



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.108 (2024)

# 第108回 2024年度秋季

## 低温工学・超電導学会 研究発表会 講演概要集

2024年  
11月25日, 26日, 27日

いわて県民情報交流センター(アイーナ)+WEB  
〒020-0045 岩手県盛岡市盛岡駅西通1-7-1

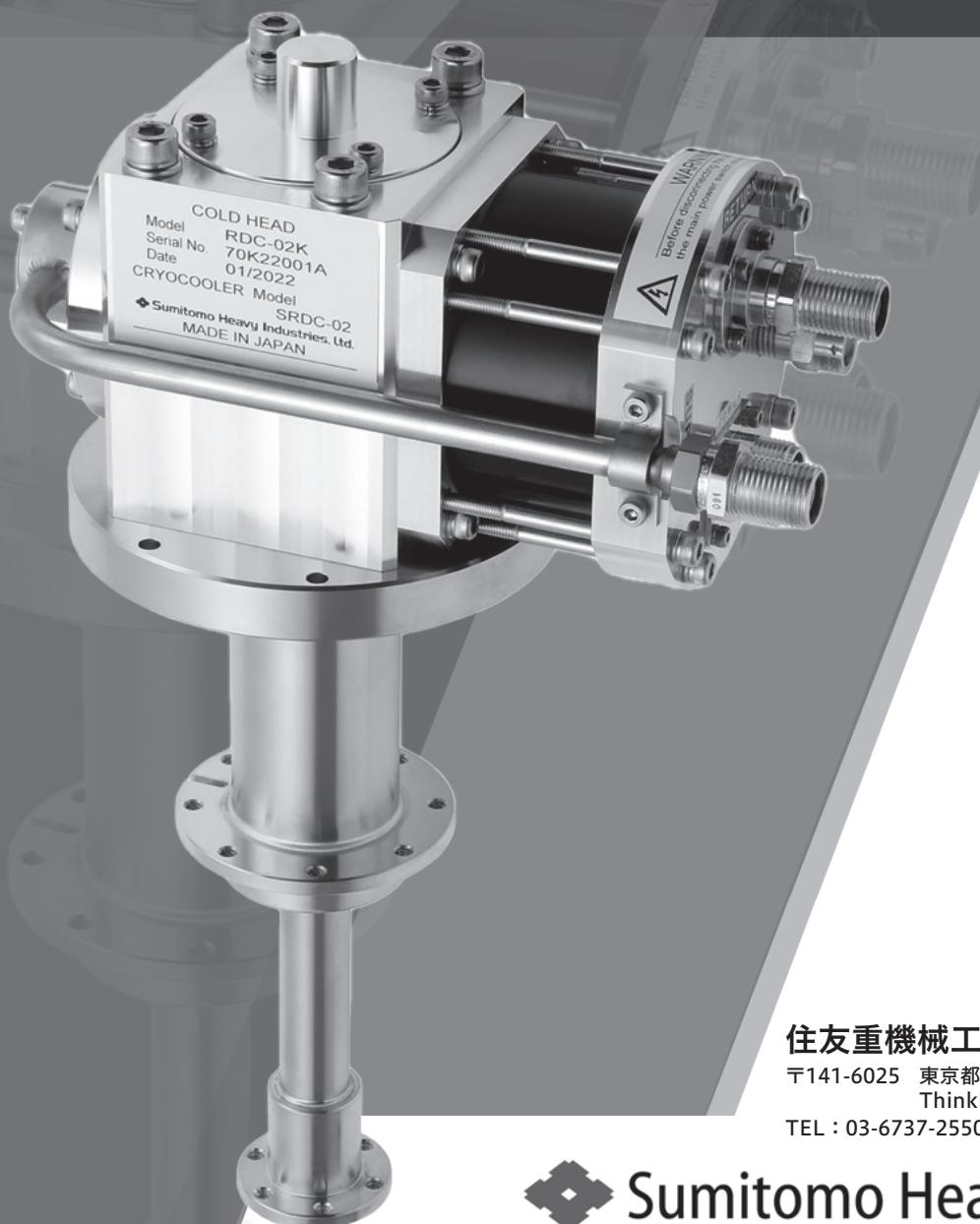
主催 公益社団法人 低温工学・超電導学会  
〒113-0033 文京区本郷 6-12-8 パレドール本郷302号  
TEL 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573  
協賛 応用物理学会、日本物理学会、日本機械学会、  
日本冷凍空調学会、電気学会、日本表面真空学会  
後援 盛岡観光コンベンション協会

108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年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会

2024年11月25日(月)~11月27日(水)

会場：いわて県民情報交流センター（アイーナ）+WEB

所在地：〒020-0045 岩手県盛岡市盛岡駅西通1-7-1

参加費：お支払いはクレジットカード、コンビニ決済、また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（10月28日(月)~11月11日(月)17時）

正会員\*10,000円、賛助会員\*\*11,000円、協賛等団体会員個人\*\*\*15,000円、学生4,000円、

非会員（一般）20,000円、非会員（学生）5,000円

期限後申込（11月11日(月)17時以後）

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

非会員（一般）24,000円、非会員（学生）6,000円

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

学生2,500円、非会員（一般）7,000円、非会員（学生）2,500円）

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

\*\* 賛助会員価格の適用は、秋季春季合わせて1口2名まで。適用期間が、会員年度と半期ずれますことご注意ください。例えば2024年度会員の場合は、2024年秋季から2025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：11月26日(火) 18:30 - 20:30

会場：ビアベースベアレン盛岡駅前

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：盛岡観光コンベンション協会

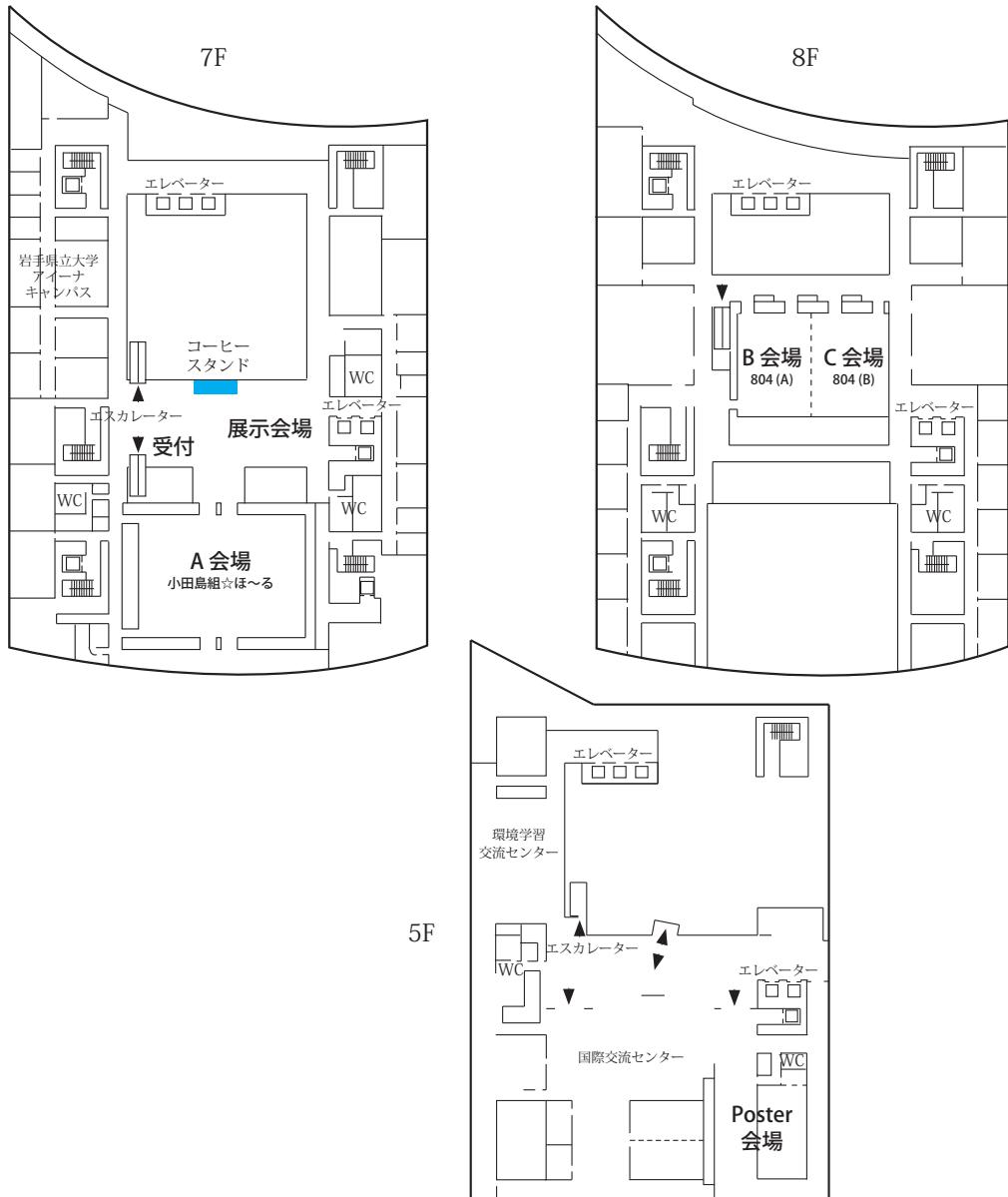
協賛：応用物理学会、電気学会、日本物理学会、日本機械学会、日本表面真空学会、日本冷凍空調学会

交通案内：東北自動車道盛岡ICから車で8分

JR盛岡駅から徒歩4分



会場配置図：いわて県民情報交流センター（アイーナ）



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/2024a/>

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

※口頭発表は、すべて WEB 会場にて視聴できます。

ポスター講演：ポスター発表の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 130 cm、高さ 185 cm 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ませんので、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（11月 25 日、11月 26 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 年度秋季低温工学・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
		受付 10:00 ~	
	10:45 - 12:00 クエンチ保護技術 p. 1	10:30 - 12:00 金属系超電導体 p. 16	10:45 - 12:00 計測・沸騰現象 p. 33
		昼食	
11 月 25 日 (月)	ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 14:00 (A 会場)		
		ポスターセッション I 14:00 - 15:15 (Poster 会場)	
		超電導材料探索・ハイブリッド線材 p. 49, 教育・セミナー p. 51, 交流損失評価・解析 p. 54, REBCO 臨界電流特性 p. 59, 超電導線材機械特性 p. 65	
	15:30 - 16:45 SCSC ケーブル (1) p. 5	15:30 - 16:15 金属系線材・導体特性評価 p. 22	15:30 - 16:15 磁気冷凍機 p. 38
	17:00 - 18:30 SCSC ケーブル (2) p. 10	16:30 - 17:15 ピンニング・臨界電流 p. 25	16:30 - 17:30 宇宙・超低温 p. 41
		17:30 - 18:45 REBCO 線材作製・加工 p. 28	17:45 - 18:45 低温技術 p. 45
	9:45 - 10:45 無線電力伝送 p. 69	9:30 - 10:45 バルク作製 (1)・バルク応用 p. 73	9:30 - 10:45 液体水素 p. 84
	ポスター手短紹介 11:00 - 11:30 (A 会場)		
	山藤 馨先生追悼セッション 11:30 - 12:00 (A 会場)		11:30 - 13:00 賛助会員と学生の交流会
	昼食		
11 月 26 日 (火)	ポスターセッション II 13:00 - 14:15 (Poster 会場)		
	バルク作製 (2) p. 98, HTS コイル p. 101, 送電ケーブル p. 105, 回転機 (1)・磁気軸受 (1) p. 109, 冷却システム p. 115		
	会員アンケートの最終結果報告 14:30 - 14:45 (A 会場)		
	特別セッション 14:45 - 15:15 (A 会場) 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」(第一部)		
	特別セッション 15:30 - 18:00 (A 会場) 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」(第二部)	15:30 - 17:00 薄膜・バルク作製 (3) p. 78	15:30 - 16:45 デバイス応用 (1) p. 89
			17:00 - 18:00 デバイス応用 (2) p. 94
	懇親会 (ビアベースベアレン盛岡駅前) 18:30 - 20:30		
11 月 27 日 (水)	9:15 - 10:30 高エネルギー加速器 p. 118	9:15 - 10:30 電力システム・磁気軸受 (2) p. 134	9:15 - 10:30 臨界電流特性 p. 147
	特別セッション 10:45 - 11:45 (A 会場) 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」(第三部)		
	昼食		
	12:45 - 14:15 核融合 p. 122	12:45 - 13:15 磁気分離 p. 139	12:45 - 14:00 REBCO・MgB <sub>2</sub> 機械・I <sub>c</sub> 特性 p. 152
	14:30 - 16:00 医療用加速器 p. 128	13:30 - 15:00 回転機 (2) p. 141	14:15 - 15:00 超電導・低抵抗接合 p. 157

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

2024年度秋季低温工学・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 藤代 博之 岩手大学  
委員 内藤 智之 岩手大学

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 井上 昌睦 学会運営担当 / 福岡工業大学  
副委員長 横山 和哉 プログラム編成担当 / 足利大学  
委員 伴野 信哉 企業展示担当 / 物質・材料研究機構  
岩井 貞憲 京都フュージョニアーリング株式会社  
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

オブザーバー

古瀬 充穂 産業技術総合研究所

■山藤 騒先生追悼セッション

日時：11月 26日（火）11:30～12:00

場所：A会場

■特別セッション「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」

(第一部) 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) の最新状況」

林 和彦（低温工学・超電導学会 専務理事）

日時：11月 26日（火）14:45～15:15

場所：A会場

(第二部) 「加速する高温超電導小型核融合開発：203x 年商法化を目指す世界の現状」

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

日時：11月 26日（火）15:30～18:00

場所：A会場

講演予定：

- |                |           |    |
|----------------|-----------|----|
| 1. 調査研究会の趣旨と挨拶 | 山田 穣（中部大） | 5分 |
| 2. 最新技術動向      |           |    |

ASC2024 から報告

HTS 導体・マグネットの開発状況 柳 長門（核融合研） 10分

NI コイルの課題と展望 淡路 智（東北大） 10分

米国追加情報 野口 聰（北大） 10分

外部講演 各 30 分

A. 「Helical Fusion (HF) 社における取り組み現状と計画」（仮題）

宮澤 順一（HF 社共同創業者 代表取締役 CTO）

B. 「Development plans for HTS Cable-in-Conduit Conductors for fusion at ENEA」

Luigi Muzzi (ENEA, Frascati Research Centre, Superconductivity Laboratory)

- |              |            |
|--------------|------------|
| 3. 総合討論 司会進行 | 植田 浩史（岡山大） |
|--------------|------------|

(第三部) 「NMR システムの市場動向と強磁場化のニーズ」

オーガナイザー：横山 彰一（JASTEC）

日時：11月 27日（水）10:45～11:45

場所：A会場

プログラム：

- |                                 |
|---------------------------------|
| 1. 「NMR システムの技術開発と超電導マグネットの重要性」 |
|---------------------------------|

蜂谷 健一（日本電子株式会社）

- |                         |
|-------------------------|
| 2. 「NMR 用超電導マグネットの技術動向」 |
|-------------------------|

小湊 健太郎（ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社）

11月25日（月）  
受付開始 10:00～

※一般講演の発表時間はすべて10分、質疑応答4分です。  
(なお、発表資料の切替や登壇等の時間を考慮し、+1分  
確保してプログラムを編成しています。)  
プログラム番号の例  
1A-a05：1日目A会場の午前5番目  
1B-p05：1日目B会場の午後5番目  
※タイトル、著者、所属は講演申し込み時のものです。

11月25日（月） A会場 10:45 - 18:30

クエンチ保護技術 10:45 - 12:00 座長：石山敦士

- 1A-a01 CNNを用いた無絶縁REBCOパンケーキコイルの電圧予測器におけるノイズ耐性の評価-----1  
間藤昂允, 野口聰（北大）
- 1A-a02 金属絶縁体材料を塗布したREBCOのテープ間コンタクト抵抗測定 -----2  
櫻井響介, 土屋雄司（東北大）；田橋正浩, 後藤英雄（中部大）；岡田達典（九工大）；  
淡路智（東北大）
- 1A-a03 導電性樹脂で含浸した高温超電導コイルのターン間抵抗制御-----3  
阿部格, 宇都達郎, 西本守, 大谷安見, 小柳圭, 戸坂泰造, 伊藤智庸（東芝ESS）；  
江口朋子（東芝）
- 1A-a04 (取り消し)
- 1A-a05 非線形抵抗器「バリスタ」を組み込んだクエンチ保護回路の安定性評価法 -----4  
西将汰（神戸大）；鈴木研人, 中本建志, 菅野未知央, 萩津透（KEK）；山崎祐司（神戸大）

昼食 12:00 - 13:00

SCSCケーブル(1) 15:30 - 16:45 座長：東川甲平

- 1A-p01 SCSCケーブルの研究開発の進捗（2024年秋）(1)：概要-----5  
雨宮尚之, 曽我部友輔（京大）；高山茂貴, 野中利昭（東芝ESS）；福井聰（新潟大）；  
原英和（古河電工）；坂本久樹（SuperPower）
- 1A-p02 SCSCケーブルの研究開発の進捗（2024年秋）(2)：  
多種多様なSCSCケーブルの交流損失測定結果に基づいたヒステリシス損失の実験則の導出-----6  
重政茉於, 曽我部友輔, 雨宮尚之（京大）
- 1A-p03 SCSCケーブルの研究開発の進捗（2024年秋）(3)：  
1本の超伝導線で構成したスパイラル導体で巻いたコイルの交流損失測定-----7  
上垣柊季, 曽我部友輔（京大）；福井聰（新潟大）；雨宮尚之（京大）
- 1A-p04 SCSCケーブルの研究開発の進捗（2024年秋）(4)：  
スパイラル導体で巻かれたコイルを対象とする数値電磁界解析モデルに関する検討-----8  
林遼一, 曽我部友輔, 雨宮尚之（京大）
- 1A-p05 SCSCケーブルの研究開発の進捗（2024年秋）(5)：  
多層SCSCケーブルにおける動的抵抗の数値電磁界解析による評価-----9  
曾我部友輔, 本多尚, 雨宮尚之（京大）

休憩 16:45 - 17:00

SCSCケーブル(2) 17:00 - 18:30 座長：宮崎寛史

- 1A-p06 SCSCケーブルの研究開発の進捗（2024年秋）(6)：ケーブル端末の特性評価 -----10  
坂本溪太, 高山茂貴, 阿部格, 宇都達郎, 戸坂泰造, 下之園勉, 野中利昭（東芝ESS）；

福井 聰 (新潟大) ; 藤野 正人, 高橋 明, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
1A-p07 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2024 年秋) (7) :	
磁化法によるマルチフィラメント高温超伝導線の臨界電流測定-----	11
高山 茂貴, 坂本 溪太, 阿部 格, 宇都 達郎, 戸坂 泰造, 下之園 勉, 野中 利昭 (東芝 ESS) ;	
福井 聰 (新潟大), 藤野 正人, 高橋 明, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
1A-p08 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2024 年秋) (8) :	
マルチフィラメント化有無 REBCO 線材の $I_c$ - ひずみ特性-----	12
菅野 未知央 (KEK) ; 壇内 政哉 (京大) ; 萩津 透 (KEK) ; 雨宮 尚之 (京大)	
1A-p09 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2024 年秋) (9) : SCSC ケーブルによる電機子巻線と	
ハルバッハ永久磁石界磁を組合せた高温超伝導同期電動機の電磁設計の検討-----	13
福井 聰, 坂下 涼介, 小川 純 (新潟大) ; 曽我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
1A-p10 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2024 年秋) (10) :	
スパイラル導体における臨界電流劣化箇所が保護特性に与える影響-----	14
西川 泰生, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
1A-p11 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2024 年秋) (11) :	
2 層スパイラル導体の層間電流分流現象に関する実験的研究-----	15
許 光輝, 小山 淳也, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	

11月 25 日 (月) B 会場 10:30 - 18:45

金属系超電導体 10:30 - 12:00 座長: 菅沼 良光

1B-a01 高圧力下で放電プラズマ焼結した $PbMo_6S_8$ 超伝導バルク体の臨界電流特性-----	16
金木 大祐, 内藤 智之 (岩手大)	
1B-a02 浸透法で作製した緻密な $Nb_3Sn$ バルクの捕捉磁場特性-----	17
田島 複久, 内藤 智之 (岩手大)	
1B-a03 $Nb/Sn-Cu-Ti$ 拡散反応において $Zn$ および $Mg$ 添加が $Nb_3Sn$ 層形成に与える影響-----	18
浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大) ; 諸永 拓, 伴野 信哉 (NIMS)	
1B-a04 $Cu \cdot Zn$ 共添加 $Sn$ 合金芯の作製とそれを用いた $Nb_3Sn$ 層形成-----	19
伴野 信哉 (NIMS) ; 浅井 航希, 谷貝 �剛 (上智大)	
1B-a05 $Nb_3Sn$ 層形成を促進する $Ti$ 添加場所に関する検討-----	20
伴野 信哉 (NIMS) ; 浅井 航希, 谷貝 剛 (上智大)	
1B-a06 YBCO 粉末を用いた $NbTi$ ハイブリッド線材の開発-----	21
松岡 杏祐, 吉澤 侑希, 大橋 克也, 小黒 英俊 (東海大) ; 淡路 智 (東北大)	

昼食 12:00 - 13:00

金属系線材・導体特性評価 15:30 - 16:15 座長: 菅野 未知央

1B-p01 HIP 処理された内部マトリックス補強 $Nb_3Sn$ 線材の機械強度特性-----	22
菅沼 良光 (NIFS) ; 小黒 英俊 (東海大) ; 能登 裕之 (NIFS) ; 矢田 裕貴 (総研大) ;	
谷口 博康 (大阪合金) ; 淡路 智 (東北大) ; 菊池 章弘 (NIMS)	
1B-p02 コンジット形状に起因する撲り乱れがケーブル・イン・コンジット導体における電流分布に及ぼす影響-----	23
矢崎 一斗, 阿部 吉三, 小林 宏奏, 宮城 大輔 (千葉大) ; 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大)	
1B-p03 SuperKEKB 用超伝導六極電磁石システムの開発-----	
～補正コイル用 $Nb_3Al$ 超伝導ケーブルの機械的曲げ歪に対する特性評価～-----	24
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)	

休憩 16:15 - 16:30

## ピンニング・臨界電流 16:30 - 17:15 座長：土屋 雄司

1B-p04	REBCO 薄膜線材の磁束ピンニング特性の TDGL 解析	25
	松本要, 挖出朋也, 吉田 隆 (名大)	
1B-p05	ツイストした RE 系コート線材の縦磁界特性の評価	26
	濱本 拓郎, 相廣祐介, 濱田凌輔, 木内 勝 (九工大)	
1B-p06	酸化物原料を用いた FF-MOD 法 Y123 薄膜における共添加効果	27
	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)	

休憩 17:15 - 17:30

## REBCO 線材作製・加工 17:30 - 18:45 座長：松本要

1B-p07	RE123 薄膜作製における FF-MOD 法原料溶液中の金属濃度調整	28
	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)	
1B-p08	IBAD 上フッ素フリー MOD REBCO 線材の作製	29
	吉原健彦, 本田元気, 稲垣充, 伊東智寛, 永石竜起, 小林慎一 (住友電工); 蟹江澄志 (東北大); 岡田達典 (九工大); 淡路智 (東北大)	
1B-p09	データ駆動型アプローチによる PLD 法による REBCO 線材製造における多層成膜時の下地 REBCO 層の成膜条件の影響に関する検討	30
	木須隆暢, 呉澤宇, 世良真也, 東川甲平 (九大); VALIKOV Roman, 中村美幸, PETRYKIN Valery, LEE Sergey (FFJ)	
1B-p10	融点制御した $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ を用いた超伝導丸線材の開発	31
	新井樹, 小黒英俊 (東海大); 淡路智 (東北大)	
1B-p11	RE 系超電導線材の細線化加工の進捗	32
	町敬人, 廣瀬陽代, 和泉輝郎 (産総研)	

## 11月25日(月) C会場 10:45 - 18:45

### 計測・沸騰現象 10:45 - 12:00 座長：濱口真司

1C-a01	表面反射光と液中透過光を利用した ToF カメラでの低温液面測定	33
	安田宏大, 岡本洋 (秋田県立大)	
1C-a02	$MgB_2$ 超伝導コイル冷却モデル装置—オシレーションの抑制を目指したサーモサイフォンの改造	34
	楳田康博, 新富孝和 (KEK); 谷貝剛, 猪俣涼 (上智大); 駒込敏弘 (前川); 平野直樹 (NIFS); 濱島高太郎 (東北大)	
1C-a03	切込部を持つ樹脂コーティングによる液体窒素の沸騰伝熱促進	35
	高畠一也 (NIFS)	
1C-a04	縦溝およびフィンを加工した配管による液体水素沸騰熱伝達の促進	36
	堀伊吹, 吹場活佳, 須田公平, 田部宏太郎 (静岡大); 小林弘明, 坂本勇樹 (JAXA)	
1C-a05	積層材料における有効熱伝導率の研究	37
	平山貴士, 小池祐太郎, 鶴留武尚 (住重)	

昼食 12:00 - 13:00

## 磁気冷凍機 15:30 - 16:15 座長：吉田茂

1C-p01	新規水素磁気冷凍用希土類酸化物磁性材料の磁気熱量効果	38
	松本宏一, 堀江征生, 長谷川博紀, 堤隼汰 (金沢大); 石川和洋, 山崎崇平 (京セラ); 齊藤明子, 北澤英明, 沼澤健則 (NIMS)	
1C-p02	静止型磁気冷凍機のための磁気結合した複数の超伝導磁石から構成される変動磁場システムの検討	39

松永 信之介 (岐阜高専) ; 夏目 恭平, 神谷 宏治 (NIMS)	
1C-p03 磁気遮蔽方式磁気冷凍システムに関する基礎研究 2	40
平野 直樹, 小野寺 優太 (NIFS) ; 逢坂 昇汰, 岡村 哲至 (東工大) ; 富田 優 (鉄道総研)	

休憩 16:15 - 16:30

**宇宙・超低温 16:30 - 17:30 座長：中納 晓洋**

1C-p04 2段スターリング型パルス管冷凍機の開発	
－ 設計計算プログラムと性能試験結果との比較評価検討－	41
平塚 善勝, 大塚 清見, 恒松 正二, 安田 仰, 金尾 憲一 (住重) ; 楠崎 勝弘 (新居浜高専)	
1C-p05 宇宙用希釈冷凍機	42
朱 紹偉 (同済大)	
1C-p06 サブ mK 連続発生冷凍機の実現	43
戸田 亮, 福山 寛 (東大)	
1C-p07 残留抵抗率比測定による熱交換器材料の超低温熱伝導率の評価	44
中川 久司 (産総研) ; 野末 龍弘, 斎藤 政通 (アルバック・クライオ)	

休憩 17:30 - 17:45

**低温技術 17:45 - 18:45 座長：高畠 一也**

1C-p08 大型高温超伝導導体試験用温度可変インサートの性能	45
濱口 真司, 小野寺 優太, 三戸 利行 (NIFS)	
1C-p09 断熱二重管の表面材料と熱輸送	46
山口 作太郎, 神田 昌枝, IVANOV Yury, 渡邊 裕文 (中部大) ; 松本 一昭, 坪田 修一郎 (栃木カネカ) ; 原田 泰宏 (JFE スチール)	
1C-p10 CO <sub>2</sub> の液体窒素温度における固化を使った真空断熱層の減圧	47
高田 卓, 濱口 真司, 鷹見 重幸 (NIFS) ; 野澤 正和 (秋田高専)	
1C-p11 超電導・極低温機器の安全と信頼性のアンケート実施に向けたアンケート WG の活動 2 (限定アンケート実施結果)	48
池内 正充 (前川) ; 伊藤 聰 (JASTEC) ; 鷺山 玲子, 淀野 修一郎 (東大) ; 横田 康博 (KEK) ; 平井 寛一 (大陽日酸) ; 三戸 利行 (NIFS)	

**ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 14:00 (A会場)**

**11月 25日 (月) ポスターセッション I Poster会場 14:00 - 15:15**

**超電導材料探索・ハイブリッド線材 14:00 - 15:15 座長：菊池 章弘**

1P-p01 キラルな結晶構造を有する TaGe <sub>2</sub> の Al 置換による超伝導発現	49
小泉 太護, 木佐貫 晋吾, 門田 健太, 高阪 勇輔, 宍戸 寛明, 戸川 欣彦 (大阪公立大)	
1P-p02 MgB <sub>2</sub> ハイブリッド超伝導線材の作製方法の最適化	50
吉澤 侑希, 松岡 杏祐, 大橋 克也, 小黒 英俊 (東海大) ; 淡路 智 (東北大)	

**教育・セミナー 14:00 - 15:15 座長：長崎 陽**

1P-p03 2024 年度低温技術夏合宿 77K 小型冷凍機を作ろう - ロータリー弁方式 -	51
田上 裕之 (NIFS) ; 灰田 悠希 (東大) ; 谷口 貴紀 (東北大)	
1P-p04 2024 年度低温技術夏合宿 77K 小型冷凍機を作ろう － 電磁バルブ式パルスチューブ冷凍機の製作と試験 -	52
田中 芳実 (住重) ; 井出 郁央 (名大) ; 高 雲飛 (京大)	

1P-p05 「水素・超電導経済研究会」活動報告 -----	53
<u>和久田毅</u> (日立) ; 安藤竜弥 (日立ハイテク) ; 来栖努 (東芝 ESS) ; 野元一宏, 小笠原敦 (三菱電機)	

#### 交流損失評価・解析 14:00 - 15:15 座長:馬渡康徳

1P-p06 外部磁界印加用マグネット内の磁場分布対称性の改善によるピックアップコイル法による 交流損失測定システムの高感度化 -----	54
<u>佐藤麻哉</u> , 近森希望, 川畑秋馬 (鹿児島大)	
1P-p07 切断接合線材を用いた REBCO コイルの交流損失低減評価 -----	55
<u>大石遼真</u> , 姫野雄輝, 末永隆笑, 西田雄詞, 柏木涼太, 吉田幸市, 佐々滉太, 宮崎寛史, 岩熊成卓 (九大) ; 和泉輝郎, 廣瀬陽代, 町敬人 (産総研) ; 中村美幸 (FFJ)	
1P-p08 積層枚数と印加磁場角度を変化させた際の Face-to-Face Double Stack 構造による REBCO 線材の交流損失評価 -----	56
<u>姫野雄輝</u> , 大石遼真, 西田雄詞, 末永隆笑, 柏木涼太, 佐々滉太, 吉田幸一, 宮崎寛史, 岩熊成卓 (九大), 中村美幸 (FFJ)	
1P-p09 非正弦波・高周波電流通電時の Bi-2223 サンプルコイルの交流損失特性の評価 -----	57
<u>濱田大夢</u> , 近森希望, 川畑秋馬 (鹿児島大)	
1P-p10 極細 Nb <sub>3</sub> Sn および Nb <sub>3</sub> Al 超電導線材の交流通電損失に関する数値解析 -----	58
<u>錦織敏志</u> , 宇都宮航生, 尾上凜空, 井上良太, 植田浩史, 金錫範 (岡山大) ; 菊池章弘, 飯嶋安男 (NIMS)	

#### REBCO 臨界電流特性 14:00 - 15:15 座長:小黒英俊

1P-p11 Zr をパターンニングした基板上に形成した REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 薄膜の臨界電流特性 (2) -----	59
<u>関戸真矢</u> , 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)	
1P-p12 極細 Zr をパターンニングした基板上に形成した YBCO 薄膜の臨界電流特性 -----	60
<u>白土裕一朗</u> , 関戸真矢, 高城凜, 野村涼太 (福岡工大) ; 松本明善, 立木実 (NIMS) ; 井上昌睦 (福岡工大)	
1P-p13 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 (2) -----	61
<u>隱崎遼河</u> , 本田翔也, 松尾祐斗, 宮本望夢, 井上昌睦 (福岡工大)	
1P-p14 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 (2) -----	62
<u>宇都宮銀汰</u> (福岡工大) ; 大井修一, 立木実, 松本明善 (NIMS) ; 井上昌睦 (福岡工大)	
1P-p15 機械学習を導入したリール式磁気顕微鏡観察による REBCO 線材の局所不均一性のプロセス依存性の 比較と汎用的評価手法への展開 -----	63
<u>吳澤宇</u> , 東川甲平, 木須隆暢 (九大)	
1P-p16 パルス電流を用いた REBCO 線材における I <sub>c</sub> の磁場印加角度依存性測定手法の開発 -----	64
<u>土屋雄司</u> (東北大) ; SOURCE Hugo, BADEL Arnaud (Grenoble Alpes 大) ; 水野謙一郎 (MTL) ; 小濱芳允 (東大) ; 淡路智 (東北大)	

#### 超電導線材機械特性 14:00 - 15:15 座長:井上良太

1P-p17 REBCO coated conductor の臨界電流の磁場角度依存性に与える曲げひずみ印加効果 -----	65
<u>大川祐平</u> , 永井颯介, 栗原佑太, 小黒英俊 (東海大) ; 淡路智 (東北大)	
1P-p18 REBCO 切断面の断面観察による破損形態の考察 -----	66
<u>佐藤倅希</u> (大同大) ; 長村光造 (応用科学研) ; 町屋修太郎 (大同大) ; ZHANG Yifei (SuperPower)	
1P-p19 BSCCO 線材のフィラメントの引張および圧縮破壊挙動 -----	67
<u>町屋修太郎</u> (大同大) ; 長村光造, 白木原蒼 (応用科学研)	
1P-p20 Nb <sub>3</sub> Sn の横方向圧縮における有限要素法の解析 -----	68
<u>片山翔太</u> , 町屋修太郎 (大同大) ; 菅野未知央 (KEK) ; 淡路智 (東北大)	

11月26日(火) A会場 9:45 - 18:00

無線電力伝送 9:45 - 10:45 座長: 谷貝剛

2A-a01	非接触給電システムにおける高温超電導コイルの運転中断線への対策 - 断線時におけるコイルの電流分布特性 -	69
	薦田 遥暉, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大)	
2A-a02	非接触給電システムにおける高温超電導コイルの運転中断線への対策 - 断線時における非接触給電システムの電力伝送特性 -	70
	井上 良太, 薦田 遥暉, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大)	
2A-a03	EV用超電導非接触給電システムにおけるフェライト板の配置による電力伝送効率	71
	岩本 貴大, 塩崎 琉登, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大)	
2A-a04	高Q値超伝導共振器を用いた長距離電界共振結合方式無線電力伝送	72
	高橋 俊一, 作間 啓太, 關谷 尚人 (山梨大)	

山藤 騒先生追悼セッション 11:30 - 12:00 (A会場)

昼食 12:00 - 13:00

11月26日(火) B会場 9:30 - 17:00

バルク作製(1)・バルク応用 9:30 - 10:45 座長: 山本 明保

2B-a01	バルク超電導の研究開発について - 鉄道総研における研究開発の近況 -	73
	富田 優 (鉄道総研)	
2B-a02	造粒粉末を用いて作製したAg-GdBCOバルクの捕捉磁場特性	74
	箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)	
2B-a03	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	75
	遠藤 淳, 元木 貴則, 國本 慧太, 下山 淳一 (青学大)	
2B-a04	軟磁性材料を用いたバルク超伝導体アンジュレータの磁場増強	76
	紀井 俊輝 (理研)	
2B-a05	REBCOバルク磁石のパルス着磁における印加磁場分布が捕捉磁場特性に与える影響	77
	横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)	

昼食 12:00 - 13:00

薄膜・バルク作製(3) 15:30 - 17:00 座長: 赤坂 友幸

2B-p01	様々なRE元素を用いたIBAD基体上FF-MOD法RE123薄膜の作製	78
	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 元氣, 小林 慎一 (住友電工)	
2B-p02	Premix-浸透法で作製したMgB <sub>2</sub> リングバルクによる磁場の捕捉および集束特性	79
	阿部 優太, 内藤 智之 (岩手大)	
2B-p03	MgB <sub>2</sub> バルク作製における酸を用いた不純物低減効果	80
	岩崎 韶, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 末本 祐也, 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー)	
2B-p04	2段階放電プラズマ焼結によるKドープBa122バルクの作製	81
	石渡 翔大, 清水 和花, 水登 伊知郎, NUR RAHMAWATI Ayukaryana (東京農工大); 嶋田 雄介 (九大); 山本 明保 (東京農工大)	
2B-p05	一方向溶融成長(SDMG)法による60mm級REBCOリングバルクの直接育成	82
	元木 貴則, 遠藤 淳, 國本 慧太, 浅古 謙, 松永 直也, 下山 淳一 (青学大)	
2B-p06	強磁場化に向けた積層QMG®リングマグネットの補強方法	83
	森田 充, 中林 正史 (日本製鉄)	

11月26日(火) C会場 9:30 - 18:00

液体水素 9:30 - 10:45 座長: 神谷 宏治

2C-a01	蒸発水素ガスにおけるパラ水素濃度の経時変化に及ぼす貯蔵圧力の影響	84
	岡島 大地, 前川 一真, 藤川 静一, 佐藤 更, 武田 実 (神戸大)	
2C-a02	液体水素の貯蔵・輸送に関する数値シミュレーション	85
	山下 陽也, 前川 一真, 武田 実 (神戸大)	
2C-a03	充填率をパラメータとした横振動時における液体水素の貯蔵・輸送に関する研究	86
	武中 悠一郎, 平本 幸暉, 河江 聖延, 川嶌 秀亮, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実 (神戸大)	
2C-a04	液化水素貯槽の保安距離に関する研究	87
	中納 晓洋, 原 知輝, 小山田 賢治, 岸川 義明, 志賀 優多, 柴野 佑太, 佐野 尊, 竹花 立美 (KHK); 土橋 律, 桑名 一徳 (東京理科大)	
2C-a05	液化水素冷熱を利用した液化ネオン製造の構想	88
	松永 信之介 (岐阜高専); 大屋 正義 (関西学院大); 柳 長門 (NIFS)	

昼食 12:00 - 13:00

デバイス応用(1) 15:30 - 16:45 座長: 日高 瞳夫

2C-p01	バイアス電流下の力学インダクタンスの理論	89
	久保 翔幸 (KEK)	
2C-p02	単一磁束量子回路を用いた拡張性を持つベイジアンネットワークのハードウェア実装	90
	山中 陸央, 吉川 信行, 山梨 裕希 (横浜国大)	
2C-p03	単一磁束量子回路を用いたストカスティック数 $n$ 倍器の設計	91
	浅香 海斗, 吉川 信行, 山梨 裕希 (横浜国大)	
2C-p04	Bi2212 固有ジョセフソン接合からの周波数変調テラヘルツ波放射	92
	掛谷 一弘, 宮本 将志, 杉本 啓太郎, 小林 亮太 (京大); 遠藤 学 (産総研)	
2C-p05	超電導リザバーの著しい精度向上及びピン力と精度との相関の調査	93
	有田 拳, 小田部 莊司, 宇佐美 雄生, 田中 啓文 (九工大); 松野 哲也 (有明高専)	

休憩 16:45 - 17:00

デバイス応用(2) 17:00 - 18:00 座長: 山梨 裕希

2C-p06	HTS-SQUID と差分型検出コイルを用いた高感度交流磁化特性評価システムの開発	94
	倉知 侑希, 佐藤 祐喜, 堀 健司 (同志社大)	
2C-p07	火力発電ボイラーエネルギー伝熱管の健全性評価のための高温超伝導 SQUID ベースの渦流探傷試験技術の開発 — その 1 —	95
	廿日出 好 (近畿大)	
2C-p08	火力発電ボイラーエネルギー伝熱管の健全性評価のための高温超伝導 SQUID ベースの渦流探傷試験技術の開発 — その 2 —	96
	廿日出 好 (近畿大)	
2C-p09	高耐電力超伝導フィルテナの開発	97
	武田 航太郎, 作間 啓太, 關谷 尚人 (山梨大)	

ポスター手短紹介 11:00 - 11:30 (A会場)

11月26日(火) ポスターセッションII Poster会場 13:00 - 14:15

バルク作製(2) 13:00 - 14:15 座長: 紀井 俊輝

2P-p01	大気中で作製した SmBCO 超伝導バルクの捕捉磁場特性	98
--------	------------------------------	----

芦生 龍太郎, 箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)

2P-p02	超電導バルクの機械特性向上に向けた研究-----	99
	<u>赤坂 友幸</u> , 石原 篤, 恩地 太紀, 矢野 俊, 富田 優 (鉄道総研)	
2P-p03	超電導バルクの高性能化に向けた YBCO の核生成・核成長の解明-----	100
	<u>矢野 俊</u> , <u>赤坂 友幸</u> , 富田 優 (鉄道総研)	

#### HTS コイル 13:00 - 14:15 座長:曾我部 友輔

2P-p04	積層無絶縁 REBCO コイルシステムにおける遮蔽電流磁場解析と不整磁場の低減-----	101
	<u>吉藤 夢来</u> , 石山 敦士 (早大); 野口 聰 (北大); 植田 浩史 (岡山大)	
2P-p05	ピックアップコイルを用いた無絶縁 REBCO パンケーキコイル局所劣化の位置推定-----	102
	<u>大石 崇史</u> , 石山 敦士 (早大)	
2P-p06	「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年秋): (その 7) ECR イオン源用無絶縁 REBCO コイルシステムの遮蔽電流磁場解析・評価-----	103
	<u>島田 亜緒</u> , 石山 敦士 (早大); 野口 聰 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 荘 浩謙, 福田 光宏 (阪大); 吉田 潤 (住重)	
2P-p07	鞍型形状を利用した非対称 MRI 用マグネットのコイル配置検討-----	104
	<u>片岡 小春</u> , 朝倉 優哉, 佐田 敦也, 宮崎 寛史 (九大)	

#### 送電ケーブル 13:00 - 14:15 座長:塩原 敬

2P-p08	短絡電流パルス後の HTS ケーブルテープの熱緩和-----	105
	<u>IVANOV Yury</u> , 神田 昌枝 (中部大); 山口 作太郎 (e-Donuts)	
2P-p09	超電導ケーブルの過渡的熱応力・運動に対する数値計算検証-----	106
	<u>山本 春海</u> , 福本 祐介, 富田 優 (鉄道総研)	
2P-p10	超電導き電ケーブルの営業稼働検証 — 超電導送電による営業電車供給 8か月 —	107
	<u>富田 優</u> , 福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 矢野 俊, 山本 春海, 緒方 隆充 (鉄道総研)	
2P-p11	3 次元 T-A 法と H 法による超電導ケーブルの数値解析-----	108
	<u>呂 高泰</u> , 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	

#### 回転機 (1)・磁気軸受 (1) 13:00 - 14:15 座長:大屋 正義

2P-p12	液体水素ポンプ用超電導同期モータの軽量・低損失化に向けた電磁設計-----	109
	<u>河野 亮介</u> , 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)	
2P-p13	REBCO 全超伝導誘導機の二重台形電機子巻線構造の提案および電磁設計-----	110
	<u>津森 将彦</u> , 柏木 涼太, 佐藤 正宗, 末永 恋太郎, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)	
2P-p14	空心超伝導かご形回転子を用いた REBCO 全超伝導誘導モータの回転速度 — トルク特性の実験的評価-----	111
	<u>柏木 涼太</u> , 津森 将彦, 佐藤 正宗, 末永 恋太郎, 宮崎 寛史, 吉田 幸市, 岩熊 成卓 (九大)	
2P-p15	電動航空機推進用全超電導モータにおける希薄ガスを用いた回転子冷却の成立条件の検討-----	112
	<u>山切 紫雲</u> , 大崎 博之, 寺尾 悠 (東大); 岡井 敬一 (JAXA)	
2P-p16	バルク超伝導磁気浮上の矩形補助磁石追加による磁気剛性向上-----	113
	<u>二村 宗男</u> , 石井 貴之, 佐藤 明 (秋田県立大)	
2P-p17	バルク超電導体の捕捉磁場分布からの超電導電流分布及び $J_c$ -B 特性の推定-----	114
	<u>飯田 晃太郎</u> , 奥村 韶月, 蛭海 悠人, 寺尾 悠, 大崎 博之, 秋澤 涼介 (東大); 高久 謙太 (QUP); 松村 知岳 (Kavli IPMU); 富田 優 (鉄道総研)	

#### 冷却システム 13:00 - 14:15 座長:池内 正充

2P-p18	磁気プラズマセイルの推進加速度向上に適した HTS コイルの輻射熱シールド構成-----	115
--------	--	-----

淡路 恰, 津田 理, 長崎 陽 (東北大)

- 2P-p19 能動的蓄冷式磁気冷凍を活用した液体空気貯蔵システムの性能評価 ----- 116  
秋谷 一樹, 石田 政義 (筑波大); 神谷 宏治, 夏目 恒平, 白井 毅, 関 孝峻 (NIMS)
- 2P-p20 MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体短尺試験のための冷凍機冷却銅電流リードの開発 ----- 117  
矢島 健太, 許 航, 野村 新一 (明治大); 仁田 旦三 (東大); 新富 孝和 (KEK);  
平野 直樹, 力石 浩孝 (NIFS)

会員アンケートの最終結果報告 14:30 - 14:45 (A 会場)

特別セッション 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」 14:45 - 15:15 (A 会場)

- (第一部) 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) の最新状況」  
林 和彦 (低温工学・超電導学会 専務理事)

特別セッション 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」 15:30 - 18:00 (A 会場)

(第二部) 「加速する高温超電導小型核融合開発: 203x 年商用化を目指す世界の現状」

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 穣 (中部大) 5 分

2. 最新技術動向

ASC2024 から報告

HTS 導体・マグネットの開発状況 柳 長門 (核融合研) 10 分

NI コイルの課題と展望 淡路 智 (東北大) 10 分

米国追加情報 野口 聰 (北大) 10 分

外部講演 各 30 分

A. 「Helical Fusion (HF) 社における取り組み現状と計画」 (仮題)

宮澤 順一 (HF 社共同創業者 代表取締役 CTO)

B. 「Development plans for HTS Cable-in-Conduit Conductors for fusion at ENEA」

Luigi Muzzi (ENEA, Frascati Research Centre, Superconductivity Laboratory)

3. 総合討論 司会進行 植田 浩史 (岡山大)

懇親会 (ビアベースペアレン盛岡駅前) 18:30 - 20:30

11月 27 日 (水) A 会場 9:15 - 16:00

高エネルギー加速器 9:15 - 10:30 座長: 村上 陽之

- 3A-a01 LHC 高輝度化アップグレード用超伝導磁石の開発 (20) - 7 m 長実機製造状況と磁石試験結果 ----- 118  
菅野 未知央, 鈴木 研人, 中本 建志, 池本 由希子, 岡田 尚起, 岡田 竜太郎, 萩津 透, 川又 弘史,  
高橋 直人, 田中 賢一, 寺島 昭男 (KEK); 木戸 修一, 柳澤 正樹, 田原 大夢 (日立);  
西 将汰 (神戸大); 木村 誠宏 (東大); 市原 直 (フューザック・テクノロジーズ);  
PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)
- 3A-a02 LHC 高輝度化アップグレード用超伝導磁石の開発 (21)  
- CERN における実証機コールドマスの冷却励磁試験 ----- 119  
鈴木 研人, 菅野 未知央, 中本 建志, 池本 由希子, 岡田 尚起, 萩津 透, 川又 弘史, 寺島 昭男 (KEK);  
木村 誠宏 (東大); 市原 直 (フューザック・テクノロジーズ); WILLERING Gerard,  
FISCARELLI Lucio, PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)
- 3A-a03 SuperKEK アップグレード用 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導 4 極電磁石の開発 - Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導 4 極電磁石開発概要 ----- 120  
有本 靖, 青木 和之, 増澤 美佳, 中村 衆, 萩津 透, 大内 徳人, 大木 俊征, 鈴木 研人, 飛山 真理,  
植木 竜一, 王 旭東 (KEK); AMBROSIO Giorgio, GOURLAY Stephen, KASHIKHIN Vadim,

KASHIKHIN Vladimir, MARINOLI Vittorio, STOYNEV Stoyan, VELEV Gueorgui, XU Xingchen (Fermi Lab.) ; MUN Ka Kei, 杉本昌弘, 中尾健吾, 谷口諒, 原英和 (古河電工)	
3A-a04 加速器用 HTS マグネットの開発 (12) – 4.2 K 磁場中での REBCO 丸型ケーブルの臨界電流特性-----	121
王旭東, 土屋清澄, 寺島昭男 (KEK) ; 田邊豪 (潤工社) ; 菊池章弘 (NIMS)	
3A-a05 (取り消し)	

休憩 10:30 - 10:45

**特別セッション 「Superconductivity Global Alliance (ScGA) と関連技術開発動向」 10:45 - 11:45 (A 会場)**

(第三部) 「NMR システムの市場動向と強磁場化のニーズ」

オーガナイザー：横山彰一 (JASTEC)

プログラム：

1. 「NMR システムの技術開発と超電導マグネットの重要性」

蜂谷健一 (日本電子株式会社)

2. 「NMR 用超電導マグネットの技術動向」

小湊健太郎 (ジャパンスーパー・コンダクタ・テクノロジー株式会社)

昼食 11:45 - 12:45

**核融合 12:45 - 14:15 座長：王旭東**

3A-p01 JT-60SA 超電導コイルの現場絶縁補強手法の開発 -----	122
村上陽之, 山本聰, 宇野淳也, 土屋勝彦, 園田翔梧, 濱田一弥 (量研機構)	
3A-p02 JT-60SA ポロイダル磁場コイルのクエンチ検出器のローパスフィルタによる クエンチ検出電圧への影響-----	123
園田翔梧, 村上陽之, 薄井勝富, 畠山昭一, 濱田一弥 (量研機構)	
3A-p03 クエンチ時に NI REBCO TF マグネットが受ける不平衡な電磁力の調査 -----	124
榎原里樹 (北大) ; 石山敦士 (早大) ; 野口聰 (北大)	
3A-p04 核融合マグネットに適用される低融点金属含浸単純積層 REBCO テープの インダクタンス変化由来の誘導電圧の考察-----	125
成嶋吉朗, 小野寺優太, 濱口真司, 柳長門, 力石浩孝, 馬場智澄 (NIFS) ; 宮澤順一, 後藤拓也 (ヘリカルフュージョン)	
3A-p05 REBCO テープ線を集合させた大電流容量導体の新しい健全性診断方法の開発 2 ~ 実験的検証 ~-----	126
永田秀輝, 玉利優斗, 川越明史 (鹿児島大) ; 平野直樹 (NIFS)	
3A-p06 異方性導電率を用いた REBCO 積層大型導体のヒステリシス損失と結合損失の数値解析-----	127
摺木惇人, 川越明史 (鹿児島大) ; 尾花哲浩 (NIFS)	

休憩 14:15 - 14:30

**医療用加速器 14:30 - 16:00 座長：園田翔梧**

3A-p07 「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年秋) : (その 1) 全体概要 -----	128
石山敦士 (早大) ; 野口聰 (北大) ; 植田浩史 (岡山大) ; 福田光宏 (阪大) ; 吉田潤 (住重) ; 渡部智則 (中部電力)	
3A-p08 「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発 (2024 年秋) : (その 2) 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの励磁特性解析-----	129
野口聰 (北大) ; 折原菜月, 石山敦士 (早大) ; 植田浩史 (岡山大)	

3A-p09	「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発（2024 年秋）： (その 3) 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの励磁特性評価-----	130
	折原 菜月, 石山 敦士 (早大); 野口 聰 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則 (中部電力)	
3A-p10	「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発（2024 年秋）： (その 4) 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの応力特性解析-----	131
	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 聰 (北大); 渡部 智則 (中部電力); 石山 敦士 (早大)	
3A-p11	「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発（2024 年秋）： (その 5) 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの常伝導転移-----	132
	石山 敦士 (早大); 野口 聰 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則 (中部電力)	
3A-p12	「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発（2024 年秋）： (その 6) スケルトン・サイクロトロン用セクターコイルの設計最適化-----	133
	山下 葵, 廣田 悠力, 南前 俊介, 井上 良太, 金 錫範, 植田 浩史 (岡山大); 野口 聰 (北大); 荘 浩謙, 福田 光宏 (阪大)	

11月 27 日 (水) B 会場 9:15 - 15:00

電力システム・磁気軸受 (2) 9:30 - 10:30 座長：津田 理

3B-a01	EV の急速充電実現する液体水素冷却 MgB <sub>2</sub> 昇圧 DCDC コンバータのヘリウム温度運転-----	134
	谷貝 剛 (上智大); 横田 康博, 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS); 濱島 高太郎 (東北大)	
3B-a02	REBCO テープ線を積層した大電流容量導体の交流通電時熱暴走電流-----	135
	玉利 優斗, 永田 秀輝, 川越 明史 (鹿児島大); 尾花 哲浩 (NIFS)	
3B-a03	SMES ケーブルの大電流容量化とシステム構成に関する検討-----	136
	東川 甲平, 宮崎 智也, 田渕 竜也, 浅野 将輝, 諸井 翔, 木須 隆暢 (九大); 塩原 敬, 佐藤 迪夫 (SWCC); MUYEEN S. M. (カタール大)	
3B-a04	超電導バルク磁石の磁気浮上と小型冷凍機を使った非接触攪拌の検討-----	137
	岡 徹雄 (芝浦工大); 関根 芸妍, 菊地 紘生, 青木 正智, 手呂内 拓人, 横山 和哉 (足利大); 坂井 直道 (芝浦工大); 加藤 好一 (佐竹マルチミクス); 逸見 智和 (サーマルブロック)	
3B-a05	磁化方向の異なるリング状永久磁石と積層超電導リングを用いた超電導磁気軸受の電磁力特性に関する考察-----	138
	寺尾 悠, 淵野 修一郎 (東大); 大屋 正義 (関西学院大)	

昼食 11:45 - 12:45

磁気分離 12:45 - 13:15 座長：内藤 智之

3B-p01	常磁性流体を用いた淘汰管磁気分離装置の検討-----	139
	三島 史人, 野村 直希, 西嶋 茂宏 (福井工大)	
3B-p02	BWR 中のクラッド処理に対する磁気分離法の応用の可能性-----	140
	西嶋 茂宏, 野村 直希, 三島 史人 (福井工大); 関根 智一 (ICUS)	

休憩 13:15 - 13:30

回転機 (2) 13:30 - 15:00 座長：福井 聰

3B-p03	高温超電導三相電機子巻線の非線形抵抗に伴う不平衡電気特性に関する一考察-----	141
	中村 武恒 (京大)	
3B-p04	新しいかご形巻線構造を有する高温超電導誘導同期モータの回転特性評価-----	142
	REN Mengyi, 中村 武恒 (京大)	

3B-p05	機械的測定法を用いた回転磁界下における $MgB_2$ コイルの交流損失測定-----	143
	奥村 駿月, 大久保 洋希, 寺尾 悠, 淵野 修一郎, 大崎 博之 (東大)	
3B-p06	空芯型 REBCO 誘導電動機に用いる回転子のトルク特性評価 -----	144
	安藤 総一郎, 中川 心平, 吉田 尚貴, 川越 明史 (鹿児島大); 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)	
3B-p07	高温超電導集合導体の低周波交流誘導通電試験に関する基礎検討 -----	145
	大屋 正義, 中西 啓太, 嶋田 健, 大淵 匠真 (関西学院大); 今川 信作 (NIFS)	
3B-p08	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 2 -----	146
	吉田 尚貴, 安藤 総一郎, 中川 心平, 川越 明史 (鹿児島大); 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)	

11月27日(水) C会場 9:15 - 15:00

臨界電流特性 9:15 - 10:30 座長: 金沢 新哲

3C-a01	ステップを有する超伝導線材の接合における有限要素法を用いた通電特性の評価 -----	147
	今泉 圭佑, 張 宇威, 小田部 莊司 (九工大); 赤坂 友幸, 富田 優 (鉄道総研)	
3C-a02	マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流 IV -----	148
	毛利 誠一, 小田部 莊司 (九工大); 馬渡 康徳 (産総研)	
3C-a03	磁束クリープ・フロー モデルを用いた RE 系コート線材の縦磁場下の臨界電流特性の評価 -----	149
	洗明銳, 木内 勝 (九工大)	
3C-a04	銀複合 Bi2223 厚膜の作製 -----	150
	大久保 龍一, 山口 章, 公平 龍之介, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)	
3C-a05	伝導冷却下における極細 $Nb_3Sn$ および $Nb_3Al$ 超伝導線材の臨界電流と交流通電損失特性 -----	151
	尾上 凜空, 錦織 敏志, 宇都宮 航生, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大); 菊池 章宏, 飯嶋 安男 (NIMS)	

昼食 11:45 - 12:45

REBCO・ $MgB_2$  機械・ $I_c$  特性 12:45 - 14:00 座長: 岡田 達典

3C-p01	REBCO coated conductor の超伝導層の破壊を考慮した臨界電流のひずみ依存性モデル-----	152
	青木 康佑, 小黒 英俊, 久保田 猛, 小倉 健太, 松下 玄 (東海大)	
3C-p02	パルス通電法を用いた REBCO 線材の電気機械特性の温度依存性評価-----	153
	久米 俊輔, 土屋 雄司, 淡路 智 (東北大)	
3C-p03	REBCO テープ線材における臨界電流のねじり・引張変形依存性 -----	154
	長村 光造 (応用科学研); CHEGGOUR Najib (SuperPower); 町屋 修太朗 (大同大)	
3C-p04	REBCO 薄膜のナノインデンターによる硬さ評価方法の検討 -----	155
	浦中 智貴 (九大); 立木 実, 松本 明善 (NIMS); 山田 穣 (中部大); 寺西 亮 (九大)	
3C-p05	SUS 補強 $MgB_2$ 線材におけるフィラメント部の残留圧縮ひずみの推定 -----	156
	田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司 (日立)	

休憩 14:00 - 14:15

超電導・低抵抗接合 14:15 - 15:00 座長: 伊藤 悟

3C-p06	REBCO iGS 接合の抵抗および電圧-電流特性 -----	157
	武田 泰明, 西島 元, 北口 仁 (NIMS)	
3C-p07	Cu 安定化層を有する REBCO 線材の半田フリー音波接合プロセスの物理モデルに関する考察と数理モデルの導出 -----	158
	世良 真也, 呉 澤宇 (九大); 鈴木 賢次 (鉄道総研); 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)	



# CNN を用いた無絶縁 REBCO パンケーキコイルの電圧予測器におけるノイズ耐性の評価

## Investigation of Noise Robustness in Voltage Prediction for No-Insulation REBCO Pancake Coils using CNN

間藤 昂允; 野口 聰(北大)  
 MATO Takanobu; NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)  
 E-mail: mato@ist.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

Rare-earth barium copper oxide (REBCO)マグネットの高性能化が進み、小口径 REBCO コイルを使用した 45.5 T 生成[1]や Massachusetts Institute of Technology と Commonwealth Fusion Systems (MIT/CFS)による 2 m 級の D 型コイルによる 20 T 生成[2]などが達成されてきた。これら高磁場生成では、REBCO コイルに適用された無絶縁巻線技術が大きな役割を果たしている。無絶縁 REBCO コイルは層間に絶縁材がなく、REBCO に特性劣化が生じた場合、電流が常電導部を避けるように隣接ターンに分流する。したがって、局所常電導部が生じた際に生じる発熱が小さく、非常に高い熱的安定性を示す。常電導転移したとしても、コイルに焼損が生じる可能性は低い。しかし、MIT/CFS による 20 T 生成実験後に実施した電流遮断試験では、REBCO コイルに焼損の跡が見られた。高エネルギー密度化が進んだことを背景として、無絶縁技術により受動的にマグネットを保護するだけでは十分な保護ができず、能動的にクエンチ(常電導転移)を検出して減磁する必要性が出てきた。検出方法としては、これまで電圧やピックアップコイル、音響信号、光ファイバを利用する方法が登場してきた一方で、無絶縁 REBCO コイルの場合には、常電導転移速度が遅く、コイルの抵抗成分も小さいまま推移するため、クエンチ検知が極めて難しい。

そこで、我々は深層学習手法の一種である convolutional neural network (CNN)に着目して、コイル電圧予測器を開発してきている。数値計算によって生成した絶縁 REBCO コイルのクエンチ時電圧を多数学習させることによって、過去 4 秒間の電圧データから未来 4 秒間の電圧推移を予測できることを示してきた[3]。本研究では無絶縁 REBCO コイルに対して同様の予測器構築を行って、予測性能の調査を行う。また、実環境を想定したノイズに対する頑健性も調査する。

### 2. 学習データ(コイル電圧)および CNN モデル

学習データは径方向分割 partial element equivalent circuit (PEEC) モデルによりシミュレーションを行い収集される。対象は表 1 に示す無絶縁 REBCO コイルであり、熱を投入することで擬似的に常電導転移を再現する。この時、現実での不確定性を考慮して、熱の投入箇所と投入量、接触抵抗率を変更する。解析の結果得られた学習用の 905 波形と検証用の 4 波形を図 1 に示す。熱の投入開始時刻である 5 秒以降、大きく分けて①急激に常電導転移する場合、②ゆっくりと常電導転

移する場合、③一部が常電導転移した後に冷却されて超電導状態に復帰する場合、④電圧が立ち上がりず常電導転移しない場合が確認できる。4 つの検証データはそれぞれのケースに対応している。

得られた学習用波形を図 2 に示す CNN モデルに入力して学習させる。入力は 4 秒間の電圧、教師データとなる出力はその後 4 秒間の電圧である。3 層からなる CNN 層を通して電圧変化量などの特徴量が抽出され、208 次元の高次特徴量をもとに全結合層で波形が復元される。詳細および調査結果については発表当日に報告する。

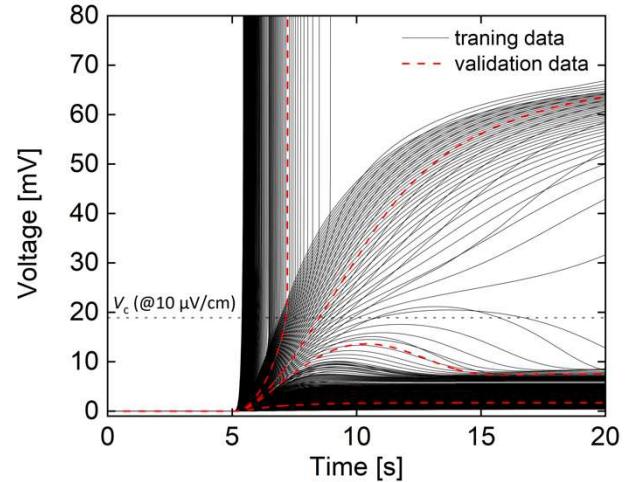


Fig. 1. Several examples of gathered coil voltages.

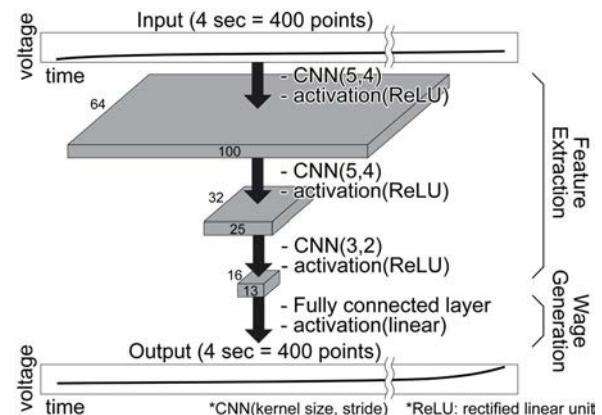


Fig. 2. Structure of CNN-based voltage predictor.

### 参考文献

- [1] S. Hahn, et al., “45.5-Tesla Direct-Current Magnetic Field Generated with A High-Temperature Superconducting Magnet,” *Nature*, vol. 570, pp. 496–499, 2019.
- [2] Z. S. Hartwig, et al., “The SPARC Toroidal Field Model Coil Program,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 2, 2024, Art. no. 0600316.
- [3] T. Mato, Y. Nakai, S. Noguchi, Investigation of Quench Prediction Using Deep Learning for REBCO Pancake Coils, *Abstracts of CSSJ Conference*, vol. 107, p. 40, 2024.

TABLE I  
 COIL SPECIFICATIONS AND OPERATING CONDITIONS

Parameters	Value
Coil inner diameter [m]	50
Coil outer diameter [m]	70
Number of turns [turn]	100
Winding method	no-insulation
Contact resistivity [ $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	10, 30, 100
Heated element (1 ele. = 2 turns)	8th, 16th, 24th
Input heat [W]	7.0-9.0
Operating temperature [K]	4.2 (liquid helium)
Operating current [A]	600
Background field [T]	20

# 金属絶縁体材料を塗布した REBCO のテープ間コンタクト抵抗測定

## Tape-to-tape contact resistance measurements of REBCO coated with metal-insulator transition material

櫻井 韶介, 土屋 雄司, 淡路 智 (東北大); 田橋 正浩, 後藤 英雄 (中部大); 岡田 達典 (九工大)

SAKURAI Kyosuke, TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.);

TAHASHI Masahiro, GOTO Hideo (Chubu Univ.); OKADA Tatsunori (Kyushu Inst. Tech.)

E-mail: sakurai.kyosuke.s6@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材は強磁場超伝導マグネットへの応用が期待される一方で、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)が提案された[1]。しかし、NIコイルには、超伝導線材間を絶縁しないためにターン間電流が生じ、励消磁の際に電流と磁場に遅延が生じるという課題がある。

近年、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コイルでは、超伝導線材間に、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材料を用いる。そのため、通常運転時は絶縁コイルのように、クエンチ時は金属絶縁体材料が金属に相転移し、NIコイルのように振る舞う。

我々は、SIコイルに使用する金属絶縁体材料として、ペロブスカイト型コバルト酸化物 $(Pr_{1-x}Sm_y)_{1-x}Ca_xCo_3$ (PSCCO)に着目した。前回の低温工学・超電導学会では、PSCCO 多結晶バルク体における電気抵抗率の温度依存性を報告した[3]。SIコイルの実現に向けて、PSCCOをREBCO線材上にコーティングすることが課題であった。本研究では、金属絶縁体材料をコーティングするプロセス開発を目的とし、PSCCO多結晶バルク体からスラリーを作製し、REBCO線材上にコーティングした。また、PSCCOがコーティングされたREBCO線材間のコンタクト抵抗 $R_{ct}$ を測定した。

### 2. 実験方法

ゾルゲル法でPSCCO多結晶バルク体を作製し、金属絶縁体転移温度が74 Kとなる組成 $x=0.4, y=0.2$ を選択した[4]。バルク体をアルミナ製の乳棒と乳鉢を使用して1時間粉砕し、PSCCO粉末と溶媒N-メチル-2-ピロリドン(NMP)とをオートミキサで1分間攪拌して、スラリーを作製した。スラリー中のPSCCOの体積分率は17%および51%とした。これらのスラリーを、線幅4 mmのREBCO線材(フジクラ社製、銅めっき)の長手方向に10 mmの範囲に塗布し、大気中100 °Cで1時間乾燥してコーティングした。

Fig. 1に、REBCO線材間のコンタクト抵抗 $R_{ct}$ 測定セットアップの模式図を示す。銅のステージ上に、PSCCOコーティングしたREBCO線材を置き、その上にREBCO線材、銅の板を用いて固定した。PSCCO部には、約10 MPaの圧力を印加した。REBCO線材間の電気抵抗は、1  $\mu$ A-1 mAの電流を印加して直流四端子法で10 K-270 Kの昇温過程で測定した。 $R_{ct}$ は、測定によって得られた電気抵抗とスラリーを塗布した面積との積として算出した。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2に、PSCCO体積分率17%および51%のスラリーを塗布した試料における $R_{ct}$ の温度依存性と、PSCCOバルク体の電気抵抗率 $\rho$ から見積もったコンタクト抵抗 $R_{ct}^{calc}$ の温度依存性を示す。 $R_{ct}^{calc}$ は以下の式で定義した。

$$R_{ct}^{calc} = \rho t \quad (1)$$

$t$ は試料の厚みであり、50  $\mu$ mと仮定した。PSCCO体積分率17%の試料は、10 K-270 Kで $R_{ct}$ が $1 \times 10^9$ - $7 \times 10^4$   $\mu\Omega\text{cm}^2$ まで単調に減少した。一方で、PSCCO体積分率51%の試料の $R_{ct}$ は、10 K-100 K付近で $5 \times 10^7$   $\mu\Omega\text{cm}^2$ でほぼ一定となり、270 Kにおいて $1 \times 10^5$   $\mu\Omega\text{cm}^2$ まで減少した。これらの結果をバルクのデータから計算した $R_{ct}^{calc}$ の温度依存性と比較すると、 $R_{ct}$ と大きく異なる。今後は、PSCCO体積分率を変更し、 $R_{ct}$ をバルク体の値に近づける予定である。

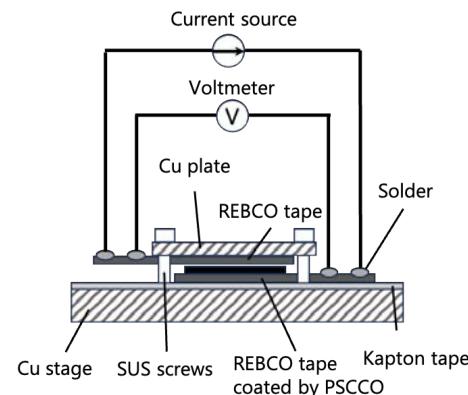


Fig. 1 Schematic diagram of the sample set up.

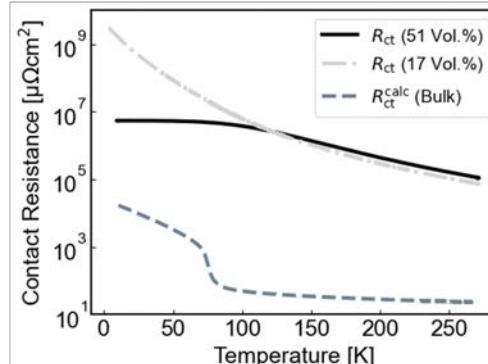


Fig. 2 Temperature dependence of the contact resistance  $R_{ct}$  and the calculated contact resistance  $R_{ct}^{calc}$ .

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP24KJ0385, JP22H01522 の助成を受けたものです。

### 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] K. Sakurai *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, 107 p.46 (2024).
- [4] M. Tahashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 61, 018003 (2022).

## 導電性樹脂で含浸した高温超電導コイルのターン間抵抗制御

### Control of average resistance between turns in HTS coil impregnated with conductive resin

阿部 格, 宇都 達郎, 西本 守, 大谷 安見, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 伊藤 智庸(東芝エネルギーシステムズ); 江口朋子(東芝)  
ABE Itaru, UTO Tatsuro, NISHIMOTO Shu, OHTANI Yasumi, KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo,  
ITO Toshinobu (Toshiba Energy Systems & Solutions); EGUCHI Tomoko (Toshiba)  
E-mail: itaru1.abe@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

高温超電導コイルが熱暴走する前に、導電性樹脂を介してターン間に電流を迂回させる保護技術を開発している<sup>(1)</sup>。ターン間抵抗は、過小である場合には不要に励磁が遅れる課題があり、過大である場合には熱暴走してしまうおそれがあるため、適切な値に制御する必要がある。今回、抵抗率の異なる導電性樹脂にて含浸した REBCO コイルを試作して、液体窒素中で通電評価を行った結果について報告する。

#### 2. 導電性樹脂の試作・評価

エポキシ樹脂、カップリング材、フィラーからなる導電性樹脂について、絶縁性および導電性フィラー総量のうち導電性フィラーの体積比率である導電性フィラー比率をパラメータとして、抵抗率の異なる導電性樹脂を試作した。Fig. 1 に、導電性フィラー比率に対する導電性樹脂の抵抗率を示す。導電性フィラー比率の増加に伴い、抵抗率が減少する傾向が見られ、 $10^{-5} \sim 10^{-2} \Omega \text{m}$  オーダーの範囲で幅広く制御できた。

#### 3. REBCO コイルの試作・評価

試作したコイルの諸元を Table 1 にまとめた。 $6.8 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-2} \Omega \text{m}$  の異なる抵抗率の導電性樹脂を適用した。液体窒素中での通電試験の結果、コイル  $n$  値は 22~26 であり、超電導特性に劣化がないことを確認した。また遮断時の中心磁場の減衰時定数およびインダクタンスの計算値からターン間抵抗を見積ると、 $59 \sim 3.3 \times 10^3 \mu\Omega/\text{turn}$  となり、導電性樹脂の抵抗率によりターン間抵抗を 3 枝オーダーで制御できた。Fig. 2 に導電性樹脂の抵抗率に対するターン間抵抗の計測値および実測値を示す。導電性樹脂の抵抗率が大きい場合に、ターン間抵抗の実測値が計算値に比べ小さい傾向が見られる。線材間の接触による抵抗減少や、線材の Cu メッキ層の抵抗の影響などが計算との乖離の原因と考えられる。

#### 4. 保護動作検証: 過電流通電試験結果(77 K)

液体窒素中にて過電流通電試験を実施した。通電電流、コイル電圧のほか、コイル周方向に流れる電流のモニタのため、ホール素子で中心磁場を測定した。すべてのコイルにて、通電負荷率 100%近くの通電電流値にて電流迂回が始まる挙動が見られた。また、試験前後でコイル  $n$  値の低下がなく、いずれの抵抗率の導電性樹脂を適用してもコイル保護の有効性を確認できた。

#### 参考文献

- (1) H. Miyazaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. No. 4602805.

#### 5. まとめ

体積抵抗率の異なる導電性樹脂にて含浸した REBCO コイルを試作し、液体窒素中で通電評価を行った。導電性樹脂の抵抗率制御により、ターン間抵抗を 3 枝オーダー制御することに成功した。今後は、伝導冷却試験にて高電流密度の条件下での保護動作の検証を進める。

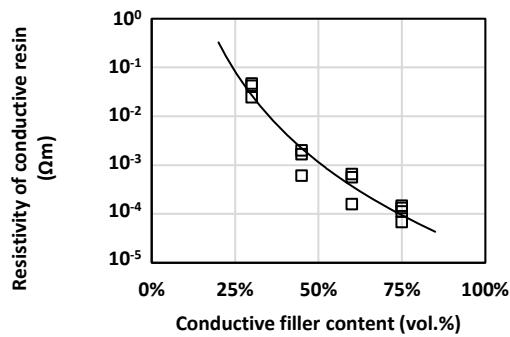


Fig. 1. Resistivity of conductive resin dependency on conductive filler content

Table 1. Specifications of REBCO pancake coils

Coil No.	#1	#2	#3
Tape width(mm)		4.1	
Tape thickness (mm)		0.15	
Tape length (m)		89	
Inner diameter (mm)		100	
Outer diameter (mm)		184	
Number of turns	200		
Coil $I_c$ (A)	88	86	88
n-value	22	26	24
Resistivity of conductive resin ( $\Omega\text{m}$ )	$6.8 \times 10^{-5}$	$7.9 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-2}$
Average resistance between turns ( $\mu\Omega/\text{turn}$ )	$5.9 \times 10^1$	$1.9 \times 10^2$	$3.3 \times 10^3$

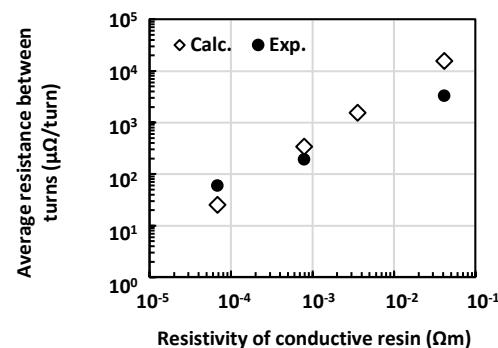


Fig. 2 Comparison of the calculated and experimental values of average resistance between turns dependency on resistivity of conductive resin

# 非線形抵抗器「バリスタ」を組み込んだクエンチ保護回路の安定性評価法

## Stability evaluation of quench protection circuits incorporating “varistor”

西 将汰, 山崎 祐司(神戸大学); 鈴木 研人, 菅野 未知央, 中本 建志, 萩津 透(高エネルギー加速器研究機構)

NISHI Shota, YAMAZAKI Yuji (Kobe University); SUZUKI Kento, SUGANO Michinaka,

NAKAMOTO Tatsushi, OGITSU Toru (KEK)

E-mail: 235s117s@stu.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

非線形抵抗器「バリスタ」は、印加電圧に対して電流値が指数的に増大する抵抗器である。その通電特性からクエンチ保護において、磁石の耐電圧仕様を満たしやすく、低電流部において比較的高抵抗となるため効率よいエネルギー回収を可能にする。以上の理由から、高エネルギー加速器研究機構(KEK)では LHC 高輝度化アップグレード(HL-LHC)に向けた加速器用超伝導磁石 D1 の励磁試験において、クエンチ保護回路に SiC 製バリスタ(Varistor, Metrosil®製)[1]を導入した。本発表ではこれまで KEK 磁石試験で得られた正常にクエンチ保護された際のデータと、シミュレーションで得られたバリスタが異常動作するケースとを比較し、バリスタの安定性評価を行う。そしてこの安定性評価で得られた結果を通して、今後の磁石試験のためのクエンチ保護回路異常発生検知の開発を試みる。

### 2. 本研究の対象

D1 の励磁試験では最大 13.2 kA まで通電し、その時の磁場蓄積エネルギーは 2.4 MJ にも及ぶ[2]。KEK 励磁試験におけるクエンチ保護は Fig. 1 に示すように、クエンチ保護ヒーターと、5 機の並列回路構成のバリスタを組み合わせて行われる[3][4]。バリスタが並列回路構成であることと、バリスタの温度上昇が流入電流に正のフィードバックを及ぼす可能性があることから、バリスタの性能劣化などの何らかの異常が起きたとき、1機(または複数)のバリスタに電流が集中し(偏流)、定格容量を超えて破壊に至り、結果的に磁石もクエンチ保護されず破損するシナリオが考えられる。このため、バリスタの異常の予兆をとらえ、また同時にその原因を特定することが重要である。

### 3. バリスタを用いた保護回路の安定性評価法

本研究では Fig. 1 に示す保護回路をもとにクエンチシミュレーションコードを作成し、まず磁石試験での遮断電流波形を再現することでコードの正当性を確認した。次に Fig. 2 のように、バリスタ電圧やバリスタの非線形性を設計値から意図的に変化させた複数のケースでの遮断電流波形を求め、MIITs を算出した。なおここでは大量のシミュレーションを実行する必要があるため、今回初めてGPUを用いた並列化計算による高速化を図り、その結果従来の計算時間の約 20 分の1程度にまで削減する事に成功した。以上より、磁石の安全性を保証するMIITs閾値及びバリスタの定格電流(3500 A)を超えるようなバリスタの異常モードをさまざまなクエンチ電流に対して調査することが可能となり、そして保護回路安全性評価の基準を定める事が可能となった。本発表では、上記の評価基準の検討結果を述べるとともに、これまでの D1 実機クエンチトレーニングのデータとシミュレーションとの比較から各バリスタの電流分岐の再現性、及び実際の安定性を報告する。

### 4. まとめと今後

今回新たに GPU を活用したクエンチシミュレーションコードを開発し、これにより並列回路で組まれたバリスタの安定性評価基準を求めたとともに、D1 実機トレーニングデータで得ら

れた保護回路の実際の安定性を調査した。さらに今後の磁石試験に向けたバリスタの異常検知法の検討結果を報告する。

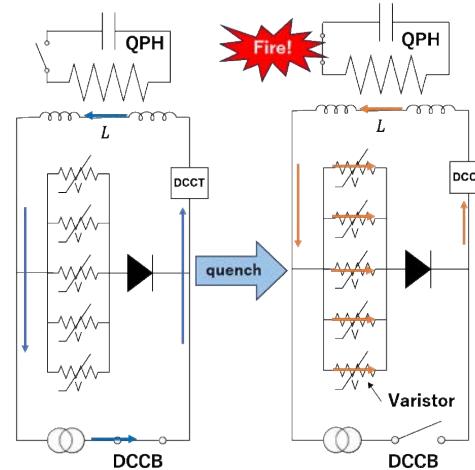


Fig.1 Quench protection circuit

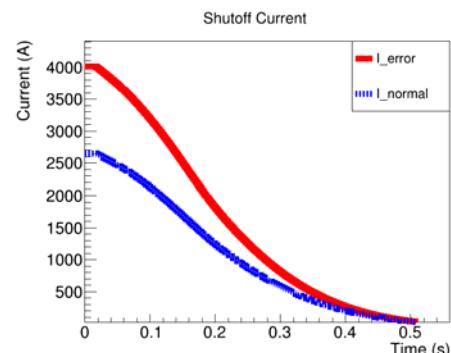


Fig.2 Shutoff Current of one varistor

### 参考文献

1. T. Galvin et al; Experimental Examples of Quench Protection With Varistors to Reduce Quench Voltages and Hot-Spot Peak Temperatures, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, Sep. 2022, 4702505.
2. M. Sugano et al; Test result of a full-scale prototype of beam separation dipole magnet for the high-luminosity LHC upgrade, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, Sep. 2022, 4003407.
3. K. Suzuki et al; Evaluation of the Parallel-Scheme Varistors as Energy-Extraction System for a Test Facility of Superconducting Accelerator Magnet, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, Aug. 2024, 9501407.
4. K. Suzuki et al; Performance of the quench protection heater for the HL-LHC beam separation dipole, IEEE Trans. Appl. Supercond. **30**, Jun. 2020, 4701206.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(1): 概要

## Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (1): Overview

雨宮 尚之, 曽我部 友輔(京大); 高山 茂貴, 野中 利昭(東芝 ESS); 福井 聰(新潟大);  
原 英和(古河電工); 坂本 久樹(SuperPower Inc.)

AMEMIYA Naoyuki, SOGABE Yusuke (Kyoto U.); TAKAYAMA Shigeki, NONAKA Toshiaki (Toshiba);  
FUKUI Satoshi (Niigata U.); HARA Hidekazu (Furukawa Electric); SAKAMOTO Hisaki (SuperPower)  
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

ロバスト性を維持しながらの低交流損失性, 良好的な巻線性, 大電流容量という長所を有した高温超伝導集合導体である SCSC cable (Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable)の研究開発を進めている。本発表では, 研究開発プロジェクトの枠組みと進捗の概要を報告する。

### 2. 研究開発プロジェクトの枠組みと外部連携

2024 年 4 月から, JST 戰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 本格研究に移行し, 京都大学と古河電工・SuperPower に加えて, 東芝エネルギーシステムズと新潟大学を研究開発チームに迎え, 電力会社や自動車メーカーからなるアドバイザリー会議においてニーズの汲み取りと議論を行なながら, 研究開発を進めている。また, 京都大学は, ウェリントン・ピクトラリア大学, 高エネルギー加速器研究機構, ローレンス・バーカー国立研究所, ブルックヘブン国立研究所, 量子科学技術研究開発機構, 航空機機体メーカ, 航空機エンジンメーカとも連携し, 航空機電動化, 加速器応用, フュージョンエネルギー応用も視野に入れて研究開発を展開している。

### 3. 進捗の概要

本格研究への移行後, 研究開発全体の中で, コイル化技術の比重が高まりつつある。これに伴い, 研究開発を進める上でケーブルの安定的な供給が重要となってきているが, 京都大学における長尺ケーブリング装置を用いたケーブル作製も軌道に乗っており, 単長数メートルから二十メートル級のケーブルを継続的に作製している。さらに, ケーブリング装置を改良することにより, ケーブリング速度の向上やケーブリング時の初期作業時間の短縮も進めている。作製したケーブルは, 東芝エネルギーシステムズに供給しているほか, 京都大学において, 交流損失評価のためのコイル作製, 長尺ケーブルの電圧-電流特性やクエンチ特性の評価に用いている。また, 外部連携機関にもケーブルを提供し, その評価を依頼している。本稿を執筆している週にも 24 m のケーブルを海外の連携機関に輸出した。Fig. 1 に, 2024 年夏に作製したケーブルの例を示す。標準的には, ケーブル外側はポリイミドテープにより絶縁している(Fig. 1 左端図参照)。

交流損失に関しては, 多様な短尺ケーブルの磁化損失測定結果から, 運転条件や線材臨界電流特性が変わったときの交流損失特性を予測する理論式の導出を進めている(1A-p02)。本格研究においては, コイルに巻いた状態での交流損失特性の評価が重点的なトピックのひとつであるが, ケーブルに対する横磁界が支配的になるような実用的な多層・多ターンコイルの交流損失測定の前例はない。そこで, まず, 単芯線で構成されたケーブルで Fig. 2 に示すような 6 層・26.6 ターンコイルを巻き, その交流損失を測定した(1A-p03)。Fig. 2 のコイルの作製において, ケーブルの巻線し易さや巻線後の臨界電流の保持についても確認できた。また, 数値電磁界解析に関して, コイルのモデル化手法の検討(1A-p04), 動的抵抗の評価(1A-p05)を行った。

ケーブルを構成する線材になるべく均一に電流を流し込むために適切なケーブル端末の作製が重要であるので, 探索研究の段階でローレンス・バーカー国立研究所から導入した技術をもとに端末の改良と評価を行っている(1A-p06)。

ケーブル作製の前段階で, 線材の臨界電流を確認することが望まれる。TapeStar は, 長尺線材の臨界電流を簡易に評価できるという点で魅力的であるが, 本来, 単芯線を対象とし, 磁化の幅方向分布から臨界電流を求めるもので, 多芯線への適用は想定されていない。そこで, TapeStar の多芯線評価への適用可能性について検討した(1A-p07)。

多芯線においては超伝導層を分割しているために, その機械的特性が単芯線に比べて異なることが予想される。そこで, 多芯線ならびにそれによって構成した SCSC ケーブルの機械的特性評価の第一歩として, 多芯線の線材長さ方向の引張ひずみ特性を評価した(1A-p08)。

また, 応用機器の検討として, SCSC ケーブルによる電機子巻線とハルバッハ永久磁石を組み合せた高温超伝導同期電動機の電磁設計の検討を行っている(1A-p09)。

ロバスト性の観点で単線に比べたケーブルの魅力は線材間, 特に線材が直接接触している隣接層線材間の電流分流である。複数層のスパイラル導体において, 臨界電流劣化箇所が導体の保護特性に与える影響について数値解析によって評価し(1A-p10), また, 実験面では, 直径 5 mm のコアの中にホールセンサを設置しケーブル軸方向の磁界を測定することで, 2 層ケーブルの層間電流分布を測定することに成功した(1A-p11)。

以上, 研究開発の進捗の概要を説明したが, 詳細は本発表に続く連報にて報告する。

### 謝辞

本研究は, JST 戰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 の支援を受けたものである。



Fig. 1 Examples of fabricated cables.

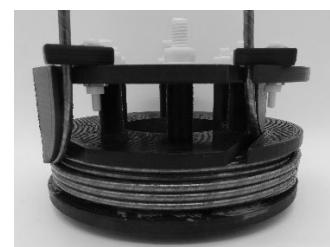


Fig. 2 Coil wound with cable consisting of monofilament coated conductor.

