汰, 井上 昌睦(福岡工業大学); 大井 修一, 立木 実, 松本 明善(NIMS)

UTSUNOMIYA Ginta, INOUE Masayoshi (Fukuoka); OOI Syuuichi, TACHIKI Minoru, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

E-mail: mem24102@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

超電導層が厚さ数マイクロメートル程度の薄膜で形成されている REBa₂Cu₃O_y(REBCO, RE=レアアース)高温超電導線材は、局所的な欠陥が臨界電流密度(J_c)特性を制限することから、超電導薄膜面内における J_c 制限の原因を明らかにすることが重要となる。我々は超電導薄膜の評価手法として磁化法の中でも高い空間分解能を有する磁気光学イメージング(MOI)を用いる手法に着目している。同手法では磁場強度に対応した光度が得られるものの、バックグラウンドの光量や空間磁場の影響を受けることとなるため、臨界電流値の定量評価には磁気光学画像から磁場分布への換算と校正が必要となる。本研究では MOI で得られる磁気光学(MO)画像から J_c 分布を評価するため、理想的な条件下で得られた捕捉磁場分布を用いて、磁場への換算と校正について検討を行い J_c 分布の算出を試みたので、その結果について報告する。

2. 実験方法

本研究では、5 mm×5 mm の超電導膜を 5 分割にするように金属ストライプを形成した超電導薄膜を使用した。試料を 50 K まで冷却させた後、外部磁場を 0 T から 0.42 T まで増磁したのちに 0 T まで減磁するように変化させながら、各磁場における捕捉磁場分布について MOI 膜を用いて観測した。同手法により得られた結果をもとに磁場分布解析を行った。MOI 画像の画素数は 2048×2048 pixel、深度は 16 bit となっている。

3. 結果及び考察

撮影した MOI 画像の一例を Fig. 1 に示す。同画像は 0.42 T で得られた結果である。得られた MOI 画像から磁場分布へ変換するために超電導膜外の信号強度と磁場の関係を調べた。両者に線形性が確認できなかったため、6 次の多項式にて換算式を算出し、信号強度分布を磁場分布へ換算した。得られた磁場分布の一例として、幅方向の 1 次元分布を Fig. 2 に□で示す。同図を見ると磁場の傾きが確認できる。これは、印加磁場の空間分布や光学系に起因するものと考えられる。ここでは、外部磁場は一定であるとして線形の傾き補正を行った。補正後の磁場の 1 次元分布を Fig. 2 に○で示す。線形の補正により概ね適切な補正が行われているものと考えられる。補正後の磁場分布からビオサバルの逆問題を解くことで、 J_c 分布を算出した。得られた J_c 分布を Fig. 3 に示す。ルーフトップ形状の磁場分布を反映した J_c 分布が高い空間分解能で得られていることが分かる。発表当日は Brandt ら理論式[1][2]から得られる磁場分布及び臨界電流値との比較等についても報告する。

謝辞

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。

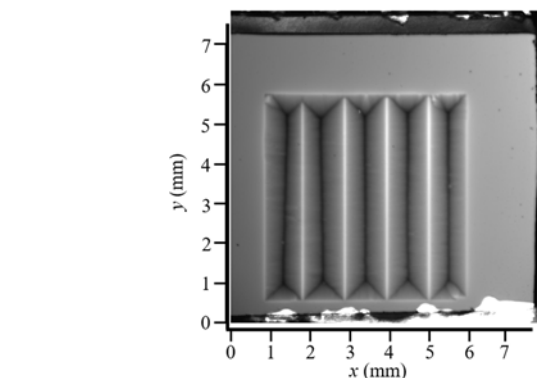


Fig. 1 MO image at 50 K, 0.42 T

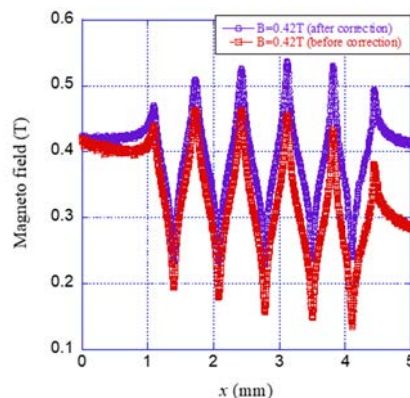


Fig. 2 Magnetic field distribution

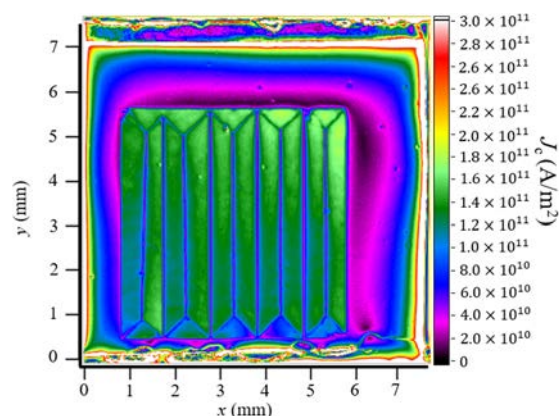


Fig. 3 J_c distribution

参考文献

1. E. H. Brandt, *et al.*, *Europhys. Lett.* 22 (1993) 735
2. Y. Mawatari, *J. Cryo. Soc. Jpn* 44 (2009) 2

アルミニウム鑄包み法による $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ 超電導バルクの作製Fabrication of $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ bulk using insert casting method

川島 健司, 神谷 良久(イムラ・ジャパン);

石田 茂之, 荻野 拓, 鬼頭 聖, 伊豫 彰, 永崎 洋, 吉田 良行(産総研)

KAWASHIMA Kenji, KAMIYA Yoshihisa (IMRA JAPAN);

ISHIDA Shigeyuki, OGINO Hiraku, KITO Hijiri, IYO Akira, EISAKI Hiroshi, YOSHIDA Yoshiyuki (AIST)

E-mail: kenji.kawashima@imra-japan.com

1. はじめに

超電導体バルクは、線材を用いた超電導マグネットより小型で高磁場発生が可能であり、様々な磁場応用用途への適応が進められている。鉄系超電導体である $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ (CaK1144) は、122 型構造の類縁構造を有し、単結晶試料を用いた検証より、その構造特有の積層欠陥が磁束ピン止めに寄与することが判明している[1,2]。我々は、上記特性を有す CaK1144 が有望な超電導バルク磁石になると推測し、 CaK1144 多結晶バルク(CaK1144 超電導バルク)開発を進めている。これまでに放電プラズマ焼結 (Spark Plasma Sintering, SPS) 手法や熱間加工手法を併用し作製した CaK1144 超電導バルクについて、超電導特性を報告してきた[3-6]。作製したバルクの内部組織の観察より、SPS 法にて作製した CaK1144 超電導バルクには内部にマイクロクラックが多数存在していることがわかり、臨界電流密度等の超電導特性を抑制していると推測される。そこで今回、バルク状態における超電導特性の向上につなげるべく、超電導バルク組織の緻密化について検討を行った。

鉄系超電導体の超電導バルク化に関連する先行研究では、SUS パイプ等に封止後に熱間等方加圧 (Hot Isostatic Pressing (HIP)) 処理を行った 122 型構造鉄系超電導体バルクにおいて高い超電導特性が得られことが報告されている[7]。SUS の熱膨張による圧縮効果でよりバルク組織の緻密化が増強されたと推測される。同手法は組織の緻密化に対して有効だが、原材料を充填した SUS パイプの封止に高い技術が必要となる。今回、SUS パイプ等の封止処理と同等の効果をより簡易に行う手法として SPS 焼結時によるアルミニウム (Al) 鑄包み手法の導入を試みた。Al 鑄包み後のバルクに対し HIP 処理を行うことで CaK1144 超電導バルクの内部組織緻密化について検証を進めた。

2. 実験方法

超電導体バルク作製の原材料には CaK1144 多結晶粉末を用いた。多結晶粉末は CaAs , KAs , Fe_2As を所定の比率で混合・焼成 (930°C-5hrs) し合成している。上記多結晶粉末を所定サイズに成型し、Al 粉末と共に SPS 装置用黒鉛型に充填、加圧加熱処理を行うことで Al 鑄包みバルク化した。上記バルクに対し、200MPa の Ar ガス雰囲気下にて、600°C-15hrs の HIP 処理を行った。

3. 結果・考察

Al 鑄包み処理による多結晶 CaK1144 への影響を確認したが、上記処理後バルクの断面観察より、Al と CaK1144 との反応は 100 μm 程度にとどまり、深部までは反応が見られない (Fig. 1)。熱処理による Al の深部拡散は遅いと推測される。Al 鑄包み処理後バルクに対して、HIP 処理を行った。なお、事前検証において超電導バルクに対し封止材被覆を行わない状態で HIP 処理を行うと、組織が低密度化することを確認している。Al 鑄包み処理後バルクに対する HIP 処理の結果、SPS 焼結のみで作製した超電導バルクと同程度の相対密度 98% の CaK1144 バルクの作製に成功した。上記 HIP 処理後バルクの内部組織の観察より、HIP 処理による Al の深部拡散は生

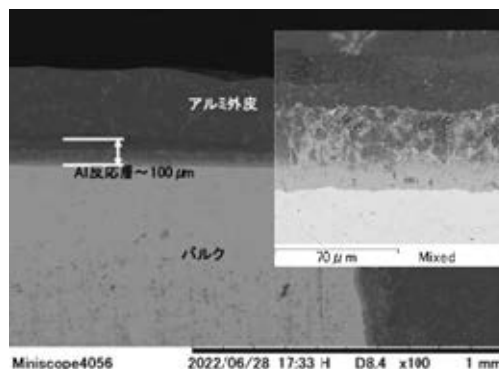


Fig.1 Cross Section SEM Image of of Al insert casting sample

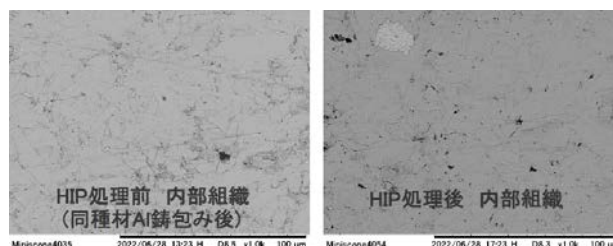


Fig.2 Cross section SEM images of (left) as-cast and (right) HIP treatment samples

じていないことがわかった。HIP 処理前後の内部組織の比較より、HIP 処理を行うことで粒界組織が薄くなり組織が緻密化していることがわかった。マイクロクラックの発生は低減できると推測されることから、上記工程は、 CaK1144 超電導バルクのマイクロクラック低減に有効であると考えられる。

4. まとめ

Al 鑄包み手法を用いることで簡易に超電導バルクの金属被覆処理が可能となり、また上記バルクをHIP処理することでバルク組織の緻密化に有効であることを確認できた。今後、より大型の CaK1144 超電導体バルクに対し、本手法による緻密化の検証を進める。

参考文献

1. A. Iyo, *et al.* J. Am. Chem. Soc. 138 (2016) 3410
2. S. Ishida, *et al.* npj Quantum Mater. 4, (2019) 27
3. S. Ishida, *et al.* Supercond. Sci. Technol. 33, (2020) 094005
4. S. Ishida, *et al.* J. Alloys Compd. 916 (2023) 171093
5. 川島 健司, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-P03-17
6. 石田 茂之, , 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-P03-18
7. A. Yamamoto *et al.*, J. Cryo. Super. Soc. Jpn. 52(6) (2017) 2-8

Al 鑄包み法により作製した $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ 超電導バルクの捕捉磁場特性

Trapped field properties of $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ bulk fabricated by insert casting method

石田 茂之, 鬼頭 聖, 伊豫 彰, 永崎 洋, 吉田 良行, 荻野 拓(産総研); 神谷 良久, 川島 健司(イムラ・ジャパン)
 ISHIDA Shigeyuki, KITO Hijiri, IYO Akira, EISAKI Hiroshi, YOSHIDA Yoshiyuki, OGINO Hiraku (AIST);
 KAMIYA Yoshihisa, KAWAHIMA Kenji (IMRA Japan)
 E-mail: s.ishida@aist.go.jp