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(2): 多種多様な SCSC ケーブルの交流損失測定結果に基づいたヒステリシス損失の実験則の導出

### Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (2): Derivation of empirical law of hysteresis loss from ac losses measured in various SCSC cables

重政 茉於, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)  
SHIGEMASA Mao, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)  
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

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まわ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, フィラメントの結合を抑制している[1]。我々はこれまでに, 様々な SCSC ケーブルの, 温度 77 K, 磁界振幅 0.1 T 以下における磁化損失を測定した。その結果を用いて, 温度 77 K 以下, 磁界振幅 0.1 T 以上を含めた様々な条件下での磁化損失を評価する手法を検討中である。磁化損失のうちヒステリシス損失に関しては, これまで主に Brandt の理論に基づいた理論値を用いて議論してきたが, 実験値が理論値に一致しない場合があった。そこで, 実験結果に基づいたヒステリシス損失に関する新たな実験則の導出を試みている。本発表では, その進捗状況を報告する。

#### 2. 検討対象の実験試料

これまでに, 長さ 100 mm の SCSC ケーブルを液体窒素で浸漬冷却し, 横方向の交流磁界を印加して, コアに沿ったケーブル単位長さあたりの交流磁界一周期あたりの磁化損失  $Q_m$  を測定してきた。コアの直径  $D_c$  は 2.5~5 mm, 線材幅  $w_t$  は 2~4 mm, フィラメント幅  $w_f$  は 0.2~0.8 mm, フィラメント数  $n_f$  は 3~10, 銅層厚さ  $t_{Cu}$  は 5~40  $\mu\text{m}$ , 層数  $n_L$  は 1~8, 線材の本数  $n_t$  は 1~16 である。コアの素材がヒステリシス損失に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

#### 3. ヒステリシス損失の抽出と Brandt の理論に基づく規格化

交流磁界一周期あたりのヒステリシス損失  $Q_h$  は周波数に依存しない一方, 結合損失  $Q_c$  は周波数  $f$  に依存する。周波数が十分低く, フィラメントがほとんど結合していない場合, 結合損失は周波数に比例するとみなすことができ, 磁化損失  $Q_m$  は次式で表すことができる。

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

複数の周波数で測定された磁化損失  $Q_m$  を式(1)にフィッティングすることで, ヒステリシス損失  $Q_h$  を抽出することができる。今回の発表では, ヒステリシス損失に焦点を絞る。

Brandt と Indenbom の理論によると, モノフィラメント線, および同じ線幅  $w_t$  のマルチフィラメント線に垂直な磁界が印加されたときのヒステリシス損失理論値  $Q_{BL,t}$ ,  $n_f Q_{BL,f}$  は以下の式で示される[2]。

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

$$g(x) = \frac{2}{x} \ln(\cosh x) - \tanh x, \quad H_c = \frac{I_c}{\pi w_t} \quad (3)$$

$I_c$  は線材の臨界電流であり, ヒステリシス損失は臨界電流に依存する。さらに SCSC ケーブルにおいては, 線材の本数  $n_t$ , 線材とコアの角度  $\alpha$ ,  $\beta = 1/\cos \alpha$ , および線材のスパイラル形状を考慮して, ヒステリシス損失理論値は  $n_t \beta (2/\pi) n_f Q_{BL,f}$  となる。この理論値は, 以下で示す  $n_t \beta Q_0$  で除算して規格化すると, ケーブルの特性によらず一致する。

$$n_t \beta Q_0 = n_t \beta \frac{(\mu_0 H_m)^2 \pi w_t^2}{\mu_0} \quad (4)$$

実際には, 上記のような規格化をヒステリシス損失の実験値に対して行っても同じ値に一致しないが, ここでは, 臨界電流が異なる線材のヒステリシス損失特性を比較するために, 便宜的にこの規格化法を用いることとする。

#### 4. 実験結果と理論値の比較

Fig. 2 に, ある一つの SCSC ケーブルについて, 測定結果から抽出されたヒステリシス損失を規格化した  $Q_h / n_t \beta Q_0$  の一例を丸印で示す。また Fig. 2 に, Brandt の理論のみを考慮したヒステリシス損失理論値  $(2/\pi) n_f Q_{BL,f} / Q_0$  に加え, Y. Mawatari の理論に基づき, フィラメントが隣接している際の磁束分布を考慮した理論値  $(2/\pi) \{Q_{BL,f} + (n_f - 1) Q_{M,f}\} / Q_0$  をそれぞれ曲線で示す。ここで,

$$Q_{M,f} = \frac{4\mu_0 (w_f + w_s)^2}{\pi} \int_0^{H_m} (2H_a - H_m) \ln \left[ 1 - \frac{\sin^2 \left\{ \frac{\pi w_f}{2(w_f + w_s)} \right\}}{\cosh^2 (H_a/H_c)} \right] \partial H_a \quad (5)$$

である[3]。 $w_s$  はフィラメント間の溝幅である。共通の幅広の母材から切り出された, 同じ線幅  $w_t = 2 \text{ mm}$  のモノフィラメント線とマルチフィラメント線の臨界電流を比較すると, マルチフィラメント線の臨界電流は, モノフィラメント線の臨界電流より 21.3% 低下していた。ここでは, 臨界電流の低下がすべて  $(n_f - 1) = 9$  本の溝によるものと仮定し, 一本あたりの溝幅を  $w_s = w_t \times 21.3\% \div (n_f - 1) = 47.3 \mu\text{m}$  と計算し, 式(5)に代入した。

#### 謝辞

本研究は JST ALCA-Next JPMJAN24G1 ならびに JSPS 科研費 JP23KJ1355 の支援を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] N. Amemiya et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 35, no. 2 (2022), Art. no. 025003, doi: 10.1088/1361-6668/ac3f9c
- [2] E. H. Brandt and M. Indenbom, Physical Review B, vol. 48, no. 17, pp. 12 893–12 906 (1993)
- [3] Y. Mawatari, Phys. Rev. B, vol. 54, pp. 113 215–113 221 (1996)

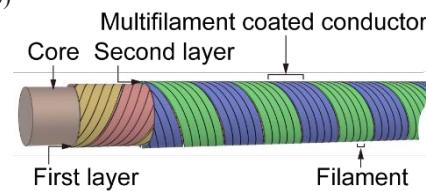


Fig. 1 Schematic view of the SCSC cable [1].

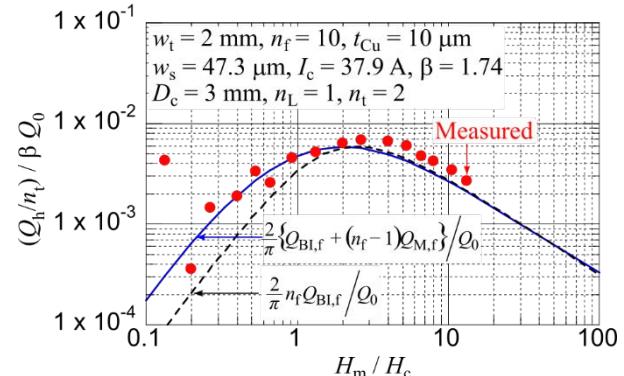


Fig. 2 Example of normalized value of experimentally determined hysteresis loss (symbols) in SCSC cable compared with theoretical values (lines).

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024年秋)(3): 1本の超伝導線で構成したスパイラル導体で巻いたコイルの交流損失測定

### Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (3): AC loss measurements of coils wound with spiral-coated-conductor cable

上垣 栄季, 曽我部 友輔(京都大学); 福井 聰(新潟大学); 雨宮 尚之(京都大学)  
 UEGAKI Hiiragi, SOGABE Yusuke (Kyoto U.); FUKUI Satoshi (Niigata U.); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

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き付けたスパイラル導体(CORC®ケーブル, SCSC ケーブル)は、テープ形状である薄膜高温超伝導線と比べて任意方向に曲げることが容易となり、コイル設計の自由度が大幅に向かう。我々はこのようなスパイラル導体で巻いたコイルの交流損失特性を実験によって評価することを目指し、これまで交流損失測定に用いるコイルの設計を行ってきた。今回は1本の薄膜高温超伝導線で構成したスパイラル導体を巻いたコイルを作製し、その交流損失測定を行った。

#### 2. スパイラル導体の構成とコイルの諸元

Table 1 に使用した薄膜高温超伝導線、作製したスパイラル導体、コイルの諸元を示す。黄銅コアに1本のモノフィラメント薄膜高温超伝導線と2本の銅テープを巻き付け、最外層をポリイミドテープで絶縁したスパイラル導体を作製した。研究の初めの段階として、超伝導素線間の偏流が交流損失に与える影響を排除するために超伝導線を1本だけ巻き付けた。作製したスパイラル導体を3Dプリンタ製の巻き枠に一定の張力で巻きつけ、コイルを作製した。コイルは整列巻きで6層、合計26.6ターンであり、断面は正方形に近い形状である。コイルの臨界電流(コイル全体の平均電界が100 μV/mとなる電流で定義)は56.6 Aであった。

#### 3. 交流損失測定

コイルに正弦波交流電流を流し、交流損失を測定した。Fig. 1 に実験系の構成を示す。コイルの交流損失は、交流電力計を用いた方法(PM 法)と、コイルの電圧・電流波形を記録し波形解析から損失を得る方法(WF 法)で測定し、それらの結果を比較した。WF 法において電流波形は計器用変流器(CT)を用いて測定した。記録した電圧・電流波形を高速フーリエ変換(FFT 解析)することによって基本波の電圧振幅  $V$ 、電流振幅  $I$ 、電圧・電流間の位相差  $\phi$  を取得し、コイル全体で生じる通電電流1周期あたりの損失を式(1)のように計算した。

$$Q_{\text{coil}} = VI \cos(\phi) / 2f \quad (1)$$

超伝導コイルは極めて低力率であるため、交流損失の測定は位相差の測定精度に大きく影響を受ける。Table 2 に測定データの内、損失成分が最も小さく、位相差が90°に最も近くなる13.38 Hz, 10 Aにおける電圧・電流波形の位相差  $\phi$  を示す。WF 法における位相差  $\phi$  は PM 法における位相差  $\phi$  とほとんど一致した。また、目視では波形に歪みは見られなかった。

Fig. 2 に測定したコイルの損失を示す。2つの方法で測定したコイルの損失は概ね一致した。コイルの損失は通電電流の約3乗に比例している。また、周波数依存性はほとんど見られないことから、黄銅コアや銅テープで生じる渦電流損失は小さく、超伝導線で発生するヒステリシス損失が支配的であると考えられる。

#### 謝辞

本研究はJST ALCA-Next JPMJAN24G1の支援を受けたものである。

#### 参考文献

1. H. Uegaki, et al., Submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond. (2024)

Table 1 Specifications of coated conductor, cable, and coil

Coated conductor	
Tape type	SCS2030AP, monofilament
Tape width	2 mm
Copper layer thickness	10 μm × 2 (20 μm)
Cable	
Outer diameter	3.3 mm, including insulation
Core material / diameter	Brass / 3 mm
Spiral pitch	9.48 mm
Composition of one layer	Superconductor / Cu / Cu
Number of layers	1
Insulation of cable	Polyimide tape
Critical current <sup>#1</sup>	61.5 A
Coil	
Inner / outer diameter	80 mm / 115.3 mm
Total number of turns	26.6
Number of layers	6
Inductance	87.2 μH
Critical current <sup>#1</sup>	56.6 A

#1 The criterion is 100 μV/m along cable.

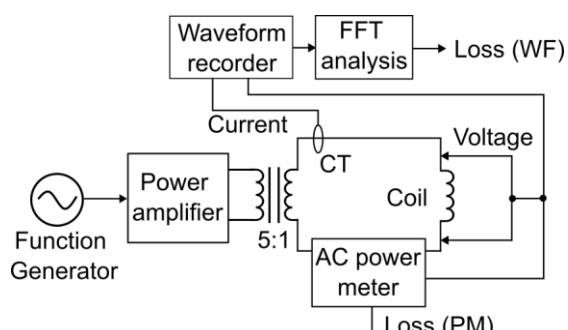


Fig. 1 AC loss measurements setup.

Table 2 Measured phase difference  $\phi$  (13.38 Hz, 10 A)

PM	WF
89.86 deg.	89.89 deg.

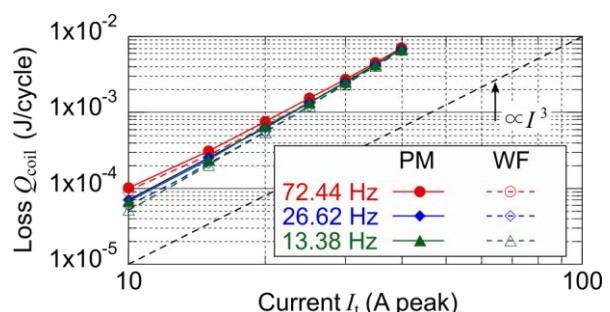


Fig. 2 Measured loss of coil plotted against current[1].

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(4): スパイラル導体で巻かれたコイルを対象とする数値電磁界解析モデルに関する検討

## Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (4): Numerical electromagnetic field analysis models for coils wound with spiral coated conductors

林 遼一, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)  
 HAYASHI Ryoichi, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

SCSC ケーブルをはじめとしたスパイラル導体をコイル形状で使用するにあたって、曲がった導体の数値電磁界解析が必要となる。しかし、スパイラル導体の数値解析においては数十 cm の導体でも数百万自由度の大規模解析となるため、コイル全体を対象とした解析は計算負荷の観点から現実的ではない。そこで、コイル巻線の一部を模した、曲がった有限長スパイラル導体を対象として数値解析を行うことが考えられるが、今回はその際のモデル化手法について検討した。

### 2. 曲がったスパイラル導体の解析モデル

曲がったスパイラル導体の数値解析としては、V. A. Anvar らによる CORC® ケーブルを対象とした研究[1]などがある。Anvar らによるモデル化手法では、曲げ処理によってケーブルの中心より内側が縮小、外側が拡大されることで線材の幅が変化する。しかし我々は、適切な張力によって製作された実際のスパイラル導体では、各線材の位置が芯材に沿って動くことで線材の幅が一定に保たれると考えた。線材の磁化や交流損失は線材の幅に大きく依存するため、線材の幅に変化を与えるモデル化手法は解析結果の妥当性に影響を与える可能性がある。そのため、我々は曲げ処理によって線材の幅が変化するモデル化手法(モデル 1)と、補正を加えることにより線材幅が変化しないモデル化手法(モデル 2)の二通りの解析モデルを作成し、それぞれの解析結果を比較した。それぞれの解析モデルの概念図を Fig. 1 に示す。

### 3. 解析結果と考察

数値解析においては、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[2]、外部磁界として交流磁界を印加した SCSC ケーブルの交流損失を比較した。解析対象とした SCSC ケーブルの諸元と解析条件を Table 1 に示す。

曲がった SCSC ケーブルの二つのモデル化手法で計算された、単位長さあたりの交流損失の時間変化を Fig. 2 に示す。比較対象として、直線状 SCSC ケーブルについても解析結果を示している。単位長さあたりの交流損失の時間変化についての比較では、ケーブルの曲げによる影響及びモデル化手法の影響はほとんど見られなかった。

また、各解析対象の単位長さあたりの交流損失を一周期分積分した結果を Table 2 に示す。一周期あたりの交流損失は、直線状ケーブルと比較してモデル 1 では 0.31% 程度、モデル 2 では 0.42% 程度低下することが分かった。

交流損失については、二通りの曲げ手法による差は 0.1% 程度となった。一方、例えば加速器用マグネットへの応用においては、交流損失だけでなく超伝導線の磁化が磁界の空間的・時間的均一性に及ぼす影響も重要となるため、今後は交流損失以外の指標として線材磁化や電流密度分布による比較を行う予定である。また、特に Fig. 1 において紙面と平行に磁界が印加される場合、モデル化手法による結果の差は大きくなると考えられる。そのため、磁界の印加角度に対する依存性についても検討する。

### 参考文献

1. V. A. Anvar, et al.: SUST, Vol. 31 (2018) 115006
2. T. Mifune, et al.: SUST, Vol. 32 (2019) 094002

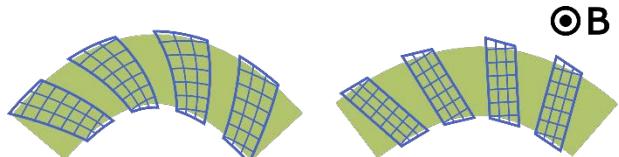


Fig. 1 Conceptual diagrams of model 1 (left) and model 2 (right)

Table 1 Model parameters and analysis conditions

Number of layers	3
Number of tapes per layer	2
Number of filaments	3
Width of tape	2 mm
Spiral pitch	5.6 mm
Diameter of core	2.5 mm
Bending radius	20 mm
External magnetic field amplitude	0.8 T
External magnetic field frequency	100 Hz
Applied current amplitude	30 A
Applied current frequency	100 Hz

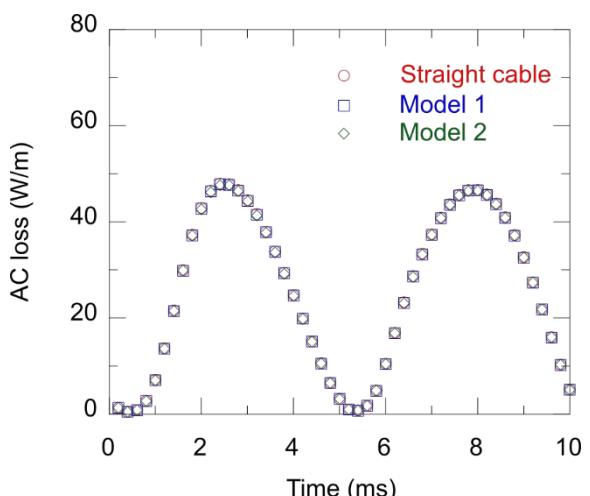


Fig. 2 Time evolution of total ac loss per unit cable length

Table 2 Total ac loss per unit cable length per cycle

	Total ac loss per unit cable length per cycle (J/m/cycle)
Straight SCSC cable	0.2563
Bent SCSC cable (model 1)	0.2555
Bent SCSC cable (model 2)	0.2552

### 謝辞

本研究の一部は JST 戰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 の支援を受けたものである。

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(5): 多層 SCSC ケーブルにおける動的抵抗の数値電磁界解析による評価

### Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (5): Evaluation of dynamic resistivity in multilayered SCSC cables by numerical electromagnetic field analyses

曾我部 友輔, 本多 尚, 雨宮 尚之(京大)  
SOGABE Yusuke, HONDA Sho, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

交流磁界下で超伝導線に直流電流が通電されるとき, 動的抵抗と呼ばれる抵抗が現れ, 磁束ポンプや回転機などの応用において問題となる。我々は, 単線のスパイラル銅複合多芯薄膜超伝導線において動的抵抗が大幅に低減されることを実験的・解析的に確認している。実際の SCSC ケーブルの応用においては, 電流容量を確保するために, 複数層かつ一層には複数の超伝導線を巻くように構成されるため, 超伝導線間の電磁的相互作用によって動的抵抗特性が変化することが考えられる。今回は, 複数本の銅複合多芯薄膜高温超伝導線から構成される多層 SCSC ケーブルにおける動的抵抗を数値電磁界解析によって評価したので, これを報告する。

#### 2. 数値電磁界解析手法・解析対象

数値電磁界解析手法として, 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[1]。薄板近似を適用する際には, 超伝導フィラメントの間に常伝導部が存在するとしてモデル化した。この常伝導部の導電率は過去の結合時定数測定結果と数値電磁界解析の比較から得られた値を使用した。

線材に直流電流を通電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。交流磁界一周期中に線材の電流密度  $J$  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[2]。動的損失から動的抵抗を計算する際に, 複数本の超伝導線からなる SCSC ケーブルにおいては, ケーブル全体で計算された動的損失を, ケーブル全体の通電電流の二乗  $I^2$  で除したものを, ケーブルの動的抵抗とした。

以下では, ケーブルの名称として, 層数を  $i$ , 1 層あたりの超伝導線本数を  $j$  とし,  $iL-jT$  という表記を用いる。ここでは, 1L-1T と, 2L-1T での動的損失の時間変化を比較する。ケーブルの諸元を Table 1 に示す。外部交流磁界の振幅, 周波数をそれぞれ 20 mT, 200 Hz とし, 臨界電流の 40% を通電している場合の数値電磁界解析を行った。ここで, 超伝導線の臨界電流は自己磁界下で 57.6 A とした。

#### 3. 動的損失及び動的抵抗の解析結果比較

Fig. 1 に 1L-1T と 2L-1T の二種の SCSC ケーブルにおける動的領域を示す。スパイラル状になっているテープのうち, 白色の領域が動的領域, 黒色の領域が動的領域以外の領域を示している。ここでは, ケーブルの 1 ピッチ分のみを図示している。また, 外部交流磁界は紙面垂直方向に印加されている。このとき, 動的領域は 1L-1T, 2L-1T のいずれにおいても各フィラメントで独立するような形状をとっている。すなわち, フィラメントの電磁的結合が解け, 線材幅方向端部からのみならず, フィラメント間の常伝導部からも磁束が侵入している。

Fig. 2 に二種の SCSC ケーブルにおいて発生するケーブル単位長さあたり超伝導線あたりの動的損失の時間変化を示す。この結果から, ケーブルを構成する超伝導線の本数が異なっていても, 発生する動的損失の大きさはほぼ変化しないことが確認された。これは, ケーブルの多層構造に伴って生じる超伝導線間の相互作用は, 動的損失に大きな影響を与えないことを示唆している。また, 1L-1T と 2L-1T のケーブルにおけるケーブル単位長さ当たりの動的抵抗は, それぞれ約  $2.17 \times$

$10^{-8} \Omega/\text{m}/\text{cycle}$ ,  $1.07 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}/\text{cycle}$  となった。このことから, 多層 SCSC ケーブルにおいては低動的抵抗の銅複合多芯薄膜超伝導線の並列化によって, 動的抵抗がより低減できる可能性が示されたといえる。

#### 参考文献

1. T. Mifune, et al.: SUST, Vol. 32 (2019) 094002
2. Y. Sogabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2024) p. 6

#### 謝辞

本研究は, JST 戰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 の支援を受けたものである。

Table 1 Specifications of analyzed SCSC cables.

Name of SCSC cable	1L-1T	2L-1T
Number of layers	1	2
Number of tapes per layer		1
Tape width		2 mm
Number of filaments		10
Copper thickness per side		10 $\mu\text{m}$
Substrate thickness		30 $\mu\text{m}$
Tape thickness		54 $\mu\text{m}$
Core diameter		3 mm
Spiral angle		55°
Cable length		130 mm

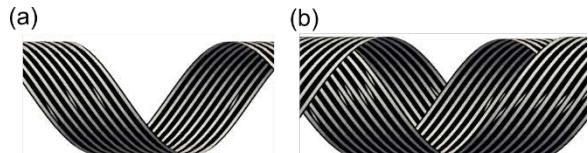


Fig. 1 Dynamic regions of (a) 1L-1T and (b) 2L-1T. White parts correspond to dynamic regions.

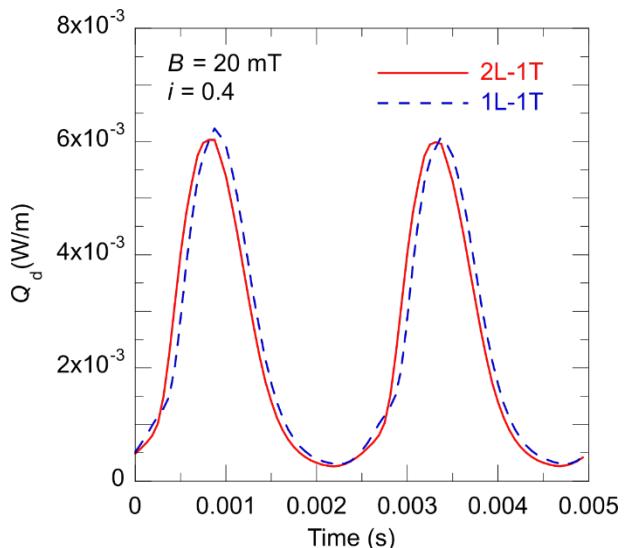


Fig. 2 Temporal evolution of dynamic losses in 1L-1T and 2L-1T.

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(6): ケーブル端末の特性評価

### Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (6): Characteristic evaluation of cable terminal

坂本 溪太, 高山 茂貴, 阿部 格, 宇都 達郎, 戸坂 泰造, 下之園 勉, 岡安 真偉雅, 野中 利昭(東芝 ESS);  
福井 聰(新潟大);藤野 正人, 高橋 明, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)

SAKAMOTO Keita, TAKAYAMA Shigeki, ABE Itaru, UTO Tatsuro, TOSAKA Taizo,  
SHIMONOSONO Tsutomu, OKAYASU Maia, NONAKA Toshiaki (TOSHIBA Energy Systems & Solutions Corporation);  
FUKUI Satoshi (Niigata U.); FUJINO Masato, TAKAHASHI Akira, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
E-mail: keita1.sakamoto@toshiba.co.jp

#### 1. はじめに

高温超伝導ケーブル(集合導体)の端末ではケーブルを構成する素線それぞれに健全な電流経路を確保する必要がある。SCSC cable (Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor cable)と呼ばれる集合導体では REBCO 線材を芯線にスパイラル状に巻き付け、それを複数積層する構成となっている。本集合導体における端末を複数のはんだ種で試作し、抵抗測定を実施したため、本発表ではその結果について報告する。

#### 2. ケーブルと端末接続方法

端末には長さ 4 cm の銅パイプを使用している。端末とケーブルの接続方法は、銅パイプを SCSC ケーブルに挿入し、銅パイプ内にははんだを流し込むことで接続している。はんだ種、銅パイプ径、コーティングをパラメータとして、Table 1 に示すパラメータで端末を試作した。ケーブルは、直徑 3 mm の真鍮線の周りに各層 3 本の銅テープを 4 層巻いたケーブルを使用している。コーティングは銅パイプをあらかじめはんだでコーティングした状態でケーブルと接続している。Sn-Pb37.5-Ag2.5 では銅パイプを 180°以上まで加熱する必要があるが、In-Ag3、Sn-Bi58 では銅パイプを 170°まで加熱することで十分にはんだが流れ込み、さらにコーティングした場合、はんだの流れ込みが良くなり作業性が向上する効果が確認できた。

#### 3. 常温抵抗測定結果

Fig.1 に示すようにケーブルの位置 I1 から 6.5 cm 離れた銅パイプ外側 I2 まで 0 A, 0.25 A, 0.5 A, 0.75 A, 1.0 A の電流をそれぞれ通電した。銅パイプ内部に挿入した計測線(V1)から銅パイプの外側 3 カ所(V2,V3,V4)間で電圧を測定し、各パラメータで試作した端末の抵抗値をそれぞれ求めた。各端末の抵抗値を Fig.2 に示す。銅パイプ径は外径 6 mm、内径 5 mm より外径 8 mm、内径 6 mm で抵抗値が低下することを確認した。3 種のはんだの中では In-Ag3 はんだで作成した端末において、V1-V4 間での抵抗値が 0.026 mΩ となり、最も小さいことがわかった。また、コーティングは In-Ag3 と Sn-Pb37.5-Ag2.5 はんだで抵抗値の低下を確認した。

#### 4. まとめ

SCSC ケーブルに健全な電流を導入するため、試作した端末を抵抗測定により評価した。外径 8 mm、内径 6 mm の銅パイプをコーティングし、In-Ag3 はんだで接続した場合に抵抗値が最も低くなることが確認できた。また、作業性の観点からもはんだが流れ込みやすい In-Ag3 はんだでコーティングした端末が最も良いことがわかる。

#### 謝辞

本研究は、JST 戰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 の支援を受けたものである。

Table 1 Terminal Parameter

Terminal No.	Solder	Outer diameter /Inner diameter	Coating
1	In-Ag3	8 mm/6 mm	No coated
2	In-Ag3	8 mm/6 mm	No coated
3	In-Ag3	8 mm/6 mm	Coated
4	In-Ag3	6 mm/5 mm	No coated
5	In-Ag3	6 mm/5 mm	Coated
6	Sn-Bi58	8 mm/6 mm	No coated
7	Sn-Bi58	8 mm/6 mm	Coated
8	Sn-Pb37.5-Ag2.5	8 mm/6 mm	No coated
9	Sn-Pb37.5-Ag2.5	8 mm/6 mm	Coated

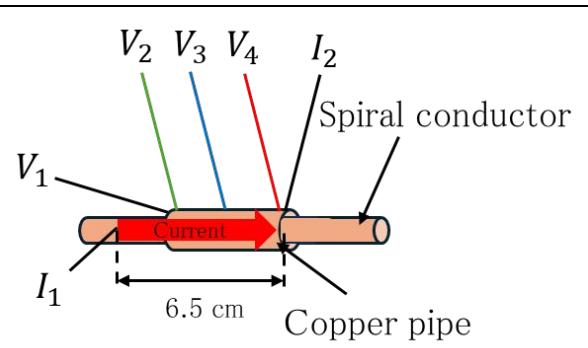


Fig. 1 Schematic diagram of resistance measurement

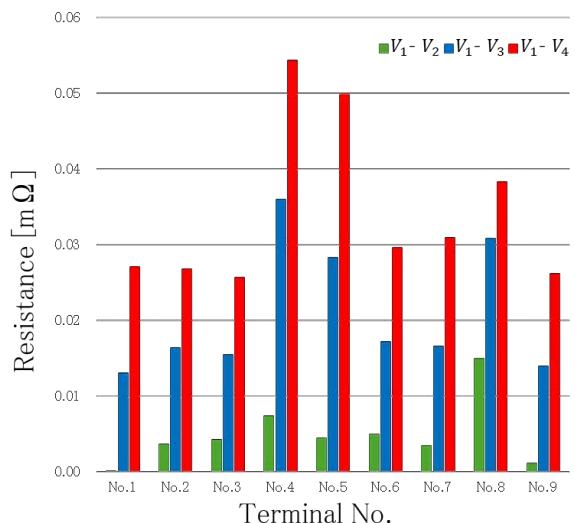


Fig. 2 Resistance measurement results

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(7): 磁化法によるマルチフィラメント高温超伝導線の臨界電流測定

Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (7):  
Critical current measurement of multifilament coated superconductors by measuring the magnetic field distribution.

高山 茂貴, 坂本 溪太, 阿部 格, 宇都 達郎, 戸坂 泰造, 岡安 真偉雅, 下之園 勉, 野中 利昭(東芝 ESS);

福井 聰(新潟大);藤野 正人, 高橋 明, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)

TAKAYAMA Shigeki, SAKAMOTO Keita, ABE Itaru, UTO Tatsuro, TOSAKA Taizo, OKAYASU Maia, SHIMONOSONO Tsutomu, NONAKA Toshiaki (Toshiba); FUKUI Satoshi (Niigata U.); FUJINO Masato, TAKAHASHI Akira, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

低交流損失でロバストな高温超伝導ケーブルである SCSC ケーブルの研究開発を進めている[1]。このケーブルには交流損失低減のため、線材内部の超伝導薄膜を幅方向に分割したマルチフィラメント REBCO 線材が適用されている。このマルチフィラメント線材の特性評価のため、臨界電流値( $I_c$ )を磁化法により測定した。ここで磁化法とは、REBCO 線材に磁場を印加し、線材直上の磁場分布を測定することで  $I_c$  を求める手法である。通常、磁場分布から  $I_c$  を換算する際、モノフィラメント線を想定した換算方法(モノフィラメント換算)を用いるが、この手法でマルチフィラメント線の  $I_c$  を評価すると、通電法で求めた  $I_c$  と大きく異なる結果となることが明らかとなった。ここでは磁化法での  $I_c$  評価方法の検討結果について報告する。

### 2. 磁化法による臨界電流値測定結果

通常、モノフィラメント換算では Bean モデルが用いられる。モノフィラメント換算にて求めた  $I_c$  を Fig.1(右軸)に、測定した線材諸元と、測定条件を Table 1, 2 に示す。本線材の通電法での  $I_c$  測定結果は平均 45 A となる一方で、モノフィラメント換算した  $I_c$  は 4 A 弱となった。この測定結果の差はモノフィラメントと仮定したことによるものと想定し、マルチフィラメント線を想定した  $I_c$  換算方法(マルチフィラメント換算)を検討した。

### 3. マルチフィラメント線を想定した $I_c$ 換算法

モノフィラメント換算で用いた Bean モデルをマルチフィラメント線に拡張し、各フィラメントが作る磁場分布を求めた。その結果を Fig.2 に示す。ここでは、各フィラメントの電気的結合は切れているものとし、各フィラメントの  $I_c$  を 4.8 A としている。本線材の場合、フィラメント間の距離が近く、各フィラメントの磁場分布は重なり合っている。各フィラメントの磁場分布を重ね合わせたマルチフィラメント換算結果と、従来手法のモノフィラメント換算結果を Fig.3 に示す。合わせて、マルチフィラメント換算で全長  $I_c$  を換算した結果を Fig.1(左軸)に示す。モノフィラメント換算での  $I_c$  は 3.5 A と小さくなるが、マルチフィラメント換算での  $I_c$  は 48 A と、通電法での測定結果(45 A)と一致することが明らかとなった。

### 4. まとめ

マルチフィラメント線の磁化法での  $I_c$  換算法について検討し、各フィラメントからの磁場分布の重ね合わせとすることで正しく評価可能なことを明らかにした。

### 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 の支援を受けたものである。

### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.126

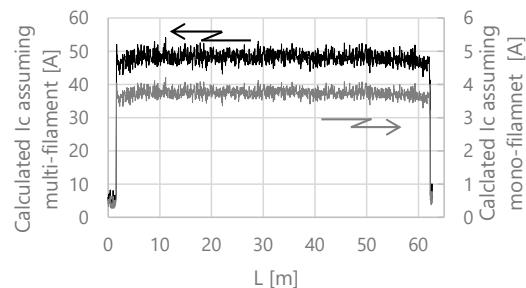


Fig. 1 Critical current measurement results of multifilament REBCO tape by measuring the magnetic field distribution.

Table 1 Specifications of multifilament REBCO tape

Tape width	2 mm
Number of filaments	10
Width of filament	0.19 mm
Thickness of copper layer	10 $\mu\text{m}$ per side
Thickness of Tape	53 $\mu\text{m}$
Average tape $I_c$	45 A

Table 2 Critical current measurement conditions

Applied field	6 mT
Measuring speed	200 m/h
Number of Hall sensors	21
Width of measurement area	12 mm
Distance from REBCO tape to hall sensor	0.8 mm

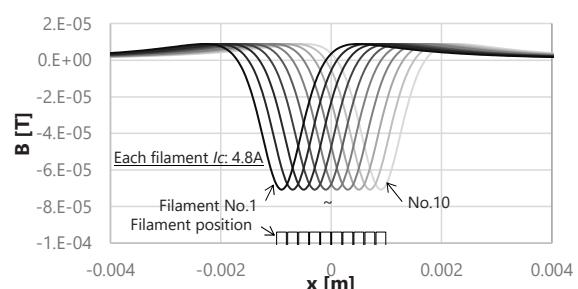


Fig. 2 Distribution of the magnetic field generated by each filament.

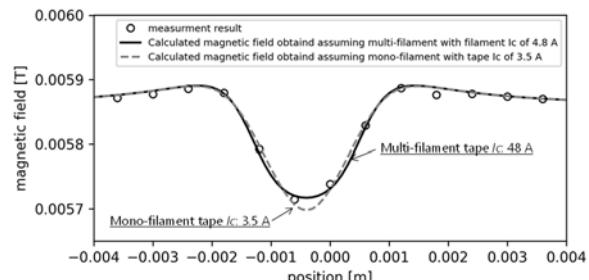


Fig. 3 Distribution of the magnetic field generated by multi- or mono-filament tape.

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(8): マルチフィラメント化有無 REBCO 線材の $I_c$ -ひずみ特性

Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (8):  
 $I_c$ -strain characteristics for REBCO coated conductors with or without striation

菅野 未知央(KEK); 堀内 政哉(京大); 萩津 透(KEK); 雨宮 尚之(京大)  
 SUGANO Michinaka (KEK); KAKIUCHI Masaya (Kyoto U.); OGITSU Toru (KEK); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
 E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

### 1. はじめに

SCSC ケーブル (Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable) は、超伝導膜をレーザー加工によりマルチフィラメント化した REBCO 線材を金属コアの周囲に多層らせん巻きした構造を有する[1][2]。REBCO 膜が幅方向に分割されている一方で Cu 安定化層は線材全体をカバーしており、超伝導層の局所的欠陥部で Cu を迂回する電流パスが確保されていることが特徴である。超伝導膜の幅方向寸法低減により、交流損失の削減と磁化電流が磁石の磁場精度に及ぼす悪影響の抑制が期待されている。一方で、ケーブリング、コイル巻線、電磁力などによる応力/ひずみ下でのストライエーション加工された REBCO 膜の機械的特性は明らかになっていない。本研究では、最も基礎的な線材長さ方向の引張ひずみ特性をマルチフィラメント化有無の REBCO 線材について比較した結果について報告する。

### 2. 実験方法

実験に用いた REBCO 線材は SuperPower 社製であり、幅 2 mm, Hastelloy 基板厚さ 30  $\mu\text{m}$ , 安定化 Cu 厚さ 10  $\mu\text{m}$ (片側あたり)である。マルチフィラメント化線材では REBCO 膜が幅方向に 10 分割されている。線材の両端を引張試験機の Cu 製つかみ具で保持し、77 K 浸漬冷却後につかみ具を介して通電した。電圧タップ間距離は 20 mm とした。ひずみ測定にはゲージ長 25 mm の Nyilas 型伸び計を使用した。段階的に負荷するひずみを増加させながら  $V$ - $I$  曲線を測定し、1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  の電界基準で臨界電流 ( $I_c$ ) を評価した。また、一定ひずみ負荷後に除荷し、 $I_c$  の可逆性を確認した。試験後の線材から安定化 Cu と Ag 保護層を化学エッチングにより除去し、走査型電子顕微鏡(SEM)により損傷観察を行なった。

### 3. 実験結果

Fig. 1 にマルチフィラメント化なし(Monofilament)、あり(Multifilament#1)の REBCO 線材の  $I_c$ -ひずみ特性を示す。別途行なった除荷後の  $I_c$  測定から、 $I_c$  が初期値の 99%以下に低下するひずみという定義で不可逆ひずみ ( $\varepsilon_{irr}$ ) を評価した。Fig. 1 に図示の通り、モノ、マルチフィラメント線材について  $\varepsilon_{irr}$  は 0.64%, 0.66% でありほぼ差はなかった。 $\varepsilon_{irr}$  以上のひずみ領域での  $I_c$  の低下はマルチフィラメント線材の方が急峻であるが、これは各フィラメントの破断により超伝導層の電流パスが減少するためと考えられる。

同じバッチで別の場所から切り出した線材の  $I_c$ -ひずみ特性を Fig. 2 に示す。この場合は、0.5~0.64%のひずみ範囲で  $I_c$  が低下し、一旦回復した後、再び劣化が進行するという振る舞いが確認された。この線材では  $I_c$  決定に用いた電界基準に相当する電界レベルでひずみによる  $V$ - $I$  曲線の形状変化が顕著に起こっていることが確認された。マルチフィラメント化 REBCO 線材では電圧タップの配置とフィラメント間の電流迂回の影響が  $V$ - $I$  曲線の低電界部の形状に現れることが報告されており[3]、Fig. 2 の結果はひずみ負荷により電流パスの変化が起こっていることを示唆している。当日の講演では、 $V$ -

$I$  曲線のひずみ依存性や SEM による損傷観察についても報告する予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理分野)の課題「高温超伝導磁石の加速器応用における新しい展開のための研究協力」、および、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)グランツ番号 JPMJAN24G1 の支援を受けたものである。

### 参考文献

1. N. Amemiya, et al.: SUST, Vol. 35 (2022) 025003.
2. N. Amemiya, et al.: IEEE TAS, Vol. 33 (2023) 4701507.
3. N. Amemiya, et al.: IEEE TAS, Vol. 32 (2022) 8001005.

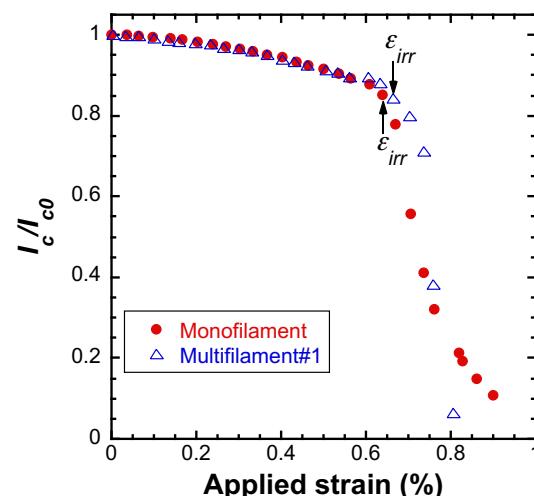


Fig. 1  $I_c$ -axial tensile strain characteristics for REBCO coated conductors with or without striation.

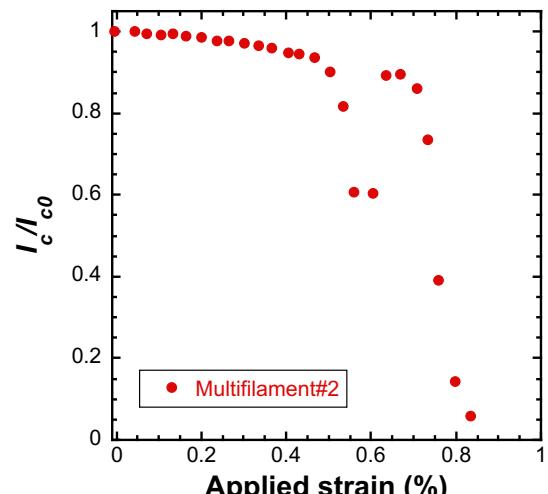


Fig. 2  $I_c$ -axial tensile strain characteristics for a striated REBCO coated conductor.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024 年秋)(9): SCSC ケーブルによる電機子巻線とハルバッハ永久磁石界磁を組合せた 高温超伝導同期電動機の電磁設計の検討

Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (9):

Study on electromagnetic design of HTS synchronous motor combining armature winding  
with SCSC cable and halbach PM field magnet

福井 聰, 坂下 涼介, 小川 純(新潟大); 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)

FUKUI Satoshi, SAKASHITA Ryosuke, OGAWA Jun (Niigata U.); SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

## 1. はじめに

マルチフィラメント REBCO 線材を円形断面のコア周囲にスパイラル状に巻き付けた集合した SCSC ケーブルは、横断方向磁場に対する交流損失をフィラメントレベル程度まで低減できること、多層化により電流容量の設定自由度が大きいこと、巻線性に優れることなどの利点を有する。SCSC ケーブルを電機子巻線に適用すれば、界磁の超伝導化による大起磁力に頼らず、低励磁・低電圧でも大電流化により高出力を得られる回転機設計が可能になると考えられる。特に航空機応用では、低気圧下での絶縁耐力の問題から、線間電圧を低く抑える必要があるため、低電圧・大電流・高出力の設計が求められる。本研究では、SCSC ケーブルの高出力回転機への適用に関する検討の一環として、ハルバッハ構造の永久磁石界磁と SCSC ケーブルを用いた空心電機子巻線を組合せた MW 級の同期電動機の電磁設計について検討した。

## 2. 電磁設計

本研究では、航空機応用を想定した 3 MW / 5000 min<sup>-1</sup> 機の設計を検討する。界磁には、ハルバッハ配列の希土類永久磁石を用いる。後述する Fig. 1 で示すように、扇形断面の永久磁石を 24 個組合せて円筒状にする。各永久磁石を矢印に示す方向に着磁すると、円筒内部空間に概ね均一な 2 極磁場が形成され、その径方向成分は同一円周上で正弦波分布となる。電機子コイルは鞍型コイルとする。電磁設計のプロセスは以下の通りである。

- ① 以下の条件を満たす断面寸法及び電機子巻線電流密度の組合せ候補を複数設計する。
    - 電機子巻線部電流密度は 100 A/mm<sup>2</sup> 程度 (20 K 運転)
    - 電機子巻線は 6 コイル集中巻とし、各コイルにおける導体曲げ半径を 25 mm 以上とする
    - 界磁磁石は、上記の電機子巻線が配置可能な内部空間を確保しつつ、2 極磁場が 0.4 T 程度、重量が 200 kg 程度になる寸法とする
    - クライオスタットのスペースのために、界磁磁石内径と電機子巻枠外径の差を 25 mm 以上確保する
    - 負荷角 95% で発生トルク 5730 Nm (3 MW-5000 min<sup>-1</sup>) 以上とする
  - ② ①で求めた断面寸法に対して、以下の条件を満たすように、電機子コイルの巻数、定格電圧、定格電流の組合せ候補を決定する。
    - 電機子導体の直径 5 - 7 mm (絶縁含)、巻線部占積率を 0.75 程度とする
    - 5000 min<sup>-1</sup>、定格負荷での線間電圧が 1000 V<sub>rms</sub> 程度
  - ③ ①②で得られた界磁・電機子諸元の組合せのうち、電機子導体の素線電流密度が、定格出力時の電機子巻線内の最大磁場下における素線臨界電流密度の 65 % 以下となるように、諸元の絞り込み及び微調整を行う。
- 得られた設計諸元を Table 1、断面概略図を Fig. 1 にそれぞれ示す。特性解析の結果等は当日報告する。

## 謝辞

本研究は、JST 戰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 の支援を受けたものである。

Table 1 Specifications of designed HTS motor.

Basic parameters	
Rated power	3 MW
Rated voltage (line-to-line)	1103 V <sub>rms</sub>
Rated current	6000 A <sub>rms</sub>
Rated revolution / frequency	5000 min <sup>-1</sup> / 83.3 Hz
Rated torque	5730 Nm
Rated load angle	$\pi / 2 \times 0.82$ rad
Pole number	2
Operating temperature	20 K
Outer diameter	580 mm
Effective length	285 mm
Field magnet : 24 segmented halbach array	
Permanent magnet	Nd-Fe-B
Residual magnetic field	1.4 T
Outer / inner diameter	520 mm / 380 mm
Axial length	285 mm
Weight	213 kg
Back yoke	SS400
Outer / inner diameter	580 mm / 520 mm
Weight	116 kg
Armature winding : Concentrated winding (6 saddle coils)	
Conductor	14-layer SCSC cable
Diameter (with insulation)	7 mm
Width of REBCO tape	2 mm
Number of REBCO tape	63
Rated tape current density	67.3 A <sub>p</sub> /mm
Rated conductor current density	219 A <sub>p</sub> /mm <sup>2</sup>
Max. magnetic field	2.2 T
Winding cross section	1114 mm <sup>2</sup>
Turn number	21
Conductor space factor	0.725
Rated winding current density	160 A <sub>p</sub> /mm <sup>2</sup>
Weight	~ 50 kg

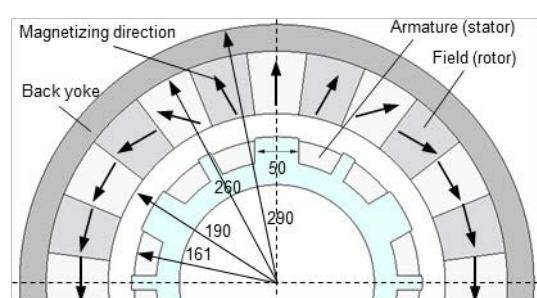


Fig. 1 Schematic illustration of cross section of designed HTS motor.

# SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024年秋)(10): スパイラル導体における臨界電流劣化箇所が保護特性に与える影響

## Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (10): Influence of position of low $I_c$ region on protection characteristics of spiral coated conductors

西川 泰生, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)  
 NISHIKAWA Taisei, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)  
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

スパイラル導体[1]は薄膜高温超伝導線材を複数本、金属コアの周りにスパイラル状に巻き付けた構造をもち、超伝導線間およびコアへの分流が可能であるため、優れた熱的安定性をもつと期待されている[2]。我々は、スパイラル導体を対象としたクエンチ解析プログラムを構築し、スパイラル導体における保護特性を評価している。今回は、複数層のスパイラル導体において、臨界電流劣化箇所が導体の保護特性に与える影響について調査した。

### 2. 解析モデル・解析条件

本論文では文献[3]と同様に、一次元熱拡散方程式と回路方程式を組み合わせたモデルを用いてスパイラル導体の熱-電気回路連成解析を行った。スパイラル導体をマグネットのコイル巻線に使用することを意識し、ケーブル全長での電圧監視と外部抵抗によるエネルギー回収を組み合わせた Detect and Dump によるクエンチ検出・保護を模擬した。

Table 1 に諸元を示す 4 層スパイラル導体について解析を行った。また、解析諸元は Table 2 に示す。このとき、超伝導体の臨界電流の温度依存性を以下の式で表す。

$$I_c = \begin{cases} I_{c0} - a(T - T_{c0}) & (T_{c0} \leq T < T_c) \\ 0 & (T \geq T_c) \end{cases} \quad (1)$$

健全な領域では  $I_{c0} = 50 \text{ A}$ ,  $a = 10/3 \text{ A/K}$ ,  $T_{c0} = 77 \text{ K}$ ,  $T_c = 92 \text{ K}$  とした。 $L_iT_j$  は  $i$  層目に巻かれた  $j$  番目の超伝導線を表すとし、L1T1 または L2T1 の中央に局所劣化部が生じたとして解析を行った。局所劣化部における式(1)のパラメータを  $I_{e0} = 10 \text{ A}$ ,  $a = 10/3 \text{ A/K}$ ,  $T_{e0} = 77 \text{ K}$ ,  $T_c = 80 \text{ K}$  とした。

### 3. 解析結果

コアと各超伝導線の長手方向中央部を流れる電流を Fig. 1 に示す。ただし、(a)は L1T1 が、(b)は L2T1 が劣化している場合である。(a)では、0.1 s から 1.6 s までは L1T1 の超伝導部に流れていた電流の一部が同超伝導線の金属部に分流した。金属部のジュール発熱により超伝導線温度は上昇し、1.6 s からは超伝導部に残っていた電流が隣接するコアと 2 層目の t 超伝導線に分流した。さらに、18.8 s 以降はより外側の超伝導線に分流した。19.6 s にケーブル電圧が検出電圧を超えて、電源が遮断され、電流が減衰した。また、(b)では超伝導線内の金属部への分流が起きたのち、0.7 s からは隣接する 1 層目と 3 層目に分流した。最終的に、3.3 s にケーブル電圧が検出電圧を超えて、電源が遮断され電流が減衰した。

熱暴走に至るまでの時間は(a)の方が長くなった。(a)では劣化した超伝導線がコアに直接接触しているため、コアに早い段階から電流が分流する。コアは超伝導線と比べて体積が極めて大きいので、熱容量が大きく、また常伝導転移した超伝導線よりも抵抗値が小さい。このことから、コアへの接触と分流によって発熱と温度上昇を抑えることができる理由であると考えられる。

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP22H00142 の助成を、一部は JST 戰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 の支援を受けたものである。

### 参考文献

1. N. Amemiya, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 35 (2022) 025003
2. G. Xu, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 33 (2023) 4701205
3. Y. Sogabe, et al., *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 105 (2023) p. 11

Table 1 Cable geometry.

Cable length	300 mm	Spiral pitch	10 mm
No. of layers	4	Tape thickness	54 $\mu\text{m}$
No. of tapes / layer	2	Tape width	2 mm
Core diameter	3 mm		

Table 2 Analysis conditions.

Initial temp.	77 K	n-value	20
Tape / cable $I_c$ @ 77 K	50 A / 400 A	Time constant of protection	0.5 s
Deterioration tape $I_c$ @ 77 K	10 A	Terminal resistance at tape	1 $\Omega$
Transport current	320 A	Terminal resistance at core	1 k $\Omega$
Detection voltage	30 mV	Contact resistivity	$5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}^2$

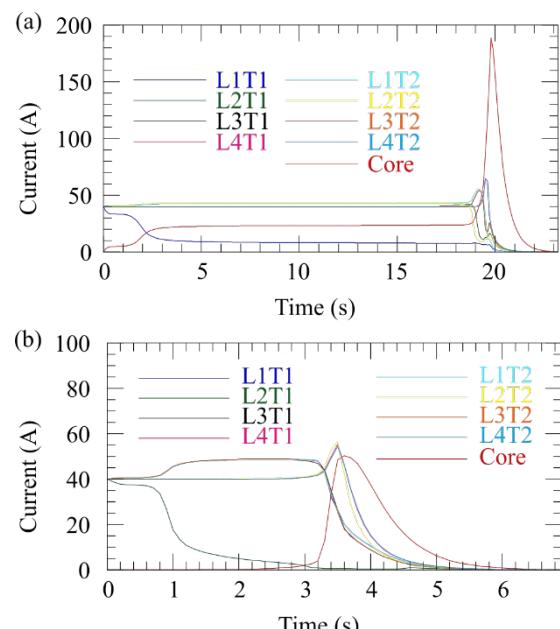


Fig. 1 Current of the spiral-coated-conductor cables in each tape and core; deterioration in (a) L1T1 and (b) L2T1.

## SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2024年秋)(11): 2層スパイラル導体の層間電流分流現象に関する実験的研究

Progress of R&D of SCSC cable in autumn 2024 (11):

Experimental study of current sharing between layers of two-layer spiral coated conductors

許光輝, 小山湧也, 曾我部友輔, 雨宮尚之(京大)

XU Guangwei, KOYAMA Yuya, AMEMIYA Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)

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

### 1. Introduction

In a cable in which coated conductors are wound spirally in multiple layers on a core, such as the SCSC cable, the current distribution among layers could be not always uniform because of the imbalanced joint resistances at the terminals and/or the imbalanced inductances among coated conductors in different layers. We developed a new method to measure the current distribution in two-layer spiral coated conductors using Hall sensor. We report the results of the initial experiment.

### 2. Measurement method of current distribution

If the directions and/or the pitches of the spirals in the two layers are different, the longitudinal magnetic flux densities  $B_l$  generated by the currents in the coated conductors in the first and second layers (layers 1 and 2) are different. Here, we assume that the spiral coated conductor in each layer is an infinitely long solenoid. Then, the following equations are obtained.

$$I_{L1} + I_{L2} = I_t \quad (1)$$

$$B_l = \frac{\mu_0}{L_{p1}} I_{L1} - \frac{\mu_0}{L_{p2}} I_{L2} \quad (2)$$

where  $I_{L1}$  and  $I_{L2}$  are the currents of the coated conductors in the layer 1 and in the layer 2;  $I_t$  is the total current supplied to the sample consisting of two coated conductors;  $L_{p1}$  and  $L_{p2}$  are the spiral pitches of the layer 1 and the layer 2. If we measure  $I_t$  and  $B_l$ , we can calculate  $I_{L1}$  and  $I_{L2}$ .

We used a hollow copper core, on which we wound coated conductors and in which we installed a small Hall sensor to measure  $B_l$ . The Hall sensor was calibrated in liquid nitrogen to determine the Hall coefficient  $K_0$  of the sensor at 77 K.

Furthermore, if the directions of the spirals in the two layers are different, and if their pitches are same ( $L_p \equiv L_{p1} = L_{p2}$ ), as in the sample below, Eq. (2) can be transformed as follows:

$$v_H = \frac{K_0 \mu_0}{L_p} (I_{L1} - I_{L2}). \quad (3)$$

From Eqs. (1) and (3),  $I_{L2} / I_{L1}$  is given as follows:

$$\frac{I_{L2}}{I_{L1}} = 2 / \left( 1 + \frac{K_0 \mu_0 v_H}{L_p I_t} \right) - 1 \quad (4)$$

### 3. Sample

The specifications of the coated conductor and the core are listed in Table I. The geometry of the sample is shown in Fig. 1. The layer 1 of the sample consisted of one coated conductor and one polyimide tape whose thickness was 50  $\mu\text{m}$ . The gap between the coated conductor and the polyimide tape was 0.5 mm. The layer 2 consisted of only one coated conductor. The spiral pitches of both layers were 15.1 mm. The surface of the core was insulated to eliminate the current sharing between the core and the coated conductors. Hall sensor was placed in a slit cut on a 3-mm-diameter GFRP rod, which was inserted to the 5-mm-diameter hollow copper core. The longitudinal location of the Hall sensor was the center of the sample.

### 4. Results

As the initial experiment, we simply ramped up the total current  $I_t$  and measured the current distribution at one longitudinal location as well as the voltages along the coated conductors. Fig. 2(a) shows  $I_{L1}$  and  $I_{L2}$  as well as  $v_H$ , Fig. 2(b) shows the voltages per unit length along the coated conductor in the layer 1 ( $v_{L1}$ ) and that along the coated conductor in the layer 2 ( $v_{L2}$ ), and Fig. 2(c) shows  $I_{L2} / I_{L1}$ .

#### a) Phase A: $I_t = 0 - 100 \text{ A}$

In this phase,  $I_{L2}$  was larger than  $I_{L1}$ ,  $I_{L2} / I_{L1}$  was constant, and no voltage appeared along both coated conductors. The current distribution might be dominated by the joint resistances at the terminals, which might be smaller in the layer 2.

#### b) Phase B: $I_t = 100 - 175 \text{ A}$

At  $I_t \sim 100 \text{ A}$ , the voltage appeared in the coated conductor in the layer 2, which was carrying more current. As the consequence, the resistance of the coated conductor started to influence the current distribution:  $I_{L2} / I_{L1}$  started to decrease.

#### c) Phase C: $I_t = 175 \text{ A}$

In this phase,  $v_{L2}$  was increasing drastically, and its influence on the current distribution became more remarkable.

In this initial experiment, we confirmed that we can determine the current distribution very clearly. At the next stage of experiments, we will measure the current distributions at multiple longitudinal locations to find out where the current transfers: through the contact resistance between coated conductors and/or at terminals. Furthermore, measurements will be conducted in more practically samples: for example, a sample, in which one coated conductor degrades locally.

### Acknowledgments

This work was supported in part by JSPS KAKENHI Grant Number JP22H00142 and JST-ALCA-Next Program Grant Number JPMJAN24G1, Japan.

Table I Specifications of the coated conductor and the core

Coated conductor width	4 mm
Substrate thickness	40 $\mu\text{m}$
Copper layer thickness per side	5 $\mu\text{m}$
Critical current at 77 K <sup>#1</sup>	$\sim 117 \text{ A}$
Spiral pitch	15.1 mm
Diameter / thickness of hollow copper core	5 mm / 0.5 mm

#1 Measured at Kyoto University.

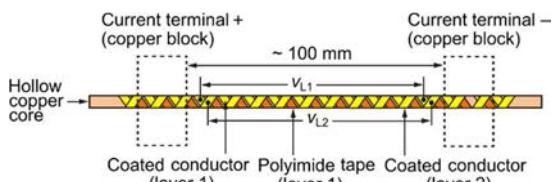


Fig. 1 The geometry of the sample.

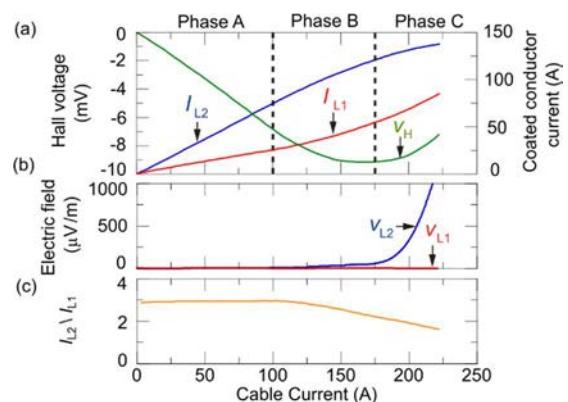


Fig. 2 Measurement results; (a) electric fields, (b) Hall voltage and coated conductor currents.

# 高圧力下で放電プラズマ焼結した $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ 超伝導バルクの臨界電流特性

## Critical current characteristics of $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ superconducting bulk prepared by SPS method under high uniaxial pressure

金木 大祐, 内藤 智之(岩手大)  
 KANEKI Daisuke, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)  
 E-mail: g0323045@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

$\text{Nb}_3\text{Sn}$  超伝導体は現在線材として実応用されている  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  に比べて上部臨界磁場  $B_c$  が 51 T(4.2 K)と高い値であるが、硬脆性や低充填率などの問題から長尺線材化の研究が行われていない。そこで、我々はテスラ級のバルク磁石としての可能性を考えた。これまで、Nb 箔とステンレスカプセルを用いた  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  超伝導バルク体の作製方法を提案し、臨界電流密度について報告してきた[1]。Nb 箔を用いることでステンレスとの反応を防ぎ比較的不純物の少ない  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  が作製できた。しかし、充填率は 60% 台と低く、得られた  $J_c$  も  $10^4 \text{ A/cm}^2$  級程度であったことから充填率の向上が不可欠である。そこで、本研究では、放電プラズマ焼結法 (Spark Plasma Sintering: SPS) を用いて高密度な  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  超伝導体を作製し、充填率と臨界電流特性の相関について報告する。

### 2. 実験方法

原料 Pb(99.9%), Mo(99.9%), S(99.99%)を用いて、まず前駆体である PbS,  $\text{MoS}_2$  を固相反応法により作製した。その後  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  の作製のため PbS:MoS<sub>2</sub>:Mo = 1:3.5:2.5 で秤量し、一軸圧力下で圧粉体を成型した。SUSとの反応を防ぐため Nb 箔で圧粉体を包み、Ar 霧囲気中でステンレス(SUS)容器に封入後、950°C-24 h の焼成を行った。得られた  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  粉末を真空霧囲気で印加圧力 50 MPa、ダイスサイズ  $\phi$  10、保持温度 800, 900, 1000, 1100°C、保持時間 20 min の条件で放電プラズマ焼結法 (Spark Plasma Sintering: SPS) によりバルク化した。

試料の評価は結晶相の同定に X 線回折(XRD)装置、磁化測定には SQUID 磁束計を用いた。臨界電流密度  $J_c$  は磁化測定データより拡張型ビーンモデルを用いて算出した。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に SPS した  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  バルクの XRD パターンを示す。SPS 温度に依らず主相は  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  である。しかし、SPS 後のすべての試料で不純物である  $\text{MoS}_2$  のピークが見られた。SPS 前粉末では見られなかつことから、SPS による再加熱により分解が起こったためと考える。

Fig. 2 に SPS 温度と充填率の関係を示す。SPS 法の導入と SPS 焼結温度を上昇させていくことで充填率が向上した。特に、SPS1100°C バルクでは充填率 97% とより緻密なバルクが得られた。

Fig. 3 に各バルク試料の磁化の温度依存性を示す。SPS の導入、SPS 焼結温度の上昇により  $T_c$  の低下が見られた。 $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  超伝導体の特徴として化学量論比からの組成のずれにより超伝導特性が低下することが報告されている[2]。そのため、SPS の再焼結による組成のずれや不純物である  $\text{MoS}_2$  の生成が  $T_c$  の低下に起因していると考えられる。また、最も充填率の高い SPS1100°C のバルクでは反磁性が見られなかった。そのため SPS 温度 1000°C 以下で行う必要がある。

講演では微細組織観察、臨界電流密度  $J_c$  の磁場依存性について報告する。

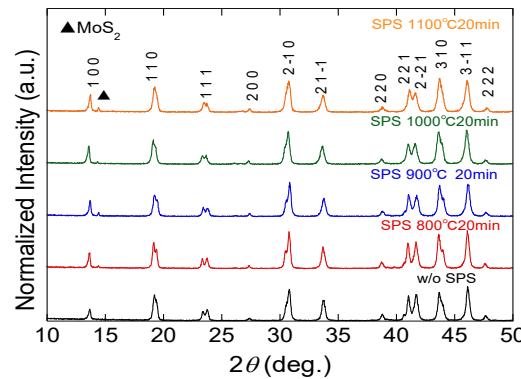


Fig. 1 XRD patterns of  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  bulks after SPS

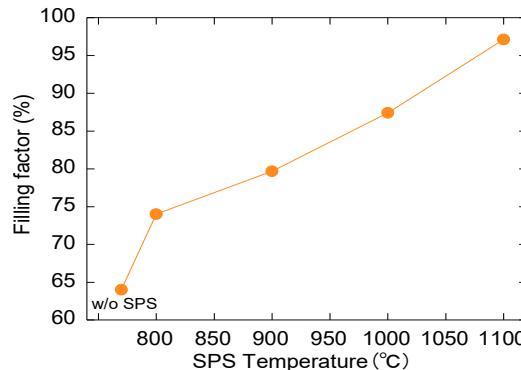


Fig. 2 Relationship between SPS temperature and filling factor

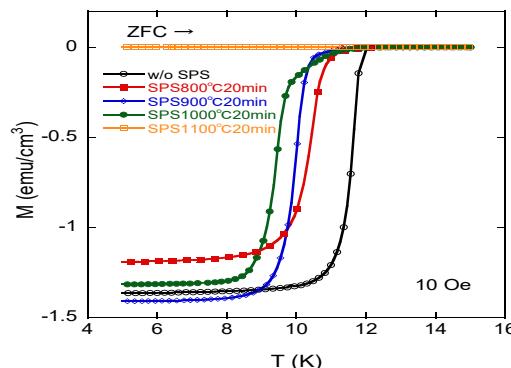


Fig. 3 Temperature dependence of magnetization of  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  bulks.

### 参考文献

1. D. Kaneki et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 80
2. Y. Kimura, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 14 No. 2 (1979) 51-63

## 浸透法で作製した緻密な $\text{Nb}_3\text{Sn}$ バルクの捕捉磁場特性

### Trapped field properties of dense $\text{Nb}_3\text{Sn}$ bulks fabricated by infiltration method

田島 穎久, 内藤 智之(岩手大)  
 TASHIMA Yoshihisa, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ)  
 E-mail: g0324121@iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

$\text{Nb}_3\text{Sn}$  超伝導体の上部臨界磁場  $H_{c2} = 24 \text{ T}$  (4.2 K) [1] は  $\text{MgB}_2$  の  $H_{c2} = 10 \sim 20 \text{ T}$  (4.2 K) より高く、また、臨界電流密度  $J_c$  の磁場依存性が比較的小さい。また、異方性がないことから多結晶体で大型の強磁場バルク磁石を作製できると期待される。我々の研究グループではこれまでにボールミル粉碎と SPS の組み合わせで高密度な  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  バルクを作製してきた。そのバルクの捕捉磁場は 10 K において 6 T 以上が期待できる [2]。しかし ex-situ 法である SPS よりも in-situ 法で作製した方が結晶粒の結合性が良好になり、ひいては捕捉磁場が向上されると期待される。そこで本研究では in-situ 法でかつ高密度なバルクを得られる浸透法を用いて  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  バルクを作製し、その捕捉磁場特性を評価した。

#### 2. 実験方法

原料は Nb (粉末、純度 99.9%)、Sn (粉末、純度 99.99%)、Cu (粉末、99.99%)、を用いた。まず Nb : Sn = 3 : 1 (Sn=8.363g, Nb=19.637g) と  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  に対して 1wt% の Cu を秤量し、Nb と Cu を自動乳鉢で 30 分混合した。この混合粉末を 1 軸圧力下で直径 20mm、厚さ 10mm に圧粉成型し、その上に Sn を配置したあと Ar 霧囲気で 850°C, 800°C, 750°C-48h の熱処理を行い  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超伝導バルクを作製した。

作製した  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  バルク体は X 線回折(XRD)によって結晶相を同定した。その後、磁場中冷却着磁(FC)法で着磁を行って捕捉磁場を評価した。また、SQUID 磁束計によって測定した磁化ヒステリシス曲線から拡張型ビーンモデルを用いて  $J_c$  を評価した。

#### 3. 実験結果

750°C バルク 4.069g, 800°C バルク 2.245g の残留 Sn が確認された。熱処理温度が下がるに従って、Sn の残留量は増え  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  の生成量は低下した。

Fig.1 に 750°C バルクの top, bottom の XRD パターンを示す。750°C バルクの top には  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  が生成されていた。Bottom の外観は圧粉体のようになっており XRD パターンからも Nb が主な相として観測された。800°C バルクでも同様の結果が得られた。以上のことより熱処理温度 800°C, 750°C では 10mm の厚さのバルクの作製には浸透が不十分であることが分かる。

Fig.2 に各試料の捕捉磁場の温度依存性を示す。捕捉磁場は 750°C バルクが一番高く、これは熱処理温度の低下による結晶粒成長の抑制による効果だと考えられる。 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  の生成量は 750°C バルクが一番少ないと考えられるが、それ以上に結晶粒成長の抑制による効果が大きいと考えられる。また 800°C バルクは 850°C バルクに比べて低い。これは  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  の生成量が低下しているからと考えられる。

講演では  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  バルクの臨界電流密度  $J_c$  と併せて報告する予定である。

#### 参考文献

1. K. Tachikawa, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) vol.45 No.3 (2010) 88 - 98
2. T. Oyamada et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.104 (2022) p.94

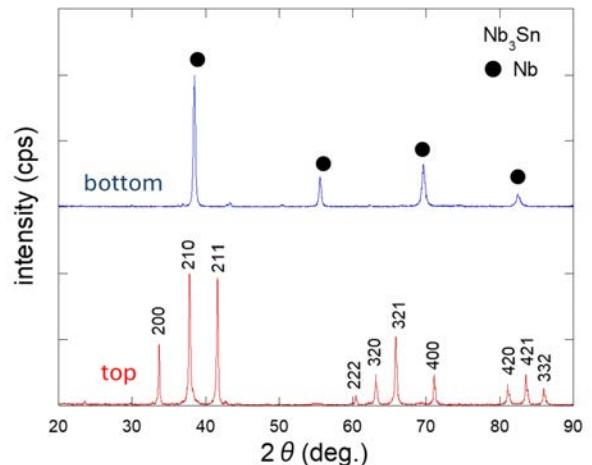


Fig.1 XRD patterns of top and bottom surfaces of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  bulk fabricated at 750°C.

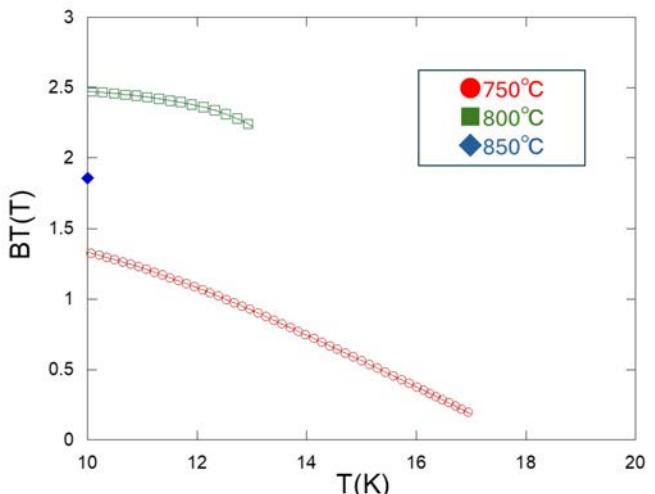


Fig.2 Temperature dependence of the trapped magnetic field of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  bulks fabricated at various temperatures.

## Nb/Sn-Cu-Ti 拡散反応において Zn および Mg 添加が Nb<sub>3</sub>Sn 層形成に与える影響

### Effect of Zn and Mg doping on Nb<sub>3</sub>Sn layer formation in Nb/Cu-Sn-Ti diffusion reaction

浅井 航希, 谷貝 剛(上智大学);諸永 拓, 伴野 信哉(NIMS)

ASAI Koki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia University); MORONAGA Taku, BANNO Nobuya (NIMS)

E-mail: kouki0204@eagle.sophia.ac.jp

#### 1. はじめに

Nb/Sn 拡散反応に対しての Ti 添加は、線材の上部臨界磁場特性 ( $B_{c2}$ ) を向上させることで知られている[1]。しかし、Sn 相への Ti 添加は、Nb/Sn 界面での Nb<sub>3</sub>SnTiCu の四元化合物形成を促し、これが Nb<sub>3</sub>Sn 層形成時の Sn の拡散障壁となりうる。この化合物を不安定化させ、Ti 添加時においても Sn 拡散を促進することが求められるが、この側面についての詳細な研究はまだ少ない。そのため、本研究では Sn 拡散を促すことで知られる Zn 添加を Ti 添加試料に行なうことで、Nb/CuZn/SnTi における拡散反応挙動を調べた。また、Nb<sub>3</sub>Sn 結晶粒微細化に対して一定の効果が見られる Mg 添加[2]も同時に用い、その効果を調べた。

#### 2. 実験手法

本研究では、(A)Nb/Cu/Sn-1.6wt%Ti, (B)Nb/Cu-15wt%Zn/Sn-1.6wt%Ti, (C)Nb/Cu-14wt%Zn-0.2wt%Mg/Sn-1.6wt%Ti, (D): Nb-0.8wt%Ti/Cu/Sn と4種類の試料を作製した。Nb/Sn/Cu 複合材を Cu 安定材へと挿入し、直径 0.6mm まで伸線加工した。これを真空中で 500°C/100h の予備熱処理を施し、その後 650°C/150h または 685°C/100h の2種類の熱処理を行い、Nb<sub>3</sub>Sn 相を生成した。

#### 3. 実験結果と考察

図1に各試料の 650°C/150h, 685°C/100h 熱処理後の研磨断面の SEM 像、表1に結晶粒径を示す。

650°C/150h 熱処理後では、試料(A)では、形成された Nb<sub>3</sub>Sn 層と Cu-Sn 層の間に安定した Nb<sub>3</sub>SnTiCu の四元化合物が見られた。これが Sn の Nb への拡散障壁となり Nb<sub>3</sub>Sn 層形成が薄くなつたと考えられる。Zn 添加試料(B)でも同様の化合物が見られたが、分解して存在しており、Sn の拡散障壁とはならなかつた。その結果、試料(B)では厚い Nb<sub>3</sub>Sn 層が形成されたと考えられる。Zn と Mg の共添加試料(C)では、試料(B)と比べやや薄い Nb<sub>3</sub>Sn 層形成となり、Mg が Zn 添加の効果を抑制した。試料(D)では、四元化合物は形成されなかつた。685°C/100h 熱処理後では、すべての試料で厚い Nb<sub>3</sub>Sn 層の形成が見られた。試料(A)から(C)では、650°C で存在していた Ti 化合物相が減少しており、Sn 拡散が良好に進んだといえる。一方で、四元化合物層の見られない試料(D)では最も厚い Nb<sub>3</sub>Sn 層が形成された。

結晶粒径では、試料(A)と(B)を比較すると、650°C/685°C 熱処理の両方で Zn 添加の試料(B)でわずかに結晶粒微細化が見られた。Mg の共添加試料(C)では、結晶粒微細化が 650°C では見られず、685°C ではわずかに見られた。

図2に 650°C/150h 熱処理後の Mg 添加試料(C)の STEM-BF 像と EDS マッピングを示す。Nb<sub>3</sub>SnTiCu 四元相内では Mg 粒子が界面に集中し、Nb<sub>3</sub>Sn 相内への拡散は微量であった。そのため Zener ピンニングによる結晶粒微細化を十分に得られなかつたと考えられる。

#### 謝辞

本研究の一部はJSRS科研費JP23K04453の助成を受けた。

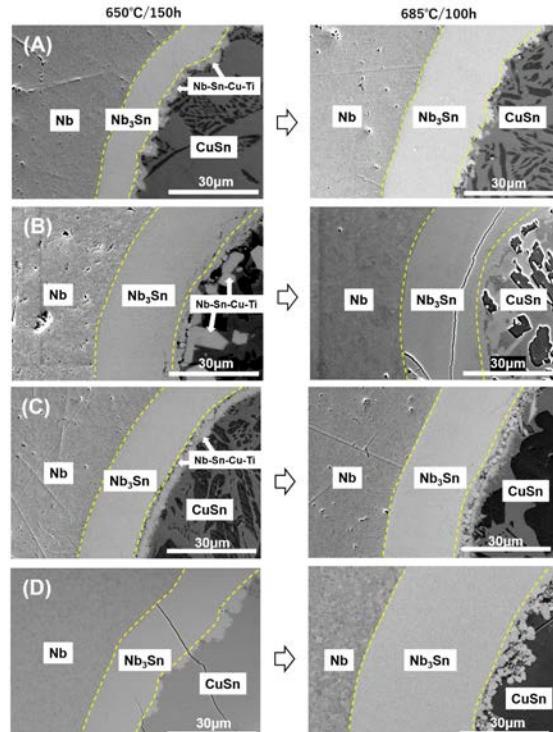


Fig. 1 Cross sectional SEM images of the reaction layer (acceleration voltage: 20 kV) for (A)–(D) after diffusion at 650 °C for 150 h and at 685 °C for 100 h.

Table. II Average Nb<sub>3</sub>Sn grain size of samples (A)–(D).

Sample	(A)N-C-ST	(B)N-CZ-ST	(C)N-CZM-ST	(D)NT-C-S
650°C/150h	116(nm)	109(nm)	124(nm)	94(nm)
685°C/100h	207(nm)	167(nm)	173(nm)	164(nm)

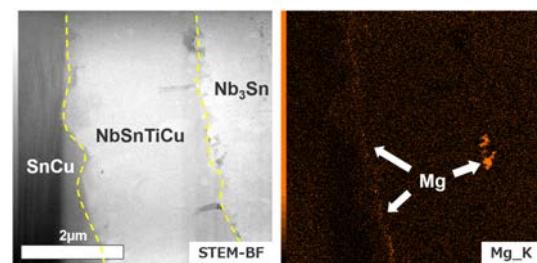


Fig. 2 STEM-BF images and EDS mapping (at%) of sample (C) heated at 650 °C for 150 h for the Nb<sub>3</sub>SnTiCu quaternary phase.

#### 参考文献

1. K. Tachikawa, et al.: High-field superconducting properties of the composite-processed Nb<sub>3</sub>Sn with Nb-Ti alloy cores, *Appl Phys Lett*, vol. 39 (1981) pp. 766–768
2. K. Togano, et al.: Effects of magnesium addition to the CuSn matrix in the composite-processed Nb<sub>3</sub>Sn superconductor, *Journal of The Less-Common Metals*, vol. 68 (1979) pp. 15–22

## Cu・Zn 共添加 Sn 合金芯の作製とそれを用いた Nb<sub>3</sub>Sn 層形成

### Preparation of Cu-Zn co-doped Sn alloy core and formation of Nb<sub>3</sub>Sn layer using it

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

Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線材は、次世代粒子加速器や原型炉用マグネットの候補線材となっている。これらの装置では、数千トンに及ぶ物量の Nb<sub>3</sub>Sn 線材が必要であり、高臨界電流密度化だけでなく、線材コストパフォーマンス改善も重要な課題である。コストパフォーマンスは、ワイヤーのデザインと伸線性に密接に関係している。良好な伸線性は、断線のリスクを抑制し、歩留まりを向上させる。さらに、良好な硬度バランスは、良好な断面形状の維持に貢献する。本研究では、Sn 芯硬度を増大させるために Cu と Zn を共添加した様々な Sn 合金を作製した。その微細組織、組成および硬度を調べた[1]。

#### 2. 実験方法

Sn 合金は Ar 雰囲気の通常の誘導加熱炉で鋳造した。添加元素として Cu、Zn、Ti を用いた。各構成材料を所定量組み合わせて混合物を調製した。この混合物を Cu の融点以上に加熱した。Ti の添加には、Ti 粉末 (-325 メッシュ) を用いた。混合物は、Ti が完全に溶解するのに十分な時間、一定の温度で加熱した。試料の微細構造は電界放出型走査電子顕微鏡 (FESEM) を用いて観察し、組成分析は FESEM に付随するエネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) を用いて行った。断面は、まず多結晶ダイヤモンド懸濁液で研磨し、最終工程で非結晶化アモルファス 0.05 μm および 0.02 μm コロイダルシリカ懸濁液 (MasterMet、Buehler 社製) で研磨した。Sn 合金の硬度は、マイクロビックース硬度計を用いて 0.025 kgf の圧力で測定した。

溶製した Sn 合金のうち Sn-20Cu-30Zn-2Ti および Sn-10Cu-40Zn-2Ti を用いてチューブ法により 19 芯の多芯線を作製した (Fig. 1)。拡散対の構成は、Nb/Sn 合金もしくは Nb/Cu/Sn 合金を採用した。後者は、高い Sn の拡散駆動力を抑制するために薄い Cu 層を挿入した構造である。

試料は、Nb<sub>3</sub>Sn 相形成のために 4h の昇温時間で 100h/650°C の熱処理を行った。試料は、400、500、600、650 °C、20h/650°C、50h/650°C で炉から取り出し、微細組織の時間変化を観察した。

#### 3. 実験結果と考察

Table 1 に、Sn 合金の組成と加工性、ビックース硬度 (Hv) をまとめた。Fig. 2 に、代表的な Sn 合金の組織を示した。Sn に 50at% の Cu を入れると、樹枝状  $\epsilon$ -CuSn 相が生成され、加工で深いクラックが発生する。一方、Zn と共に添加することで (例えば 20at%Cu-30at%Zn)、トータル組成で 50% の元素添加が可能となる。Table 1 に示すように、Cu・Zn を共添加することで従来の Sn-2Ti 合金に比べ、Hv が 2 倍以上に増大可能である。Fig. 3 に、Sn-20Cu-30Zn-2Ti を用いて作製した線材の 650°C × 100 h 热処理後の組織を示す。Cu 層がない試料では、Sn の拡散駆動力が大きいことから界面に粗大な Nb<sub>3</sub>Sn 層が形成される。

**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] N. Banno et al., presented at ASC2024, 3M0r2A-07, Salt Lake City

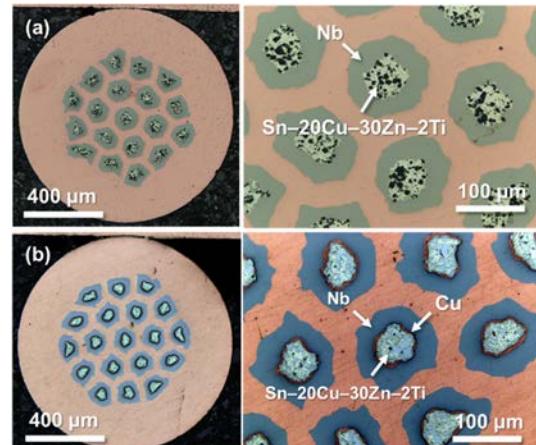


Fig.1. Cross-sections for RIT Nb<sub>3</sub>Sn precursor wires without and with a Cu thin layer.

Table 1 Specifications of Sn-alloy (composition: at%)

Name	Sn	Cu	Zn	Ti	Ductility	Hv
Sn-2Ti	98	0	0	2	Good	11
Sn-20Cu	80	20	0	0	Good	32
Sn-50Cu	50	50	0	0	Brittle	—
Sn-20Cu-30Zn-2Ti	48	20	30	2	Good	25
Sn-10Cu-40Zn-2Ti	48	10	40	2	Good	20
Sn-31Zn	69	0	31	0	Good	20
Sn-5Cu-5Zn	90	5	5	0	Good	19
Sn-20Cu-5Zn	75	20	5	0	Good	23

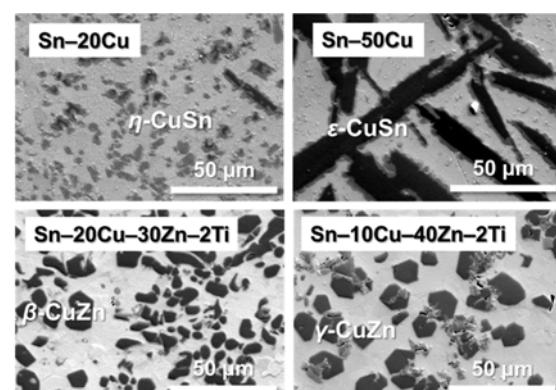


Fig.2. Comparison of microstructures of typical Sn-alloys.

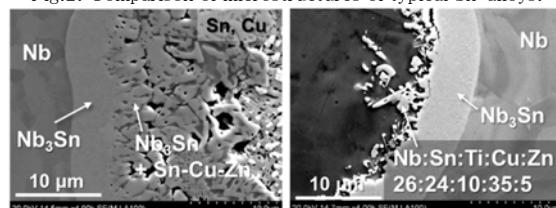


Fig.3. Comparison of microstructures at the reaction interface after annealing (650 °C × 100 h) for wires using Sn-20Cu-30Zn-2Ti (a) without and (b) with Cu thin layer.

# Nb<sub>3</sub>Sn 層形成を促進する Ti 添加場所に関する検討

## Investigation on Ti-doped locations that promote Nb<sub>3</sub>Sn layer formation

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

Ti は Nb<sub>3</sub>Sn の高磁場特性を向上させる添加元素として広く知られている。内部スズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材では、Ti 添加場所として Sn 芯、Nb 芯、Cu マトリクスの 3 通りが考えられる [1]。前回、Sn 芯および Cu マトリクスへの Ti 添加を主に調査し、Cu に Ti を添加することで、Sn および Ti の拡散が促進することを報告した。Ti を Sn 芯に添加した場合に形成される Ti 化合物層の抑制が主な要因と考えられる。今回、Nb 芯に Ti を添加する新しい方法を検討し、さらなる Nb<sub>3</sub>Sn 生成促進を確かめた。Ti を Nb 側に添加することで、Ti 化合物の形成はほぼ抑制され、Nb<sub>3</sub>Sn 層への Ti の拡散が進み、特に高磁場特性の大きな改善効果が見られた。

### 2. 断面設計コンセプト

微量 Ti を直接 Nb に固溶させず、Nb 芯の中心に Nb-47Ti 芯を配置し Ti の供給源とする。これによって流通する Nb と NbTi 合金を利用でき、製造コストの増大を抑制できると考えられる。まず外径 15.5mm の Nb ロッド中心に  $\Phi 3.5\text{mm}$  の穴をあけ、外径 3.4mm の Nb-47Ti ロッドを挿入し、外径/内径=18/16mm の Cu 管を被せて冷間加工を施す。加工の際、適宜中間焼鈍を行って材料を軟化させる。NbTi 芯は Nb の中心に配置されているので、Nb がバリアの役目となって Cu/Ti の相互拡散が防がれている。この設計で Nb 芯におけるオーバーオールの Ti 組成は 1.76at%と見積られる。

上記複合材を冷間加工により 1 mm 高さの六角形状にしたのち、121 本束ね、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  $\Phi 0.6$  mm まで伸線する。Nb バリア内の体積比は Cu:Nb:Sn=46:32:22 である。

作製した線材は 500°C-50 h + 685°C-100 h (もしくは 200 h) の熱処理を施し Nb<sub>3</sub>Sn 層を形成させた。試料の Nb<sub>3</sub>Sn 層を観察するとともに臨界電流を測定した。本試料はバリア厚が大きいので、non-Cu  $J_c$  の代わりに、バリアの内側面積で  $J_c$  を割った Matrix  $J_c$  を求めた。

### 3. 実験結果と考察

Nb/NbTi モジュールの伸線加工性は、適切な中間焼鈍を施すことで良好に保たれる。Fig. 2 に、100 h 保持後の Nb モジュール部の EDS マップを示す。Sn 芯に Ti を添加していた際に Nb モジュール外周に形成されていた Nb<sub>3</sub>SnTiCu 化合物の発生は確認されず、Sn が内部まで均一に拡散している様子がわかる。

Fig. 3 に、Ti 添加場所の異なる 3 種類の試料の Matrix  $J_c$  を比較した。Nb へ Ti を添加した試料で、高磁界特性が劇的に改善することが確認された。

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] T. Morita, T. Yagai, N. Banno, JALCOM 848 (2020) 155465, <https://doi.org/10.1016/j.jalcom.2020.155465>

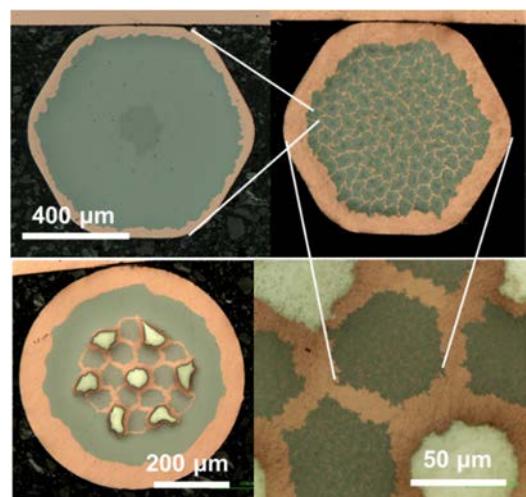


Fig.1. Cross-sectional design for distributed-Sn type Nb<sub>3</sub>Sn precursor wires.

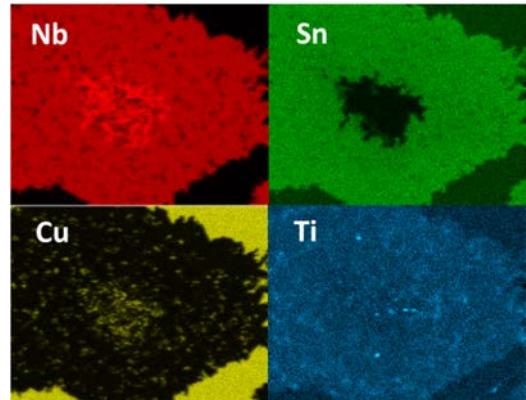


Fig. 2. EDS maps of Nb module after 685 °C for 100 h.

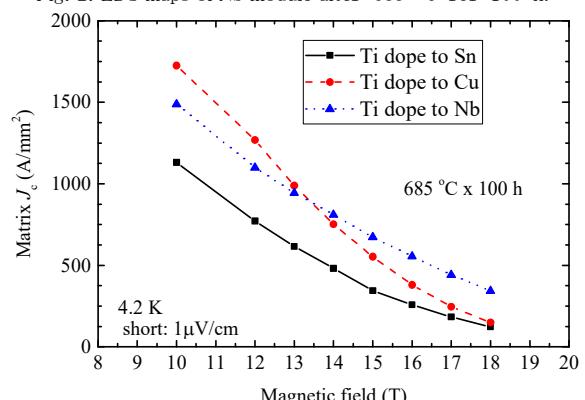


Fig.3. Comparison of Matrix  $J_c$ .

## YBCO 粉末を用いた NbTi ハイブリッド線材の開発

### Development of NbTi hybrid wires using YBCO powder

松岡 杏祐, 吉澤 侑希, 大橋 克也, 小黒 英俊(東海大); 淡路 智(東北大)

MATSUOKA Kyosuke, YOSIZAWA Yuki, OHASHI Katsuya, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)  
E-mail:3CAJM052@mail.u-tokai.ac.jp

#### 1. はじめに

我々のグループでは、上部臨界磁場が低い  $MgB_2$  を磁場に強い  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO)粉末で覆ったハイブリッド線材を開発し、YBCO の磁気遮蔽効果により強磁場下での通電性能の向上を実現した[1]。ところが、 $MgB_2$ 、YBCO とも粉末原料を使っていたことから、機械加工性が非常に悪く、その後作成した線材の多くが圧延途中で線材長手方向に亀裂が入ってしまった。ハイブリッド線材は、強磁場中における通電特性が良いことは分かっているが、その原因などの解明が全く進んでおらず、長尺線を作成する必要が急務であった。そこで、NbTi 線材に着目した。

NbTi 線材は、超伝導体が合金であり、機械加工が容易である。超伝導特性も低温低磁場では大きいが、上部臨界磁場が 12 T 程度のため、10 T 以上の強磁場下では使用が難しい。以上のことから、YBCO とのハイブリッド化により、粉末層が 1 つになり機械加工性の向上が見込めることが、強磁場下での通電特性向上が見込めるメリットがあると思われる。そこで今回は、 $MgB_2$  の代わりに NbTi を用い、YBCO とのハイブリッド線材作製を試みた。

本研究では、YBCO+NbTi のハイブリッド線材を作製し、その断面構造の観察、磁場中臨界電流の測定を行った。この時、 $MgB_2$  と同様に YBCO の磁気遮蔽効果で強磁場中臨界電流が向上するかを調べた。

#### 2. 実験方法

ハイブリッド線材作製にあたり、線径 0.8 mm の NbTi 線材(古河電工製)を用意した。YBCO 粉末は以下のように作製した。 $Y_2O_3$ (和光純薬、99.99 %)、 $BaCO_3$ (和光純薬、99.9 %)、 $CuO$ (和光純薬、95.0%)をモル比が  $Y:Ba:Cu=1:2:3$  になるように大気中で秤量し、混合した後、900°C × 4 h の仮焼き、930°C × 24 h の本焼きを行なった。その後、大気中で粉碎し、粉末状態にした。

YBCO+NbTi ハイブリッド線材の作製方法を示す。まず、市販の外径 4 mm、内径 3 mm、長さ 10 cm の真鍮管の片側にはんだで蓋をした。この時、管の中央に NbTi 線が配置されるよう蓋となるはんだで固定した。その周囲に YBCO 粉末を少しづつ入れて NbTi 線の側面全体を覆った。粉末を入れる際、上から叩き隙間なく詰めた。その後、もう一方もはんだで蓋をした。その後、大型溝ロール圧延機、小型溝ロール圧延機を用いて外径 1.44 mm、長さ 30.1 cm まで線引き加工を行った。

作製した NbTi ハイブリッド線材に対して、東北大学金属材料研究所強磁場センターの 15 T 超伝導マグネットを用いて 4.2 K、14 T 以下の臨界電流( $I_c$ )測定を行った。その後、NbTi ハイブリッド線材内部組織観察のため、樹脂に埋め、研磨をした後、走査型電子顕微鏡(SEM)での観察を行った。

#### 3. 実験結果および考察

Fig. 1 に作製した YBCO+NbTi ハイブリッド線材の断面図を示した。NbTi 線材の周りに YBCO が詰まっていることがわかり、真鍮管と NbTi 線が接触しているところは見られなかった。その断面構造は参考文献[1]と同様のものが得られたことがわかった。

Fig. 2 に 4.2 K、14 T 以下における  $I_c$  の磁場依存性を示した。丸がハイブリッド線材、四角が同時に測定した通常の NbTi 線の結果である。通常の NbTi 線の  $I_c$  は、非常に大きな磁場依存性が見られ、12 T の上部臨界磁場付近では臨界電流は見られない。一方、ハイブリッド線材では、通常の線材に

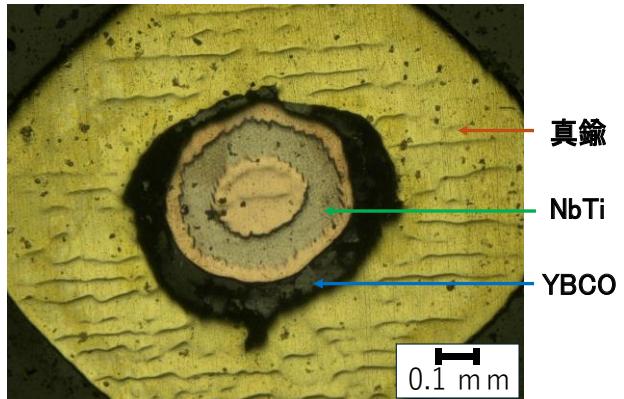


Fig. 1 Optical microscope image of the cross section in YBCO and NbTi hybrid wire.

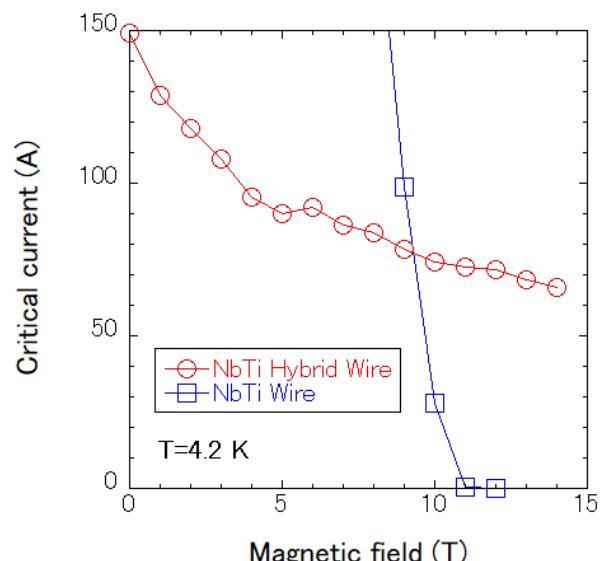


Fig. 2 Critical current as a function of magnetic field for YBCO and NbTi hybrid wire and NbTi wire at 4.2 K up to 14 T.

比べて低磁場での電流値が低くなってしまったものの、緩やかに  $I_c$  が変化しており、14 T で 70 A の臨界電流が見られた。この結果は、NbTi 線の上部臨界磁場を超えてでも電流が流れることを示している。これより、NbTi ハイブリッド線材でも YBCO による磁気遮蔽効果が現れており、上部臨界磁場を超えてでも超伝導電流が流れる原因であると考えている。さらに、今回はこれまで以上に長い線材が作製できたことから、基礎特性の測定に十分なハイブリッド線材が確保できる目処がついたことになる。

#### 謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの課題(202312-HMKGE-0036)の一部として行われた。本研究の一部は、東海大学高度物性評価施設及び、核融合科学研究所一般共同研究(研究コード NIFS23KIEA038)の支援を受け、実施したものである。

#### 参考文献

1. K. Ohashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.78

## HIP 处理された内部マトリックス補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の機械強度特性

### Mechanical strength of the internal matrix reinforced Nb<sub>3</sub>Sn multifilamentary wires with HIP processing

菱沼 良光 (核融合研・総研大・物材機構); 小黒 英俊 (東海大); 能登 裕之 (核融合研・総研大); 矢田 裕貴 (総研大);

谷口 博康 ((株) 大阪合金工業所); 淡路 智 (東北大金研); 菊池 章弘 (物材機構)

HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS・SOKENDAI・NIMS); OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); NOTO Hiroyuki (NIFS・SOKENDAI);

YATA Hiroki (SOKENDAI); TANIGUCHI Hiroyasu (OAW); AWAJI Satoshi (IMR, Tohoku Univ.) and KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

取扱やすく高強度特性を有する Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発を目的に、三元系ブロンズ合金母材からの固溶強化による内部マトリックス補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材を検討している。これまでに Cu-Sn-In 三元系ブロンズ合金を線材母材に適用することで、引張及び圧縮変形における臨界電流特性劣化の抑制効果が高いことが明らかとなった<sup>1)</sup>。一方、1980 年代に Nb<sub>3</sub>Sn 線材における種々の HIP 处理効果が検討された経緯があり、特に臨界電流特性のひずみ依存性が改善された<sup>2)</sup>。

そこで、内部マトリックス補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の更なる高強度化を図る目的で、熱処理プロセスへの熱間等方静水圧焼結 (Hot Isostatic Pressing; HIP) の適用を行った。本報告では、HIP 处理の有無による内部マトリックス補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界電流特性における引張応力・ひずみ依存性を評価した。

#### 2. 実験方法

本研究における内部マトリックス補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の線材母材として用いた Cu-Sn-In 三元系ブロンズ合金母材の組成は、Cu-14.0mass%Sn-2.0mass%In-0.3mass%Ti (2.0In) 及び Cu-10.0mass%Sn-5.0mass%In-0.3mass%Ti (5.0In) の 2 つの組成とした。これらの三元系合金を用いて作製した極細多芯線と比較材である市販のブロンズ法極細多芯線材(16Sn)をそれぞれ用意した。これらの極細多芯線材について、Ar 霧囲気にて 550°C × 100h + 650°C × 100h の 2 段熱処理を行った。その後、一部の線材試料について核融合研に設置された HIP 装置にて 200MPa の高圧 Ar 霧囲気下で 650°C × 2h の HIP 处理を実施した。その後、ひずみゲージを線材表面に固着させた。

Nb<sub>3</sub>Sn 相生成熱処理及び HIP 处理した後の種々の線材における引張変形下での臨界電流測定は、東北大金研強磁場超伝導材料研究センターにある一軸引張応力印加機構を持つ特殊プローブを用いて、4.2K@15T の条件で直流四端子法にて測定した。なお、臨界電流におけるクライテリオンを 1 μV/cm の電圧発生とした。試料は 40mm で切断し、プローブ両端の電流導入 Cu 電極に、そして電圧タップはひずみゲージを挟むようにそれぞれハンド付けした。線材に印加される引張荷重(N)を共和電業製の 1kN ロードセルにて測定し、印加された引張応力はその引張荷重を線材断面積で除した値とした。引張ひずみは、接着させた 2 つのひずみゲージの平均値とした。

#### 3. 実験結果

Fig.1 に HIP 处理における処理温度と処理圧力の波形を示す。本研究の HIP 处理は、先に目的の圧力まで昇圧させる昇圧先行プログラムにて実施した。HIP 装置における Ar ガスの昇圧は、ガス圧縮機と温度上昇に伴うガス膨張を利用し、自動にて圧力を制御している。Fig.1 からも分かるように、HIP 处理は先に 200MPa まで昇圧され、その後 650°C で 2 時間の熱処理であった。Fig.2 に 2.0In 試料における HIP 处理の有無による規格化  $I_c$  ( $I_c \sigma / I_{c\max}$ ) 特性の一軸引張応力依存性を示す。規格化  $I_c$  は、各引張応力下での  $I_c$  値を最大の  $I_c$  値で除した値とした。HIP 处理によって、線材の破断応力が 474MPa まで約 15% 向上した。また、規格化  $I_c$  のピークが得られる引張応力も 104MPa から 163MPa まで約 55% 向上した。なお、これらの HIP 处理による挙動は、5.0In 試料でも同様に観察された。以上のことから、内部マトリックス補強線材においても、HIP 处理は機械強度を向上させる効果があることが示唆された。本発表では、In 組成の影響や微細組織変化についても報告する。

理は先に 200MPa まで昇圧され、その後 650°C で 2 時間の熱処理であった。Fig.2 に 2.0In 試料における HIP 处理の有無による規格化  $I_c$  ( $I_c \sigma / I_{c\max}$ ) 特性の一軸引張応力依存性を示す。規格化  $I_c$  は、各引張応力下での  $I_c$  値を最大の  $I_c$  値で除した値とした。HIP 处理によって、線材の破断応力が 474MPa まで約 15% 向上した。また、規格化  $I_c$  のピークが得られる引張応力も 104MPa から 163MPa まで約 55% 向上した。なお、これらの HIP 处理による挙動は、5.0In 試料でも同様に観察された。以上のことから、内部マトリックス補強線材においても、HIP 处理は機械強度を向上させる効果があることが示唆された。本発表では、In 組成の影響や微細組織変化についても報告する。

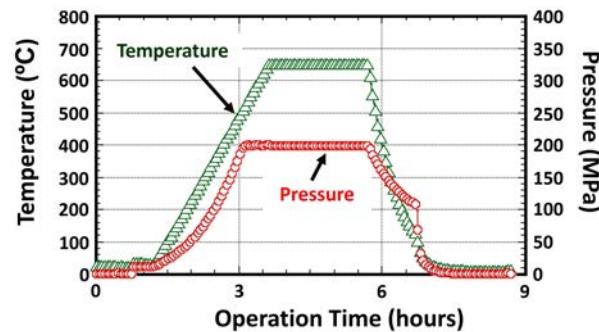


Fig. 1 The temperature and pressure profiles on the HIP treatment after Nb<sub>3</sub>Sn synthesis heat treatment (two-stage heat treatment).

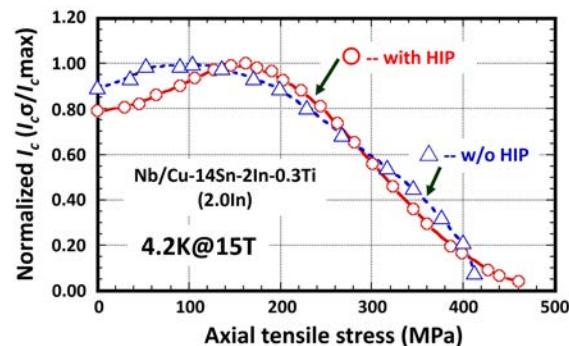


Fig. 2 Axial tensile stress dependence of the normalized  $I_c$  ( $I_c \sigma / I_{c\max}$ ) properties in the 2.0In sample with and without HIP processing.

#### 参考文献

- [1] Y. Hishinuma et al., J. Nucl. Mater., 567, 2022, 153808, (8pp).
- [2] T. Fukutake et al., Adv. in Cryo. Eng., 30, 1984, pp.891-898.

謝辞 本研究は、核融合研運営交付金(ASU010)、科研費(基盤(B)20H01889)、及び東北大金研国際共同利用・共同研究拠点事業(GIMRT)の支援のもと実施された。

## コンジット形状に起因する撓り乱れがケーブル・イン・コンジット導体における電流分布に及ぼす影響

Effect of twist disturbances due to conduit geometry on current distribution in cable-in-conduit conductors

矢崎 一斗, 阿部 吉三, 小林 宏泰, 宮城 大輔(千葉大学); 津田 理, 濱島 高太郎(東北大学)

YAZAKI Kazuto, ABE Kichizo, 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、ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体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、コンジット内側が四角形状のCIC導体の素線軌跡を推定し、各素線の自己インダクタンスと相互インダクタンスから、撓りピッチと電流分布の関係について検討を行ってきた<sup>[1]</sup>。CIC導体は多段に撓られた超電導素線の束がコンジット内に押し込められた構造のため、コンジット内側の形状が素線の撓り乱れに影響し、各素線のインピーダンスの不均一性に影響を及ぼすと考えられる。本報告では、コンジット内側が円形状のCIC導体の電流分布を計算し、四角形状のCIC導体の電流分布の計算結果<sup>[1]</sup>と比較を行うことで、コンジット内側の形状がCIC導体の電流分布に及ぼす影響について検討を行った。

### 2. 解析手法

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、円形状としたCIC導体内の全ての素線軌跡を計算により推定した。素線を2mm毎の素線要素に分割し、素線の自己インダクタンスは素線要素の自己インダクタンスの和と、同一素線における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、素線間の相互インダクタンスは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<sup>[1]</sup>。実際のCIC導体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

これまでの検討結果より、直線形状のCIC導体において1次サブケーブルの撓りピッチが短く、各次のサブケーブルの撓りピッチの最小公倍数長さが十分に長いときに偏流が抑えられるとしている<sup>[1]</sup>。本報告ではTable 1に示す撓りピッチの構造が異なる5種類のCIC導体(Model A～E)において、コンジット内側の形状が円形状と四角形状の違いによる電流分布の比較を行った。Table 2に計算を行ったCIC導体の諸元を示す。コンジット内側の形状の違いが電流分布に及ぼす影響を検討するため、円形状と四角形状でCIC導体のボイド率が等しいモデルとした。

Fig. 1にModel A～Eのコンジット内側形状が円形状と四角形状のそれぞれにおける各素線に流れる電流の標準偏差を示す。Models A, Bにおいて、円形状にすることで偏流が増大している一方で、Models C, D, Eでは円形状にすることで偏流が抑制できていることが確認された。

Fig. 2に四角形状から円形状にすることで最も偏流が抑制されたModel Eの素線に流れる電流を示す。結果より、四角形状に比べて円形状の方が、素線に流れる最大電流を大幅

に低減することができ、標準偏差も19.0 Aから14.3 Aとなり、24.8%の改善が見込まれる結果が得られた。以上の結果より、コンジット内側は円形状とする方が偏流を抑制できると考えられる。

### 参考文献

1. Ryota sato et al.: IEEE Trans. Applied supercond., 480265, Vol.: 34, Issue: 5, Aug. (2024)

Table 1 Combinations of twist pitches for five different models.

Twist pitch [mm]	1st	2nd	3rd	4th	5th
Model A	80	100	160	200	400
Model B	45	105	225	315	525
Model C	50	80	100	200	400
Model D	25	50	100	200	400
Model E	80	160	240	280	400

Table 2 Specifications of the analytical models for the CICCs.

Shape	square	circular
Cable pattern	3x3x3x3x6	
Strand diameter [mm]	0.89	
Critical current of strand at 5T and 4.2K [A]	200	
Void fraction [%]	39.5	
Operating current [A]	29160	

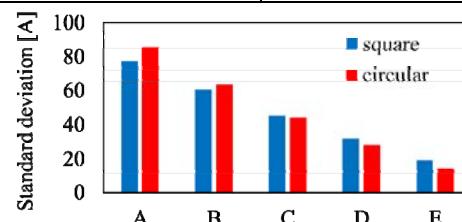


Fig.1 Effect of the difference between square and circular inner shape of conduit conductors with various combinations of twist pitches on the standard deviation of current flowing through each strand.

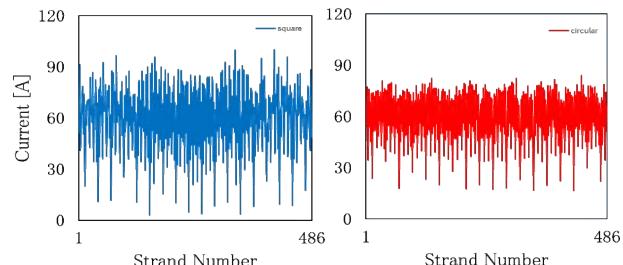


Fig. 2 The current distribution through each strand of a CIC conductor with circular and square internal conduits in model E is as follows.

# SuperKEKB 用超伝導六極電磁石システムの開発

## ～補正コイル用 Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ケーブルの機械的曲げ歪に対する特性評価～

### Development of superconducting sextupole magnet system for SuperKEKB

### ～Characterization of Nb<sub>3</sub>Al superconducting cable under mechanical bending strain for corrector magnet～

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  $4.65 \times 10^{34}$  の [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] ピークルミノシティー(衝突頻度)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 超電導電磁石の製作を検討している。これまで我々は、直径 50  $\mu\text{m}$  超細線 Nb<sub>3</sub>Al ストランド線で構成された超電導ケーブルの直線状の臨界電流値の温度・磁場依存性および曲げ半径の臨界電流依存性を調査してきた[3]。10mm の曲げ半径を持ったケーブルの臨界電流を測定すると大きな劣化が見られた。この原因を調べるために、マイクロ CT スキャン装置を使ってケーブルの CT 画像を撮影した。さらに、連続的な曲げ歪が超伝導特性に与える影響を調べるために、ソレノイドコイル形状に巻いた Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ケーブルの臨界電流値の測定を行ったので報告する。

#### 2. 曲げ歪を持った Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ケーブルの臨界電流測定

25 mm から 10 mm まで 2.5 mm ステップで曲げ半径を変化させた Nb<sub>3</sub>Al 超伝導ケーブルの臨界電流値の測定を行った。15 mm 以上の曲げ半径では、臨界電流の大きな劣化は見られなかったが、12.5 mm および 10 mm の曲げ半径を持ったケーブルの臨界電流は劣化を示した。CT 装置を用いて劣化したケーブルの調査を行ったところ、クラックが入っている様子が数か所観察された(Fig. 1)。このクラックが、臨界電流値の劣化の原因となっていると考えられる。

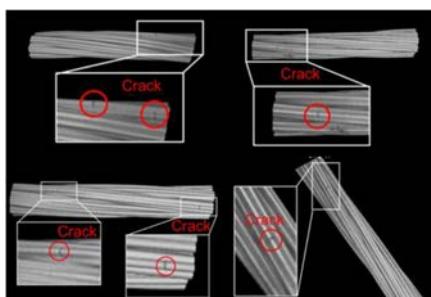


Fig. 1. CT image of the Nb<sub>3</sub>Al cable with the highest degradation of critical current (R = 10 mm).

#### 3. ソレノイドコイル形状の Nb<sub>3</sub>Al ケーブルの臨界電流測定

連続的な曲げ歪が Nb<sub>3</sub>Al ケーブルの超伝導特性に与える影響を調べるために、ソレノイドコイル形状の Nb<sub>3</sub>Al ケーブルの臨界電流測定を行った。Fig. 2 にテストコイルの写真を示す。機械加工により円筒形の G10 に螺旋状の溝を製作し、この溝

に Nb<sub>3</sub>Al ケーブルを沿わせアルダイトで固定した。これを液体ヘリウムに浸漬し、4.2 K において通電試験を行った。

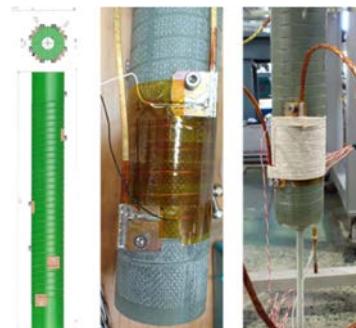


Fig. 2 Measurement folder Nb<sub>3</sub>Al cable in the shape of solenoid coil.

R25 mm、5 ターンのケーブルの測定結果を Fig. 3 に示す。7 回測定を行い、最終的な臨界電流は 698 A であった。この値は直線時の臨界電流値(740 A)と比べ低く、自己磁場(0.1 T)の影響であると考えられる。

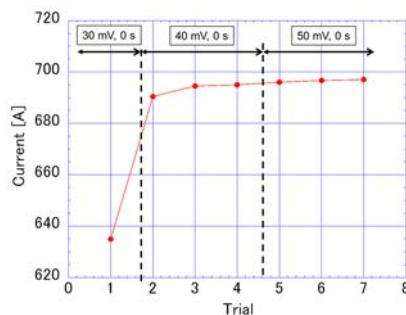


Fig. 3. Change in maximum current value with quench detector setting.

#### 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 Nb<sub>3</sub>Al Cable for SuperKEKB Superconducting Sextupole Magnet System", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.33, no 5 Aug. 2023, Art. no. 6000305.

# REBCO 薄膜線材の磁束ピンニング特性の TDGL 解析

## TDGL Analysis of Flux Pinning Properties in REBCO Thin Film Wires

松本 要(名大、九工大); 堀出 朋哉, 吉田 隆(名大)  
MATSUMOTO Kaname (Nagoya Univ., Kyutech); HORIDE Tomoya, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)  
E-mail: matsu@post.matsc.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO (REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>) 超伝導薄膜線材の大量生産技術の開発が急速に進展している。REBCO 薄膜線材は低温・高磁場における臨界電流密度( $J_c$ )特性に優れており、小型核融合装置などの高磁場発生コイルへの応用展開が期待されている。その磁場中  $J_c$  特性は REBCO 薄膜中に存在する微細組織による量子化磁束のピン止め特性に強く依存している。特に最近では、ナノロッドやナノ粒子などの人工ピン(APC)を導入することで性能の向上が多數報告されている。しかし、ピン止め特性の決定には、人工ピンだけではなく、薄膜中に存在する多数の格子欠陥、例えば酸素欠損や転位などのランダムピンの存在が大きく関わっている。実験的に観測される巨視的ピン止め力  $F_p = J_c \times B$  は、

$$F_p = \sqrt{(F_p^{column})^2 + (F_p^{random})^2}$$

のようふるまうと予測されている。<sup>1,2)</sup> ここで  $F_p^{column}$  は人工ピン、 $F_p^{random}$  はランダムピンによる効果である。実験的にランダムピンの濃度を自由に変えて最適な  $F_p$  を実験的に見出すことは難しいが、我々は時間依存 GL 方程式(TDGL)を用いたシミュレーション解析によって、ランダムピンがどのように全体の  $F_p$  に影響を与えるかを調べてきた。実際にはありえないが、仮想的にランダムピンを取り除き、人工ピンだけの効果を調べたところ、低磁場では高い  $J_c$  を示すが、中高磁場では  $J_c$  は急速に低下することもわかっている。このように磁場中  $J_c$  の振る舞いにはランダムピンの存在が大きく関わっている。そこで本研究では、強いピン止め力を有する人工ピンとランダムピンとの関係を深く理解するため、TDGL シミュレーションによるさらなる解析を進めた。

### 2. 実験方法および解析法

本研究では、次の TDGL 方程式(large  $\lambda$  limit)を用いた。

$$\begin{cases} u(\partial_t + iq)\psi = \varepsilon(\mathbf{r})\psi - |\psi|^2\psi + (\nabla - i\mathbf{A})^2\psi \\ \nabla^2 q = \nabla \operatorname{Im}\{\psi^*(\nabla - i\mathbf{A})\psi\} \end{cases}$$

ここでは計算コストを抑えるため 2 次元モデルを採用した。また実際の REBCO 薄膜を想定し、ナノロッドピンと酸素欠損ランダムピンを計算メッシュ上に配置した。ナノロッドは、実験的

に知られている直径や濃度を想定して導入した。ランダムピンも異なる酸素欠損濃度を想定して 3 水準用意した。Fig.1 に計算モデルの模式図を示す。薄膜の  $T_c$  は 90 K、測定温度を 4.2 K と 20 K、磁場  $B$  は薄膜面に垂直( $B \parallel c$ )に印加し  $B = 0 \sim 0.25$  の範囲で、また電流  $J$  は  $J = 0 \sim 0.1$  の範囲で与えた。TDGL 方程式は無次元化されており、磁場  $B$  は  $B_{c2}$ 、および電流  $J$  は対破壊電流  $J_d$  で規格化されている。0 K におけるコヒーレンス長を 1.5 nm、GL パラメータ = 100 とすれば、シミュレーションで与えた磁場と電流の最大値は 37 T と 78 MA/cm<sup>2</sup> に対応する。

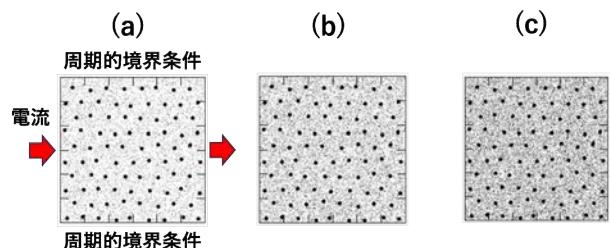


Fig.1 The distribution of pinning centers on the computational mesh when fixing the diameter of the nanorods (6 nm) and the concentration (5%) while varying the amount of oxygen deficiency at three levels. The top and bottom of each figure represent periodic boundary conditions, while the left and right sides represent boundary conditions for current injection and extraction.

### 3. 結果と考察

まず、酸素欠損量を一定にして、ナノロッドの濃度を 3%から 6%に変化させた場合の  $F_p$ - $B$  特性の変化を調べた。ナノロッド濃度を増大させることによってマッチング磁場の高磁場側へのシフトが見られ  $F_{p,max}$  の増大も認められた。ナノロッド濃度を 5%程度と固定し、酸素欠損量を 3 水準で変化させると適度な酸素欠損量の場合、高磁場  $F_p$  が増大したが入れすぎると  $F_p$  が低下した。これは超伝導領域が劣化し、量子化磁束のデピンニングが起こりやすくなっていると推測された。詳細に関しては当日報告する。

### 参考文献

1. T. Matsushita, A. Matsuda, and K. Yanagi, *Physica C* 213, 477 (1993).
2. Awaji S, Namba M, Watanabe K, Kai H and Mukaida M *J. Appl. Phys.* 111 013914 (2012).

## ツイストした RE 系コート線材の縦磁界特性の評価

### Evaluation of longitudinal magnetic field properties of twisted RE coated wires

濱本 拓郎, 相廣 祐介, 濱田 凌輔, 木内 勝(九工大)  
 HAMAMOTO Takuro, AIHIRO Yusuke, HAMADA Ryosuke, 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2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、2次元的な電流の流れを3次元的な流れに変えることができる。

これまでに市販されている RE 系コート線材にツイストを加え、縦磁界下での  $I_c$  特性を評価してきた[1]。特に評価を行った線材についてツイストを加えると、 $I_c$  のピーク位置や磁界依存性が変化することがわかつてき。そこで本研究では数百メートルの線材が販売されている Faraday Factory Japan 社製 RE 系コート線材に注目し、ツイストのピッチ長を変化させることにより、 $I_c$  特性がどのように変化するかを調べた。

#### 2. 実験方法

本研究では、数百メートルの線材生産が可能で、比較的銅メッキ層が薄くツイストが容易な Faraday Factory Japan 社製 RE 系コート線材を用いた。線材の幅は 4 mm で、線材全体の厚さ 0.07 mm、77 K の自己磁界における  $I_c$  は 250 A 程度で、人工ピンは  $\text{Y}_2\text{O}_3$  である。

線材へのツイストは、線材と同じ幅の銅板を切り出してツイストを加え、その銅板に RE 系コート線材を這わせ、カプトンテープで固定した。ツイストの方向は電流通電による自己磁界を考慮し Z 卷き方向とした。本研究ではツイストピッチ(TP=[mm])は 1 ピッチの線材長さとして定義した。なお、特性比較のためにツイストしていないフラットな線材:Flat も評価した。 $I_c$  は直流四端子法を用いて電界  $E$  - 電流  $I$  特性を測定し、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$  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。なお測定はすべて液体窒素中 77 K で実施した。

#### 3. 測定結果と解析

Fig. 1 に Flat の自己磁界における臨界電流  $I_c^{\text{Flat}}$  で  $I_c$  を規格化した  $I_c/I_c^{\text{Flat}}$  の TP 依存性を示す。TP=200 では  $I_c$  の劣化はなく、TP=150 まで  $I_c$  は緩やかに減少した。同様に  $I_c$  が減少する特性が報告されている [2]。

Fig. 2 に TP を変化させた場合の  $I_c/I_c^{\text{self}}$  の縦磁界特性をそれぞれ示す。全ての TP 線材で Flat 線材とは異なり、0.10 T 付近で  $I_c$  のピークが現れた。また、 $I_c$  の増加は 1 % 程度であった。さらに磁界の増加と共に  $I_c/I_c^{\text{self}}$  は減少するが、TP=200 は特にその減少が著しい。また、TP=150 と TP=175 の磁界依存性は同様な特性を示すが、ツイストによる  $I_c$  の劣化により TP=150 の  $I_c$  値は TP=200 よりも小さい。従って、今回測定を行った磁界領域では TP=175 で高い  $I_c$  特性が得られた。

この TP=200 の  $I_c$  特性の測定結果について、①ツイストによって加わる歪み [3] による  $I_c$  劣化と②磁界と電流の平行度の変化を考慮して解析を行った。Fig. 3 に解析結果と実験結果の比較を示す。解析結果では実験結果のような大きなピークはないが、0.10 T 近傍で緩やかなピークを示し、0.15 T 以上では定性的な一致が得られた。解析の詳細および TP=175、TP=150 の解析結果については当日発表する。

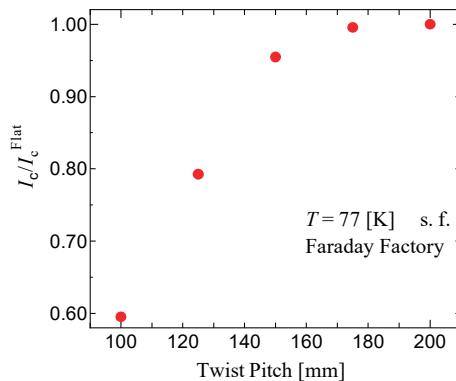


Fig. 1 Twist pitch dependence of  $I_c/I_c^{\text{Flat}}$ .

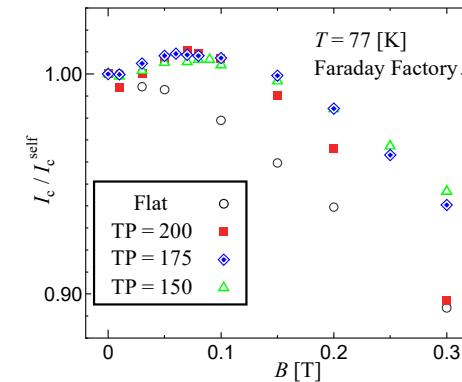


Fig. 2 Longitudinal magnetic field dependence of  $I_c/I_c^{\text{self}}$  for TP=200 mm, TP=175 mm, TP=150 mm and Flat at 77 K.

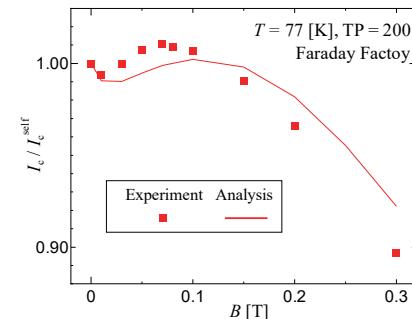


Fig. 3 Comparison of experimental results and analysis results for at 77 K for TP=200.

#### 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. T. Hamamoto *et al.*, Abstract of CSSJ Conference Vol. 107 (2024) p.22
2. Y. Tanaka *et al.*, Abstract of CSSJ Conference Vol. 104 (2022) p. 52
3. M. Takayasu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 014011

## 酸化物原料を用いた FF-MOD 法 Y123 薄膜における共添加効果

Effects of co-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, Motoiki Takanori, Shimoymaya 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酸塩塗布熱分解(FF-MOD)法は、RE123 結晶の成長が非常に速く[1]、常圧下の簡単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  $M$  ( $M = \text{Zr, Sn, Hf}$ ) を共添加することにより、膜中に生成する非超伝導の  $\text{BaMO}_3$ (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]。また、あらかじめ固相反応法によって合成した Y123 粉末から直接調製する新しい製法の FF-MOD 法原料溶液を用いることにより  $J_c$  が高い RE123 薄膜が従来法の溶液を用いた場合より広い焼成条件で得られることが明らかになった[3]。今回は、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結果を報告する。

### 2. 実験方法

Y123 粉末を直接プロピオン酸に溶解し、乾固後に適量の塩酸と溶媒を加えることにより Y123(Cl)溶液を調製した。 $M$ (Zr, Hf)添加には EMOD 塗布型材料を用い、Mg 添加には  $\text{MgO}$  をプロピオン酸に溶解、乾固した粉末を溶媒に溶かしたもの用い、これらを Y123(Cl)溶液に混合した。得られた原料溶液を IBAD 基板上にスピノコート法により塗布した後、仮焼を行った。共添加 Y123 薄膜はこの塗布と仮焼を 3 回繰り返し、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  $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$ ,  $780^\circ\text{C}$ , 30 min で作製した(Cl, Zr)共添加 Y123 薄膜の XRD パターンを示す。いずれの試料でも Y123 の鋭い  $00l$  ピークが見られ、 $c$  軸配向した Y123 薄膜が生成した。20 mol%Zr 添加試料では Y123 の無配向領域による 103 ピークが出現した。Fig. 2 に  $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$ ,  $740 - 760^\circ\text{C}$ , 1 - 6 h で作製した共添加 Y123 薄膜(Cl, Mg 2-3: 仮焼膜の 2, 3 層目に Mg を Y に対して 20% 添加)の XRD パターンを示す。Y123 の鋭く強い  $00l$  ピークが確認できた。Fig. 3 に Fig. 2 に示した試料における磁化率の温度依存性を示す。20%Mg 添加試料は  $T_c$  はいずれも大きく低下したが、鋭い超伝導転移を示した。講演では、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。さらに Mg を希薄ドープした試料の超伝導特性についても報告する予定である。

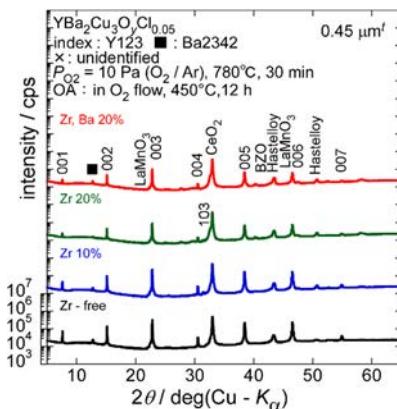


Fig. 1. XRD patterns of (Cl, Zr) co-doped Y123 thin films.

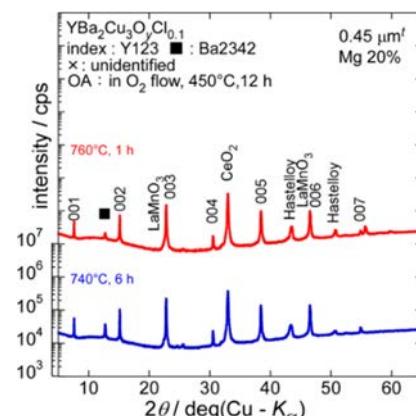


Fig. 2. XRD patterns of (Cl, Mg) co-doped Y123 thin films.

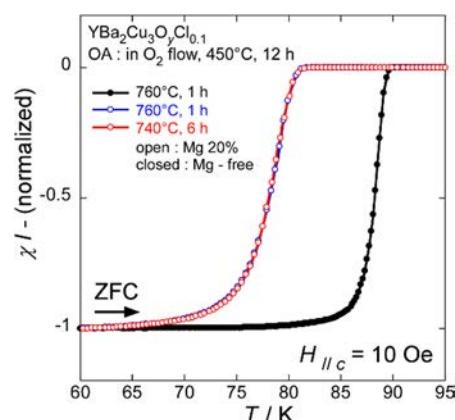


Fig. 3. ZFC magnetization curves of (Cl, Mg) co-doped Y123 thin films

### 参考文献

- [1] Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804
- [2] T. Motoiki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 015006
- [3] K. Sagara *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* Vol.107 (2024) p73.

## RE123 薄膜作製における FF-MOD 法原料溶液中の金属濃度調整

Control of metal concentration in FF-MOD solution for the synthesis of RE123 thin films

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

フッ素フリー有機酸塩塗布熱分解(FF-MOD)法は様々なRE123薄膜の作製方法のなかで、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により薄膜線材開発に最も適した方法とある。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ため他の方法で得られるRE123薄膜より磁場中の臨界電流特性は劣っていたが、最近、200m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<sup>[1,2]</sup>、低い臨界電流特性の課題がほぼ解決されつつある。さらに、原料溶液への適量Cl添加によって焼成時の昇温過程で生成する2軸配向Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>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明らかにしてきた<sup>[3]</sup>。しかし、実用に十分なJ<sub>c</sub>を有するRE123線材の開発では、膜厚を2μm以上にする必要があり、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金属濃度が低いこと(1 mol/L以下)に起因するものである。また、これまでのRE123薄膜用FF-MOD溶液は、各構成金属の酢酸塩またはアセチルアセトン錯体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調製されていたが、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、また仮焼時に有機酸塩の熱分解が多段階で起こり元素が偏析しやすいという問題もあった。これに対し、我々は既製のRE123焼結体またはその粉末を直接プロピオノ酸塩に溶解させる工程から出発したFF-MOD原料溶液は、金属組成制御が容易になるだけでなく、J<sub>c</sub>が高いRE123薄膜が成長する焼成条件をこれまでの原料溶液と比べて低温側に広げることを見出した<sup>[4]</sup>。このように従来の原料溶液と異なる性質を持つことから、本研究では塗布一回当たりの厚膜化のための溶液中の総金属の高濃度化と、逆に総金属濃度が低い滴下-乾燥によって原料膜を形成するための溶液調製を進めている。後者については、超伝導接合作製や線材の劣化箇所の補修に生かすことを狙っている。

### 2. 実験

RE123焼結体またはそれを粉碎した粉末をプロピオノ酸(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>COOH)に室温~80°Cで溶解後、80~130°Cに加熱し過剰なプロピオノ酸を気化させて得られた固化物を粉碎した。このRE、Ba、Cuを含むプロピオノ酸塩粉末を、メタノール、ブタノール、水の混合溶媒に溶解しFF-MOD法塗布原料溶液を作製した。RE123薄膜はSrTiO<sub>3</sub>単結晶またはCeO<sub>2</sub>層を最表面に設けたIBAD基板上において、原料膜の形成、仮焼を繰り返した後、本焼成することにより作製した。原料膜は高金属濃度溶液の場合にはスピニコート法による塗布、低金属濃度溶液の場合には滴下-乾燥によって形成した。

### 3. 結果と考察

これまでに、RE元素がY、La、Nd、Sm、Gd、Dy、Ho、Er、YbについてRE:Ba:Cu=1:2:3のプロピオノ酸塩が得ら

れることを確認しており、La123を除いてエピタキシャル薄膜が得られている。このなかで、Y123用の原料溶液について金属濃度の調整を試みた。プロピオノ酸塩粉末に加える混合溶媒の重量比はこれまで、水:メタノール:ブタノール=1:3.6:3.6程度としていたが、メタノール、ブタノールを減らしていくと、プロピオノ酸塩の溶解に必要な溶媒の量が減らせることがわかり、総金属濃度を2.2 mol/Lまで高めた溶液が得られている。ただし、室温の保存では黒色の沈殿が生じやすく、また、厚い塗布膜の場合の仮焼条件などを最適化する必要があり、これらは今後の課題である。なお、黒色の沈殿が生じた溶液を用いてもほぼ単相のY123薄膜が得られることから金属組成比は大きくずれないことが示唆された。

低金属濃度の溶液は総金属濃度1.3 mol/Lの原料溶液に有機溶媒や水を加え、希釈することにより作製した。基板上に滴下後乾燥する過程で液体の部分が基板面内で収縮するような溶液を用いると原料膜の表面に凹凸が生じるので、できるだけ平坦な原料膜が残る溶媒を探索している。Fig. 1は市販のY123/IBAD線材上に酢酸イソペンチルで希釈し総金属濃度~0.1 mol/Lとした溶液を滴下、乾燥後、仮焼、本焼成を行った試料の表面XRDパターンである。この希釈溶液においても少量の黒色沈殿が生じていたが、得られた試料の表面は配向したY123相であった。また、表面の微細組織にも顕著な劣化は認められず、このような層を介した接合試料は超伝導転移を示した。

### 参考文献

- [1] T. Yoshihara *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33** (2023) 6600205
- [2] G. Honda *et al.* ASC2024, 1MOr2B-06 (2024)
- [3] T. Motoki *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **27** (2014) 095017
- [4] J. Shimoyama *et al* Abstract of CSSJ Conf. Vol.107 (2024) p.72.

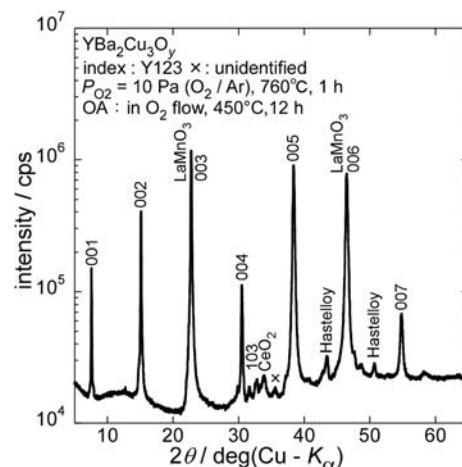


Fig. 1 Surface XRD pattern of a new Y123 layer capped commercial Y123/IBAD tape.

## IBAD 基板上フッ素フリーMOD REBCO 線材の作製

### Fabrication of fluorine-free MOD REBCO tapes on IBAD templates

吉原 健彦, 本田 元気, 稲垣 充, 伊東 智寛, 永石 竜起, 小林 慎一 (住友電工);  
蟹江 澄志 (東北大, SRIS); 岡田 達典 (九大); 淡路 智 (東北大, 金研)

YOSHIHARA Tatsuhiko, HONDA Genki, NAGAISHI Tatsuoki, KOBAYASHI Shinichi  
(Sumitomo Electric Industries, Ltd.); KANIE Kiyoshi (SRIS, Tohoku Univ.);

OKADA Tatsunori (Dept. of Mater. Sci. and Eng., Kyutech); AWAJI Satoshi (IMR, Tohoku Univ.)

E-mail: yoshihara-tatsuhiko@sei.co.jp

#### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (REBCO)薄膜の作製方法の中で、有機金属塗布熱分解法(MOD 法)は真空装置を必要とせず、高い原料収率が実現できる手法である。その中でもフッ素フリー MOD(FF-MOD)法は、良好な 2 軸配向膜を短時間で得ることができるため[1, 2]、低コストな量産線材を実現可能とする工業的に優れた製法と考えられる。課題であった人工ピン導入と長尺線材への適用に対し、我々は BaMO<sub>3</sub> (BMO)ナノ粒子を溶液へ添加する方法および多結晶化熱処理の導入により、FF-MOD 法による 120 m 長の人工ピン入り REBCO 線材の作製に成功したことを報告した[3]。

従来、Ni/Cu/SUS から成るクラッド基板[4]上の結果について報告してきたが、今回、基板薄膜化、高強度化の観点から IBAD 基板上に FF-MOD REBCO 線材を作製したため、その結果について報告する。

#### 2. 実験方法

IBAD 基板上へ RF スパッタリング法により中間層 CeO<sub>2</sub>を成膜した。ソルボサーマル法[5]により作製した BMO (M = Zr, Hf)ナノ粒子を添加したフッ素フリー GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (GdBCO) 溶液をダイコートにより塗布し、酸素雰囲気下で仮焼後、BaCO<sub>3</sub> の分解、超電導層の多結晶化を目的とした熱処理を行った後、低酸素雰囲気下にて本焼を行うことで人工ピン入り REBCO 層を成膜した。長手方向の  $I_c$  分布は THEVA GmbH 社製 Tapestar を用いて液体窒素中で評価を行い、部分的に切断した試料の四端子法通電  $I_c$  評価値を基に補正した。磁場中  $I_c$  はマイクロブリッジを形成したサンプルを用いて、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター所有の無冷媒超伝導マグネット 20T-CSM, 25T-CSM により評価を行った。

#### 3. 実験結果

Fig. 1 に  $\Delta \phi$  の REBCO 膜厚依存性を示す。REBCO 膜厚が 0  $\mu\text{m}$  の点は、CeO<sub>2</sub>(111)の  $\Delta \phi$  であり、それ以外の点は REBCO(103)の  $\Delta \phi$  である。 $\Delta \phi$  (CeO<sub>2</sub>) = 2~7 ° の試料へ REBCO 層を積層したところ、いずれの試料においても REBCO 膜厚の増加と共に  $\Delta \phi$  が低下する自己配向化現象[6]が確認された。Fig. 2 に  $\Delta \phi$  (CeO<sub>2</sub>) = 7.6 ° の中間層を用いて作製した REBCO 線材の長手方向  $I_c$  依存性を示す。REBCO 膜厚は 3.1  $\mu\text{m}$  である。顕著な  $I_c$  欠陥は無く、平均  $I_c$  が 467 A/4 mm 幅と高い  $I_c$  を有することが分かった。磁場中  $I_c$  評価の結果、 $I_c$  のリフトファクター(20 K, 20 T / 77.3 K, s.f.) は 0.34 であった。この結果から、 $\Delta \phi$  (CeO<sub>2</sub>) = 7.6 ° と比較的結晶性の悪いIBAD基板へも FF-MOD 法は適用可能であり、低コストな超電導線材の量産化が期待できる。

#### 4. 謝辞

ナノ粒子形成について有意義な議論をしていただきました Institut de Ciéncia de Materials de Barcelona (ICMAB)の Prof. Puig, Dr. Obradors に感謝いたします。また、本成果の一部は、

東北大学金属材料研究所における共同研究(強磁場センター課題番号 202112-HMKPC-0006)によるものである。

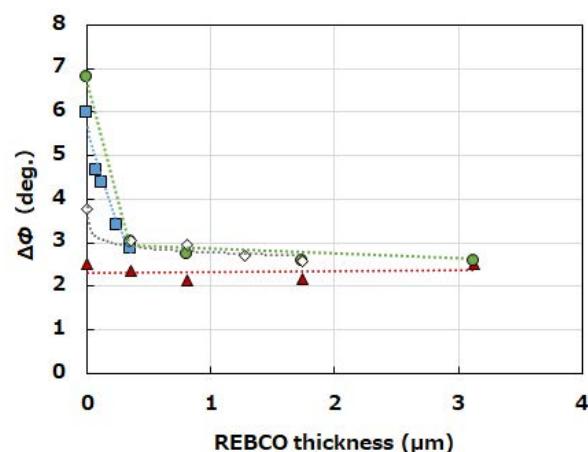


Fig. 1 REBCO thickness dependence of  $\Delta \phi$ . The  $\Delta \phi$  of zero REBCO thickness represents the  $\Delta \phi$  of CeO<sub>2</sub>(111), and at the other data represents the  $\Delta \phi$  of REBCO(103).

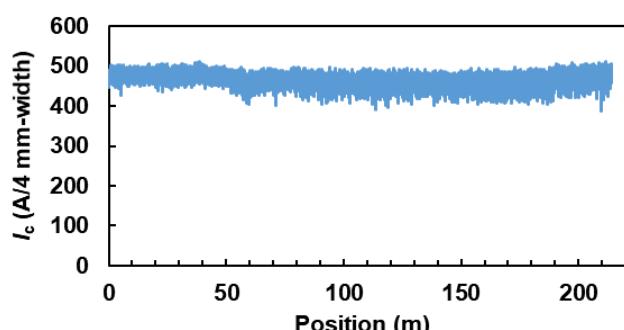


Fig. 2 Longitudinal  $I_c$  distribution of REBCO tape with 2.7 mol% BHO at 77.3 K measured by the Tapestar. Tape width is 12 mm, and the  $I_c$  values shown in the graph are 4 mm-width equivalents.

#### 参考文献

1. Y. Ishiwata, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **23** (2013) 7500804.
2. L. Soler, et al.: Nat. Commun., **11** (2020) 334.
3. T. Yoshihara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **33** (2023) 6600205.
4. K. Ohki and T. Nagaishi, Ceramics Japan, **47** (2012) 280.
5. N. Chamorro, et al.: RSC Adv., **10** (2020) 28872.
6. V. Matias, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **17** (2007) 3263.

# データ駆動型アプローチによる PLD 法による REBCO 線材製造における 多層成膜時の下地 REBCO 層の成膜条件の影響に関する検討

A Data-Driven Approach for the Study of Influence of Deposition Conditions of under REBCO  
Layers in Multi-Layer Deposition of PLD Processed REBCO Coated Conductors

木須 隆暢, 吳 澤宇, 世良 真也, 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, 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

PLD 法は、REBCO 線材の量産プロセスとして最も広く用いられているものの一つであるが、実際の製造では、線材をリール間に複数回搬送させる Multi-turn システムを用いて成膜領域を複数回通過させ、逐次的な成膜を行い、数  $\mu\text{m}$  程度の REBCO 層膜を形成する。この時、下地の層の成膜条件がその上に堆積される膜の特性に及ぼす影響を明確化することは、多層膜あるいは厚膜の形成において重要な課題といえる。本研究では、先行研究においてコンビナトリアル試料と高速の  $I_c$  計測手法とを組み合わせて、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。この時用いた成膜条件は単層膜を用いていたが、実際の製造条件である多層成膜へ適用するためには、単層膜による特性の線形和の適用可能性や、多層成膜の履歴を考慮した学習の必要性など検討が不可欠である。本研究では、これらの観点から、多層膜成膜プロセスにおいて、下地の成膜条件とその上に積層した膜の特性との関係について、データ駆動型アプローチによって臨界電流  $I_c$  の挙動を調査した。

## 2. 実験方法

前回報告した、基板温度やレーザーパワー、周波数、ガス圧などの製造パラメータを変化させながら単層成膜した REBCO コート線材試料の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、Deep Neural Network (DNN) モデルを用いて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[1]。次に、リール間を 3 回往復させ、連続搬送せながら成膜する 3-turn 成膜によって、3 層膜を連続的に作製した。前述した学習モデルを用いて、作製時のパラメータを元に、各層の  $I_c$  は線形和であると仮定して 3 層膜の  $I_c$  推定値を予測した。最後に、実際に  $I_c$  の長手変化を測定し、推定値との比較を行った。

## 3. 実験結果・考察

成膜条件を様々に変化した結果、成膜パラメータのうち、最も大きな影響を及ぼすものは基板温度であり、980°C を境に、積層成膜時に  $I_c$  の線形和に比べ積層膜の  $I_c$  値が低下、すなわち、2 層目以上の  $I_c$  がモデル推定値に比べ低下する事が明らかとなった。基板温度を 980°C 以上の範囲で変化させた結果を Fig. 1(a) に 980°C 以下の温度範囲で成膜した結果を Fig. 1(b) に示す。ガス圧、レーザーパルスエネルギー、周波数等の他の成膜条件の変化範囲はいずれも同じである。本研究は、PLD 成膜プロセスの挙動を把握するためのデータの取得条件のみならず、実規模の積層製膜プロセス条件を把握するうえで基本的な理解を与えるものである。

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。

## 参考文献

[1] 木須 *et al.*, 低温工学・超電導学会予稿集(2024・春), 1B-a01.

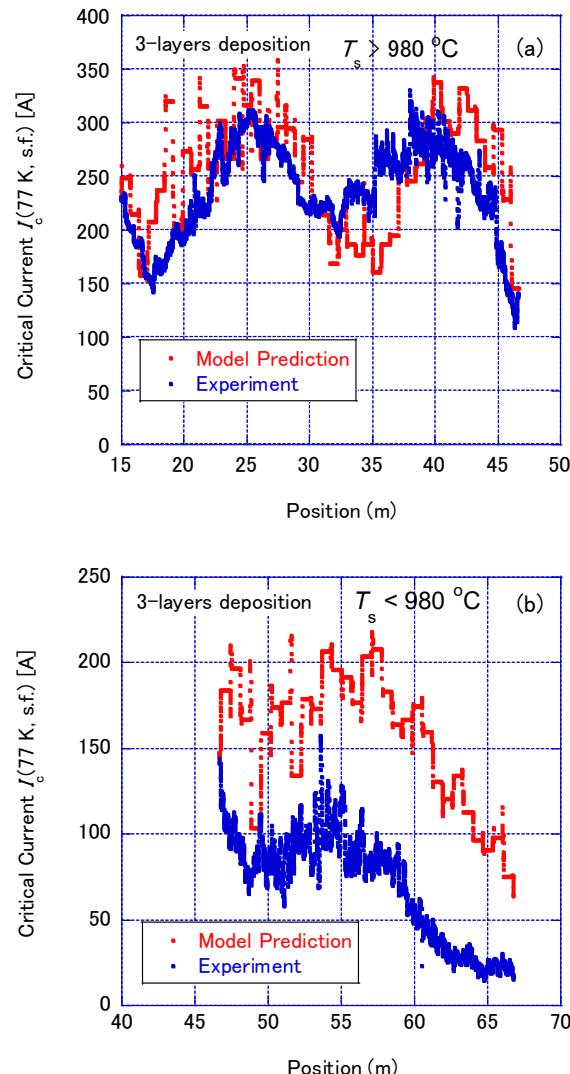


Fig. 1 Comparison between DNN model prediction and experiments of  $I_c$  for sequentially deposited 3-layers REBCO CC, where the model was trained by single layer deposition data. Substrate temperature,  $T_s$ , was controlled in the range of (a)  $T_s > 980^\circ\text{C}$  and (b)  $T_s < 980^\circ\text{C}$ , while the other parameters such as laser pulse energy, frequency, and pressure were varied in the same ranges, respectively. Linear summation holds in case of (a), however  $I_c$  becomes significantly smaller than the prediction in case of (b).

## 融点制御した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を用いた超伝導丸線材の開発

Development of superconducting round wires using melting point-controlled  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

新井 樹, 耿 智輝, 日置 悠登, 小黒 英俊(東海大); 淡路 智(東北大)

ARAI Tatsuki, GENG Zhihui, HIOKI Yuto, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: 3CAJM002@mail.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 系 高温超伝導線材は、coated conductor としてすでに実用化されているが、応用例はまだ少なく、コイル化技術の研究が活発に行われている状況である。これは、超伝導層の剥離を防ぐことと、ホットスポットを防ぐことが必要であるためである。現在は No-insulation コイル技術により解決されているが、より使いやすい線材が開発されることで、YBCO 系線材の利用が促進されると期待される。

そのため、我々は YBCO 丸線材開発のための研究をおこなっている。丸線材作製の方法として、金属管中に超伝導粉末を入れて線引き加工する Powder-in-Tube(PIT)法を利用している。この時、溶融成長を試みているが、YBCO と反応しない銀管を用い、YBCO を銀の融点である 960°C 以下で溶融させる技術を研究してきた。これまでに、 $\text{BaCu}_2\text{O}_2$  という低酸素分圧下において存在する、融点が 900°C 以下である化合物を介して YBCO を合成することに成功している[1]。ただし、この方法では酸素分圧の精密なコントロールが必要であり、作製が困難であることから、上記以外の方法を検討してきた。

その中で、YBCO に銀を入れることで融点が下がることに着目し、YBCO へ添加物を入れることで融点を下げる物質の探索を行なった。本研究では YBCO 丸線材開発を最終目標とし、添加物により YBCO の融点が銀の融点以下になるような条件の探索を行った。その際の添加物として、 $\text{Ag}_2\text{O}$ 、Pt、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  を添加し、組織観察及び臨界電流の測定を行った。

### 2. 実験方法

YBCO 丸線材は、PIT 法により作製した。YBCO 粉末の作製方法は以下の通りである。 $\text{Y}_2\text{O}_3$ (和光純薬製、99.9%)、 $\text{BaCO}_3$ (和光純薬製、99.9%)、 $\text{CuO}$ (和光純薬製、95.0%)を、モル比において  $\text{Y}:\text{Ba}:\text{Cu}=1:2:3$  となるように秤量し、混合した後、大気中にて 900°C × 4 h の仮焼き、930°C × 24 h の本焼きを経て、YBCO 試料を作製した。

YBCO 線材作製にあたり、 $\text{Ag}_2\text{O}$  粉末を 20wt% 加えた YBCO 粉末( $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}$ )、 $\text{Ag}_2\text{O}$  粉末 10wt% と Pt 粉末 0.5wt% を加えた粉末( $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Pt}$ )、 $\text{Ag}_2\text{O}$  粉末を 10wt% と  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  粉末 10mol% を加えた粉末( $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Nb}_3\text{Sn}$ )を用意した。それぞれを外径 5 mm、内径 4 mm、長さ 50 mm の銀管に詰めた。その後、直径が 0.8 mm 以下になるまで溝ロール圧延機による圧延加工を行った。

3 種類の線材に対し、以下の熱処理を行った。Ar ガスプロ一霧囲気において 930°C で 48 時間、ガスを止めた状態で 900°C において 24 時間保持した後、室温まで戻した。その後、大気霧囲気で 930°C において 24 時間保持した。さらに、酸素霧囲気で 500°C の条件で 24 時間の酸素アニールを行なった。

作製した YBCO 丸線材は、エポキシ樹脂に埋め込み、研磨後、光学顕微鏡による組織観察を行った。また、4.2 K と 77 K において臨界電流測定を行った。

### 3. 実験結果および考察

表 1 に各線材の臨界電流値を示す。4.2 K では、 $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}$  線材と  $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材に臨界電流があることが分かった。 $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Pt}$  線材には臨界電流がみられなかった。77 K では、 $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}$  線材と、 $\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Pt}$  線材に臨界電流が見られた。表の臨界電流の値には、銀への分流分も含まれているため、正確な臨界電流値を評価するためには、低温、強磁場中における銀の電気

抵抗を測定し、補正する必要があると考えられる。YBCO+ $\text{Ag}_2\text{O}+\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材には臨界電流は見られなかった。

図 1 に、熱処理前の各線材の断面組織を示し、図 2 に、熱処理後の各線材の断面組織を示した。図 1 では粉末を密に入れた様子が見られた。ところが、図 2 の各線材の組織には、線材中心部に大きな空洞が形成されていることが分かった。この空洞は、YBCO の融点が低下し溶融したことで、粉末間の空隙が集まって形成されたと考えられる。YBCO の融点は 1000°C 程度であるが、添加物を入れ、かつ低酸素分圧にしたことによって、YBCO の融点が低下したのだと考えられる。また、粉末のみでは 930°C で溶融した様子が見られなかったことから、銀管内部の酸素分圧が低かったこと、銀が銀管から YBCO へ添加され、融点低下に影響したことも考えられる。

組織観察の結果から、一度溶融してから凝固したことで、YBCO 組織の密度が向上し、電流が流れやすくなつたため、いくつかの試料で臨界電流が観測されたと考えられる。熱処理後の試料に対し、高倍率での観察も行っているが、まだ YBCO 結晶軸が配向した様子は見られない。このため、臨界電流が小さい、もしくは見られないものもある状況である。

### 謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの課題(202212-HMKGE-0037)の一部として行われた。本研究の一部は、東海大学高度物性評価施設の支援を受け、実施したものである。

### 参考文献

1. Z. Geng et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 34 (2024) 6800704

Table 1 Critical currents of three wires at 4.2 K and 77 K.

	4.2 K	77 K
$\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}$ wire	8.40 A	10 mA
$\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Pt}$ wire	×	156 mA
$\text{YBCO}+\text{Ag}_2\text{O}+\text{Nb}_3\text{Sn}$ wire	3.40 A	×

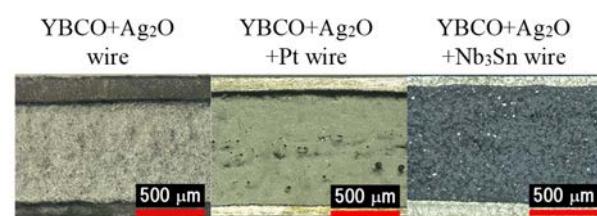


Fig. 1 Cross sectional views of three wires for the wire before heat treatment.

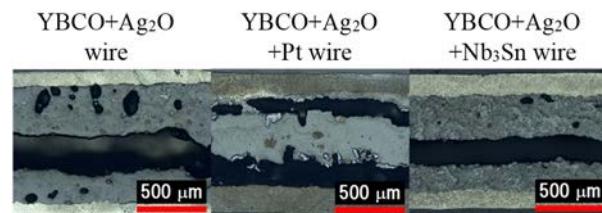


Fig. 2 Cross sectional views of three wires for the wire after heat treatment.

# RE 系超電導線材の細線化加工の進捗

## Development of laser scribing technique on REBCO coated conductors

町 敬人, 廣瀬 陽代, 和泉 輝郎 (産総研)  
MACHI Takato, HIROSE Hishiro, IZUMI Teruo(AIST)  
 E-mail: t.machi@aist.go.jp

### 1. はじめに

航空機の推進システムには軽量かつエネルギー密度の高い全超電導回転機が必要不可欠である。超電導回転機では電機子コイル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同時に低減することができると期待されている。これまでのレーザースクライビング加工技術での課題とその解決方法について報告する。

### 2. 実験

加工に用いたレーザーは 7 psec のパルス長の UV パルスレーザー(Coherent HyperRapid NX 355-30)である。短パルスのため Ablation 加工が可能である。用いた REBCO 線材は厚さ 40μm のハステロイ上に成膜したもので、最外に Cu 安定化層を有する。4mm 幅線材の分割数は 4 フィラメントとした。

(1) レーザースクライビングで溝を形成した場合に、フィラメント間抵抗を低下させるのは、切削した金属粉等が溝内に残留するためである。そのためレーザー照射時にアシストガスを線材に垂直方向に吹き付けて切削粉末を吹き飛ばすという方法で加工した。この試料についてフィラメント間抵抗と断面 SEM 観察およびフィラメント Ic 測定を行った (試料 NEDO309S3)。

(2) アシストガスは切削直後の溝に吹き付けられる。溝の両側側面は Ablation 加工のために超電導層が剥き出しの状態であるため、アシストガスのガス圧によって剥離の危険性がある。切削粉末を除去しつつ切削面へのダメージを低減するために、アシストガスの吹き付け方向を線材長手水平方向に変更した。この試料について、フィラメント間抵抗と断面 SEM 観察およびフィラメント Ic 測定を行った (試料 NEDO330S2)。

### 3. 実験結果と考察

アシストガスを垂直に吹き付けた場合 (Fig.1, NEDO309S3) には、懸念されたように切削された溝側面の超電導層付近に剥離が生じることがあった。それに比べてアシストガスを線材の長手水平方向に吹き付けた場合 (Fig.2, NEDO330S2) では、超電導層の剥離の発生が抑えられていることが分かる。平行吹き付けの場合でも切削溝の側面では超電導層が剥き出しどとされているため、空気中の水分などの影響で劣化が生じないように Fig.2 の断面 SEM 像に示したポリイミド電着被覆 (厚さ約 30μm) を行っている。ここで SEM 像では埋め込み樹脂とのコントラスト比が分かりにくいため、ポリイミドの最外部部分をオレンジ色で明示してある。

Table 1 に 4 フィラメント間の抵抗値と抵抗率のデータを示す。どちらの加工方法も平均で 1 MΩcm 以上のフ

ィラメント間抵抗率であったが、垂直吹き付けの場合には抵抗値が低い部分もあり、剥離の影響で低下した可能性がある。抵抗率データでも水平吹き付けの方が優れているという結果となった。

### 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 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。REBCO 線材は Faraday Factory Japan の中村美幸様にご提供いただきました。

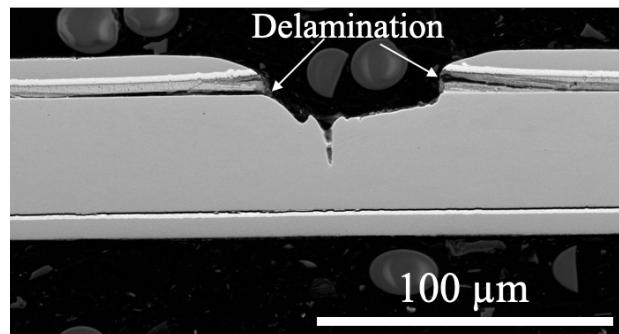


Fig. 1 Cross-sectional SEM image for laser scribed REBCO tape with vertical assist gas flowing (NEDO309S3).

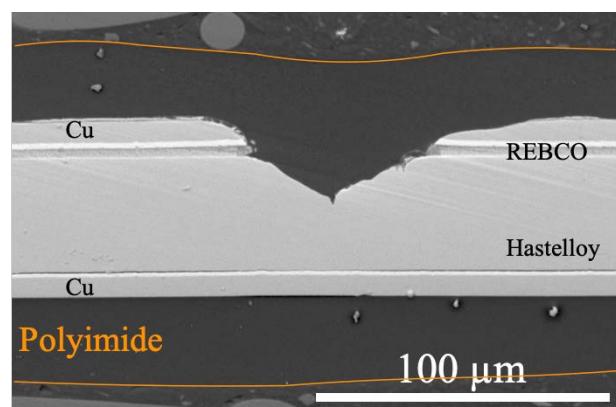


Fig. 2 Cross-sectional SEM image for laser scribed REBCO tape with horizontal assist gas flowing (NEDO330S2).

Table 1 Resistance and resistivity between filaments at room temperature.

		f1_f2	f2_f3	f3_f4	f1_f4	平均
NEDO309S3 37 cm	R (Ω)	<b>2.5E+03</b>	6.13E+04	4.7E+04	8.71E+04	4.95E+04
	$\rho$ (Ω cm)	9.25E+04	2.27E+06	1.74E+06	3.22E+06	<b>1.83E+06</b>
NEDO330S2 41.2 m	R (Ω)	5.14E+03	2.71E+03	1.21E+03	2.50E+03	2.89E+03
	$\rho$ (Ω cm)	2.12E+07	1.12E+07	4.99E+06	1.03E+07	<b>1.19E+07</b>

## 表面反射光と液中透過光を利用したToFカメラでの低温液液面測定

Low temperature liquid level measurement with a ToF camera using surface reflected light and transmitted light in the liquid

安田 宏大, 岡本 洋(秋田県立大学)

YASUDA Koudai, OKAMOTO Hiroshi(Akita Prefectural University)

E-mail:M26N010@akita-pu.ac.jp, okamoto@akita-pu.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 液体空気は様々な場面で使用され, 人々の生活を助けている. その中でも, 液体空気の一種である液体水素は, 次世代のクリーンエネルギーとして注目を集めしており, エネルギー密度の高さから様々な使用方法が検討されている. 液量の管理に使われている既存の液面計には, 超電導式[1], 差圧式[2]などがある. しかし, いずれも装置の一部が液面に接触しているため, 伝熱による液体の損失や電気による潜在的リスクを考えなければならない.

我々はこの問題を解決するため, 完全に液面と接触しない状態での液体水素の計測を目指している. 本研究では, ToFカメラを用いた液体水素の液面高さの計測を行う前段階として, 液体窒素の液面高さの計測を行う.

### 2. 測定原理

図1に測定原理を示す. ToFカメラの光源から光を液体に照射し, 液面と容器の底のそれぞれで反射した光をカメラで観測する. この際, 光のカメラへの到達時間は Arduino で作成されたプログラムを用いて光の強度変化と時間の関係をヒストグラムとして表示することでそれぞれ求める. 求めた値を式(1),(2)に代入することで液面の高さを求める.

液面の高さ $d$ を求める2種類の方法を以下に示す. 光速が  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$  であるから, 液体窒素中の光の速さ $c'$ は, 液体窒素中の光の屈折率 $n' = 1.2053$ [3]より,

$$c' = \frac{c}{n'} = 2.5 \times 10^8 \text{ m/s}$$

と求められる.

空気中を光が通る時間を $t$ とすると,

$$t = \frac{2(D-d)}{c}$$

よって, 液面の高さ $d$ は,

$$d = D - \frac{ct}{2} \quad (1)$$

次に, 液中を通り, 容器の底で反射した光を受光するまでの時間を $t'$ とすると, 空気中と液中を光が通る時間の和から求められるので,

$$t' = \frac{2(D-d)}{c} + \frac{2d}{c'}$$

よって, 液面の高さ $d$ は,

$$d = \frac{c'(ct' - 2D)}{2(c - c')} \quad (2)$$

と表すことができる.

また, ToFカメラは吊り上げることで重力を利用し, 容器内の液面に対して垂直に自動調整する.

### 3. 実験

今回は液体窒素を用いて実験を行った. 図2に実験装置の全体図を示す. 液体窒素容器の口付近に置かれたToFカメラ(SparkFun TMF8821)が Arduino 基板(SparkFun Red Board)を通してPCに接続されている. この実験装置で求めた液面の高さの値と他の方法で測定した値を比較することで精度を求める. 実験結果については講演で発表する.

### 4. 今後の課題

測定可能距離を液体水素用タンクの高さ(5~10 m)程度まで伸ばすこと, 揺れている液面での測定を可能にすること, 電気機器の気密性を守るために光ファイバーを通した状態で測定を可能にすること, が今後の課題である.

### 謝辞

液体窒素の貸し出し及び使用の許可をいただいた二村宗男助教, ToFカメラ使用の示唆をいただいた斎藤敬教授に感謝します.

### 参考文献

- [1] Ch. Haberstroh and G. Zick, A Superconductive MgB<sub>2</sub> Level Sensor for Liquid Hydrogen, AIP Conference Proceedings **823**, 679 (2006).
- [2] W. A. Olsen, A Survey of Mass and Level Gauging Techniques for Liquid Hydrogen. In: K.D. Timmerhaus (eds), Advances in Cryogenic Engineering, vol 8. Springer, Boston, MA. (1963).
- [3] 信貴豊一郎 社団法人 低温工学協会 超電導・低温工学ハンドブック, pp. 32 (1993).

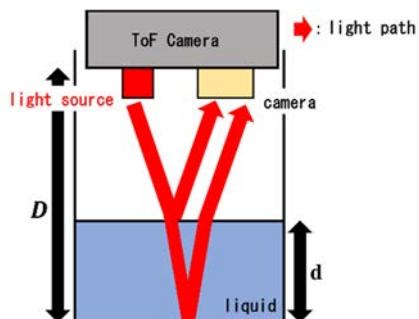


Fig.1 Measuring principle

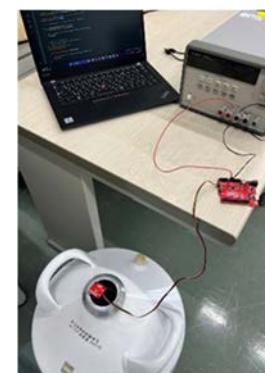


Fig.2 Overall view of the experimental apparatus

## MgB<sub>2</sub>超伝導コイル冷却モデル装置 —オシレーションの抑制を目指したサーモサイフォンの改造

A MgB<sub>2</sub> coil cooling model device – Modified thermosiphon loop to suppress thermal oscillation

槙田 康博, 新富 孝和(KEK); 谷貝 剛, 猪俣 涼(上智大); 駒込 敏弘(前川); 平野 直樹(NIFS); 濱島 高太郎(東北大)

MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); YAGAI Tsuyoshi, INOMATA Ryo (Sophia University);

KOMAGOME Toshihiro (MAYEKAWA); HIRANO Naoki(NIFS); HAMAJIMA Takataro(Tohoku University)

E-mail: yasuhiro.makida@kek.jp

### 1. はじめに

水素利用推進の中で活用される超伝導磁石装置を目指して、液体水素による MgB<sub>2</sub> 超伝導コイル冷却モデル装置を作成し、液体水素による冷却励磁試験を実施した[1]。水素防爆の観点から、通電部と水素が直接接することが無いよう、開放型サーモサイフォン方式によって循環する液体水素を冷却源にして、純銅板の熱伝導を介してコイルを間接冷却するという冷却モデルになっている。2021 年に液体水素や液体ヘリウムで冷却試験を実施し、コイルの冷却励磁は実証することができた。一方で、蒸発ガス流量のオシレーションが測定された[2]。今回、原因となった蒸発ガス放出系の改良をしたところオシレーションが終息したので、その報告をする。

### 2. 冷却モデル装置概要

#### 2.1 サーモサイフォンによる MgB<sub>2</sub>コイル冷却

モデル装置の内部構造を Fig. 1 に示す。サーモサイフォン流は、まずバッファータンク(容積 95 l)の底から下方に 1/2" の配管で 0.11 m ほど下がり、そこで 4 本の 3/8" 配管に分岐して外径側を向き、俯角 15° で下がっていく(液管)。コイルの外周相当(Φ 0.6 m)に達すると向きを円周方向に変え、仰角 15° で上りながら 1/4 ほど円周方向に進み、そこで鉛直上向きとなり、タンクの上部(気相部)に戻っている(蒸気管)。コイルからの熱伝導板は、1/4 周ほど進む配管部にはんだ付けされ、ここでの蒸発(気泡)がサーモサイフォンの流れの駆動源となる。

サーモサイフォン配管の下方には、MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体によるダブルパンケーキ 3 組で構成されるコイルが吊り下げられている。コイル上下表面とダブルパンケーキ層間には 0.5 mm 厚さの高純度銅(7N 热処理済み)板が貼りつけられて、コイルを伝導冷却している。銅板は Fig. 2 に示されるように、渦電流低減のため、磁場が小さくなるコイル外周部を除いて 2.5° 間隔でスリットを入れている[2]。

### 2.2 蒸発ガスによる電流リード、輻射シールド冷却

サーモサイフォン回路から戻ってくる蒸発ガスは、バッファータンクの上部ネック部、電流リード冷却及びシールド冷却の 3 系統で外部へと放出される。

電流リード配管はリン脱酸銅 5×30 mm<sup>2</sup> 断面×500 mm 長の電流リードと並行に配置され、純銅板を介して伝導冷却している。輻射シールドは A5052 板で構成され、バッファータンク上方のネック部及びシールド板全体を一周する蒸発ガス配管から伝導冷却されている。

当初、シールド冷却配管及び電流リード冷却配管は 4 本のサーモサイフォンラインの内の 1 つから分岐させていた(Fig. 1 左端図)。2021 年の液体水素による冷却試験では、約 1 Hz 周期の 0~100 l/min で振動する不安定な流量がフロート式流量計で測定された。この分岐部とバッファータンク戻り口間の流れの向きが不安定なため、振動が発生していると考え、Fig. 1 中央のようにバッファータンク気相部から電流リードと輻射シールドの冷却ガスを直接取り出すように改造した。

### 3. 改造後の冷却試験結果

改修後に液体ヘリウムでの冷却試験を実施した。5 l/min で 1 Hz 程度の振動が液面の高い時には発生しているものの、改修前に観察された振幅の大きな流量振動は無くなつた。液面の低下(40 %→20 %)から計算される熱負荷も 5.5 W 程度だったものが、4.6 W 程度まで低下した。サーモサイフォンループと蒸発ガス放出ラインの切り分けの重要性を認識した。

#### 参考文献

1. T. Yagai, et al.: TEION KOGAKU, Vol. 56 (2021) pp.270~276
2. Y. Makida, et al.: TEION KOGAKU, Vol. 57 (2022) pp. 241~245

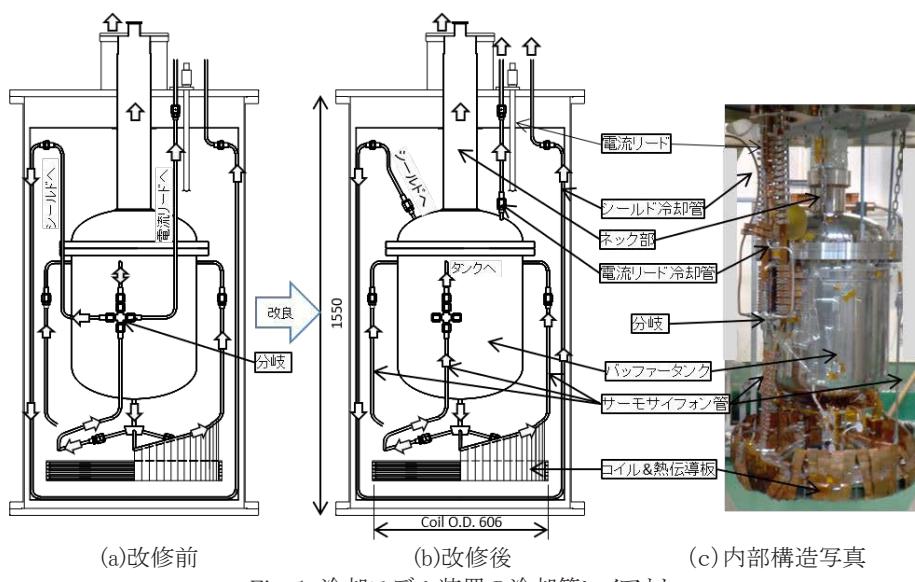


Fig. 1 冷却モデル装置の冷却管レイアウト



Fig. 2 MgB<sub>2</sub>ダブルパンケーキコイルの冷却構造詳細

## 切込部を持つ樹脂コーティングによる液体窒素の沸騰伝熱促進

Boiling heat transfer enhancement of liquid nitrogen by resin coating with notches

高畠 一也 (NIFS)  
 TAKAHATA Kazuya (NIFS)  
 E-mail: takahata.kazuya@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

極低温機器の配管、タンクなどを液体窒素や液体水素を用いて予冷する際、冷媒の消費量削減、時間効率の観点から予冷時間の短縮が重要となる。ところが予冷過程の初期においては、伝熱面に膜沸騰による蒸気相が発生し伝熱を阻害することが知られている。そこで古くから、表面テクスチャリングやコーティングなどの表面改質による伝熱促進が試みられてきた。その一例が、樹脂コーティングである。熱絶縁層を用いて伝熱を促進するという一見矛盾した方法であるが、期待以上の効果が得られる。これを「断熱層のパラドックス」と呼ぶ。前回の報告[1]では、樹脂コーティングに熱収縮によって自発的に発生するクラックによって、さらなる予定時間短縮が実現できることを示した。今回は、自発的に発生するクラックではなく、樹脂コーティングに切り込み(ノッチ)を入れる加工を施し、伝熱促進に与える影響を調べた。

### 2. 実験方法

30 mm × 30 mm × 2 mm の銅板をユニレート®製のブロック(70 mm × 70 mm × 20 mm)に貼り付け、銅板片面の伝熱面以外を熱絶縁した。銅板の温度を測定するため、熱絶縁された側の銅板表面中央に T 型熱電対を半田付けした。液体窒素の浴槽に、伝熱面を上にしてブロックを落下させ、その後の温度変化を測定した。

続いて、銅板の伝熱面に、フッ素樹脂を厚さ 4.3  $\mu\text{m}$  から 16.6  $\mu\text{m}$  の範囲でコーティングし、裸面と同じ急冷実験を、各サンプル5回ずつ繰り返して行った。フッ素樹脂は、スプレー缶で塗布し常温で乾燥するタイプのニューTFEコートFC-102(ファインケミカルジャパン株式会社)である。

次に精密カッターを用いて、樹脂コーティングに幅 2 mm から 0.5 mm の縞状もしくは格子状のノッチを入れた。最初は 2 mm 幅のノッチ加工を行い、急冷実験を行った後、幅を 1 m, 0.5 mm と変更し、その都度急冷実験を 5 回ずつ繰り返した。図 1 は、膜厚 16.6  $\mu\text{m}$  のコーティングに幅 0.5 mm のノッチを格子状に入れたサンプルの顕微鏡写真である。定規を使ってノッチを入れたため、幅にバラツキがあるが、ノッチの本数が決まっているため、幅の平均値は 0.5 mm となっている。

### 3. 実験結果

図 2 に膜厚 16.6  $\mu\text{m}$  のコーティング(格子状ノッチ有りと無し)を施したサンプルの予冷曲線を示す。ノッチがない場合に予冷時間が短縮されるのは、断熱層で温度勾配が出来ることによって、ライデンフロスト点の温度が見かけ上増加するためである。ノッチを入れた場合に、より予冷時間が短くなるのは、表面の凹凸が膜沸騰を阻害し、ライデンフロスト点をより高温側にシフトさせるためと考えられる。

図 3 に図 2 の予冷曲線から算出した沸騰曲線を示す。ノッチ無しのデータは、樹脂層の温度勾配によって現れるライデンフロスト点と限界熱流束点の高温側へのシフトという典型的な断熱層のパラドックスの特徴を示している。一方、ノッチ有りのデータでは、ライデンフロスト点の更なる高温側へのシフトが見られた。さらに、核沸騰域において裸面に近い熱伝達係数が得られ、かつ限界熱流束が裸面を上回った。また、125 K まで限界熱流束点に近い熱流束が維持された。熱伝導の低い樹脂を塗布したにもかかわらず、核沸騰域の伝熱が促進されたことは非常に興味深く、予冷時間短縮だけでなく、様々な用途への応用が期待される。

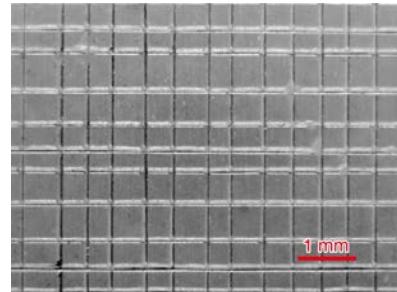


Fig. 1 Surface micrograph of fluoroplastic coating (16.6  $\mu\text{m}$  thick) with lattice notches (0.5 mm wide grid).

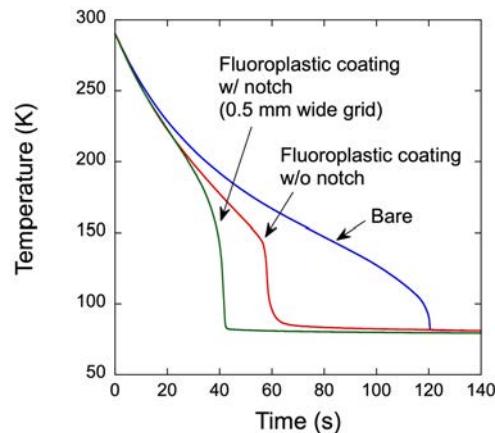


Fig. 2 Temperature measurements of the bare and fluoroplastic coated copper plates (w/ and w/o lattice notches).

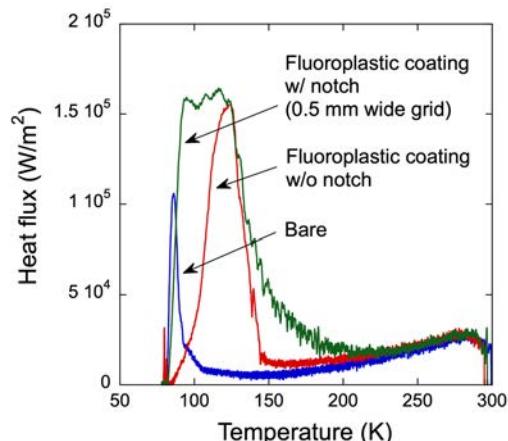


Fig. 3 Heat flux of the bare and fluoroplastic coated copper plates (w/ and w/o lattice notches).