1. はじめに

鉄系超電導体は高い超電導臨界温度(T_c)に加え、良好な磁場特性と粒界特性を有することから、多結晶バルク磁石への応用が期待されている。鉄系バルク材料としては 122 型 ($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ や $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$) が主流であるが、我々は 1144 型の $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ (CaK1144) を用いたバルク開発を進めてきた[1,2]。これまでに、放電プラズマ焼結 (SPS) 法により作製した CaK1144 バルクにおいて、臨界電流密度が温度 4.2 K、印可磁場 5 T 中で 10^4 A/cm^2 を超えることを確認している。一方で、バルク内部にはマイクロクラックが多数存在し、バルク特性の律速要因となっていることも明らかになってきた。そこで今回、マイクロクラックの発生を防ぐ試みとして、バルクを金属アルミニウム (Al) 粉末とともに SPS 処理し、バルクに金属被覆を施す Al 鑄包み法を用いてバルク作製を行った[3]。ここでは、従来の SPS 法および Al 鑄包み法で作製した CaK1144 バルクの捕捉磁場特性について報告する。

2. 実験方法

CaK1144 超電導バルクは SPS 法 (SPS バルク) および Al 鑄包み法 (Al-SPS バルク) を用いて作製した。バルクの捕捉磁場の評価は図 1 に示すように、ホール素子 (Lake Shore, HGA-3010) をバルク中心部表面に取り付け、磁束密度 (B) を測定した。温度制御および着磁には物理特性測定システム (Quantum Design, PPMS) を用いた。磁場中冷却を行い、5 K において 30 mT/min の掃引速度でゼロ磁場まで減磁することで着磁した。着磁後、 T_c ($\sim 35 \text{ K}$) 以上まで 0.2 K/min で昇温し、 B の温度依存性を測定した。測定後にバルクを切断し、Al 被覆厚みの確認および内部組織の観察を行った。

3. 結果・考察

図 2 に、SPS バルクおよび Al-SPS バルク (両者ともにバルク径 $R = 15 \text{ mm}$ 、厚さ $t_{\text{bulk}} = 10 \text{ mm}$) に対する B の温度依存性 (○および●) を示す。それぞれ 5 K において $B \sim 0.4 \text{ T}$ および 0.2 T であった。SPS バルクに比べて Al-SPS バルクの B が小さくなっているが、これはホール素子が Al 層の厚み (t_{Al}) の分だけバルク表面から離れたことに起因すると考えられる。両者の B の大きさを比較するため、ディスク状のバルク中心における B の表面からの距離 (z) 依存性を表す式[4]:

$$B(z) = B_0 \left[(z + t_{\text{bulk}}) \ln \frac{R/2 + \sqrt{(R/2)^2 + (z + t_{\text{bulk}})^2}}{z + t_{\text{bulk}}} - z \ln \frac{R/2 + \sqrt{(R/2)^2 + z^2}}{z} \right]$$

を用いて補正を行った。バルク表面における B は SPS バルク ($z \sim 0.8 \text{ mm}$) では 0.59 T 、Al-SPS バルク ($z \sim 3 \text{ mm}$) では 0.62 T と見積もられた。したがって、Al 鑄包み処理によってバルク特性が劣化しないことがわかった。また、温度上昇とともに B は減少するが、その温度依存性は比較的緩やかで、いずれのバルクでも 20 K において 5 K の値の半分程度の捕捉磁場を維持することが示された。

4. まとめ

本研究では、SPS 法および Al 鑄包み法で作製した CaK1144 の捕捉磁場特性評価を行い、Al 鑄包み処理によるバルクの劣化がないことを確認した。Al-SPS バルクは金属被覆を有するので、内部組織を緻密化するために熱間等方加圧 (HIP) 処理を追加することが可能である。現在、Al-SPS バルクに HIP 処理を施すことが捕捉磁場特性に及ぼす影響を検証している。

参考文献

1. S. Ishida, et al.: Supercond. Sci. Technol., **33** (2020) 094005
2. S. Ishida, et al.: J. Alloys Compd., **961** (2023) 171093
3. 川島健司, 他: 2024 年度春季低温工学・超電導学会, 3P-p04
4. I. G. Chen, et al.: J. Appl. Phys. **72** (1992) 1013

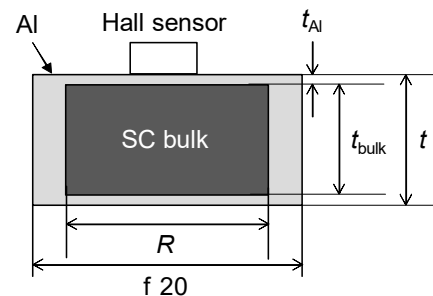


Fig.1 Experimental setup for trapped field measurement

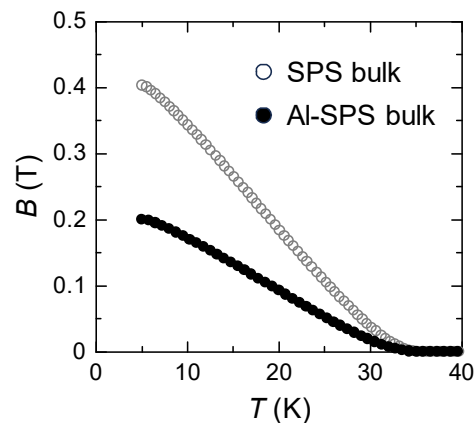


Fig.2 Temperature dependence of magnetic flux density measured at 0.8 mm and 3 mm above the surface of SPS (○) and Al-SPS (●) bulks, respectively

幅が広い希土類系酸化物超伝導テープ線材を用いた 擬似バルク超伝導体の捕捉磁場

Trapped magnetic field of pseudo-bulk superconductor
using wide rare-earth based oxide superconducting tape

原田 直幸, 高橋 慶, 末安 彰 (山口大)

HARADA Naoyuki, TAKAHASHI Kei, SUEYASU Akira (Yamaguchi Univ.)

E-mail: naoyuki@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系超伝導バルク体をバルクマグネットとして応用するにはバルク体全体に高い臨界電流密度や機械的特性が必要とされる。一方、希土類系酸化物超伝導テープ線材は、高磁場まで臨界電流が大きく、ハステロイ等を基板に用いているため機械的剛性が大きい特徴がある。そこで、本研究では市販されている幅が広い希土類系酸化物超伝導テープ線材を用いて擬似的なバルク超伝導体を作製し、捕捉磁場を測定し、計算値と比較した。また、テープ線材の形状や加工方法についても検討を行った。Fig.1 は作製した試料を永久磁石上に置いたときや永久磁石の下に吊り下げた様子である。



Fig.1 Magnetic flux pinning phenomenon in pseudo-bulk superconductors.

2. 実験方法

実験には市販の希土類系酸化物超伝導テープ線材 TPL2100[1]を用いた。テープ線材の幅は 12mm, 厚さは 0.22mm, 77K で磁場を印加しないときの臨界電流の仕様値は 360A である。この線材を 12mm の長さで切断して正方形とし、1~10 枚まで重ね、擬似バルク体試料とした。例えば、試料名 C12-1 の「12」は 12mm に切断した正方形試料, 「1」はテープ線材の枚数を表している。また、長さを 10~40mm まで変えた長方形の試料も用意した。テープ線材を切断する方法は、金切りバサミを用いる方法とエンドミルを用いて機械加工する方法を比較した。C12 はエンドミルを用いた試料である。

試料に磁束を捕捉させ、その磁束密度をホール素子により測定する方法を Fig.2 に示す。ホール素子の上に発砲スチロール製の容器を配置し、その容器の中央に試料を固定した。ホール素子と試料の下面との距離は 15mm である。

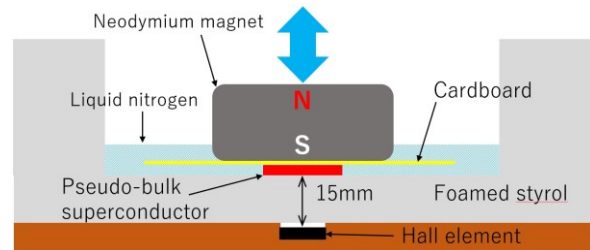


Fig.2 Schematic view of the experimental equipment.

3. 実験結果と検討

ホール素子の出力電圧 V_H の時間変化を Fig.3 に示す。どの試料も室温の状態、測定開始から 120 秒後に磁石を近づけ、その後、液体窒素を容器に入れ試料を冷却した。測定開始から 240 秒で磁石を上方向に離れた。試料を構成するテープ線材の枚数が多いほど V_H の値が大きいことがわかる。500~600 秒の間で液体窒素を捨て、試料が室温に戻るのを待った。試料の温度が上昇すると V_H は測定開始時のオフセット電圧 V_{OFF} まで低下した。次に、 $V_H - V_{OFF}$ の値からホール素子の位置にける磁束密度を求め、試料に用いたテープ線材の枚数とホール素子の位置における磁束密度の関係を計算値と共に Fig.4 に示す。計算値はビオ・サバールの法則を用いて正方形のループ電流が試料に均一に流れていると仮定して求めたものである。エンドミルで機械加工して作製した試料において、枚数が少ない場合は計算値に近い値であることがわかる。一方、金切りバサミで切断した試料は計算値の 0.70~0.8 倍程度であった。長方形試料の実験結果と合わせて考察すると、金切りバサミを用いた場合は切断した部分に近い場所はダメージを受けて電流が流れていないことが考えられる。

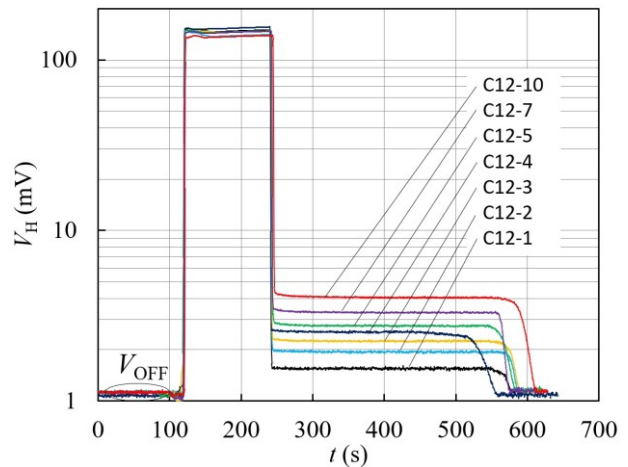


Fig.3 Time changes of the output voltage of the Hall element.

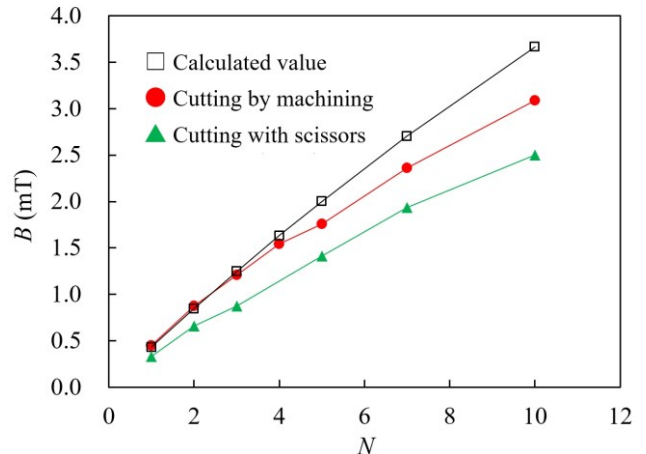


Fig.4 Magnetic flux density for the number of tape.

参考文献

1. <https://www.theva.com/products/>

ILC 主線形加速器用 NbTi 伝導冷却超伝導四極磁石・双極複合磁石の開発状況

Development status of a NbTi conduction-cooled superconducting quadrupole magnet combined with dipole correctors for the ILC main linac

山田 智宏, 有本 靖, 山本 明, 大内 徳人(KEK); SOLYAK Nikolay, SAINI Arun (FNAL); 堀井 弘幸, 野元 一宏(三菱電機)
 YAMADA Tomohiro, ARIMOTO Yasushi, YAMAMOTO Akira, OHUCHI Norihito (KEK); SOLYAK Nikolay, SAINI Arun (FNAL);
 HORII Hiroyuki, NOMOTO Kazuhiro (Mitsubishi Electric)
 E-mail: ytomohi@post.kek.jp

1. 概要

国際リニアコライダー (ILC) 主線形加速器では、超伝導加速空洞が電子・陽電子ビームをそれぞれ 125GeV まで加速し、超伝導四極・双極複合磁石がビームの収束および軌道補正の役割を担う。KEK では 2023 年度より 5 年間で、上記の超伝導空洞と超伝導磁石を組み込んだクライオモジュール試作機 (1 台) を国際協力によって開発する計画を進めている。超伝導磁石は 2025 年までに完成し、単体性能評価試験を実施する予定である。また、ILC では超伝導空洞の運転加速勾配が 31.5MV/m と高く、さらに超伝導磁石の磁場勾配も最大 40T/m、口径内磁場が ~2T に達するため、上流の加速空洞表面で自然発生する電界放出電子による暗電流シャワーが、下流に位置した超伝導磁石へ偏向入射することによって超伝導コイル発熱し、クエンチするリスクが指摘されている。本発表では、超伝導磁石と単体試験用クライオスタットの開発状況に加え、検討を進めている暗電流対策についても報告する。

2. ILC 主線形加速器用超伝導磁石と暗電流

ILC 主線形加速器 (以下、ILC-ML) では、約 8000 台の超伝導空洞と約 300 台の超伝導磁石が、2K の超流動ヘリウムで冷却されるクライオモジュールに格納され設置される。ニオブ製超伝導空洞はその周りをチタン製のジャケットで覆われ、空洞とジャケットの隙間が超流動ヘリウムで満たされ浸漬冷却される。一方、超伝導空洞のクリーンルーム内での組み立て時に超伝導磁石由来のダスト混入を防ぐため、超伝導磁石は分割構造になっており後から組みつけられるようになっている。さらに、ヘリウム輸送管からの伝熱冷却を採用している。

ILC-ML ではビームエネルギーに応じて 2 種類の超伝導磁石を使い分けるが、どちらも 1 つの四極磁石と 2 つの二極磁石が一体となった磁石となり、それぞれビーム収束と、水平/垂直のビームステアリングを担う。ILC-ML 向けおよび今回製作する超伝導磁石パラメータを Fig.1 に示す。

Parameters	L.E type	H.E type	MEXT
Beam Energy Range	5-25 GeV	25-250 GeV	-
Physical Length	0.25 m	1 m	0.4 m
Magnetic Length	0.20 m	0.95 m	0.3 m
Radius of inner pole	45 mm	45 mm	45 mm
Field gradient	19 T/m	40 T/m	40 T/m
Maximum field of Q-coil	1.5 T	3 T	3 T
Operational Temperature	2 K	2 K	2 K

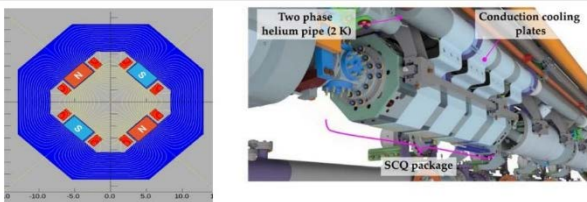


Fig.1 Top: ILC superconducting magnets parameters, Bottom left: Cross sectional image of the magnet, Bottom right; Schematic image of conducting cooling

また、超伝導空洞内では空洞内表面での電界放出により電子が放出され、空洞の加速電場によってビームとともに加速される。これは暗電流と呼ばれ、この暗電流ビームが超伝導磁石内磁場で曲げられ超伝導コイルに入射することで、コイル内で発熱しクエンチする可能性がある。この対策として、磁石内のビームパイプと四極の超伝導コイルとの間に銅製ブロックを挿入し、コイルへの入射前に暗電流をブロックすることを検討している。

3. 単体試験用クライオスタット

超伝導磁石は上述の通り熱伝導で冷却されるが、磁石の伝熱冷却はヘリウム浸漬冷却に比べ格段に難しく、クライオモジュールにインストールする前に冷却試験を実施し、励磁試験および磁場性能評価試験を行う必要がある。

単体試験用クライオスタットでは、寒冷として簡便のためヘリウムを用いずに GM 冷凍機を採用する。クライオスタットは太鼓型で前後の大フランジから磁石を挿入する。分割した超伝導磁石をビームパイプの周りに組み付けるという ILC クライオモジュールでの組み立て方法を全く同様に再現できるように設計した。さらに、Beam Position Monitor (BPM) も格納できるように設計してあるため、BPM と超伝導磁石が一体となった試験を KEK 内の実際の加速器を用いて実施することが可能となっている。

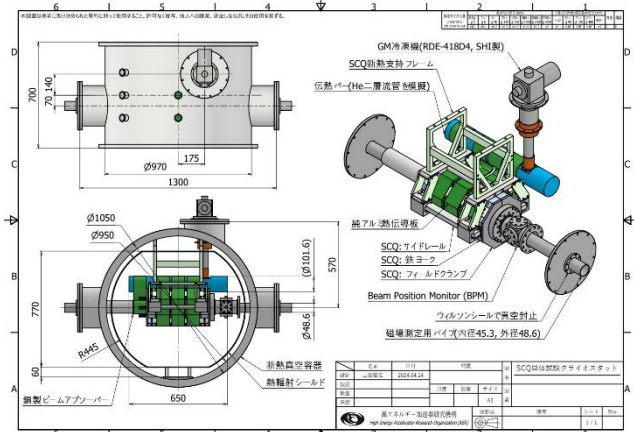


Fig.2 Standalone test cryostat

4. まとめ

ILC 主線形加速器で用いられる超伝導磁石には、伝導冷却および分割構造という 2 つの特徴がある。本発表では、ILC スベックを実証する超伝導磁石の設計ならびにこの超伝導磁石を単体で試験するためのクライオスタットの設計について報告した。今後は、2024 年度に超伝導磁石およびクライオスタットの製造、2025 年度に単体励磁試験を予定している。

謝辞

本研究は文部科学省先端加速器共通基盤技術研究開発費補助金「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」および日米科学協力事業「高エネルギー物理分野」の助成を受けて行われた。

Transient voltage measured over a large-scale prototype of a cryogen-free HTS insert coil

ZAMPA Alexandre, TSUCHIYA Yuji, TAKAHASHI Kohki, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (HFLSM);

UTO Tatsuro, TAKEWA Hiroyuki, HANAI Satoshi, IOKA Shigeru, INAGAKI Junji (Toshiba)

E-mail: alexandre.zampa.d4@tohoku.ac.jp

1. Introduction

The High Field Laboratory for Superconducting Materials (Tohoku University) and Toshiba® are currently developing a 19 T insulated HTS coil for its future 33 T cryogen-free superconducting magnet. The architecture of the coil is based on the robust concept [1] aiming to cope with the occurrence of local degradation in the HTS tape and to withstand high mechanical stresses. One large-scale prototype of this HTS insert, consisting of twenty stacked pancakes, was manufactured, and successfully tested in liquid Helium inside a 14 T LTS magnet, reaching a total magnetic field of 25 T and validating the coil mechanical design. The HTS coil protection sequence is based on the early detection of dissipation followed by a rapid discharge in a dump resistor. The dissipation in the coil is reflected by a sudden change of slope in the coil's voltage. Another phenomenon, detailed in this work, presents a dissipation-like voltage. A good understanding of this phenomenon is important to efficiently protect the HTS coil not to hinder the recognition of the transient voltage of interest coming from dissipation.

2. Experimental apparatus

This study was conducted using the twenty stacked pancakes coil. The coil was equipped with a pickup coil with its voltage $V_{pick,up}$. This voltage was adjusted by k to match the inductive contribution of the coil's voltage V_{coil} . The compensated voltage V_{comp} , defined in (1), was used to make easier the recognition of the contribution of interest.

$$V_{comp} = V_{coil} - kV_{pick,up} \quad (1)$$

A Lakeshore® HGCA-3020 Hall sensor was positioned at the coil's mid-plane, on the coil's axis, to measure the magnetic field B_{meas} . The coil coefficient K in case of a homogeneous current was determined at 100 K. The magnetic field error B_{error} is defined by (2), with I the transport current.

$$B_{error} = B_{meas} - KI \quad (2)$$

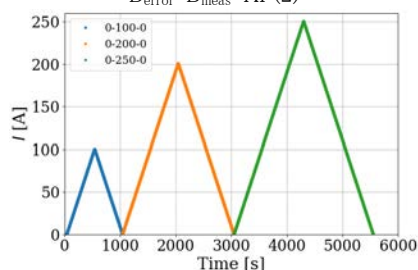


Fig.1 Current as a function of time applied in the coil

3. Experimental results

The coil was cooled down to 27 K and magnetically virgin. It experienced successively two energizations to 250 A at 0.2 A/s ("1st Ramp Up" and "2nd Ramp Up"). The coil was then warmed up above T_c and cooled down again to 27 K. It then experienced the current introduced in Fig.1. V_{comp} measured

throughout these tests is displayed in Fig. 2. When the current in the coil exceeded the maximum previous current, changes in V_{comp} were observed with the voltage jumping from the trend of the second energization ("2nd Ramp Up") to the trend of the first energization ("1st Ramp Up").

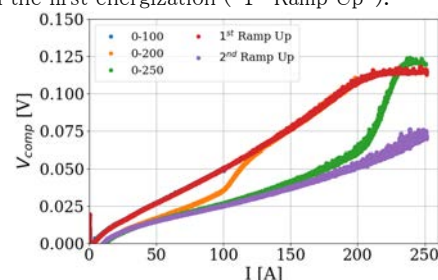


Fig.2 $V_{comp}(I)$ measured during the successive energizations

Fig. 3 introduces B_{error} measured during these tests. When the current exceeded the maximum previous current, B_{error} followed back the trend of B_{error} obtained during the initial energization from the virgin state ("1st Ramp Up").

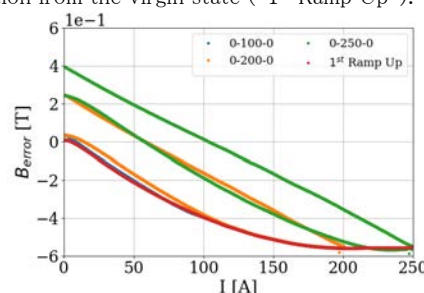


Fig.3 $B_{error}(I)$ during the successive energizations

4. Discussion

The sudden changes in V_{comp} with the voltage jumping to the level corresponding to the initial current ramp up from the virgin state, when the current exceeded the maximum previous current were detailed in [2]. In [2], the use of simulation helped to clarify the origin of these changes occurring when the current inside the superconductor penetrates virgin zones. Our work confirms experimentally these simulation results showing that B_{error} reach the level obtained with the initial current ramp up from the virgin state when the current exceeded the maximum previous current.

References

1. S. Awaji et al., "Robust REBCO Insert Coil for Upgrade of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond., Aug. 2021.
2. B. Rozier et al., "Calculation of the local current density in high-temperature superconducting insulated rare earth-barium-copper oxide coils using a volume integral formulation and its contribution to coil protection" Superconductor Science and Technology, 2019.

誘導エネルギー取出法によるクエンチ復旧時間短縮の実証試験

Demonstration of inductive energy extraction to reduce quench recovery time.