### 参考文献

1. K. Takahata: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023)  
 p. 76.

## 縦溝およびフィンを加工した配管による液体水素沸騰熱伝達の促進

### Boiling heat transfer enhancement in liquid hydrogen using grooved and finned pipes

堀 伊吹, 吹場 活佳, 須田 公平, 田部 宏太郎(静岡大); 小林 弘明, 坂本 勇樹(JAXA)

HORI Ibuki, FUKIBA Katsuyoshi, SUDA Kohei, TANABE Kotaro (Shizuoka Univ.);

KOBAYASHI Hiroaki, SAKAMOTO Yuki (JAXA)

E-mail: hori.ibuki.19@shizuoka.ac.jp

#### 1. はじめに

液体燃料ロケットの推進剤として液体水素、酸化剤には液体酸素が用いられている。極低温流体は常温の物質に接触すると即座に沸騰・蒸発する性質があるため、燃料充填の際には流量を絞った燃料を少しづつ流入させて配管を予め冷却する。しかし、長時間をする配管予冷では膨大な燃料が消費されるため、予冷時間の短縮が課題となっている。本研究では、液体窒素および液体水素を冷媒として流動冷却実験を実施し、縦溝を断熱材で埋めた配管およびフィンを付与した配管の冷却性能を無加工の配管と比較し、評価した。

#### 2. 実験方法

本研究では長さ 120 mm、外径 12.7 mm (1/2 in)、厚さ 1 mm のステンレス製配管を用いた。配管内壁へ軸方向に深さ 0.5 mm の縦溝を加工し、溝にはシリコンシーラントを充填し、スリット状コーティング配管を作製した。また、Fig. 1 に示すように、幅 1 mm、高さ 2 mm のフィンを加工することで伝熱面積を拡大したフィン配管を作製した。供試管の上下2面にシリコンダイオードをはんだ付けし、供試管外壁の温度を計測する。冷媒(液体窒素・液体水素)はタンク圧力 100 kPa で送液し、予冷ラインを予冷したのちテストラインを冷却した。供試管下流部のコイル状熱交換器で冷媒を気化させ、さらに下流の流量計で気体の流量を測定した。再現性確認のため、供試管毎に3回以上のデータ収録を行った。

#### 3. 実験結果と考察

Fig. 2 に NC(無加工)配管とフィン付き配管の温度の時間変化を示す。冷却時間は温度 273 K を 0 s とし、配管が飽和温度となり、温度の時間変化が 0.1 K/s を下回るまでの時間と定義した。Fig. 2 中に冷却時間  $t$  に対する NC の冷却時間  $t_{NC}$  の比  $t_{NC}/t$  を冷却促進率  $\epsilon$  と定義した[1]。液体窒素を冷媒とした場合、フィン付き配管の冷却時間は NC と比較して 1/3.1 に短縮された。過去の一様な PTFE コーティングを用いた実験における冷却促進率は最大で 2.7 であり[2]、今回の結果はこれを上回った。一方で、液体水素を冷媒とした場合には、フィン付き配管の冷却促進率は 1.1 であり、冷却時間の短縮効果はわずかであった。水素実験において、0 s における予冷ライン温度が飽和温度付近まで低下していたのに対し、テストライン温度は 134 K であり予冷ラインよりも 100 K 以上高かった。一方で、窒素実験における 0 s のテストライン温度は飽和温度付近であったことから、水素実験の場合には気化したガス水素が先行して供試管に到達したと考えられる。冷却開始直後 1 秒間におけるテストラインと供試管の温度差をみると、液体窒素では 180 K であるのに対して、液体水素では 135 K であり冷却開始直後から供試管が急激に冷却されていた。これは水素の気相状態での冷却能力が窒素に比べてはるかに大きい[3]ため、水素実験の場合には先行して供給されるガス水素により供試管が急冷されたからだと考えられる。また、フィン付き配管では冷却開始直後の冷却速度が最大で NC の 1.7 倍であることから、フィン付き配管はガス水素による冷却には一定の効果があり、これにはフィンによる伝熱面積の拡大が影響したものと考えられる。

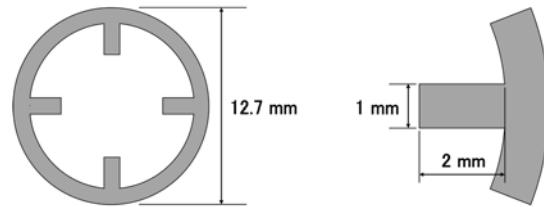


Fig. 1 Dimensions of the test pipe cross-section

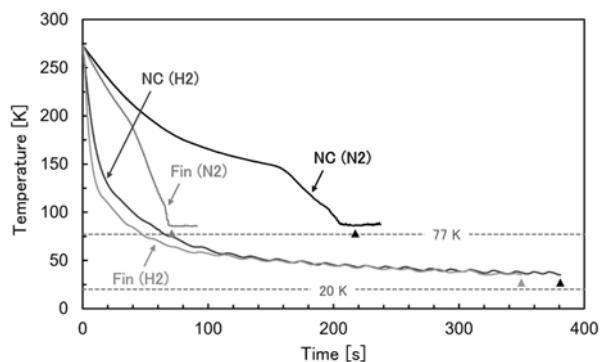


Fig. 2 Temperature histories of NC and Fin for N2 or H2

#### 4. 結論

本研究では液体窒素および液体水素を冷媒として流動冷却実験を実施し、縦溝にシリコンシーラントを充填した配管と、フィンを加工した配管の冷却性能を評価した。液体窒素を冷媒とした場合、フィン付き配管の冷却時間は NC と比較して約 1/3 に短縮された。液体水素の場合、冷却時間の短縮はわずかであったが、冷却開始直後における NC に対するフィン付き配管の冷却速度比は最大で 1.7 であった。冷媒を液体水素とする場合には、送液の際に気化したガス水素が先行して供試管に到達するとみられ、伝熱面積の拡大がガス水素による冷却に一定の効果を発揮すると考えられる。

#### 謝辞

本研究はイハラサイエンス中野記念財団の助成を受けたものである。ここに記して謝意を示す。

#### 参考文献

1. G. Mazor, et al.: Frost formation as a temporary enhancer for quench pool boiling, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 52 (2013) pp. 345–352
2. D. Takeda, et al.: Improvement in pipe chilldown process using low thermal conductive layer, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 111 (2017) pp. 115–122
3. 須田公平, 他: スリット状の断熱面を付与した配管による沸騰熱伝達の促進, 日本冷凍空調学会論文集(2024)

# 積層材料における有効熱伝導率の研究

## Study of Effective Thermal Conductivity in stacked Materials

平山 貴士, 小池 祐太朗、鶴留 武尚(住友重機械)  
 HIRAYAMA Takashi, KOIKE Yutaro, TSURUDOME Takehisa (SHI)  
 E-mail: takashi.hirayama@shi-g.com

### 1. はじめに

Gifford-McMahon (GM) 冷凍機やパルス管冷凍機に代表される蓄冷式冷凍機は Magnetic Resonance Imaging (MRI) や Magnetic field-applied Czochralski (MCZ) における超伝導コイル冷却だけでなく、液体水素用途などのアプリケーションに活用されている。冷凍機はこれらシステムの消費電力の大部分を占めることが多く、高効率な冷凍機が求められている。高効率な冷凍機には高効率な蓄冷器が必要であることから、蓄冷器にかかる要素研究を実施した。

蓄冷器の機能の1つとして、室温部との断熱がある。冷凍機において蓄冷器上下間に非常に大きな温度差が発生する。そこで蓄冷器は金網や粒などの蓄冷材を積層した構造とし、蓄冷器上下間に断熱する構造を持つことが多い。この機能を示す物理量が有効熱伝導率であり、冷凍機における冷凍損失を評価する重要なパラメータである。そこで冷凍機で使用される状態を模擬できる有効熱伝導率測定システムを新規に開発した。さらに開発した測定システムを用いて、鉛球を積層した蓄冷器の有効熱伝導率を測定した。

### 2. 熱伝導率測定システム

Fig.1 に開発した熱伝導率測定システムの概念図を示す。測定部は冷凍機の使用環境を模擬するため、蓄冷材を充填しつつヘリウムガスを気密できる構造とした。測定部の一方の端部は熱浴である4K-GM冷凍機の2段フランジと熱的・機械的に締結し、もう一方の端部にヒーターを設置した。ヒーターで加えた熱流束によって発生する温度差を測定し、有効熱伝導率を算出する。すなわち熱伝導率の測定は定常法によって実施した。また測定部は2段フランジと熱的・機械的に締結した輻射シールドで覆うことで、輻射熱による測定エラーを低減する構造とした。

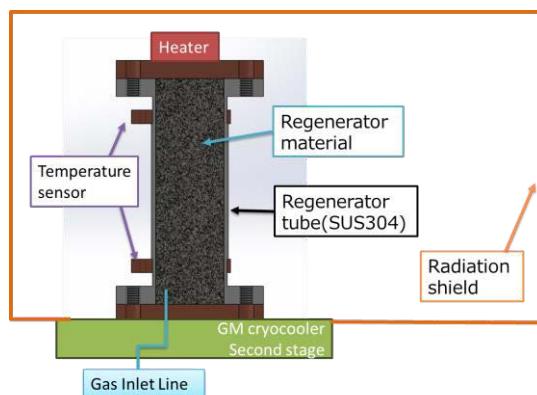


Fig.1 Schematic diagram of developed system

### 3. 熱伝導率測定システムの健全性確認

開発したシステムの健全性を確認するため、極低温までの熱伝導率が既知である SUS304 の熱伝導率の測定を行った。Fig.2 に開発した本測定システムの測定結果を白抜きマークで、既知の試験結果を破線で示す。開発したシステムは既知のデータを定量的に再現できており、システムが健全であることを確認した。

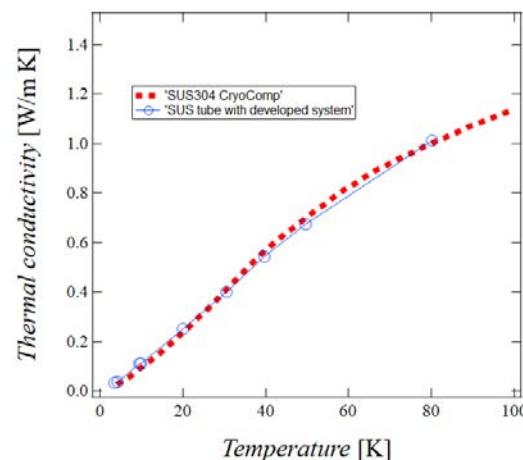


Fig.2 Test result of system confirmation [1]

### 4. 積層材料における有効熱伝導率測定

開発したシステムを用いて鉛球を積層した蓄冷器の有効熱伝導率を測定した。測定は0~3MPa、5K~50Kの圧力・温度領域で実施した。

講演では有効熱伝導率の算出方法と、測定結果について述べる。

### 参考文献

1. CryoComp © 1993–2009 Eckels Engineering Inc.

## 新規水素磁気冷凍用希土類酸化物磁性材料の磁気熱量効果

### Magnetic calorimetric effect of rare earth oxide magnetic materials for new hydrogen magnetic refrigeration

松本 宏一, 堀江 征生, 長谷川 博紀, 堤 隼汰 (金沢大);  
石川 和洋, 山崎 崇平 (京セラ);

斎藤 明子, 北澤 英明, 沼澤 建則 (NIMS)

MATSUMOTO Koichi, HORIE Masaki, HASEGAWA Hironori, TSUTSUMI Hayata (Kanazawa University);  
ISHIKAWA Kazuhiro, YAMAZAKI Shuhei (Kyocera);  
SAITO Akiko, KITAZAWA Hideaki, NUMAZAWA Takenori (NIMS)

#### 1. はじめに

JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術により磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍の研究、開発が進められている。最近、磁性材料として  $\text{HoAl}_2$  を用いた能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMRR) による水素液化に成功した[1]。

水素液化磁気冷凍用磁性体には大きな磁気熱量効果は必須であるが、耐水素性・絶縁性・加工性・安定性も重要であり、この点で酸化物は有望である。Garnet 系(GGG, DGAG)は水素を凝縮液化する磁気冷凍機に用いられた[2]。

Eu を含んだ希土類酸化物磁性体には水素磁気冷凍の温度領域で磁気相転移を起こすものがある。例えば、 $\text{EuO}$  は 70K で強磁性、 $\text{Eu}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$  は 5.5K で反強磁性と磁性や転移温度が変化する。積層ペロブスカイト類似構造を持つ  $\text{Eu}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Eu}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$  は  $T_c = 9\text{K}$ , 8.5K で強磁性転移すると報告されている[3][4]。

本研究では  $\text{Eu}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Eu}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$  を含む酸化物の磁気熱量効果を評価し、有望な磁性体であることを明らかにした。

#### 2. 試料

試料は Eu 酸化物と Ti 酸化物を焼成して作成した。 $\text{Eu}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Eu}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  からなる複相多結晶であった。リートベルト解析によって評価した各相の割合(wt.%)を表 1 に示す。

磁気熱量評価用に磁化サンプル ( $0.55 \times 0.55 \times 3.30 \text{ mm}^3$ ) と比熱サンプル ( $1.10 \times 2.00 \times 2.00 \text{ mm}^3$ ) を作成した。

#### 3. 磁気熱量効果測定法

磁化は Quantum Design 社の MPMS を用い、磁場 5T～0.1T、50～2K の温度範囲で測定した。比熱は Quantum Design 社 PPMS の比熱オプションを用い、0T の磁場で 300～2K の温度範囲で測定した。

#### 4. 評価結果

##### 4.1. 比熱

Sample1～3 の 0T における比熱を Fig.1 に示す。8K と 7K 近傍にそれぞれ  $\text{Eu}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$  と  $\text{Eu}_2\text{TiO}_4$  の相転移に対応するピークを確認できた。また、二つの比熱ピークが分離できていること、ピークの大きさがサンプル中の複相割合に対応して変化していることから、リートベルト解析と整合していることが確認できた。

##### 4.2. 磁化

Sample1～3 の磁化について、10K 付近で  $\text{Eu}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Eu}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$  の強磁性転移に伴い磁化が増加した。転移温度が近いため、各相の転移を分離して観測することはできなかつた。また、飽和磁化は Sample1, 3, 2 の順で大きかった。

磁性体のエントロピー変化  $\Delta S$  は磁化から Maxwell 関係式を用いて求められた。

5T・20K における  $\Delta S$  は今回の試料では Sample2 が最大で  $dS = 19.4 \text{ J/kgK}$  であった。また、Sample2 の体積当たりの  $\Delta S$  と Garnet や Perovskite の酸化物磁性体との比較を Fig.2 に示

す。Sample2 の 5T, 20K での  $\Delta S$  は GGG の約 3.7 倍、DGAG の約 2.6 倍と大きいことが明らかとなった。

本研究は JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術 (JPMJMI18A3) によって実施された。

	Eu <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	Eu <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sample 1	0	80.0	20.0
Sample 2	56.2	43.8	0
Sample 3	44.4	37.6	18.0

Table1 List of samples

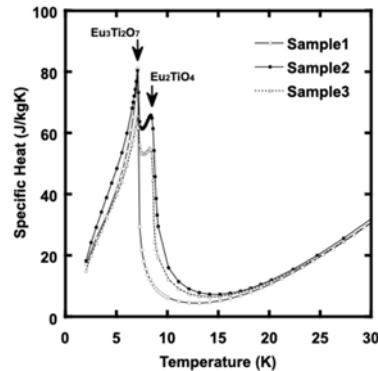


Fig.1 Specific heat of samples

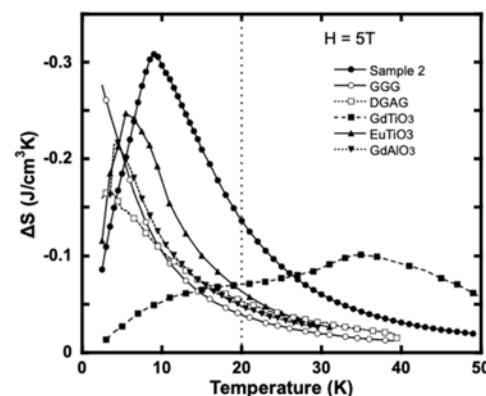


Fig.2 Comparison of entropy change at 5T

#### 5. 参考文献

- [1] K. Kamiya, et al.: Appl. Phys. Express 15 (2022) 053001
- [2] K. Matsumoto, et al.: J. of Phys. Conf. Series 150: 12028 (2009)
- [3] J. E. Greedan and G. J. McCarthy, Mat. Res. Bull. 7, 531 (1970)
- [4] CL Chien and S. DeBenedetti, PHYS REV.10, 9 (1974)

# 静止型磁気冷凍機のための磁気結合した複数の超伝導磁石から構成される変動磁場システムの検討

## Consideration of Excitation System Composed of Magnetically Coupled Multiple Superconducting Magnets for a Static Magnetic Refrigerator

松永 信之介 (岐阜高専); 夏目 恭平, 神谷 宏治 (NIMS)

MATSUNAGA Shinnosuke (NIT, Gifu College); NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji (NIMS)

E-mail: shinnosuke.matsunaga@gifu-nct.ac.jp

### 1. はじめに

磁気冷凍機は、従来の気体を冷媒として使用した冷凍技術に代わる新しい技術として注目されている。この技術は、ある種の磁性材料(Magnetocaloric Material; MCM)が磁場の変化に伴い温度変化を引き起こす「磁気熱量効果」を利用して冷凍サイクルを実現するものである。冷媒としてフロンガスなどを使用しないため環境負荷が低く、特に低温領域で効率が高いことが多いことから、水素液化や超伝導型量子コンピュータ冷却への導入が検討されている[1][2]。また最近では月面ミッションにおける推薦製造(液体水素製造)に対しても検討が進められている[3]。特に月面ミッション向けには、莫大な輸送コストのため装置本体を軽量とすること、限られた電力で運転できること、できるだけメンテナンスを不要とすること、といった要望を満足することが望まれている。

### 2. 磁気冷凍機における駆動型と静止型

磁気熱量効果を利用して実用に足る温度変化を得るためにには、数テスラの変動する磁場を MCM(磁気冷媒)に与える必要がある。これは非常に強い磁場であるため、ほとんどの場合、超伝導磁石が用いられる。この変動磁場を達成するために、以下の方式が研究・開発されている。

#### A) 磁気遮蔽物による磁場変化方式:

超伝導体や閉じた超伝導コイルの遮蔽効果を利用して、MCM に与えられる磁場を変化させる[4]。

#### B) 磁石と MCM の位置を変化させる方式(駆動型):

機械的に磁石と MCM の位置を変えて磁場を変動させる。先行研究[1]ではこの方式を採用し、水素の液化運転が実証された。

#### C) 電磁石の励消磁による方式(静止型):

電磁石と MCM を固定し、電磁石の充放電を行って磁場を変化させる。この方式は、連続運転ではなく、シングルショットで極低温を実現する場面、特に宇宙機で実績がある[5]。また、複数のシングルショット機を組み合わせて連続運転することも可能である[6]。

方式 A や方式 B は「駆動型」と呼ばれ、機械的な駆動装置を必要とする。一方、方式 C は駆動部を持たないため「静止型」と呼ばれる。一般的に冷凍サイクルを回すためのエネルギーが大きいほど冷凍能力も高い。駆動型では、強力なアクチュエーター(kW クラス)を備えればいいので、水素液化に必要な冷凍能力を達成しやすい。一方、静止型における電磁石の充放電による仕事(電力)は、10~100 W 程度が限度であり、冷凍能力を大きくすることが難しい。静止型はメンテナンスが容易であり、重量のあるアクチュエータが不要なため、軽量・コンパクト化に期待できるが、水素液化のような高い冷凍能力が求められる場合は、さらなる工夫が求められている。

### 3. 磁気結合型変動磁場システム

冷凍能力と静止型の両立を目指した磁気冷凍機に向けて、コイル間で電気的にエネルギーを移動させる方法や、LC 回路の共振現象を利用する方法が考えられている[7][8]。本研究では、Fig. 1 に示すように、磁気的に強く結合した複数の超

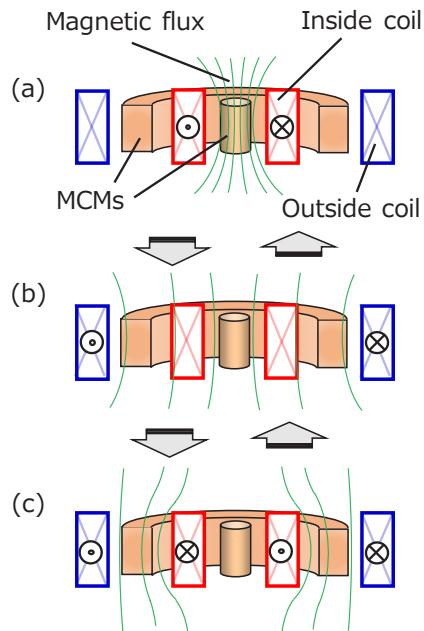


Fig.1 Excitation system by magnetically coupled multiple superconducting magnets for a static magnetic refrigerator

伝導磁石によって変動磁場システムを構成することを検討している[9]。まず、(a)のように内側コイルのみを励磁する。次に、もう一方のコイルの両端を閉じて(b)のように内側コイルを減磁させる。すると、磁束は系内に留まるため、磁石の励消磁に必要な電力を低減できる。さらに(c)のように内側コイルを逆励磁させることで、内側の MCM が受ける磁場は 0 となり、外側の MCM が受ける磁場が増大する。(a)→(b)→(c)→(b)→(a)のサイクルを繰り返すことで MCM に対して変動磁場を与えることができる。この方法では、内側コイルの巻線に対して大きな交流損失と径方向の圧縮応力が発生してしまう。これらについての詳細な分析が今後の課題である。

### 参考文献

1. K. Kamiya, et al.: Applied Physics Express, Vol. 5 (2022), No. 053001
2. K. Kamiya, et al.: Invited presentation of ISS2023, 2023.11.28-30
3. 神谷宏治 他: 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2022), No. 1D09
4. 佐治吉郎 他: 特開平 4-177065 (1990)
5. D. McCammon, et al.: The Astrophysical Journal, Vol. 576 (2002), pp. 188-203
6. P. Shirron, et al.: Cryogenics, Vol. 41 (2001), pp. 789-795
7. 平野直樹 他: 特許第 7170337 号 (2022)
8. 脇耕一郎 他: 2023 年秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2023), p. 48
9. 松永信之介 他: 特願 2024-026290 (2024)

## 磁気遮蔽方式磁気冷凍システムに関する基礎研究 2

## Basic research on magnetic shielding type magnetic refrigeration system 2

平野 直樹, 小野寺 優太(NIFS); 逢坂 昇汰, 岡村 哲至(Science Tokyo); 富田 優(鉄道総研)

HIRANO Naoki, ONODERA Yuta (NIFS)

OSAKA Shota, OKAMURA Tetsuji (Science Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: hirano.naoki@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導材料の研究開発の進展と、今後ヘリウムが安定に供給されない可能性を鑑み、ヘリウムに頼らなくとも極低温を維持できる冷却システムの研究開発を行っている。その一方として、高温超伝導コイルから発生する磁場と磁気冷凍技術を組合せることでコイル冷却をアシストする技術の研究を進めている。磁気冷凍では磁気作業物質に磁場の変化を与える必要がある。その手法として超伝導コイルの電力貯蔵機能を利用して励消磁する方法<sup>[1]</sup>と磁気遮蔽体を用いる方法<sup>[2]</sup>を検討している。外径や厚みの異なるYBCOバルク体に対して液体窒素を用い、77 Kと減圧下での約 65 Kでの実験から遮蔽効果を整理しているが、市販バルク体の結晶状態の不均一に起因し、バルク体の形状が磁気遮蔽能力と相関することを示すに至っていない。今回、77 Kにおいてバルク体の着磁特性を評価し、その特性と磁気遮蔽能力との相関を検討したので報告する。

## 2. 超伝導バルク体の磁気遮蔽効果

## ・実験方法

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

## ・実験結果

代表的な磁気遮蔽効果測定結果として、厚みは同じ(10 mm)で外径の異なるバルク体に対し、65 Kにおける磁気遮蔽効果の実験結果をFig.2に示す。磁気遮蔽効果は、バルク体の外径や厚みが増すほどその遮蔽能力が高くなると考えられるが、今回の実験では、外径が同じでも大きく遮蔽効果が異なる結果(28 mmΦ①、②)や、厚みが薄い方が遮蔽能力が高い結果が得られている。これは、バルク体の均一性が低いことが影響していると考えている。

## 3. バルク体の着磁特性評価

外見上は同じでもバルク体自体の特性は異なることが考えられる。これを明らかにするため、液体窒素温度においてバルク体に外部から磁場を印加し、その着磁特性の空間分布状態を計測した。外径28 mm厚み10 mmのバルク体の結果をFig.3に示す。同じ形状であっても、片方はきれいな円錐状の着磁特性が確認されたが、もう一方はピークが複数に分かれ、着磁磁場強度も半減していることが分かる。

## 4. まとめと今後の予定

YBCOバルクを液体窒素を用いて77 Kならびに65 K付近で磁気遮蔽効果を測定し、結果を整理している。同じ形状であっても、バルク自体の着磁特性の測定結果が大きく異なることが確認された。着磁特性と磁気遮蔽効果は相関性があると考えられることから、この考えも取り込んだ解析により20 Kまでの磁気遮蔽効果を推定し、水素の再液化にも応用できる高い冷凍性能を有する磁気遮蔽方式の磁気冷凍システムの実現可能性を検討したい。

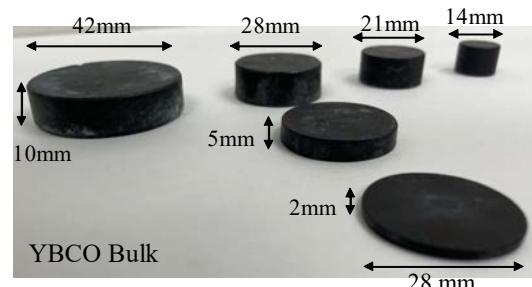


Fig.1 Photograph of superconducting bulk material for magnetic shielding

Table 1 Experimental Condition

Diameter [mm]	14, 21, 28, 42
Shield spacing [mm]	10
Temperature [K]	58~65, 77
Thickness [mm]	2, 5, 10
Applied field [T]	0~3.5

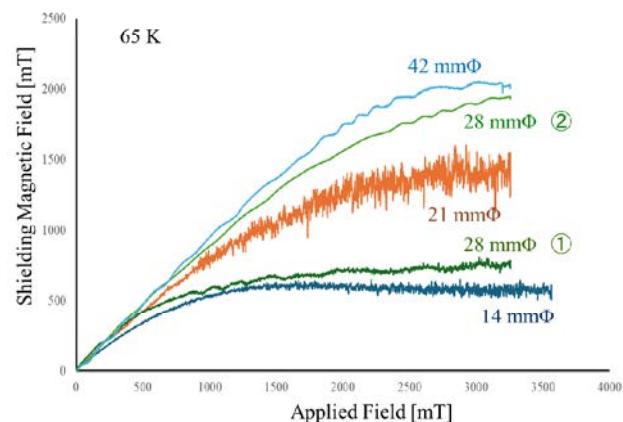


Fig.2 Experimental results of magnetic shielding effect at 65 K for YBCO bulks with different outer diameters

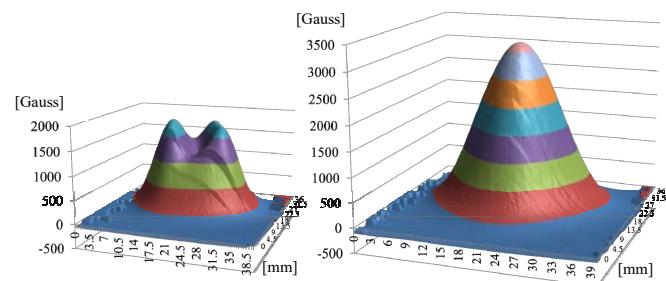


Fig.3 Magnetization characteristics of YBCO bulk at 77 K (outer diameter 28 mm, thickness 10 mm)

謝辞：本研究の一部は、NIFS（NIFS21KECA084, NIFS22KIEA016）の支援を受けて行ったものである。

## 参考文献

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

## 2段スターリング型パルス管冷凍機の開発 -設計計算プログラムと性能試験結果との比較評価検討-

### Development of Two-Stage Stirling Type Pulse Tube cryocooler -Comparative evaluation of design calculation programs and performance test results-

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

HIRATSUKA Yoshikatsu, OTSUKA Kiyomi, TSUNEMATSU Shoji, YASUDA Aogo, KANAO Kenichi (SHI);

NARASAKI Katsuhiro (NIT, Niihama College)

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

#### 1. はじめに

住友重機械工業株式会社(SHI)は、地球観測衛星、科学衛星用センサ冷却やシールドクーラ用途として人工衛星搭載用の冷凍機として単段、2段スターリング冷凍機およびJT冷凍機を冷却システムとして提供してきた。将来、観測能力を向上させるためにセンサの大型化に伴い冷凍機の冷却能力増加ならびに冷凍機の寿命を5年から10年に延伸することが要求されている。2段スターリング冷凍機はディスプレーサ駆動のためクリアランスシールを維持して、10年寿命延伸を担保することは厳しい課題となる。この課題を解決するための一つの方策として、膨張器に可動部を持たないパルス管(=以後PT)膨張器のハイブリッド構成を適用した高効率の冷凍機の開発を実施している。前回の報告では、単段パルス管冷凍機を予冷器として使用し、サーマルカップリング方式で、冷凍能力0.2W at 15Kを有する2段パルス管膨張器を設計試作し性能試験を行った結果について報告した。本報告では、その際に使用した設計計算プログラム(SAGE)と試験結果の比較評価検討結果について報告する。

#### 2. 試作機概要と性能試験結果

2PT冷凍機を設計する際に、冷凍機各部の形状ならびに最適な運転条件を決定するため、各国の研究機関で実績のあるSAGEソフトウェア(Gedeon Associates 米)を使用し冷却性能計算を行った。SAGEは独自のGUI操作により計算モデルを作成し、様々な小型冷凍機(エンジン)に対応した計算が可能である。パラメタ自動変更機能や最適化機能を付属し、計算の収束性が良いことが設計時に大きな利点となる。

図1には、2段PT冷凍機の計算モデルと表1には設計時の計算結果がそれぞれ示されている。2段PT冷凍機の計算は、2段PT膨張器のみを計算しており、その中間部分に設けられた熱交換器の熱量は、77Kの温度を維持するために必要な値を意味する。圧縮機の機械的な負荷を低減するために30Hzで計算検討しており、100Wの電気入力(P-V仕事74.7W)で、目標冷凍能力0.2W at 15Kが得られていることが分かる。冷却試験には2段スターリング用圧縮機を使用してお

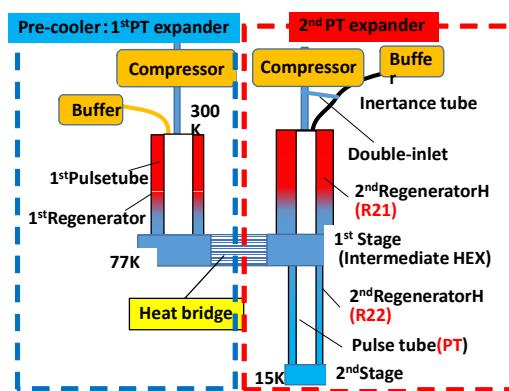


Fig.1 SAGE calculation model of 2 stage PT expander.

Table 1 Performance calculation results of a 2stage PT cryocooler.

Item	Geometry parameters of 2 stage PTC
Compressor piston diameter	OD20 mm
Operating frequency/Initial gas pressure	f 30Hz / Pm 2.5MPa
2 stage expander	
Regenerator(R21)	H OD17.8mm, L25mm, 180#SS L OD17.8mm, L45mm, 400#SS
Regenerator(R22)	H OD14.2mm, L35mm, HoCu2 d0.1mm L OD14.2mm, L40mm, HoCu2 d0.1mm
Pulse tube	ID9mm, L70mm+5mm(Intermediate HEX) +L90mm+L5mm(HEX)
Double-inlet / Inertance tube	ID0.85mm / L2.42m, ID1.59mm
Buffer volume	250cc
Cooling performance	
Compressor stroke Xc/ pressure defference dPc	14.7mm / 0.528MPa
Compressor P-V work Wc2	74.7W
2 stage PTC	
Heat rejection of 1 <sup>st</sup> stage at 77K Q21	4.233W
Cooling performance of 2 <sup>nd</sup> stage at 15K Q22	234 mW
compressor electric input power QinP2	100W

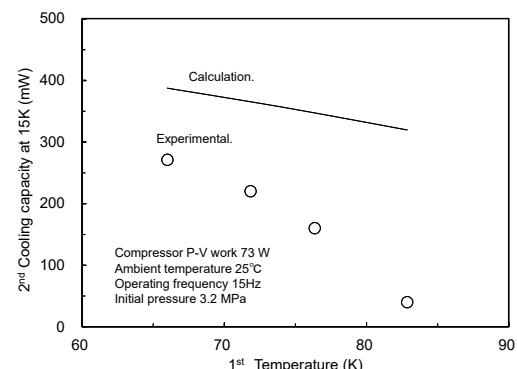


Fig.2 Comparison of experimental and calculated results.

り、共振周波数が合わないため圧縮機P-V仕事75Wを基準に試験を行った。本計算結果に基づき冷却試験を行ったが、目標冷凍能力に未達(到達温度28.6K)となり、その後各諸量を変更調節することで、単段1W負荷時に2段冷凍能力206mW at 15K、到達温度9.7Kが得られている。

図2には、1段に掛かる負荷を0~3W掛けた際の1段温度に対する2段冷凍能力の試験結果と計算結果が示されている。同図より、定性的な理解は可能かと考えるが、設計時に必要となる定量的な値が大きく乖離していることが分かる。

#### 3. まとめと今後の予定

冷凍能力0.2W at 15Kを有する2段PT試作膨張器を設計製作した際に使用した性能計算プログラム(SAGE)について評価検討を行った。その結果、性能計算ツールとして現状使用することは困難で、今後より多くのデータを収集し修正項を考慮することで次期設計に適応可能と考える。

#### 参考文献

1. Y. Hiratsuka, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p48.

# 宇宙用希釈冷凍機

## Dilution refrigerator for space use

朱 紹偉(同濟大學)  
 ZHU Shaowei (Tongji University)  
 E-mail: sw\_zhu@163.com

### 1. INTRODUCTION

Some space missions need a refrigeration temperature below 50mK. The magnetic refrigerator is complex though it is used in space. Open cycle dilution refrigerator life time depends on the storage of He3 and He4 in space. Close cycle dilution refrigerator could be a good choice because it is very simple, but how to separate He3 and He4 in space is a problem because ordinary still cannot make a clear phase boundary of liquid He4 and gas He3 near zero gravity. Another problem is no He3 concentrated phase and dilute phase in the mixing chamber near zero gravity. A new concept of close cycle dilution refrigerator may solve these problems.

### 2. NEW CONCEPTS OF STILL AND MIXING CHAMBER

The inner wall of the still is filled with porous material for liquid superfluid He4, the empty center is for gas phase He3. All heating power to the still originates from the center. A silver or other porous material plug replaces the interface between the concentrated and dilute phases in a typical dilution refrigerator.

### 3. STRUCTURE AND MECHANISM

Figure 1 is a schematic of the dilution refrigerator for space using based on the new concept.

Compression unit 1 includes compressors and pre-coolers, where He3 is compressed and pre-cooled to base temperature may be 2-4K by a JT refrigerator pre-cooled by a pulse tube refrigerator or Stirling refrigerator. Then it passes hot heat exchanger 2 where it is cooled by low pressure He3 gas from the still 3.

The inner wall of still 3 filled with porous material 31, in which the liquid super He4 would stay, the center is empty for gas phase He3. It is similar to space using heat pipe in which there is clear liquid phase and gas phase. He3 gas out tube 33 has heater 35 for breaking Rollin film and supply heat power to the still for vaporization. High pressure He3 tube also passes He3 out tube for making He3 cooler 34 in the center of the still for further cooling to near still temperature, and the He3 cooler is also a heater for the still. To slow down the Rollin film velocity, the He3 out tube may be coiled to make it long enough. This structure let almost all heat power for the still release from the center. There would be a temperature gradient from the center to the porous material for keeping gas phase. If the power of heater 35 is not enough to break Rollin film, theoretically, it still works by an orifice at the end of He3 out tube, but it may meet compression unit difficult due to too low pressure of He3. He3 last cooler 36 is for make sure that He3 is cooled enough by the still.

Mixing chamber 5 is separated by porous material plug 53 to imaginary concentrated space 51 and imaginary dilute space 52. He3 from imaginary concentrated phase passes plug 53 due to high pressure, and it would penetrate to He4 which is on the surface of the powder of the plug. If the plug surface area is large enough, He3 and He4 would mix well after passes the plug to imaginary dilute phase 52. A JT valve on He3 gas tube may stop super He4 goes to He3 tube. The space 51 may be filled with He3 drop mixing with He4 or concentrated He3, which may depend on the pressure difference of He3 between both side of plug 53. The plug acts as the interface between concentrated phase and dilute phase in an ordinary dilution refrigerator. The process of He3 penetrates to He4 is also a

process of making cooling power, the plug would be cooled down, then the plug is also a fin for transfer cooling power out.

Heat exchanger unit 4 may include continues heat exchanger and step heat exchanger. Due to zero gravity, He3 may be easy penetrate to still 3 from imaginary dilute phase 51.

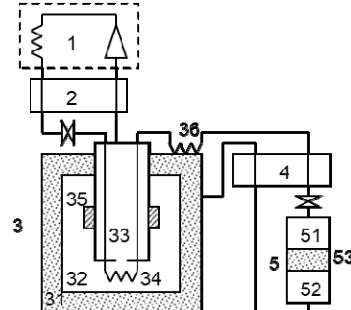


Figure 1 Schematic of dilution refrigerator for space use  
 1.compression unit 2.hot heat exchanger 3.still 31.porous material 32.gas space 33.He3 out tube 34.He3 cooler 35.heater 36.He3 last cooler 4.heat exchanger unit 5.mixing chamber 51.imaginary dilute phase 52. Imaginary concentrated phase 53.plug

### 4. CONFIRMATION TEST CONCEPT ON GROUND

Figure 2 is the schematic of the test system. Inside the still, there is a heater which supply heat power, and a sorption cooler supply same amount of cooling power to let the still in thermal balance condition. If it works, superfluid He4 fills the porous material, He3 gas is in the center, and there is He3 gas inside the He3 out tube, too. We can put the test system in different directions to check it. After the test, we may test it in zero gravity test system for about 10 seconds to know if He4 stays in porous material and the center has no liquid. The confirmation test of mixing chamber could be done in an ordinary dilution refrigerator with new mixing chamber as shown in Figure 1 and let its temperature over the phase-separation temperature to make sure there is no concentrated phase in the system, and let still temperature is a little higher. If the mixing chamber temperature is lower than the still and has cooling power, we may judge that it works.

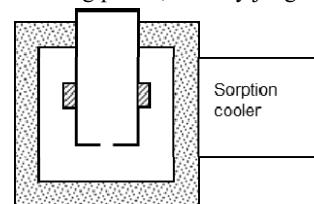


Figure2 Schematic of the confirmation test system for still

### 5. CONCLUSION

The new concept of a dilution refrigerator and its confirmation test system are introduced. The new dilution refrigerator theoretically has the potential to work well.

### REFERENCE

1. Shaowei ZHU. Dilution refrigerator for space use, Chinese patent application 2024105341129.
2. Shaowei ZHU, Yuanjian Li, Zhexiang Li. The Mixing chamber of dilution refrigerator for space use and the dilution refrigerator, Chinese patent application 2024106935552.

## サブ mK 連続発生冷凍機の実現

### Successful Development of a Continuous Sub-mK Refrigerator

戸田 亮, 福山 寛 (東大)  
 TODA Ryo, FUKUYAMA Hiroshi (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: toda.ryo@mail.u-tokyo.ac.jp

#### 1. はじめに

従来、限られた研究分野でのみ利用されてきたサブ mK ( $T < 1 \text{ mK}$ ) の超低温実験環境を、量子技術など広い分野で活用できるよう、小型で操作簡便な連続核断熱消磁冷凍機 (CNDR)型のサブ mK 連続発生冷凍機の開発を行ってきた。これまで主要構成部品の開発を進めてきたが、これらを統合して 0.72 mK を連続発生させる実証実験に成功した。核スピンを利用した連続断熱消磁冷凍を実現したのはこれが初めてである。

#### 2. 本冷凍機の構成

本冷凍機は、市販の無冷媒希釈冷凍機 ( $T_{\min} = 10 \text{ mK}$ 、 $400 \mu \text{W} @ 100 \text{ mK}$ ) を予冷段とし、その混合器温度の実験空間に CNDR ユニットを搭載する構成となっている。CNDR ユニット(図 1)は  $156\text{W} \times 84\text{D} \times 240\text{H}$ (単位 mm)と十分コンパクトで、希釈冷凍機への着脱は容易である。図 2 の赤線で示したように、ステージ 1 は希釈冷凍機による予冷過程①と、流入熱によってステージ 2 に蓄積したエントロピーをポンピングする過程③を含む熱サイクルを繰り返す。ステージ 2 は図中青矢印で示すように、試料ステージ温度  $T_s$  を一定に保つよう流入熱や測定発熱を常時吸熱しつつ(①②④)、ステージ 1 のサイクルに同期して、溜め込んだエントロピーをステージ 1 へ受け渡す(③)。最低維持温度をできるだけ下げるには、各構成部品自身の熱抵抗や部品間の接触熱抵抗を減らすことが重要で、本装置の場合、両ステージ間の熱抵抗は残留電気抵抗値で概ね  $210 \text{ n}\Omega$  を実現している。増強核磁性体  $\text{PrNi}_5$  を用いたことで最大磁場  $1.3 \text{ T}$  の小型超伝導マグネットでも、 $20 \text{ mK}$  以下まで予冷できれば十分な量のスピンエントロピーを奪うことができる。そのためマグネット全体を磁気シールドで覆い 2 つの核ステージを近接設置して装置を小型化できた。また、ステージ 1 で繰り返しエントロピーポンピングができるので、比較的少量の磁気作業物質でも(使用する  $\text{PrNi}_5$  の体積は 1 ステージ当たり  $10 \text{ cm}^3$ )、実用的な冷却能力を確保できている。

CNDR の動作原理[1]と各構成部品[2-4]の詳細については、それぞれの参考文献を参照されたい。

#### 3. サブ mK の連続発生

図 3 に、実際にサブ mK 温度の連続発生に成功したデータの一例を示す[5]。実証実験では、2 つの核ステージの温度は白金線の NMR 磁気温度計[6]で測定した。図の上段に実測したステージ 2 の温度をリニアスケールで、下段に 2 つの核ステージに印加した磁場(赤がステージ 1、青がステージ 2)の制御の様子を対数スケールでそれぞれ示す。数サイクルにわたり温度を  $0.72 \pm 0.01 \text{ mK}$  および  $0.96 \pm 0.01 \text{ mK}$  に維持できたことが分かる。このときはステージ 2 の磁場制御の範囲を固定しており、外界からの熱流入量の増減を能動的に補正していないが、原理的には、長期間にわたりいくらでもサブ mK 温度を維持し続けることができる。

#### 4. 本冷凍機の冷却能力

今回開発した CNDR 初号機の熱モデルを構築し、実測した各部の熱伝導度や熱流入量を加味して最大冷却力を予測したのが図 4 の緑線である。丸印は冷却力の実測値で、両者はよく一致する。図中の黒破線は予冷段に用いた希釈冷凍

機の冷却力曲線で、液体  $^3\text{He}$  の粘性発熱のため約  $9 \text{ mK}$  以下で冷却力は急減する。一方、CNDR はその温度以下で、希釈冷凍機に比べて圧倒的に大きな冷却力をもつことが分かる。その意味で、この小さな CNDR は大型希釈冷凍機の冷却性能を飛躍的に拡張することができる。

上記測定時の熱流入量(両ステージ合わせて  $20 \text{ nW}$ )の大部分は機械振動による摩擦熱であることが判明したので、その後、一定の除振対策を施すことで計  $5 \text{ nW}$  まで低減できている。仮にこれを計  $2 \text{ nW}$  まで低減し、部品間の熱抵抗も半減できれば、図中紫線までこの CNDR 初号機の性能を向上できるはずである(最低維持温度は  $0.5 \text{ mK}$  弱)。現在、それらの改良と、白金 NMR 温度計に代わる新たなサブ mK 温度計の開発に取り組んでいる。

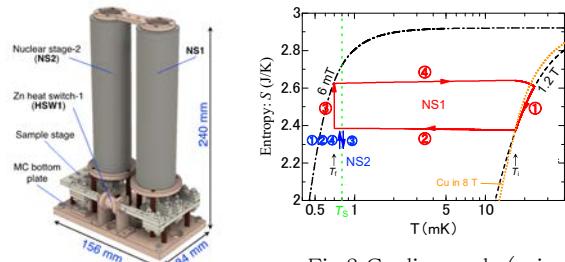


Fig.1 Overview of CNDR [1,5]  
 [3,5].

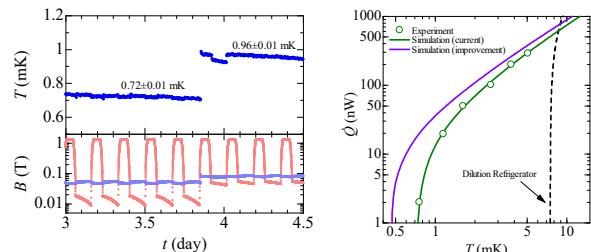


Fig.3 Time evolution of the temperature and controlled magnetic fields of CNDR [5].

#### 参考文献

1. R. Toda, S. Murakawa, and H. Fukuyama: J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 969, (2018) p.012093.
2. S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and H. Fukuyama: J. Low Temp. Phys. Vol. 201, (2020) p.179.
3. S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and H. Fukuyama: J. Low Temp. Phys. Vol. 208, (2022) p.492.
4. R. Toda, S. Takimoto, Y. Uematsu, S. Murakawa, and H. Fukuyama: arXiv:2209.08260.
5. 戸田亮, 瀧本翔平, 村川智, 福山寛: 東京大学低温科学研究センター2022年報, (2023) p. 115.
6. F. Pobell, Matter and Methods at Low Temperatures, 3rd ed. (Springer, Berlin, 2007).

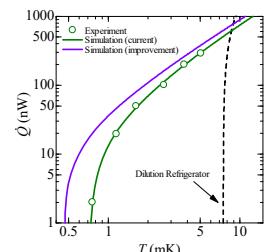


Fig.4 Cooling power of CNDR.

## 残留抵抗率比測定による熱交換器材料の超低温熱伝導率の評価

### Ultra-low temperature thermal conductivity estimation of heat exchanger materials using residual resistivity ratio measurements

中川 久司 (産総研) ; 野末 竜弘 (アルバック・クライオ) ; 斎藤 政通 (アルバック・クライオ)

NAKAGAWA Hisashi (AIST); NOZUE Tatsuhiro (ULVAC CRYO); SAITO Masamichi (ULVAC CRYO)

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

#### 1. はじめに

我々は、超伝導量子コンピュータのための冷凍システムの開発を進めている[1]。このシステムの中核である希釈冷凍機には、大きな冷凍能力が求められる。その性能は、冷媒のヘリウム混合液を冷却する熱交換器の性能に大きく左右される。熱交換器内において、熱交換器材料である銀焼結体（銀粉末を焼結したもの、silver sinter）は高温側濃厚相と低温側希薄相とを隔てる隔壁の両面に焼結されており、この銀焼結体を介して熱交換が行われる（図1）。そのため、銀焼結体には、大きな熱交換表面積や高い熱伝導率などが求められる[2]。これらのことと踏まえ、我々は冷凍システムに必要な銀焼結体の開発を進めている。

#### 2. 残留抵抗率比による熱伝導率の評価

熱交換器において、冷たい希薄相が濃厚相の熱を効率よく吸熱するには、銀焼結体の表面積が大きいだけでは不十分である。両相を熱的につなぐそれ自身が良熱伝導体である必要がある。高い焼結温度、あるいは長い焼結時間とすることで、銀微粒子間のネット成長が促され、微粒子間の結合が強くなるので、銀焼結体の熱伝導は高くなる。しかし、充填率（バルク状態で100%）は高くなり、同時に比表面積は減少する。そのため充填率は、50%前後を目安としている。均一な固体材料では、熱拡散係数は熱伝導率に比例する。レーザー・フラッシュ法を用いた熱拡散係数測定[3]から、充填率50%の銀焼結体の熱拡散係数は、バルクのおよそ半分であることがわかっている[2]。

本研究では、最適な銀焼結体を効率よく探索するため、Wiedemann-Franz 則に基づく残留抵抗率比 (RRR) 測定[4]から銀焼結体の熱伝導率を評価する。この方法は、これまで高純度金属[5]や銀焼結体[6]の超低温下での熱伝導率の評価に利用されてきた。また熱拡散係数や熱伝導率測定に比べ実験の準備が簡単であり、比較的短時間で評価ができる。RRRは、室温の電気抵抗率 $\rho_{300\text{ K}}$ と低温（4 K）の電気抵抗率 $\rho_{4\text{ K}}$ との比「 $\rho_{300\text{ K}}/\rho_{4\text{ K}}$ 」であり、この比が大きいほど純度や熱伝導が高い。室温では、電子散乱はフォノンが支配的である。一方、低温ではフォノンの寄与がほとんどなくなり、不純物や結晶の不完全性などによる散乱のみとなる。この方法を用いて、RRRという「比」で各試料の熱伝導を比較するので、試料の正確な形状情報は必要なく、各試料間の（相対的な）熱伝導の良し悪しを比較することができる。

#### 3. 残留抵抗率比測定システムの構築

銀焼結体試料は、あらかじめ窒素ガス吸着法を用

いて比表面積、細孔分布などを測定する。希釈冷凍機の予冷部分である4 K パルス管冷凍機の2段ステージを利用して試料を冷却する。室温および4 K での試料の厚み方向の電流（I）-電圧（V）特性を四端子法により測定して、得られた傾き $dV/dI$ から電気抵抗を求める。室温に設置した配線スイッチにて測定対象を選択し、一度の実験で、4個までの試料を評価できるようにしている。

#### 4. まとめ

現在、残留抵抗率比測定システムの構築と並行して冷凍システム実機の開発、性能試験も進めている。実機の試験結果に基づき、本研究を進め、さらに本研究の成果を冷凍システム設計にフィードバックする。今後は、ヘリウム混合液と銀焼結体との熱抵抗の評価も行い、銀焼結体の開発を進めていく。

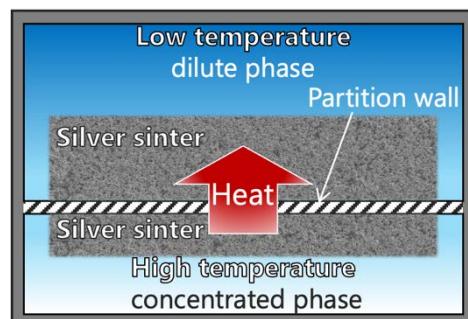


Fig.1 Schematic view of the step heat exchanger in a dilution refrigerator. Heat flows from the concentrated phase to the dilute phase through a partition wall with silver powder sintered on both sides.

#### 謝辞

本研究の一部は、JSTムーンショット型研究開発事業（JPMJMS2067）の支援を受けたものです。

#### 参考文献

1. JSTムーンショット型研究開発事業 目標6  
「超伝導量子回路の集積化技術の開発」(PM 山本剛), <https://ms-iscqc.jp/>
2. H. Nakagawa, Y. Miseki and M. Akoshima, *Cryogenics* **102**, (2019) 1–8.
3. M. Akoshima and T. Baba, *Int. J. Thermophys.* **32**, (2006) 1189–1203 and the references cited therein.
4. J.W. Ekin, *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements*, Oxford University Press, New York, 2006.
5. K. Gloos *et al.*, *Cryogenics* **30**, (1990) 14–18.
6. P.A. Busch, S.P. Cheston and D.S. Greywall, *Cryogenics* **24**, (1984) 445–447.

# 大型高温超伝導導体試験用温度可変インサートの性能

## Performance of Variable Temperature Test Apparatus by Helium Gas for Large-Scale High Temperature Superconductors

浜口 真司, 小野寺 優太, 三戸 利行 (NIFS)

HAMAGUCHI Shinji, ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail: hamaguchi.shinji@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所超伝導マグネット研究棟の超伝導・低温試験設備は、平成 26 年度に温度可変ヘリウム液化冷凍機が導入され、任意の温度のヘリウムで試験体の冷却が可能となった。大型の高温超伝導導体を温度可変で試験するため、定格 10 kA の電流リードを備えた温度可変インサートが製作され、最大磁場 9 T のスプリットコイルを備えた既設の大型導体試験装置に設置された。本発表では、その性能・試験可能範囲について報告する。

### 2. 装置概要

大型導体試験装置に温度可変インサートを挿入し、温度可変ヘリウム液化冷凍機と接続した状態の試験装置の概略を Fig. 1 に示す。温度可変ヘリウム液化冷凍機は 250 L/h の液化能力、600 W@4 K の冷凍能力に加え、任意の温度のヘリウムを供給することが可能である。その冷却能力は送り温度/戻り温度が 20 K/30 K で約 1 kW、40 K/50 K で約 1.5 kW である[1]。試験においては、スプリットコイルを液体ヘリウムで浸漬冷却しつつ、試験体を任意の温度のヘリウムガスフローで冷却する。温度可変インサートは、上部に一对の電流リード、下部に試験体を周囲の液体ヘリウムから断熱するための容器を持ち、電流リードから容器底までは約 2.3 m である[2]。試験空間の断面は幅 160 mm、奥行 70 mm で、設計圧力は 0.3 MPa である。また、試験体用の直流電源の最大電流値は、50 kA である。

### 3. 試験性能

通電試験中は、容器内には定常的な侵入熱のほかに、電

流リードや接続部の発熱が熱負荷として加わるため、温度可変ヘリウム液化冷凍機とバランスを取りながら、寒冷の分配を調整する必要がある。電流リードは発熱が増加し一旦温度が上昇し始めると、電気抵抗は増加し冷媒の流量は減少するため注意を要するが、通電波形や冷却を工夫することで、電流リードの定格を超える通電が可能となる。これまでの実績から、以下の範囲において、試験が可能であることが確認された。

試験温度: 5.5 K – 65 K

通電電流値: 10 kA@20 K (定常)

22 kA@20 K (繰り返し通電(三角波))

30 kA@6 K (最大)

### 4. まとめ

温度可変インサートの導入により 2 m 級の高温超伝導導体の通電特性を 9 T までの磁場環境下において幅広い温度範囲で調べることが可能となった。また、通電方法の工夫により電流リードの定格を超える通電が可能である。

### 参考文献

1. S. Hamaguchi, et al., "Commissioning Test Results of Variable Temperature Helium Refrigerator/Liquefier for NIFS Superconducting Magnet Test Facility," IEEE Trans. Appl. Supercond., 26 (2016) 9500404.
2. Y. Onodera et al., "New HTS conductors testing facility with 4.2 K – 50 K variable temperature insert in 9 T magnetic field," presented in ITC29, Oct. 27-30 (2020) Toki, Japan.

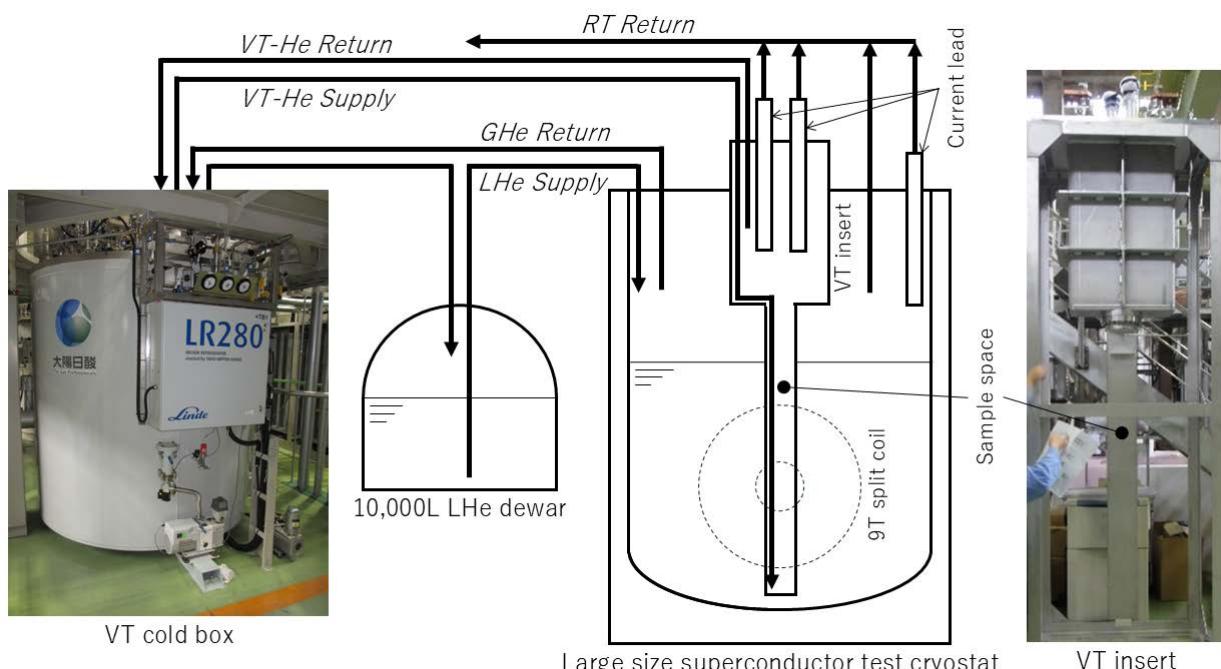


Fig.1 Flow diagram of variable temperature (VT) test apparatus

## 断熱二重管の表面材料と熱輸送

### Heat-transfer dependence of pipe surface materials in cryogenic double pipes

山口 作太郎, 神田 昌枝, IVANOV Yury, 渡邊 裕文(中部大学); 坪田 修一郎, 松本 一昭(栃木カネカ); 原田 泰宏(JFE スチール)

YAMAGUCHI Sataro, KANDA Masae, IVANOV Yury, WATABAE Hirofumi (Chubu Univ.); TSUBOTA Shuichiro, MATSUMOTO Kazuaki (Tochigi KANEKA); HARADA Yasuhiro (JFE Steel)

E-mail: yamax@fsc.chubu.ac.jp

#### 1. はじめに

超伝導機器の表面積・体積比が大きい装置は外部からの熱侵入が大きな課題になる。これは低温に保持するための冷凍機の消費電力と関連するため、熱侵入量と冷凍機 COP に直接依存する。後者はカルノー・サイクル効率によって上限があるが、前者は上限がなく、真空断熱二重管で広く使われる多層膜断熱材 (Multi-Layer Insulation, MLI) の物理モデルがないため、大きな改善の余地があると考えている。

輻射に寄る熱輸送は常温側と低温側の表面材料とその表面状態に依存する輻射率を用いて計算で求めることができる。このため、今回光学積分球での反射率測定を行い、プランクの輻射公式を利用してそれぞの波長での輻射率の重みを考慮して実効的な輻射率を求めた。そして、それを利用して今までの熱侵入量実験データとの比較を行った。

#### 2. 色々な材料の反射率測定と実効輻射率

図 1 に色々な材料の輻射率測定結果を示す。これは光学積分球を用いて赤外領域 (波長は 1.6 ~ 25.0 mm) で測定を行っている。反射率が 100%を超すのは、センサー・ノイズが原因であるとされている。一方、輻射率  $\epsilon$  と反射率  $\rho$  の関係は下記の様に表される。

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (1)$$

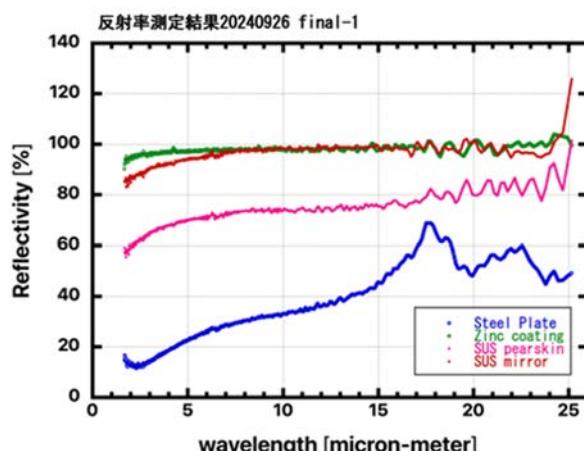


Fig. 1 Reflectivity measurement for metal surfaces

実効輻射率を求めるには Plank 輻射公式を使い、常温からの輻射のそれぞれの波長に対する重みを付けて平均化を行い求める。具体的な評価方程式は下記である。

$$\langle \epsilon \rangle = \int_{1.6}^{25.0} \epsilon(\lambda) I_0(\lambda, T) d\lambda / \int_{1.6}^{25.0} I_0(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

このようにして求めた実効輻射率は Table 1 で与えられる。尚、全ての波長での観測ができないが、常温黒体から

の輻射積分値の 80%以上を観測波長範囲で含まれるため、誤差は少ない。また、反射率が 100%を超す時には、上限値を例えれば 98%, 99%と決めて平均操作を行った。

Table 1 Effective Emissivity of Metals Surfaces

Metal	MLI	Zinc coating	SS mirror	Pearskin SS	Steel
effective $\epsilon$	0.0175	0.0225	0.0259	0.2425	0.5960

#### 3. 同軸 2 重管での計算結果と実験データ

同軸二重管構造を考え、低温内管と常温外管から構成されるとすると、下記の方程式が熱侵入量 [1] を与える。

$$Q_{12} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left( \frac{1}{A_2 \cdot \epsilon_2} + \frac{1}{A_1} \left( \frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \right)} \quad (3)$$

ここで  $A_1, \epsilon_1, T_1$  は高温側の面積、輻射率、温度を表し、添字が 2 で示されたパラメータは低温側の同じ物理量を示す。また、 $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 係数である。この式を用いて実験データから得た実効輻射率を適用すると図 2 を得る。縦軸が熱侵入量であり、横軸は内管の実効輻射率であり、外管の実効輻射率を 0.22, 0.24, 0.26 と変えて、低温側温度 = 77 K, 常温側温度 = 300 K として計算した。

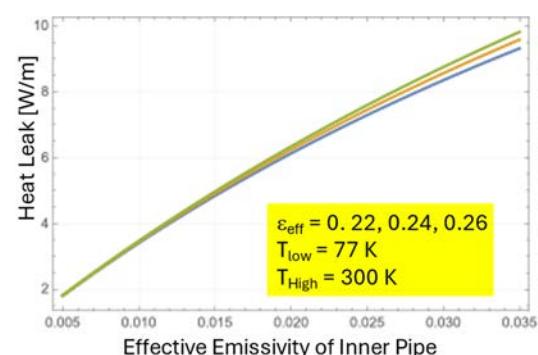


Fig. 2 Reflectivity measurement for metal surfaces

現時点でのまとめとして、上記計算結果は一層 MLI の場合に相当し、熱侵入量は 2 ~ 10 [W/m] が得られ、過去に行った実験結果と比較的良い一致 [2] を示している。

#### 参考文献

1. R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, "Transport Phenomena," pp. 446-453, John Wiley & Sons, 1960.
2. Y. Nasu et al., Proc., ICEC22/ICMC2008, pp. 489-494.

## CO<sub>2</sub> の液体窒素温度における固化を使った真空断熱層の減圧

Pressure reduction inside vacuum insulation by Cryo-condense of CO<sub>2</sub> in liquid Nitrogen

高田 卓, 濱口 真司, 鷹見 重幸(NIFS); 野澤 正和(秋田高専)  
 TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, TAKAMI Shigeyuki (NIFS); NOZAWA Masakazu(Akita tech);

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

### 1. はじめに

極低温実験を始めるにあたって真空断熱層を減圧するターボ分子ポンプや拡散ポンプ等の準備は1つの悩みの種になる。しかし、極低温であれば真空断熱層内のガスが凝縮し、クライオポンプ効果によって減圧が可能であり、高価なポンプを使わずに実験可能に思える。こうした発想は、古くから知られており、クライオポンプ研究のみならず、予冷時間短縮技術としても1960年代には複数の記載がみられる[1, 2]。ヘリウム液化機のコールドボックスにおいてもロータリーポンプのみでクライオポンプ効果に頼って断熱しているモノも一般化してきている。更には、空気とCO<sub>2</sub>等のガスとの置換によってアウトガス低減を狙う特許も出ている[3]。しかしながら、そのどれも断熱真空を得たいだけのユーザーにとっては具体的データの記載は乏しく実験を開始するに至った。

### 2. 物性値の比較

本発表では液体窒素層の断熱を狙うため、断熱層に充填するガス種は液体窒素温度で固化するガス種で、入手性の良いCO<sub>2</sub>を選んだ。77Kでの飽和蒸気圧がアルゴンは10<sup>2</sup>Pa、CO<sub>2</sub>が10<sup>-14</sup>Paオーダーであり、アルゴンは選ばなかった。ちなみに、液体水素温度での窒素・酸素の飽和蒸気圧もそれぞれ10<sup>-15</sup>、10<sup>-17</sup>Paオーダーであるため、液体窒素温度でのCO<sub>2</sub>固化の様相は液体水素温度での空気の固化の様相と近い。捕獲係数が77K、20Kではやや違う[4]ため、時定数には違いがあると察せられる。

### 3. 実験方法

本実験では、液体窒素用クライオスタットの真空断熱層にCO<sub>2</sub>を導入するのではなく、液体窒素溜めに対して小型の真空断熱層を沈める方式をとった。体積/表面積比が時間のパラメータになると考えられ、本実験は多くのクライオスタットに比べて加速試験的な意味合いをもつ。小型真空槽はI.D. 38 x 300 mm、肉厚は2 mmのBA管、底板のみ3 mm、材質はSUS304、フランジにはICF70を使用した。真空槽外側の温度測定にPt測温抵抗体を複数配置し、圧力測定にはフルレンジゲージ(ピラニーとコールドカソードゲージの複合ゲージ)を使用した。

液体窒素は285 mmの深さの容器に満杯にした後、自然と液面が下がる中で実験を行っている。後述する結果では液面の効果は顕著には見られない。

CO<sub>2</sub>の充填は、最初に入っている空気の追い出しと吸着したガスを放出する為に10Paに減圧後、大気圧のCO<sub>2</sub>を入れ、再度減圧するという操作を5回行っている。

### 4. 実験結果と考察

図1に大気圧に充填されたCO<sub>2</sub>を液体窒素に沈めた場合とCO<sub>2</sub>を充填した後ロータリーポンプで減圧し0.6Paに減圧した後に液体窒素槽に沈めた場合を比較したもの。大気圧のCO<sub>2</sub>が充填されていても、僅か数分の後に1Paを下回り、3時間程度後には0.1Pa以下の値で落ち着く。初期圧力が0.6Paと低い場合においては、やや圧力減少が1atmから始めた場合よりも早い。吸着スピードが僅かな固体層の厚みにより減じていることが想像される。なお、1atmのCO<sub>2</sub>が壁面に均一に固体層を形成したとした場合の厚みは約14 μmである。また、最低到達圧は高真空まで到達せず、時間の差はあるモノのおおよ

そ同じ圧力に落ち着くことが分かる。

本実験は実のところ低圧領域において非常に再現性が悪い。これは実験開始時に既に壁面に吸着されているガスが深く関係していると考えられる。図2に示すのは、減圧後締め切ったサンプル槽の圧力上昇率(ビルドアップ)の違いによるLN<sub>2</sub>冷却後の減圧カーブを比較したものである。特に、100Pa以下の領域で違いが顕著に表れる。脱ガスが主なビルドアップ要因と考えられ、このビルドアップが低く抑えられる程、最低到達圧は低くなる。しかしながら、ビルドアップレートは金属表面から脱離するガス種が弁別される指標でないため、空気成分の吸着が問題であるのか、結論は出来ない状態である。

そのため、結論できることは「十分な洗浄やベーキング等に気を払えば、真空槽をCO<sub>2</sub>置換することで液体窒素温度以下のクライオスタットでは断熱真空に足る1Pa未満が得ることが出来る。」というに留まる。

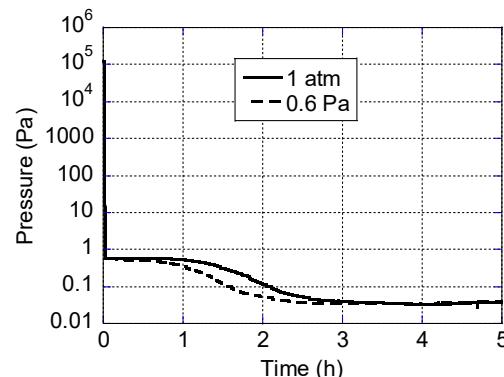


図1. CO<sub>2</sub>固化による減圧過程の初期充填圧比較

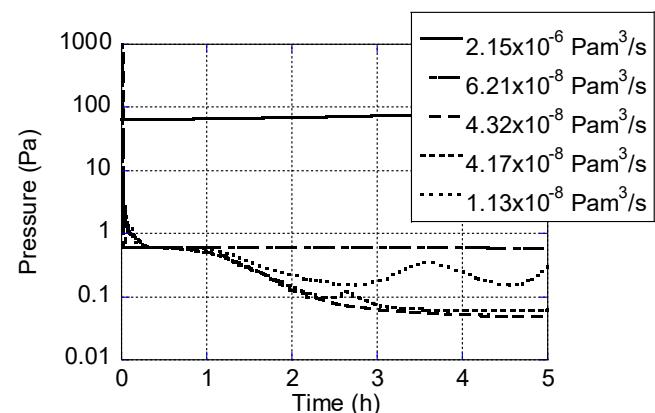


図2. 1atmのCO<sub>2</sub>を固化させた際の減圧過程とビルドアップレート比較

### 参考文献

1. L. Finegold, Cryogenics 9(1969), 134-135
2. M. Springford and J. R. Stockton, Cryogenics 9(1969), 390
3. 圓山 重直, 青木 五男ら (特開2010-276173)
4. 秋山 好胤, 低温工学 vol 2-4 (1967) pp9-17

## 超電導・極低温機器の安全と信頼性のアンケート実施に向けた アンケート WG の活動2(限定アンケート実施結果)

Activities of the survey working group towards questionnaire concerning safety and reliability of the superconducting / cryogenic equipment 2 (Survey results for limited audience)

池内 正充(前川)；伊藤 聰(JASTEC)；淵野 修一郎, 驚山 玲子(東大)；平井 寛一(大陽日酸)；三戸 利行(NIFS)；  
楳田 康博(KEK)

IKEUCHI Masamitsu (MAYEKAWA) ; ITO Satoshi (JASTEC) ; FUCHINO Syuichiro, SAGIYAMA Reiko (Tokyo Univ.) ;  
HIRAI Hirokazu (TAIYO NIPPON SANSO) ; MITO Toshiyuki (NIFS) ; MAKIDA Yasuhiro (KEK)

E-mail: masamitsu-ikeuchi@mayekawa.co.jp

### 1. はじめに

アンケート WG は環境・安全委員会の下、2023 年 5 月より活動中である。2023 年秋季低温工学において、安全と信頼性のアンケートを検討中であることを報告した[1]が、今般、対象者を限定してアンケートを実施した。その結果を報告するとともに、今後幅広く実施予定のアンケートの案についても提示し、皆様のアンケートへのご協力を募りたい。

### 2. アンケートの目的

超電導機器と、それを冷却する冷凍機・液化機および付随する機器類の定量的な評価手法を確立し、我が国が先頭に立ってその標準化の議論を進めるため、アンケートを通してトラブルなどに関する情報を広く収集し、今後の活動に生かすことを目的としている[2]。

アンケートはメーカーとユーザーの両方に行うこととし、アンケート結果をもとに、(1)信頼性については標準化案の作成に資する。(2)安全に関しては環境・安全委員会の安全テキストの作成に資することができること、としてアンケート案を検討した。

### 3. 限定アンケートの作成

アンケートは、最初に特定の方々に対して行い(限定アンケート)、回収後に回答内容やアンケート上の課題を検討してアンケートの完成度を上げていくことにした。

項目は大きく以下の 5 つの部分で構成している(Fig1)。

- (1) 回答者の情報 Q1～Q7  
扱う機器や従事年数など
- (2) 機器トラブル Q8～Q20. Q21～Q33. Q34～Q45  
運転時間、メンテナンス、トラブル事象など。複数の機器を扱う場合も考慮し、3 台までの質問を用意
- (3) 安全 Q46～Q59  
安全対策(機器側、施設側)、運転監視など
- (4) 安全教育 Q60～Q65  
安全教育に実施やテキスト作成の有無など
- (5) 共通設問 Q66～Q69  
安全に関する情報提供の必要性など

### 4. 限定アンケート結果

限定アンケートは 2024 年 4 月 30 日から 6 月 12 日に実施した。回答数は 22 件であり、メーカー側と考えられる企業側回答者が 13 名、ユーザー側と考えられる教育機関や公的研究機関からの回答者が 9 名であった。回答に要した時間は平均 43 分であった。回答の一例を Fig.2 に示す。

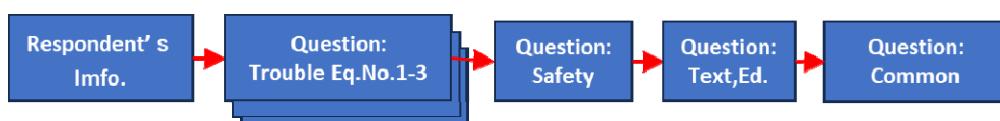


Fig.1 Flow diagram of exclusive questionnaire

回答の詳細は講演時に報告するが、Fig.2 の例に示すように、機器の信頼性に関して重視する質問では、仕様性能の達成とその性能を安定して保つ、との回答が過半であったが、ユーザーに限ると運転時間やメンテナンス間隔などに注目する回答が多かった。トラブル関連では、機器単体に起因することのほかに運転・操作上の課題を上げる回答もあり、メーカー、ユーザー両方で信頼性の向上を図る取組みが必要と考える。

アンケートとは別に回答に対する感想を伺ったところ、質問の仕方や回答数などについて率直な意見がよせられ、本格的に実施するアンケートに反映させることとした。

### 5. アンケート案

アンケート内容を再検討し、重複する質問項目の見直しや再確認項目はジャンプして省略できるようにした。信頼性に関する質問では、メーカー側で採ってもらいたい対策とユーザー側で採ってもらいたい対策を区別して質問するなどして回答者が判断に迷う項目を修正した。質問項目全体は限定アンケートに比べ 3 間減少しただけであるが、最小では 29 間に回答すればよく、回答者の負担低減が図れたと考えている。

### 6. 今後の予定

本講演と同時に皆様にアンケートへの協力をお願いする予定である。

### 参考文献

1. R. Sagiyama et al. : Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p. 52
2. M. Ikeuchi et al. : Abstract of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) P. 93

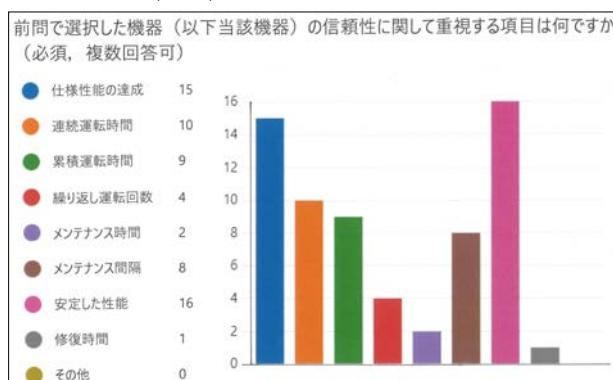


Fig.2 Example of answers to the questionnaire

## キラルな結晶構造を有する $TaGe_2$ の Al 置換による超伝導発現

### Superconductivity in Al-substituted $TaGe_2$ with a chiral crystal structure

小泉 太護, 木佐貫 晋吾, 門田 健太, 高阪 勇輔, 宮戸 寛明, 戸川欣彦(大阪公立大)

KOIZUMI Daigo, KISANUKI Shingo, MONDEN Kenta, KOUSAKA Yusuke,  
SHISHIDO Hiroaki, TOGAWA Yoshihiko (Osaka Metropolitan University)

E-mail: si23278f@st.omu.ac.jp

#### 1. 緒言

キラルな結晶構造を有する  $TaAl_xGe_{2-x}$  において超伝導発現を見出した。Al 置換量  $x$  が 0 と 0.1 の試料は超伝導を示さなかつたが、 $x$  が 0.2 から 0.4 では 2.0 K から 2.2 K で超伝導転移し、第二種超伝導体であることがわかった。 $x$  が 0.5 以上で超伝導特性が大幅に抑制された。また、Al 置換に伴う格子定数の変化を観察した。フェルミ面近傍の状態密度の変化に起因して超伝導が発現していると考えられる。

#### 2. はじめに

近年、対称中心の無い超伝導体が示す特異な物性が注目を集めている。空間反転対称性の欠如に由来する反対称スピン軌道相互作用のためにスピン一重項とスピン三重項状態が混在するクーパー対が形成され、上部臨界磁場がパウリの常磁性限界を超えて大きくなることが知られている [1]。

空間反転対称性に加えて鏡映対称性を持たないキラルな結晶構造を有する超伝導体(キラル超伝導体)は、対称中心の無い超伝導体の一種である。一方、キラル結晶は非相反電気輸送現象(eMChA)や電流下で現れるスピン偏極現象(CISS)などの非自明な物性を示すことで知られている。そのため、対称中心の無い超伝導体で観測されてこなかつた独自な物性の発現が期待される。実際に、キラル有機超伝導体が超伝導転移近傍で CISS を介してスピン蓄積することが報告された[2]。キラル超伝導体は興味深い研究対象であるが、報告された物質例が非常に少ないことが問題となっている。

本研究では、キラルな結晶構造である六方晶系 C40 構造を有する  $TaGe_2$  に着目し、Ge サイトの Al 置換を通じてフェルミ面近傍の状態密度を制御することで  $TaGe_2$  の超伝導化を試みた。

#### 3. 実験方法

$TaAl_xGe_{2-x}$  の多結晶試料は 1100°C の真空中で固相反応法により合成した。Al 置換量  $x$  は 0 から 0.8 の範囲とした。粉末 X 線回折測定により、得られた多結晶試料の相同定、及び、Al 置換に伴う格子定数の評価を行った。

磁化測定は Quantum Design MPMS3 を用いて行った。零磁場冷却(ZFC)、及び、磁場中冷却(FC)による磁化率の温度依存性から超伝導転移温度  $T_c$  を決定した。磁化の温度依存性(磁化曲線)から下部・上部臨界磁場  $H_{c1}$ ,  $H_{c2}$  を決定した。また、抵抗率測定は Quantum Design PPMS を用いて行い、 $T_c$ ,  $H_{c2}$  を決定した。測定は 1.8 K 以上で行った。

#### 4. 実験結果

$TaAl_xGe_{2-x}$  の粉末 X 線回折測定を行った。 $x$  が 0.1 以下において  $TaAl_xGe_{2-x}$  の単相試料が得られた。 $x$  が 0.2 以上では、超伝導を示さない  $Ta_5Ge_3$  が不純物として少量混入しているものの  $TaAl_xGe_{2-x}$  を主相とする試料が得られた。

また、格子定数の Al 置換依存性が見出された。 $x$  が 0 から 0.4 の範囲では  $x$  の増加に伴って  $a$  軸長と  $c$  軸長が共に単調減少した。 $x$  が 0.5 以上では、 $a$  軸長は変わらず単調減少するが、 $c$  軸長は大幅に増加し  $x$  が 0 の時より大きくなつた。

Fig. 1 に  $TaAl_xGe_{2-x}$  の磁化率の温度依存性を示す。 $x$  が 0 の試料は非磁性を示した。 $x$  が 0.2 と 0.4 の試料ではマイス

ナー効果による反磁性信号を観測することができ、超伝導体であることがわかった。 $x$  が 0.2 で  $T_c$  は 2.0 K,  $x$  が 0.4 で 2.2 K であり、Al 置換に伴って  $T_c$  が増加した。FC 測定における超伝導体積分率(VF)は、 $x$  が 0.2 で 71%、 $x$  が 0.4 で 53% であった。これらは主相である  $TaAl_xGe_{2-x}$  が超伝導体であると判断するのに充分に大きい値である。また、 $TaAl_xGe_{2-x}$  の磁化曲線が磁場に対して明瞭な履歴効果を示すことから第二種超伝導体であることがわかった。更に、抵抗率測定において零抵抗を観測することができた。抵抗率で求めた  $T_c$  は磁化率で求めた  $T_c$  と一致した。

$x$  が 0.5 以上になると、超伝導状態が大幅に抑制された。例えば、 $x$  が 0.6 では  $T_c$  はほとんど変わらないが VF は 0.6% まで大幅に低下した。この領域では Al が一様に置換されておらず、超伝導を示す Al 置換量の少ない領域 ( $0.2 \leq x \leq 0.4$ ) がわずかに存在するためだと考えられる。主相である  $TaAl_xGe_{2-x}$  における超伝導の消失もしくは抑制が生じる Al 置換量 ( $x = 0.5$ ) は  $c$  軸長が減少から増加に転じる領域と一致していた。この振る舞いから、格子定数の変化に伴って生じる状態密度の変化が超伝導の発現に影響を与えていると考えられる。

#### 5. 結論

キラルな結晶構造を示す  $TaGe_2$  の Ge サイトを Al に置換した  $TaAl_xGe_{2-x}$  において格子定数の変化に伴って超伝導が発現することを見出した。 $x$  が 0.2 から 0.4 の範囲で超伝導が発現し、それ以外の領域では超伝導が消失する。C40 構造を有するキラル金属間化合物は元素置換により状態密度を変化することができることからキラル超伝導の探索に有望な物質系であるといえる。

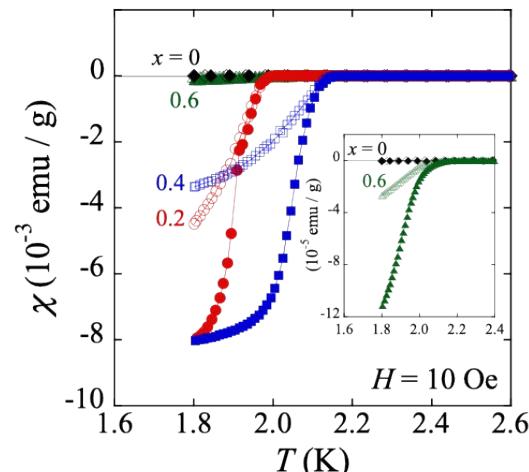


Fig.1 Temperature dependence of the magnetic susceptibility of  $TaAl_xGe_{2-x}$  under a magnetic field of 10 Oe. Close and open marks present the susceptibility collected by zero-field cooling (ZFC) and field cooling (FC) processes, respectively.

#### 参考文献

- [1] E. Bauer, et al.: Phys. Rev. Lett., Vol. 92 (2004) 027003  
[2] R. Nakajima, et al.: Nature, Vol. 613 (2023) 479

## MgB<sub>2</sub>ハイブリッド超伝導線材の作製方法の最適化

### Optimization of the fabrication method of MgB<sub>2</sub> hybrid superconducting wire

吉澤 侑希, 松岡 杏祐, 大橋 克也, 小黒 英俊(東海大); 淡路 智(東北大)  
 YOSHIZAWA Yuki, MATSUOKA Kyosuke, OHASHI Katsuya, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.);  
 AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)  
 E-mail: 4cajm070@tokai.ac.jp

#### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>は、臨界温度( $T_c$ )が 39 K[1]であり、すでに線材として市販され、MRI にも応用されている。ただし、上部臨界磁場( $B_{c2}$ )が低いことから、強磁场中での臨界電流密度( $J_c$ )が低いために、応用先が広がっていないのが現状である。

一方で、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub>(YBCO)は、 $B_{c2}$  が非常に高く、磁场中  $J_c$  が優れていることが知られている。ただし、薄膜形状であることから、コイル化には高い技術が必要となる。

この状況を変えるため、我々のグループでは、YBCO で MgB<sub>2</sub> を覆ったハイブリッド線材を開発している。その結果、YBCO の磁気遮蔽効果を利用することで、MgB<sub>2</sub> 線材の磁场中  $J_c$  を大幅に向かうことがわかった[3]。しかし、粉末層が 2 重になっていることから、非常に線材加工性が悪く、線材加工時にシース材が割れてしまうことが多発していた。

そこで本研究では、MgB<sub>2</sub>とYBCOの2種類の超伝導体を利用したハイブリッド超伝導線材の作製方法の見直しを行い、長尺ハイブリッド線材作製の可能性を検討した。

#### 2. 実験方法

ハイブリッド線材作製にあたり、中心コアの金属管として、Nb 管、SUS304 管及び、Ag 管と Nb 管の 2 重管を用いた。

Nb 管コアを用いた線材は、In-situ 法 Powder-in-Tube 法で作製した。Ar ガス雰囲気下のグローブボックス中で MgH<sub>2</sub> 粉末(富士フィルム製)と B 粉末(Pavezym 製)のモル比が 1:2 になるように秤量し、この粉末を長さ 70 mm、外径 5 mm、内径 4 mm の Nb 管の中に詰めた。

SUS304 管を用いたコアは、Ex-situ 法で作製した。MgB<sub>2</sub> 粉末(高純度化学研究所製)を、長さ 70 mm、外径 5 mm、内径 4 mm の SUS304 管に詰めた。作製したコアは、細くして複合化させるため、溝ロール圧延機による圧延加工を行った。

Nb 管を Ag 管に入れて 2 重にした金属管コアを用いた線材は、Ex-situ 法で作製した。まず、MgB<sub>2</sub> 粉末を長さ 50 mm、直径 5 mm の Nb 管に詰めた。その後、MgB<sub>2</sub> コアを圧延加工し、直径が 4.0 mm 以下になるまで加工し、外径 5 mm、内径 4 mm、長さ 50 mm の Ag 管の中に MgB<sub>2</sub> コアを入れ、長さ 13.5 cm、直径 3.5 mm になるまで圧延加工した。

YBCO 粉末は、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(和光純薬、99.99 %)、BaCO<sub>3</sub>(和光純薬、99.9 %)、CuO(和光純薬、95.0 %)をモル比が Y:Ba:Cu=1:2:3 になるように大気中で秤量し、混合した後、900°C × 4 h の仮焼き、930°C × 24 h の本焼きを経て作製した。その後、大気中で粉碎し、粉末にした。

圧延加工後の Nb 管および SUS304 管 MgB<sub>2</sub> コアは、YBCO 粉末を付着させるためにアピエゾングリスを塗布し、回転せながら YBCO 粉末を振りかけた。その後、外径 5 mm、内径 4 mm、長さ 50 mm の Ag 管に詰め、圧延加工をした。In-situ 法コアを用いた線材は、外径 2.8 mm、長さ 98 mm まで加工し、Ex-situ 法コアを用いた線材は外径 3.0 mm、長さ 75 mm まで加工した。その後、Nb 管を使ったコアを用いた線材を、真空雰囲気下で 630°C × 10 h の熱処理を行った。

Ag 管と Nb 管の 2 重管コアをつかった線材は、圧延後外径 5 mm、内径 4 mm、長さ 50 mm の Ag 管に詰め、YBCO 粉末を Ag 管に棒でたたきながら詰めた。その後圧延加工をし、外径 2.8 mm、長さ 14.0 cm まで加工した。

作製したハイブリッド線材中の微細組織を観察するために、

線材の軸方向及び長手方向の断面観察を行った。観察には電子顕微鏡(JEOL JCM-6000)と光学顕微鏡(VHX-700F)を用いた。

#### 3. 実験結果および考察

作製した線材の断面写真を Fig. 1 に示した。Nb 管、SUS304 管を用いた線材は、圧延加工により線材長手方向に向かって管に亀裂が入ってしまった。これは圧延加工時に YBCO 粉末が写真の 4 つの角に集まってしまい、これが外側の管を変形させたため、亀裂が入ったと考えられる。Nb と SUS304 は硬いため、複合化後の圧延時に十分伸線できていなかったと思われる。特に SUS304 管においては、複合時と完成時の直径の比を比較すると、複合時 5:3 に対し完成時は 3:2 となり、SUS304 の変形が促進されず、代わりに YBCO 粉末が線材の外に追いやられてしまう形の変形となってしまったことが分かった。

これに対し、Ag 管と Nb 管の 2 重管の場合は、YBCO 粉末を棒でたたきながら詰めたため、粉末が角に移動せず管が変形しなかったと考えられる。また、Nb 管を Ag 管に入れたため、圧延の際に MgB<sub>2</sub> コアが変形せずに圧延できた。そのため、Ag 管と Nb 管の 2 重管のハイブリッド超伝導線を圧延の際、角に余計な力が加わらずに伸線することができたと思われる。

この試料に関して、2 重管にしたこととグリスを使わなかったことのどちらが効いているかは今後の検討課題であるが、今後はより長いハイブリッド線材が作製可能となり、基礎研究を進めることができると期待できる結果が得られた。

#### 謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの課題(202312-HMKGE-0036)の一部として行われた。本研究の一部は、東海大学高度物性評価施設及び、核融合科学研究所一般共同研究(研究コード NIFS23KIEA038)の支援を受け、実施したものである。

#### 参考文献

1. J. Nagamatsu et al., Nature, Vol. 410 (2001) p. 63
2. 下山淳一、低温工学、Vol. 56(2021)301
3. K. Ohashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.78

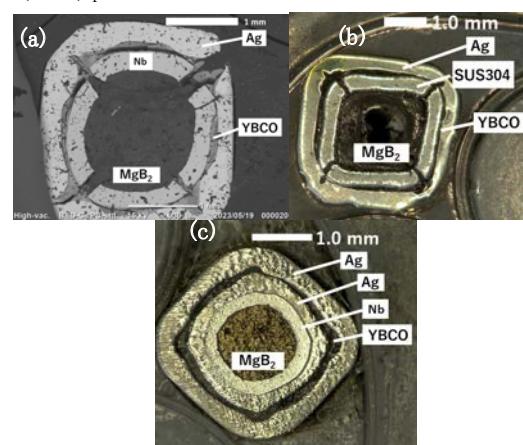


Fig. 1 Cross section of hybrid superconducting wires. (a) The Nb tube core wire. (b) The stainless-steel core wire. (c) The Ag and Nb tube core wire.