江原 悠太, 吉田 潤(住重)
Yuta Ebara, Jun Yoshida (SHI)
E-mail: yuta.ebara@shi-g.com

1. はじめに

超電導コイルのクエンチ発生時における2次コイルを用いたエネルギー取出しの実証試験をおこなった。超電導コイルがクエンチした際には、その蓄積エネルギーの放出によりコイルの温度が上昇する。特に無冷媒マグネットでは再び励磁可能な温度を下回るまでに一定時間(クエンチ復旧時間)が必要であり、クエンチによってマグネット稼働率は低下してしまう。今回、コイル損傷防止だけでなくクエンチ復旧時間短縮によるマグネット稼働率向上をおこなう目的で、2次コイルによるエネルギーの取出しを提案し、原理実証をおこなった。本発表では、その方法と試験結果を報告する。

2. 誘導エネルギー取出法

2次コイルを用いてインダクティブにエネルギー取出しをおこなうクエンチ保護法(ここでは「誘導エネルギー取出法」と呼ぶ)を検討した。2次コイルによるクエンチバックなど、2次コイルを利用したクエンチ保護法は以前から検討されている。[1] 今回検討した誘導エネルギー取出法では、1次コイルに対して磁氣的に結合し、熱的に分離された2次コイルを用いて、クエンチ時に放出される蓄積エネルギーの一部を2次コイルへと取り出し、1次コイルの温度上昇を抑制する。コイルの温度上昇を抑制することで、コイルの損傷防止だけでなく、クエンチ復旧時間の短縮も可能になる。

誘導エネルギー取出しを考えると、最も簡単な回路モデルは1次、2次回路がそれぞれのインダクタンス $L_1, 2$ と抵抗 $R_1, 2$ のLR回路とみなせる場合である。それぞれの回路を流れる電流 $I_1, 2$ は、2つのインダクタの相互インダクタンス M を用いて、以下のような回路方程式で表せる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}.$$

この方程式は解析解が得られる。解析的にエネルギー取出効率について検討すると、2つのコイルの結合係数 k と時定数比 τ_{ratio} (1次回路の時定数に対する2次回路の時定数の比) が取り出し効率を決定する重要なパラメータであることがわかった。なお、2つのコイルの結合係数 k と時定数比 τ_{ratio} は以下のように定義される。

$$k \equiv \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad \tau_{ratio} \equiv \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

そこで、本研究では多段冷凍機の特性に着目し、誘導エネルギー取出しを検討した。エネルギーの取出し先を冷凍機1段階にするだけで、重要因子と考えられる結合係数と時定数比を比較的高く設定することができ、高いエネルギー取出効率が実現できる。同時に、多段冷凍機における段階間での熱容量と冷却能力の差異によって、効果的なクエンチ復旧時間短縮が可能になる。

3. 実証試験

検討の妥当性を評価するため、誘導エネルギー取出法の実証試験をおこなった。Fig. 1 に実証試験の概略図、Fig. 2 に実証試験の回路図をそれぞれ示す。この実証試験では、1次コ

イルにNbTiコイルを用い、4K-GM冷凍機の2段階で冷却した。2つの電流遮断器を開くことにより、1次コイルと保護ダイオードで構成される閉回路が形成され、1次コイルに蓄えられていたエネルギーが1次コイルと保護ダイオードへ放出される。1次コイルと磁氣的に結合した2次コイルを設置し、一部のエネルギーを取り出し2次回路で消費させた。高い時定数比を得るため、2次コイルには高温超電導であるBi-2223コイルを用い、同冷凍機の第1段階で冷却した。コイルのテープ線材両端をはんだ接続し、微小かつ有限な抵抗をもたせた。

このようなセットアップを用いて、回路遮断後の1次コイルの温度、電圧、電流が測定された。2次コイル有無の条件下でそれぞれ測定され、誘導エネルギー取出しによって、コイル温度上昇やクエンチ復旧に差異が得られるか確認した。

4. 結果

誘導エネルギー取出しによりコイル温度の上昇が抑制され、クエンチ復旧時間が短縮されることが、実証試験によって確認された。[2] また、簡易的な数値計算をおこない、妥当性を確認した。

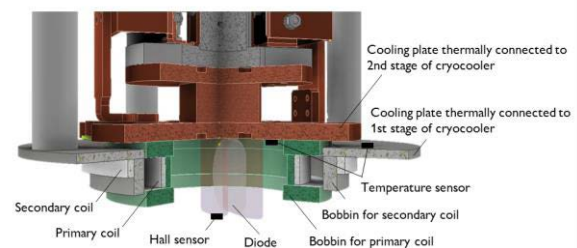


Fig.1 Schematic of the demonstration setup. [2]

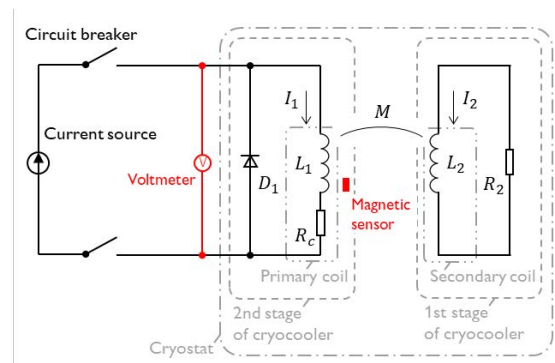


Fig.2 Circuit diagram for the demonstration. [2]

参考文献

1. M. N. Wilson, "Superconducting magnets.", (1983).
2. Y. Ebara and J. Yoshida, "Study on Reduction of Quench Recovery Time by Inductive Energy Extraction.", IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2024).

REBCO 積層導体を収めた常電導ジャケットの渦電流損失

Eddy Current Losses in The Normal Conducting Jacket with REBCO Stacked Cable

川越 明史, 摺木 惇人(鹿児島大学); 尾花 哲浩(NIFS)
 KAWAGOE Akifumi, SURUKI Atsuto (Kagoshima University); OBANA Tetsuhiro (NIFS)
 E-mail: kawagoe@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO テープ線材は、高磁界中の臨界電流が高く、金属基板上に超伝導層を成膜することから機械的特性にも優れている。このため、次世代の核融合実験装置などへの適用が期待されている。必要な電流容量を確保するために複数本を束ねた大電流容量導体の研究開発が進められている。REBCO 線材を積層した導体はその候補の一つである。機械的・熱的な観点から、積層導体を常電導金属ジャケット内部に収める構造が採用されることが多い。これまで内部導体のヒステリシス損失や結合損失を実験的に評価してきた[1, 2]。常電導金属ジャケットでも、変動磁界中で渦電流損失が発生するので、その特性を把握しておく必要がある。超伝導導体がジャケット内部に有無によって、銅製ジャケットの渦電流損失が影響を受けるかを実験的に調べた結果を報告する。

2. 実験方法

YBCO 線材を積層した積層導体を、銅製ジャケットに入れた場合と入れない場合で、サンプル全体の損失を測定した。積層導体ありの損失から積層導体のみの損失を差し引くことによって、積層導体有りときの銅製ジャケットの渦電流損失を評価した。積層導体は、YBCO 線 50 本を積層して、その周りを銅テープで螺旋巻した後にハンダ含浸したものである。長さ約 100mm の直線形状でツイストはしていない。銅製ジャケットの断面寸法は、外寸法が 14mm × 14mm で、内寸法が 12mm × 12mm である。このサンプルに交流外部磁界を液体窒素中で印加して、サンプル全体を覆うピックアップコイルを用いて交流損失を測定した。なお、積層導体と銅製ジャケットは、通常は電氣的に接続される。しかしながらこの場合、積層導体の損失特性が銅製ジャケットによって変化する可能性があるため、今回は積層導体と銅ジャケットは絶縁した。

3. 測定結果

測定結果を Fig. 1 に示す。積層導体は、テープ線を積層した構造なので、その特性には異方性がある。そこで、積層導体有りのサンプルは、テープ面に垂直方向に磁界を印加した場合と、平行方向に磁界を印加した場合の測定を行った。Fig. 1(a), (b)は、どちらも銅ジャケットのみと積層導体ありの比較である。(a)と(b)の積層導体のデータは、それぞれ、テープ面に垂直方向と平行方向に磁界を印加した場合の結果である。○プロットが銅ジャケットのみの結果である。△と□が、積層導体ありの結果で、測定されたデータから、積層導体のみの結果を差し引いた結果である。縦軸は、印加磁界一周周期当たり、サンプル単位体積当たりの交流損失エネルギーを $\mu_0 H_m^2$ で規格化した規格化損失である。 μ_0 は真空の透磁率で、 H_m は印加磁界振幅である。横軸は周波数である。測定値の周波数依存性は、渦電流損失の特性をもっている。ピーク周波数がスキンの周波数に対応する。Fig. 1(a)より、テープ面に垂直な方向に磁界を印加した場合は、内部導体によって銅ジャケットの渦電流損失が低下していることがわかる。スキンの周波数よりも高い周波数では、ほぼ一致する。また、Fig. 1(b)では、スキンの周波数より高い周波数領域で差が観測されている。いずれの結果も、積層導体によって磁界が遮蔽される領域で、銅ジャケットの渦電

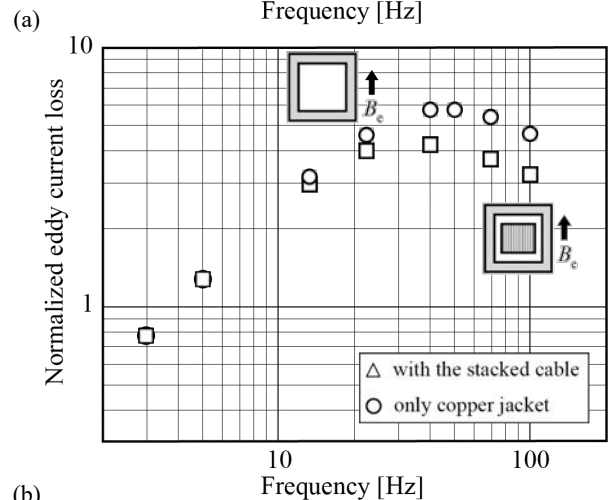
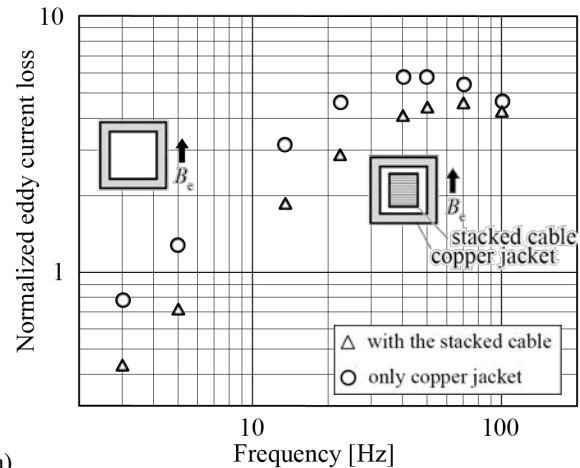
流損失が低下している。銅ジャケット内部の空間の透磁率の低下することに対応していると考えられる。

4. まとめ

REBCO テープ線を積層させた導体を内部に持つ銅ジャケットの渦電流損失を評価した。積層導体が磁界を遮蔽する領域で、銅ジャケットの渦電流損失が低下することがわかった。

参考文献

- Y. Ueno, et al. "Evaluation AC Losses in Large-Scale Conductors Consisting of Stacked REBCO Tapes," *Plasma and Fusion Research*, 16, (2021) 2405071–2405071.
- A. Kawagoe, et al. "Investigation of Intertape Coupling Losses in YBCO-Stacked Cables," *Plasma and Fusion Research*, 18, (2023) 2405074–2405074.



(b) Fig. 1 Measured eddy current losses in the copper jacket. (a) and (b) are comparison of results with and without a stacked cable. Circle plots represent measured losses in the only copper jacket. Triangle and square plots represent losses for the sample with a stacked cable.