## 2024 年度 低温技術夏合宿 77K 小型冷凍機を作ろう 一ロータリー弁方式一

### Summer Seminar for Cryogenic Technology 2024 Fabrication of Refrigerator with a Rotary valve

田上 裕之(核融合研); 灰田 悠希(東大); 谷口 貴紀(東北大)  
 TANOUYE Hiroyuki (NIFS); HAITA Yuki (The Univ. of Tokyo); TANIGUCHI Takanori (Tohoku Univ.)  
 E-mail: tanouye.hiroyuki@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

冷凍部会低温技術夏合宿は、5 日間の座学と実験を通して受講者の低温技術向上に資する目的で開催されている。実習は、今年度もパルス管冷凍機を取り扱い、2 班に分かれて設計の異なる冷凍機の製作・性能評価試験を行った。筆者の班では圧縮機バルブユニット部にロータリー弁を採用したものを使用した。本講演では、この冷凍機の製作・性能評価実験の結果に加え、筆者らが学んだ低温技術内容を報告する。

#### 2. 使用したパルス管冷凍機の構成

Figure 1に今回使用した GM タイプのパルス管冷凍機の概略図を示す。オリフィス1および2を操作することで、第一世代(ベーシック型)、第二世代(オリフィス型)、第三世代(ダブルインレット型)の運転性能実験を行うことができる。ロータリー弁の開閉周期は 2 Hz で固定した。温度計は 3 点設置されており、パルス管の高温側に T 型熱電対(CH2)、低温側に T 型熱電対(CH1)と測温抵抗体 PT1000(CH3)で構成される。

#### 3. 蓄冷材の構成

蓄冷材の構成は、昨年度の実習班が設定したリン青銅 C5191(#250 メッシュ、素線径 0.04mm)約 645 枚を高温側、SUS316(#300 メッシュ、素線径 0.04mm)約 997 枚を低温側に配置する考えを踏襲した。メッシュが細かく、熱交換面積をより大きくとれる SUS メッシュを低温側に採用することで、低温部における He ガスと蓄冷材間の熱交換を促進できるという観点から、この配置は妥当と考えられた。

#### 4. 断熱処理方法

Figure 2 に、Multi-Layer Insulation (MLI)によるパルス管と蓄冷器の断熱処理結果を示す。MLI はフランジからの輻射ができるだけ低温部に届かないように、低温側が最下層かつ、所謂「オムツ」となる構成とした。しかし、今回の実験系では LN<sub>2</sub> 等による真空容器表面の断熱が行われておらず、輻射はフランジ側だけでなく全方向から入射することから、適切な断熱処理方法ではない可能性があることが後程分かった。

#### 5. 実験手順・結果

冷凍機を組み立てた後、配管内の He 置換を 4 度行った。真空容器は真空ポンプヘッダ部で  $4 \times 10^{-3}$  Pa 程度まで排気したのちに封じ切った。予冷は第一世代から順に行い、最低到達温度は CH1 で測定した場合、第一世代で 179 K、第二世代ではオリフィス 1 を 2 回転した場合の 112 K、第三世代ではオリフィス 2 を 3 回転した場合の 86 K であった。

その後、冷凍能力測定のためにヒータを通電したところ、ヒータの地絡が確認された。真空容器内を窒素で置換して昇温を早めたが、加温完了に約 40 分を要した。ヒータを交換する際、ヒータを半分に折り束ねて巻くことで電流リードの両端を同位置にしつつノイズキャンセルさせる技術を学んだ。ヒータ交換の際、PT1000 の設置状況確認を並行して行ったところ、当該センサにグリースの塗布を行っていないことが判明した。センサと銅管の接触不良が懸念されたため、アピエングリースをセンサに付与することで、積極的に接触するよう努めた。

その後、ヒータ交換前と同じオリフィス開度の条件で第三世代にて冷凍能力測定を行った。Figure3 に測定結果を示す。

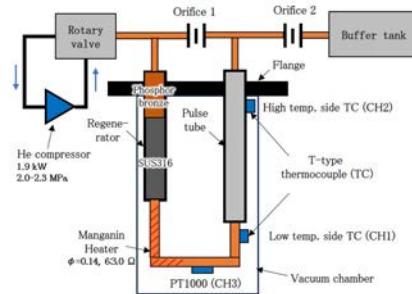


Fig. 1 Schematic diagram of the pulse-tube refrigerator

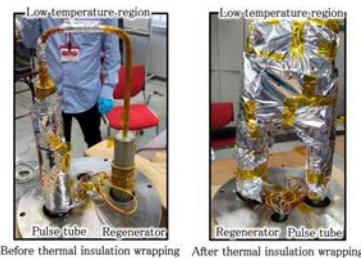


Fig. 2 Thermal insulation wrapping for the pulse tube and the regenerator with multi-layer insulation

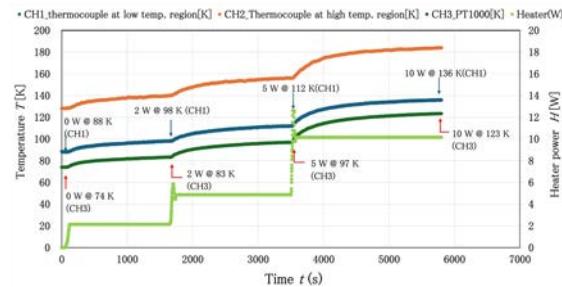


Fig. 3 Temperature waveforms during refrigeration capacity measurement

10 W 負荷時の温度は CH1 にて 136 K となった一方、CH3 では 123 K となり、CH1-3 間で 10 K 以上の温度測定差が生じた。この測定差は昨年も生じており[1]、それによると CH1 の熱電対は、計測対象との接触が不十分な可能性が考えられる。

#### 6. 実験を通しての所感

目標である 77 K にて 10 W の冷凍能力を持つ冷凍機は実現できなかった。この原因については、ポスター発表時に議論する。目標達成は叶わなかったが、講義や運転、不具合対応を通じて低温技術について多くのことを学ぶことができた。

#### 7. 謝辞

本合宿において、夜遅くまでご指導いただいた出村氏、森江氏、平山氏、Xu 氏(住重)、藤岡氏(クライオウェア)、星野氏(明星大)、淵野氏(東大)、上田氏(東京農工大)、吉田氏(NIFS)、神谷氏、西島氏(NIMS)に深く感謝いたします。

#### 参考文献

1. T. Kanayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 108 2P-p02(2023)

# 2024 年度低温技術夏合宿77K 小型冷凍機を作ろう

## —電磁バルブ式パルスチューブ冷凍機の製作と試験—

### Summer Seminar for Cryogenic Technology 2024

#### —Fabrication and Testing of the Pulse Tube Refrigerator with the solenoid valve—

田中 芳実(住重); 井出 郁央(名大); 高 雲飛(京大)  
 TANAKA Yoshinori(SHI); IDE Ikuo(Nagoya Univ.); GAO Yunfei(Kyoto Univ.)  
 E-mail: yoshinori.tanaka.t@shi-g.com

#### 1. はじめに

冷凍部会主催の低温技術夏合宿は、低温分野の講義と、冷凍機を用いた実習を通じて若手の研究者と技術者の低温技術を向上させる目的で毎年開催されている。本年度の実習では、2つの班に分かれてパルスチューブ冷凍機の製作と動作試験を実施した。著者らは、電磁バルブを用いたパルスチューブ冷凍機の分解と設計・製作および冷凍能力試験を行った。本講演では設計のコンセプトと試験方法および計測結果について報告する。

#### 2. 設計と試験方法

Fig.1 に本実習で用いた電磁バルブ式パルスチューブ冷凍機の概略図を示す。冷凍機は、パルスチューブ、蓄冷管、圧縮機、バッファから構成されており、それぞれが 7 つのバルブを介してつながっている。7 つのバルブの開閉を行うことで、第 1 世代から第 4 世代のパルスチューブ冷凍機で動作可能となっている。冷凍機の動作状態と、各バルブの開閉の関係を Table.1 に示す。計 7 つあるバルブの内、3,4,5 のバルブは手動で開閉しており、開度を調整することができる。一方、1,2,6,7 のバルブは電磁弁で制御しており、開度と開閉の周波数を制御することができる。

低温部の温度測定と冷凍能力試験を実施するためにパルスチューブ中央に温度センサとヒーターを取り付けている。バルブの開閉操作により冷凍機を第 1 世代から第 4 世代までの状態で動作させ、各動作状態における最低到達温度を測定した。加えて、第 3 世代においてヒーターにより冷却部を加熱し、定常状態となった際の温度を測定することで冷凍能力の試験を実施した。

#### 3. 結果

実習時間の都合上、第 1 世代において最低到達温度の計測は実施していない。第 2 世代では、バルブ 3 の開度を変化させながら温度を計測し、最適な開度を調査した。バルブ 3 の

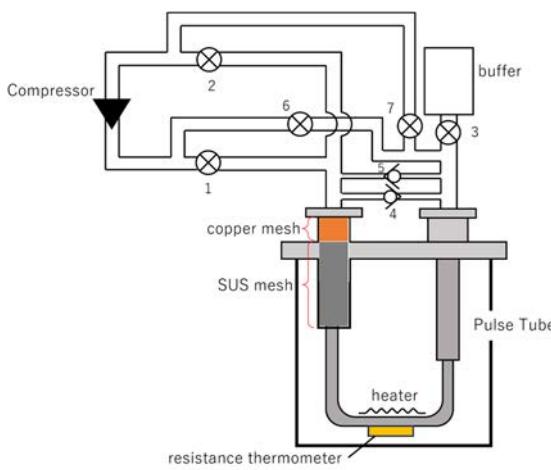


Fig.1 Schematic of Pulse Tube cryocooler.

開度を 2 回転としたとき、最低到達温度 120 K を達成した。第 3 世代では、バルブ 3,4 の開度をそれぞれ 2 回転、4 回転に固定し、バルブ 5 の開度を変化させながら温度計測を実施した。Fig.2 にバルブ 5 の開度に対する計測温度を示す。バルブ 5 の開度 3.5 において最低到達温度約 31 K を達成した。第 4 世代では最低到達温度は約 49 K であり、第 3 世代よりも高い結果となった。これは、第 4 世代において各バルブの開度や開閉周波数の最適条件を特定できなかったためである。

最も低い到達温度を記録した第 3 世代において冷凍能力試験を実施した。Fig.3 に示すように、77.5 K において 14.5 W の冷凍能力を達成した。

#### 4. おわりに

本実習を通じて、合宿前半の講義で学んだ冷凍機の原理や構造の理解をより深めることができた。また、実験を行うことで、低温計測や冷凍能力試験を行うまでの重要事項など、今後の業務に活かすことのできる多くの知見を得ることができた。

Table.1 Pulse tube cryocooler types and open valves

Type	Open valves
Basic pulse (1st generation)	1,2
Orifice (2nd generation)	1,2,3
2 valves (3rd generation)	1,2,3,4,5
Double inlet (4th generation)	1,2,3,4,5,6,7

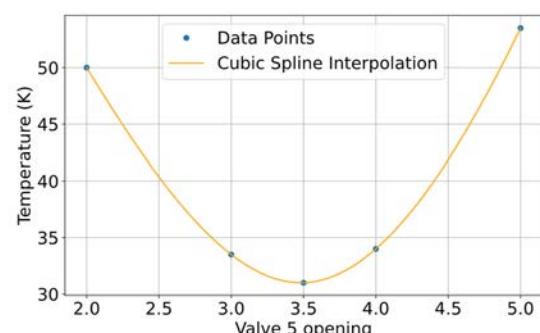


Fig.2. Temperature to valve 5 opening.

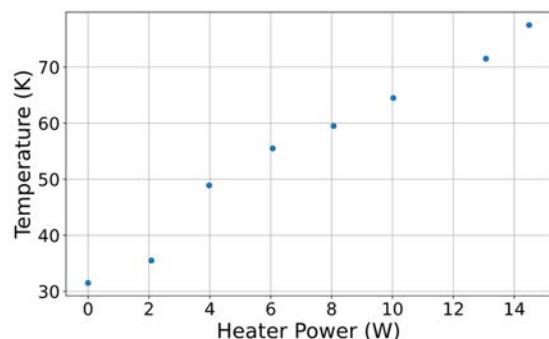


Fig.3 Refrigeration capacity test with 2 valves.

## 「水素・超電導経済研究会」活動報告

### Activity Report of "Task Force on Evaluating Economic Benefits of Hydrogen and Superconductivity Integration"

和久田 肇(日立); 安藤 竜弥(日立ハイテク); 来栖 努(東芝エネルギー・システムズ); 野元 一宏, 小笠原 敦(三菱電機)  
WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi, Ltd.); ANDO Ryuya (Hitachi High-Tech Corporation); KURUSU Tsutomu (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation); NOMOTO Kazuhiro, OGASAHARA Atsushi (Mitsubishi Electric Corporation)

E-mail: tsuyoshi.wakuda.sb@hitachi.com

#### 1. はじめに

直流電気抵抗ゼロの超電導は損失ゼロで電流を流せるところから大電流アプリケーションや高電流密度アプリケーションなどの用途に有用である。これまで超電導は大型加速器やMRI,NMRと言った強磁場を利用する用途で実用化され普及してきた。一方、発電機、変圧器、ケーブルと言った電力向け応用ではこれまで開発が行われ一部は実用に供されているものの広くは普及していない。

カーボンニュートラル社会実現のために電力応用向け超電導機器はある一定の役割を果たすことになると思われるが、その道筋は明確ではない。カーボンニュートラル社会において水素は大きな位置づけとなることは間違いない。我々はその貯蔵の一形態である液体水素に着目し、液体水素が全国に遍在する社会像(それによって得られるだろうベネフィット)を描くことによって、その液体水素の冷熱を活用した超電導機器が普及するシナリオを構築するとともに液体水素の導入および超電導機器開発の気運を高めることを目指している。

#### 2. 水素・超電導経済研究会の立ち上げの経緯

水素・超電導経済研究会は、産業競争力懇談会(COCN: Council on Competitiveness - Nippon)における2023年度推進テーマ「水素・超電導コンプレックス」(2022年度テーマ「超電導で拓くカーボンニュートラル社会」から改称)の終了後、それを引き継ぐ形でCOCN連携活動として超電導関連メーカ、関連産業界およびアカデミアの有志によって立ち上げられた。

一貫する基本的な理念は、水素社会における液体水素の冷熱(多段)活用およびその低温環境を利用した超電導装置の導入によって、社会課題を解決するとともに新しい社会を創生するというものである。ただし、超電導シーズありきではなく社会課題を起点に考えることを特徴としている。

Fig. 1 に COCN のプロジェクトで検討した「水素・超電導コンプレックス」の概念を示す。臨海地区には輸入液体水素貯蔵基地を中心とし発電所や製鉄所などの水素需要家が集積された大規模コンプレックスが形成され、内陸部には液体水素タンクを備える自動運転 FC トランクによる物流網が構築され物流拠点などの液体水素集約地点に中小規模コンプレックスが形成される[1]。

2 年間の COCN の活動では府省庁や水素関連団体に「水素・超電導コンプレックス」の概念や液体水素活用(インフラ整備)の重要性を説明してきた。しかし、コンプレックス形成の道筋の具体化は十分ではなく、また、これに導入される冷熱多段活用のための装置概念や超電導装置は明確ではない。水素・超電導経済研究会はこれらの課題を引き継ぎ、これらの具体化を目的として活動することとした。

#### 3. 水素・超電導経済研究会の活動方針

水素・超電導経済研究会は、「COCN競争法コンプライアンス指針」に基づき、価格、数量、顧客、販路、設備または技術の制限行為など実質的に競争を制限するとみなされ得る行為のないように運営している。

本年度の活動の大方针は水素・超電導コンプレックスの具体化検討であり、そのために実際の水素ユーザーとの関係を構築していくことを中心に据えている。大規模コンプレックスは、

輸入液体水素を中心とした水素燃焼発電プラントを含むものであるが、この例題として播磨臨海地域のカーボンニュートラルポートを題材として検討を行う計画とし“仲間づくり”を開始した。また、中小規模コンプレックスでは全国に配備された物流拠点等の液体水素集約地における地域特性に応じた水素と冷熱活用および超電導の融合による新しい地域・社会の構築が重要となる。物流、生活や医療といった社会課題から説得力のある水素・超電導導入シナリオの構築を目指す。



Fig.1 Concept of Hydrogen Superconductivity complex.

Fig.2 に本研究会が考える“超電導産業”的階層図を示す。ニーズとシーズの間には図に示すようなレイヤーがあり、それぞれに沿っての生業の対象は異なる。超電導が産業として回るようになるには民間企業2のレイヤーの超電導専業メーカもしくは専業事業部を有する企業が生まれることが必要である。そのためには(便宜上上下と表現するが)トップダウン的な上流側からの要請(政策)とともにボトムアップ的な圧倒的パフォーマンスの提供の両輪を回すことが重要であり、さらに液体水素の冷熱活用した社会づくりのためには冷熱利用システム・インフラの開発が不可欠となる。水素・超電導経済研究会はニーズ側への働きかけ、低温工学・超電導学会はシーズ側からの技術開発、と両面からのアプローチで超電導産業の振興を目指したい。

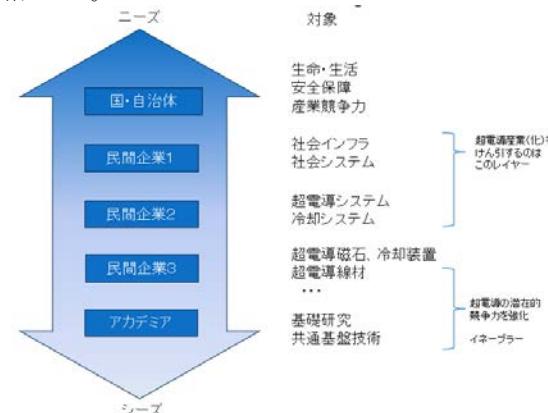


Fig.2 Layer structure of superconductivity industries.

#### 参考文献

1. COCN 2023 年度推進テーマ「水素・超電導コンプレックス」報告書

## 外部磁界印加用マグネット内の磁場分布対称性の改善による ピックアップコイル法による交流損失測定システムの高感度化

Increasing the sensitivity of the AC loss measurement system using a pick-up coil method by improving the symmetry of field distributions in the magnet for applying external fields

佐藤 麻哉, 近森 希望, 川畠 秋馬(鹿児島大)  
 SATO Maya, CHIKAMORI Nozomi, KAWABATA Shuma(Kagoshima University)  
 E-mail: k3382764@kadaid.jp

### 1. はじめに

高温超伝導(HTS)線材の交流損失特性の高感度測定は、低損失 HTS 線材を開発する上で重要である。本研究では、ピックアップコイル法による交流横磁界印加時の HTS 線材の交流損失測定システムの高感度化を図ることを目的としている。そのために本研究では、測定サンプルがないときに発生する見かけの損失(キャンセル残り)の低減方法についての検討を行ってきた[1]。本発表では、外部磁界印加用マグネットを構成する 7 つのコイル配置位置の設計値からのずれや各コイルの巻き乱れなどにより生じるマグネット内の磁場分布の対称性の乱れを、複数の補正コイルにより改善する方法、ならびに、7 つのコイル配置位置の修正により改善する方法により、どの程度キャンセル残りの低減を図れるかを検討した。

### 2. 交流損失の測定方法と外部磁界印加用マグネット

本研究では、交流損失の測定方法としてピックアップコイル法を用いている。Fig. 1 に外部磁界印加用マグネットの概観図を示す。このマグネットは中央のコイルとその両側の 3 対のコイルから成る。ピックアップコイルとキャンセルコイルはマグネット中心に対して  $z$  軸方向に対称な位置に配置するが、設計上、2 つの検出コイルを配置する空間の磁場分布は同じであるため、2 つの検出コイルの形状を極力近づけることができ、測定 2 次回路での位相誤差を小さくすることができる。すなわち、これによりキャンセル残りの低減が図れる。

一方、実際に作製されたマグネットにおいては、マグネットを構成する 7 つのコイルを組み立てる際の配置位置の設計値からのずれや各コイルの巻き乱れなどが原因で、2 つの検出コイルが配置される空間の磁場分布はマグネット中心に対して完全には対称ではない。よって、交流損失測定システムのより高感度化のためには、マグネット内の磁場分布の対称性の改善が必要となる。

### 3. マグネット内の磁場分布対称性の改善の評価

まず、補正コイルにより、磁場分布の対称性の改善を図る。前報では、Fig. 2(a) に示す矩形コイルにより磁場分布の対称性を評価したが、本報では、Fig. 2(b) に示す直径 5.4 mm の円形コイルを用いて局所的な磁場分布の対称性の改善を調べた。さらに、マグネット内の磁場分布の非対称性の主要因であるマグネットを構成する 7 つのコイルの配置位置のずれをスペーサの挿入により改善し、7 つのコイルを対称配置となるようにした場合の磁場分布の対称性の改善の程度も検討した。

Fig. 3 は Fig. 2 に示す矩形コイルならびに円形コイルを用いた磁場分布の測定結果である。矩形コイルだけでなく、円形コイルの測定結果も、補正コイルの設置により改善されていることを確認できた。Fig. 4 はスペーサによる 7 つのコイル配置位置の修正前後の磁場分布の計算結果である。スペーサによるコイル配置位置の修正により、磁場分布の対称性の改善を図れることがわかった。磁場分布の対称性の改善によるキャンセル残りの改善の程度については、当日報告する。

### 参考文献

1. N. Chikamori, et al.: Abstracts of CSJ conference, Vol. 106 (2023) p. 103.

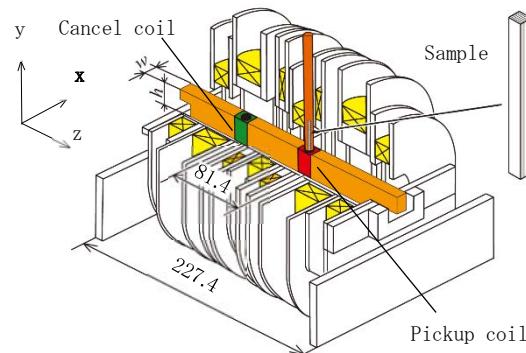


Fig. 1 Schematic view of magnet for applying external field.

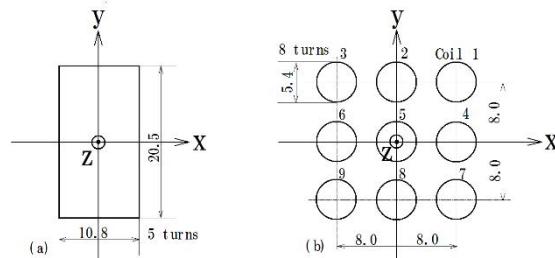


Fig. 2 Coils for measuring field distributions in the magnet.  
 (a) Rectangular coil (b) circular coil

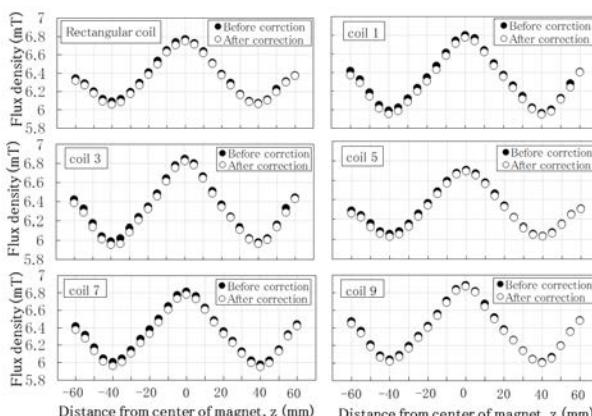


Fig. 3 Measured field distributions in the magnet.

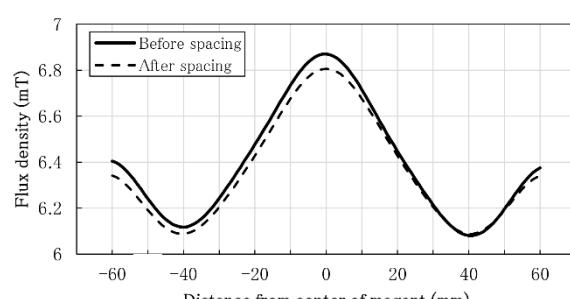


Fig. 4 Calculated field distributions in the magnet.

## 切断・接合線材を用いたREBCOコイルの交流損失低減評価

### Evaluation of AC Loss Reduction of a REBCO Superconducting Coil wound with a Multifilamentary REBCO Tape with High Inter-Filament Resistance

大石 遼真, 姫野 雄輝, 西田 雄詞, 柏木 涼太, 吉田 幸市, 佐々 涼太, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓(九州大学); 廣瀬 陽代, 町 敬人, 和泉 輝郎(産業技術総合研究所); 中村 美幸(Faraday Factory Japan)

OISHI Ryoma, HIMENO Yuki, NISHIDA Yuji, KASHIWAGI Ryota, YOSHIDA Koichi, SASA Hiromasa, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka (Kyushu university); HIROSE T. Hishiro, MACHI Takato, IZUMI Teruo (AIST), NAKAMURA Miyuki (FFJ)

E-mail: oishi.ryoma.640@s.kyushu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

履歴損失は線材の幅に比例することからフィラメントを複数枚に分割することは履歴損失低減に有効であるが、フィラメント間抵抗が大きなければフィラメント間が結合し、交流損失が低減しない可能性がある。そこで、我々は線材を基板まで完全に分割したのちに電着ポリイミドで覆うことで、フィラメント間が絶縁された切断・接合線材(CaAM tape)を提案する。本研究では、*T-A*法による電磁界解析で4分割した切断・接合線材を用いたダブルパンケーキコイルの交流損失を通常の4 mm 線材で巻いたコイルの損失と比較し、損失低減に対して有効性を確認した。

#### 2. 諸元および解析方法

線材の諸元をTable.Iに、コイルの諸元をTable.IIに示す。本研究では、切断・接合線材で巻いたコイルと比較するため、同程度の臨界電流を持つ通常の4 mm 線材を用いている。また、印加される磁場を強める目的で2つのコイルを積層した時を想定している。電磁界解析は有限要素解析ソフトCOMSOL Multiphysics®上で*T-A*法を用いて行った。[1]

#### 3. 結果と考察

積層した2つのコイルに77 K下で電流10-45 Aを周波数1Hzで印加した際の交流損失を解析した結果はFig.1に示す。低電流領域では、coilBの方が損失は大きく、20A印加した条件ではcoil Aの2.6倍の損失となったが、35 Aで損失が逆転し始め、45A印加した条件では0.52倍まで減少した。マルチフィラメント線材は、中心到達磁場を超えた高磁場領域でのみ交流損失が分割数分の1になることがわかつており、その影響が表れていると考えられる。[2]

次に電流振幅が45 Aの時の線材に対して垂直方向の磁場をFig.2に示す。CoilA,Bともにダブルパンケーキの外側のコイルは多くのターンで中心まで磁場が侵入していることがわかるが、内側のコイルはコイルの中心に進むにつれて磁場が遮蔽されていることがこの結果からわかる。これにより、Fig.1の高電流領域でも4分割にもかかわらず、損失が0.52倍に留まっていると考えられる。

TableI Specification of tapes

Parameter	Monofilament	CaAM
Tape width	4.13 mm	4.26 mm
Superconducting layer		YBCO
Superconducting layer thickness		3 $\mu$ m
$I_c$ (77K, s.f.)	211.9 A	213.9 A

TableII Specification of coils

Parameter	Coil A	Coil B
Used tape	Monofilament tape	CaAM tape
Inner diameter		40 mm
Outer diameter	65.4 mm	65.6 mm
Number of turns	80 $\times$ 2	
Tape length		26.5 m

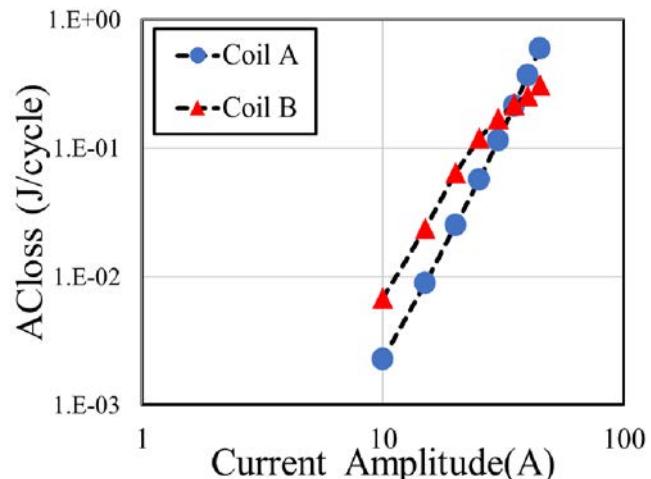


Fig.1 Comparison of calculated AC losses of coils A and B when they are stacked.

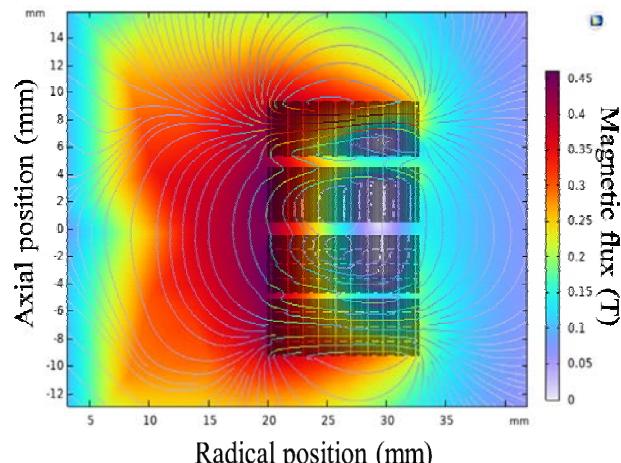


Fig.2 Distribution of the magnetic field magnitude along the radial direction in coils under current amplitude of 45 A.

#### 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO:JPNP15005)の支援により成果が得られてた。

#### 参考文献

- [1] E. Berrospe-Juarez *et al.*, “Advanced electromagnetic modeling of large-scale high-temperature superconductor systems based on H and T-A formulations,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 6, Feb. 2020, Art. no. 044002, doi: 10.1088/1361-6668/abde87
- [2] T. Ito *et al.*, “Difference of AC losses between nonstriated and striated tape and applicability of temperature scaling law to stacked striated tape,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, Apr. 2018, Art. no. 8200505, doi: 10.1109/TASC.2018.2789458.

# 積層枚数と印加磁場角度を変化させた際の Face-to-Face Double Stack 構造による REBCO 線材の交流損失評価

## Evaluation of AC loss of Face-to-Face Double Stack REBCO Coated Conductors under varying the number of stacks and degrees of applied magnetic field.

姫野 雄輝, 大石 遼真, 西田 雄詞, 末永 隆笑, 柏木 涼太, 佐々 淩太,  
吉田 幸市, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓(九大); 中村 美幸(FFJ)

HIMENO Yuki, OISI Ryoma, NISIDA Yuji, SUENAGA Takaemi, SASA Hiromasa,  
YOSIDA Koichi, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ); NAKAMURA Miyuki (FFJ)  
E-mail: himeno.yuuki.970@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

2枚のREBCOテープ線材の超伝導層を低抵抗接合したFFDS(Face-to-Face-Double stack)線材は、欠陥部を迂回するように電流が流れることで電界集中が防げる点や対称構造により曲げ半径特性に優れるという特徴を持つ[1]。一方で、モータ等の交流機器への応用を考えると交流損失特性を把握することは重要である。FFDS線材は、超伝導層をはんだで貼り合わせているため結合電流による交流損失の増加や超伝導層間の距離の違いによる積層特性の変化が考えられる。本研究では、積層数の変化や印加磁場角度の変化を条件としてFFDS線材の交流損失を測定することでFFDS構造による影響を明らかにした。

### 2. 実験方法

冷凍機による伝導冷却を行い、NbTi超伝導マグネットで外部磁界を印加した。磁界中の試料が生じる磁化を鞍型ピックアップコイル法で検出し、そこから交流損失を算出した[2]。線材試料の諸元及び測定条件をTable. 1に示す。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1に77KにおけるFFDS線材の交流損失に対する積層枚数依存性を示す。FFDS線材は超伝導層間隔が狭い部分と広い部分が交互に繰り返される積層構造を持つが、積層枚数が増加してもFFDS構造特有の大きな変化は観察されなかつた。

Fig. 2に印加磁場角度を変化させた際の交流損失の測定結果を示す。また、挿入図に比較用REBCO線材(EuBCO+BHO、2枚積層)の交流損失を示す。FFDS線材は印加磁場角度が小さくなるにつれて比較用線材と比べ損失の減少が小さくなることが確認された。この結果からFFDS線材に対して平行磁場成分が大きくなると交流損失における角度依存性が異なることが示唆される。

本研究では、FFDS構造における交流損失の積層枚数依存、磁場角度依存の影響を明らかにした。今後、FFDS線材を用いた超伝導モータ等の交流機器への応用のために、本実験で確認された角度依存性による違いの原因調査やFFDS線材で作成した超伝導コイルの交流損失評価を進める必要がある。

### 参考文献

1. M. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 34(2024) 6601804
2. M. Iwakuma, et al.: Supercond. Sci. Technol., 16 (2003) p.545

謝辞 本研究は、科学研究費補助金(HBG3H00187)の支援を受けて実施したものである。

Table.1 Specifications of FFDS tape and Companion tape and conditions of experiments

	FFDS tape
Dimensions of the tapes	4 mm in width, 0.18 mm in thickness
Superconducting layer	EuBCO+BHO(2.7 $\mu$ m in thickness)
Temperature	30 ~ 77 K
Number of layer stack	1, 5, 8 and 15
Field angle	45° 60° 90°
$I_c$ (77K, s.f.)	416.8 A

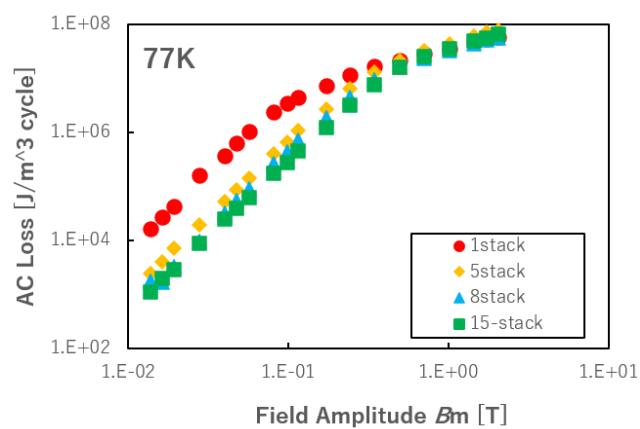


Fig. 1 Number of layer stack dependence of AC losses of FFDS tapes at 77K.

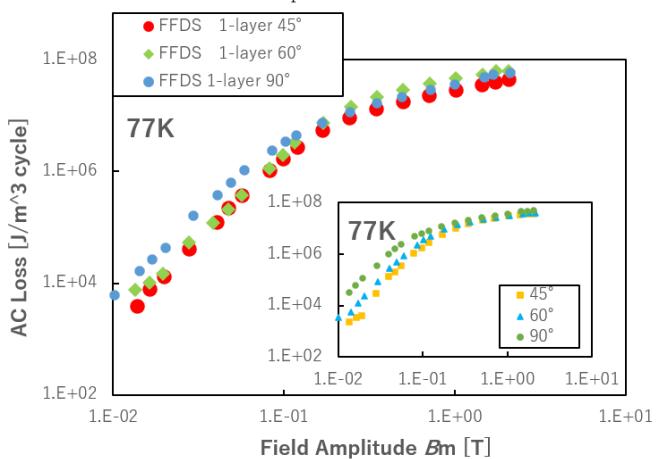


Fig. 2 Angular dependence of AC losses of FFDS tapes at 77K.

## 非正弦波・高周波電流通電時の Bi-2223 サンプルコイルの交流損失特性の評価

Evaluation of AC loss characteristics of a Bi-2223 sample coil under non-sinusoidal and high frequency current flow

濱田 大夢, 近森 希望, 川畑 秋馬(鹿児島大)

HAMADA Taimu, CHIKAMORI Nozomi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k3341858@kadai.jp

### 1. はじめに

本研究では、パワーエレクトロニクス機器での使用を想定した HTS コイルの交流損失特性を定量的に評価することを目的としている。パワーエレクトロニクス機器の駆動電流は非正弦波で高周波成分が含まれているため、HTS コイルの交流損失は増加することが予想される。Bi-2223 サンプルコイルを用いたこれまでの研究で、高周波成分による交流損失増加は HTS 線材の常伝導金属部の渦電流損失の増加で概ね説明できる結果が得られているが、測定された交流損失の測定値は、計算値より 1~3 割程度大きい値となっている[1]。本発表では、この交流損失の測定値と計算値の差に対して、指令電流に高周波成分を重畠させた電流波形を通電した際の Bi-2223 サンプルコイルの交流磁化曲線測定を行い、高周波成分によるヒステリシス損失の増加分との関係について検討した。

### 2. HTS サンプルコイルと非正弦波・高周波通電時の交流損失

HTS サンプルコイルは銀シース Bi-2223 テープ線材で巻線した 3 ターン 30 層のソレノイド形状のものである。このコイルに、非対称 H-Bridge インバータシステムで構成される回路により、Fig. 1 に示すような基本波に高周波成分を含む波形の電流を通電すると、基本波だけの場合よりも交流損失は増加する結果となる[1]。Fig. 1 の電流波形は基本波振幅  $I_F = 20$  A、周波数  $f_F = 100$  Hz の台形波に、高周波振幅  $\Delta I = 1.72$  A、周波数  $f_h = 13$  kHz の三角波を重畠させたものである。なお、ここでは指令電流の台形波を基本波と定義している。

Fig. 2 は高周波電流の周波数を 5~21 kHz 変化させたときの高周波成分による交流損失の増加分の測定結果と計算結果である。○と△のプロットは測定値、●と▲のプロットは計算値である。高周波成分による交流損失増加は HTS 線材の常伝導金属部の渦電流損失の増加で概ね説明できる計算結果が得られているが、測定された交流損失の測定値の方が、計算値より 1~3 割程度大きい値となっている。

### 3. 高周波成分による交流損失増加分についての検討

Fig. 2 に示した交流損失の測定値と計算値の差に対して、指令電流に高周波成分を重畠させた電流波形を通電した際の Bi-2223 サンプルコイルの交流磁化曲線を測定し、高周波成分によるヒステリシス損失の増加分との関係について検討した。Fig. 3 に交流磁化曲線の測定回路図を示す。サンプルコイルの両端電圧に含まれる誘導電圧成分をキャンセルコイルにより除去し、サンプルコイルの磁化の信号電圧のみを抽出し、磁化曲線を測定した。

Fig. 2 の測定結果は、100 Hz の基本波電流に対して 5 kHz~21 kHz の高周波成分を重畠した電流波形を通電したものであるが、磁化曲線測定において 5 kHz~20 kHz 程度の周波数領域での測定は困難である。そのため本研究では、まず、基本波と高周波の比率は保ったまま、測定可能な低い周波数領域で、基本波のみの場合と基本波に高周波を重畠した場合の磁化曲線を測定し、高周波成分によるサンプルコイルのヒステリシス損失増加分を算出した。その結果をもとに、実際の周波数領域での交流損失の増加分を推定することとした。Fig. 4 は交流磁化曲線の測定結果の一例である。高周波重畠により、ヒステリシス損失が増加する結果となった。測定結果の詳細については、当日報告する。

### 参考文献

1. D. Nogi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 48.

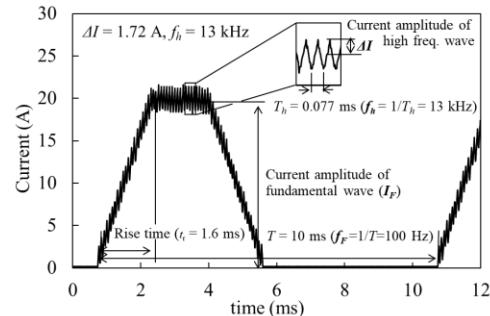


Fig. 1 Current waveform with superimposed high frequency currents.

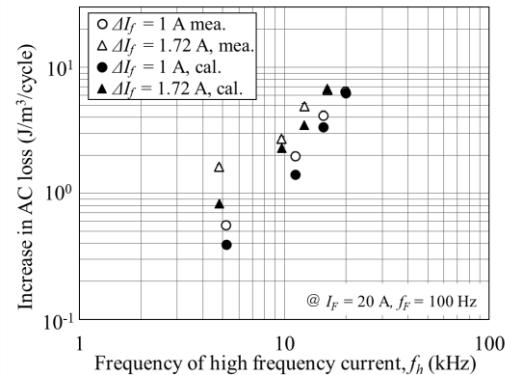


Fig. 2 Measured and calculated results of incremental AC losses.

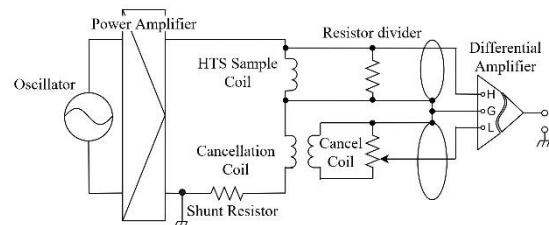


Fig. 3 Measurement circuit for AC magnetization curves.

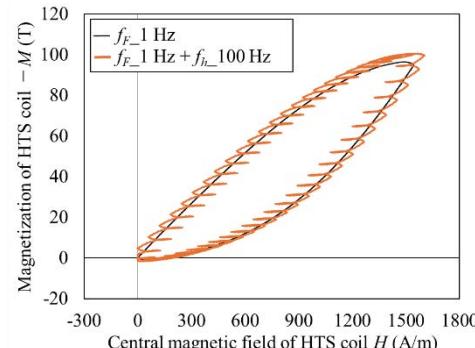


Fig. 4 An example of measurement results of AC magnetization curve.

# 極細 Nb<sub>3</sub>Sn および Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材の交流通電損失に関する数値解析

## Numerical analysis of AC transport current losses in ultrafine Nb<sub>3</sub>Sn and Nb<sub>3</sub>Al superconducting wires

錦織 敏志, 宇都宮 航生, 尾上 凜空, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大); 菊池 章弘, 飯嶋 安男(NIMS)

NISHIKORI Satoshi, UTSUNOMIYA Kosei, ONUUE Riku, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama University)

KIKUCHI Akihiro, IIJIMA Yasuo (NIMS)

E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年, NIMS では, 線径が 50 μm 以下で柔軟性に富み, かつ高い臨界電流密度を有する React&Wind 法で超電導マグネットが製作可能な極細柔軟性 Nb<sub>3</sub>Al 線材と Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発が行われている。開発する極細 Nb<sub>3</sub>Al と Nb<sub>3</sub>Sn 線材は, 直流応用だけではなく交流応用機器への適用も考えているため, 臨界特性と交流特性を同時に評価する必要がある。我々は, 各線材の交流通電損失特性について伝導冷却運転下において実験的に測定することに成功した。しかしながら, 伝導冷却下で極細線材の交流通電損失を正確に測定・評価するのは非常に難しく(通電中の温度上昇や断線などの問題により), 測定結果の妥当性や信頼性について確認する必要があると考えている。そこで本研究では, 極細 Nb<sub>3</sub>Al 線材と Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線材の各構成材の交流通電損失について有限要素法に基づく数値解析を行い, 実験結果および理論値との比較を行ったので, その結果について報告する。

### 2. 試料線材と解析方法

開発した極細 Nb<sub>3</sub>Al と Nb<sub>3</sub>Sn 線材の断面写真と 2 次元有限要素法に用いるための解析モデルを Fig.1 に示す。ジェリーロール法で作製された Nb<sub>3</sub>Al 線材の超電導部は円筒形状になっており, 銅と Nb/Al 層との間には拡散防止用の Nb バリアが配置されている。また, 銅と銅以外の材料の比率 (Cu/non-Cu ratio) は 1:1 である。一方, ブロンズ法で作製された Nb<sub>3</sub>Sn 線材の超電導部はフィラメント形状であり, 摺っていない 19 本のフィラメントは同心円状に配置されている。試料線材の諸元と実験から得られた値(臨界電流や  $n$  値)を参照した解析パラメータを Table.1 に示す。同じ線径において, 超電導部の面積は Nb<sub>3</sub>Al 線材が Nb<sub>3</sub>Sn 線材よりも大きく, 臨界電流密度は低いが, 工学的臨界電流密度は高い。なお, 解析方法には H 法を用いており, 1 サイクル当たりの交流通電損失  $Q$  (J/m/cycle) を, 電界の強さ  $E$  と電流密度の大きさ  $J$  による次式で計算した。ここで,  $S$  は線材断面積,  $T$  は通電電流の周期を表している。超電導部においては  $E-J$  特性が考慮されており, 線材全体 (Total) と各部(超電導部: Nb<sub>3</sub>Al, 銅: Cu, ニオブバリア: Nb) の交流通電損失を計算した。

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \int_S E \times J \, dS \, dt$$

### 3. 解析結果・考察

結果の一例として数値解析と実験で得られた線径 50 μm の Nb<sub>3</sub>Al 線材の 10 K における交流通電損失の電流負荷率特性と周波数特性を Fig.2 と Fig.3 に示す。図より, Cu と Nb の通電によるヒステリシス損と周波数による渦電流損は非常に小さく, Nb<sub>3</sub>Al の超電導部によるヒステリシス損が支配的であることが解析結果から示された。また, Nb<sub>3</sub>Al のヒステリシス損は, 同じ厚さの円筒形超電導体の理論式[1]に比べ, 低負荷率での交流損失が大きく, 高負荷率になるにつれ理論式に漸近した。これは, 理論式では  $n$  値が  $\infty$  に対して, 数値解析では非常に低い  $n$  値が用いられたためであると考えられる。この低い  $n$  値の影響は周波数特性にも現れ, Nb<sub>3</sub>Al の交流通電損失は周波数の増加と共に減少する傾向を示した(Fig.3)。しかし, 実験と解析で求められた交流通電損失はほぼ同じ値を示しており, 実験においては超電導部による交流損失が正しく測定されていることが明らかになった。

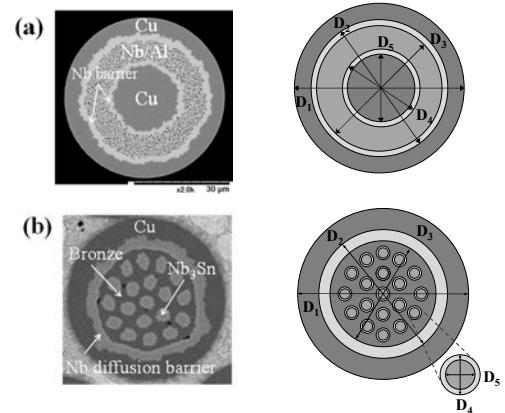


Fig.1 Cross-sectional photograph and 2D analytical model of the (a) Nb<sub>3</sub>Al wire and (b) Nb<sub>3</sub>Sn wire.

Table.1 Sample wire specifications and analysis parameters

Parameter	Nb <sub>3</sub> Al	Nb <sub>3</sub> Sn
Wire diameter (μm)	50	50
Cu/Non-Cu ratio	1.0	0.89
Superconductor shape	Cylindric	19 filaments
Superconducting area (×10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> )	6.53	1.34
Superconducting portion (%)	33	6.8
Critical current @10 K (A)	13.05	3.85
Critical current density @10 K (×10 <sup>10</sup> A/m <sup>2</sup> )	2.0	2.9
$n$ value	5	7

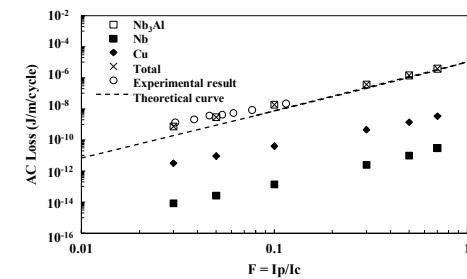


Fig.2 Numerical and experimental results of AC transport current losses in Nb<sub>3</sub>Al wire as a function of  $I_p/I_c$ .  $I_p$  is peak value of AC current (@ 10 K and 400 Hz).

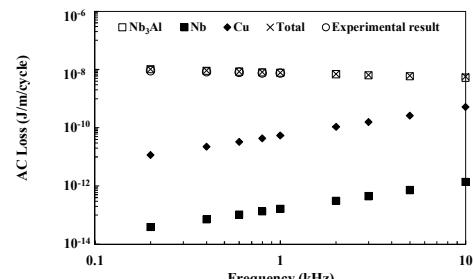


Fig.3 Numerical and experimental results of AC transport current losses in Nb<sub>3</sub>Al wire as a function of frequency (@ 10 K and 1 A).

### 参考文献

- [1] G. Vellgo and P. Metra, "An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes," *Supercond. Sci. Tech.*, vol. 8, pp. 476-483, 1995.

## Zr をパターンニングした基板上に形成した $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の臨界電流特性(2)

### Critical current characteristics of $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films deposited on a Zr-patterned substrates (2)

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)

SEKITO Shinya, SHIRATSUCHI Yuichiro (Fukuoka Inst. Tech); MATSUMOTO Akiyoshi, TACHIKI Minoru (NIMS); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech)

E-mail: mem24105@bene.fft.ac.jp

#### 1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (REBCO) 線材の交流損失低減には細線化が有効である[1]。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。前回は Zr の上部や側面に堆積する REBCO 膜の電気的特性について調べるために、幅 106  $\mu\text{m}$  の Zr を直線状に形成し、REBCO を成膜した薄膜の Zr 近傍での  $I$ - $V$  特性を自己磁場中で測定した。その結果、Zr 上に堆積した REBCO が超電導相を形成している振舞いがみられた[2]。そこで今回は臨界電流特性の温度・磁場依存性を調べたので報告する。

#### 2. 実験方法

本研究では 5 mm 角の  $\text{SrTiO}_3$  基板上にフォトリソグラフィ及びウェットエッチングにより半幅 106  $\mu\text{m}$ 、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 (PLD 法) にて成膜した。また Zr 近傍における  $I$ - $V$  特性測定のためにマイクロブリッジ加工を行った。そのマイクロブリッジの模式図を Fig. 1 に示す。作製した Zr 上を通るマイクロブリッジと超電導層のみのマイクロブリッジのサイズはどちらも幅が 200  $\mu\text{m}$ 、長さが 500  $\mu\text{m}$  であり、それらの  $I$ - $V$  特性の温度・磁場依存性を物理特性測定システム (Physical Properties Measurement System, PPMS) を用いて測定した。

#### 3. 結果及び考察

PPMS で得られた各マイクロブリッジの  $I$ - $V$  特性 (自己磁場) を Fig. 2 に示す。 $T_c$  ( $\geq 90\text{K}$ ) 以上においては、Zr 上を通るマイクロブリッジの  $I$ - $V$  特性は Zr のない場合と同様に REBCO の常電導抵抗に相当する線形抵抗を示していることが分かる。 $T_c$  以下の領域においては Zr 上を通るマイクロブリッジの  $I$ - $V$  特性は Zr の抵抗成分による電圧が重畠された特性となることが予想されたが、超電導層のみの場合と比較して  $I_c$  値は低いものの超電導転移が見られた。このことから、Zr 上には超電導層が形成されていると考えられる。

さらに、 $I_c$  値の温度・磁場依存性の結果を Fig. 3 に示す。その結果より Zr の有無における  $I_c$  値の差が低磁場領域では 4 倍以上であるものの、一方で高磁場領域ではその差が小さくなり、不可逆磁場はほぼ等しくなるような挙動がみられた。これは結晶粒界の傾角が増大すると低磁場での臨界電流値が減少するという報告[3]と類似している。したがって、Zr 上に堆積した REBCO は結晶配向しており、低傾角粒界によりつながっている可能性が考えられる。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。

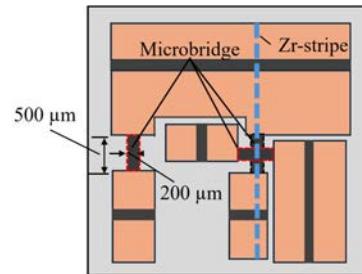


Fig. 1 Schematic diagram of the micro-bridges

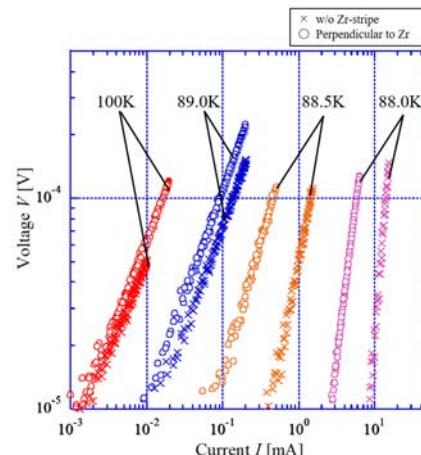


Fig. 2 Current-voltage characteristics at various temperatures in self-field

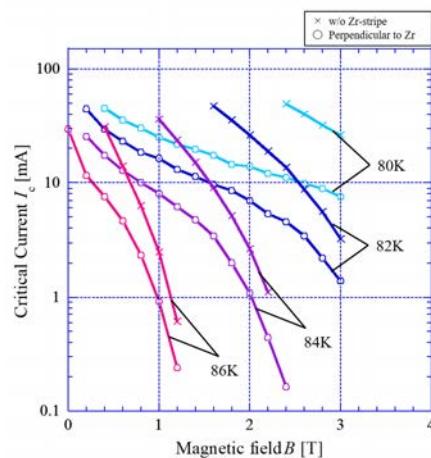


Fig. 3 Magnetic field dependence of  $I_c$ -value

#### 参考文献

- [1]. A. Matsumoto, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 18
- [2]. S. Sekito, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2023) p. 104
- [3]. H. Hilgenkamp *et al.*, “Grain boundaries in high- $T_c$  superconductors” Rev. Mod. Phys., Vol. 74, No. 2, April 2002

## 極細 Zr をパターニングした基板上に形成した YBCO 薄膜の臨界電流特性

Critical current properties of YBCO thin films on substrate with Zr-stripe of a few  $\mu\text{m}$ -width

白土 裕一朗, 関戸 真矢, 高城 凜, 野村 涼太 (福岡工大) ; 松本 明善, 立木 実 (NIMS) ; 井上 昌睦 (福岡工大)

SHIRATSUCHI Yuichiro, SEKITO Shinya, TAKAJO Rin, NOMURA Ryota (Fukuoka Inst. Tech.);  
MATSUMOTO Akiyoshi, TACHIKI Minoru (NIMS); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)

E-mail: mem23111@bene.fit.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系 (RE=Rare Earth, REBCO) 高温超電導線材の細線化は交流損失低減に有効な手法の一つである。細線化においては、歩留り向上の観点からフィラメント間の間隔が狭いことが望ましい。そこで、我々は数  $\mu\text{m}$  幅の金属 (Zr, Nb 等) ストライプを形成した基板上に、超電導膜を成膜することで分離を目指している。本研究では、数  $\mu\text{m}$  幅の Zr 近傍で  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO) 膜が電気的に分離しているかを調べるために Zr に対して垂直にブリッジ加工を行い、通電試験を実施したのでその結果について報告する。

### 2. 実験方法

$\text{SrTiO}_3$  (STO) 基板中央に幅 5.2  $\mu\text{m}$ 、高さ 350 nm を有する Zr ストライプをフォトリソグラフィとスパッタリングにて形成した。その後、パルスレーザー蒸着法にて 300 nm 程度の YBCO 薄膜を成膜した。

通電試験を行うためにフォトリソグラフィとウェットエッチングプロセスを用いてマイクロブリッジを行った。Fig. 1 にマイクロブリッジの模式図を示す。マイクロブリッジは、Zr ストライプに対して垂直に形成したもの及び比較を目的とした超電導のみのものを形成した。ブリッジの幅と長さは、それぞれ 500  $\mu\text{m}$  である。電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性は、物理特性測定システムを用い 4 端子法にて行った。また、マイクロブリッジに該当する箇所の結晶構造を確認するために SEM による表面観察を行った。

### 3. 結果及び考察

Fig. 2 に  $I$ - $V$  特性の温度依存性を示す。 $T_c$  近傍の 90 K では、両ブリッジにおいて線形抵抗を示しており、10  $\Omega$  程度の抵抗値を有していた。88 K では、両ブリッジにおいて超電導転移が確認されたものの、Zr ストライプを含むブリッジの方が低い臨界電流であった。また、Zr ストライプの領域で電気的に分離されていた場合、線形抵抗を有する Zr に電流が流れるため、Zr 領域の電圧を重畠した  $I$ - $V$  特性を示すことが予測されたが、そのような振舞いは確認されなかった。

Fig. 3 に Zr ストライプ近傍の SEM 像を示す。STO 基板上では、2 軸配向を反映した析出物が確認できた。一方で、Zr 上の YBCO はストライプ上の広範囲で大きな結晶粒が形成していること、またそれらの配向が乱れていることが確認できた。

これらの結果から、Zr ストライプ付近の REBCO は、低傾角粒界や低  $T_c$  相で弱く結合していると考えられる。

### 謝辞

本研究で作製したデバイスの作製行程の一部は NIMS 並木ファウンドリにて行った。また、本研究の一部は NIMS の Joint Research Hub Program 及び、JSPS 科研費 JP22H02019, JP22H02021 の支援により得られたものである。

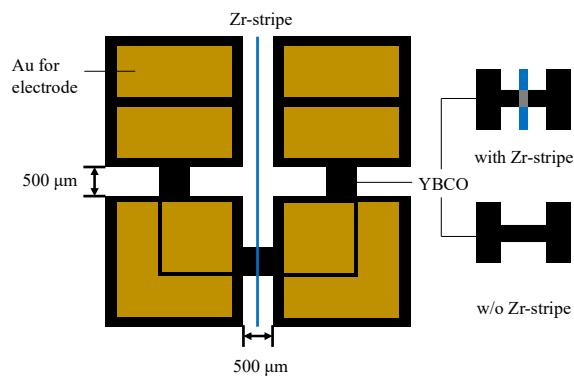


Fig. 1 Schematic of micro-bridges for  $I$ - $V$  measurement

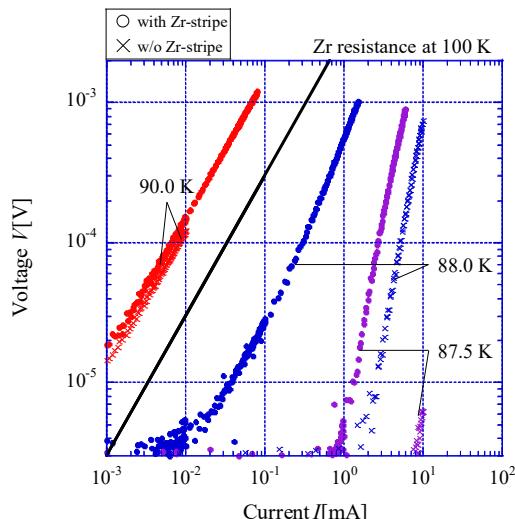


Fig. 2  $I$ - $V$  characteristics of micro-bridges with or w/o Zr-stripe in various temperatures

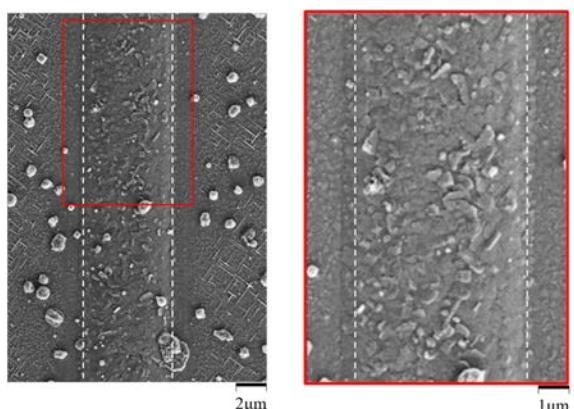


Fig. 3 SEM image of YBCO thin films near the Zr-stripe

## 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(2)

Torsion dependence on critical current and in-plane  $J_c$  distribution  
of REBCO coated conductor(2)

隱崎 遼河, 本田 翔也, 松尾 裕斗, 宮本 望夢, 井上 昌睦 (福岡工大)  
KAKUREZAKI Ryoga, HONDA Shoya, MATSUO Yuto, MIYAMOTO Nozomu, INOUE Masayoshi  
(Fukuoka Inst. Tech.)  
E-mail: mem24103@bene.fit.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材は交流損失低減のため、ツイスト加工が施される[1]。そこで、我々は  $I_c$  のねじり依存性を調べている。特に、 $I_c$  低下時の欠陥の入り方に着目し、臨界電流密度 ( $J_c$ ) の面内分布測定に取り組んでいる。今回、 $I_c$  の低下開始ピッチ長が異なる3つの線材の面内  $J_c$  分布を調べ、比較を行ったので、その結果について報告する。

### 2. 実験方法

試験で使用した線材は幅 2mm、厚さ 43  $\mu\text{m}$  の REBCO 線材で線材全体が銅でコーティングされており、 $I_c$  は 46 A である。同線材を 100 mm 程度切り出した後、電圧端子用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。回転角を増加させながら、直流 4 端子法により  $I_c$  測定を行った。 $I_c$  測定後、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測定及び面内  $J_c$  分布の解析を行った。

### 3. 実験結果及び考察

ねじり印加試験により得られた  $I_c$  のツイストピッチ依存性を Fig. 1 に示す。3 つの試料は、いずれも同一ロットの線材から切り出しているが、 $I_c$  が低下し始めるピッチ長は 170 mm, 120 mm, 70 mm と異なっていた。試験終了後、電圧端子間内の線材を切り出して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 を見てみると、周期的に磁場強度や  $J_c$  が低下していることが分かる。その間隔は 3~5 mm 程度であった。このことは、ねじりによる欠陥の入り方が、全長にわたって均一なわけではなく、局所的かつ周期性があることを示している。また、局所的に大幅に磁場強度が低下している箇所も確認できた。それらの箇所を SEM 観察したところ、Sample 2 では、線材長手方向に断続的に伸びたクラックなどの欠陥[2]が、Sample 3 では、線材幅方向に横断する断続的なクラックの分布が観察された。SEM による表面観察の結果や詳細については発表当日に報告する。

### 謝辞

本研究の成果の一部は、JSPS 科研費 JP22H02021、並びに JST-ALCA の支援により得られたものである。

### 参考文献

1. N. Amemiya, J. Cryo. Soc. Jpn Vol. 45 (2010) p.376
2. R. Kakurezaki, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2024) p. 105

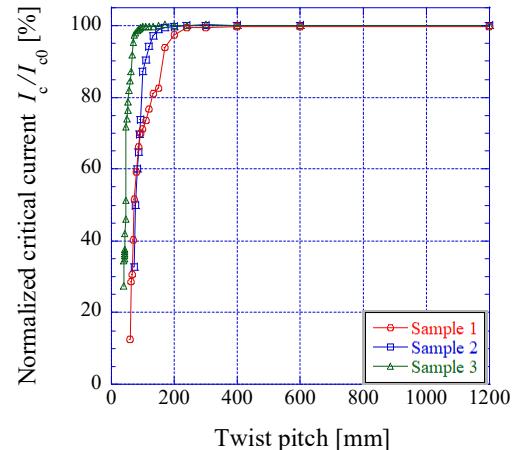


Fig. 1 Twist pitch dependence of  $I_c$  at 77K.

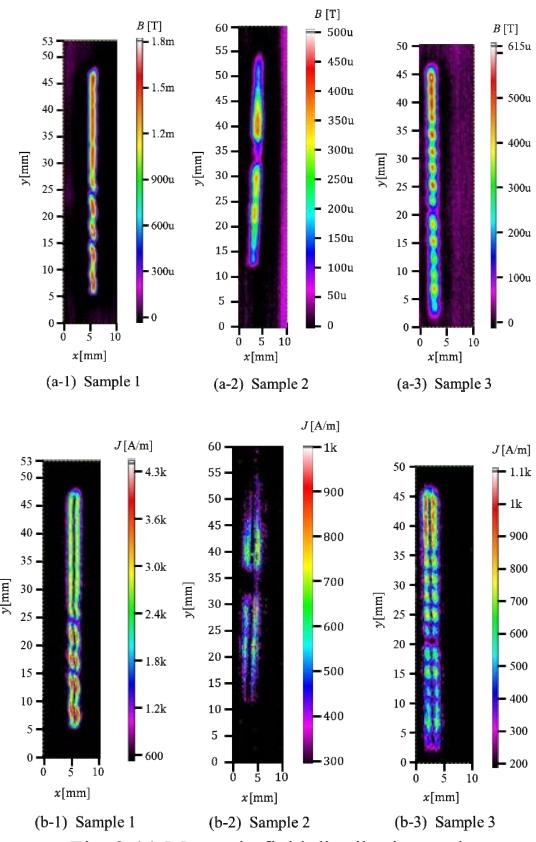


Fig. 2 (a) Magnetic field distribution and  
(b) critical current density distribution

## 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(2)

### Critical current density distribution measurement in $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconducting thin films using magneto-optical imaging (2)

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 Inst. Tech);

OOI Syuuichi, TACHIKI Minoru, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

E-mail: mem24102@bene.fit.ac.jp

#### 1. はじめに

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。同手法においては、磁場強度に対応した輝度が、高い空間分解能で得られるものの、 $J_c$ 分布の換算には校正が必要となる。前回は、特定の温度、磁場において得られた磁気光学(MO)画像を基に、磁場分布への換算と $J_c$ 分布の算出に取り組んだ[1]。今回は、異なる温度、磁場条件下における $J_c$ 分布の評価を行ったので、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。試料を所定の温度まで冷却させた後、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MO膜を用いて観測した。その後、同手法により得られた結果をもとに磁場分布への換算と $J_c$ 分布の算出を行った。MO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MO画像の一例をFig. 1に示す。同画像は70 K, 0.40 Tで得られた結果である。得られたMO画像の信号強度と磁場の関係から、6次の多項式を用いて磁場への換算を行った。その後、得られた磁場分布において印加磁場の空間分布や光学系に起因すると思われる傾きが確認されたため、外部磁場は一定であるとして線形の傾き補正を行った。補正後の磁場の一次元分布をFig. 2に示す。同図より、金属ストライプの領域から磁場が侵入する様子が確認できる。Brandtらの理論式から超電導薄膜面内の磁場分布の理論曲線を算出したところ[2][3]、Fig. 3 (a), (b)に示すように、Fig. 2の実験結果と概ね一致する様子が確認された。発表当日は得られた $J_c$ 分布の結果についても報告する。

#### 参考文献

1. G.Utsunomiya, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2023) p. 106
2. E. H. Brandt, *et al.*, *Europhys. Lett.* 22 (1993) 735
3. Y. Mawatari, *J. Cryo. Soc. Jpn* 44 (2009) 2

#### 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。

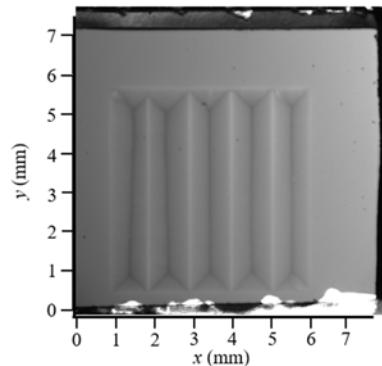


Fig. 1 MO image at 70 K, 0.40 T

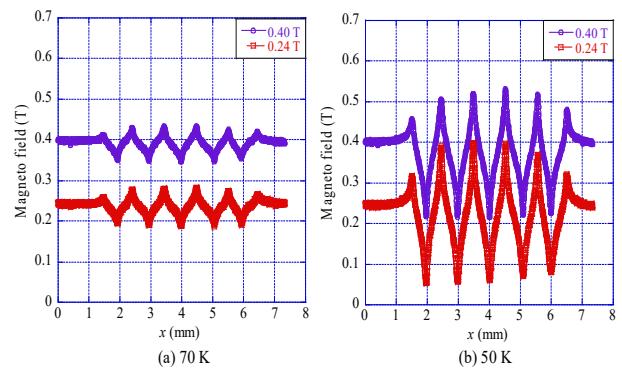


Fig. 2 Comparison of magnetic field distribution

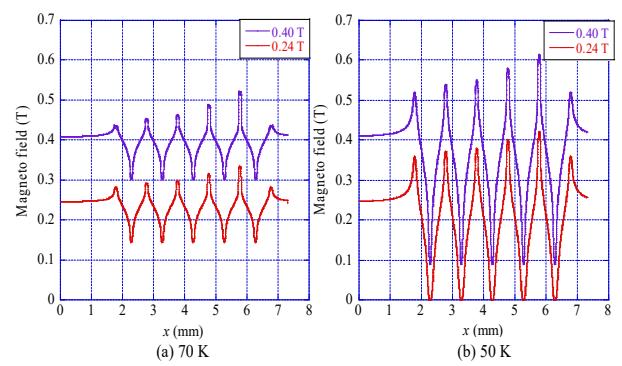


Fig. 3 Comparison of theoretical curves of magnetic field distribution

# 機械学習を導入したリール式磁気顕微鏡観察による REBCO 線材の局所不均一性のプロセス依存性の比較と汎用的評価手法への展開

## Comparison of Process Dependent Local Inhomogeneities in REBCO Wires Observed by Reel-to-Reel Magnetic Microscopy with the Introduction of Machine Learning and Its Development into A General Evaluation Method

吳 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線材の臨界電流 $I_c$ の空間均一性の向上は、応用機器の信頼性、安定性向上のための重要な因子であり、線材の品質保証や受け入れ試験のための信頼性の高い評価手法の確立は喫緊の課題となっている。我々は先行研究において、リール式磁気顕微鏡観察によって取得した磁化電流分布の像に深層学習による物体検出を導入することで、通常のTapestarによる一次元的 $I_c$ 測定では検知できていない電流阻害因子obstacleを自動的に検出することに成功した。また、REBCO層の成膜プロセスの異なる線材の比較によって、局所不均一性の形態がプロセス依存性を有することを示唆する結果を得た[1]。

本研究では、これらの研究をさらに推し進めて、現在線材メーカーが採用している複数の主要なプロセスによる線材に対して、プロセスの違いを含めた学習データを取得し、モデルのトレーニングを行うことで、プロセスごとの局所不均一性の統計的な分布の違いを取得すると共に、線材製造プロセスによらず適用可能な、汎用的な検出モデルについて検討を行った。本手法によって、異なる製法によるREBCO線材に内包される局所不均一性の検出・評価が可能となり、その統計事象を含む特徴の定量化が可能になると考えられる。

### 2. 実験方法

試料はPLD法、RCE-DR法およびMOCVD法の3つプロセスによる長尺線材を用いた。PLD法試料の線幅は5.0 mm、RCE-DR法線材4.1 mmおよびMOCVD線材4.0 mmであった。各試料に対し、リール式磁気顕微鏡観察によって面内の磁化電流密度 $J$ 分布を評価し、面内の空間解像度がおおよそ同等になるように調整した。各線材における $J$ 低下領域の画像を教師データとして用い、3つプロセスに対応する $J$ 低下領域をオブジェクトとして検出するモデルの学習を行った。この時、以下の4つのラベルを定義した。PLD法による線材において1) obstacleのドメインが独立に存在する: Isolated Obstacle、2) クラスタ状のドメインを形成する領域: Cluster of Obstacles、3) RCE-DR法による線材でのobstacle、及び4) MOCVD法による線材におけるobstacleである。得られたモデルは対象領域をBounding boxで示したとき、Ground truthである物体領域との重ね具合を示す指標IoU (Intersection over Union)が81%と充分に高かった。さらに学習に用ないテストデータセットを使ってモデルの検出精度を検証し、再現率Recallと適合率Precisionを評価した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1に学習済みの検出モデルによる各線材におけるObstacleの検出例を示す。(a)PLD線材(isolated type) (b)PLD線材(cluster type)、(c)RCE-DR線材および(d)MOCVD線材のBounding boxとラベル名を示す。Bounding boxで $J$ マップにおけるObstacleの場所とサイ

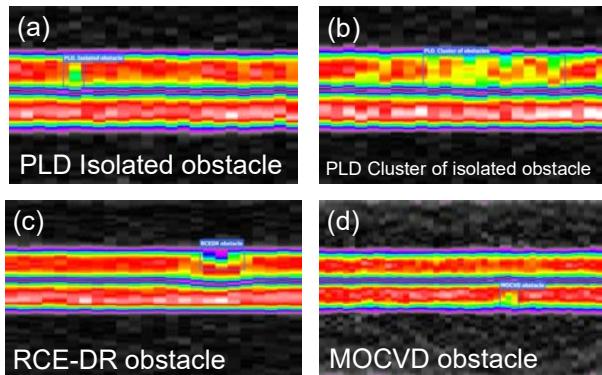


Fig. 1. Object detection results of Isolated Obstacle for PLD tape and MOCVD Obstacle for MOCVD tape, by Object Detection model based on  $J$  images from different processes.

Table 1. Results of object detection by the trained model for the CC tapes fabricated by different three processes, PLD, RCE-DR and MOCVD, respectively.

Process	PLD Isolated obstacle (34)	34	0	0	0
PLD Cluster of isolated obstacles (10)	0	8	0	0	0
RCE-DR obstacle (23)	1	0	20		
MOCVD obstacle (16)	0	0	0	13	
	PLD Isolated obstacle (39)	PLD Cluster of isolated obstacles (8)	RCE-DR obstacle (20)	MOCVD obstacle (17)	Model Prediction

ズのみならず、Obstacleが対応するプロセスの種類まで正確に判別できた。全テストデータにおける検出結果をTable 1にまとめた。100枚のPLD線材の $J$ マップに34個Isolated obstacleが存在し、モデルでは39個Isolated obstacle、他の種類と間違って判断した数は0であった。一方、200枚のRCE-DR線材の $J$ マップでは23個のRCE-DR obstacleに対して、モデルは20個のRCE-DR obstacleおよび、1個のPLD法のIsolated obstacleと判断した。Table 1の判定結果から、再現率Recall 90.4%と適合率Precision 89.3%と評価でき、当該モデルの検出精度が十分高いことを確認した。

これらの結果より、異なるプロセスによるREBCO線材に内包される局所不均一性の検出に適用可能な汎用的なモデル作成に成功したと言える。当日は、線材局所不均一性の統計事象を含む特徴の定量化についても報告する予定である。

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

### 参考文献

- [1] 吳 *et al.*, 低温秋予稿集(2023), 3B-a01.

# パルス電流を用いた REBCO 線材における $I_c$ の磁場印加角度依存性測定手法の開発

## Measurement of Field Angular Dependence of $I_c$ in REBCO Tapes Using Pulsed Current

土屋 雄司, 淡路 智(東北大); Hugo Source, Arnaud Badel (UGA, G2Elab/Néel Institute, CNRS);  
水野 謙一郎(MTL); 小濱 芳允(東大)  
E-mail: tsuchiya@tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系銅酸化物(REBCO)高温超伝導線材は、NMR や物性測定用の強磁場マグネット応用に向けた 4.2 K、30 T 以上の低温強磁場[1]や、核融合応用に向けた 20 K 程度の中温度域での運用が注目されている。それらの機器設計および線材開発に向けて、REBCO 線材の臨界電流  $I_c$  の測定が必要である。REBCO 線材は、冷却方法によって運転温度が多岐にわたり、材料固有の異方性から  $I_c$  の磁場印加角度依存性があるため、強磁場下で可変温度かつ可変磁場印加角度での  $I_c$  測定技術が必要である。我々はこれまで、5 kA 級のパルス電源を開発し、可変温度環境で、パルス通電を用いた  $I_c$  測定手法を開発してきた[2]。しかし、磁場印加角度が固定されていたため、 $I_c$  の磁場印加角度依存性の評価が課題であった。

本研究では、パルス通電法と回転機構を有するプローブ[3]とを組み合わせることで、REBCO 線材の  $I_c$  の磁場印加角度依存性の測定手法の開発を目的とした。従来は、REBCO 線材を数 10  $\mu\text{m}$  幅のマイクロブリッジに加工することで電流を抑制していたが、超伝導特性の不均一性を考慮して、幅 100  $\mu\text{m}$  程度のマイクロブリッジに加工した REBCO 線材に対する  $I_c$  測定手法に着目した。

### 2. 実験方法

試料は、33T 無冷媒超伝導マグネット[1]に使用予定のフジクラ社製 REBCO 線材(FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、Cu 安定化層厚 40  $\mu\text{m}$ )を用いた。パルスレーザーを用いて、試料を幅 180  $\mu\text{m}$ 、長さ 2 mm のマイクロブリッジに加工した。磁場印加角度を制御するため、回転機構を有する直流電流容量 10 A 級のプローブを用いた[3]。磁場印加および冷却には、25T 無冷媒超伝導マグネットおよび He フロー型クライオスタットを用いた。マイクロブリッジを流れる電流は、外部磁場に直交するよう配置した。通電試験には、ニッケミ社製スーパーキャパシタを用いた 60 V、5 kA 級パルス電流源および NI 社製デジタイザを用いた。

### 3. 実験結果及び考察

図 1 に、20 K において REBCO 線材の(a)垂直および(b)平行方向に磁場を印加したときの各磁場での電流-電圧曲線を示す。磁場が線材垂直方向のとき(図 1(a))、磁場が増加するほど  $I_c$  が低下し、低い電流で非線形に電圧が発生した。また、電圧ノイズは約 20  $\mu\text{V}$  で一定であった。一方で、磁場が線材平行方向のとき(図 1(b))、磁場が増加しても  $I_c$  はほぼ低下しなかった。電圧ノイズは磁場が増加するほど増加し、6 T において 100  $\mu\text{V}$  以上となり、 $I_c$  の算出が困難であった。

電圧ノイズの原因は、パルス通電時に電流リードおよび試料に流れる電流と外部磁場によって短時間にローレンツ力が発生し、プローブ、回転機構が振動することで、計測線への鎖交磁束が時間的に変化するために、誘導電圧が生じたためと考えられる。磁場の向きにより傾向が変化した理由は、ノイズ源となるローレンツ力の大きさが、 $I_c$  と磁場との積、つまり、巨視的ピンニング力密度に

比例した値に依存するため、垂直磁場下では飽和し、平行磁場下では単調に増加したためと考えられる。以上の結果から、 $I_c$  の磁場印加角度依存性の評価には、電圧ノイズの抑制が必要であることが明らかになった。

当日は、電流経路の制御することでローレンツ力を打ち消し電圧ノイズを抑制する手法について報告する予定である。

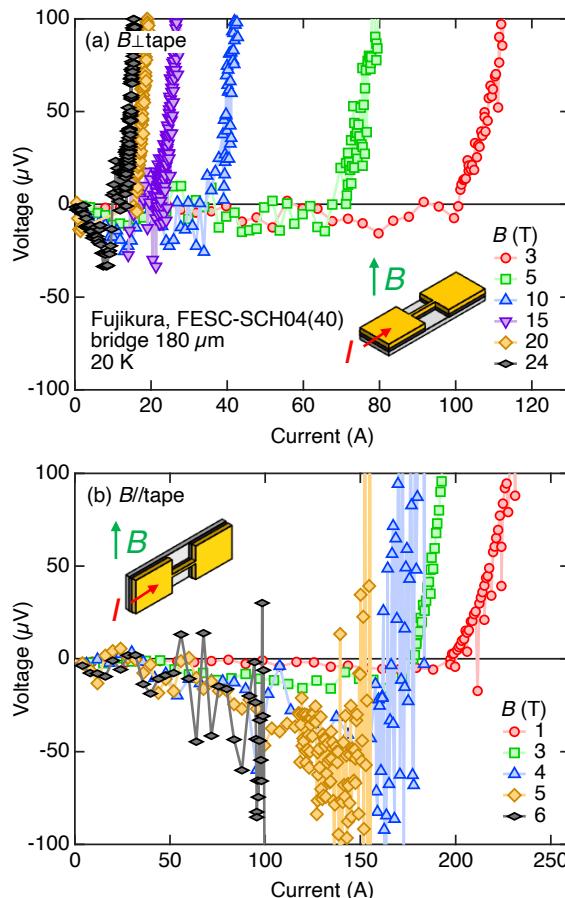


Fig. 1 Current-voltage curves of the REBCO tape at 20 K under various magnetic fields (a) perpendicular and (b) parallel to the tape.

### 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。F. Sirois 教授には有益な議論をいただきました。

### 参考文献

- [1] A. Badel *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 4301205 (2024). S. Awaji *et al.*, submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond.
- [2] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 9500207 (2024).
- [3] Y. Tsuchiya *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **30**, 104004 (2017).

## REBCO coated conductor の臨界電流の磁場角度依存性に与える 曲げひずみ印加効果

Bending Strain effect for angular dependence of critical current for REBCO coated conductor

大川 祐平, 永井 鳩介, 栗原 佑太, 小黒 英俊(東海大); 淡路 智(東北大)

OKAWA Yuhei, NAGAI Sosuke, KURIHARA Yuta, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: 4CAJM008@tokai.ac.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(REBCO, REはYまたは希土類元素)線材は、coated conductorとして実用化されている。しかし、ひずみを加えることと、線材に印加する磁場の方向を変えることで、超伝導特性が変化するため、人工ピンの導入やひずみと超伝導特性の関係に関する研究が進められている。実際には、この2つの特徴を同時に議論することが超伝導マグネット応用には重要だが、その測定が難しいためほとんど調べられていない。我々のグループでは、磁場角度とひずみを変えた時のcoated conductorの超伝導特性を調べており、その結果、ひずみによってREBCOの異方性が変化する可能性があることが分かってきた[1, 2]。ただし、どのように変化するのか、に関する条件は全くわかっていない。

本研究では、REBCOの異方性の変化の仕方を調べるために、ひずみと磁場印加角度を変えて臨界電流測定を行った。ひずみ印加には、曲げひずみ印加ジグを用いており、磁場、磁場角度、温度を変えた条件で臨界電流の測定を行った。

### 2. 実験方法

測定する線材として、フジクラ社製と SuperPower 社製のREBCO coated conductor を用意した。これらの線材は高温でも大きな臨界電流を持つが、測定中の温度変化を無くして精密測定を行うため、臨界電流を抑えるためのブリッジを作成した。線材にカプトンテープを貼った後、レーザーカッターを用いてブリッジ形状にテープを切った。ブリッジ部のみカプトンテープを残し、銅を硝酸、銀を過酸化水素水とアンモニア水の混合溶液、超伝導層と中間層をリン酸でそれぞれエッチングした。ブリッジは長さ 1 mm、幅 0.3 mm とした。

測定は直状での状態と、曲げひずみを与えた状態で行った。曲げひずみ印加時には、ホルダーの測定部にφ25 mm の曲率を持った Ti-6Al-4V 製の曲げジグを取り付け、その上に試料を沿わせるように固定した。測定は 4 端子法で行い、端子はインジウムを用いて固定した。磁場の印加には、0.4 T 回転型水冷マグネット、もしくは 18 T 超伝導マグネットを使用した。回転型マグネットでは試料を固定しマグネットを回転させ、超伝導マグネットでは回転プローブによって試料を回転させながら磁場中で測定を行った。測定は、10 T 以下、65 K ≤ T ≤ 85 K の範囲で行った。印加する磁場の角度は、テープ面に垂直方向、つまり、REBCO の c 軸に対して平行方向を 0°、テープ面に平行方向であり REBCO の ab 面方向を 90° として、-20° から 120° の範囲で測定した。

### 3. 実験結果と考察

フジクラ社製と SuperPower 社製の coated conductor に曲げひずみを与えたときの、85 K、0.4 T における規格化された臨界電流の磁場角度依存性を、それぞれ Fig. 1、Fig. 2 に示した。Fig. 1 の結果より、0° 付近と 90° 付近の結果に関して、曲げひずみを印加して測定したときの  $I_c$  の変化が小さくなつた。この結果は、これまでに測定した結果[1, 3]とは異なる結果であった。その原因是今後の検討課題ではあるが、0° 付近や測 100° 付近の再検討の必要性も考えられるため、測定数を増やすことが有効であると考えている。

Fig. 2 より、-20° から 70° 付近において、曲げひずみを印加した線材の超伝導特性の低下が確認できた。SuperPower

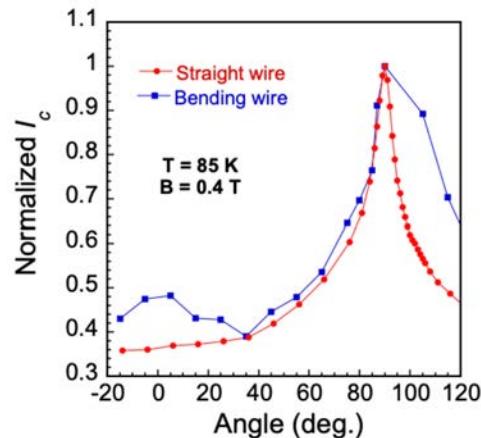


Fig. 1 Normalized critical current as a function of magnetic field angle for Fujikura wire at 85 K and 0.4 T.

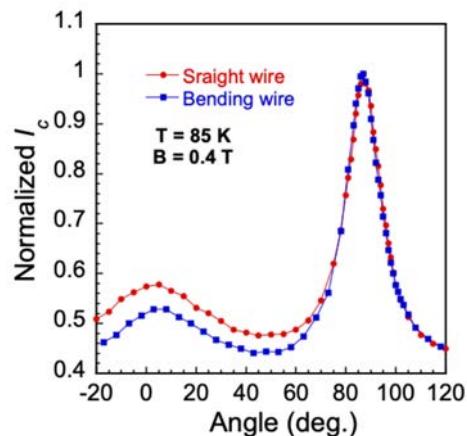


Fig. 2 Normalized critical current as a function of magnetic field angle for SuperPower wire at 85 K and 0.4 T.

社製の線材のため、ピンが入っていることから磁場角度 0° 方向の  $I_c$  はピークをもつ形で大きくなっているが、0° 方向と 90° 方向の  $I_c$  の大きさの比率が大きくなっていることは分かった。この結果は、これまでの測定結果[1, 3]と一致している。当日は温度と磁場条件を変えた結果も報告するが、過去の結果も踏まえて、人工ピンの有無や希土類の種類など、どの条件が異方性の変化に影響を与えるのかに関して報告する。

### 謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの課題(202312-HMKGE-0036)の一部として行われた。

### 参考文献

1. Y. Kurihara et al., Abstract of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.38
2. R. Hasegawa et al., Abstract of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.146
3. K. Ishizuka et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) 6602304

## REBCO 切断面の断面観察による破損形態の考察

Consideration of failure morphology based on cross-sectional observation of REBCO cut surfaces

佐藤 倖希, 町屋 修太郎(大同大学); 長村 光造(応用科学研); YIFEI Zhang (Super Power)  
SATO Koki, MACHIYA Shutaro (Daido univ.); OSAMURA Kozo (RIAS); YIFEI Zhang (Super Power)  
E-mail: dmm2305@stumail.daido-it.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO は幅 12mm で製作され、3 分割することで市販されていることは広く知られている。だが、切断によりバッファ一層あるいは REBCO 層にせい性破壊に起因する欠陥が導入される可能性が高い。破壊じん性の低下を抑えるために、メーカーでは全面の銅メッキで対応していると考えられる。しかし、機械加工によるせん断力による切断では REBCO レイヤー界面周辺での損傷は不可避であり、微小な欠陥の存在は予見されていたが、実際の破断様態の観察はあまりされてこなかつた。その形態を明らかにするために実際に機械的な切断面を生成し、断面の観察を行なつたので報告したい。

また、これらの機械的切断の問題を軽減するために、レーザー切断を行っているメーカーもある。単純な機械的な切断よりもレーザーを用いた機械的切断のはうが、欠陥が少ないと考えられるが、それを補強する実験結果として、レーザー切断のはうが、ねじり方向の負荷での  $I_c$  の劣化が少ないと報告もある。

### 2. 試料および実験方法

今回は、Super Power 社の REBCO 線材を使用した。  
 $(0.085 \times 4.01 \text{ mm}^2)$

REBCO 線材を長手方向に機械的な切断をし、走査電子顕微鏡にて断面写真の撮影と成分分析を行った。

### 3. 結果

今回、REBCO のサンプルを 2 本 (sample1, sample2) 用意して断面観察と成分分析を行った。図 1, 図 2 に機械的な切断を行った REBCO の断面写真示す。図 3 では、sample1 の特徴的なクラックを拡大したものを示す。また、図 4 では、図 3 の一部を模式図として表す。図 1 の断面では、層状のものが確認できる。クラック内の成分としては主に、Ni, Cr が確認できた。一方で図 2 では、層状のものは確認できなかった。クラック内の成分としては、Ni, Cr と Ag が確認できた。図 3 では、ほとんどのクラックに約  $45^\circ$  の角度がついていた。

### 4. 考察

図 1 では、層状のものが確認できたことから超伝導層でクラックが生じていると推測できる。一方で図 2 では、層状のものではなく、Ag が確認できることから、超伝導層より上側にある Ag の層でクラックが生じていると考えることができる。また、図 3 の角度のついたクラックがねじり方向の引張が弱くなる原因と推測する。

### 5. まとめ

今回の実験では、sample1, sample2 は同一の REBCO であり、切断方法であったが、クラックが入る層に違いがあることがわかった。機械的切断を行った場合、sample1 のように角度のついたクラックが入ることがあり、ねじり方向の引張が弱くなる原因となっている可能性がある。したがって、製造段階でのクラックを減らすことは実用フェーズとして重要な課題といえる。

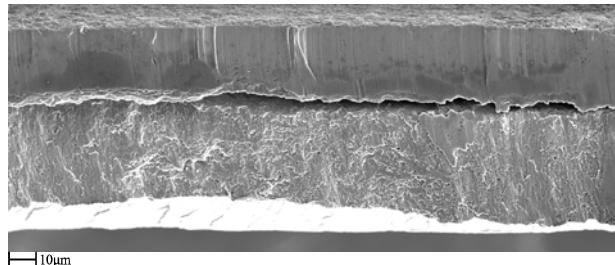


Fig.1 REBCO (sample 1)

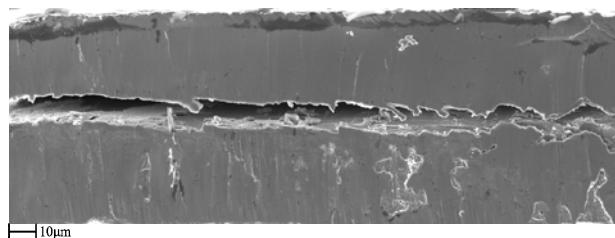


Fig.2 REBCO (sample2)

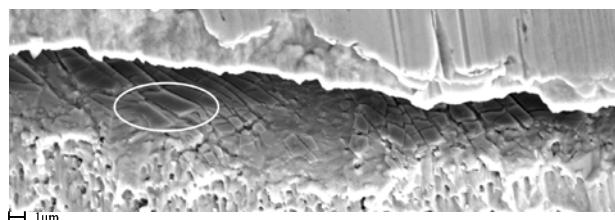


Fig.3 Enlarged view of sample 1

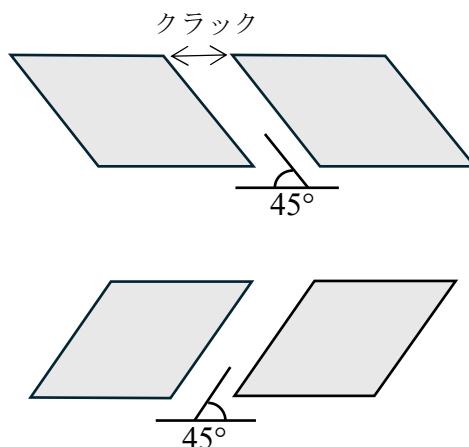


Fig.4 Schematic diagram of part of Fig.3

## BSCCO 線材のフィラメントの引張および圧縮破壊挙動

### Tensile and compressive fracture behavior of BSCCO filaments

町屋 修太郎(大同大学); 長村 光造(応用科学研究所); 白木原 蒼(大同大学 学  
MACHIYA Shutaro (Daido univ.); OSAMURA Kozo (RIAS);  
SHIRAKIHARA Sou (Undergraduate of Daido univ.)  
E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

#### 1. はじめに

BSCCO は単体での圧縮が難しく、はりに貼りつけて圧縮する実験がいくつか行われてきたが、ラミネート強化された BSCCO 線材は、フィラメントに圧縮を付与しているため、圧縮側の強度にマージンが少ないと考えられてきた。しかし、引張は多重破断モードでの破壊が想定されてきた一方、実際の圧縮での破壊挙動を観察した例はなかった。室温で BSCCO フィラメントを露出させた上で、引張および圧縮ひずみ下での顕微鏡でのその場観察を試みたので報告したい。

#### 2. 実験方法

フィラメント部分をむき出しにしなければひずみを負荷した状態でのその場実験できないため、まずシースの両側面と片面のみを除去した。このシースが片面だけついた状態の線材を図1に示すよう、幅 15mm ( $t=1.5$  mm) のはりに貼りつけた。幅広の針に貼り付けているのは、4点曲げのときに、圧縮あるいは引張のみを与えたいためである。ただ、単純に貼り付けただけでは、負荷時にフィラメント表面に規定のひずみが付加できない問題がある。これは、フィラメントまわりの純銀の降伏強度が低いため、純銀部で緩和が発生するためである。そこで緩和を起こりにくくするため、図1の上部に示すとおり、フィラメントの観察部位以外をエポキシ接着剤で被せるように塗布している。これにより、接着剤部位を通して、ひずみが伝達されやすくなると考えられる。

図2にはりを、4点曲げ治具に取り付けた状態の写真を示す。写真では、引張モードになっているが、BSCCO の貼り付け位置を変更することで、圧縮にも対応可能となる。負荷ひず

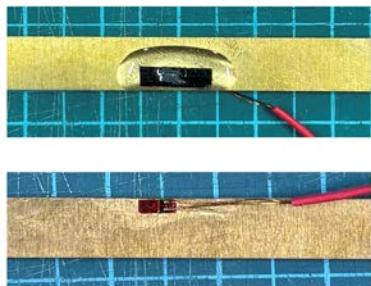


Fig. 1 BSCCO filament on bending beam with strain gauge.