Faro shuffle 接続法を用いた積層高温超電導導体間における接続抵抗の評価 Evaluation of Connection Resistance between Stacked REBCO tapes using Faro Shuffle Joint Technique

小野寺 優太(NIFS);成嶋 吉朗, 柳 長門(NIFS, 総研大);宮澤 順一, 後藤 拓也, 中村 誠, 金田 健一(Helical Fusion)
ONODERA Yuta (NIFS);NARUSHIMA Yoshiro, YANAGI Nagato (NIFS, SOKENDAI);
MIYAZAWA Junichi, GOTO Takuya, NAKAMURA Makoto, KANETA Kenichi (Helical Fusion)
E-mail: onodera.yuta@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合炉用マグネットに向けて高温超電導線材を用いた導体開発が世界各国で進められている。数十 kA 以上の大電流容量が必要であり、テープ形状の REBCO 線材を積層した導体構造が考案されている。素線枚数の多さから導体間の接続には簡易的かつ低抵抗な接続方法が求められるが、導体そのものが開発段階であることから未だ確立できていない。そこで、我々は REBCO 線材表面を酸洗いし、超電導面を向かい合わせて積層した後、ボルト締めによる圧着のみで接続する新たな手法 (Faro shuffle 接続法) を提案した。本研究では、REBCO 線材を 2 枚接続した場合の接続抵抗値と締め込みトルクとの関係性を明らかにし、実際の導体に適用し接続抵抗の評価を行うことで本接続手法の有効性について検討を行った。

2. 実験方法

Fig. 1 に接続抵抗を計測した実験治具の模式図および写真を示す。実験には 12 mm 幅の REBCO 線材 ($I_c = 542$ A/cm-w at 77 K s.f. Fujikura 社製) を用いた。フラックスを用いて銅メッキされた線材表面を酸洗いした後、エタノールで洗浄した。30 mm の長さに亘り超電導面を向かい合わせて積層した後、ステンレス製の押し板 (幅 12 mm, 長さ 30 mm, 厚さ 0.5 mm) で挟み、3 本の M6 ボルトを用いて所定のトルクで締め込んだ。本試料に電圧端子を取り付け、液体窒素中に浸漬させ通電することで接続抵抗および臨界電流値を計測した。また、この接続手法を 60 枚積層した導体と電流リードとの接続 (2 箇所) に適用し、20 K 中での通電試験によって接続抵抗を計測した。接続部分は 30 枚の REBCO 線材をそれぞれ突き合わせ、交互に積層させて本接続方法により接続した。

3. 実験結果

Fig. 2 に 2 枚積層時の締め込みトルクに対する接続抵抗および規格化した臨界電流値の関係を示す。締め込みトルクの増加に伴い接続抵抗が減少している一方、臨界電流値について劣化はほとんど観測されなかった。この結果から、Faro shuffle 接続法によって $100 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ 程の接続抵抗値を達成できることが確認できた。

Fig. 3 に REBCO 線材を 60 枚積層させた導体の通電波形と電圧波形の実験結果および導出した抵抗値を示す。200 A/s の掃引速度で 19 kA まで通電し、360 秒間保持した。定常通電時の抵抗値は電流リードの正極側で $1.35 \text{ n}\Omega$ 、負極側で $0.8 \text{ n}\Omega$ であった。このときの一組当たりの接続面積は 7.2 cm^2 であり、REBCO テープ面間の接続抵抗値の平均値はそれぞれ $291 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ 、 $170 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ であった。2 枚積層時の結果とほぼ同等の値であり、19 kA 通電時に接続部分からの発熱は確認されなかった。したがって、本手法が積層導体の簡易的な接続方法として有効であることが明らかとなった。

本研究は、核融合科学研究所共同研究予算(PASU1481 共民/HF6)の助成を得て行ったものである。

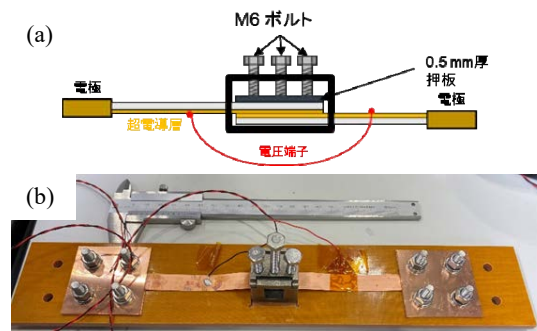


Fig. 1 (a) Schematic diagram (a) and picture (b) of joint resistance measurement setup.

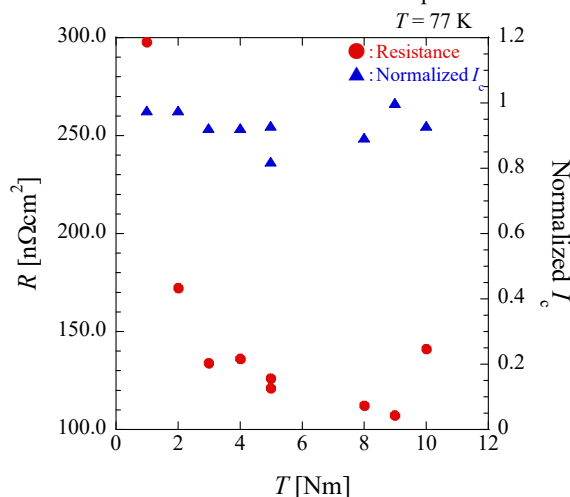


Fig. 2 Dependence of joint resistance and normalized I_c on tightening torque.

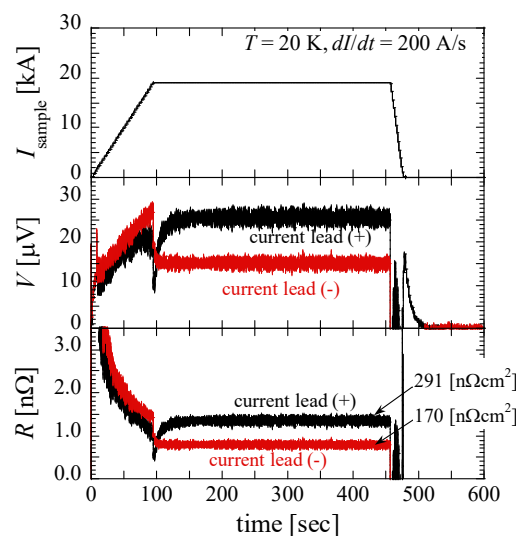


Fig. 3 Experimental results of current, voltage and resistance at the Faro shuffle joint in stacked REBCO tapes conductor.

太陽光発電と超電導直流送電システムの成立性に関する検討

Feasibility study of solar power generation and superconducting DC power transmission system

星野 勉, 矢花 空宙, 森井 大晴, 伊庭 健二 (明星大)

HOSHINO Tsutomu, YABANA Sora, MORII Taisei, IBA Kenji (Meisei Univ.)

E-mail: thoshino@ee.meisei-u.ac.jp

1. はじめに 九州大学の東川准教授が、メガソーラとエネルギー貯蔵を兼ねた超電導直流送電システムを提案している。メガソーラ側に蓄電装置を置かずに、直流ケーブルにエネルギー貯蔵機能を持たせるものである [1]。本報告は、メガソーラ (以後、PV と呼ぶ) の発電能力を発揮するために MPPT との親和性を検討するものである。検討の進捗状況の概要を報告する。

2. 解析モデルとチョッパ 解析の簡単化のため、超電導送電ケーブルシステムの負荷は定抵抗 R 、超電導送電ケーブルはインダクタンス L で表現する。メガソーラと超電導ケーブルの間に種々の DC-DC 変換器が入った主回路である。超電導ケーブルの定格電圧 1 kV、定格電流 10 kA、インダクタンス 20 H、蓄積エネルギー 1 GJ である。

平井は、DC-DC 変換器として Fig. 1 に示す降圧チョッパを採用して、PV の出力特性を PSIM [2] を用いて行った [3]。矢花と森井は、Fig. 2 に示す Ćuk コンバータを用いて解析した [4,5]。森井は XTAP [6] を用いて解析した。いずれの変換器でも、超電導送電ケーブルのインダクタンス L を変換器の構成要素とした。変換器の L が大きすぎるため、十分な昇圧効果が得られず、超電導ケーブルの通電電流を急増させることができず、日射量の急増に伴う PV の発電可能電力を引き出しきれなかった。

そこで、本論では、Fig. 3 に示す通常の昇降圧コンバータ回路について、新たに解析を行った。ここで、 $C_i = 1$ mF、 $L_f = 100$ μ H、 $C_o = 50$ μ F、チョッパ周波数 $f = 20$ kHz である。

3. デューティ比と出力の関係 まず、定常状態におけるチョッパスイッチのデューティ比と出力側コンデンサ C_o の端子電圧の関係を Fig. 4 に示す。デューティ比が 0.65 を超えると出力電圧 V_{C_o} が増加しなくなる。そこで、デューティ比が 0.6 以下となるように MPPT 制御回路に制限を掛けた。降圧チョッパでは、チョッパ周波数を下げて、シミュレーション時間を長くとることができたが、昇降圧コンバータでは、チョッパ周波数を下げることができず、計算誤差が蓄積するため、有効な結果を得られていない。

4. むすび PSIM や XTAP では、計算ステップに対して膨大な計算時間では、誤差が累積するため、チョッパ周波数を下げる工夫を行い、有意義な結果を得る工夫を重ね、システムの成立性の検証を追求していく。

参考文献

1. K. Higashikawa, T. Kiss: "Proposal for Superconducting Cable with Energy Storage Function and Power System Using Them for Mass Utilization of Renewable Energy", TEION KOGAKU, Vol. 57, No. 6, pp. 343 - 348 (2022)
2. 日本パワーエレクトロニクス協会: "ゼロからわかる回路シミュレータ入門" (2019.5) コロナ社
3. K. Hirai: "DC power transmission system—Preliminary study using PSIM—", Bachelor thesis, Meisei Univ. (2023.1)
4. S. Yabana: "DC power transmission system—Preliminary study using PSIM—", Bachelor thesis, Meisei Univ. (2024.1)
5. T. Morii: "DC power transmission system—Preliminary study

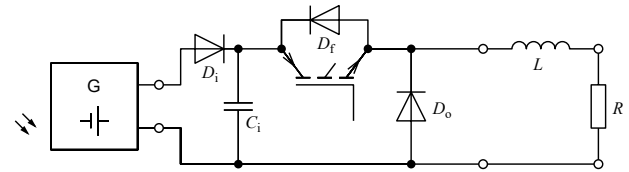


Fig.1 Buck converter main circuit

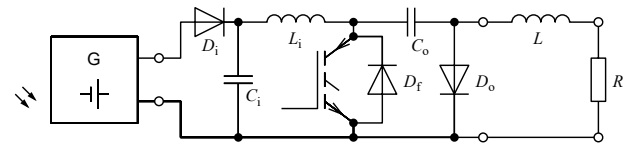


Fig.2 Ćuk converter main circuit

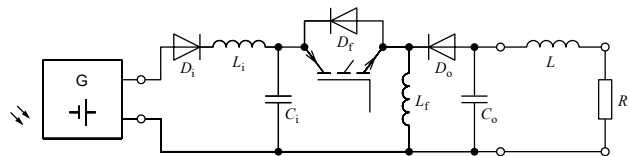


Fig.3 Buck boost converter main circuit

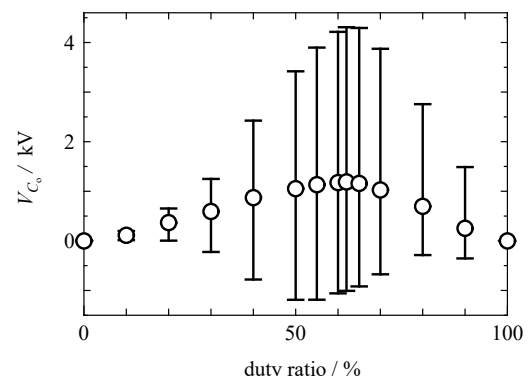


Fig.4 Relationship between duty ratio and output voltage V_{C_o} .

using XTAP—", Bachelor thesis, Meisei Univ. (2024.1)

6. CRIEPI: "XTAP", <https://www.xtap.jp/top/>

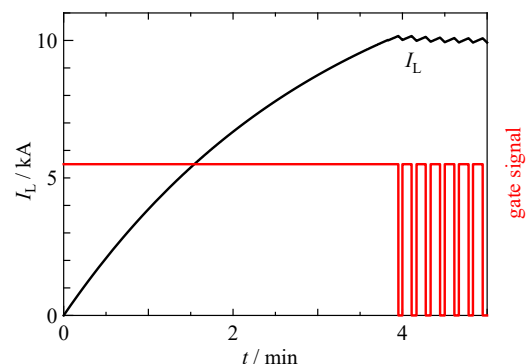


Fig.5 Buck converter gate signal and output current waveform [3]