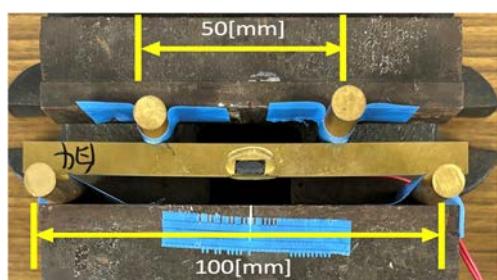


Fig. 2 4 points bending jig and bending beam

みは、図1の下部に示すようにひずみゲージをフィラメント部分の裏面に貼り付けており、この計測ひずみを用いて負荷を行った。

#### 3. 実験結果および考察

4点曲げ 0.1%ずつひずみを負荷しながら、実体顕微鏡を用いてひずみを負荷しながらのその場観察を行った。図2に圧縮の 0.3%を負荷したときの観察写真を示す。負荷方向は、左右方向である。写真ではみづらいが、左下矢印付近で、せり上がるよう面外変形するように破壊する様子が確認できた。圧縮方向とやや角度がついており、せん断型の圧縮き裂の可能性もある。

同様に図4では、引張で 0.5%を負荷したときの観察写真を示す。ここでも、画像を二次元化するとき裂が確認しづらいので、図中に補助線を入れている。線に示す部位がき裂となり、多重破断の典型例のようにき裂が連続して発生していることが確認できた。

#### 4. まとめ

引張モードでは多重破断の様子が確認できた。圧縮ではせり上がるよう面外変形するように破壊する様子が確認できた。実体顕微鏡では立体視できるため観察しやすいが、発表時に二次元化するとき裂が見えにくい問題があり、今後の課題として、可視化してみやすくしていきたい。

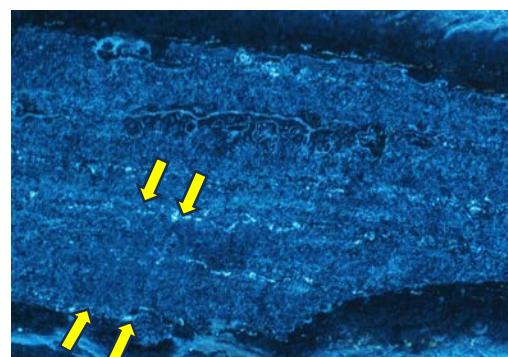


Fig. 3 Surface image at compressive 0.3% strain.

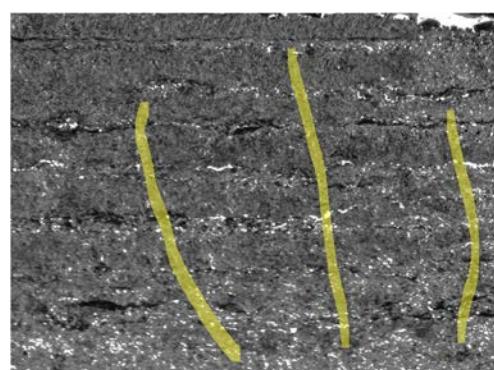


Fig. 4 Surface image at tensile 0.5% strain.

# Nb<sub>3</sub>Sn の横方向圧縮における有限要素法の解析

## Finite element analysis in lateral compression of Nb<sub>3</sub>Sn

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

### 1. はじめに

欧洲合同原子核研究機関(CERN)における大型ハドロン衝突型加速器(Large Hadron Collider,LHC)加速器に使用される超電動磁石の線材がNbTiからNb<sub>3</sub>Snへ高磁場化のため変更される等、核融合応用ではNb<sub>3</sub>Snはこの先も使われる可能性が高い。

しかし、超伝導電磁石のコイルに使用されている超伝導線材には横方向からの外力および電磁力の増加が見込まれており、Nb<sub>3</sub>Sn線材の耐性の改善が必須である。

実験的には線材に横圧縮を負荷する方法が提案されているが、応力集中の問題についての議論はあまりされてこなかった。そこで有限要素法を用い、横方向圧縮をかけた時の応力の影響部を解析することにより、応力集中の問題の考察を行う。

### 2. 実験方法

今回の実験では、事前にKEKで使用されたNb<sub>3</sub>Sn線材の写真を参考にsolidworksにより2D-FEMモデルを作成した。図1に本解析で使用したメッシュモデルを示す。図中の上部の長方形は剛体であり、下方向に変位を与えて接触解析とした。本解析では、この問題の解決のためモデルの上下の接触部分へあらかじめフラット部を設けている。

表1に本解析で使用したモデルの物性値および条件を示す。

本実験の解析では2つの条件下で解析を行なっている。

条件1 板材に角Rをつけ強制変位による圧縮力を線材にかけた場合の解析。

条件2 モデルの接触部分へ設けたフラット部の寸法Lを変更し強制変位による圧縮力を線材にかけた場合の解析を行なった。

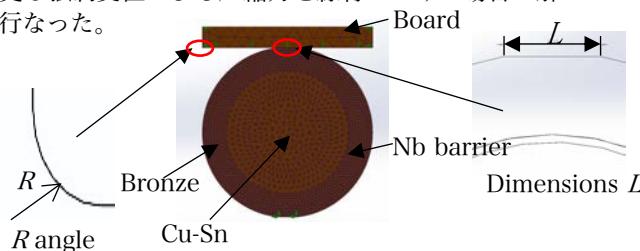


Fig. 1. Mesh model

TABLE I

Physical properties and analysis conditions of the model used

	Bronze	Nb barrier	Cu-Sn		
Dimensions[mm]	φ 0.81	φ 0.60	φ 0.58		
Elastic modulus[GPa]	110	110	110		
Poisson's ratio	0.37	0.37	0.33		
Yield stress[MPa]	259	259	110		
Board model					
Properties	Rigid body				
Dimensions[mm]	0.81w×0.30t	0.30w×0.30t			
Imposed displacement	0.001mm	0.0001mm			
R angle[mm]	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
Dimensions L[mm]	0.114	0.098	0.080	0.057	

### 3. 実験結果および考察

条件1の解析結果を図2に示す。

Cu-Sn部のVon-Misesによる応力分布を比較すると、角Rが大きい方がCu-Sn部にかかる応力が小さくなっているように見える。

応力による電気抵抗の発生を鑑みれば、角Rを大きくすることで、超伝導層の性能低下を防ぐことができる。

しかし角Rを大きくするほどアウター部には応力集中が顕著にみられるようになる。

条件2の解析結果を図3に示す。

Cu-Sn部の応力分布を比較すると、Lの値が小さくなるほど応力の値が小さくなっているように見える。

しかし条件2の解析では局所応力による解析の停止が頻発していたため、解析結果が正常であるかの確認の必要はある。

### 4. まとめ

条件1の結果より、線材へ応力をかける場合には角Rを大きくすることで超伝導部への応力による影響を少なくすることができると考える。

今後の展望として、Solidworksによる弾塑性解析がこれ以上できない場合、AnsysやLs-Dynaを使用し解析を実施したい。

Solidworksによる解析が可能であれば、ラザフォード製Nb<sub>3</sub>Snのモデルを作成し解析を行なっていきたい。

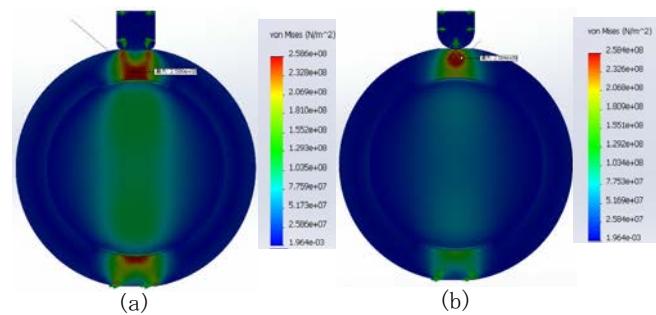


Fig. 2. Analysis results of Von Mises stress distribution according to condition 1.(a) Stress distribution at R=0.02.(b) Stress distribution at R=0.06.

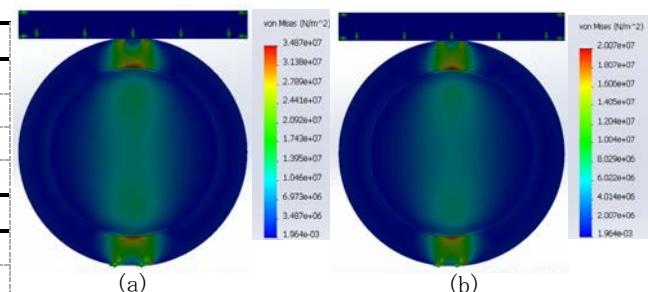


Fig. 3. Analysis results of Von Mises stress distribution according to condition 2.(a) Stress distribution at L=0.114.(b) Stress distribution at L=0.080.

# 非接触給電システムにおける高温超電導コイルの運転中断線への対策

## -断線時におけるコイルの電流分布特性-

Countermeasure for wire breakages in HTS coil for wireless power transmission system  
-Current distribution characteristics in the HTS coil at wire breakage-

薦田 遥暉, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大)

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

E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出量ゼロを目指したEV用大容量非接触給電システムの需要は高まっている。そこで本研究では、地上側送電用として高温超電導(HTS)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。その一方で、コイル内部の局所的な温度上昇により、コイルが断線した場合は、電力送電の継続運転が困難となる。そこで、断線が生じたときでも継続運転を維持させる目的としてターン間に共振キャパシタを接続したHTSコイル構造を新たに提案する。本研究では、部分要素等価回路(PEEC)モデルに基づき、提案するHTSコイルにおけるターン間に共振キャパシタの設計指針およびコイル内的一部が断線した場合における電流分布特性について検討した。

### 2. 解析条件

共振キャパシタを含むHTSコイルの諸元をTable.1に示す。コイルの形状は、先行研究の1kW級WPTシステム[1]を参考にした。また、1次側に提案するターン間に共振キャパシタを挿入したHTSコイルおよび2次側に銅コイルを用いたWPTシステム((SP)-S方式)の共振周波数 $f_{0,(\text{SP})-S}$ は、4800Hzで設計した。ここで、(SP)-S方式の1次側の直列キャパシタ $C_{s1}$ とターン間にキャパシタ $C_{pn1}$ は以下の式で設計される。

$$C_{s1} = \frac{1}{\omega_{0,(\text{SP})-S}^2 L_1} \quad (1)$$

$$C_{pn1} = \frac{(N_1 - 1) \left\{ \frac{1}{L_1} - \sqrt{\frac{1}{L_1^2} - \frac{4M^4\omega_{0,(\text{SP})-S}^2}{L_1^4 R_L^2}} \right\}}{2N_{cp1}\omega_{0,(\text{SP})-S}^2} \quad (2)$$

ここで、 $\omega_{0,(\text{SP})-S}$ は、(SP)-S方式における共振角周波数、 $L_1$ は1次側コイルの自己インダクタンス、 $M$ は相互インダクタンス、 $N_1$ は1次側コイルの巻き数、 $N_{cp1}$ は1ターンあたりのターン間にキャパシタの数、 $R_L$ は2次側の負荷抵抗である。ここで、1次側HTSコイルのみにおける共振周波数 $f_{0,(\text{SP})}$ は式(3)で表される。

$$f_{0,(\text{SP})} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \left( C_{s1} + C_{pn1} \frac{N_{cp1}}{N_1 - 1} \right)}} \quad (3)$$

ここで、(SP)-S方式における共振周波数 $f_{0,(\text{SP})-S}$ と1次側HTSコイルにおける共振周波数 $f_{0,(\text{SP})}$ は、ターン間にキャパシタ $C_{pn1}$ に相互インダクタンス $M$ および負荷抵抗 $R_L$ が含まれるため異なる。なお、提案するHTSコイルのPEECモデルは、1周を60等分しており、3方位にターン間にキャパシタ $C_{pn1}$ を接続した構造である。以上の条件下において、PEECコイルに基づいて、1次側コイル内部の電流分布解析を行った。

### 3. 結果および考察

Fig.1に提案するコイルの入力インピーダンスの周波数特性を示す。また、Fig.2(a)に通常運転時、Fig.2(b)に1ヶ所断線時、Fig.2(c)に3ヶ所断線時のHTSコイル内の電流分布解析結果を示す。

Fig.1より、通常運転時の1次側コイルのみにおける共振周波数 $f_{0,(\text{SP})}$ は4670Hzとなり、式(3)で表される設計値と概ね一致したことを確認した。また、Fig.2(a)より、通常運転時の提案

するHTSコイルのターン間にキャパシタに流れる径方向電流は小さく、周方向電流は概ね均一に流れることが確認された。これは、コイルの自己インダクタンス $L_1$ と直列キャパシタ $C_{s1}$ 間の直列共振を積極的に利用しているためである。一方で、Fig.2(b)およびFig.2(c)より、断線時において、コイルの周方向電流は、ターン間にキャパシタを介して断線点を迂回する。そのため、自己インダクタンス $L_1$ が減少し、通常運転時に比べて共振周波数が高くなつたと考えられる。

以上より、提案するコイルは断線点の増加につれ、共振周波数が高くなるものの、断線が生じたときには動作周波数を新たな共振周波数に一致させることで継続運転が可能になることがわかった。今後はターン間にキャパシタの数を減らす構造を検討し、実証実験を行う予定である。

Table.1 Specifications of HTS coil for wire breakage

Resonance frequency of the (SP)-S type $f_{0,(\text{SP})-S}$ (Hz)	4800
Outer diameter $D_o$ (mm)	410
Inner diameter $D_{in}$ (mm)	47
Radial gap $g_t$ (mm)	4.8
Self-inductances $L_1$ ( $\mu\text{H}$ )	246.6
Number of turns $N_1$	37
Number of resonance capacitors between turns (per turn)	3
Resonance capacitor between turns $C_{pn1}$ ( $\mu\text{F}$ )	2.6
Series capacitances $C_{s1}$ ( $\mu\text{F}$ )	4.46
$\tan \delta_{cs1}$ @293 K [2]	0.0003
$\tan \delta_{cpn1}$ @77 K [2]	0.0004
Wiring(interconnect) resistances $r_1$ ( $\text{m}\Omega$ )	2.5

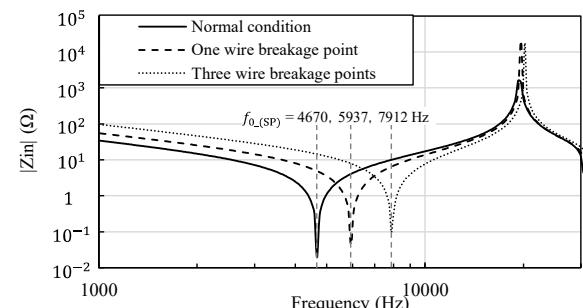


Fig.1 The calculated input impedance of HTS coils with and without wire breakage as a function of frequency.

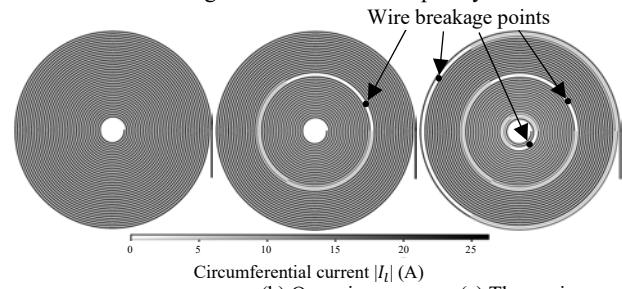


Fig.2 The calculated current distribution properties of HTS coils with and without wire breakage on the PEEC model.

### 参考文献

- [1] R. Inoue, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, pp. 1-5  
[2] M. -J. Pan, *Cryogenics*, vol. 45, no. 6, pp. 463-467, Jun. 2005

# 非接触給電システムにおける高温超電導コイルの運転中断線への対策

## -断線時における非接触給電システムの電力伝送特性-

Countermeasure for wire breakages in HTS coil for wireless power transmission system  
-Electric power transmission characteristics of the WPT system using the HTS coil at wire breakage-

井上 良太, 薦田 遥暉, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大)

INOUE Ryota, KOMODA Haruki, UEDA Hiroki, KIM SeokBeom (Okayama Univ.)

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

### 1. はじめに

我々は、2050年のかーボンニュートラルの実現に向けて、地上側に高温超電導(HTS)コイルを用いた大容量非接触給電(WPT)システムの開発を行っている。その一方で、HTSコイル内部が局所的に温度上昇した場合、HTSコイルの一部が断線することが明らかになった。そこで本研究では、断線した場合でも電力伝送が可能なWPTシステムの実現を目指して、ターン間にキャパシタを挿入したHTSコイル構造を提案する。本発表では、開発したWPTシステム用部分要素等価回路(PEEC)モデルに基づき、提案するターン間キャパシタを挿入したWPTシステム((SP)-S方式)の電力伝送特性を検討した。

### 2. 解析条件

Fig.1に、開発したWPTシステム用PEECモデルを示す。提案型の(SP)-S方式における1次側HTSコイルには、断線時に電流を迂回させるためのターン間キャパシタ $C_{pn1}$ を接続した。また、1次側および2次側コイルには、直列共振用キャパシタ $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ を接続した。各キャパシタは、以下の式で設計される。

$$C_{s1} = \frac{1}{\omega_0_{(SP)-S}^2 L_1} \quad (1)$$

$$C_{s2} = \frac{1}{\omega_0_{(SP)-S}^2 (L_1 L_2 - M^2)} \quad (2)$$

$$C_{pn1} = \frac{(N_1 - 1) \left\{ \frac{1}{L_1} - \sqrt{\frac{1}{L_1^2} - \frac{4M^4 \omega_0_{(SP)-S}^2}{L_1^4 R_L^2}} \right\}}{2N_{cp1} \omega_0_{(SP)-S}^2} \quad (3)$$

ここで、 $L_1$ ,  $L_2$ および $M$ は自己および相互インダクタンスである。また、 $R_L$ は負荷抵抗、 $N_1$ は1次側コイルのターン数、 $N_{cp1}$ は1ターンあたりのターン間キャパシタ $C_{pn1}$ の数である( $N_{cp1}=3$ )。さらに、 $\omega_0_{(SP)-S}$ は、(SP)-S方式における共振周波数 $f_0_{(SP)-S}$ を用いて、 $\omega_0_{(SP)-S} = 2\pi f_0_{(SP)-S}$ で表される(電源から見た力率が1となる周波数を共振周波数と定義)。Table.1に、提案型の(SP)-S方式およびターン間キャパシタを接続しない従来型のS-S方式の諸元を示す。ここで、通常運転時(断線無し)における(SP)-S方式およびS-S方式の共振周波数 $f_0_{(SP)-S}$ ,  $f_0_{S-S}$ は、4800 Hzで設計した。また、コイル形状は1 kW級WPTシステム[1]を参考にした。なお、PEECモデルは周方向に60分割した。

### 3. 結果および考察

Fig.2に、提案型の(SP)-S方式および従来型のS-S方式における受電電力の周波数特性を示す。ここで、(SP)-S方式の運転条件は、通常時(断線無し)、1ヶ所断線時および3ヶ所断線時を想定した。なお、Fig.2には、(SP)-S方式およびS-S方式における共振周波数 $f_0_{(SP)-S}$ ,  $f_0_{S-S}$ および伝送効率 $\eta_{(SP)-S}$ ,  $\eta_{S-S}$ を示している。さらに、Fig.3に、3ヶ所断線した(SP)-S方式における1 kW送電時の電流分布( $f_0_{(SP)-S}=8829$  Hz)を示す。

Fig.2より、通常運転時における(SP)-S方式およびS-S方式の共振周波数 $f_0_{(SP)-S}$ ,  $f_0_{S-S}$ は、4800 Hzとなった。一方、1ヶ所および3ヶ所断線した(SP)-S方式の共振周波数 $f_0_{(SP)-S}$ は、断線箇所の増加と共に増加した。これはFig.3より、1次側HTSコイルの周方向電流がターン間キャパシタにより断線箇所を迂回することで、自己インダクタンスが減少したためと考えられる。また、Fig.2より、通常運転時の(SP)-S方式およびS-S方式の伝送効率 $\eta_{(SP)-S}$ ,  $\eta_{S-S}$ は概ね一致した。一方、(SP)-S方式の

伝送効率 $\eta_{(SP)-S}$ は断線箇所の増加と共に減少した。これは主に、断線箇所を迂回する径方向電流の増加によって、ターン間キャパシタの損失が増加したためと考えられる。以上より、提案型の(SP)-S方式は、HTSコイル内部における断線箇所の増加と共に共振周波数は増加し、伝送効率は低下するものの、動作周波数を共振周波数に一致させることによって、目標の電力を伝送できることが明らかになった。今後は、ターン間キャパシタの個数および配置の最適化を行う予定である。

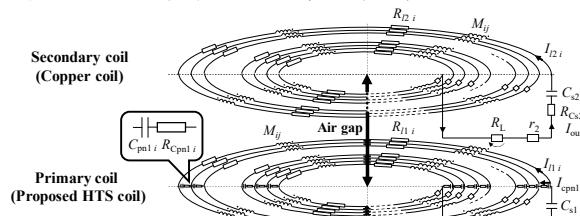


Fig.1 Schematic drawing of the PEEC model for the WPT system using the proposed HTS coil ((SP)-S type).

Table.1 Specifications of the 1 kW-class WPT system for the (SP)-S and the S-S types

	(SP)-S type	S-S type [1]
Outer diameter $D_o$ (mm)	410	
Inner diameter $D_{in}$ (mm)	47	
Radial gap $g_1$ (mm)	4.8	
Self-inductances $L_1$ , $L_2$ ( $\mu$ H)	246.6, 242.7	
Mutual Inductance $M$ ( $\mu$ H)	125.8	
Load resistance $R_L$ ( $\Omega$ )	9	
Number of turns $N_1$ , $N_2$	37, 37	
Series capacitances $C_{s1}$ , $C_{s2}$ ( $\mu$ F)	4.46, 6.16	4.46, 4.53
Capacitor between turns $C_{pn1}$ ( $\mu$ F)	2.6	-

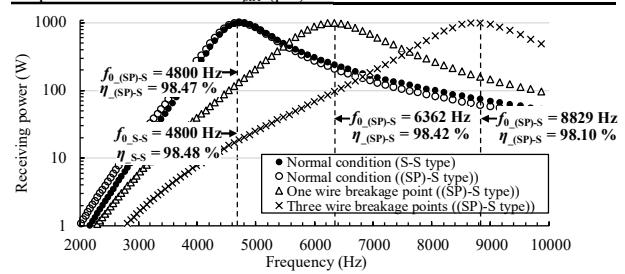


Fig.2 Calculated results of the receiving power in the (SP)-S type and S-S type as a function of frequency.

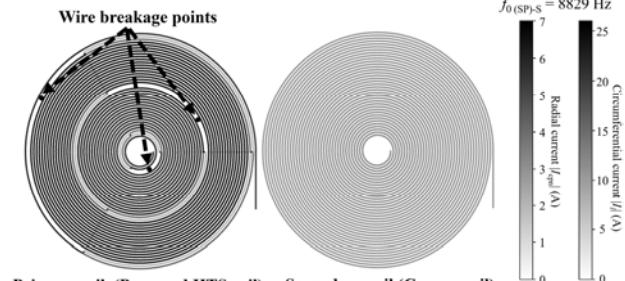


Fig.3 Calculated results of current distribution of the (SP)-S type with three wire breakage points at a receiving power of 1 kW.

### 参考文献

1. R. Inoue, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, (2024) pp. 1-5, doi: 10.1109/TASC.2024.3354669.

## EV 用超電導非接触給電システムにおけるフェライト板の配置による電力伝送効率

### Power transmission efficiency by arrangement of ferrite plate in superconducting wireless power transmission system for EVs

岩本 貴大, 塩崎 琉登, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大)

IWAMOTO Takahiro, SHIOZAKI Ryuto, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama Univ.)

E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

#### 1. はじめに

近年, カーボンニュートラル社会実現のため, 電気自動車(EV)用大容量非接触給電(WPT)システムの需要が高まっている。そこで我々は, 地上側の送電コイルに高温超電導(HTS)コイル, 車両側の受電コイルに銅コイルを用いたWPTシステムを提案している。本提案システムにおいて, 漏れ磁場による電力伝送効率の低下や人体・周辺電子機器への干渉を防ぐために, 送受電コイル背面に軟磁性材料(磁器シールド)を設置するのが有効であると考えられる。その一方で, 軟磁性材料を冷却したWPTシステムの電力伝送特性は十分に検討されていない。そこで本研究では, 軟磁性材料としてフェライト板を選択し, 提案システムにおける, フェライト板の冷却有無と送受電コイルとの配置関係による電力伝送特性を実験的に検討した。

#### 2. 実験条件

Table.1に実験に用いたWPTシステムの諸元, Fig.1にWPTシステムの概念図を示す。Type AはHTSコイルおよび銅コイルにフェライト板を設置していない。また, Type Bは, HTSコイルの下部にフェライト板を設置し, HTSコイルおよびフェライト板を液体窒素(77 K)で冷却した。さらに, Type Cは銅コイルの上部にフェライト板(常温)を設置した。なお, 本実験では, 厚さ5 mm, 縦25 mm, 横25 mmのフェライトコアを400 mm × 400 mmの面積に敷き詰めたものをフェライト板として使用した。ここで, フェライト板の配置位置および冷却有無が電力伝送効率に与える影響を明確にするために, Type A, BおよびCの動作周波数は5 kHzとした。ここで, 両コイル形状は, 1 kW級WPTシステム[1]を参考にした。

#### 3. 結果および考察

Fig.2にType A, BおよびCのHTSコイルにおける1サイクル当たりの交流損失の実験結果を示す。なお, 各タイプにおけるHTSコイルの交流損失測定は, 5 kHzとした。Fig.2より, Type Bの交流損失はType A, Type Cに比べて10倍以上増加した。これは, フェライト板を77 Kに冷却することで, フェライトの結晶磁気異方性係数の絶対値が大きくなり, 鉄損が増加したためと考えられる。一方で, Type AおよびType CにおけるHTSコイルの交流損失は概ね一致した。これは, Type Cにおいて, フェライト板は常温の銅コイルの背面にあるため, HTSコイルとフェライト板との距離が大きく, フェライト板における鉄損の影響が小さかったためと考えられる。

Fig.3に, Type A, BおよびCにおける電力伝送効率の負荷依存性の実験結果を示す。Fig.3より, Type AおよびCに比べてType Bの電力伝送効率は著しく低下した。これは, フェライト板を77 Kに冷却することで, HTSコイルにおける損失が増加し, HTSコイルのQ値が著しく低下したためである。その一方で, Type Cの電力伝送効率はType Aに比べて増加した。これは, 銅コイル側にフェライト板(常温)を用いることで, 送受電コイルの自己インダクタンスおよび相互インダクタンスが増加し, 結合係数および銅コイルのQ値が増加したためと考えられる。

以上より, 提案システムの電力伝送効率は, 常温の銅コイル側にフェライト板を使用することによって上昇することが明らかになった。

Table.1 Specifications of the WPT system using HTS and Cu coils

	Type A	Type B	Type C
Outer diameter (mm)	400		
Inner diameter (mm)	50		
Airgap (mm)	50		
Load resistance ( $\Omega$ )	2-60		
Resonance frequency (Hz)	4852	5020	4872
Coupling coefficient	0.485	0.531	0.529
Primary coil	Wire type Self-inductance $L_1(\mu\text{H})$ Capacitor $C_1(\mu\text{F})$	REBCO 232 4.50	255 3.60 4.05
Secondary coil	Wire type Self-inductance $L_2(\mu\text{H})$ Capacitor $C_2(\mu\text{F})$	Copper litz wire 236 4.50	394 4.05 2.55

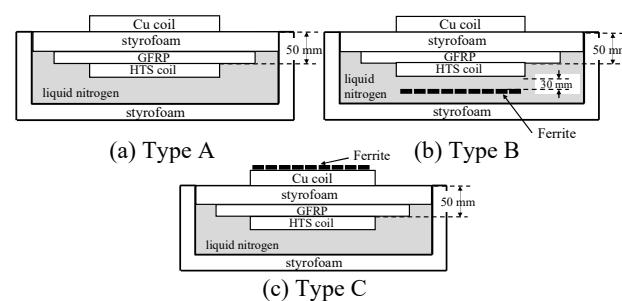


Fig.1 Cross-sectional view illustrating the WPT system with HTS and Cu coils, and the position of the ferrite cores.

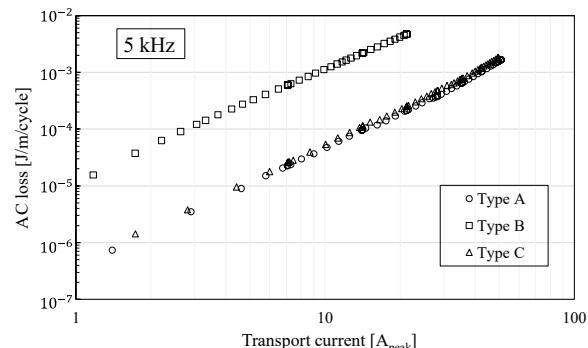


Fig.2 The measured AC losses in HTS coil with (Type B, Type C) and without (Type A) ferrite cores.

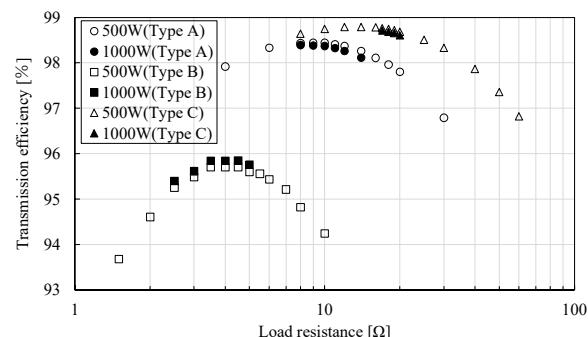


Fig.3 Experimental results of transmission efficiency in Types A, B, and C as a function of load resistance.

#### 参考文献

- [1] R. Inoue, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, pp. 1-5

# 高 Q 値超伝導共振器を用いた長距離電界共振結合方式無線電力伝送

## A Large Air-Gap Electric Resonance Coupling Wireless Power Transfer System Using High Quality Factor Superconducting Resonators

高橋 俊一, 作間 啓太, 關谷 尚人(山梨大)  
TAKAHASHI Shunichi, SAKUMA Keita, SEKIYA Naoto (University of Yamanashi)  
E-mail: g23te015@yamanashi.ac.jp

### 1. はじめに

電界共振結合方式無線電力伝送(Electric Resonance Coupling Wireless Power Transfer : ERC-WPT)はEVなどへの無線給電が注目されているが、伝送距離が短いことが課題とされており、伝送距離向上のために伝送効率の改善が必要となっている。ERC-WPTの伝送効率の改善には共振器(コイルと電極板で構成)のQ値向上が必要となるが、共振用コイルに銅のコイルを用いた共振器のQ値の向上には限界がある。

これに対し、我々はMHz帯の周波数においても低損失となる高周波用超伝導線材を開発し、これを用いたコイルのQ値が銅コイルの約20倍と非常に高い値になることを明らかにした[1]。そこで、開発した線材を使用してERC-WPT用の高Q値超伝導共振器を開発し、これをERC-WPTに用いて伝送効率を改善することで伝送距離の向上を目指す。本研究はERC-WPTに超伝導線材を用いた最初の研究である。

### 2. ERC-WPT用高Q値超伝導共振器の設計

3次元電磁界シミュレータ(CST STUDIO)を用いて共振器を設計した。図1に共振器の形状を示す。コイルの開放端に電極板を接続し、コイルのインダクタンスと全体の寄生容量のLC共振により共振器を形成している。

まず、共振器のQ値に影響する部分として、共振用コイル、コイルと電極板を接続するリード線、電極板の3部分に注目した。各部分の材料をそれぞれ超伝導から銅に変化させた際のQ値をシミュレーションすることで各部分がQ値に与える影響を評価したところ、最も影響するのはコイル部分で、次にリード線部分であり、電極板部分の導電率は共振器のQ値にほぼ影響しないことが判明した。そのため、共振用コイルとリード線に超伝導線材を用いて、電極板部分には銅を用いて共振器を作製することとした。

### 3. 高Q値超伝導共振器のQ値とERC-WPTの伝送効率の測定結果

設計をもとに作製した超伝導共振器のQ値と、これを送受電に用いたERC-WPTの伝送効率を測定し、銅の共振器の測定Q値と比較した。

超伝導共振器のQ値の測定値は送電側、受電側それぞれ $Q_1=9253$ ,  $Q_2=11051$ (共振周波数約7.2MHz)となり、送受電共振器のQ値の相乗平均値は全て銅を用いて作製した共振器のQ値の約13倍まで改善した。

また、図2に送受電の両方に銅共振器と超伝導共振器をそれぞれ用いた際のERC-WPTの伝送距離に対する伝送効率の測定結果を比較して示す。同時に図2に送受電共振器のQ値 $Q_1$ ,  $Q_2$ と結合係数kの測定値から計算した伝送効率 $\eta$ の計算値を示す。計算値は以下の式(1)を用いて算出した[2]。

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}} \quad (1)$$

伝送効率の測定結果は、送受電に銅共振器を用いた際の伝送効率が伝送距離100cmで35%であるのに対して、超伝導共振器では同距離における伝送効率が82%と高効率となった。したがって、高Q値共振器をもちいることで伝送効率を

大幅に改善でき、それによって伝送距離を大幅に向上できることを実証した。しかしながら、送受電に超伝導共振器を用いた際の伝送効率の測定値と計算値を比較すると、測定値が計算値よりも低い値を示している。これは伝送効率測定の際に共振器のQ値が事前に測定していたQ値より低下していたためと考えられ、測定方法の改善によってさらに計算値程度まで伝送効率を改善できる可能性がある。

### 4. まとめ

ERC-WPT用の高Q値超伝導共振器を開発した。共振器のQ値に影響する共振用コイルとリード線部分に超伝導線材を用いて作製した超伝導共振器のQ値は銅共振器の約13倍となり、大幅なQ値の改善を達成した。また、送受電に超伝導共振器を用いたERC-WPTの伝送効率は送受電に銅共振器を用いた際と比較して大幅な高効率化を実現し、それに伴い伝送距離を改善した。

### 参考文献

- [1] N. Sekiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no. 3(2023), Art. No. 6601206.
- [2] T. Komaru et al., "Positional characteristics of capacitive power transfer as a resonance coupling system", Proc. IEEE Wireless Power Transf. (WPT), (2013) pp. 218-221.

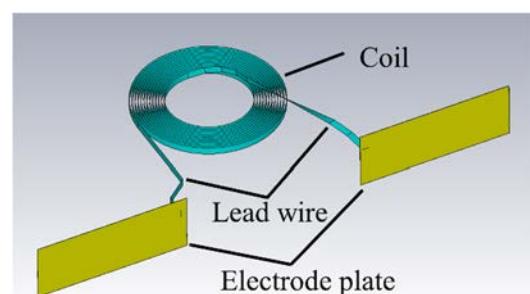


Fig.1 Resonator form

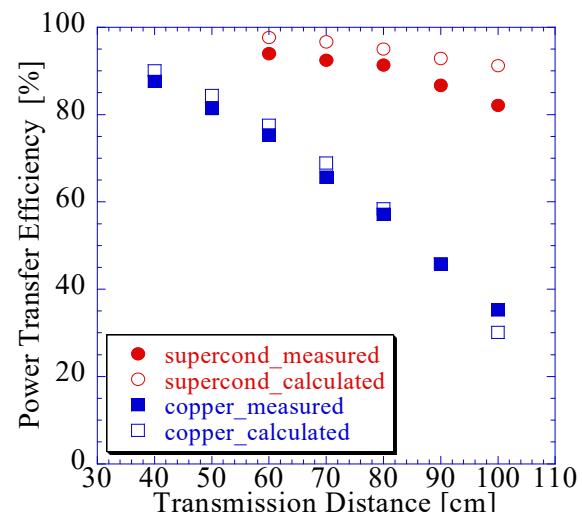


Fig.2 Measured and calculated power transmission efficiency versus transmission distance

# バルク超電導の研究開発について —鉄道総研における研究開発の近況—

## Research and development of bulk superconductivity —Recent research and development at RTRI—

富田 優 (鉄道総研)  
TOMITA Masaru (RTRI)  
E-mail: tomita.masaru.19@rtri.or.jp

### 1. はじめに

バルク超電導体は、それ自身が超電導の結晶であるため、コンパクトで非常に強い磁場を捕捉できる特徴がある。特に高温超電導材料においては、液体窒素を冷媒とした場合でも高い電流密度を有するため、各種機器への応用が期待できる。

鉄道総研では、機器応用に向けた超電導材料の開発に取り組んでおり、バルク超電導体の製造技術、評価、分析についての研究を進めてきた。本発表では、鉄道総研における研究開発の近況として、物性、材料工学、応用の各分野における研究開発の取り組みについて紹介する。

### 2. 物性に関する研究

超電導特性の向上を目的とし、化学組成の制御手法などの研究開発に取り組んでいる。近年では、大型化に向けた核生成のメカニズムを解明すべく、余分な核生成を抑制したRE系バルク超電導体の疑似単結晶化指針などを得ている。

### 3. 材料工学に関する研究

バルク超電導体は、高い捕捉磁場値を有するが、それに伴い超電導材料が受ける電磁力も増大するため、材料強度の負担が大きくなる。高い磁場領域においては、僅かな磁束の揺らぎによる電磁力にも材料強度が耐えられず破壊に至る場合がある。その対策として、バルク超電導体の樹脂含浸による材料内部クラック進行の防止や、金属含浸による材料内部の伝熱性向上を施し、これまで29 Kにおいて17.24 Tの高い捕捉磁場値を実現している[1]。これらの材料工学的な有用な手法において、最近の研究としては、放熱特性向上を目的とし、バルク超電導体に溶融合金を吹き付け、被膜を形成する研究に取り組んでいる。

### 4. 応用に向けた研究

バルク超電導体を用いた可搬式の小型超電導マグネットの開発において、バルク超電導体を外径80 mm、内径50 mmのリング形状に加工し樹脂含浸により補強した。これまで、それを積層させることで小型超電導マグネットを構成し、液体窒素浸漬冷却下において性能を評価し、サンプル空間において2.59 Tの磁場発生を確認している[2]。また、アンジュレータ応



Fig.1 Research and development of bulk superconductivity in RTRI

用に向け、MgB<sub>2</sub>バルク超電導体の発生磁場の均一化に向けた研究も実施している。その他、水素社会を見据えたバルク超電導体の液体水素冷却の実験や、磁場と磁気冷凍技術を組み合わせた磁気遮蔽方式磁気冷凍システムの検討も行っている。

今後も、基礎から応用に向けた一貫した研究開発に取り組み、バルク超電導体の応用機器の実現を目指す。

### 参考文献

1. M. Tomita, M. Murakami : Nature, Vol.421, 517-520, 2003.
2. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.217

## 造粒粉末を用いて作製したAg-GdBCOバルクの捕捉磁場特性

### Trapped field properties of an Ag-GdBCO bulk prepared using granulated powder

箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)  
 HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)  
 E-mail: s3123003@iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は以前、放電プラズマ焼結 (SPS) 法で作製した高密度前駆体を用いて、空孔の少ないGdBCOバルク（直径約20 mm、厚さ約10 mm）が得られることを報告した[1]。しかし、直径60 mmを超える前駆体を作製するには、大型のSPS装置が必要となり、コストが高騰する。一方、微粉末は高密度前駆体の作製に有効であることはよく知られているが、粉末のプレス成型時に圧粉欠陥が頻発するという別の欠点もある[2]。そこで本研究では、アクリルバインダーを用いてAg-GdBCO粉末を造粒し、Ag-GdBCOバルクを作製することを目的とした。

#### 2. 実験方法

前駆体粉末GdBCO（組成Gd123:Gd211=3:1（モル比））は固相反応法により合成した（900°C 12h × 3回）。その後、100wt% GdBCO+0.5wt% CeO<sub>2</sub>+1.0wt% BaO<sub>2</sub>+10wt% Ag<sub>2</sub>Oとなるよう秤量した後、ステンレスをボールミルメディアとして用いてボールミル粉碎・混合を行った[3]。ボールミル時の粉末流動性向上のためにステアリン酸、プレス成型時の圧粉欠陥抑制のためにアクリルバインダー（共栄社化、オリックス KC-1700P）を添加し、ボールミル後に造粒を行った。脱脂条件確立のため、ステアリン酸・バインダーに対して熱分析TG-DTAを行った。

Ag-GdBCOバルクは上記造粒粉末をプレス成型した圧粉体を用いて大気中でTSMG法により作製し、得られたバルクは350°C-150 hの酸素富化処理を行った。

作製した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、 $J_c$ は拡張型ビーンモデルを用いて算出した。

#### 3. 結果と考察

Fig.1に造粒有/無Ag-GdBCO粉末を用いた圧粉体の外観を示す。造粒を行っていない粉末を用いた圧粉体側面には圧粉欠陥が観測された。ボールミル後の粒径は1 μm以下であったことから、圧粉欠陥の要因は金型内部の残留空気の圧縮、圧力伝達の低下による密度むらなどによるものと考えられる。一方、造粒を行った場合、粒径は数10～数100 μmと大きくなつたため、圧粉欠陥は発生しなかつた。

次に、得られた圧粉体を500°Cまでゆっくり加熱し脱脂を行ったところ、脱脂中に圧粉体の破損（脱脂割れ）が確認された。一般的に脱脂割れは脱脂時に発生するガス圧によるものであるため、各添加物の熱分析を行った。Fig.2に潤滑剤ステアリン酸、アクリルバインダー、Ag<sub>2</sub>Oの熱分析結果を示す。アクリルバインダーの反応は熱分解であり、250°C付近から開始し、350°Cで分解が終了した。ステアリン酸は約60°C付近で融解した後、200～300°Cにおいて燃焼反応を示した。Ag<sub>2</sub>Oは130°C～380°Cで2Ag<sub>2</sub>O→4Ag+O<sub>2</sub>の熱分解が発生することが知られている。以上の反応からステアリン酸の燃焼反応がAg<sub>2</sub>Oの熱分解で発生した酸素により促進された可能性があり、圧粉体内部で熱暴走が発生し、発生した大量のガスで脱脂割れが発生したと考えられる。そこで事前にAg<sub>2</sub>Oを分解させてから造粒・脱脂を行ったところ、脱脂割れは発生しなかつた。そのためAg-GdBCO粉末の造粒・脱脂においては、脱脂割

れ抑制のためAg<sub>2</sub>Oを分解させてAgにしておくことが重要である。

講演では得られたAg-GdBCOバルクの捕捉磁場特性と併せて報告する。

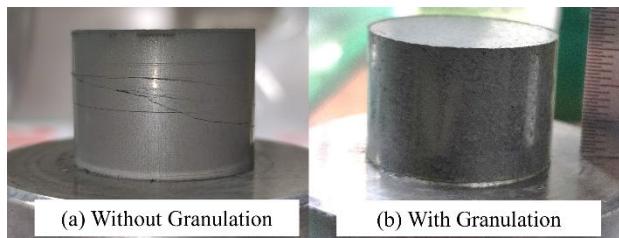


Fig.1 Appearance of green compact when using Ag-GdBCO powder with/without granulation.

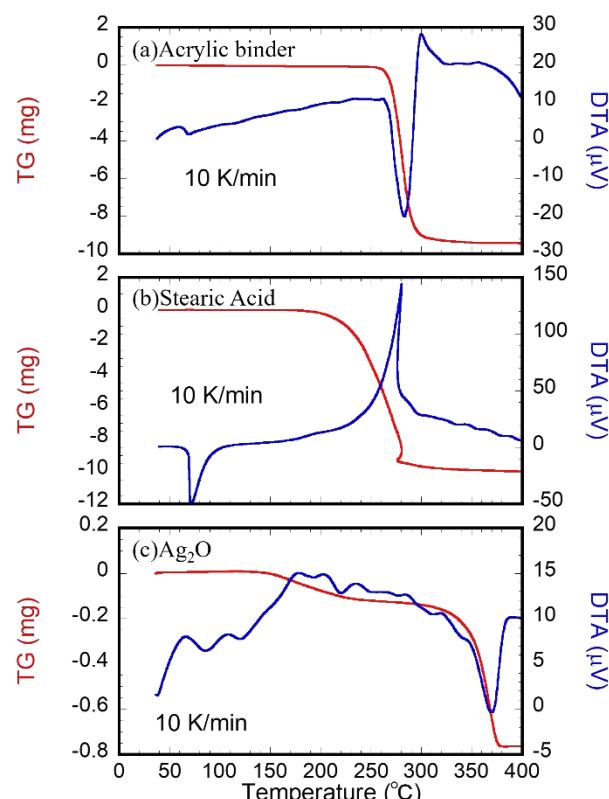


Fig.2 TG-DTA curves of (a)Acrylic binder KC-1700P, (b)Stearic Acid, and (c)Ag<sub>2</sub>O.

#### 参考文献

1. H. Hakoishi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33** (2023) 6800405
2. S. Nariki *et al.*, Physica C **463-465** (2007) 308
3. H. Hakoishi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34** (2024) 6800804

# 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  
prepared 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

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO, RE: 希土類元素) は液体窒素温度 77 K を超える高い  $J_c$  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、強力超伝導磁石として、モーターや車上 NMR などへの応用が期待されている[1]。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、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粒間  $J_c$  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[4]。これまで我々は 2 枚の種基板を用いたバイクリスタル SMDG 法 YBCO 溶融凝固バルクにおいて、Fig. 1 に示すように、ミスフィット角の増大に伴い粒間  $J_c$  が指指数的に低下することを報告してきた。この粒界部における  $J_c$  の低下は銀の偏析とミスフィット角の両者に起因する可能性があったため、今回は銀の偏析による影響を除くことで溶融凝固バルクにおける本質的にミスフィット角が超伝導特性におよぼす影響の解明を試みた。

## 2.実験方法

$Y_2O_3, BaCO_3, CuO$  を出発原料とし、Y123:Y211 が 7 対 3 のモル比となるように混合、焼成した粉末に、Y211 析出物の微細化のために  $CeO_2$  を 0.5wt% 添加した。この前駆体粉末を 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 に示すように任意のミスフィット角  $\theta$  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でポストアニールを行い、最後に  $O_2$  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を行った後、磁場中冷却法により着磁し、液体窒素浸漬下においてバルク表面の捕捉磁場分布を調べた。

## 3.結果と考察

Fig. 3 に 0.8–14.2° のミスフィット角を有する銀無添加バイクリスタル YBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場分布を示す。ミスフィット角が 7.3° 以下ではシングルピークの捕捉磁場分布を示したが、9.4° 以上では粒界部で二つに分離し、粒界部での電流密度の低下が示された。このことから銀無添加の場合では 77 K、低磁場下におけるミスフィット許容角は最大~8° 程度であり、複数枚の種基板を用いた大型バルクの作製に向けては、隣接する種基板間のミスフィット角がこの条件を満たすことが必須であると結論できる。講演ではこれらバルクのミスフィット界面の微細組織等についても報告する予定である。

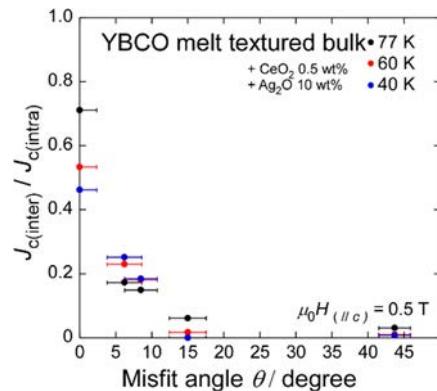


Fig. 1. Relationship between in-plane misfit angle  $\theta$  and  $J_{c,\text{inter}}/J_{c,\text{intra}}$  for SDMG-YBCO bulks prepared on two seed plates.

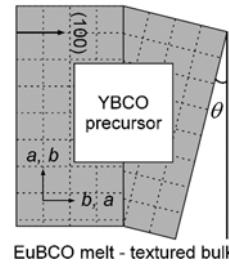


Fig. 2. Schematic illustration of the SDMG-processed rectangular YBCO bulk grown on two EuBCO seed plates with an in-plane misfit angle of  $\theta$ .

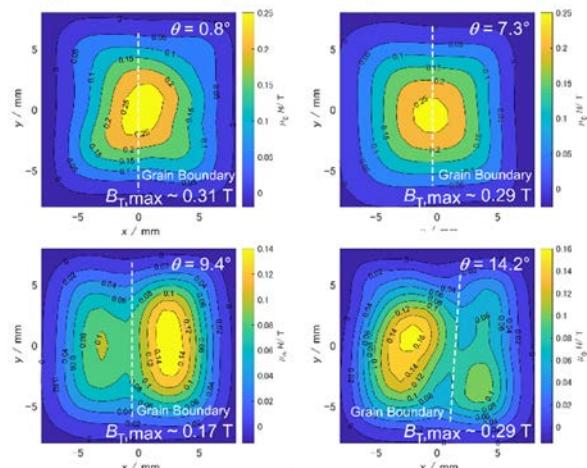


Fig. 3. Trapped field distributions at 77 K of YBCO melt-textured bulk prepared on two seed plates with various misfit angles  $\theta$ .

## 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.

## 軟磁性材料を用いたバルク超伝導体アンジュレータの磁場増強

### Field enhancement using soft magnetic material for bulk HTS undulator

紀井 俊輝(理化学研究所)

Kii Toshiteru (RIKEN)

E-mail: t.kii@spring8.or.jp

#### 1. はじめに

理化学研究所では、バルク超伝導体を用いたアンジュレータの実用化に向けた研究開発を推進しており、周期 10 mm, 磁極間隔 4 mm で 2.22 T の短周期高強度交替磁場の生成を実証している。さらなる強磁場短周期化を目指し高磁束密度軟磁性材料を用い周期 7 mm および 12 mm の条件で磁場生成試験を行った。軟磁性材料の飽和磁束レベルを超えた領域においても最大で 15% 程度の増強効果が得られた。

#### 2. バルク超伝導体アンジュレータ

放射光施設では、相対論的速度の高輝度電子ビームを周期磁場中で蛇行させることで様々な特徴を持った放射光を生成し多くの利用者に提供している。現在主力の周期磁場生成装置(アンジュレータ)はネオジム系永久磁石で構成されているが、より低いビームエネルギーで短い波長の光を生成できるようになれば、放射光施設の“グリーン化”; 施設の小型化による低コスト化・省エネ化に大きく貢献することが期待できる。ネオジム系磁石の性能限界を超えた強磁場特性を達成するために、超伝導巻線型、冷却永久磁石型などの開発が進んでいるが、我々はバルク超伝導体に着目し新方式のアンジュレータを提案し開発を続けてきた[1,2,3]。特に、希土類銅酸化物バルク超伝導体の臨界電流密度は 10 K で 10 kA/mm<sup>2</sup> に達し、実用超伝導線材のそれに比べて 10 倍程度高く、より単純な冷却機構で大電流をハンドリングできる点で非常に魅力的である。これまでに、バルク超伝導体型で得られた磁場性能は周期 10 mm、磁極間隔 4 mm において 2.22 T で、永久磁石を冷却しさらに軟磁性材料と組み合わせた冷却ハイブリッド永久磁石型で到達可能なレベルのおよそ 3 倍の磁場強度となっている。

#### 3. 軟磁性材料を用いたハイブリッド化

永久磁石型や超伝導線材型の従来型アンジュレータでは、飽和磁束密度の高い軟磁性材料を用いるハイブリッド構造を導入することで特に磁極間隔を狭くした条件で磁束集中による効果的な磁場増強が報告されている。バルク超伝導体型アンジュレータにおいてもハイブリッド化の効果は期待できるが、周期磁場強度が軟磁性材料の飽和磁束レベルとほぼ同等で、磁場生成の過程で飽和レベルの数倍の磁場を印加することから、ある程度の増強は期待できるものの、その特性の予測は難しい。そこで、本研究では実際に軟磁性材料を用いたハイブリッド型超伝導アレイを構築し、磁場生成試験を行うことで磁場増強効果を実験的に評価した。

Fig. 1 に構築したアレイの写真を示す。アレイの外径は 25 mm、全長はおよそ 80 mm で、準半円系のバルク超伝導体には厚さ 2.5 mm または 5.0 mm の日本製鉄製 QMG®GdBaCuO、QMG®DyBaCuO、サポート部材として無酸素銅加工品、ハイブリッド試験片として日立金属パーメンダ YEP-2V®、および対照実験のための非磁性試験片として真鍮加工品を用いた。アレイを構成するバルク超伝導体および軟磁性材料の断面はいずれも同じ準半円状とし、磁場中冷却過程の磁場掃引開始前に外部ソレノイドにより与える軸方向磁場を軟磁性材料での磁束集中により乱さないように追加する軟磁性材料はすべて対向配置とした。

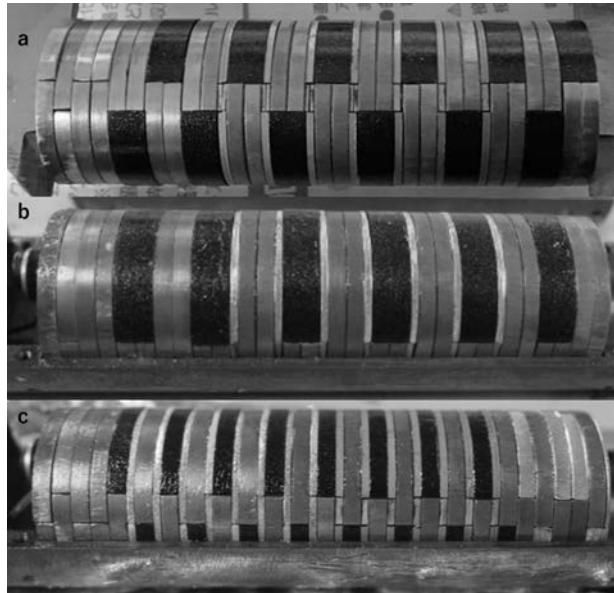


Fig. 1 Photograph of bulk HTS array a: hybrid b: brass  
c-left: brass c-right: hybrid

#### 4. 磁場増強効果

Fig. 1 (a)(b) の周期 12 mm のアレイでの周期磁場強度および(c)の周期 7 mm のアレイの真鍮部と軟磁性体部のピーク磁場強度の比を Fig. 2 に示す。

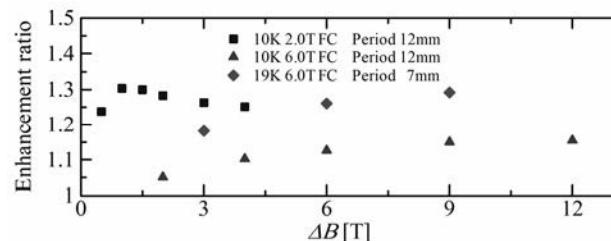


Fig. 2 Field enhancement by soft magnetic material

2.0 T の磁場中冷却では最大 30% の磁場増強が、6.0 T の磁場中冷却においても 15% 程度の磁場増強が確認でき、バルク超伝導体型アンジュレータにおいても軟磁性材料を用いたハイブリッド構造が効果的であることが判明した。今後は、ヒステリシス特性の調査や数値計算との比較を予定している。

#### 謝辞

本研究はJSPS科研費、JP22H03870 (23K25124) の助成を受け行われた。また、京都大学環境安全保健機構低温物質管理部門による液体ヘリウムの供給が不可欠でした。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

1. T. Kii, et al.: Proc. FEL2006 (2006) p. 653
2. 紀井 俊輝: 加速器 Vol.20 (2023) p. 10
3. T. Kii: Proc. FLS2023 (2023) p. 224

# REBCO バルク磁石のパルス着磁における印加磁場分布が 捕捉磁場特性に与える影響

## Influence of Applied Field Distribution on Trapped Field Characteristics in Pulsed-field Magnetization of REBCO Bulk Magnets

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 バルク磁石の着磁方法のうちパルス磁化法 (PFM) は、オンラインにおいて短時間で着磁できることから、産業応用において実用的な手法である。これまでの研究において、着磁過程において特性の低い部分から磁束が侵入し、特性の高い部分に捕捉されることがわかっている。しかし、近年の試料作製手法の向上により、試料の均一性が向上しており、磁束が捕捉されれば強力な磁石となりえるが、PFM では強い磁気シールドにより磁束を試料に侵入させることが難しくなっている。著者らは、PFM の際に用いる軟鉄ヨークに注目し、その形状を変更することで着磁効率を向上させることを検討している。本文は軟鉄ヨークの形状変更により、印加磁場がどのように変化するか、更にその印加磁場分布が捕捉磁場特性にどのように影響するかについて数値解析により検討する。

### 2. 実験方法

Fig. 1 にクロス型、八足型、Y 字型ヨークとバルク体の結晶成長境界 (GSB) 及び結晶成長領域 (GSR) との配置の関係を示す。実験は  $\phi 60 \times 20$  mm の GdBCO バルク体 (日本製鉄製) を用い、30 及び 50 K において 3.6~5.8 T のパルス磁場 (立上時間: 10 ms, パルス幅: 100 ms) を印加した。着磁中の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とともに、着磁後、磁極表面の磁束密度分布を測定した。さらに、その実測データから総磁束量を算出した。また、実験と同じ条件で数値解析を行った。

### 3. 結果及び考察

Fig. 2 に 30 K における総磁束量、及びヨークの単位重さ当たりの総磁束量の印加磁場依存性を示す。総磁束量の比較では Y 字型ヨークの場合で円柱型ヨークに比べて約 12% 大きな値となっており、また単位重さ当たりの比較では最大 68% 大きな値となった。

Fig. 3 に各ヨークを用いた時の一次元磁束密度分布の時間変化を示す。磁場印加後 50 ms において軟鉄のある部分とない部分で磁束密度の大きさを比較すると、クロス型ヨークで 24.4%、八足型で 15.8%、Y 字型で 30.6% の差となった。

### 4. まとめ

本文はクロス型、八足型、Y 字型ヨークを用いて GdBCO バルク体をパルス着磁した時の総磁束量を比較し、Y 字型ヨークで着磁効率が高くなることを確認した。また、数値解析により各ヨークを用いた時の印加時磁場分布を可視化した。軟鉄のある部分とない部分で印加磁場の大きさが異なっており、それが捕捉磁場特性に影響を与えている可能性を示した。

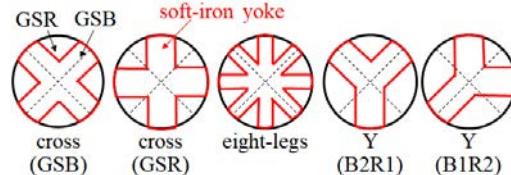


Fig. 1. Arrangements of soft-iron yokes with different geometries

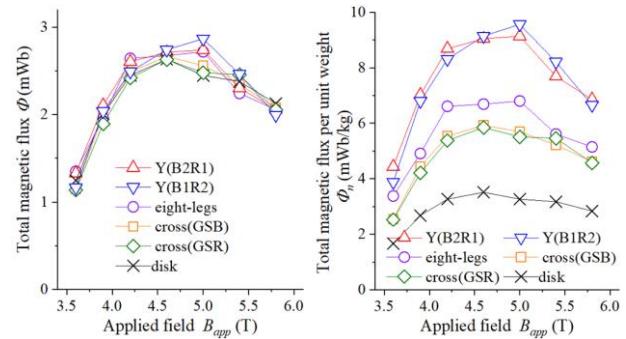


Fig. 2. Comparison of total magnetic flux and total magnetic flux per unit weight between yokes with different geometries

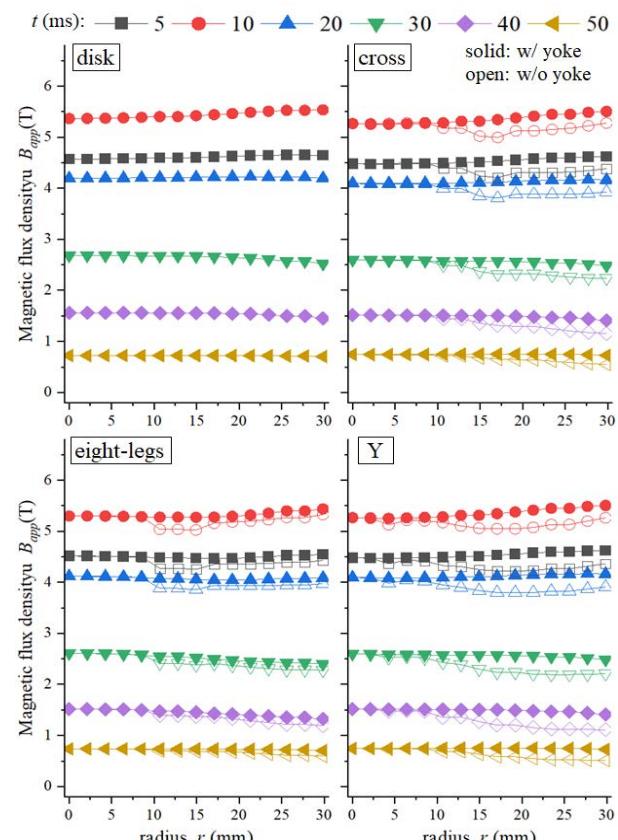


Fig. 3. Time changes of one-dimensional applied field distributions ( $B_{app} = 5.4$  T)

# 様々な RE 元素を用いた IBAD 基体上 FF-MOD 法 RE123 薄膜の作製

## Preparation of RE123 thin films with various rare earth elements on IBAD substrates by FF-MOD method

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, Motoiki Takanori, Shimoymaya 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て強磁場発生コイル等への応用が進められているが、高コストであることが普及を制限している。RE123 薄膜線材の製造方法の一つに常圧プロセスで金属組成比制御が容易な有機金属塗布熱分解(MOD)法が挙げられ、なかでも結晶成長が速やかで複数回焼成により厚膜化が可能なフッ素フリーMOD(FF-MOD)法は最も低コストで量産化に適している[1]。さらに原料溶液中に微量の Cl<sup>-</sup>を添加することで 2 軸配向した Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>(Ba2342)微結晶が RE123 より先に成長するため、RE123 の 2 軸配向薄膜生成条件が拡大するとともに、T<sub>c</sub>が低下することなく J<sub>c</sub>が向上することを見出している[2]。さらに、実用レベルの臨界電流特性を有する FF-MOD 法長尺線材開発が急速に進展している[3]。本研究では、酸化物原料から調製した原料溶液を用い、FF-MOD 法による様々な希土類を用いた RE123 薄膜の臨界電流特性の向上を試みた。

### 2. 実験方法

仕込組成比 RE : Ba : Cu : Cl = 1 : 2 : 3 : 0.1 (RE = Y, Gd, Ho, Er)の原料溶液を用いて、2 軸配向 CeO<sub>2</sub>層を表面に有する IBAD 基板上に、スピンドルコート法により溶液を塗布し、乾燥後に仮焼した。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を行い、最後に酸素アニールにより酸素量を制御した。さらに、これらの工程を繰り返し行う複数回焼成法により厚膜化を試みた。RE123 薄膜の最終膜厚は塗布を 3 回行った 3 層膜で約 0.45 μm である。得られた試料に対して XRD による構成相と結晶性の評価、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<sub>c</sub>を調べた。

### 3. 結果と考察

様々な焼成条件で作製した 3 層の Ho123 薄膜の表面 XRD パターンを Fig. 1 に示す。いずれの焼成条件においても鋭い 001 ピークが見られ、c 軸配向した Ho123 薄膜が生成することを確認した。Fig. 2 に P<sub>O2</sub> = 10 Pa, 740°C, 1 h の焼成条件で作製した Ho123 薄膜の表面二次電子像を示す。わずかに表面に不純物が存在するものの比較的平坦な表面を有する薄膜が得られた。

Fig. 3 に IBAD 基板上に 3 層の Y123 薄膜を作製し、その上に Gd123 薄膜を成長させ、複数回焼成により厚膜化を進めた過程での XRD パターンを示す。各膜厚における焼成条件を制御することで高い結晶性を維持しながら膜厚の増加に成功し、~0.9 μm 厚の Gd123/Y123 薄膜は誘導法評価装置の限界に近い 180 A cm<sup>-1</sup> (77 K, ~0 T) の J<sub>c</sub>を記録した。

講演では Cl 添加 Ho123 薄膜、Er123 薄膜の本焼成条件最適化、厚膜化した Gd123 薄膜の詳しい物性について報告する。

### 参考文献

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

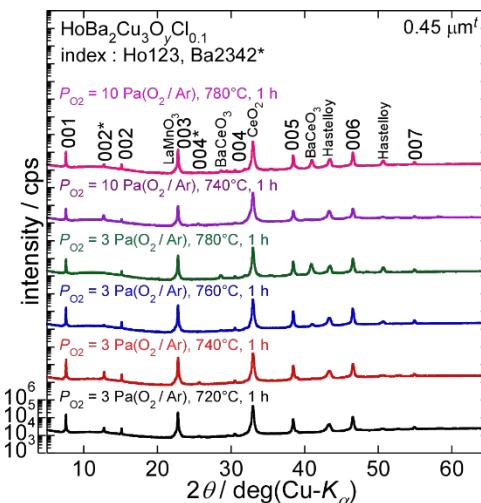


Fig. 1. XRD patterns of FF-MOD processed Ho123 thin films prepared under various sintering conditions.

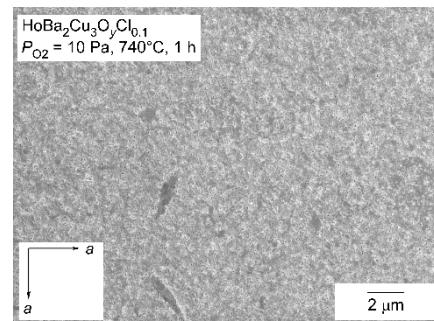


Fig. 2. Secondary electron image of the surface of Ho123 thin film.

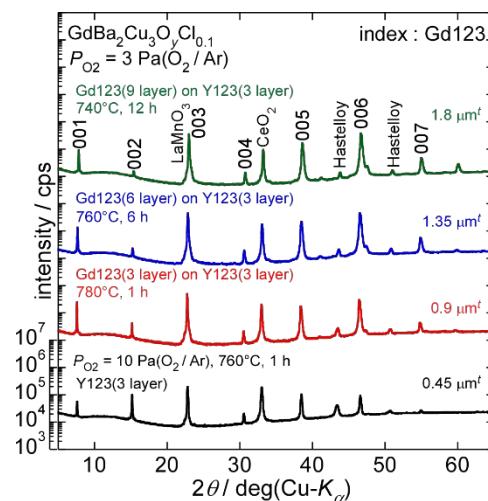


Fig. 3. XRD patterns of FF-MOD processed Gd123/Y123 thin films with increased thicknesses.

## Premix-浸透法で作製した $MgB_2$ リングバルクによる磁場の捕捉および集束特性

### Trapped and focused magnetic field properties of $MgB_2$ ring bulks fabricated by premix-infiltration method

阿部 健汰, 内藤 智之(岩手大)  
 ABE Shuta, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)  
 E-mail: g0323006@iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

軽量かつレアアースフリーな材料である  $MgB_2$  超伝導体には弱結合の問題がなく、多結晶体で実用可能な臨界電流密度  $J_c$  が流れる。そのため、比較的作製が容易な多結晶バルク体にテスラ級磁場を捕捉させることができる。これに加えて、臨界温度  $T_c$  が 39 K と比較的高いことから、 $MgB_2$  は液体水素温度(20 K)付近において、磁気共鳴画像(MRI)や、核磁気共鳴(NMR)装置などへの応用が検討されている。 $MgB_2$  バルクの作製法の一つである浸透法は、高いコストのかかる高圧装置を必要とせず、高充填率の  $MgB_2$  バルクを作製することができるという利点がある。一方で、 $MgB_2$  バルク体表面に欠陥が生じてしまう問題があるが、B 粉末に  $MgB_2$  粉末を仕込む premix 法[1]を用いることで欠陥を低減することができる。そこで、本研究では、premix-浸透法で大型のリングバルクを作製し、その捕捉磁場および磁場シールド特性を調べた。それに加えて、スリット加工による磁場集束特性も併せて報告する。

#### 2. 実験方法

原料粉末にはアモルファス B 粉末(純度 99%、粒径 46  $\mu$ m 以下)、Mg 粉末(純度 99.5%、粒径 180  $\mu$ m)および、in-situ 法により 700°C-6 h の熱処理条件で作製した  $MgB_2$  粉末を用いた。まず、Mg, B,  $MgB_2$  を 0.77:1.4:0.3 のモル比で秤量し、B と  $MgB_2$  を自動乳鉢で 30 分混合した。混合粉は、内径 40 mm、外径 60 mm の SUS 製カプセルに封入後、一軸プレスによって圧粉し、その上に Mg 粉末を配置した。その後、Mg の酸化を防ぐために Ar 雰囲気のグローブボックス内で密閉し、卓上型ボックス炉にて 800°C-12 h の条件で熱処理を行った。熱処理後、旋盤加工により外径 60 mm、内径 40 mm、高さ 10 mm に成形した。

作製したバルク体は X 線回折測定(XRD)によって結晶相を同定した。捕捉磁場は 20 K、印可磁場 3 T のもとで磁場中冷却着磁(FCM)を行い、バルクの表面中心およびボア中心にホールセンサを配置して測定を行った。磁場シールドおよび磁場集束特性はゼロ磁場で動作温度まで冷やし、円筒の中心軸に対して平行に磁場を加え、ボア中心での局所磁場を測定した。

#### 3. 実験結果

Fig. 1 に作製した  $MgB_2$  リングバルクの XRD パターンを示す。主相は  $MgB_2$  であり、不純物は Mg,  $MgO$  のみであった。このことから、800°C-12 h の熱処理において、あらかじめ仕込んだ  $MgB_2$  の分解は起きていないと言える。

Fig.2 にリングバルクの表面中心およびボア中心での捕捉磁場の温度依存性を示す。20 K における捕捉磁場値は表面中心で 1.23 T、ボア中心で 1.32 T であった。この値は、premix で作製した  $MgB_2$  リングバルク(高さ 15 mm)[2]より 0.3 T 高い値であった。

Fig.3 に 20, 25, 30 K でのボア中心における Shielding Factor(SFs)の外部磁場依存性を示す。T = 20 K では、 $\mu_0 H_{\text{appl}}$  = 0.1 T において SFs = 6.5 を示した。アスペクト比 0.33 のバルクでの磁場の遮蔽効果を確認できたが、低磁場においても SFs が小さいという結果になった。

講演では、積層バルクにおける SFs の評価や、磁場集束特性についても報告する予定である。

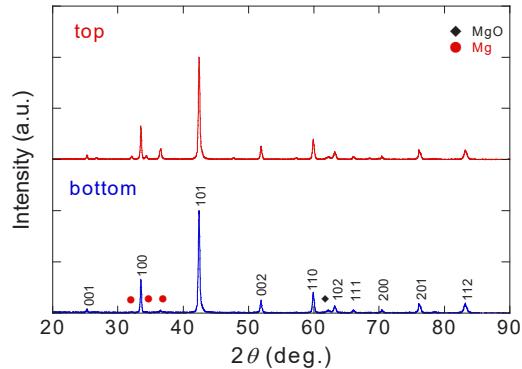


Fig.1 XRD patterns of  $MgB_2$  ring bulk.

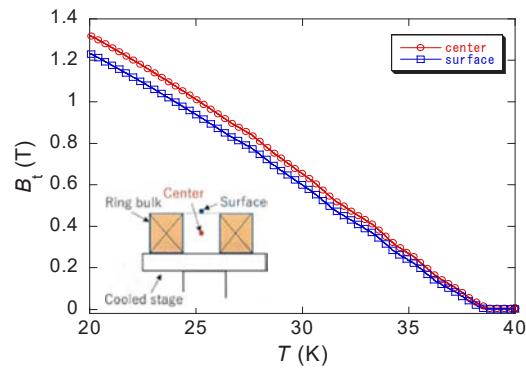


Fig.2 Temperature dependence of trapped magnetic field at center and surface positions in the bore of  $MgB_2$  ring bulk.

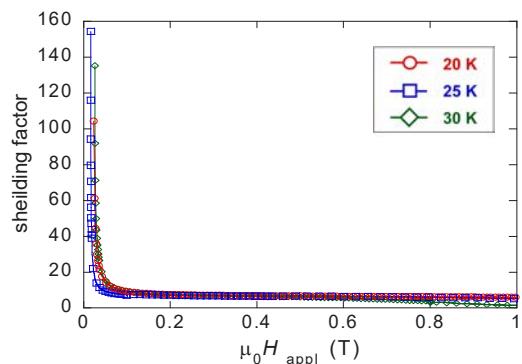


Fig.3 Magnetic field dependence of shielding factors at 20, 25, 30 K.

#### 参考文献

1. Y. Shimada, et al. TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 44 No.12 (2009) 613-620
2. Y. Takahashi et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.98 (2019) p.33

## MgB<sub>2</sub> バルク作製における酸を用いた不純物低減効果

### Effects of impurity reduction using acid in the synthesis of MgB<sub>2</sub> bulks

岩崎 韶, 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

MgB<sub>2</sub> は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度  $T_c \sim 39$  K を有し、化学的に安定で合成が容易、かつ原料が比較的安価であることから、液体ヘリウムフリーの冷凍機冷却による 10-20 K 付近での応用が期待されている。しかし、MgB<sub>2</sub> は磁場の増大とともに臨界電流密度  $J_c$  が急激に低下する問題があり、これが改善できれば医療用高分解能 MRI など広範な応用が可能になる。MgB<sub>2</sub> 材料の磁場中  $J_c$  の改善には MgB<sub>2</sub> の主なピンニングセンターである粒界密度の高密度化が有効な指針の一つである。MgB<sub>2</sub> は B の粒子内に Mg が拡散することによって生成することから、原料となる B 粉末が高純度かつ粒径の小さいものであるほど微細な MgB<sub>2</sub> 結晶が生成しやすく、粒界密度が向上することが知られている。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 MgB<sub>2</sub> バルクの作製を目指している。これまでには新たに試作した開発中の B 粉末を用いた MgB<sub>2</sub> 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結果を報告した<sup>[1,2]</sup>。今回は MgB<sub>2</sub> バルクに含まれる不純物 MgO, Mg の酸を用いた除去による臨界電流特性向上を図った結果を報告する。

#### 2. 実験方法

MgB<sub>2</sub> 多結晶バルクの作製には MgB<sub>2</sub> 粉末と B 粉末(フルウチ化学社製、粒径~48  $\mu\text{m}$  もしくは開発中の粒径~100 nm)の混合粉末に Mg 粉末(100#)からの気相または液相の Mg 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く比表面積が大きいことから酸素含有量比較的多く、さらに Al, Mn など微量の金属不純物を含んでいる。試料作製の際には Mg : B : MgB<sub>2</sub> = 1.2 : 2 : 1 のモル比となるようそれぞれの原料粉末を秤量し、SUS316 管に封入、~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 MgB<sub>2</sub> 粉末は原料に開発中 B(new B)を用い *in-situ* 法で作製した。この前駆体粉末に、酸を加えて加熱することで不純物の除去を試みた。構成相の同定は XRD、微細組織は SEM 観察、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価し、 $J_c$  は磁化ビス テリシス幅から拡張 Bean モデルを用いて算出した。

#### 3. 結果と考察

Fig. 1 に *in-situ* 法で作製した MgB<sub>2</sub> 前駆体粉末について酸処理前後の XRD パターンの変化を示す。酸処理前の前駆体には MgO と Mg のピークが認められたが、酸処理後にはこれらのピークが消失した。Fig. 2 に酸処理前及び酸処理後の前駆体粉末を用いて同じ条件で作製した Premix 拡散法 MgB<sub>2</sub> バルクの 15 K における  $J_c$  の磁場依存性を示す。酸処理した前駆体を用いること  $J_c$  が向上する傾向にあり、高磁場中での  $J_c$  の改善は残留炭素の影響による可能性があるが、 $T_c$  の低下が小さかったことから別の要因によるものと考えられる。発表では、粒径や不純物量の異なる B 粉末から作製した MgB<sub>2</sub> 前駆体における酸を用いた不純物除去の効果や、それらの前駆体から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。

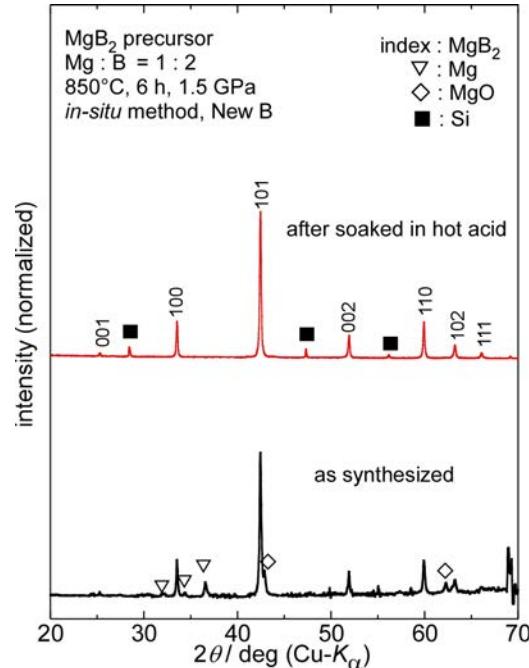


Fig. 1 Powder XRD patterns of MgB<sub>2</sub> precursors synthesized by *in-situ* method using new B powder, as-synthesized and after soaked in hot acid.

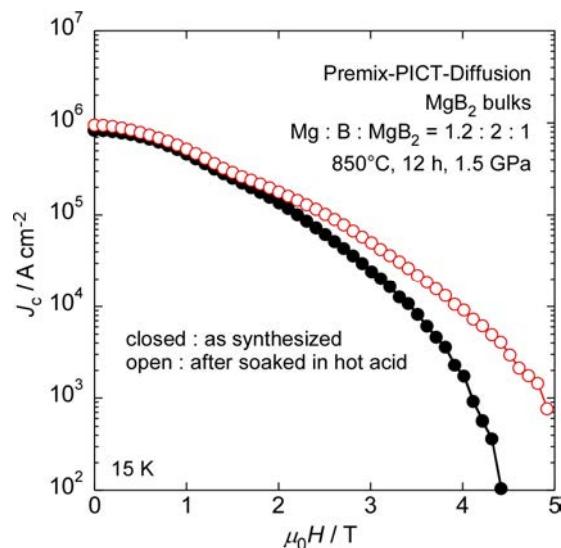


Fig. 2  $J_c$  -  $H$  curves at 15 K of MgB<sub>2</sub> bulks synthesized by Premix-PICT-Diffusion method using MgB<sub>2</sub> precursors, as-synthesized and soaked in hot acid.

#### 参考文献

- [1] H. Iwasaki *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol.106 (2023) p.86.
- [2] H. Iwasaki *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol.107 (2024) p.88.

## 2段階放電プラズマ焼結によるKドープBa122バルクの作製

### Fabrication of K-doped Ba122 bulks by two-step spark plasma sintering

石渡 翔大, 清水 和花, 水登 伊知郎, NUR RAHMAWATI Ayukaryana(東京農工大);  
嶋田 雄介(九大); 山本 明保(東京農工大)

ISHIWATA Shota, SHIMIZU Nodoka, MIZUTO Ichiro, NUR RAHMAWATI Ayukaryana(TUAT);  
SHIMADA Yusuke(Kyushu Univ.); YAMAMOTO Akiyasu(TUAT)

E-mail: s230587z@st.go.tuat.ac.jp

#### 1. はじめに

鉄系高温超伝導体[1]の1種であるBaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>(Ba122)は元素置換により超伝導が発現する。Baサイトの一部をKで置換したKドープBa122は高い臨界温度( $T_c=38\text{ K}$ [2])と上部臨界磁場( $H_{c2}>50\text{ T}$ [3])を持ち、強力磁石等への応用が期待されている。我々は放電プラズマ焼結(PS)法を用いてKドープBa122バルクを作製し、ランダム配向多結晶として、 $1\times10^5\text{ A/cm}^2$ を上回る臨界電流密度( $J_c$ )を得た[4,5]。一方で、KドープBa122エピタキシャル薄膜では $10^6\sim10^7\text{ A/cm}^2$ の高い $J_c$ [6]が報告されている。本研究では、高 $J_c$ バルク作製に向けた指針を得るために、2段階SPS法[7~9]を用いて $c$ 軸配向性を高めたバルクを作製し、SPS条件が及ぼす配向度と $J_c$ への影響を評価した。

#### 2. 実験方法

Ar雰囲気のグローブボックス内で仕込組成Ba<sub>0.6</sub>K<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>となるように単体金属を秤量し、高エネルギー混合することでKドープBa122前駆体を作製した[4]。その後、SPS法によりΦ10 mmのバルクを作製した(1st step SPS)後、Φ15 mmの型に1st step SPSバルクを装填し、再度SPS法によりバルクを得た(2nd step SPS)。異なる熱処理温度(HT)で作製したバルクに対し、XRD解析により配向度を、磁化測定により $J_c$ を評価した。配向度の評価にはXRD回折ピーク強度から式(1)で求められるLotgering Factor( $LF$ )を用いた。

$$LF = \frac{p - p_0}{1 - p_0} \quad (1)$$

$$p_0 = \frac{\sum I_{(00l)}}{\sum I_{(hkl)}}, \quad p = \frac{\sum I_{(00l)}}{\sum I_{(hkl)}}$$

$I_0$ : 参照粉末試料のピーク強度,  $I$ : バルク試料のピーク強度

#### 3. 結果

Fig.1に1段階SPS法で作製したランダム方位のバルクと2段階SPS法で作製したバルク(1st step SPS HT = 650°C, 2nd step SPS HT = 800°C)のバルク表面のXRD回折パターンを示す。ランダム試料と比較して明らかな(00l)ピークの増強がみられ、2段階SPS法により $c$ 軸配向性が高まったことが確認された。 $LF$ は0.80であり、常圧合成Ba122テープ( $LF=0.36$ )[10]やHIP法Ba122テープ( $LF=0.46$ )[11]と比較しても高い $c$ 軸配向性を示した。

Fig.2に1段階SPS法バルクと2段階SPS法バルク(1st step SPS HT = 650°C, 2nd step SPS HT = 750°C)の $J_c$ の外部磁場依存性を示す。2段階SPS法バルクでは $J_c=2.12\times10^5\text{ A/cm}^2$ (0 T)、 $4.6\times10^4\text{ A/cm}^2$ (3 T)が得られ、従来の1段階SPS法バルクの $J_c\sim1\times10^5\text{ A/cm}^2$ (0 T)、 $\sim2\times10^4\text{ A/cm}^2$ (3 T)[4]と比較して約2倍の値であった。また、2段階SPS法バルクの $J_c$ は磁場中での減衰がより小さい挙動を示した。一方で、SPS条件を変化させて作製した試料において $LF$ と $J_c$ の間には単純な比例関係はみられず、他の要因も $J_c$ に影響を及ぼしていることが示唆された。

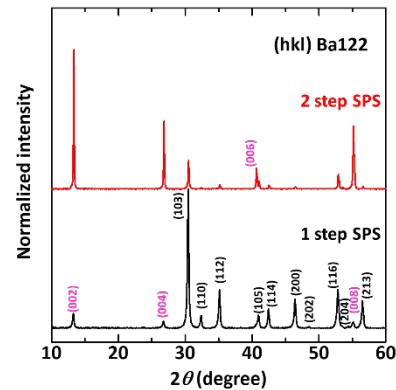


Fig.1 X-ray diffraction patterns of the surfaces of the bulk samples

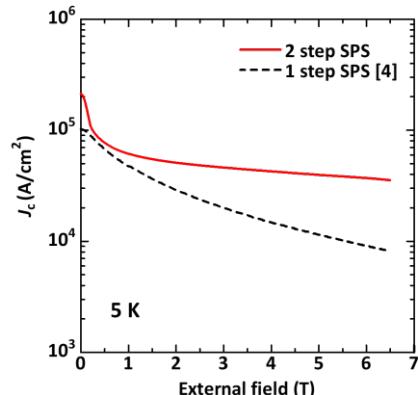


Fig.2 External field dependence of the critical current density

#### 4. まとめ

本研究では、2段階SPS法を用いてKドープBa122バルクを作製し、SPS条件が $c$ 軸配向性と $J_c$ に及ぼす影響を評価した。適した熱処理条件を適用することにより、 $LF=0.80$ と高い配向を示した。また、 $J_c$ においても適した熱処理条件により従来の1段階SPS法と比較して約2倍の $J_c$ を達成した。

#### 参考文献

- Y. Kamihara, et al.: J. Am. Chem. Soc., Vol. 130 (2008) 11
- M. Rotter, et al.: Phys. Rev. Lett., Vol. 101 (2008) 107006
- C. Tarantini, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 84 (2011) 184522
- S. Tokuta, et al.: iScience, Vol. 25 (2022) 103992
- A. Yamamoto, et al.: NPG Asia Mater., Vol. 16 (2024) 29
- D. Qin, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 35 (2022) 09LT01
- S. Ishiwata, et al.: JSAP Autumn Meeting, 17a-C31-1 (2024)
- J. G. Noudem, et al.: Scr. Mater., Vol. 66 (2012) 258
- S. Ishida, et al.: J. Alloys Compd., Vol. 961 (2023) 171093
- W. Li, et al.: Sci. China Mater., Vol. 66 (2023) 801
- S. Liu, et al.: Sci. China Mater., Vol. 64 (2021) 2530

# 一方向溶融成長(SDMG)法による 60 mm 級 REBCO リングバルクの直接育成

## Direct fabrication of 60 mm class REBCO ring-shaped bulks by the Single-Direction Melt Growth (SDMG) method

元木 貴則, 遠藤 淳, 國本 慧太, 浅古 諒, 松永 直也, 下山 淳一 (青学大)

MOTOKI Takanori, ENDO Jun, KUNIMOTO Keita, ASAOKO Ryo, MATSUNAGAR Naoya, SHIMOYAMA Jun-ichi  
(Aoyama Gakuin Univ.)

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

### 1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。溶融凝固バルクは通常、Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法に代表されるバルク上面に設置した種結晶を起点として徐冷による溶融凝固で育成されており、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、鉛直一方向のみに結晶成長が進行し、全体が單一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの育成が可能な Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた<sup>[1]</sup>。本手法は、バルクが鉛直方向に一次元的に結晶成長するため、原理的にリング形状のような中空形状であっても TSMG 法と異なり直接育成が可能である。これまでに小型の SMDG 法 DyBCO リングバルクにおいて TSMG 法に比べて高いリング内磁場~1.8 T (77 K)を報告している<sup>[2]</sup>。今回、外径 60 mm を超える大型のリングバルクの直接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、内径 35 mm のリング形状に成型した YBCO 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 領域からなる大型リングバルクを直接育成した。なお、YBCO 前駆体には、Y123+Y211 混合粉に 10 wt% の Ag<sub>2</sub>O および 0.5 wt% の CeO<sub>2</sub> をそれぞれ混合した TEP 社製の混合粉末を用いている。溶融凝固後に直径 60 mm を超える YBCO リングバルクが得られ、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 0.7 T の磁場中冷却後、バルク表面およびリング内部の捕捉磁場分布を評価した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した YBCO リングバルクの外観を示す。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、外径 60 mm を超える大型リング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。得られたリングバルクの 77 K における seed plate 側表面の捕捉磁場分布を Fig. 2 に、リング内部の厚さ方向の捕捉磁場分布を Fig. 3 にそれぞれ示す。リングの上では同心円に近く、かつ中央部で均一な捕捉磁場分布、リング内でコーン型の磁場分布であることがわかり、大型リングバルクにおいても結晶成長が均一に進行した

ことが示唆された。以上より、SDMG 法が大型かつリング形状の均質なバルクの育成に有用であることが示された。発表では、これらのバルクの超伝導特性についても報告する予定である。



Fig. 1. Appearance of a ring-shaped YBCO melt-textured bulk fabricated directly by the SMDG method.

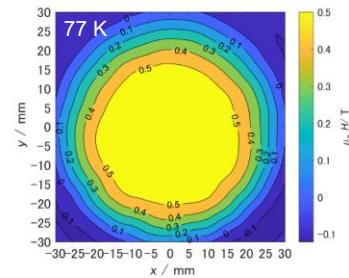


Fig. 2. Trapped field distribution at 77 K of the 60 mm class ring-shaped YBCO bulk. Trapped fields were evaluated on the seed side surface of the bulk.

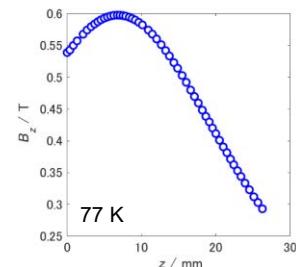


Fig. 3. Trapped field of the ring-shaped YBCO bulk along the center axis of the ring at 77 K. The growth front side of the bulk corresponds to  $z = 0$ .

[1] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003.

[2] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **16** (2023) 095501.

### 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。

## 強磁場化に向けた積層 QMG® リングマグネットの補強方法

### Reinforcement method of stacked QMG® ring magnets for high field trapping

森田 充, 中林 正史(日本製鉄)  
 MORITA Mitsuru, NAKABAYASHI Masashi (NSC)  
 E-mail: morita.d98.mitsuru@jp.nipponsteel.com

#### 1. はじめに

QMG®(単結晶状の123相中に211相が微細分散したバルク状酸化物超電導材料)は、高い臨界電流密度特性を有することから、これまで種々の応用開発が進められてきた[1]。バルクマグネット応用では、現在、低温強磁場中での着磁により数Tの磁場が捕捉可能となり、卓上NMR応用などへの期待が高まっている[2]。NMR応用では、高い均一性を有する強磁場が必要となる。これまで、我々は強磁場着磁に伴うQMGリングの割れを抑制するための技術を開発し、10T超、17Tまでの強磁場着磁を実現してきた[3,4]。

強磁場着磁の阻害要因の一つに、着磁過程で起こる電磁気力による割れがある。QMG リングを積層したマグネットユニットの応力集中箇所は、端部に配置された QMG リングの内周エッジ部分 (Fig.1(a)の Strain gauge①位置) である[5]。今回、この部分の歪を軽減する方法として、内径が等しく外径が小さい QMG リングに径方向の肉厚が大きい補強リングを取り付けた補強用のリング材を配置することで、比較的簡便に応力集中を緩和し、割れの発生を抑制する試みを行ったのでその結果を報告する。

#### 2. 実験方法

**2-1 試料準備** Fig.1(a)に着磁実験に使用した内径が異なる高さ20mm、外径60mmのGd系QMGリングを5枚積層したマグネットユニットの構造を示す。各QMGリングは外径70mm、内径60mmのアルミ合金で外周補強されている。また、Fig.1(b)に外径70mm、内径40mmのアルミ合金リングで外周補強された高さ15mm、外径40mm、内径28mmのQMGを使用した補強用のリング材を乗せた時の様子を示す。また、各図中に周方向の歪を測定するために貼り付けたひずみゲージの位置を示す。歪ゲージを貼り付けた関係から、補強用リング材と外径60mmの端部のQMGリングとの間に約0.5mmのギャップを設けた。

**2-2 測定方法** マグネットユニットは冷凍機のコールドヘッド上に固定され、ボア径150mmの10Tマグネット内で、所定の磁場中で冷却された。その後、減磁過程での各位置の歪量の変化を記録した。

#### 3. 実験結果・考察

Fig.2に5T,40Kで着磁した時の各位置の歪量の変化を示す。補強用リング材がない場合の①での歪変化量の最大値が $500 \mu\Delta\epsilon$ に達したのに対し、補強用リング材を配置した場合の①'は、約 $350 \mu\Delta\epsilon$ に低減している。補強用リング材の上面では、主に着磁過程の前半で、また補強用リング材の下面では主に後半で歪変化量が大きくなっている。補強用リング材でこのような歪が発生し応力(電磁気力)を担うことによって、外径60mmの端部のQMGリングの①'での応力集中が緩和されたものと思われる。

また、補強用リング材の上下面での歪挙動の違いは、着磁過程の初期では、補強用リング材が作用している磁場は、リングの回転軸方向であったのに対し、着磁過程の後半では、径方向磁場が主に作用していることに起因すると思われる。

これらの結果から、マグネットユニットの端部に補強用のリング材を配置することが、強磁場化に向けた補強方法として有効であることが分かった。

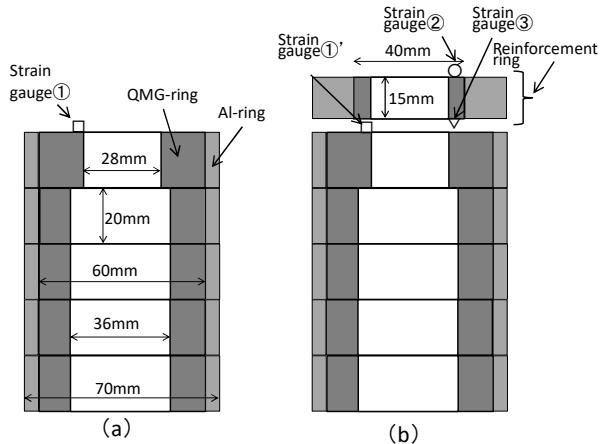


Fig.1 Magnet unit structures and strain gauge positions.  
 (a) Magnet unit made of five stacked QMG rings with reinforced outer periphery. (b) Magnet unit with reinforcing rings at the top end

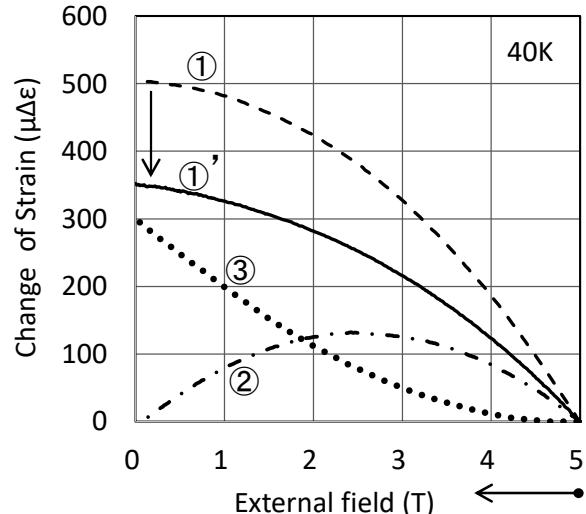


Fig.2 Changes of strain during magnetization process at each position shown in Fig.1

#### 参考文献

1. 森田充, 松田昭一:New Superconducting Materials Forum News, No.10 (1988) 15
2. 低温工学 特集「小型NMR用円筒超伝導バルク磁石の開発と信号検出」第52巻第1号 2017年
3. M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.27
4. M. Morita and S. Awaji: 東北大学金属材料研究所 強磁場超電導材料研究センター 2019年度年次報告 p.9
5. M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.98

# 蒸発水素ガスにおけるパラ水素濃度の経時変化に及ぼす貯蔵圧力の影響

## Influence of storage pressure on time change of para-hydrogen concentration for gas evaporated from liquid hydrogen

岡島 大地, 前川 一真, 藤川 静一, 佐藤 更, 武田 実(神戸大)

OKAJIMA Daichi, MAEKAWA Kazuma, FUJIKAWA Shizuchi, SATO Sara, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)

E-mail: 230w602w@stu.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて、水素エネルギーが注目されている。水素の利用時に留意すべき点として、オルト水素とパラ水素の変換問題がある。オルト-パラ変換については詳しく研究されている一方で、液体水素の利用時に問題となるパラ-オルト変換については、変換速度が遅いことが知られているが、詳しく研究されていない。我々はこれまでに、液体水素の蒸発ガスにおけるパラ水素濃度の経時変化を試行的に調べて報告した<sup>[1]</sup>。本研究では、この経時変化に及ぼす貯蔵圧力の影響を詳しく調べることにした。3種類の圧力で蒸発水素ガスを採取・貯蔵後、パラ水素濃度の経時変化を測定し、貯蔵圧力の影響について考察した。

### 2. 実験装置と実験方法

304Lステンレス鋼製ボンベ(内容積2.25 L)にバルブとブルドン管式圧力計を取り付けたものを採取ボンベとして用いた。これを液体水素タンクの放出ラインに接続し、ボンベ内を真空引きしてから蒸発水素ガスを充填した。この時、最終的に液体水素タンクの内圧以上の圧力を得るために、採取ボンベを液体窒素で冷却し、水素ガスを凝縮させた。その後、ボンベの温度が室温で安定し、圧力も上昇するまで待った。圧力が安定したら、目的の圧力になるよう減圧した。貯蔵圧力は0.3, 0.6, 0.9 MPaGの3つを設けた。採取したサンプルを室温条件下で一定期間貯蔵した。

サンプルガスのパラ水素濃度測定には、オルト・パラ水素の熱伝導度の違いを利用した分析計(株式会社ジェイ・サイエンス・ラボ製 DS-502)を利用した。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 1に貯蔵圧力ごとの測定結果を示す。液体水素のパラ水素濃度は99.8%、室温域での平衡濃度は25%であるが、平衡に達するまでの長期の変換の様子を見ることができる。

経時変化をさらに明らかにするために、回帰分析を行った。分析には、Fig. 1に示すように、2022年度の過去の測定値も用いた。濃度の経時変化 $x_p$ の近似式の条件として、経過日数 $t$ の関数において、 $t = 0$ で $x_p = 99.8$ 、 $t \rightarrow +\infty$ で $x_p = 25.0$ とし、以下のように近似式を設定した。

$$x_p = \left( \frac{1.496}{1 + e^{k_0 t}} + 0.25 \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

(1)式中の定数 $k_0$ を、統計ソフトRで最小自乗法を用いて計算した。貯蔵圧力ごとに求めた定数 $k_0$ を用いた回帰曲線をFig. 2に、貯蔵圧力と定数 $k_0$ の関係をFig. 3に示す。0.3 MPaGの近似式については、0.6, 0.9 MPaGに比べて残差が大きくなつたので、残差の正負やサンプル採取日をもとに2グループに分けて再分析した。0.3 MPaG(グループ1)、0.6, 0.9 MPaGの間で貯蔵圧力と定数 $k_0$ が比例の関係にあり、貯蔵圧力が大きいほど平衡に達するまでの変換速度が速いことが分かる。0.3 MPaG(グループ2)が比例関係から大きく外れた理由として、他の3つのグループに比べて、採取日や貯蔵期間の気温が比較的高いことが考えられる。このため、貯蔵中の温度を一定に管理することが必要であると考えられる。

一方、(1)式を $t$ について微分すると、 $x_p$ についての2次式に

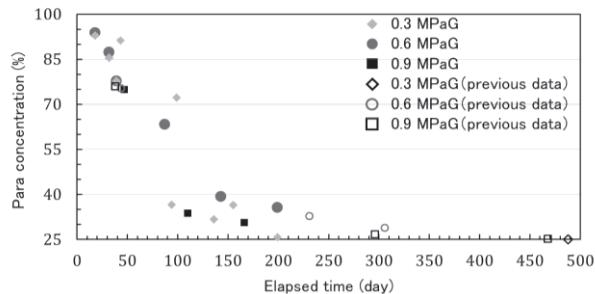


Fig. 1 Time change of para concentration.

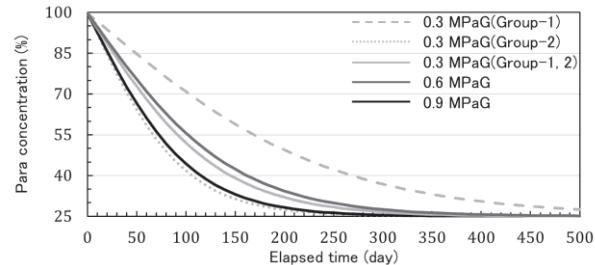


Fig. 2 Approximation curves as a parameter of storage pressure.

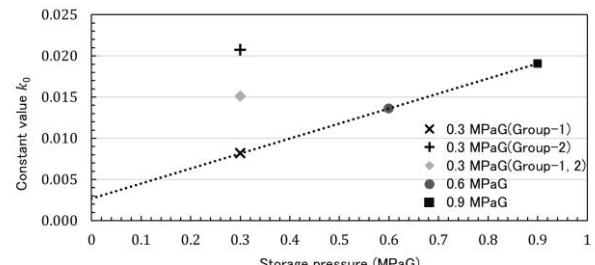


Fig. 3 Relationship between storage pressure and constant value  $k_0$ .

なる。これは過去の研究<sup>[2]</sup>で報告されていた、触媒を用いないオルト-パラ変換が2次の反応であることと一致する。このことから、近似式(1)が、パラ水素濃度の経時変化を示す具体的な式として条件を満たしていると考えられる。

### 4. まとめ

パラ-オルト変換に注目し、採取した蒸発水素ガスの貯蔵圧力を変えて、パラ水素濃度の経時変化を調べる実験を行った。その結果、貯蔵圧力が大きくなると平衡に達する変換速度が速くなることが、回帰分析から分かった。また、用いた近似式が経時変化を表す具体的な式の形として条件を満足していた。

今後の課題としては、0.3 MPaGの変換速度が比較的速くなった原因を解明するために、温度を一定にして貯蔵し、パラ水素濃度の経時変化を調べる実験を行うことが挙げられる。

### 参考文献

1. S. Sara, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.62
2. Milenko Y, Sibileva R, Strzhemechny M.: Natural Ortho-Para Conversion Rate in Liquid and Gaseous Hydrogen, J Low Temp Phys, Vol. 107 (1997) p.77-92

# 液体水素の貯蔵・輸送に関する数値シミュレーション

## Numerical Simulation of Liquid Hydrogen Storage and Transportation

山下 陽也, 前川 一真, 武田 実(神戸大)  
 YAMASHITA Haruya, MAEKAWA Kazuma, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)  
 E-mail: haruya0728@gmail.com

### 1. はじめに

近年、水素が化石燃料などの代わりとなる次世代エネルギーとして、世界から注目されている。その中でも「グリーン水素」は、製造から利用までの一貫プロセスにおいて、再生可能エネルギーを利用するため、二酸化炭素を全く排出しない。そのため、世界では豪州の太陽光発電などを中心に、「グリーン水素」の製造に関する研究開発が進んでいる。水素は気体の場合、密度は非常に小さい。そのため、水素の体積を約800分の1の液体状態にして、高効率に貯蔵・輸送することが望ましい。しかし、液体状態の水素は沸点が20 Kと極低温であるため、液体水素タンクへの入熱により、液体状態を長期間維持することが難しい。従って、液体水素タンク内部の状態変化を予測することは、管理運用上、極めて重要である。我々は、小型液体水素模擬タンク(光学クライオスタット)を用いて、実験を行っており、前回は充填率50%の静止蓄圧実験を報告した[1]。本研究は、状態変化計算モデルの構築を目指して、数値シミュレーションを行い、実験データの再現を試みることにした。

### 2. 数値シミュレーション概要

本研究で用いた光学クライオスタットのLH<sub>2</sub>槽は容積21.67 L、直径216.3 mm、高さ610.0 mm、底面面積0.0367 m<sup>2</sup>の円筒型である。そのため、本シミュレーションにおいても3D CADを用いて上記の仕様の流体領域を設計した。また、光学クライオスタットのLH<sub>2</sub>槽内には、鉛直方向のGFRP管の表面に、温度計が設置されており、上から100 mm間隔で温度が定点観測できる。そのため、本シミュレーションにおいてもその仕様を採用し、LH<sub>2</sub>槽の上部からT6、T5、T4とした。

流体解析ソフトウェアとして、CAEソリューションであるSTAR-CCM+を用いた。解析手法はVOF法(界面が鮮明な流れに特化する解析手法)、MMP(界面が混合している流れに特化する解析手法)をそれぞれ使い、結果の違いに着目した。双方、流れ場は層流、時間ステップは0.05 s、入熱条件に関して、実験結果[1]に基づいて、液相部は一定の熱流束を加え、気相部は解析初期で主に流体領域上面から熱流束を加えた。解析終了付近では主に流体領域側面から熱流束を加えた。

気液界面付近の蒸発・凝縮現象を表現するために、気液の質量輸送の式である「Schargeの式」を用いた。式中のアコモデーション係数を調整することで、実験再現性の向上が期待できる。内部イタレーション数は、VOF法を用いたシミュレーションでは20回、MMPを用いたシミュレーションでは100回と設定した。

### 3. 実験結果とシミュレーション結果の比較

まずシミュレーションにおいて、解析物理時間600 sに設定した。Fig.1は実験結果、Fig.2はシミュレーション結果(VOF法)、Fig.3はシミュレーション結果(MMP)である。シミュレーションに関して、上記の条件に基づき得られた温度と、圧力の時間変化の結果をグラフ化した。

得られた結果から、MMPを解析手法として用いることはVOF法を用いる場合に比べて、圧力上昇を再現できることができなかった。温度上昇に関しては、MMP・VOF法の双方でほぼ同じ結果となった。特にT6の温度上昇を再現することができなかつた。

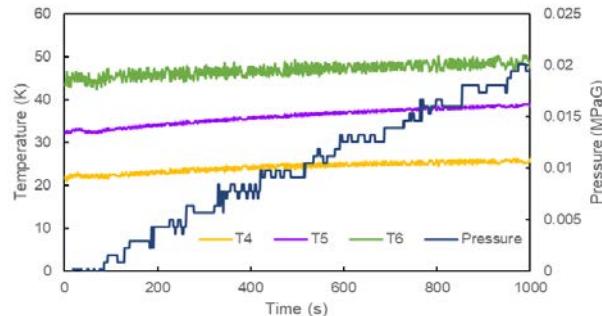


Fig.1 Experimental result of static pressure accumulation.

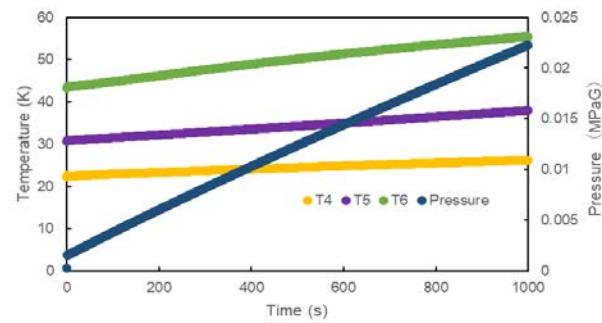


Fig.2 Numerical simulation result (VOF Method).

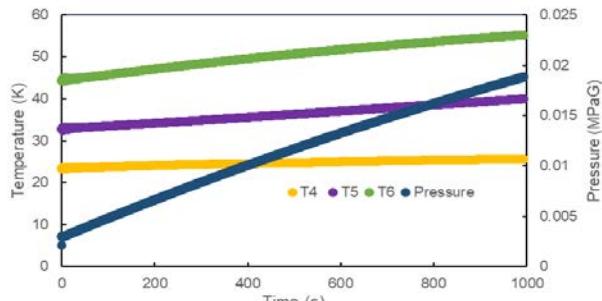


Fig.3 Numerical simulation result (MMP).

### 4. まとめ

MMPを解析手法として数値シミュレーションすることで、圧力上昇の実験結果を再現できた。MMPは流体中の気泡または気体中の液滴の混合をモデル化するために設計されたモデルであるため、本研究のような気液の質量輸送が激しいシミュレーションでは、界面が鮮明な流れに特化するVOF法より適しているからだと考えられる。今後はメインの解析手法をMMPとし、長時間解析を可能にするために、内部イタレーション数、メッシュ、時間ステップなどの調整を行いたい。

本研究の一部に対して、科研費基盤研究(C) (23K04251)による助成を受けました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

1. S. Hatai *et al.* : Abstracts of CSSJ Conference, Vol.106 (2023) P.153

## 充填率をパラメータとした横振動時における液体水素の貯蔵・輸送に関する研究

### Study on storage and transportation of liquid hydrogen under horizontal vibration as a parameter of filling ratio

武中 悠一郎, 平本 幸暉, 河江 聖延, 川嶋 秀亮, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実(神戸大)  
 TAKENAKA Yuichiro, HIRAMOTO Koki, KAWAE Masanobu, KAWASHIMA Hideaki, MAEKAWA Kazuma,  
 FUJIKAWA Shizuichi, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)  
 E-mail: 233w516w@stu.kobe-u.ac.jp

#### 1. はじめに

近年、我々はエネルギー資源の大量消費による枯渇やそれによって引き起こされる地球温暖化など、深刻なエネルギー問題に直面している。このような中で、環境負荷が少なく安全でクリーンな水素エネルギーは、最も注目を集めているエネルギーの一つである。水素をエネルギーとして他国から我が国へ輸入するときは、船舶による液体輸送が主な輸送手段になる。液体水素(LH<sub>2</sub>)は体積が気体水素の800分の1になることから、液体状態で効率的に輸送することが望ましいからである。しかし、液体水素は沸点が20 Kと非常に低く、粘性係数も小さくスロッシングしやすいため、船舶の動搖によって蒸発損失が生まれる。本研究室では、これまでに液体水素の貯蔵・輸送に関する研究として静止蓄圧実験[1]や振動蓄圧実験[2]を行い、報告した。本研究は、横振動時における液体水素容器内部の温度と圧力を調べ、初期充填率をパラメータとして液体水素の熱流動特性を明らかにすることを目的とする。本研究では、LH<sub>2</sub>用クライオスタット及び横振動試験装置を用いて、初期充填率・振動開始圧力を変えて、0.4 MPaGまでの振動蓄圧実験を行った。

#### 2. 実験装置及び実験方法

Fig.1に実験システムの概略図を示す。実験システムは光学観測窓付LH<sub>2</sub>用クライオスタット(LH<sub>2</sub>槽 20 L)、横振動試験装置、外部加熱型超伝導MgB<sub>2</sub>(二ホウ化マグネシウム)液面センサー、CCS温度センサー(T1~T6)、圧力計、真空計等で構成されている。横振動試験装置は振幅±100 mm、最大加速度±0.1 Gに設定した。実験では、液体水素の充填率を13%~80%に設定し、0.4 MPaGまで蓄圧を行った。run1~run20では0.1 MPaGまたは0.2 MPaGで振動を開始し、1時間後に停止した後、0.4 MPaGまで静止蓄圧した。run21~run23では、それぞれ0 MPaG, 0.1 MPaG, 0.2 MPaGで振動を開始し、0.4 MPaGに到達するまで振動させ続けた。

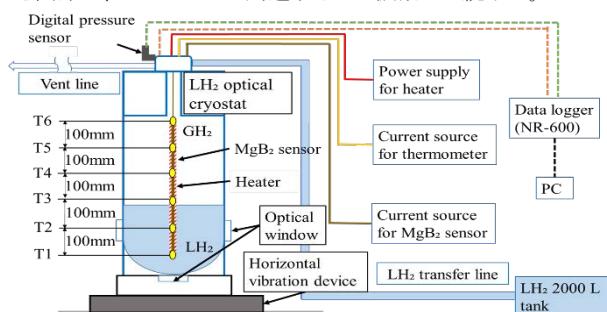


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system.

#### 3. 実験結果と考察

Fig.2はrun5(充填率50%、振動開始圧力Ps 0.2 MPaG)における温度と圧力の時間変化を示している。温度分布に注目すると、実験開始時気相部の温度計はT4~T6、液相部の温度計はT1~T3である。

振動前の静止蓄圧では圧力の上昇に伴って液相部と気相部の温度が上昇した。振動中はT4~T6で気相部の温度が

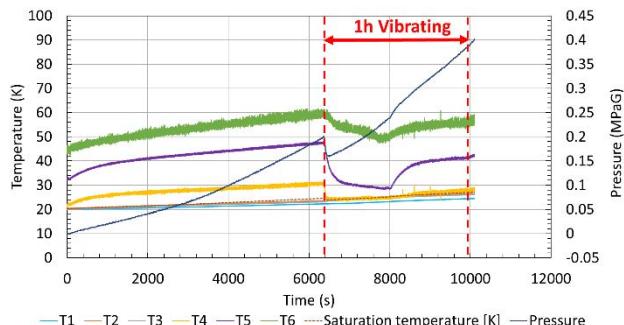


Fig.2 Time chart of temperature and pressure at run5.

低下し、T5とT6は圧力が0.25 MPaG付近で上昇に転じた。T4は振動開始直後から飽和温度となり、緩やかに温度上昇した。また、液面より260 mmほど低いT1では振動開始後もサブクール状態が続いた。T5とT6で圧力が0.25 MPaG付近で上昇に転じた理由の一つとしては、気液の境界面において気相部の圧力が高くなることで気液の混ざりあいが起きにくくなり、静置に近い状態になったことが考えられる。この現象は振動中に圧力が0.25 MPaG付近に到達した全ての実験で見られた。

充填率50%の実験について、平均入熱量を算出した。平均入熱量は蓄圧中の液相部と気相部それぞれの平均温度と圧力値より、密度及び比エンタルピーを求め、エンタルピーの変化を蓄圧時間で割ることで算出した。run5(Ps 0.2 MPaG)とrun12(Ps 0.1 MPaG)の0 MPaG~0.4 MPaGでの平均入熱量を算出するとrun5では5.78 W、run12では5.33 Wとなり、等しい振動条件において平均入熱量は振動開始圧力の大きさにほぼ比例する結果となった。異なる充填率の実験においても、この傾向が見られた。

#### 4. まとめと今後の課題

本実験から明らかになったのは以下のとおりである。

- (1) 振動を開始すると液面に近い気相部の温度は低下した。
- (2) 振動中に0.25 MPaG付近に到達すると、液面に近い気相部の温度は上昇に転じた。
- (3) 平均入熱量は静止蓄圧時より振動蓄圧時の方が多くなり、等しい振動条件では、振動開始圧力にほぼ比例した。

今後は、異なるパラメータの解析を行い、諸現象との関係を明らかにすることを目指す。

本研究の一部に対して、科研費基盤研究(C)(23K04251)による助成を受けました。また、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)の委託業務の結果、得られたものです。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

1. M Nagahiro, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2021) p.26
2. Y Takenaka, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.154

## 液化水素貯槽の保安距離に関する研究

### Study on safety distance for liquid hydrogen storage tank

中納 晓洋<sup>a</sup>, 原 知輝<sup>a,b</sup>, 小山田 賢治<sup>a</sup>, 岸川 義明<sup>a</sup>, 志賀 優多<sup>a</sup>, 柴野 佑太<sup>a</sup>, 佐野 尊<sup>a</sup>, 竹花 立美<sup>a</sup> (a: 高圧ガス保安協会);  
土橋 律<sup>b</sup>, 桑名 一徳<sup>b</sup> (b: 東京理科大学)

NAKANO Akihiro<sup>a</sup>, HARA Tomoki<sup>a,b</sup>, OYAMADA Kenji<sup>a</sup>, KISHIKAWA Yoshiaki<sup>a</sup>, SHIGA Yuta<sup>a</sup>, SHIBANO Yuta<sup>a</sup>,  
SANO Takeru<sup>a</sup>, TAKEHANA Tatsumi<sup>a</sup> (a: KHK);  
DOBASHI Ritsu<sup>b</sup>, KUWANA Kazunori<sup>b</sup> (b: Tokyo Univ. of Science)

E-mail: Akihiro.Nakano@khk.or.jp

#### 1. はじめに

高圧ガス保安法のコンビナート等保安規則(以下、コンビ則と称す)において可燃性ガスの製造施設における貯蔵設備等からの保安距離が定められているが、現状では液化水素と圧縮水素は区別されておらず、すなわち圧縮水素を想定した基準となっていることから、今後設置が検討されている大型の液化水素貯槽については、例えば同様の大型のLNG貯槽に比較すると、大きな保安距離が要求される状況となっている。本研究ではTNT等価モデルに沿って液化水素の特性を踏まえた保安距離の検討を進めたので、その結果を以下に示す。

#### 2. TNT等価モデル

コンビ則第5条第1項第2号により可燃性ガスの貯蔵設備等の保安距離は以下の式で求められる。

$$X = 0.480 \sqrt[3]{K \cdot W} \quad (1)$$

ここで、 $X$  は保安距離(単位:m)、 $K$  はガスの種類及び常用の温度の区分に応じてコンビ則別表第二に掲げる数値、 $W$  は貯蔵設備又は処理設備の区分に応じた同規則に掲げる数値を表す。なお、先頭の係数 0.480 は防護壁を設置している場合は 0.290、新設製造施設の場合は 0.576 となる。この式(1)は爆風圧と距離の相関式である下記の TNT 等価モデルから導かれる [1]。

$$L = \lambda^3 \sqrt{W_{TNT}} = \lambda^3 \sqrt{\frac{W_G f \cdot \varphi \cdot Q_G \cdot \gamma}{Q_{TNT}}} \quad (2)$$

$L$  は爆発中心からの距離(m)、 $\lambda$  は換算距離(m/kg<sup>1/3</sup>)、 $W_{TNT}$  は等価の TNT 火薬量(kg)、 $W_G$  は可燃性ガス(液体)の流出量(kg)、 $Q_G$  は可燃性ガスの燃焼熱量(J/kg)、 $Q_{TNT}$  は TNT 火薬の燃焼熱量( $4.184 \times 10^6$  J/kg)、 $f$  は流出したガスの気化率(フラッシュ率)、 $\varphi$  は爆発係数、 $\gamma$  は TNT 収率を表す。 $f$  はガス種と温度に依存性のある値で、次式で与えられる。

$$f = (H - H_b) / h_b \quad (3)$$

$H$  は液体の貯蔵温度・圧力でのエンタルピー(J/kg)、 $H_b$  は大気圧下沸点におけるエンタルピー、 $h_b$  はそこでの蒸発潜熱(J/kg)を表す。なお、 $\varphi$  はガス種により異なり、水素の場合 0.1 [2]、 $\gamma$  は 0.064 を用いれば安全側とされる。 $Q_{TNT} = 1,000$  kcal/kg であることから、 $L$  は次式で表される。

$$L = 0.04 \lambda^3 \sqrt{K \cdot W_G} \quad (4)$$

ここで、 $K = f \cdot \varphi \cdot Q_G \cdot 10^3$  (5)  
コンビ則では燃焼熱量、 $Q_G$  の単位は kcal/kg が使用されている。また、 $K$  値に  $10^3$  が係るのは、同規則では  $W_G$  がトンの単位で記載されていることによる。現行の水素の  $K$  値は  $2860 \times 10^3$  である。なお、コンビ則では既存施設に対し  $\lambda = 12.0$ (爆風圧 11.76 kPa)、新規施設に対しては  $\lambda = 14.4$ (爆風圧 9.8 kPa)を限界強度として保安距離を確保するとされている [3]。

#### 3. 水素の $K$ 値と保安距離

NIST REFPROP を使用し、水素の飽和蒸気圧曲線上のエンタルピーと大気圧下の沸点での蒸発潜熱から式(3)を用

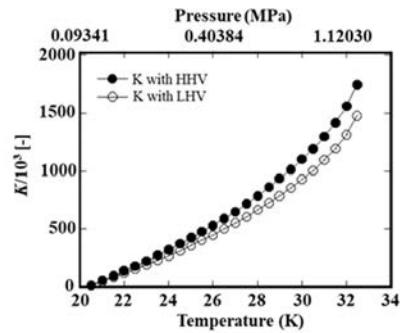


Fig.1 K-value for liquid Hydrogen

いてフラッシュ率、 $f$  を求め、式(5)を用いて  $K$  値を導出した結果を Fig.1 に示す。燃焼熱量、 $Q_G$  に総発熱量(HHV)を採用した結果を ●、真発熱量(LHV)で計算した結果を ○ で表している。コンビ則では燃焼熱に真発熱量が採用されていることから、図中 ○ が  $K$  値となる。液体を想定することで水素の  $K$  値は小さくなる。この  $K$  値と式(1)を用いて新設の 50,000 m<sup>3</sup> の液化水素貯槽に対する保安距離を試算した結果を Fig.2 に示す。温度・圧力の上昇と共に保安距離は長くなり、保安距離は約 55.3 m から 255.9 m まで変化することが確認できる。

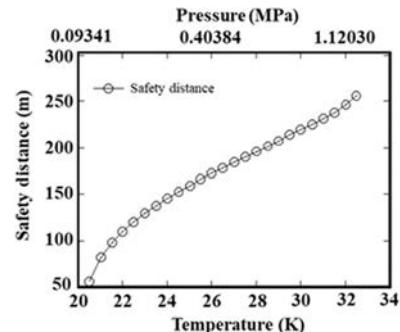


Fig.2 Safety distance for LH<sub>2</sub> storage tank

#### 4. まとめ

保安距離は  $K$  値をどの温度・圧力で決定するかによって変わってくるが、本年度開始された NEDO プロで推進する実証実験と数値解析により検証を進め、コンビ則で規定すべき水素の  $K$  値に関する改正案を取り纏める予定である。

#### 謝辞

本研究成果は NEDO「大型液化水素貯槽からの大量漏洩・拡散等のシミュレーション手法の開発及び設置基準の整備に向けた調査研究」(JPNP23004) で得られたものである。

#### 参考文献

- 消防庁特殊災害室「石油コンビナートの防災アセスメント指針」(2013) pp.140-141.
- 安全工学講座 2 爆発、安全工学協会編 (1983) p.226
- 高圧ガス取締法 コンビナート等保安規則の解説、通商産業省立地公害局保安課編 (1977) p.40

## 液化水素冷熱を利用した液化ネオン製造の構想

### Concept for the Production of Liquid Neon Utilizing the Cold Energy of Liquid Hydrogen

松永 信之介 (岐阜高専); 大屋 正義 (関西学院大); 柳 長門 (NIFS)

MATSUNAGA Shinnosuke (NIT, Gifu College); OHYA Masayoshi (Kwansei Gakuin Univ.); YANAGI Nagato (NIFS)

E-mail: shinnosuke.matsunaga@gifu-nct.ac.jp

#### 1. ネオンについて

ネオン(原子番号:10)はヘリウムの次に軽い希ガスである。半導体製造や医療用レーザーで使われており、その用途は多岐にわたる。ネオンは大気中に  $1.8 \times 10^{-3}$  %程度存在し、これを分離・精製することで産業利用可能な高純度ネオンが得られる。大気から主な産業ガスを抽出した残り(粗ガス)には、4割~5割のネオンが含まれている[1][2]。これを産業利用向けの純度まで精製するには融点である 27 K(あるいは高圧で 50 K)に冷却しなければならない[2]。これには大規模な深冷分離設備および冷凍機の運転に必要な大きな電力が必要である。本稿執筆時点、既存設備を有するロシアやウクライナが高純度ネオンの主要な産出国であり、多くの国はこれを輸入している。しかし、ロシアのウクライナ侵攻により入手性が不安定になっている。

#### 2. 液化水素と冷熱利用

令和 6 年度に示された経済産業省の水素基本戦略(案)では、水素をエネルギー源として利用拡大する必要性が述べられている[3]。水素をエネルギー源として導入する際、液化は輸送、貯蔵、利用において合理的な手段の一つとされている。水素供給に関するトータルコスト分析をした先行研究によると、2030 年時点ではアンモニア化やメチル化が液化より低コストであり、2050 年には液化の方が低コストになると予測されているが、その差は大きくなない[4]。そこで、液化水素については、燃焼前に気化させる際に副次的に発生する冷熱をコスト削減に活用するという考え方が検討されている[5]。

#### 3. 液化水素冷熱を利用した液化ネオン製造の構想

液化水素の気化時に生じる冷熱を利用して高純度ネオンや液化ネオンを製造するというコンセプトを着想した[6]。Fig. 1 にその概念図を示す。20 K の冷熱を利用することで、冷却に必要な電力がほぼ不要となる。このアイデアは、冷熱をコスト削減に活用するという先行研究[5]の考え方に基づいており、液化ネオンや高純度ネオンガスを製造して、水素供給のコストに還元することで、水素の低コスト化に寄与することが期待できる。日本国内では年間約  $2.6 \times 10^6$  km<sup>3</sup>(ガス容積)の窒素

が液化・利用されている[7]。粗ガスとして存在するネオンの重量は約  $5.5 \times 10^6$  kg と見積もることができ、これは約  $4.6 \times 10^{10}$  L の液化ネオンに相当する。つまりネオンは潤沢に存在する。ほぼ沸点の液体から常温のガスまでの水素のエンタルピー変化は約 3,900 kJ/kg、ネオンは 350 kJ/kg である。従って 1 kg の液化水素の冷熱は約 10 kg のネオンを液化するエンタルピーに相当する。効率や粗ガス中のネオン含有率を考慮しても、液化水素の冷熱が不足することはないだろう。産業用の高純度ネオンガスの製造だけでなく、年間十~百万リットル規模で極低温液体である液化ネオンを生産することが可能であれば高温超伝導機器の冷媒としての需要をも満たすことができるかもしれない。ヘリウムはリークしやすく、真空機器の真空度に影響を与えやすいが、ネオンはリークしにくいため、真空断熱との相性が良い。さらに、ネオンは水素と異なり取り扱いにおいて防爆設備が不要であり、また、原料は空気と液化水素であるためヘリウムと異なり国内で製造を閉じることができる。

#### 参考文献

- 渡辺俊男: Neonについて, 低温工学, Vol. 11 (1976), No. 1, pp. 40-41
- Deutschen Rohstoffagentur: DERA Rohstoffinformationen Noble gases - supply really critical?, 2016
- 経済産業省: 水素基本戦略(案), [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinen/e/suiso\\_seisaku/pdf/20230606\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinen/e/suiso_seisaku/pdf/20230606_1.pdf), 2024.10.15 閲覧
- 水野有智 他: 国際水素エネルギー・資源学会誌, Vol. 38, No. 3, pp. 11-17, 2016.12.16
- 大屋正義: 液体水素冷却超電導発電機の開発, 液体水素の冷熱利用に関する研究会(核融合科学研究所), 2024.3.8
- 松永信之介, ネオン製造方法およびネオン製造装置, 特願 2024-113763, 2024.7.17 出願
- 日本産業・医療ガス協会: 窒素 生産・仕入・販売実績表(2023 年実績表)

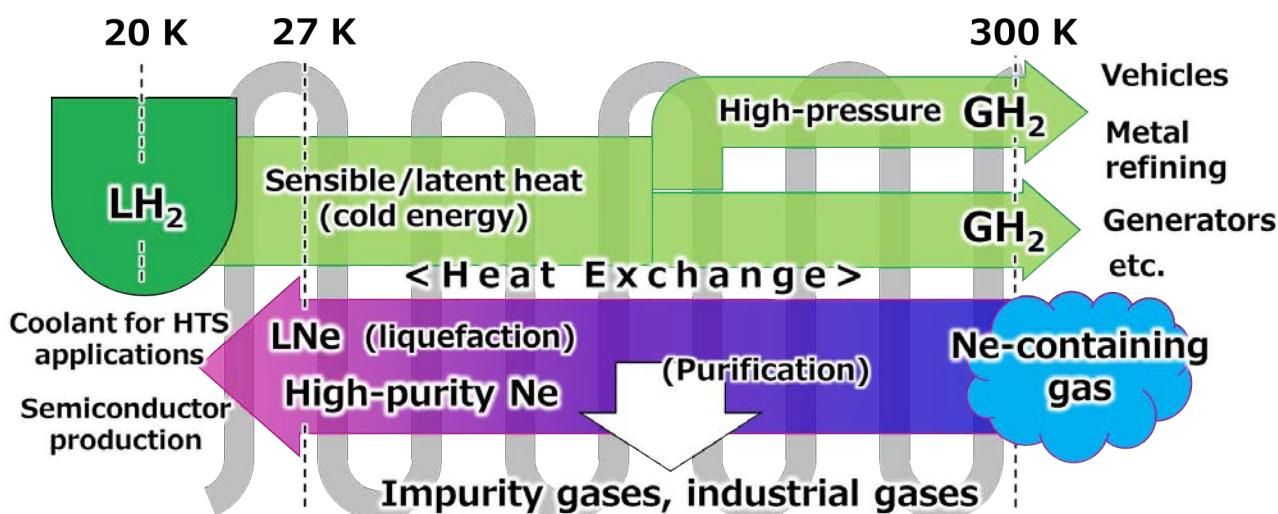


Fig.1 Diagram of the concept for the production of liquid/high-purity Ne utilizing the cold energy of H<sub>2</sub>

# バイアス電流下の力学インダクタンスの理論

## Theory of kinetic inductance under a bias DC

久保 穀幸 (KEK)  
 Takayuki Kubo (KEK)  
 E-mail: kubotaka@post.kek.jp

### 1. はじめに

これまで、バイアス電流下の力学インダクタンスは、GL 理論[1]や BCS 理論[2, 3, 4]に現象論的仮定を組み合わせることで計算されてきた。この現象論的仮定とは、電磁場とともに超流動密度が振動する所謂「遅い実験シナリオ」、または、電磁場とともに超流動密度が変化しない「速い実験シナリオ」である。

これらのシナリオは、(後で見るように、この考えは正しくないのだが)周波数が超流動密度の緩和時間の逆数と比べて小さければ超流動密度は電磁場に追随して振動し、逆に周波数が大きければ超流動密度は追随できず一定である、という考えに基づいている。そして、系がどちらのシナリオに従うかは、超流動密度の緩和時間の逆数と電磁場の周波数の間の大小関係に依存すると考えられてきた。そのため、一般的の周波数では非平衡超伝導の理論を用いなくてはバイアス電流下の力学インダクタンスを計算できないということは以前から周知の事実であった。

先行研究の中には[5, 6]、こうした現象論的仮定を陽に導入せず、バイアス電流下の力学インダクタンスを計算しているものもあるが、本質的には「凍結した超流動密度シナリオ」を暗に仮定していることに注意しなければならない。

また、不純物濃度(平均自由行程)がバイアス電流下の力学インダクタンスに与える影響についても理論的に調べられていない。過去の BCS 理論に基づく計算[2, 3, 4, 5, 6]は、平均自由行程が短い場合(dirty limit;  $mfp \ll \xi_0$ )の計算のみであり、平均自由行程が長くなると、その振る舞いがどうなるかは全く明らかではない。

まとめると、バイアス電流下の力学インダクタンスの未解決の問題は次の2つと言える。(1)現象論的仮定を導入することなく、ミクロな理論のみに基づいた計算をすること、(2)dirty limit の場合だけでなく、任意の平均自由行程の場合について計算すること、の2つである。これらの課題に取り組むには、確立された非平衡超伝導理論である Keldysh-Eilenberger 理論に基づき、忠実に複素伝導率を計算し、そこからバイアス電流下の力学インダクタンスを抜き出せば良い。本発表では、その計算結果[7]を紹介する。これにより明らかになったことは、「振動する超流動密度シナリオ(遅い実験シナリオ)」のみが正しく、「凍結した超流動密度シナリオ(速い実験シナリオ)」は理論的に正しくない、ということである。重要な役割を果たしているのは超伝導のヒッグスモードである。

### 2. 理論

計算方法の詳細は論文[7]を見て欲しい。ここでは概略のみ述べる。

この計算に用いるのは、確立された非平衡超伝導の理論である Keldysh-Eilenberger 理論である。これを用いることで、任意の温度( $0 < T < T_c$ )、対破壊電流以下の任意のバイアス電流密度( $0 < J_b < J_{dp}$ )、任意の平均自由行程に対して複素伝導率の(もちろん力学インダクタンスも)計算が可能である。

手順としては、まず、バイアス電流のみが印加された平衡状態でのグリーン関数を平衡状態の Eilenberger 方程式を解くことで求める。これを  $g_b$  と呼ぶことにする。バイアス電流下の平衡状態での秩序パラメータを  $\Delta_b$  とする。次に、電磁場を撰

動として加え、Keldysh-Eilenberger 方程式を解く。この解は  $g_b + \delta g$  と書ける。秩序パラメータは  $\Delta_b + \delta \Delta(t)$  となる。

この  $\delta \Delta(t)$  はヒッグスモードと呼ばれる量で、電磁場の二乗以上の項しかカップルしないことが知られている。すなわち、 $A \cdot A \cdot \delta \Delta$  の形しか理論に現れない。今の場合、 $A$  の一つはバイアス( $A_b$ )、もう一つの  $A$  は外部から印加される電磁場( $A_w$ )に対応している。すなわち、 $A_b \cdot A_w \cdot \delta \Delta$  という形になっている。その結果、バイアス電流下では、ヒッグスモード  $\delta \Delta$  が電磁場に対して線形応答するのである。このヒッグスモードの複素伝導率への寄与が特に大きくなるのは、周波数が超伝導ギャップ  $\Delta$  の2倍程度の場合である。この事実は、2017年に Moor 達[8]が dirty limit の超伝導体に対して、非平衡超伝導の Keldysh-Usadel 理論を適用することで明らかになっている。dirty limit から clean limit までの任意の平均自由行程については Jujo[9]が更に一般的な理論、Keldysh-Eilenberger 理論を用いることで調べている。そして、これらの予言は実験[10]で既に確認されている。

さて、多くの超伝導デバイスにとって重要なのは、 $2\Delta$  より遥かに小さい周波数である。そのような低い周波数においてもヒッグスモードの寄与が重要であるか否かはこれまで明らかにされていなかった。本発表では、論文[7]の結果のうち、複素伝導率の虚部、すなわち力学インダクタンスの計算結果のみを述べる。実部については参考文献[7]を参照して欲しい。

### 3. 結果

本研究[7]で用いた理論の枠組みは、任意のバイアス電流  $J$  について力学インダクタンス  $L_k(J)$  を評価することが可能であるが、ここでは特に、 $J$  が対破壊電流  $J_{dp}$  と比べて十分に小さい場合に注目する。この場合、 $L_k(J) = L_k(0) * [1 + C(J/J_{dp})^2]$  と書け、係数  $C$  は温度と平均自由行程に依存する。本研究での計算結果によると、 $C$  は平均自由行程が短くなるにつれて増大し、dirty limit ( $mfp \ll \xi_0$ ) で 0.41 程度になることが分かった。この計算結果は、BCS 理論に「振動する超流動密度シナリオ(遅い実験シナリオ)」を組み合わせた過去の計算結果[3, 4]と一致する。更に、敢えて誤った計算、すなわち、ヒッグスモードの寄与と不純物散乱の自己エネルギーの補正を落とした計算を行った場合、 $C$  は 0.14 程度になり、これは BCS 理論に「凍結した超流動密度シナリオ(速い実験シナリオ)」を組み合わせた結果[3, 4]と一致する。これらは、バイアス電流下ではヒッグスモード(すなわち超流動密度の振動)が複素伝導率に寄与することの帰結である。詳細は論文[3, 4, 7]を見て欲しい。

### 参考文献

1. S. M. Anlage et al., IEEE Trans. Magn. **25**, 1388 (1989).
2. J. R. Clem and V. G. Kogan, Phys. Rev. B **86**, 174521 (2012).
3. T. Kubo, Physical Review Research **2**, 033203 (2020).
4. T. Kubo, Physical Review Research **6**, 039002 (2024).
5. A. J. Annunziata et al., Nanotechnology **21**, 445202 (2010).
6. A. V. Semenov et al., Phys. Rev. Appl. **13**, 024079 (2020).
7. T. Kubo, Physical Review Applied **22**, 044042 (2024).
8. A. Moor et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 047001 (2017).
9. T. Jujo, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 074711 (2022).
10. S. Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 257001 (2019).

# 単一磁束量子回路を用いた拡張性を持つベイジアンネットワークのハードウェア実装

Hardware implementation of scalable Bayesian network using a single flux quantum circuit

中山 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

確率的モデル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ケで構成され、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BNの解析は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。我々はこれまで単一磁束量子回路を用いたBN専用プロセッサに関する研究を行い[1]、高速性に優れるプロセッサを実証した。しかし、ノードの結合を磁気結合によって表すことから3結合以上のBNは回路が複雑になるため実現困難であることや回路チップ作成後にCPTの再編集が制限されるという課題があった。本研究ではこれらの課題を解決した手法によるプロセッサの実装を行い、正常に解析できることを確認した。

## 2. 拡張性に優れる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。SRNGは雑音の増幅が必要ないことなどから非常にコンパクトで高速性に優れた回路である。

親ノードはSRNG単体で表現する。子ノードはCPTに従つ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。

先行研究と比較して、本手法によるプロセッサは使用する回路がコンパクトなSRNGと一般的な回路のみで構成可能なデコーダで構成されるため大規模化が容易である。また、CPTの再編集は独立したSRNGの制御電流を調整することで自由に可能である。最高動作周波数は、先行研究ではデジタルアナログ変換器に依存して20 GHz程度であったが、本手法ではSRNGに依存して50 GHz以上での動作が可能である。

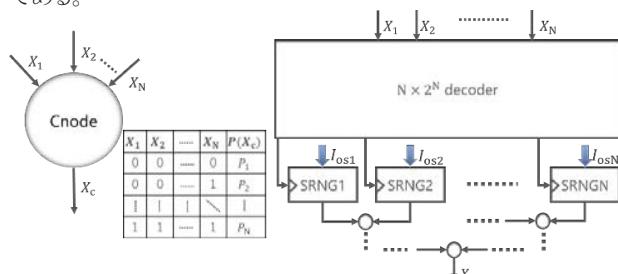


Fig.2 Architecture of BN with SRNG and decoder

本手法を用いてノード数が二つのBNを設計し、液体ヘリウム中で回路の測定を行った。Fig.3に(a)想定する2ノードBNと

(b)回路の顕微鏡写真を示す。親ノードが1つの場合、子ノードの出力確率は親ノードの出力が1の時と0の時の2パターンである為、必要となるデコーダは1入力2出力のものであり、NOTゲートを用いて設計した。

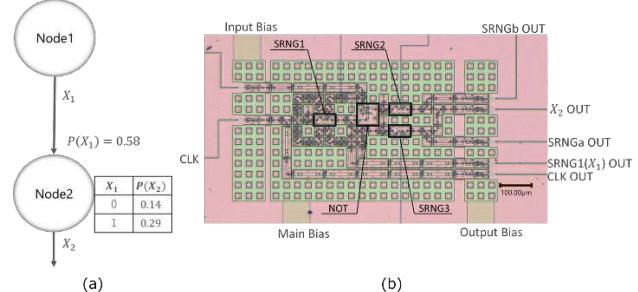


Fig.3 (a) Assumed BN and (b) microphotograph of the circuit

Fig.4はFig.3(c)の回路を液体ヘリウムに浸し、クロックを100kHzで40回入力した時の各ノード出力の電圧波形である。理論値はFig.3(a)の各値と一般的な確率計算により0.23であるが、実測値は11出力あることから11/40で0.28であった。理論値との誤差は入力数が少ないことに起因する。

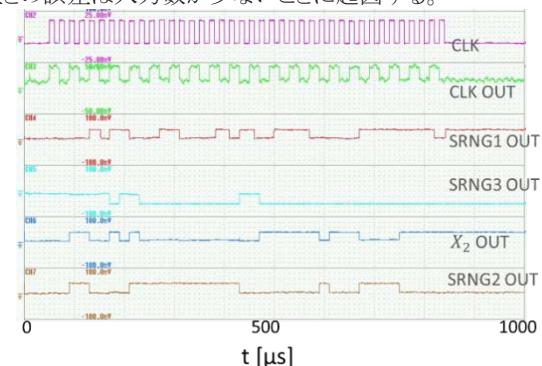


Fig.4 Measurement result

## 3. 結論

本研究ではノード数が二つの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。本手法によるプロセッサでは理論的には無限のノード数のBN解析とCPTの自在な再編集が可能である。高速性に関してはデジタルアナログ変換器を使用しないことから50 GHz以上で動作が可能である。

## 参考文献

1. R. Yamanaka, et al.: Implementation of Bayesian Network Based on Ultra-High-Speed Superconductor Random Number Generators, IEEE Access, Vol. 12(2024), pp. 129081-129086
2. 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

## 单一磁束量子回路を用いたストカスティック数 $n$ 倍器の設計

Design of  $n$ -fold-multiplier for stochastic number using single flux quantum circuits

浅香 海斗, 吉川 信行, 山梨 裕希

ASAKA Kaito, YOSHIKAWA Nobuyuki, YAMANASHI Yuki

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、ニューラルネットワーク、画像処理、ディープラーニングなど、様々な分野で応用が検討されている。SC は 2 進数数列中の“1”的出現確率を用いた数値表現であり、高いソフトエラー耐性、低消費電力性、面積効率に優れるなどの利点がある。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单一磁束量子 (Single flux quantum: SFQ)回路の SC への応用を検討している。

SC をニューラルネットワーク等へ応用するにあたって、ストカスティック数を用いた算術演算回路が必要となる。SC において、ストカスティック数(Stochastic Number; SN)同士の加算や乗算などの初等演算は簡単な論理回路で表現できるが、SN の定数倍回路はこれまで考案されていない。ここで、ニューラルネットワークでは重みづけとして数値を定数倍して次段のニューロンに入力するケースが多く、SN の定数倍回路は非常に重要な回路素子となる。本研究では、SFQ 回路特有の素子である超伝導数生成器(Superconductive Random Number Generator: SRNG)[1]を用いて、入力した SN を任意の定数倍して出力する SFQ ストカスティック数  $n$  倍器を提案する。

本発表では、SFQ ストカスティック数  $n$  倍器のベンチマーク回路として、SFQ ストカスティック数 2 倍器(Stochastic Number Doubler: SND)を提案する。

### 2. SFQ ストカスティック数 2 倍器

提案する SFQSND のブロック図を Fig.1 に示す。SRNG への clock は、Toggle Flip Flop(: TFF)を通して入力され、回路全体の clock 周波数の半分の周波数で 2 つの SRNG に対し、相補的なタイミングで clock が供給される。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”的出力確率を決定する制御電流がそれぞれ流れる。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”的存在確率に対応している。

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[2]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 パルス列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回路内で自己調整される。SRNG から出力される SFQ パルス列全体の平均電圧は、clock 周波数を  $f$ 、“1”的存在確率を  $P$ 、单一磁束量子の大きさを  $\Phi_0$  とすると、 $\bar{V} = Pf\Phi_0$  で表される。ここで、出力側 2 つの SRNG への clock 供給は TFF を通して行われるため、SRNG の clock 周波数は  $1/2f$  となる。

ここで、SRNG の出力 SFQ パルス列の平均電圧は JTL に発生する SFQ パルス列の平均電圧  $\bar{V} = Pf\Phi_0$  と等しくなることから、2 つの SRNG の“1”的出力確率は  $2P$  となる。2 つの SRNG から出力される SFQ パルス列は相補的なタイミングで出力される。したがって、2 つの SRNG からの出力を Confluence Buffer(: CB)により合成することで、元の入力 SN と同じ周波数  $f$  でかつ、入力 SN の 2 倍の SN を出力 SN として得ることができる。

Fig.1 で示す回路について、シミュレーションにより得られた入出力波形を Fig.2 に示す。このシミュレーションでは産業技術総合研究所の High-speed Standard Process(HSTP)[3]の使用を仮定した。シミュレーションは clock 周波数を 10 GHz、入力 SN の値を 0.4 として行った。Fig.2 より、clock 信号 100 bit で入力 SN が 42 bit 得られているのに対して、出力 SN が 84 bit として得られているため、入力 SN に対して出力 SN が 2 倍の値として得られることが確認できる。

Fig.1 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。SN の bit 長は 4096 bit とし、入力 SN の値を  $0.0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0$  と変化させてシミュレーションを行った。比較対象には入力 SN を  $x$  としたときの  $2x$  の理論値を用いた。Fig.3 より、シミュレーション結果と  $2x$  の理論値はほぼ一致しており、正常に出力 SN が入力 SN の 2 倍の値として得られることが確認された。

発表では、SFQSND のより詳細な性能評価、その他の SFQ ストカスティック数  $n$  倍器の設計状況を述べる。

### 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, R. Kinoshita, and N. Yoshikawa, Supercond. Sci. Technol., vol. 34, 2021.
- [3] M. Hidaka and S. Nagasawa, IEICE Trans. Electron., vol. E104-C, 2021.

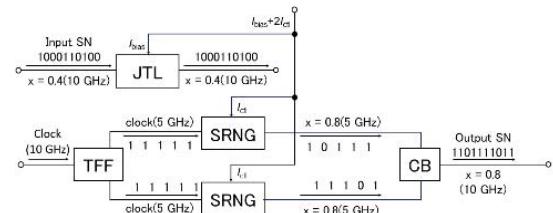


Fig. 1 Block diagram of SFQSND

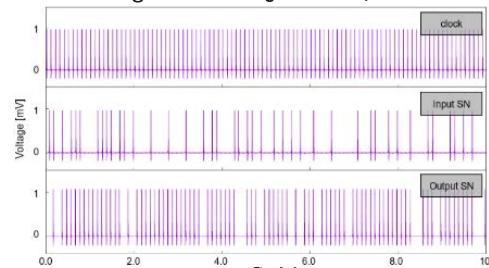


Fig. 2 Simulated waveforms of SFQSND  
Input SN is 42 bits per 100 bits of clock pulse. Output SN is 84 bits per 100 bits of clock pulse.

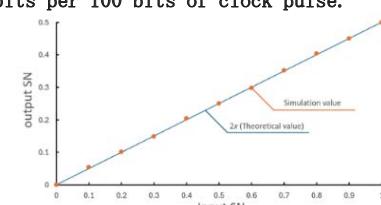


Fig. 3 SFQSND input/output characteristics

## Bi2212 固有ジョセフソン接合からの周波数変調テラヘルツ波放射

### Frequency-modulated terahertz radiation from Bi2212 intrinsic Josephson junction

掛谷 一弘, 宮本 将志, 杉本 啓太郎, 小林 亮太(京都大学); 辻本 学(産業技術総合研究所)  
KAKEYA I, MIYAMOTO M, SUGIMOTO K, KOBAYASHI R (Kyoto Univ.); TSUJIMOTO M (AIST)

E-mail: kakeya@kuee.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

銅酸化物高温超伝導体単結晶に含まれる固有ジョセフソン接合(IJJ)積層の同期ジョセフソン振動に伴うテラヘルツ領域の電磁波放射、ジョセフソンプラズマ放射(JPE)は高温超伝導体のテラヘルツ光源への応用として注目されているだけでなく、相互作用する非線形振動子集団の多体問題や非線形光学現象の舞台として学術的にも興味深い[1,2]。著者らは、JPEのバイアス電圧にギガヘルツ領域の周波数の高速変調を加えて、発振スペクトルを観測し、放射されるテラヘルツ波が周波数変調されていることを明らかにした[3]。この成果は、JPEをテラヘルツ無線通信に応用できる可能性を強く示すものであり、著者らは量子計算システムにおけるクライオスタット内部のデータ通信用のテラヘルツ量子インターネクションへの展開を提案する。

#### 2. バイアス変調ジョセフソン接合と周波数変調スペクトル

ジョセフソン接合に周波数 $f_m$ の変調バイアス

$$V(t) = V_0 + V_m \cos(2\pi f_m t) \quad (1)$$

を加えたとき、ジョセフソン接合における位相差の時間発展は、

$$\varphi(t) = \frac{2eV_0}{\hbar}t + \frac{2eV_m}{\hbar f_m} \sin(2\pi f_m t)$$

で与えられる。この時、ジョセフソン電流に流れる電流 $J_c \sin \varphi(t)$ は周波数変調電磁波の電場

$$s_{\text{FM}}(t) = A_c \sin(\omega_c t + m_f \sin 2\pi f_m t)$$

と同じ形をしており、ジョセフソン電流に従った電磁波が放射されるならば、FM電波と同様の

$$I_{\text{FM}}(f) = \frac{1}{2} A_c^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(m_f) \delta(f - nf_m) \quad (2)$$

であらわされる、 $f_m$ 間隔の歯を有する櫛状のスペクトルが得られるはずである。

JPEでは、交流ジョセフソン効果に従って IJJ 当たりの電圧に比例する振動数の電磁波を放射する[4]。これは、固定されたバイアス電圧での放射電磁波を FTIR 分光した結果であり、電圧の高速変調に放射周波数が追随するかどうかは明らかではない。さらに、放射周波数の変化は、デバイスの局所的温度上昇に由来するという指摘もあり、超伝導デバイスの物性としても興味深い問題である。

半導体テラヘルツ光源では、発振周波数は素子構造や付属回路により決まっており、広帯域の周波数変調は原理上不可能といえる。瞬時電圧に対応した周波数のコヒーレント電磁波が放射される超伝導デバイス独自の特性である。

#### 3. 周波数変調スペクトル

素子に無変調の直流電圧を加えて 860 GHz 付近にユニモーダルなスペクトルが得られる条件に、3 GHz の電圧変調を重畠した場合のスペクトルを Fig. 1 に示す。ここで、信号発生源の出力は 25 dBm であり、デバイスに加わっている変調振幅 $V_m$ はバイアス回路のインピーダンスに依存する。赤色が実験データであり、青色の棒グラフが式(2)において $f_m = 3 \text{ GHz}$  および $m_f = 5.7$ とした時の理想的 FM スペクトルである。スペクトルの全体的な傾向だけでなく、櫛の歯の高さ比まで驚くほど一致している。変調振幅を減少させていくと、変調周波数幅、すなわち櫛の歯の数が減少し、-5 dBm 程度で見慣れたユニモーダルなスペクトルに変わる[4]。

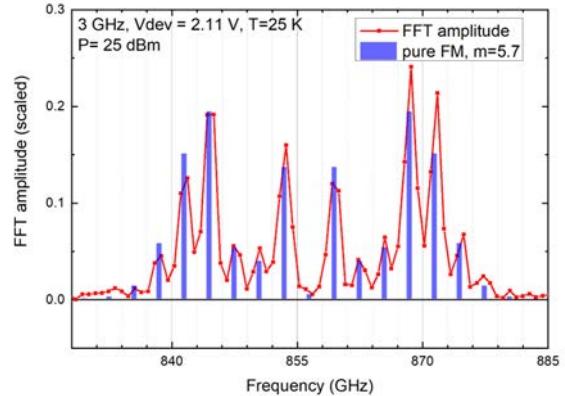


Fig.1: Frequency modulated spectrum radiated from an intrinsic Josephson junction stack.

上述の変調条件を維持して、式(1)における $V_0$ を与えるバイアスオフセット電圧を変化させると、中心周波数が  $\frac{2eV_0}{\hbar}$  に応じて変化する。JPE における放射スペクトル強度である式(2)における  $\frac{1}{2} A_c^2$  は周波数に依存し、今回のデバイスの無変調バイアス条件では、835–930 GHz の範囲でスペクトルが観測されている。Fig.1 が観測される条件で、発振領域の中心から  $V_0$  を減少させていくと、スペクトルの低周波端数が 835 GHz を明らかに下回っていても、明瞭なピークが観測された。一方、 $f_m = 10 \text{ kHz}$  の低速変調での FM サイドバンドの拡がりは、無変調時と同一の周波数範囲に限られている。

この現象は、時間変化する電圧がバイアスされた積層 IJJ 系において、発振周波数が瞬時電圧に即応している一方で、発振強度は有限時間の遅れを伴って周波数変調に追随していると考えると矛盾なく説明できる。つまり、積層 IJJ が同期するための緩和時間が変調周期に対して長い場合、無変調時の発振周波数領域を超えてサイドバンドスペクトルが観測される、と解釈できる。変調周波数を少しずつ変えて FM スペクトルを観測していくことで、長年の疑問であった積層 IJJ 間の同期緩和ダイナミクスを観測することができる、学術的にもきわめて興味深い成果である。

本研究は科研費 24K00946, 23K17747, 20H02606、京都大学学内ファンドいしづえにより支援されている。

#### 参考文献

- [1] L. Ozyuzer et al.: *Science* **318**, 1291 (2007).
- [2] I. Kakeya and H. Wang: *Supercond Sci Technol* **29**, 073001 (2016).
- [3] M. Miyamoto, R. Kobayashi, G. Kuwano, M. Tsujimoto, and I. Kakeya: *Nat Photonics* **18**, 267 (2024).
- [4] M. Tsujimoto et al.: *Phys Rev Lett* **108**, 107006 (2012).

# 超電導リザバーの著しい精度向上及びピン力と精度との相関の調査

## Investigation of significant improvement in accuracy of superconducting reservoirs and correlation between pin force and accuracy

有田 勲, 小田部 莊司, 宇佐美 雄生, 田中 啓文(九州工業大学); 松野 哲也(有明高専)  
 ARITA Ken, OTABE Edmund, USAMI Yuki, TANAKA Hirofumi (Kyutech); MATSUNO Tetsuya (NIT-Aritake)  
 E-mail: arita.ken229@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

物理リザバーコンピューティングは、非線形な物理現象を利用して様々な時系列データの予測を行うことができる Artificial Intelligence (AI) 技術の一種である。第 2 種超電導体はリザバーコンピューティングに応用可能と報告されている [1]。従来法では、超電導リザバーに入力する乱数時系列データに一定の時間間隔ごとに変化するパルス値を採用したが、その予測精度が低く演算精度向上が課題であった。本研究では入力値をその前後の値と線形補完することにより、入力情報の追従性を高め精度の変化を調べた。また、ピンや温度に関する条件を変更しながらリザバーコンピューティングのタスクを行い、ピン力や温度と超電導リザバーの予測精度との関係について調査した。

### 2. 計算方法

まず、AFI (Affine Integrator) [2]を用いて TDGL (Time-dependent Ginzburg Landau) 方程式

$$\frac{d\psi}{dt} = (\nabla - i\mathbf{A})^2 \psi + \alpha\psi - \beta|\psi|^2\psi \quad (1)$$

の数値シミュレーション行い 2 次元超電導領域を可視化した。 $\psi$  はオーダー パラメータ、 $\mathbf{A}$  はベクトルポテンシャル、 $\alpha, \beta$  は幕展開係数である。そこへ入力として電流密度の乱数時系列データを与え、可視化した領域から 50 個の点を選択しその点での電界の時系列データを出力として取り出し、これをリザバーとした。このとき、従来法ではパルス値をそのまま入力していたが、本研究では、入力値をその前後の値と線形補完した。次に、得られた電界値を用いて Nonlinear Autoregressive Moving Average 2 (NARMA2) タスクを行い、その予測精度が従来法と比較してどのように変化するのかを調査した。

続いて、本手法においてピンや温度などの条件を変化させたとき、予測精度がどのように変化するのかを調査した。まず、ピンの強さを変化させるためにピンがある位置の  $\alpha$  を -20 から 20 まで 5 ずつ変化させそれぞれの  $\alpha$  に対する精度を計算しグラフにまとめた。このときピンの数は 30 個とした。次に、ピンを 5 個縦向きに並べたものを 2 列用意し、中心付近に 2 列並べた状態から、左右両方向に空間刻み幅 5 ずつげていったときのそれぞれの精度を計算しグラフにまとめた。最後に温度に変化を与えるためにピンの無い位置での  $\alpha$  を -10 から -50 まで 5 ずつ変化させそれぞれの  $\alpha$  に対する精度を計算しグラフにまとめた。本研究では、予測精度として R Squared ( $R^2$ ) を採用した。

### 3. 結果及び考察

本手法を用いた NARMA2 タスクに関する結果を Fig. 1 に示す。図より、目標波形に対して予測波形が追従しており、概ね正しく時系列予測ができることがわかる。具体的な数値で比較しても従来法では  $R^2 = 0.16$  であったのに対して、本手法では  $R^2 = 0.84$  と大幅な精度の向上が見られた。パルス値で入力を与えていた従来法では、入力値の変化が急峻となり、本来用いたい情報のほかに余計な高周波成分が含まれていたために予測が困難となっていた。本手法では入力値を前後の値と線形補完したことによって高周波成分が切り落とされ予測精度が向上したと考えられる。

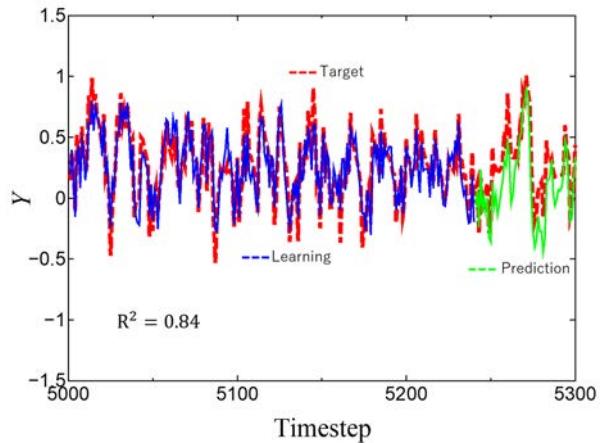


Fig. 1 prediction results for the NARMA2 task in this method

続いて、条件変更に関する調査のうち温度を変化させた場合の結果を Fig. 2 に示す。ピンに関する条件変更に関しては、強さを変化させた場合も位置を変化させた場合も NARMA2 タスクにおいて精度に変化は見られたものの、上昇傾向も下降傾向も示さなかった。温度を変化させた場合、 $|\alpha|$  が大きくなるとともに精度が向上していくという結果が得られた。したがって、温度が低いほど超電導リザバーの性能は向上すると言える。要因として、温度が低いほど量子化磁束が熱的擾乱の影響を受けにくくなり、発生する電界に正しく入力の電流密度の情報が伝わりやすくなることが考えられる。

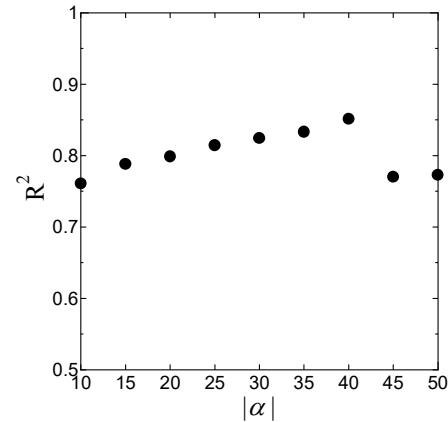


Fig. 2 Relationship between temperature and  $R^2$  in NARMA2

### 4. 結論

超電導リザバーに関して、入力を従来のパルス値から線形補完したものに変え、予測精度の大幅な改善に成功した。また、ピンに関する条件を変化させながらリザバーコンピューティングのタスクを行い、ピンの変化は精度に大きな影響を与えないことがわかった。同様に温度に関する条件を変え同タスクを行い、温度が低いほど予測精度が向上することが明らかになった。

### 参考文献

1. K. Arita, et al.: Physica C, Vol. 622 (2024) 1354522.
2. T. Matsuno, et al.: J.Phys. Soc. Japan 89 (2020) 054006.

# HTS-SQUID と差分型検出コイルを用いた高感度交流磁化特性評価システムの開発

## Development of a high-sensitivity AC magnetization measurement system using HTS-SQUID and differential detection coil

倉知 侑希, 佐藤 祐喜, 堀 健司 (同志社大学)  
 KURACHI Yuki, SATO Yuuki, SAKAI Kenji (Doshisha University)  
 E-mail:::ctwj0329@mail4.doshisha.ac.jp

### 1. 緒言

磁気ナノ粒子 (MNPs: magnetic nanoparticles) を用いた磁気免疫検査法は前処理工程が少なく、短時間の検査が可能であり、病気の新規診断法として期待されている。しかし、高精度な検査を行うには事前に MNPs の交流磁化特性を詳細に評価する必要がある。さらに、実際の免疫検査で用いる MNPs の濃度は薄く、また、病気の早期発見のために微量な特定物質の検出が必要になる。このような条件下では、MNPs からの磁気信号が非常に小さく、MNPs の基礎特性評価にも高感度な評価システムが求められる。そこで、本研究では MNPs の交流磁化特性を高感度計測可能な装置実現のために、超高感度磁気センサの HTS-SQUID を用いた交流磁化特性評価システムを開発した。開発したシステムは SQUID と常伝導検出コイルを用いた分離検出方式であり、今回は差分型の検出コイルを用いることで強印加磁場下でも SQUID の安定動作を実現し、交流磁化特性の高感度評価を試みた。

### 2. 測定方法

Fig. 1 に本システムの概要図を示す。HTS-SQUID への強磁場の印加を避けるために、検出コイルと直列に繋いだ超伝導入力コイルと HTS-SQUID を磁気的に結合させた分離検出方式とした。検出コイルは磁気シールド内に設置しサンプルからの応答磁場を検出する信号検出用コイルと、試料なしの差分用検出コイルを用いた差分型検出コイルを使用した。2つのコイルの印加コイルを順方向に配線することで2つの検出コイルに同じ大きさの交流磁場を印加できる。また、検出コイルは逆方向に配線することで、印加磁場や環境磁気ノイズを相殺し、サンプルのみの信号を検出することで SQUID の安定動作が可能となる。ロックインアンプを用いて HTS-SQUID の出力から検出磁場の実部と虚部を測定した。測定では、信号検出用コイルにサンプルを入れず測定し、コイルの周波数特性を補正することで交流磁化率の実部と虚部を算出した。

### 3. 測定試料

磁気ナノ粒子は Plain beads (多摩川精機株式会社、粒子濃度 20mg/ml) と、BNF-Dextran (micromod 社、粒子濃度 25mg/ml) を純水で10倍希釈し、マイクロチューブに入れて

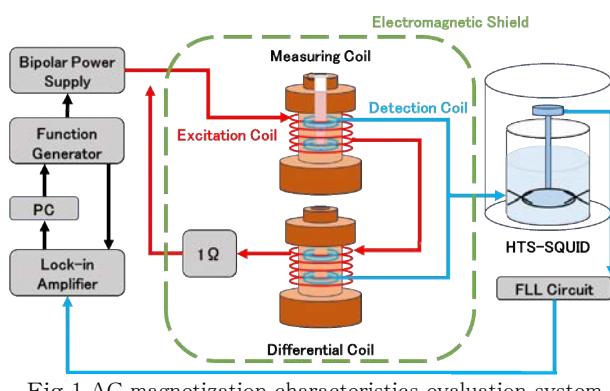


Fig.1 AC magnetization characteristics evaluation system

測定した。Plain beads はタンパク質のアフィニティ精製に用いられる磁気ナノ粒子で、粒子径は約 200nm である。また、BNF-Dextran はナノフェライト粒子をデキストランで被覆した磁気ナノ粒子で、粒子径は約 100nm である。

### 4. 測定結果

開発したシステムを用いて MNPs を測定した結果を Fig. 2 に示す。液相における粒子の緩和機構はブラウン緩和が支配的であり、ある周波数で実部の減衰が起こると同時にその周波数付近で虚部が極大となる。この周波数は粒子径によって異なり、粒子径が大きいほど低周波側、小さいほど高周波側となる。Fig. 2 より、FG beads が約 100Hz、BNF-Dextran が約 200Hz でピークを示し、前述したブラウン緩和の理論式から推定される結果と定性的に一致した。この結果より、開発した評価システムで MNPs の交流磁化特性の可能であり、今後システムの最適化を行うことで高感度評価が可能と考えられる。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、岡山大学の紀和利彦教授にご協力を頂きました。心より感謝致します。

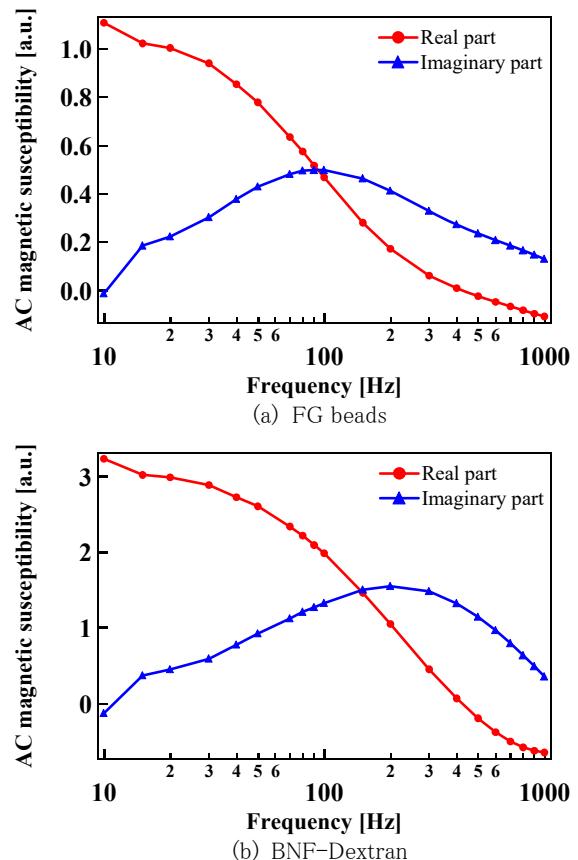


Fig.2 Frequency response of AC susceptibility for MNPs

# 火力発電ボイラー内伝熱管の健全性評価のための高温超伝導 SQUID ベースの渦流探傷試験技術の開発 一その 1—

## HTS-SQUID-based Eddy Current Testing for Thermal Tubes of Boiler in Thermal Power Plant -No.1-

廿日出 好 (近畿大学); 杉内栄夫 (中国電力株)  
HATSUKADE Yoshimi (Kindai Univ.); SUGIUCHI Takao (The Chugoku Electric Power co., inc.) E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では、超々臨界圧火力発電所内ボイラーの火SUS304J1HTB 伝熱管に発生する内圧クリープ損傷を早期検出し、故障予知・寿命予測を行える保守技術の開発を試みた。火SUS304J1HTB 伝熱管に発生するクリープ劣化を検出する技術として、低周波数でも高感度な高温超伝導 (High Temperature Superconductor: HTS) SQUID と渦電流探傷試験 (Eddy Current Testing: ECT) プローブを組合せた装置を開発した。また、開発した装置を用いて内圧クリープ試験を行った火SUS304J1HTB 伝熱管の測定・欠陥検出実験を行い、余寿命評価実現の可能性について検討した。本稿では、開発した装置とその性能について示す。

### 2. HTS-SQUID ベースの渦流探傷試験装置

開発した装置は、ボイラー内の使用中の伝熱管にも適用できるように、管の表面にアクセスする ECT プローブを開発した。装置の概略図を Fig.1 に示す。装置は、ECT プローブ、プローブと接続して信号読み出しを行う HTS-SQUID グラジオメータ、クライオスタット、配管走査システム、電流源、計測機器などから構成される。ECT プローブは、プローブ中央にコの字型の差動型検出コイルを配置し、そのコイルのベースラインと直交するコの字型コア入り励磁コイルを、検出コイルの外側に配置した。検出コイルは、HTS-SQUID グラジオメータの上にフリップチップ配置した入力コイルと接続して磁束トランスを構成し、検出コイルに誘導された信号は SQUID で読み出される。励磁コイルは電流源と接続し、低周波数電流をコイルに流して配管に渦電流を発生させる。配管走査システムは、プローブと管を保持して 3 次元的に移動・回転させることで、プローブと管のリフトオフを一定に保った状態で配管周辺の電磁応答分布を測定する。SQUID 出力はロックイン検出され、PC に記録され、配管の電磁応答はカラーコンターマップとして可視化される。

### 3. 試験装置の性能

開発した装置の性能を評価した。HTS-SQUID グラジオメータ単体の磁束ノイズレベルは約  $10\sim15 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$  であったが、ECT プローブと接続するとノイズフロアは約 1 衍増加した。次に、2~4 mm までの直径の穴を SUS304 配管に開けて人工欠陥を作り、装置を用いて配管の電磁応答を測定した。SQUID を用い ECT プローブの出力を直接ロックイン検出した場合と、SQUID を用いて ECT プローブの出力を読み出した場合の測定を行った。コイルには 2.4 kHz で前者では 2 A、後者では 0.02 A の振幅の正弦波電流を流した。測定した応答分布と点線における信号波形を Fig. 2 に示す。SQUID を読み出しに用いた方が高い信号雑音比が得られた。SQUID で読み出した穴欠陥からの応答信号強度と穴欠陥の直径の関係を Fig. 3 に示す。信号強度と穴直径はおよそ比例した。システムのノイズレベルは 1 mV 未満であり、本装置によりサブ mm サイズの欠陥を検出できる可能性が示された。

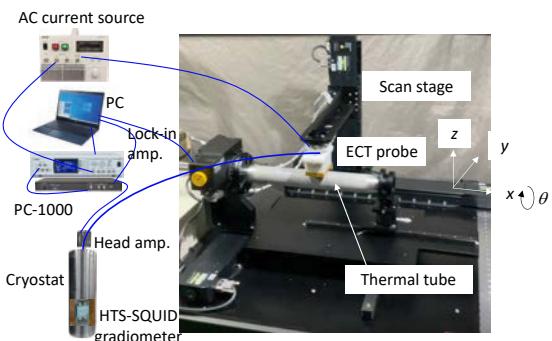


Fig. 1 HTS-SQUID-based eddy current testing system for thermal tube.

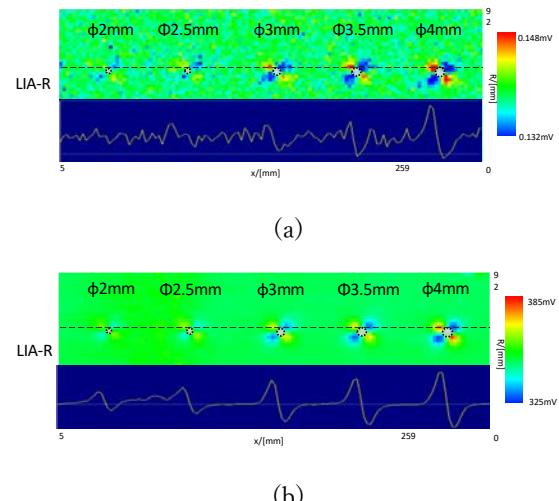


Fig. 2 Measurement results on SUS304 tube with artificial holes. (a) ECT probe only. (b) ECT probe with HTS-SQUID.

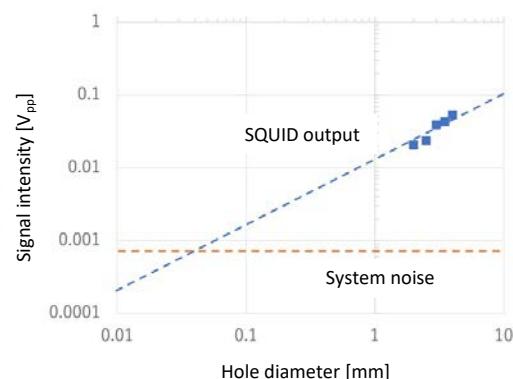


Fig. 3 Hole diameter vs. signal intensity due to hole.

# 火力発電ボイラー内伝熱管の健全性評価のための高温超伝導 SQUID ベースの渦流探傷試験技術の開発 一その 2一

## HTS-SQUID-based Eddy Current Testing for Thermal Tubes of Boiler in Thermal Power Plant -No.2-

廿日出 好 (近畿大学); 杉内 栄夫 (中国電力㈱)  
HATSUKADE Yoshimi (Kindai Univ.); SUGIUCHI Takao (The Chugoku Electric Power co., inc.)  
E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では、超々臨界圧火力発電所内ボイラーの火 SUS304J1HTB 伝熱管に発生する内圧クリープ損傷を早期検出し、故障予知・寿命予測を行える保守技術の開発を試みた。火 SUS304J1HTB 伝熱管に発生するクリープ劣化を検出する技術として、低周波数でも高感度な高温超伝導 (High Temperature Superconductor: HTS) SQUID と渦電流探傷試験 (Eddy Current Testing: ECT) プローブを組合せた装置を開発した。また、開発した装置を用いて内圧クリープ試験を行った火 SUS304J1HTB 伝熱管の測定・欠陥検出実験を行い、余寿命評価実現の可能性について検討した。本稿では、開発した装置を用いた内圧クリープ試験サンプルの測定結果について示す。

### 2. 内圧クリープ試験と渦流探傷試験

本研究で対象とした火 SUS304J1HTB 伝熱管は、超々臨界圧火力発電所ボイラ内で 600°C・25 MPa 程度の温度・圧力下で使用されている。ここでは内圧クリープ試験用サンプルを 6 本用意し、700°C・110 MPa の条件による内圧クリープ試験を実施した。試験時間はおよそ 2,500 時間、5,000 時間、7,000 時間、9,000 時間、および破断までの時間とした。それぞれの時間で内圧クリープ試験を中断してサンプルを取り出し、開発した渦流探傷装置での検査、および断面の顕微鏡撮影、物性測定等を実施した。渦流探傷装置での検査は、長さ 345 mm、外径 50.8 mm、厚さ 4 mm の部分を約 0.5mm のリフトオフで実施し、管全周辺の電磁応答分布を測定した。測定ではコイル内径の最小 2mm 角の検出コイル A と、9mm×12mm の検出コイル B を用いた。励磁コイルに流した電流は振幅 20~100 mA、管厚さ 4 mm に浸透する 1.6 kHz の周波数を選択し、測定結果は電流振幅で規格化した。

### 3. 内圧クリープ試験サンプルの測定結果

測定したサンプルの中で、破断まで至ったサンプル T4 と T6 の測定結果を Fig. 1 に示す。9 mm×12 mm の検

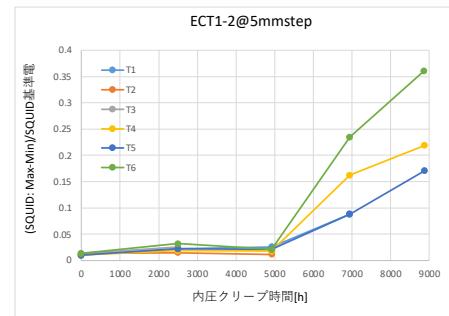


Fig. 2 Maximum anomalous signal vs. creep test time

出コイル B を使用した。約 5000 時間試験したサンプルの測定端で異常信号が現れており、断面観察の結果、表面の酸化膜の発生・進展に由来するものと推測された。試験時間が約 7000 時間を経過すると酸化膜由来と思われる欠陥信号は広い範囲で現れ、信号振幅も急激に増大した。サンプル T4 では 9435.5 時間で、T6 では 8855 時間で破断が生じた。約 9000 時間を超えると異常磁気応答分布が図の横方向すなわち軸方向に帯状に見られ、分布の一部で破断が生じていた。各内圧クリープ試験時間と、測定された異常信号部の最大値を、欠陥が無い部分の SQUID 出力値で規格化した値の関係を、破断が生じた T4 から T6 について Fig. 2 に示す。約 7000 時間から異常信号振幅が増加した。これらの異常信号の位相情報を調べた結果、一部が管内部の欠陥に由来する可能性が示唆された。一方、この時間における断面観察結果からは、内部に亀裂はほとんど生じていなかった。以上より、本装置により測定された異常信号の一部は、内圧クリープ試験に起因する亀裂以前の管内部での導電率変化に由来していると推測された。この導電率変化は、歪と相関の高かったアルファ相や粒界介在物の成長によるものと考えらる。

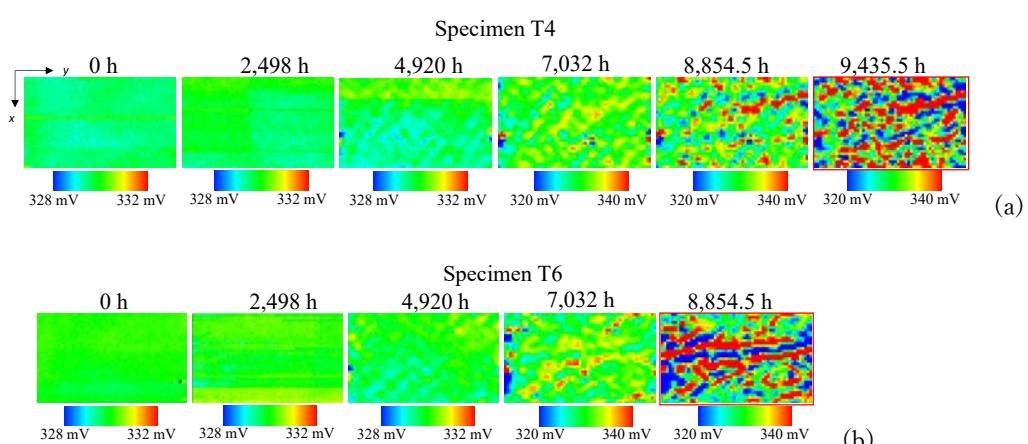


Fig. 1 Measurement results on KA-SUS304J1HTB specimen tubes under internal pressure creep test. (a) T4. (b) T6.