(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。

A			G		
阿部 太一	(量研機構)	83	GARFIAS-DÁVALOS Diego	(総研大)	47, 84
秋池 良	(東ソー)	88	後藤 英雄	(中部大)	46
雨宮 尚之	(京大)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	後藤 拓也	(ヘリカルフュージョン)	47, 114
安藤 綜一郎	(鹿児島大)	58	後藤 義人	(産総研)	69
青木 香苗	(KEK)	17			
青木 和之	(KEK)	80	H		
有本 靖	(KEK)	80, 110	芳賀 雄仁	(九大)	40
浅井 航希	(上智大)	81, 82	箱石 裕人	(岩手大)	66
浅香 海斗	(横浜国大)	103	濱田 一弥	(量研機構)	83
淡路 智	(東北大)	25, 46, 111	濱田 衛	(JASTEC)	15
AYALA Christopher	(横浜国大)	98	濱口 真司	(NIFS)	32, 45, 47, 84
			濱島 高太郎	(東北大)	11, 85
B			濱本 拓郎	(九工大)	22, 55
馬場 智澄	(NIFS)	47	濱津 順平	(日本電子)	38
BADEL Arnaud	(Grenoble Alpes 大)	111	花井 哲	(東芝エネルギーシステムズ)	111
伴野 信哉	(NIMS)	81, 82	原 英和	(古河電工)	1
			原田 直幸	(山口大)	109
C			橋本 博正	(明治大)	8
力石 浩孝	(NIFS)	47, 84	橋爪 健一	(九大)	40
			蓮尾 信也	(Faraday Factory Japan)	21
D			羽多野 椋太	(東北大)	9
DHAKARWAL Mukesh	(KEK)	89	HELLSTROM Eric	(Florida 州立大)	27
			逸見 智和	(サーマルブロック)	93
E			東川 甲平	(九大)	10, 13, 20, 26
江原 悠太	(住重)	112	平野 直樹	(NIFS)	8, 11, 41, 84
永崎 洋	(産総研)	69, 107, 108	平野 貴之	(京大)	2, 3
遠藤 淳	(青学大)	67, 68	廣瀬 陽代	(産総研)	21
			廣田 悠力	(岡山大)	18
F			菱沼 良光	(NIFS)	86, 87
淵野 修一郎	(東大)	59	日浦 琢言	(早大)	19
藤久 裕司	(産総研)	69	本田 敦	(量研機構)	83
藤巻 朗	(名大)	100	本田 元気	(住友電工)	72, 73, 74
藤本 大貴	(九大)	24	本多 尚	(京大)	6
藤野 正人	(京大)	2	堀 伊吹	(静岡大)	30
吹場 活佳	(静岡大)	30	堀出 朋哉	(名大)	76
福田 光宏	(阪大)	18	堀口 佳吾	(青学大)	72, 73, 74
福井 良磨	(量研機構)	83	堀井 弘幸	(三菱電機)	110
福井 聡	(新潟大)	5, 95	星野 勉	(明星大)	43, 115
福本 祥一	(山本電機製作所)	35, 90			
福山 和宏	(JASTEC)	38, 52			

I	
伊庭 健二	(明星大) 115
市毛 尚志	(量研機構) 83
一瀬 中	(電中研) 76
井田 徹哉	(海洋大) 70
井口 将秀	(量研機構) 83
今川 信作	(NIFS) 45
今道 颯人	(海洋大) 70
稲垣 淳二	(東芝エネルギーシステムズ) 111
稲垣 祐次	(岡山理科大) 40
井上 昌睦	(福岡工大) 104, 105, 106
井上 良太	(岡山大) 18, 36
井上 勇希	(明星大) 43
井岡 茂	(東芝エネルギーシステムズ) 111
石田 政義	(筑波大) 50, 51
石田 茂之	(産総研) 69, 107, 108
石井 涼太	(都立大) 75
石川 未祈	(中部大) 34
石山 敦士	(早大) 18, 19, 49, 61
伊藤 悟	(東北大) 14, 84
伊藤 聡	(JASTEC) 38, 52
伊東 徹也	(テラル) 95
岩熊 成卓	(九大) 58
石見 佳紀	(三菱電機) 62
岩本 晃史	(NIFS) 39, 45
岩崎 響	(青学大) 88
伊豫 彰	(産総研) 69, 107, 108
和泉 輝郎	(産総研) 21

J	
JANI Md Rafsun (Florida 州立大)	27

K	
隠崎 遼河	(福岡工大) 105
亀谷 文健	(Florida 州立大) 27
神谷 宏治	(NIMS) 50, 51, 54
神谷 良久	(イムラ・ジャパン) 107, 108
金沢 新哲	(室蘭工大) 23
神田 昌枝	(中部大) 34, 37
金田 健一	(ヘリカルフュージョン) 114
柏 好敏	(量研機構) 83
河江 達也	(九大) 40
川越 明史	(鹿児島大) 58, 113
川井 正徳	(KEK) 17
河野 勝己	(量研機構) 83
河野 亮介	(東大) 57

河島 裕	(テラル) 95
川島 健司	(イムラ・ジャパン) 69, 107, 108
川澄 渚	(海洋大) 70
菊池 章弘	(NIMS) 16, 80
菊地 紘生	(足利大) 93
金 錫範	(岡山大) 18, 36
木村 誠宏	(東大) 32
木須 隆暢	(九大) 10, 13, 20, 26
北口 仁	(NIMS) 12
鬼頭 聖	(産総研) 107, 108
木内 勝	(九工大) 22, 55
小林 弘明	(JAXA) 45, 62, 63
小林 宏泰	(千葉大) 48, 85
小林 慎一	(住友電工) 72, 73, 74
児玉 一宗	(日立) 89
小濱 芳允	(東大) 25
小池 健生	(九大) 40
近藤 良也	(KEK) 17
小瀧 博司	(日立) 89
久保田 優志	(関西学院大) 64
熊倉 浩明	(東京農工大) 35
國本 慧太	(青学大) 67, 68

L	
LEE Sergey (Faraday Factory Japan)	20
李 峰	(名大) 100
LIMON Shah Alam (Florida 州立大)	27

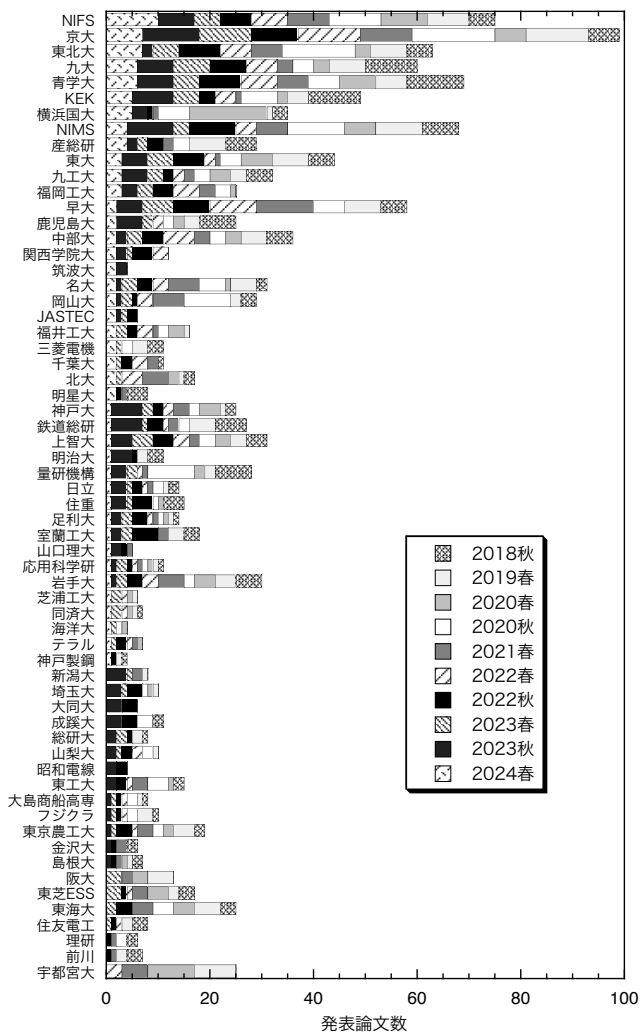
M	
町 敬人	(産総研) 21
町村 至	(横浜国大) 97
前川 一真	(神戸大) 35, 90
槇田 康博	(KEK) 11, 17
MAO Sam (Florida 州立大)	27
間藤 昂允	(北大) 44
松本 明善	(NIMS) 24, 35, 89, 104, 106
松本 要	(名大) 76
松本 拓也	(神戸製鋼) 38, 52
松永 信之介	(NIMS) 54
松尾 奏朗	(山東理大) 29
馬渡 康德	(産総研) 77, 99
召田 雅実	(東ソー) 88
南前 俊介	(岡山大) 18
三島 史人	(福井工大) 91, 92
三浦 英明	(三菱電機) 62, 63, 64, 65
三浦 大介	(都立大) 75

三浦 峻	(九大)	58	緒方 康博	(テラル)	95
三輪 歩夢	(福岡工大)	105	小川 純	(新潟大)	95
宮城 大輔	(千葉大)	48, 85	荻野 拓	(産総研)	69, 107, 108
宮崎 寛史	(九大)	58	荻津 透	(KEK)	89
宮澤 順一	(ヘリカルフュージョン)	47, 114	大井 修一	(NIMS)	24, 106
水野 謙一郎	(MTL)	25	大池 章太	(千葉大)	48
楊 墨	(九大)	20	岡 徹雄	(芝浦工大)	71, 93
毛利 誠一	(九工大)	77	岡田 達典	(東北大)	46, 111
森井 大晴	(明星大)	115	岡井 敬一	(JAXA)	62, 63
元木 貴則	(青学大)	12, 67, 68 , 72, 73, 74, 88	岡村 崇弘	(KEK)	32
村上 陽之	(量研機構)	83	大森 結斗	(横浜国大)	98
村上 正秀	(筑波大)	32	大西 祥広	(量研機構)	83
村田 将一郎	(関西学院大)	64	恩地 太紀	(鉄道総研)	14, 41
MUYEEN S. M.	(Qatar 大)	10	小野寺 優太	(NIFS)	41, 47, 84, 114
N			折原 菜月	(早大)	61
永濱 秀明	(JASTEC)	38 , 52	大崎 博之	(東大)	57, 78
永井 亜暉	(横浜国大)	101	長村 光造	(応用科学研)	28
長崎 陽	(東北大)	9, 94, 96	大島 冬真	(神戸大)	90
内藤 智之	(岩手大)	66	小田部 荘司	(九工大)	77
中川 久司	(産総研)	33	大塚 尚孝	(UACJ)	28
中川 心平	(鹿児島大)	58	大内 徳人	(KEK)	80, 110
中井 優介	(北大)	44	大和田 智也	(東北大)	9
中村 誠	(ヘリカルフュージョン)	114	大屋 正義	(関西学院大)	45, 59, 62, 63 , 64 , 65
中村 美幸	(Faraday Factory Japan)	20, 21	P		
中村 新一	(TEP)	68	PETRYKIN Valery (Faraday Factory Japan) 20		
成嶋 吉朗	(NIFS)	47 , 84, 114	S		
夏目 恭平	(NIMS)	50, 51, 54	相楽 和豊	(青学大)	72, 73 , 74
根岸 伸行	(潤工社)	16	SAINI Arun	(FNAL)	110
西島 元	(NIMS)	12, 89	齊藤 一功	(JASTEC)	15
西嶋 茂宏	(福井工大)	91, 92	齋藤 光希	(岩手大)	66
西村 新	(NIFS)	86 , 87	齊藤 剛	(明星大)	43
西尾 太一郎	(東京理科大)	99	坂井 直道	(芝浦工大)	93
仁田 旦三	(東大)	8	榊原 里樹	(北大)	49
野口 聡	(北大)	18, 19, 44, 49, 61	坂本 久樹	(SuperPower)	1
野地 英樹	(都城高専)	56	坂本 織江	(上智大)	62
野島 涉平	(東北大)	94	坂本 泰明	(鉄道総研)	41
野元 一宏	(三菱電機)	110	櫻井 響介	(東北大)	46
野村 直希	(福井工大)	91, 92	櫻井 嶺太	(量研機構)	83
野村 新一	(明治大)	8	佐藤 瑛空	(筑波大)	50, 51
沼澤 健則	(NIMS)	50, 51	佐藤 宏大	(都立大)	75
O			佐藤 稔	(量研機構)	83
尾花 哲浩	(NIFS)	60 , 113	佐藤 亮太	(千葉大)	85
小畑 慶人	(三菱電機)	62, 63, 64, 65	関根 芸妍	(足利大)	93
小笠原 敦	(三菱電機)	62 , 65, 63	関根 智一	(ICUS)	92

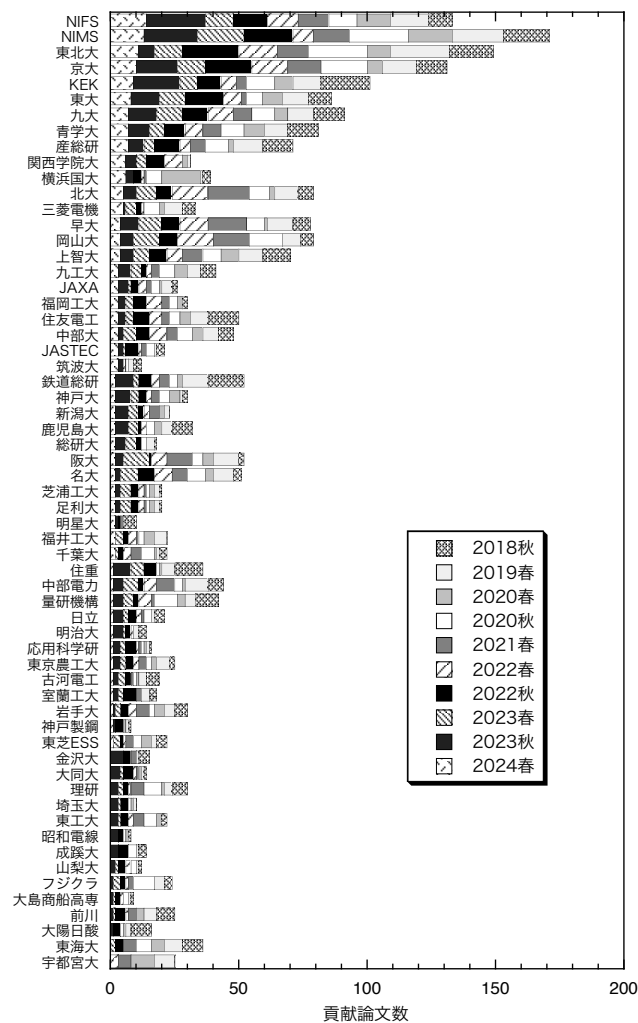
関戸 真矢	(福岡工大)	104	田中 雅光	(名大)	100
世良 真也	(九大)	13, 20	田中 佑斗	(九大)	20
SERGEY Lee	(Faraday Factory Japan)	21	谷 直俊	(JASTEC)	38, 52
志賀 雅亘	(九大)	40	TARANTINI Chiara (Florida 州立大)		27
重政 茉於	(京大)	4	手嶋 雄太	(古河電工)	1
島崎 毅	(産総研)	33	寺西 亮	(九大)	24
下山 淳一	(青学大)	12, 67, 68, 72, 73, 74, 88	寺尾 悠	(東大)	57, 59, 62, 63, 78
新富 孝和	(KEK)	8, 11	寺島 昭男	(KEK)	16
白井 毅	(筑波大)	50, 51	富田 優	(鉄道総研)	14, 41
白井 康之	(京大)	45, 62, 63	殿岡 俊	(三菱電機)	62, 63, 65
白石 智也	(岡山大)	36	豊岡 寛大	(九工大)	22
白土 裕一朗	(福岡工大)	104	土屋 勝彦	(量研機構)	83
正 孝幸	(テラル)	95	土屋 清澄	(KEK)	16
曾我部 友輔	(京大)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	土屋 美月	(海洋大)	70
SOLYAK Nikolay(FNAL)		110	土屋 雄司	(東北大)	25, 46, 111
SU Yi-Feng	(Florida 州立大)	27	津田 理	(東北大)	9, 48, 85, 94, 96
須田 公平	(静岡大)	30			
末本 祐也	(東ソー)	88			U
未安 彰	(山口大)	109	内田 公	(NIMS)	50, 51
菅野 未知央	(KEK)	89	植田 浩史	(岡山大)	18, 19, 36, 61
摺木 惇人	(鹿児島大)	113	上垣 柊季	(京大)	3, 4, 5
鈴木 大心	(東北大)	96	植木 竜一	(KEK)	80
鈴木 賢次	(九大)	13	薄井 勝富	(量研機構)	83
鈴木 孝明	(日立)	89	宇都 達郎	(東芝エネルギーシステムズ)	111
			宇都宮 銀汰	(福岡工大)	106
		T			
田淵 竜也	(九大)	10			V
立木 実	(NIMS)	24, 104, 106	VALIKOV Roman (Faraday Factory Japan)		20
田口 秀之	(JAXA)	62			
田橋 正浩	(中部大)	46			W
太子周	(九大)	40	脇 耕一郎	(鉄道総研)	41
高田 卓	(NIFS)	32	王 旭東	(KEK)	16
高田 芳宏	(山本電機製作所)	35, 90	渡部 智則	(中部電力)	18
高橋 明	(京大)	2	韋 添允	(阪大)	39
高橋 慶	(山口大)	109	呉 澤宇	(九大)	13, 20, 26
高橋 圭太	(海洋大)	70			
高橋 弘紀	(東北大)	111			X
高畑 一也	(NIFS)	31	許 航	(明治大)	8
武田 実	(神戸大)	35, 90			
武田 泰明	(NIMS)	12, 54			Y
竹内 亮郎	(明星大)	43	矢花 空宙	(明星大)	115
武輪 裕之	(東芝エネルギーシステムズ)	111	谷貝 剛	(上智大)	11, 81, 82
田村 仁	(NIFS)	84	矢島 健大	(明治大)	8
田村 怜於	(東北大)	14	山田 智宏	(KEK)	53, 110
田邊 豪	(潤工社)	16	山口 作太郎	(中部大)	34, 37
田中 秀樹	(日立)	89	山口 柊平	(九工大)	55

山本 明	(KEK)	110	吉田 尚貴	(鹿児島大)	58
山本 春海	(鉄道総研)	14	吉田 良行	(産総研)	107, 108
山本 優	(日本超電導応用開発)	80	吉田 隆	(名大)	76
山本 実奈	(中部大)	37	吉原 健彦	(住友電工)	72, 73, 74
山中 陸央	(横浜国大)	102	吉川 信行	(横浜国大)	97, 98, 99, 101, 102, 103
山梨 祐希	(横浜国大)	97, 99, 102, 103	吉村 創	(東北大)	96
山下 葵	(岡山大)	18	結城 和久	(山東理大)	29
柳 長門	(NIFS)	47, 84, 114	結城 光平	(山東理大)	29
安川 直輝	(東京理科大)	99			
余語 覚文	(阪大)	39			Z
横山 和哉	(足利大)	71, 93	ZAMPA Alexandre (東北大)		111
横山 彰一	(JASTEC)	15, 38, 52	朱 紹偉	(同済大)	42
吉田 潤	(住重)	112			

所属別発表論文数の推移



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 107 回 2024 年度春季

低温工学・超電導学会研究発表会

講演概要集

2024 年 5 月 23 日 発行

発行／公益社団法人 低温工学・超電導学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-12-8 パレドール本郷 302 号

電話 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573

E-mail: cssj@csj.or.jp URL: <http://csj.or.jp/>

銀行口座 みずほ銀行 本郷支店

普通 1012705 公益社団法人 低温工学・超電導学会

郵便振替口座 00140-8-192430 公益社団法人 低温工学・超電導学会

印刷／松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438 番地

未知の極低温技術への挑戦



*Offering Manufacturing High-end Cryogenic Equipment
on Your Request in addition to Regular Items*



極低温技術を通じて未来社会の創出に貢献します



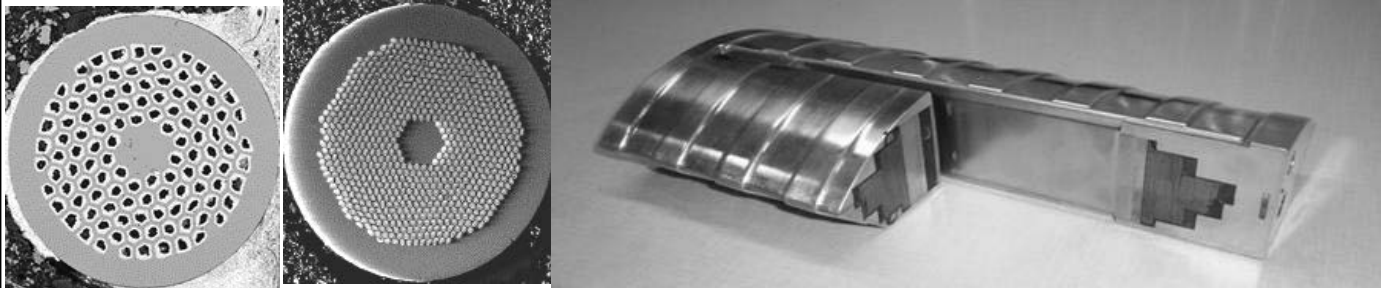
株式会社ジェック東理社

〒350-0833 埼玉県川越市芳野台2丁目8番52号

URL: <https://www.jecctorisha.co.jp> Email: U35915@jecctorisha.co.jp



米国Hyper Tech社は、アプリケーションや研究用途に合わせ様々なMgB2線をご提供いたします。またMgB2 マルチフィラメント線を使用したソレノイドコイルを設計及び製作も可能です。NbTi、Nb3Sn、MgB2、BSCCO、(RE)BCO超電導体を用いた伝導冷却超電導コイルもご提供できます。



DC & AC MgB2 wire

High Jc Nb3Sn wire

MgB2 rotor coil for 2 MW high speed, 15000 rpm motor

スターリング式冷凍機



SUNPOWERはGe検出器・IR検出器・電波望遠鏡・人工衛星・国際宇宙ステーション・レーザーダイオード冷却等の最先端研究分野で活躍しています

CryoTel® DS Mini

Dual-Split Mini Cryocooler



米国 SUNPOWER 社は、フリーピストン スターリング技術の世界的リーダーです。信頼性の高い効率的なスターリングエンジン及び冷凍機を製造しています。サンパワーのエンジニアリングサービスは、フリーピストンスターリングエンジンの試作品の設計、開発及び、製造まで対応します。CryoTel®冷凍機は優れた性能、製造精度、品質を持っています。

	分離型	一体型		
	DS Mini	MT	CT	GT
Nominal Lift @77K	1.8W	5W	11W	16W
Nominal Cooler input power	45W	80W	160W	240W
重量	1.2Kg	2.1kg	3.1kg	
最低到達温度	40K			
平均故障時間 (時間)	120,000(goal)	200,000		



日本代理店
仁木工芸株式会社

URL <http://www.nikiglass.co.jp>

東京支社 〒140-0011 東京都品川区東大井5-26-22
大阪営業所 〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島3-18-21

TEL : 03-4218-4700 FAX : 03-4212-3423

TEL : 06-6390-3220 FAX : 06-6390-3221

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 ^{※1} 未満時の保証液化能力 ^{※2} ()内はLN ₂ 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

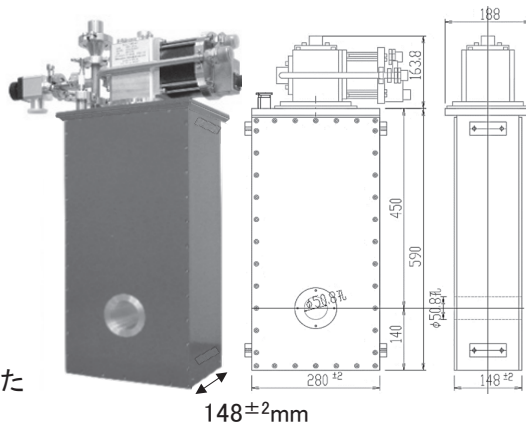
超薄型 無冷媒超電導マグネット

国内初!!

超電導マグネット厚さ148±2mmを実現

無冷媒式超電導マグネットの難点だった超電導マグネットの厚さを国内最薄の148mmまで短縮し、超電導マグネット表面から磁場中心までわずか74mmを実現いたしました

- ▶最大発生磁界±6T
- ▶室温ボア径 φ50.8mm
- ▶国内外最高クラスの高均一度
 - 均一度: ±0.1% / 10mm立方体
 - 超薄型でも高均一度を維持し、使い勝手の良さを追求しました
- ▶設置方向は立て置き、横置きどちらでも可能

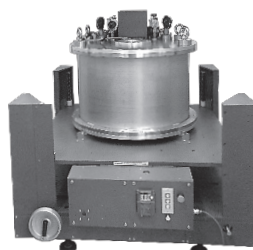


無冷媒超電導マグネットシリーズ

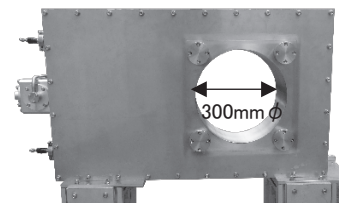
超電導マグネットメーカーとして設計から製作まですべて自社で実施しています
使用用途に応じた超電導マグネットの製造が可能です。ご要望をお聞かせください

超電導マグネット製作実績

コイルタイプ	発生磁界	室温ボア径
ソレノイドコイル	5T	50.8mm
		200mm
		300mm
	6T	50.8mm
		70mm
7.5T	70mm	
10T	70mm	
ヘルムホルツコイル	5T	50mm
	7T	50mm

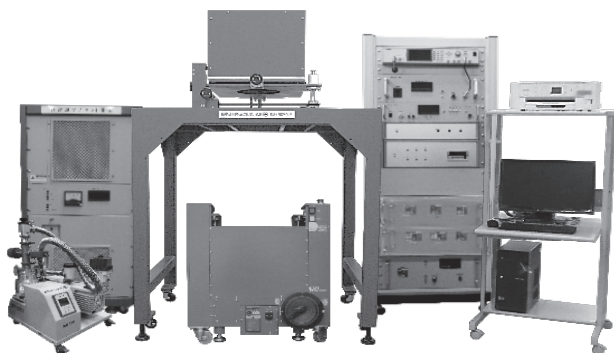


▲10Tソレノイドコイル
オプション: GP-IB制御装置付き台車



▲5Tソレノイドコイル
室温ボア径 300mm φ

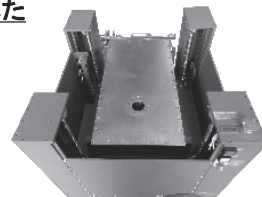
無冷媒超電導マグネット式高感度VSMシステム



—システム構成例—

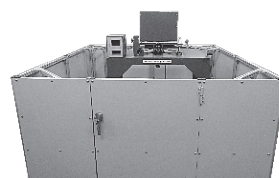
◀ 6Tソレノイドコイル型 超電導マグネット式VSM

**超電導マグネットメーカーの強みを活かし
測定可能サンプルサイズを国内外最大の
10mmcubeまで可能としました**



▲超電導マグネット部

超電導マグネット式VSMの主な特徴	
サンプルサイズ	国内外最大サイズの10mmcubeまで測定可能。極小サイズも測定可能
測定時間	最大6Tフループ測定 15分。発生磁界に応じて変化します
測定温度	室温、室温～900°C、液体窒素温度～200°C
ラインナップ	5T～10T ソレノイドコイル式超電導マグネット型VSM 5T～7T ヘルムホルツコイル式超電導マグネット型VSM
委託測定	社内常設 10Tソレノイドコイル式超電導マグネット型VSMにて 委託測定可能。サンプルサイズ 30mmcube(常設機のみ)まで対応



▲シールド製作も可能



株式会社玉川製作所

〒982-0014 宮城県仙台市太白区大野田三丁目10-19

TEL: 022-247-5671 FAX: 022-249-3648

E-mail: sales@tamakawa.co.jp

URL: http://www.tamakawa.co.jp

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

- IONOS 250

その他必要に応じて御対応いたします。

□その他 取扱品目

ヘリウムガス精製器、各種クライオスタート、各種真空配管
ヘリウムガス回収用機器（高圧圧縮機、長尺容器、ガスバッグ）

リンデ社ヘリウム液化装置国内販売代理店

 **小池酸素工業株式会社**
KOIKE SAN SO 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

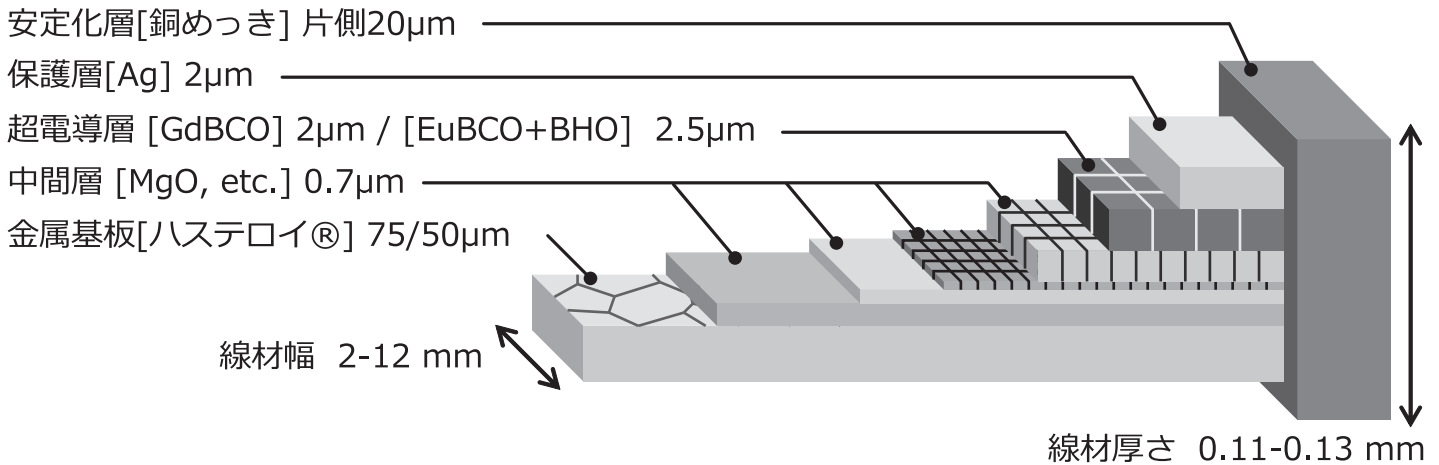
Fujikura レアース系高温超電導線材

■ 特徴

- マグネット応用に適した高機械強度・高臨界電流特性
- フジクラ独自の主要製造技術 IBAD・PLD法
- 人工ピン導入により低温・高磁場での磁場中臨界電流特性を向上



■ 線材構造



■ 製品ラインナップ

型番	線材幅 [mm]	線材厚さ [mm]	金属基板 [μ m]	安定化層 [μ m]	臨界電流 [A]		備考
					77K, S.F.	20K, 5T ^{*3}	
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	≥ 165	368	人工ピンなし
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	≥ 550	1,104	人工ピンなし
FYSC-S12 ^{*1}	12	0.08	75	—	≥ 550	—	人工ピンなし
FESC-SCH02	2	0.11	75	20	≥ 30	320	人工ピンなし
FESC-SCH03	3	0.11	50	20	≥ 63	480	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	≥ 85	640	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	≥ 250	1,280	人工ピン ^{*2}
FESC-S12 ^{*1}	12	0.06	50	—	≥ 250	—	人工ピン ^{*2}

*1 銀保護層線材は12mm幅のみ提供しております。

*2 人工ピン仕様は低温・高磁場におけるマグネットアプリケーション用途でのご使用を推奨しております。

*3 $I_c@20K, 5T$ は参考値であり、実際の性能を保証するものではありません。

株式会社フジクラ 超電導事業推進室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440

TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472

E-mail ask-sc@jp.fujikura.com

HELIALは進化しています。

忘れてませんか？ AIR LIQUIDEを

フランスの物理学者ジョルジュ・クロードが液体空気の製造に成功し、彼と実業家ポール・デロルムによりエア・リキードが設立されたのが1902年。5年後の1907年には早くも日本での酸素製造事業がスタートして、さまざまな極低温の経験と最先端技術ノウハウを集結して高品質と高効率の製品を生み出しています。



HELIAL	SL	ML	LL	XL
Capacity range with LN2	20 L/h to 85 L/h	100 L/h to 175L /h	200 L/h to 400 L/h	500 L/h to 600 L/h
Comp motor rated power	< 90 kW	< 160 kW	< 315 kW	< 500k W

自社（AIR LIQUIDE社）製のタービンを採用しています。
 また、液化効率を引き出すためにエア・リキード社は最先端技術を基に研究開発を重ねています。

薄肉溶接パイプ

- ・薄肉成形ベローズ用パイプ
- ・キャンドモータ用キャン
- ・ロールツーロール用スリーブ
- ・真空断熱容器用筒
- ・パンチングスクリーン円筒溶接



薄肉レアメタル溶接

- ・タンタルるつぼ
- ・ニッケル電鍍スタンパ溶接
- ・チタン製医療器具
- ・クライオスタット銅部品溶接
- ・コバルト端子溶接
- ・18Kゴールド触媒部品



精密溶接を極め、より高度な

ご要望にお応えします

溶接加工はもとより治具製作から切断工程、検査までの一貫体制により、高品質を実現するとともに、ご要望に応じた品目・サイズに1個から柔軟に対応します。



耐真空溶接

- ・NW、ICFなど各種真空フランジ組立溶接
- ・MRI、NMRなど極低温装置のトランスファーチューブ溶接組立
- ・VCRなど真空継手溶接
- ・ウエハー搬送口ポット部品
- ・粒子線治療装置内の真空配管溶接
- ・加速器ベローズチャンバー溶接
- ・真空断熱容器の組立溶接
- ・水冷ヒートシンク溶接



株式会社 ニッセイ機工

〒658-0044 兵庫県神戸市東灘区御影塚町 3-6-10
TEL : 078-851-6680 FAX : 078-851-6681

URL : <https://nkw.co.jp/>
E-mail : info@nkw.co.jp



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

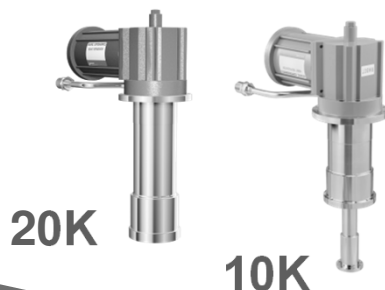


UHE15

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。



TRG-305DSモデル



TRG-340/375DSモデル

型式	TRG-375DS	TRG-340DS	TRG-305DS	TRG-305PT
再凝縮能力 ※1)	18 liter/day	10 liter/day	1 liter/day (NMR向け)	
電源	3相 200V, 50/60 Hz			
電力	13.2/15 kW, 50/60 Hz		6.6 / 7.5 kW @50/60 Hz	6.6 / 7.5 kW @50/60 Hz
冷却水	14-20L/min (28°C) ※2)		空冷式	7-10L/min (28°C)
メンテナンスサイクル				
制御ユニット	10,000時間/毎		-	
冷凍機	10,000時間/毎			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) 空冷タイプも対応可能です。

※3) 仕様は予告なく変更する場合がございます。

無冷媒希釈冷凍機

- 自動制御によりどなたでも簡単に100mK以下の極低温を得られます。
- 低振動・電気ノイズ絶縁状態での運転により、低温センサの冷却に最適です。(セパレートタイプ)



TS-3H100-HFモデル
(GM冷凍機タイプ)

TS-3H100-SPモデル

型式	TS-3H100-HF	TS-3H100-SP (セパレートタイプ)
冷凍能力	20μW@100mK	10μW@100mK
温度安定性	100mK ±25μK	
試料空間(標準)※1)	Φ50×100 mm	
電源	3相 200V, 50/60 Hz	
電力	7.8/9 kW @50/60 Hz	9/10.2 kW @50/60 Hz
冷却水※2)	7-10L/min(28°C)	
メンテナンスサイクル	制御ユニット：10,000時間/毎 ※3) 冷凍機：20,000時間/毎 圧縮機：30,000時間/毎	

※1) 同軸線の施工も可能です

※2) 空冷タイプも対応可能です。

※3) 仕様は予告なく変更する場合がございます。

大陽日酸株式会社

工業ガスユニット ガス営業部 営業開発部 機器・工事営業課
TEL:03-5788-8305 (代)

— お問い合わせ —