# 高耐電力超伝導フィルテナの開発

## Development of High-Power Superconducting Filtenna.

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

### 1. はじめに

マイクロ波無線電力伝送では、伝送効率が数%程度と非常に低く、効率の改善が必要である。超伝導パッチアンテナを用いることにより、伝送効率の改善が期待できる。しかし、超伝導体には流せる電流に限界があり、超伝導パッチアンテナの耐電力特性は1 W以下と低く[1]、マイクロ波送電に求められる耐電力特性を満たしていない。一方、超伝導バンドパスフィルタの耐電力特性は40 Wを超える[2]、超伝導パッチアンテナより高い耐電力特性を有している。我々は、超伝導アンテナの耐電力特性が低い原因是、アンテナはフィルタより非常に狭帯域であり、帯域が狭いほど電流の滞在時間が長くなる[3]ため、アンテナ端部に電流が強く集中し臨界電流密度を超える超伝導状態を保てなくなるためであると考えた。そこで、アンテナの広帯域化の方法として、今回はフィルタとアンテナを組み合わせることで帯域幅を任意に決め、帯域幅を大きく広げができるフィルタリングアンテナ(フィルテナ)[4]を用いた。

本研究では、超伝導アンテナの広帯域化のため、フィルタとアンテナを組み合わせた超伝導フィルテナを設計し、電流集中を低減し、耐電力特性を向上した超伝導フィルテナを開発したのでその詳細について報告する。

### 2. 超伝導フィルテナの設計

フィルタの等価回路をFig.1(a)に、フィルテナの等価回路をFig.1(b)に示す。フィルテナはフィルタの最終段の共振器と給電線を放射素子に置き換えることで設計できる。超伝導フィルテナでは、各設計値を個別に調整できるように積層構造を用いた。また、耐電力特性を最大にするために共振器とアンテナは正方形形状を用い、給電方法はギャップ給電を用いて電流集中を低減した。フィルテナを2段で中心周波数が5 GHz、帯域幅が100 MHz、帯域内Rippleが-0.1 dBの設計条件とし、フィルタ回路合成理論を用いて設計した[4]。超伝導薄膜はYBCO(導電率 $3 \times 10^{11}$  S/m)、基板は50 mm角のr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(比誘電率9.9、誘電正接 $1 \times 10^{-7}$ 、基板厚0.5 mm)を用いた。設計した超伝導フィルテナをFig.2に示す。

### 3. 周波数特性と電流密度の計算

シミュレーションの結果、従来の超伝導パッチアンテナの帯域幅(12 MHz)より超伝導フィルテナの帯域幅(100 MHz)を約9倍に広げた。アンテナと、フィルテナに流れる電流を計算すると、アンテナに流れる電流の最大値は275 A/mであったのに対し、フィルテナに流れる電流は116 A/mであり、流れる電流を約60%低減した。耐電力特性は $P \propto I^2$ の関係から2乗倍向上すると考えられ、耐電力特性は約5倍向上すると予想される。

### 4. 超伝導フィルテナの作製と評価

Fig.3に作製した超伝導フィルテナを、Fig.4に超伝導パッチアンテナと超伝導フィルテナのシミュレーションの周波数特性と、超伝導フィルテナの測定した周波数特性を示す。誘電率の異方性と基板とGNDとの隙間により誘電率が変化したため周波数が高周波側にずれている。フィルテナの帯域幅は91 MHzとなり、パッチアンテナの帯域幅10.3 MHzより約9倍広帯域となった。耐電力測定の結果、超伝導フィルテナの耐電力特性は45 dBm(34 W)であり、広帯域化により耐電力特性が大幅に向上した。測定の詳細は当日述べる。

### 5. まとめ

超伝導アンテナの耐電力特性を向上するために帯域幅を広げることのできる超伝導フィルテナの設計を行った。結果、超伝導フィルテナにすることで、帯域幅を9倍に広げ、流れる電流を約60%低減した。耐電力測定の結果、超伝導フィルテナの耐電力特性は34 Wと大幅に向上した。

### 参考文献

- [1] K.Ehata et al., Electronics and Communication in Japan **82** (1999) 915
- [2] N.Sekiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, (4) 2017
- [3] 加屋野博幸 et al., 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J90-C, No.3, pp.188-196, 2007
- [4] M.Ohira et al., 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-4, 2015

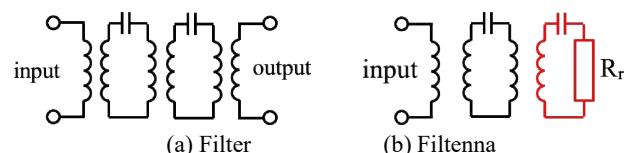


Fig.1 Equivalent circuit

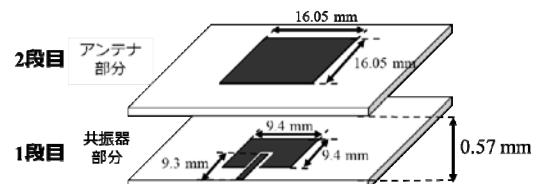


Fig.2 Structure of superconducting filtenna

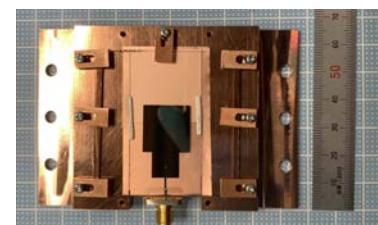


Fig.3 Photograph of superconducting filtenna

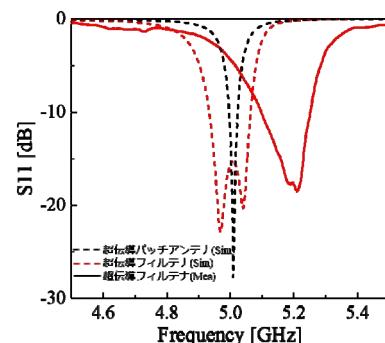


Fig.4 Frequency response of superconducting antenna and superconducting filtenna

## 大気中で作製したSmBCO超伝導バルクの捕捉磁場特性

### Trapped field characteristics of SmBCO superconducting bulk grown in air

芦生 龍太郎, 箱石 裕人, 内藤 智之(岩手大)  
ASHIOI Ryutaro, HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)  
E-mail: s0421001@iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

LREBCO超伝導バルク磁石(LRE:軽希土類元素)はYBCOバルクに比べて高い超伝導転移温度 $T_c$ と臨界電流密度 $J_c$ を有しているため、高い磁場を捕捉できる可能性がある。しかしTSMG(Top Seeded Melt Growth)法により大気中でLREBCOバルクを作製すると、LRE/Ba固溶置換により $T_c$ や $J_c$ が著しく低下する。そのため、LREBCOバルクの作製は上記の置換が抑制される低酸素分圧下で行われているが、雰囲気制御は高コストであり、1%酸素であるため再現性が取りにくい。そこで本研究では雰囲気制御を必要としない大気中においてSmBCOバルクを作製することを目的とした。

#### 2. 実験方法

原料粉末は豊島製作所製の SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(Sm123)とSm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>(Sm211)を使用し、100wt%SmBCO [ Sm123 : Sm211=3:1(モル比) ] + 0.5wt% CeO<sub>2</sub>+ 3wt% BaO<sub>2</sub>となるように秤量・混合を行った。添加物である CeO<sub>2</sub>には Sm211(磁束ピン止め点)の微細分散効果があり、BaO<sub>2</sub>には Sm/Baの固溶置換を抑制する効果がある[1]。混合粉末 20g を 50 MPa で1軸プレスし、Φ20mm×t15mm の圧粉体に成型した後、BufferペレットおよびNd123/MgO薄膜種結晶を用いたTSMG法により、反応性の低いZrO<sub>2</sub>のボールの上で結晶成長を行った。得られたバルクは $T_c$ 制御のため酸素雰囲気下で350°C-150hの酸素富化処理を行った。

作製したSmBCOバルクはFC(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SmBCO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った。

#### 3. 結果と考察

Fig.1に結晶成長後のSmBCOバルクの外観を示す。図よりSmBCOに含まれる液相Ba-Cu-OとZrO<sub>2</sub>のボールが過剰に反応していることがわかり、結晶成長が途中で停止していることが確認できる。これはGdBCOバルクやYBCOバルク作製時には見られず、結晶成長温度が高いことが原因であると考えられる。また液相ロスはバルク中のSm濃度を高めるため、Sm/Ba置換が促進される可能性がある。

Fig.2にSmBCOバルク、GdBCOバルク(酸素処理 400°C-150h)、YBCOバルク(酸素処理 450°C-150h)それぞれの磁化の温度依存性を示す。YBCOバルクに比べてGdBCOバルク、SmBCOバルクは $T_c$ が高いことが確認できる。しかし、SmBCOの超伝導転移はプロードであり、上記の予想通りSm/Ba置換が発生していると考えられる。

Fig.3に77KにおけるSmBCOバルク、GdBCOバルク、YBCOバルクそれぞれの捕捉磁場分布を示す。バルクサイズはすべてΦ17mm×t6mmである。3つのバルクを比較すると、 $T_c$ が高くLRE/Ba置換が発生しにくいGdBCOバルクの捕捉磁場が最も高かった。またLREを用いているSmBCOバルクはYBCOバルクとほぼ同じ捕捉磁場を示し、GdBCOバルクに比べて捕捉磁場が低かった。これはSm/Ba固溶置換によって、 $T_c$ や $J_c$ が大きく低下したためであると考えられる。そのためSm/Ba置換を抑制できればYBCO以上、GdBCOと同等の捕捉磁場値を得られる可能性がある。

講演では液相とZrO<sub>2</sub>のボールとの反応によって生じる前駆体からの液相ロスの対策などと併せて発表をする。

#### 参考文献

1.M. Muralidhar *et al.*, Physica C **484** (2013) 108-111



Fig.1 Appearance of SmBCO bulk after crystal growth

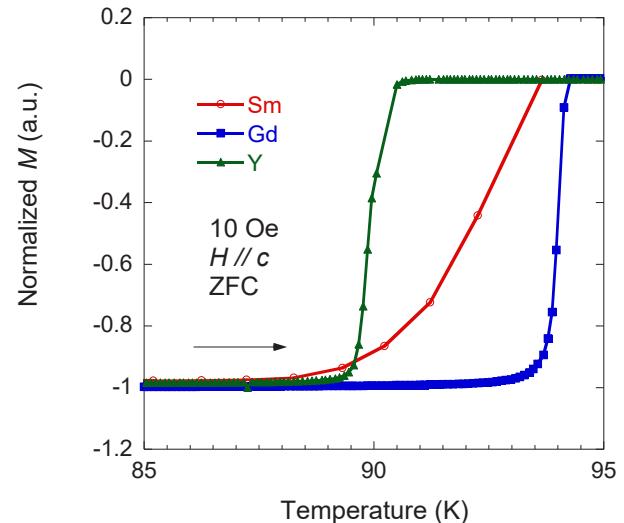


Fig.2  $M$ - $T$  curves of the SmBCO, GdBCO and YBCO bulks. (buffer pellet 1mm below, center)

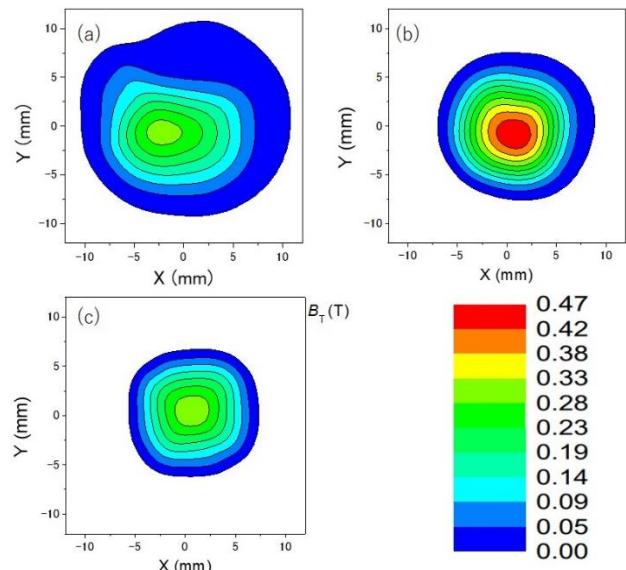


Fig.3 Trapped field distributions of (a) SmBCO, (b) GdBCO and (c) YBCO bulks at 77 K.

## 超電導バルクの機械特性向上に向けた研究

### Research towards improving the mechanical properties of superconducting bulk

赤坂 友幸, 石原 篤, 恩地 太紀, 矢野 俊, 富田 優 (鉄道総研)  
AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, ONJI Taiki, YANO Suguru, TOMITA Masaru  
 (RTRI)  
 E-mail: akasaka.tomoyuki.65@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

超電導バルクは極低温下で高磁場まで高い臨界電流密度を有するため、コンパクトで強い磁場発生が実現できる。超電導バルクの特性向上と大型化に伴って、捕捉できる磁場の大きさが飛躍的に向上し、永久磁石では実現できない磁場が捕捉可能である[1]。しかしながら、捕捉磁場が増加すると、電磁力も増大するため、材料強度の面から捕捉磁場が制限されるという問題がある[2]。よって、超電導バルクの捕捉磁場を向上するには、機械的特性の向上が重要となっている。超電導バルクの強化方法としては、Agの添加[3] や金属リングによる補強[4]が提案され、有効な手段として活用されている。

これまで我々は、優れた捕捉磁場特性を有するRE系超電導バルク[5]、MgB<sub>2</sub>超電導バルク[6]の開発を行ってきた。本研究では、超電導バルクの機械的強度向上に向け、金属を用いて含浸する手法について提案し、その有効性について検討を行った結果を報告する。

#### 2. 金属含浸を施した超電導バルクの特性評価

超電導バルクは昇温とともに捕捉磁場が小さくなり、ある温度以上では失われてしまうことが知られており、この現象は外乱に伴う局所的な発熱によっても観測されている。そのため、超電導バルクの応用に際しては、放熱特性の向上が必要であり、合金溶射法による金属皮膜処理を行った。合金溶射法は、合金を加熱して溶融し、対象物に吹き付けることで金属皮膜を形成する方法である。作製したRE系超電導バルクに対し、低融点合金を用いて合金溶射を行った。この合金溶射法を繰り返した超電導バルクを観察した結果をFig. 1に示す。溶融した合金がRE系超電導バルクに衝突し、比熱の差から急冷、凝固されることで表面に金属皮膜が形成される様子が見て取れる。合金溶射法を繰り返すことで、超電導バルクに十分な厚みの金属皮膜を形成させた。また、金属皮膜を形成させた超電導バルクに対し、液体窒素中にヒーターにより熱を加えた。温度の時間履歴をFig. 2に示す。合金溶射法により温度上昇を抑えられていることが分かった。このことから、合金溶射法によってバルク体の放熱特性を改善できていることが分かった。

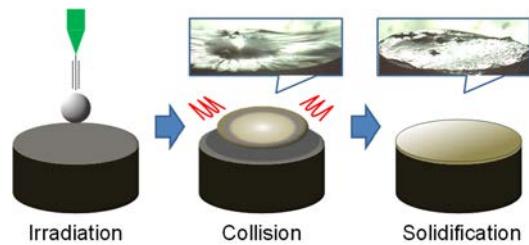


Fig.1 Superconducting bulks applied metal spraying method

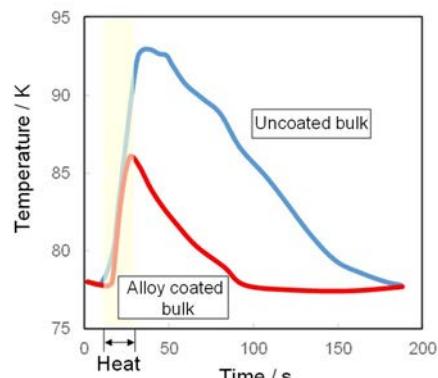


Fig.2 Temperature of the superconducting bulk applied metal spraying method

#### 参考文献

1. H. Ikuta, A. Mase, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka and U. Mizutani: Supercond. Sci. Technol. 11 (1998) 134
2. 生田博志, 岡徹雄, 水谷宇一郎: 応用物理 68 (1999) 403
3. F. Yen and K. W. White: Jpn. J. Appl. Phys. 30.09 (1991) 4989
4. M. Morita, K. Nagashima, S. Takebayashi, M. Murakami, T. Kaneko and T. Tokunaga: Proceedings of International Workshop on Superconductivity (1998) 115
5. M. Tomita et al., Nature 421, 517 (2003).
6. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.86

# 超電導バルクの高性能化に向けた YBCO の核生成・核成長の解明

## Elucidation of nucleation and growth of YBCO for high-performance superconducting bulk

矢野 俊, 赤坂 友幸, 富田 優(鉄道総研)

YANO Suguru, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: yano.suguru.49@rtri.or.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO, RE: 希土類元素) バルクは強力磁石や電流リードとして応用されている[1]。REBCO バルクは種結晶法によって擬似単結晶化することで作製されている。しかし、この擬似単結晶化の際、種結晶とは異なる結晶方位を持つ余分な核が生成・成長することによって超電導特性が低下してしまうことがある。

REBCO の核生成・核成長は主に光学観察によって調べられてきた。核成長については薄膜やバルクを実際に作製し、観察することによってそのメカニズムが明らかになっている。しかし、核生成に関しては、実際に作製した試料の目に見えるサイズの核の数を数えることでしか評価されていない[2,3]。過冷却状態における REBCO の熱物性が測定されたことはある[3,4]が、冷却中の核生成・核成長理論がなかったために、定量評価するには至っていない。そこで、今回定速冷却中の核生成・核成長理論を構築し、その理論を DTA によって測定した YBCO の包晶反応に適用した。

### 2. 理論

等温条件下の核生成・核成長理論を基に定速冷却下の核生成・核成長理論を構築する。擬似単結晶化や熱測定では通常、相転移温度 ( $T_c$ ) より高温側から緩やかに定速冷却するため、 $T_c$  近傍ではほとんどの相転移が完了すると考えられる。そこで、我々は核成長速度を  $v \propto \exp(-T_1/T) \sim \exp(-T_1/T_c)$  ( $T_1$  は活性化エネルギーに対応する定数) と定数で近似し、核生成確率  $N$  を  $T = T_c - \phi t$  ( $\phi$  は冷却速度) として、 $N \propto \exp(-T_1/T) \exp(-4T_2^3/T(T_c - T)^2) \sim 0$  (where  $t \leq b/\phi$ )、 $\sim \exp(-T_1/T_c) (t' - b/\phi) \phi/eb$  (where  $t > b/\phi$ ) ( $T_2$  は胚が核になるエネルギーに対応する定数、 $b = \sqrt{T_2^3/T_c}$ ) と近似した。この近似の下で低温相の体積分率  $V$  の積分  $V = 1 - \exp\left(-\int_0^t N(t')\{v(t-t')\}^3 dt'\right)$  を実行すれば

$$V = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t - \tau_0}{\tau}\right)^5\right) \quad (1)$$

を得る。ここで、

$$\tau = \sqrt[5]{\frac{20eb}{a\phi}}, \quad \tau_0 = \frac{b}{\phi} \quad (2)$$

$a \propto \exp(-4T_1/T_c)$  である。式(1)は等温条件下の Avrami の式と同様の形をしており、Avrami の式では指数が 4 (成長次元+1) であるのに対して、本式では 5 (成長次元+2) となっている点だけが異なる。ベースラインを基準にした DTA が低温相の体積分率の時間変化に比例すると仮定すれば、

$$DTA - baseline = \frac{ca(T_c - b - T)^4}{4eb\phi^3} \exp\left(-\frac{a(T_c - b - T)^5}{20eb\phi^4}\right) \quad (3)$$

となる。ここで、 $c$  は比例定数である。また、等温条件下における変態時間の時間依存性  $\tau_i$  は、

$$\tau_i = a^{-\frac{1}{4}} \exp\left(\left(\frac{b}{T_c - T}\right)^2\right) \quad (4)$$

となる。

### 3. 実験方法

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaCO<sub>3</sub>, CuO 粉末を混合し、焼成することで YBCO 粉末を作製した。YBCO 粉末 10 mg 程度を Pt パンに入れ、空気中で包晶温度より高温の 1373 K に 10 分間保ち、系を高温相にした後、定速冷却しながら DTA 測定をした。

### 4. 結果と考察

YBCO の冷却 DTA の温度依存性を図 1 に示す。冷却速度とともに包晶ピークが低温側にシフトしていることが分かる。式(3)でフィッティングした結果を Fig. 1 に黒線で示す。フィッティングにおいては、昇温 DTA 測定の結果から  $T_c = 1270$  K とし、ベースラインをピークより低温側の線形フィッティングで決定し、 $a, b, c$  をフィッティングパラメータとした。フィッティングから得られた  $a, b$  を式(2)に代入して得た変態時間  $\tau$  と過渡時間  $\tau_0$  の冷却速度依存性を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の実線は  $a, b$  の平均から求めた曲線である。 $\tau$  と  $\tau_0$  の各プロットは平均曲線とよく一致しており、一度の DTA 測定から任意の冷却速度における YBCO の核生成・核成長を予測できることが分かった。また、式(1)からわかる通り、冷却中、系は相転移温度を下回っても  $\tau_0$  の間相転移せず、その後  $\tau$  の時間スケールで相転移する。擬似単結晶化における典型的な冷却速度 10<sup>-4</sup> K/s では、 $\tau$  に比べて  $\tau_0$  が非常に大きく、 $\tau_0$  が相転移の時間スケールを支配していると考えられる。擬似単結晶化にあたっては、冷却時間を  $\tau_0$  より短くすることで、余分な核生成・核成長を抑制したバルクの作製が可能になると考えられる。

$a, b$  の平均を式(4)に代入して得られた時間温度変態 (TTT) 図を Fig. 3 に示す。本手法によって冷却中の核生成・核成長が明らかになっただけでなく、冷却測定の結果から等温測定の結果を予測できるようになった。

### 5. まとめ

定速冷却における  $T_c$  近傍の核生成・核成長理論を構築し、DTA で測定した YBCO の包晶反応に適用した。その結果、余分な核生成・核成長を抑制した YBCO バルクの擬似単結晶化の指針が得られた。他の RE 元素についても同様に本手法によって余分な核生成・核成長を抑制した擬似単結晶化の指針が得られると考えられる。

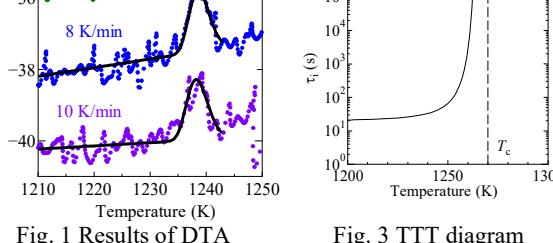
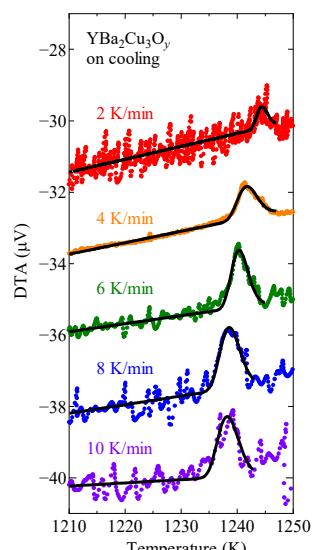


Fig. 1 Results of DTA

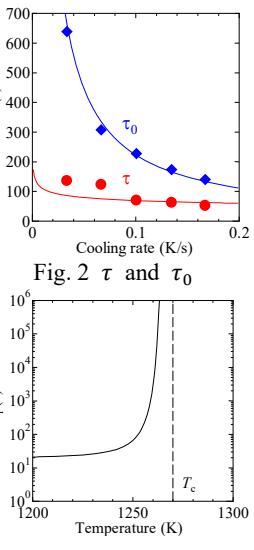


Fig. 3 TTT diagram

### 参考文献

1. J. R. Hull and M. Murakami, *Proc. IEEE* **92**, 1705 (2004).
2. K. Iida *et al.*, *Mater. Sci. Eng. B* **151**, 2 (2008).
3. K. Xu *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 075005 (2012).
4. X. Huang *et al.*, *J. Cryst. Growth* **307**, 432 (2007).

## 積層無絶縁 REBCO コイルシステムにおける 遮蔽電流磁場解析と不整磁場の低減

### Energization Current Waveform to Reduce Irregular Magnetic Fields in Multi-Stacked No-Insulation REBCO Coil Systems

吉藤 夢来, 石山 敦士(早大); 野口 聰(北大); 植田 浩史(岡山大)

YOSHIFUJI Muku, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.)

E-mail: yshfjmk@fuj.waseda.jp

#### 1. はじめに

無絶縁(NI)REBCO コイルは、高熱的安定性と高電流密度を両立できる技術として、高磁場全身磁気共鳴イメージング(MRI)やがん治療用医療加速器への応用が期待されている。これらの用途では、コイルが発生する磁場に高い空間分布精度と時間安定性が要求される。NI-REBCO コイルでは、REBCO テープに誘起される遮蔽電流による不整磁場と、NI コイル巻線に発生するコイル通電時の径方向電流の流れによる励磁遅れの 2 つの要因が同時に発生し、磁場精度が低下する。この問題に対しては、最初に電流を運転電流値以上に上げてから運転電流値まで下げる「オーバーシュート法」が、磁場の時間安定性を向上させるのに有効であることが確認されている。しかし、その効果は NI コイル特有の励磁遅れの影響を受ける可能性がある。

本研究では、新たに開発した回路解析のみによる遮蔽電流磁場解析手法を用いて、NI-REBCO コイルに特有の 2 つの電磁現象による影響を評価した。そして、オーバーシュート法とプラトー有オーバーシュート法の効果を調べ、最適な通電電流波形を検討した。本発表では、開発した解析手法の妥当性と有効性を実験との比較により検証した結果も報告する。

#### 2. 双方向分割回路型遮蔽電流磁場解析手法

本研究で用いた回路解析のみによる NI-REBCO コイルの遮蔽電流磁場解析手法は、パンケーキ状のコイルを半径方向に分割し、さらに各要素をテープ幅方向に細分化する (Fig.1)。各要素に等価回路を割り当て、それぞれ 3 つの回路方程式を解くことにより、NI コイルの励磁遅れを考慮した電流分布と遮蔽電流磁場を同時に計算することができる。

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

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

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

#### 3. 解析例

今回は、同仕様の絶縁 REBCO コイルの励磁試験結果が報告されている NI-REBCO パンケーキコイル(内径 50mm, 卷数 240, Fig.2)を同軸上に 22 個積層した 10T コイルシステムの評価を行い、最適な通電電流波形を探った(Fig.3)。Fig.4 にプラトーブーンの長さが磁場に与える影響として、時間安定度の時間変化を示す。プラトーブーンが 500 秒の時に、電流が定常状態にあっても良い時間安定度が得られ、励磁遅れがある場合でもオーバーシュート法が有効であることが確認できた。

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244)によったことを付記する。

#### 参考文献

- [1] 吉藤他, 2023 年春季低温工学・超電導学会研究発表会, 1P-p05  
[2] H. Ueda et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.26 (2016)  
4701205

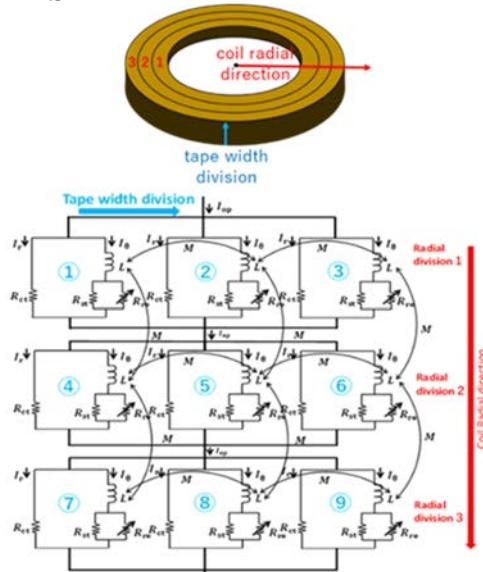


Fig. 1. Suggested electric circuit of proposed method[1].

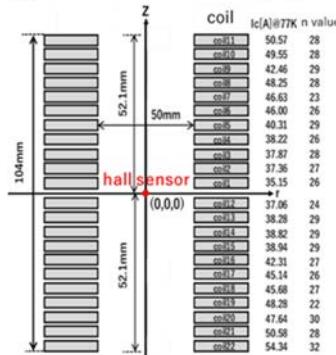


Fig. 2. 22-multi-stacked NI-REBCO coil system[1],[2].

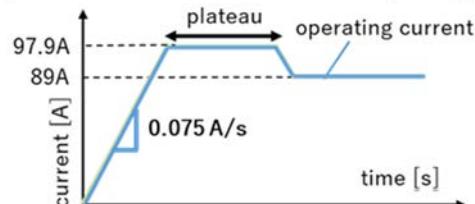


Fig. 3. Current waveform.

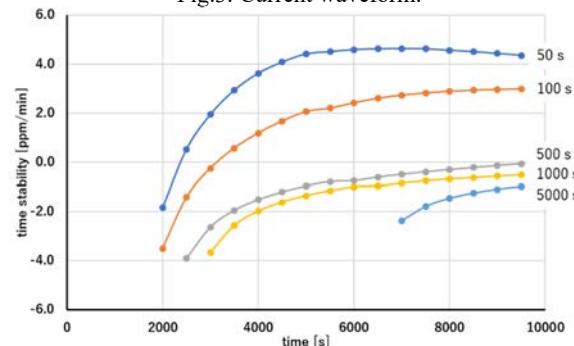


Fig. 4. Temporal stability curves.

# ピックアップコイルを用いた無絶縁 REBCO パンケーキコイル局所劣化の位置推定

## Location Estimation of Local Degradation in No-Insulation REBCO Pancake Coils by Pickup Coil

大石 崇史, 石山 敦士(早大)

OISHI Takashi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)

E-mail: bixtukuristone@ruri.waseda.jp

### 1. はじめに

無絶縁巻線コイル(NI コイル)における劣化のモニタリング技術を開発している。中でもピックアップコイルを用いた監視法を検討しているが、以前の研究によりピックアップコイルは両端電圧などの他手法に比べ高感度かつ高速に劣化を検知できる可能性が示唆された[1]。今回はピックアップコイル電圧の波形を分析し、劣化の位置や空間的な大きさを推定することを試みている。

### 2. 解析手法・解析条件

解析手法には以前の研究に続き、PEEC による電流分布解析と FEM による熱解析の連成モデル[2]に加え、ビオ・サバルの法則を用いた内部磁場計算プログラムを用いた。

NI コイルの諸元および外部条件は表1に示す通りである。劣化条件として、劣化位置に4通り(NIコイル10ターン目、20ターン目、30ターン目、40ターン目)、劣化の大きさに3通り(NIコイル1/8、4/8、8/8周)の計12通りを想定した。それぞれのケースにおけるピックアップコイル電圧の解析結果から、どの劣化パターンであるかを特定することが目標である。

なお、本研究における劣化とは、フープ応力や熱収縮によって REBCO 内の超電導層が断線することを想定している。したがって、劣化後は劣化部においては銅安定化層のみを電流が流れると仮定した。

また、NI コイルとピックアップコイルとの位置関係は図1の通りとし、ピックアップコイルには NI コイル内側に設置した Type A、上部に設置した Type B の2種類がある(シングルパンケーキコイルの場合のみ)。

### 3. 解析結果

表 2 は小口径シングルパンケーキコイルを対象とした解析における Type A ピックアップコイル電圧のピーク電圧とピーク時刻である。列方向に劣化位置、行方向に劣化サイズをまとめ、各セルの上段にピーク電圧、下段にピーク時刻を記している。ここで、ピーク時刻とは劣化が生じた瞬間の時刻を  $t = 0$  としたときの時刻である。

各列に着目すると、劣化サイズによらずピーク時刻がほぼ一致していることが分かる。したがって、ピーク時刻の情報からコイルのどの部分に劣化が生じたのかを判別できる可能性がある。また、劣化の大きさが拡大するほど高い電圧が観測されているため、ピーク電圧といった電圧値の情報から劣化の大きさを判断できる能性がある。なお、図は省略するが、この傾向は大口径コイルやダブルパンケーキコイルの場合でも同様であった。したがって、コイルの直径やターン数といったパラメータがあらかじめ判明していれば、ピックアップコイル電圧

波形から劣化の位置や大きさを推定できると考えられる。

また、Type A では劣化位置が NI コイルの外周になるほど観測される電圧が低くなっている。これは劣化とピックアップコイルとの距離が離れるためであるが、これを受けて本研究では NI コイル周辺の磁場分布を解析し、より高い電圧を観測できるピックアップコイルの位置(例えば Type B)について検討しその効果を検証している。詳細については当日ポスター上で発表する。

なお、本研究の一部は基盤研究B(22H01478)に依ったことを付記する。

TABLE I

SPECIFICATIONS OF REBCO TAPE AND COIL FOR ANALYSIS

Parameters	Assumed Values
Overall width [mm]	4.02
Tape $I_c@77K$ , self-field [A]	115
Copper stabilizer thickness [ $\mu\text{m}/\text{side}$ ]	20
NI coil	
Number of turns	50
Inner diameter [mm]	60, 500
Turn-to-turn electrical resistance [ $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	200
Analysis	
Operating current [A]	395 (const)
$I_{op}/I_c$ [%]	70
Operating temperature [K]	30
Cooling condition	Conduction
External magnetic field [T]	10
Pickup coil	
Number of turns	100
Inner diameter [mm]	58, 498

TABLE II

PEAK TIME AND PEAK VOLTAGE OF PICKUP COIL VOLTAGE

(SINGLE PANCAKE COIL)

Spatial Size of Degradation	Position of Degradation			
	@10 <sup>th</sup> turn	@20 <sup>th</sup> turn	@30 <sup>th</sup> turn	@40 <sup>th</sup> turn
1/8	11.2 mV 6 ms	5.18 mV 21 ms	3.48 mV 48 ms	3.13 mV 77 ms
	26.4 mV 6 ms	11.9 mV 20 ms	7.92 mV 48 ms	7.01 mV 77 ms
4/8	40.7 mV 5 ms	18.2 mV 20 ms	12.1 mV 49 ms	10.7 mV 76 ms

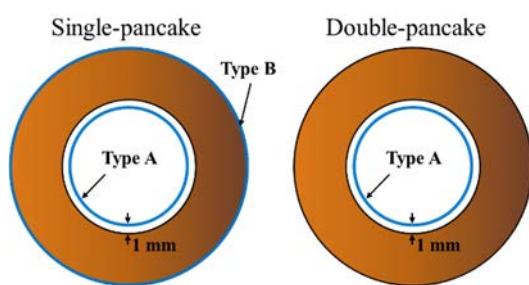


Fig. 1. Location of the NI coil and pickup coil.

### 参考文献

1. T. Oishi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.47
2. T. Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 27, no. 4(2017), Art. no. 0601206

## 「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024 年秋)： (その7) ECR イオン源用無絶縁 REBCO コイルシステムの 遮蔽電流磁場解析・評価

Development of No-Insulation REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2024) :  
(Part 7) Analysis and Evaluation of Screening Current-Induced Magnetic Field in No-Insulation  
REBCO Coil System for Multi-Frequency ECR Ion Source

島田 亜緒, 石山 敦士(早大); 野口 聰(北大); 植田 浩史(岡山大); 荘 渥謙, 福田 光宏(阪大); 吉田 潤(住重)  
SHIMADA Ao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.);  
Tsun Him CHONG, FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.)

E-mail: ao3104@ruri.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、超小型大強度加速器である高温超電導スケルトン・サイクロトロン(HTS-SC)の開発と並行して、HTS-SC 用エレクトロン・サイクロトロン共鳴(ECR)イオン源用の無絶縁 REBCO(NI-REBCO)コイルシステムを開発している。無絶縁コイルは励磁時に周方向と径方向の両方に電流が流れるため、無絶縁コイルに特有の励磁遅れが生じる。また REBCO 線材はテープ形状であるため、線材を貫く磁束により遮蔽電流磁場が生じる。そこで我々は、励磁遅れと遮蔽電流磁場を同時に考慮できる遮蔽電流磁場解析手法を開発した。ここでは新たに開発した、回路解析のみに基づいた無絶縁 REBCO コイルの遮蔽電流磁場解析プログラムを用いて ECR イオン源用無絶縁 REBCO コイルを対象に解析・評価を行った。

### 2. 解析対象

解析に使用したコイルは、先行研究[1][2]で試作・実験されたコイルシステムである。概略図を Fig.1 に、コイル諸元を Table.1 に示す。ただし今回は Iron plate 無しで解析を行った。

### 3. 解析手法

#### 3. 1 先行研究で開発した解析手法

等価回路(PEEC モデル)に基づく電流分布解析[3]と式(1)の支配方程式に基づいた有限要素法と高速多重極法による 3 次元線形遮蔽電流解析[4]の併用法である。式(2)に示す回路方程式から周方向電流を求め、これによる磁場を式(1)に代入することによって遮蔽電流磁場を算出する。

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times n)\} \cdot n + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S^{\square} \frac{(\nabla T' \times n') \times R}{R^3} \cdot ndS' = -\frac{\partial B_0}{\partial t} \cdot n \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^N M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} (I_{op} - I_{\theta j}) \quad (2)$$

#### 3. 2 新たに開発した解析手法

開発した等価回路のみに基づく遮蔽電流磁場解析手法を用い、今回は、Fig.2 に示すようにパンケーキコイルを半径方向に 4 分割し、さらに REBCO テープ幅方向に 3 分割した。周方向の分割数については、M1、M2、PC コイルは 24 分割、六極コイルは 16 分割で解析を行った。

次に Fig.3 に示すように各要素に等価回路を割り当て、各要素について成り立つ式(3)～(5)を全要素について連立することで周方向電流を算出し、ビオ・サバールの法則より磁場を求める。ただし、式(3)は等価回路間で成り立つ式、式(4)は径方向分割要素内での運転電流の分布の式、式(5)は幅方向分割要素内で成り立つ電圧の式である。

$$\sum_{j=1}^{totalnum} M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} I_{cti} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{div_s} (I_{\theta i} + I_{cti}) = I_{op} \quad (4)$$

$$I_{cti} R_{cti} - I_{ct(i+1)} R_{ct(i+1)} = 0 \quad (5)$$

### 4. 解析結果

ここでは、解析結果の一例として、M1 コイルのみを励磁したときの、電流密度分布の解析結果を Fig.4 に示す。図から

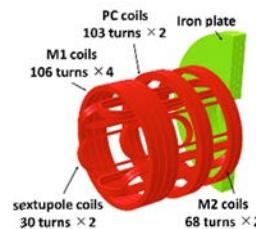


Table.1 Parameters of coil

coil	sextupole coils	M1 coil	M2 coil	PC coil
tape width (mm)	6	12	12	12
minimum radius of curvature (mm)	25	95	95	95
inner length (mm)	180	-	-	-
outer radius (mm)	-	108.4	108.4	108.4
$I_c$	>250 A at 30 K	>500 A at 30 K	>500 A at 30 K	>500 A at 30 K
coil base (mm)	-	99.55	63.85	-3.95
number of turns/SP	30	106	68	103
number of DP	1	2	1	1

Fig.1 Coil system schematic diagram

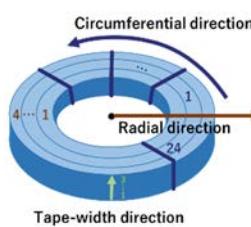


Fig.2 Image of the new method

Fig.3 Equivalent circuit of NI coil in the new method

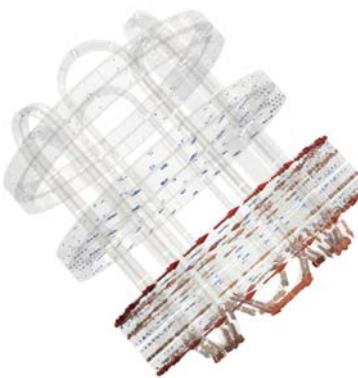


Fig.4 Analysis result

M1 コイルのみを励磁した場合、六極コイルの M1 コイル側部分に遮蔽電流が発生しているのがわかる。

コイルの励磁順を変えて行った解析結果や、コイルシステム中心の磁場分布など、詳細については当日発表する。

### 参考文献

- [1] T.H.Chong et al.: J. of Physics Conf. Series, 2244 (2022) 012108.
- [2] T.H.Chong et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.34 (2024) 4603204
- [3] T.Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25 (2013) 4603409
- [4] H.Ueda et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25 (2013) 4100805

## 鞍型形状を利用した非対称 MRI 用マグネットのコイル配置検討

### Basic Design of Saddle-Shaped Coils Arrangement for an Asymmetric MRI Magnet

片岡 小春, 朝倉 優哉, 佐田 敦也, 宮崎 寛史(九州大学)  
 KATAOKA Koharu, ASAKURA Yuya, SATA Atsuya, MIYAZAKI Hiroshi (Kyushu University)  
 E-mail: kataoka.koharu.672@s.kyushu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

円筒型の空間を持つ磁気共鳴画像装置(MRI)が現在広く使用されているが、閉所に対する恐怖を感じる患者も多い[1]。検査を受ける患者の快適さを向上させるため、全ての磁石が撮像領域の下に配置される永久磁石を用いたMRIが提案されているが、十分な質の静磁場を得られていないという課題がある。そこで我々は、超電導コイルを用いて非対称MRI用のマグネットを設計し、磁場強度と磁場均一度の向上を目指した。コイル形状には、磁石全体を撮像領域の下に収めながらもコイルを撮像領域に近づけることができる鞍型を採用した。本発表では、最適化計算によりコイル配置を検討した結果について述べる。

#### 2. 計算条件

4つの鞍型コイルの配置を、シミュレーテッドアニーリング法を用いた最適化計算によって求めた。簡略化のため、まず鞍型コイルの直線部分について、直線電流を組み合わせた矩形コイルで模擬したものの配置を検討した。直径100mmの撮像体積(DSV)において磁場強度0.1T、Volume-root-mean-square(VRMS)が100ppm以下の均一度を持つ磁場を生成することを目指した。均一度については、以下の式で表される球面調和関数の1次から3次の項の係数を最適化計算の条件に含めた[2]。

$$B_z(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n r^n P_n^m(\cos \theta) \times (\alpha_n^m \cos m\varphi + \beta_n^m \sin m\varphi) \quad (1)$$

パラメータは4つのコイルのそれぞれの端のx、z座標であり、Fig.1に示す。電流密度は200A/mm<sup>2</sup>とした。目的関数は以下の式で表される。

$$o = \frac{S}{S_{max}} + c_B + c_{anm} + c_t + c_d \quad (2)$$

ここで、第一項はコイルの断面積の合計を規格化したものである。 $c_B$ は磁場、 $c_{anm}$ は球面調和関数の係数に関する条件を示しており、これらは制約条件fに対して以下の式で表されるペナルティ関数である。 $a_i$ は重みを表す[3]。

$$c_i = \begin{cases} a_i \frac{f - f_{max}}{f_{max}} & (f \geq f_{max}) \\ 0 & (f \leq f_{max}) \end{cases} \quad (3)$$

また、 $c_t$ 、 $c_d$ はそれぞれコイルの外径と、コイル同士の接触を避けるための条件を表す。

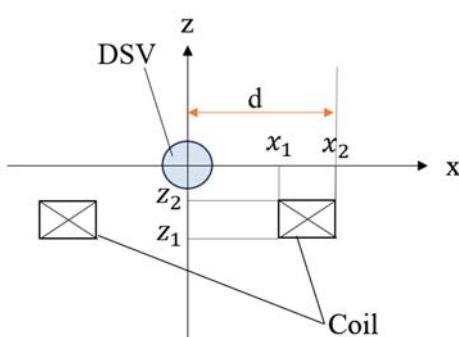


Fig.1 Calculation system in XZ plane

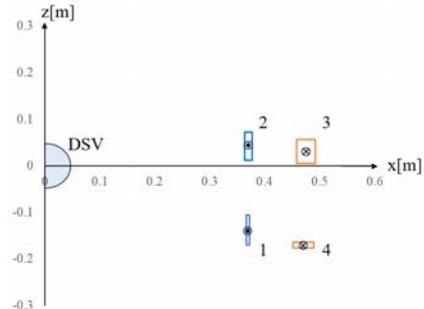


Fig.2 Coil arrangement

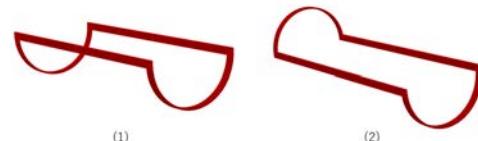


Fig.3 (1) the arc section added to the end of the rectangular coil (2) one of the arc portions reversed.

#### 3. 計算結果

得られた矩形コイルの配置をFig.2に示す。図には、x座標が正の部分のみを示している。このコイル配置によって直径100mmのDSV中心で0.1T、VRMSが43.9ppmとなる磁場が得られた。

#### 4. 鞍型コイルのエンド部分の影響の考慮

ここまで鞍型コイルの直線部分のみの配置について計算を行ったが、実際はエンド部分の影響を考慮する必要がある。求めた矩形コイルの端部にエンド部分を模擬した円弧上のコイルをFig.3(1)の同じ向きと、Fig.3(2)の上下逆向きに付け加えたものについて磁場の均一度を比較した。円弧状のコイルを同じ向きで加えると595ppm、上下逆にして付け加えると113ppmのVRMSとなる磁場が生成された。

#### 5. まとめ

シミュレーテッドアニーリング法を用いた最適化計算により、非対称MRI用の超電導コイルの配置を検討した。鞍型コイルの直線部分を矩形コイルで模擬し、最適化計算により配置を求めた。また、求めた結果に、円弧状のコイルを付け加えることで、鞍型コイルのエンド部分の影響についても考慮を行った。今後は磁場強度、磁場均一度の向上を目指すとともに、エンド部分を含めたコイル配置の詳細な検討を行う。

#### 参考文献

1. Y.Yao, et al.: "A New Design Method for Completely Open Architecture Permanent Magnet for MRI", IEEE Trans.Magn.vol.41, No5 (2005) p.1504-1507
2. C.N. Chen, et al.: "Biomedical Magnetic Resonance Technology", IOP Publishing Ltd(1989)
3. R.Ando, et al.: "Development of a Design Method for Superconducting Electromagnets Using Racetrack Coils", IEEE Trans.Appl.vol.18, No2 (2005) p.1525-1528

## 短絡電流パルス後の HTS ケーブルテープの熱緩和

### Thermal relaxation of HTS cable tapes after a short circuit current pulse

イワノフ ユーリ, 神田 昌枝, 山口 作太郎 (中部大学)  
 IVANOV Yury, KANDA Masaue, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)  
 E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

#### 1. Introduction

High-temperature superconducting (HTS) cables are designed to operate as part of bulk power transmission systems, so improving operational safety is very important. Conventional HTS cable is a concentric multilayer structure with many HTS wires (tapes) tightly sandwiched between insulation layers. Kraft or polypropylene laminated paper (PPLP) impregnated with liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) is used as electrical insulation. When HTS tapes overheat due to short circuit current, local cooling of the tapes is difficult due to the paper's low thermal conductivity and low liquid permeability. This causes rapid heating and subsequent transition to the normal state. To study the behavior of HTS tapes during short circuits, a test bench was assembled that generated current pulses with the required characteristics.

#### 2. Experimental set up

The circuit diagram is presented in Fig. 1. The test bench allows generating current pulses with a duration of about 8 ms and an amplitude of up to 4–5 kA, which is 20–25 times higher than the critical current ( $I_c$ ) of HTS tapes.

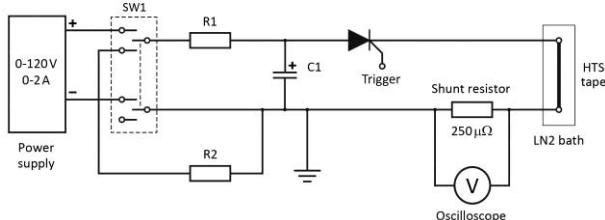


Fig. 1. Circuit diagram of the test bench.

As shown in Fig. 2, a single HTS tape is sandwiched between stacks of insulating paper with thermocouples installed at different heights. When the HTS tape is heated, some LN<sub>2</sub> in the pores of the adjacent paper rapidly evaporates. The increased pressure forces the two-phase mixture out of the surrounding space. When the current is switched off, a considerable amount of time is required for the

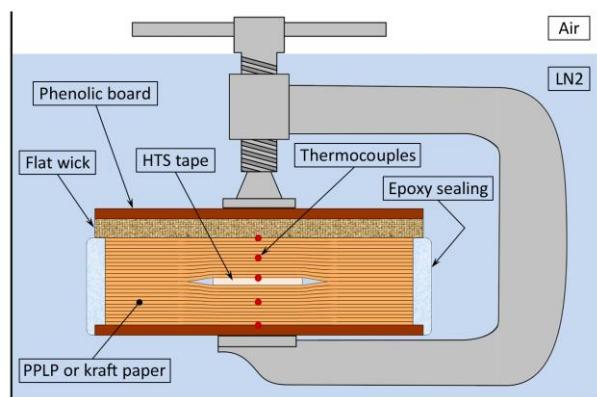


Fig. 2. Cross-section of the experimental assembly.

gas phase to condense and for the paper to cool again and become completely saturated with LN<sub>2</sub>.

The experiment used Bi2223 HTS tapes with  $L$  of about 190 Å. The sample width was 4.5 mm, the thickness was 0.25 mm, and the length of the sandwiched part was 150 mm. The cable paper pieces in both cases were 19 mm wide and 0.125 mm thick. The thickness of the bottom and top layers of paper was 3 mm, so 48 pieces of each type of paper were used.

#### 3. Results and discussion

The results of impulse tests are presented in Fig. 3. The dashed curves show the time dependence of the temperature of a free HTS tape placed in LN<sub>2</sub>. After a sharp heating, when the current pulse is passed, LN<sub>2</sub> boils and the tape is cooled in the film boiling regime. The kink in the curve with decreasing temperature is due to the transition to the nucleate boiling regime when the heat transfer coefficient increases sharply. The solid curves show the same relationship for the HTS tape sandwiched between pieces of kraft paper.

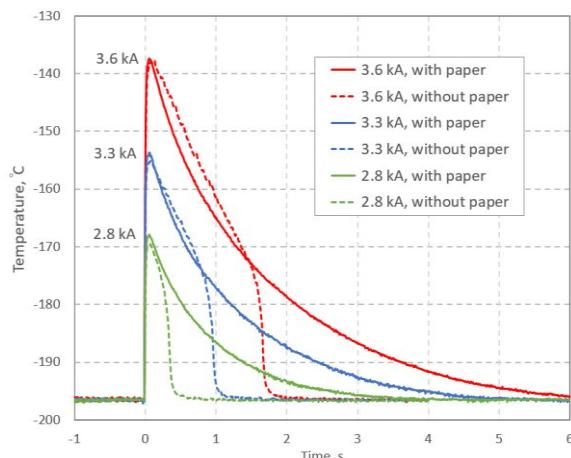


Fig. 3. Tape cooling dynamics depending on load current.

There is a significant increase in cooling time and the absence of kinks. A comparison of the slopes of the curves suggests that cooling in the presence of insulation paper occurs in a regime close to the film one since the high hydraulic resistance in the paper's pores prevents the supply of LN<sub>2</sub> to the heated region. In the PPLP case, the picture is similar, but the cooling time constant increases approximately twofold. Therefore, improving the conditions of LN<sub>2</sub> microcirculation can increase the recovery rate of the HTS cable after a short circuit. In addition, the surface of the HTS tape can be modified to initiate an early (at a higher temperature) transition to nucleate boiling.

#### References

1. S. Yamaguchi et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p. 104

## 超電導ケーブルの過渡的熱応力・運動に対する数値計算検証

### Numerical verification of transient thermal stress and motion of superconducting cable

山本 春海, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研)

YAMAMOTO Haruumi, FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)

E-mail: yamamoto.haruumi.52@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

鉄道総研では、電圧降下抑制による輸送の安定化、変電所の集約化、送電損失低減や回生効率向上といった効果が期待できる直流電気鉄道向け超電導ケーブルの開発を行っている[1]。

特に超電導ケーブルの長距離化の課題となる熱応力を考える際に、実験だけではなく解析的なアプローチを通じた定量的な評価が重要となる。本発表では超電導ケーブルの熱機械的挙動の数値計算を通じて、超電導ケーブルが経験する熱応力について分析を行った。

#### 2. 超電導ケーブルの運動の数値表現

ケーブルを長手方向に1次元運動のみをする弾性体と考え、Fig.1のような $N+1$ 個の質点と $N$ 個のばねを接続したモデル(集中質量系)を考えた。すべての質点の運動方程式を並べ以下の方程式を得た。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f_T + f_F \quad \text{Eq.1}$$

$x$ 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ はそれぞれ変位ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトル、 $M$ 、 $C$ 、 $K$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。 $f_T$ と $f_F$ はそれぞれ熱応力ベクトル、摩擦力ベクトルを表す。質点 $n$ に対する摩擦力は、 $\mu$ を摩擦係数として、

$$f_F(\dot{x}_n) = \mu m_n g \left( \frac{2}{1 + e^{a\dot{x}_n}} - 1 \right) \quad \text{Eq.2}$$

と表すことにより、連続かつ微分可能な形で表現した。この場合、静止摩擦状態を厳密に再現できず、およそ $5/a$ 程度の速度を持つ数値的なクリープが生じる。

ケーブルや計算の主要パラメータをTab.1に示す。Eq.1をニューマーク $\beta$ 法(平均加速度法)で離散化し、両端の質点が固定された条件のもとニュートン・ラフソン法にて逐次計算した。

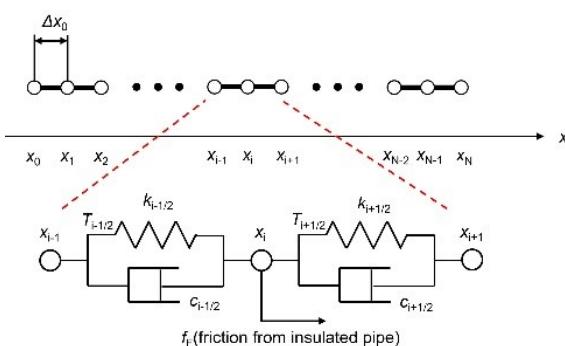


Fig.1 Numerical model of superconducting cable

Tab.1 Parameter for numerical analysis

$L$ [m]	$m$ [kg/m]	$k$ [N/m <sup>2</sup> ]	$c$ [N·s/m]	$\mu$ [-]	$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]
400	10	$10^7/3$ $\cdot 2\sqrt{mk}$	0.01	0.2	0.003/223

( $L$ : Cable length,  $m$ : Cable unit weight,  $k$ : Cable unit elastic modulus,  $c$ : Cable unit damping coefficient,  $\mu$ : Friction coefficient,  $\alpha$ : Linear expansion coefficient)

#### 3. 冷却・昇温時にケーブルが経験する応力

初期冷却は、冷媒をケーブルの片側から送ることで冷却する。これをFig.2のような温度分布で表現した。この温度分布および時間変化に基づき張力変化を計算した。結果をFig.3に示す。張力は冷却始端で低く、終端で高くなり、最大ひずみは0.4%になった。これは熱応力と摩擦力がケーブルを始端側に引張るためである。

昇温時はケーブル全体を均等に昇温するものとし、張力分布を計算した。結果をFig.4に示す。昇温時は張力分布を保ったまま張力が下がる方向にシフトし、ケーブルの運動は生じないことが分かった。

#### 4. まとめ

超電導ケーブルにおいては、初期冷却時の空間的に急激な温度変化と摩擦力が張力分布の偏りの原因となることが分かった。講演では、張力の偏りに対する摩擦の影響についても報告する予定である。

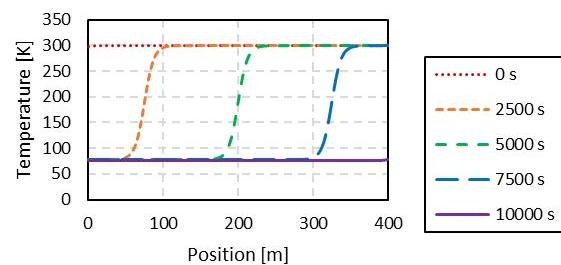


Fig.2 Temperature distribution during initial cooling

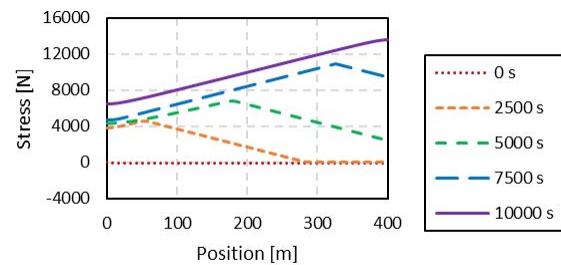


Fig.3 Thermal stress during initial cooling

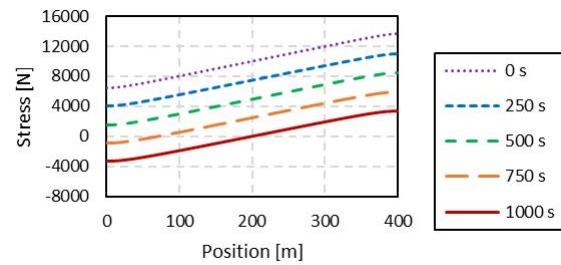


Fig.4 Thermal stress during warm-up

#### 参考文献

1. M. Tomita, et al.: Energy, (2017) pp. 579–587

## 超電導き電ケーブルの営業稼働検証 —超電導送電による営業電車供給8か月—

Verification of commercial operation on superconducting feeder cables

– Superconducting power transmission to supply commercial trains for eight months –

富田 優, 福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 矢野 俊, 山本 春海, 緒方 隆充(鉄道総研)  
TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke, ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, ONJI Taiki, YANO Suguru,  
YAMAMOTO Haruumi, OGATA Takamitsu (RTRI)

E-mail: tomita.masaru.19@rtri.or.jp

### 1.はじめに

電気鉄道は変電所から車両に電気を送る送電線の電気抵抗によって、送電損失や電圧降下が生じる。直流電化区間ににおいては低電圧高電流といった特徴から、その影響が顕著にあらわれている。そのため、運行に必要な電力を確保するよう変電所の位置が設計されており、特に都市圏路線では多くの変電所が設置されている。これらの電気抵抗に起因する課題の解決に向け、超電導き電システムの開発を進めている。

鉄道総研では、2007年より直流電気鉄道用超電導ケーブルの研究開発に着手し、実験室における基礎研究から鉄道路線を用いた様々な検証試験に取り組んでいる[1, 2]。前回、世界初の営業線(客乗車)実用運転の開始を報告した[3]。本講演では、その詳細な内容について紹介する。

### 2. 超電導き電ケーブルの営業稼働検証

これまで各鉄道事業者の協力を得て実路線を使用した検証試験を実施してきたが、これらは国土交通省の認可が必要ない、営業時間外(夜間)における試験列車を使用した試験であった。超電導き電システムを営業運行に供するには、鉄道に関する技術上の基準を定める省令(以下、鉄道の技術基準)に適合し、国土交通大臣の認可を得る必要があるが、本システムはこれまでにない新しい技術であることから、明確な鉄道の技術基準がなかった。そのため仕様を定め、その性能を満足するよう、実験や改良を繰り返し行うことで、鉄道の技術基準に適合するまでに至った。この度、営業線における実設備への接続や鉄道システムとしての動作確認など、実用化における技術検証を主な目的とし、駿豆線にて営業時間内における運用を計画し、超電導き電システムの設置に関して申請をし、2023年3月、国土交通省の認可を得て営業線運用に至った。

超電導き電システムを駿豆線の大仁駅構内に鉄道設備として導入し、2023年度より営業時間内の鉄道営業車両の駆動電力を供給する運用を開始した。本システムは、技術基準に適合した超電導き電ケーブル(長さ 102 m)と、冷凍機や冷媒を循環するポンプによる冷却システムから構成され、本線で必要な3,000 A以上の電力を電気抵抗ゼロで送電することができる(Fig.1)。運行ダイヤの始発より、営業車両に超電導き電を通して電気を供給し、国内外で初めて超電導送電による営業運行を行なった。1日を通じて、上り方面67本、下り方面68本、合計 135 本の営業車両に電力を供給できたことを確認した。営業稼働検証は現在も継続しており、長期の運用データを取得している。

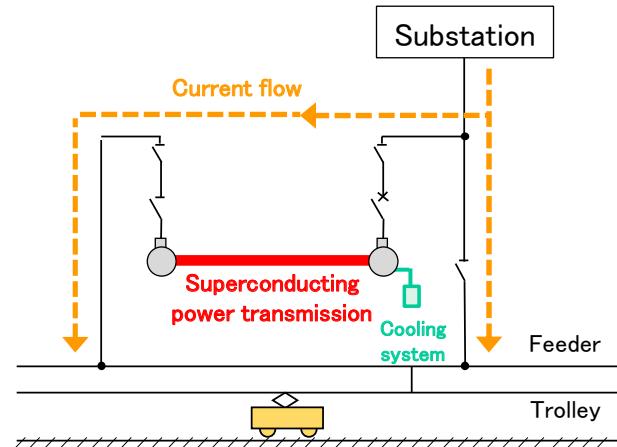


Fig.1 Superconducting feeder systems installed to commercial lines

### 3. 謝辞

本研究の一部は、国土交通省補助金により実施した。超電導き電システムの研究開発は、これまで国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベJPMJSV0921)」および「未来社会創造事業(JPMJMI17A2)」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託・助成事業により実施した。

### 参考文献

1. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.181
2. M. Tomita et al., Physica C, vol. 470, S. 1007–1008 (2010).
3. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.148

### 3次元 T-A 法と H 法による超電導ケーブルの数値解析

#### Numerical analysis of HTS cable with 3D T-A formulation and H formulation

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

#### 1. Introduction

To analyze the spatial and time independent electromagnetic distribution and performance of high-temperature superconductor (HTS) applications, finite element models are usually constructed for numerical analysis [1]. In this study, **T-A** formulation and **H** formulation are considered for comparative analysis, and the basic principles are introduced respectively. The electromagnetic performance of 3D REBCO single tape and superconducting cable are discussed in terms of magnetic flux density, current distribution, and AC loss. According to the characteristics of different formulations, single tape, and triaxial three-phase superconducting cable models are established while related partial differential equations with boundary conditions are set up. The accuracy of AC loss in the 3D finite element model is compared with theoretical calculation and 2D analysis results.

#### 2. Theoretical analysis

To reduce the complexity of solving for unknown variables, Maxwell's equations are separated by formulations. The **T-A** formulation and **H** formulation used in this study are shown in Fig. 1. In **H** formulation, the transport current is imposed using a pointwise constraint approach by integrating into the cross section of the superconductor. When an external magnetic field is applied, the Dirichlet boundary condition is set on the outer boundary of the solution domain. In **T-A** formulation, the current vector potential **T** and the magnetic vector potential **A** are solved in the superconducting and air domain respectively. The Dirichlet boundary condition is set on the edges of the tape for transport current. Due to the high aspect ratio of REBCO tape, the thickness can be neglected in **T-A** formulation, which can save calculation time effectively.

#### 3. Case study

The models of 2D/3D REBCO tapes and HTS cables are discussed regarding magnetic field distribution, current density, and AC loss. In the time-varying electromagnetic model, the alternative current is applied. When the magnetic field reaches its peak value, the current density distribution of the tape and the magnetic field distribution of the HTS cable are shown in Fig. 2. The **T-A** formulation and **H** formulation are used for comparisons in Table 1 with the current amplitude 100 A and Fig. 3 with the current amplitude 0.2 – 0.9  $I_c$ . Comparing models with different formulations, it is found that **T-A** formulation can obtain results in a shorter simulation time while ensuring accuracy.

#### 4. Conclusion

Based on the **T-A** and **H** formulations, the single REBCO tape and HTS cable modeled by finite element are analyzed with the time-dependent electromagnetic field, respectively. Comparing the AC loss of Norris analytical models verifies the correctness of the numerical analysis.

#### References

1. H. Ohsaki, et al.: Supercond. Sci. Technol. 15 754 (2002)

Table 1. Results of HTS tapes and cables

	2D H tape	2D T-A tape	
Simulation time (s)	247	148	
AC loss (J/m/cycle)	5.0056e <sup>-4</sup>	4.7563e <sup>-4</sup>	
	3D H tape	3D T-A tape	
Simulation time	4164	2837	
AC loss (J/m/cycle)	4.1812e <sup>-4</sup>	3.8207e <sup>-4</sup>	
	Phase A	Phase B	Phase C
AC loss (J/m/cycle)	6.1441e <sup>-3</sup>	7.0194e <sup>-3</sup>	7.4548e <sup>-3</sup>

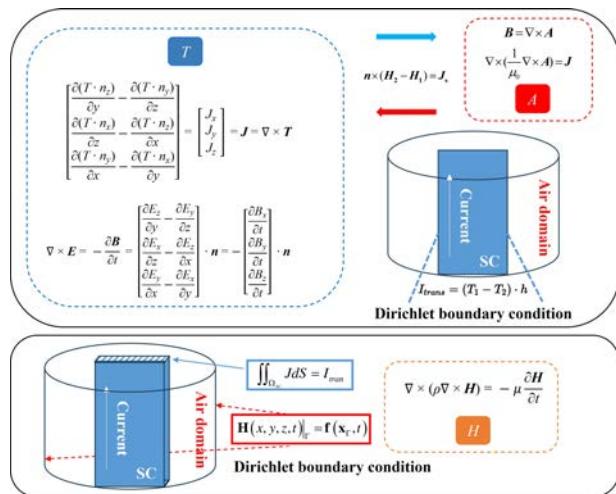


Fig. 1. **T-A** formulation and **H** formulation

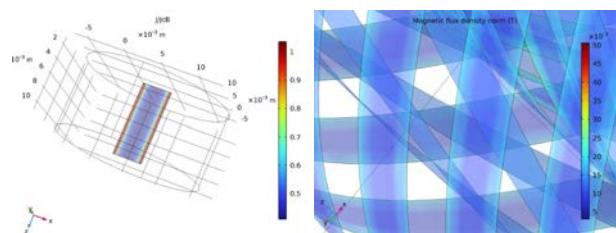


Fig. 2. Magnetic field and current distribution

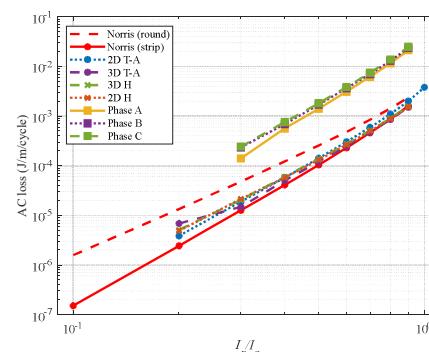


Fig. 3. AC loss of HTS tape and cables

# 液体水素ポンプ用超電導同期モータの軽量・低損失化に向けた電磁設計

## Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Liquid Hydrogen Pumps to Reduce Weight, and Loss

河野 亮介, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)

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

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

### 1. はじめに

水素は近年燃料として注目を集めている。特に液体水素は極低温(20 K)の冷媒であり、超電導機器との相性が良いと考えられる。我々は液体水素自動車を対象とし、超電導同期モータを利用したサブマージドモータポンプを液体水素浸漬冷却下で運転することを検討している。3.0 kW の電機子超電導モータについて二次元電磁界解析を行い、重量と発熱の結果と考察を既に報告している[1]。

先の報告における材料物性については常温のものが用いられていたが、本システムは最終的に液体水素浸漬冷却下、すなわち 20 K での運転を想定している。そのため極低温における材料物性が与える影響を考慮する必要がある。本発表では材料物性を考慮した超電導モータモデルを設計し、有限要素法を用いた二次元電磁界解析を行い、極低温における磁気的/電気的特性が重量と発熱に与える影響について考察した結果を報告する。

### 2. 極低温における材料物性

本研究は残留磁束密度と電気抵抗率の 2 点に着目した。残留磁束密度は前回の報告[1]では低温減磁の効果を考慮して 0.96 T としていたが、NdFeB であっても液体水素温度で 1.4 T を達成できることが示されているため[2]、今回は低温減磁を考慮せず 1.4 T として解析を行った。

鉄心の損失には、ヒステリシス損失と渦電流損失がある。材料物性として電磁鋼板のヒステリシスカーブおよび電気抵抗率について文献[3]を基にデータの補正を行った。また、永久磁石では電機子巻線が作る磁界に含まれる高調波成分によって渦電流損失が発生する。本発表では永久磁石の電気抵抗率を鉄心と同じ割合で増加させることで近似した。

### 3. モータ仕様と電磁界解析

前回の報告[1]と同様に液体水素を冷媒に用いる MgB<sub>2</sub> 電機子巻線を適用した出力 3.0 kW のモータを設計した。モータの仕様を Table 1 および Fig. 1 に示す。回転数は超電導モータポンプ試験を行った文献[4]における自動車用液体水素ポンプに必要な 290 g/min の吐出圧[5]に対応する値を参考としている。

解析結果として、従来の常温条件と極低温条件でのモータ損失の変化を Fig. 2 に示す。永久磁石の残留磁束密度が変化することで出力や電圧値が定格から変化するが、この結果ではモータ外径と積厚を一定とし、電機子コイルの巻数(6 turn→4 turn)で補正を行った。全損失は 33.9 W から 53.2 W へと 57 %増加した。特に鉄損が大きく変化し、液体水素温度条件では室温に比べて 72 %ほど増加している。これにより、液体水素の蒸発熱とタンク容量から推算している運転可能時間は 1.4 時間ほど減少することが分かった。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、液体水素ポンプ用の3.0 kWの出力を持つ電機子超電導同期モータについて、極低温の材料物性を考慮した設計を行い、電磁界解析から損失と重量について検討を行った。今後は永久磁石の電気抵抗率をより正確に見積もる必要があるほか、永久磁石の分割などといった損失を減少させる工夫を考えていく必要がある。

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 <sub>2</sub> wire
Field magnet	NdFeB

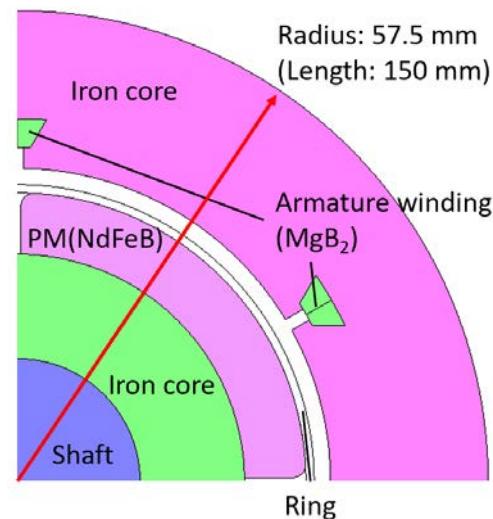


Fig. 1. A superconducting motor configuration

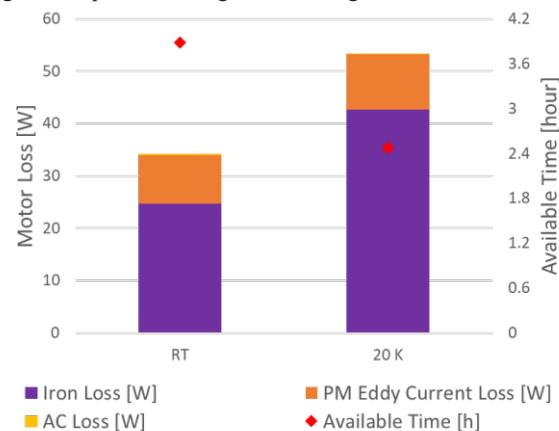


Fig. 2. Comparison of motor loss under room temperature (RT) and 20 K conditions

### 参考文献

- R. Kawano, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2024) p.57.
- X. Tang, et al.: *Scripta. Materialia.* Vol. 194 (2021) 113648
- C. Kaido, et al.: *J. Mag. Soc. Jpn.* Vol. 20 No. 2 (1996) pp.649-652.
- K. Kajikawa, et al.: *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.* Vol. 51 No. 5 (2016) pp.155-163.
- T. Nose, et al.: *J. Hydro. Ene. Sys. Soc. Jpn.* Vol. 22 No. 1 (1997) pp.39-45.

# REBCO 全超伝導誘導機の二重台形電機子巻線構造の提案および電磁設計

## Electromagnetic Design of REBCO Double Trapezoidal Armature Windings Used in Superconducting Induction Motors

津森 将彦, 柏木 涼太, 佐藤 正宗, 末永 恋太郎, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓(九州大学)

TSUMORI Masahiko, KASHIWAGI Ryota, SATO Masamune, SUENAGA Rentaro, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka  
(Kyushu Univ.)

E-mail: tsumori.masahiko.604@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は空飛ぶクルマなどの開発に向け、隣接する台形電機子巻線の長辺と短辺を交互に入れ込む構造を用いた超伝導誘導機の高出力密度化を目指している[1][2]。しかし、6個の台形コイルを用いた電機子構造(6台形電機子)では、電機子巻線を囲う円環状の電機子領域に対する巻線面積の割合(電機子巻線占積率)が低く、さらなる出力密度向上には巻線占積率の増加が必要となる。そこで我々は、大小2種類の台形電機子を組み合わせた二重台形電機子巻線構造を考案した。本発表では、2次元磁界解析により従来の台形電機子と二重台形電機子巻線を解析し、200 kWとなる有効長を比較することで有効性を確認した結果について報告する。

### 2. 解析モデルの設計と仕様

Fig. 1に6台形電機子および二重台形電機子巻線の3次元モデルを示す。二重台形電機子は、黄色で示した6台形電機子の中に赤色で示した別の6台形電機子を入れ込む構造となっている。本研究では、Fig. 2に示す二次元断面ハーフモデルを用いて解析を行った。Table 1に制約条件を示す。電機子コイルは8並列線材で構成し、各線材に均一に電流が流れるとした。使用線材は70 Kの自己磁場下における臨界電流が353 AのREBCO線材を想定し、電機子コイルの負荷率は、電機子コイル経験磁場の絶対値を用いて計算した。また、電機子領域の面積に対する巻線領域の面積である巻線占積率は、6台形、二重台形電機子でそれぞれ19.9%、39.9%となっている。回転子のバーはREBCO線材を30枚積層したものを仮定し、幅4 mm、積層厚さ6 mmのバルク導体をバーとして解析を行った。エンドリングは電気回路モデルにより、バーの2倍の積層枚数のエンドリングを仮定した抵抗と隣接するバーの抵抗を接続した。REBCO線材の抵抗率は超伝導状態を模擬するため、 $1e-12 \Omega m$ と仮定した。

### 3. 解析方法

電磁界解析ソフト JMAG-Designer を用いて二次元磁界解析を以下流れで実施した。まず、拘束試験を実施し、すべり周波数を0.001 Hzから0.05 Hzまで0.0001 Hz刻みで変化させ、各すべり周波数における定常トルクを解析した。次に、拘束試験解析のピークトルクを取るすべり周波数(回転数一定)の状態で解析を行い、出力が200 kWとなるようにモデルの有効長を変化させた。

### 4. 解析結果と考察

Table 2に解析結果を示す。出力が200 kWとなる有効長は6台形および二重台形電機子でそれぞれ309 mm、131 mmとなり、二重台形電機子の方が6台形電機子の42.4%の有効長で200 kWとなった。これは巻線占積率が増加し一相あたりの起磁力が増加したためと考えられる。つまり、二重台形電機子を用いることで、ヨークとコアに用いる電磁鋼板の使用量も削減でき、高出力密度化に有効であることが分かった。また、二重台形電機子の力率が8.4%高くなかった。これは、重なり合うコイル数が増加したことによって磁場の分布が滑らかになり、空間高調波が低減したことによるものと考えられる。

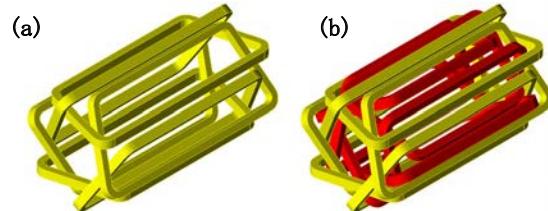


Fig. 1 Isometric view of 3D models of two types of armature windings. (a) six trapezoidal armature (ST) and (b) double trapezoidal armature (DT).

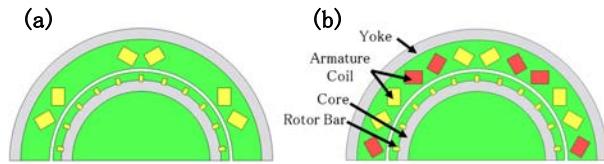


Fig. 2 2D cross-sectional 1/2 models of two types of induction motors. (a) ST and (b) DT.

Table 1  
Constraint conditions of two types of motors.

	Maximum output [kW]	200
Armature	Number of parallel conductors	8
	Number of turns [turn/coil]	30
	Electrical frequency [Hz]	60
	Load factor [%]	70
Rotor	Number of parallel conductors	30
	Number of rotor bars	22
	Yoke thickness [mm]	10
	Core thickness [mm]	10
	Operating temperature [K]	70

Table 2  
2D analysis results.

Motor type	ST	DT
Armature current [A <sub>max</sub> ]	632	616
Phase voltage [V <sub>max</sub> ]	433	377
Power factor [%]	49.3	57.9
Average torque [Nm]	530.3	530.1
Torque ripple [%]	54.4	5.64
Rotational speed [rpm]	3599.856	3599.754
Effective Length [mm]	309	131

### 参考文献

- Y. Okade, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32, No. 6, Art. No. 5201706 (2022)
- M. Tsumori, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 33, No. 5, Art. No. 5200206 (2024)

# 空心かご形回転子を用いた REBCO 全超伝導誘導モータの回転速度-トルク特性の実験的評価

## Experimental Evaluation of Torque-Rotational Speed Characteristics of REBCO Fully Superconducting Induction Motors with Air-Core Squirrel Cage Rotors

柏木 涼太, 津森 将彦, 佐藤 正宗, 末永 恋太郎, 宮崎 寛史, 吉田 幸市, 岩熊 成卓(九州大学)  
 KASHIWAGI Ryota, TSUMORI Masahiko, SATO Masamune, SUENAGA Rentaro, MIYAZAKI Hiroshi, YOSIDA Koichi,  
 IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)  
 E-mail: kashiwagi.ryota294@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

電動航空機実現に向けて超伝導モータの高出力密度化が求められる。鉄心を用いた全超伝導誘導モータは超伝導回転子の経験磁場が自己磁場だけで臨界電流を高く保てるが[1], 質量が大きくなることから軽量化のために空心化が考えられる。空心の場合では超伝導線に鎖交する磁束が多く、回転子の臨界電流が変化するため回転速度-トルク特性の変化が大きくなり、空心超伝導誘導モータの設計・制御法の確立に向けたトルク特性の把握が重要となる。そこで我々は、REBCO 線材を用いた空心超伝導かご形回転子を製作し、回転試験を行った。本発表では、電機子電流を変化させたときの超伝導空心かご形回転子のトルク特性を比較した結果について報告する。

### 2. 超伝導かご形回転子の製作方法

Fig. 1(a)とTable. 1に試作した超伝導かご形回転子とその仕様を示す。本回転子はバーとエンドリングの臨界電流を高くするため REBCO 線材を用いた。超伝導回転子の特徴として同期トルクがあり、これは同期になるときご形回転子内で永久電流のループが生じ、永久磁石回転子のように振舞うためである[2]。この永久電流の減衰時間を遅くし同期トルクを観測するため、接続抵抗を小さくする必要がある。そこで、Fig. 1(b)のように予めハンダでメッキした REBCO 線材を用いて、エンドリングを円形コイル状にし、1 ターンずつ巻きながらバーとエンドリングの超伝導層が向かい合うようにバーを挟みバーとエンドリングをハンダ接続した。

Table. 1  
Specification of superconducting squirrel cage rotor composed of REBCO tapes.

Tape width [mm]	4
Tape thickness [mm]	0.13
Critical current of tapes (77K, s. f.) [A]	190.5
$n$ value	24.2
Number of parallel tapes in a bar	5
Number of bars	12
Cross sectional area, A [mm <sup>2</sup> ]	32
Outer diameter of rotor, D <sub>1</sub> [mm]	59.4
Inner diameter of rotor, D <sub>2</sub> [mm]	37
Effective length, L [mm]	110

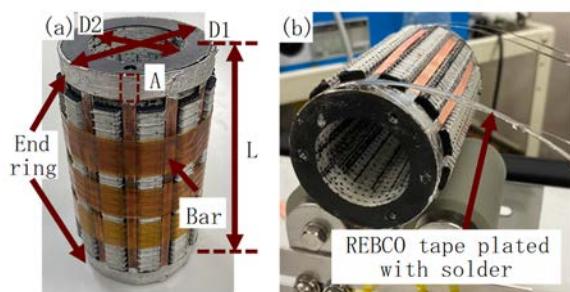


Fig. 1 Superconducting squirrel cage rotor composed of REBCO tapes. (a) Completed rotor. (b) Fabrication process.

### 3. 実験方法

本実験では、超伝導かご形回転子と文献[3]で製作された台形電機子巻線で構成した2極の誘導モータを使用した。液体窒素で冷却し、三相交流電流を通電したモータのシャフトと負荷装置をカップリングで接続し、回転子をある速度で回転させたときのトルクを測定した。また、電源周波数は15 Hzとし、電流振幅値を40, 50, 60, 70 Aと変化させ定常状態における回転速度-トルク特性を調べた。

### 4. 結果と考察

Fig. 2 に空心全超伝導誘導モータの回転速度-トルク特性を示す。40, 50 A<sub>max</sub> のトルク曲線では同期付近で最大トルクが得られたが、60, 70 A<sub>max</sub> と増加すると始動トルクが最大トルクとなつた。このトルク特性の変化は、回転子の抵抗の変化が大きくなつたためであると考えられる。これは、電機子電流の増加により回転子の超伝導線への鎖交磁束が多くなったことで臨界電流が低下したためである。また、同期付近(896 rpm, すべり  $s = 0.004$ )のトルクは、40 A<sub>max</sub> のときに最大トルクの70 %程度であったが、70 A<sub>max</sub> のときでは35 %程度に低下した。誘導モータは回転子が低抵抗のとき最大トルクが同期付近で得られ、超伝導回転子は同期付近で超伝導状態となり最大トルクを取ると考えられるが、その現象は確認できなかつた。この原因として同期付近では、超伝導体の抵抗ではなくバーとエンドリングの接続抵抗が支配的になつたからであると考えられる。

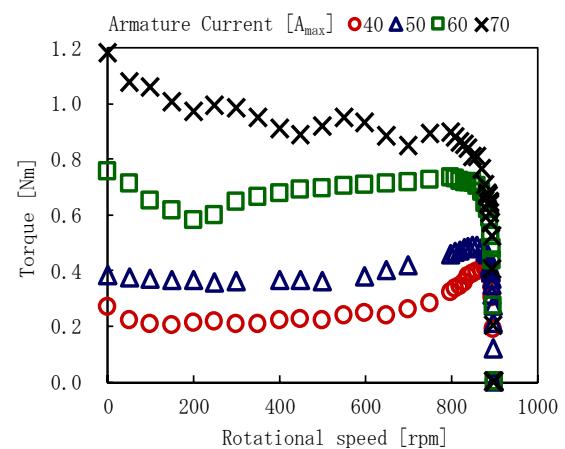


Fig. 2 Torque-rotational speed characteristics of air-core fully superconducting induction motor at 77 K. The synchronous speed is 900 rpm.

### 参考文献

1. T. Nakamura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no. 2, 2006
2. K. Ikeda et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, 2017
3. M. Tsumori et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 34, no. 5, 2024

# 電動航空機推進用全超電導モータにおける希薄ガスを用いた 回転子冷却の成立条件の検討

## Investigation of conditions for rotor cooling using dilute gas in fully superconducting motors for electric aircraft propulsion

山切 紫雲, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大); 岡井 敬一(JAXA)  
YAMAKIRI Shiun, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); OKAI Keiichi (JAXA)  
E-mail: 9829105180@edu.k.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

超電導回転機は電気抵抗がゼロで大電流が通電可能という超電導の特性から、より小型・軽量化が可能で、航空機の推進システムにおいて期待されている。超電導回転機には界磁巻線に超電導線材を使用する「界磁超電導回転機」と、界磁巻線、電機子巻線の両方に超電導線材を使用する「全超電導回転機」があるが、後者の方が相対的により小型・軽量化が可能なため電動航空機においても全超電導回転機の使用が想定されている。本稿は全超電導モータを提案し、特に希薄ガスの回転子の冷却手法に関して有限要素法による熱伝導場および流体場の連成解析を行い、その有効性に関して考察を行った。

## 2. 全超電導回転機の冷却手法

従来の全超電導回転機の冷却方法では、固定子（電機子巻線）と回転子（界磁巻線）にそれぞれ別々の冷媒供給路を設ける必要があり、機構が複雑になる課題があった。これに対して当研究グループは図1に示すように回転子と電機子巻の間に希薄ガスを満たす構造を提案してきた[1]。本手法では、電機子巻線は従来通り冷媒で直接冷却され界磁巻線は固定子と回転子の間にある希薄ガスを通じて熱伝導と対流による熱伝達を利用して冷却される。この方法により、回転子側に専用の冷却機構を設ける必要がなくなり、回転子構造の簡略化が可能である。

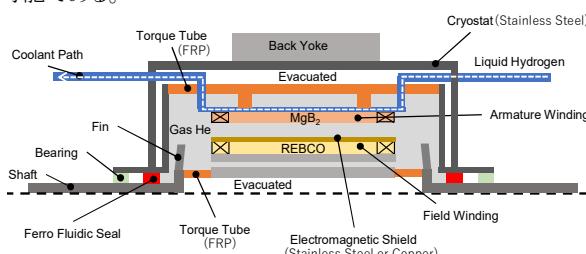


Fig.1 Fully superconducting machine employing dilute gas rotor cooling [1]

### 3 回転子の冷却特性実験

3. 回転子の冷却特性実験  
小型モデル実験機を用いた静止・回転実験を行った。He ガス圧力をパラメータとして本冷却手法によって、回転子表面がどの程度冷却されるかを測定した。この結果より静止・回転条件のどちらにおいても He ガス圧力を高くするほど冷却が促進されていることが確認できた。

#### 4 実験機モデルの冷却特性解析

#### 4. 実験機 モデルの構造特性解析

希薄ガスによる回転子冷却の有効性を検討するため、有限要素法解析ソフトウェアである COMSOL Multiphysics®を用いた解析を行った。本研究では熱伝導場と流体場の連成解析と実験式を用いて対流の影響を考慮した熱伝導解析の両方を行う。

#### 4.1 実験機の数値解析モデル

実験結果との比較をすることを目的に寸法, 壓力, 冷却温度等の実験条件に合わせて 3 次元でモデリングを行なった。当

グループの提案に基づく実験機解析モデルを図 2 に示す。温度の初期条件は、温度測定開始時の回転子表面温度 230 K、固定子外壁の境界条件は 77 K 一定とした。また重力による自然対流も考慮した。

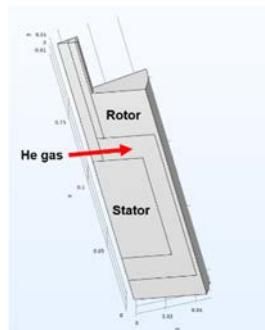


Fig.2 3D analytical model of an experimental.

#### 4.2. 静止条件と回転条件

MR.前田和行と西村和行  
解析モデルの妥当性を確認するために二手法の解析を行った。図3に示すように回転速度が大きくなるほど冷却が促進されることが確認できた。また、解析結果と実験結果がほぼ一致し、回転子を回転させた回転条件においても比較を行った結果はほぼ一致することから、これらの解析モデルは妥当であるといえる。

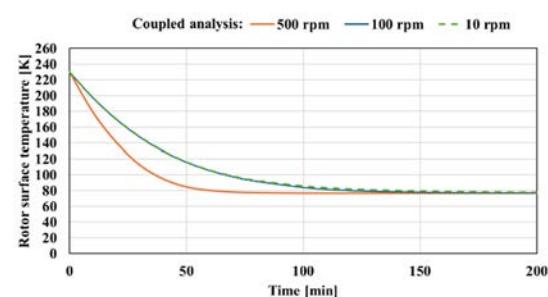


Fig.3 Comparison of results under rotational.

## 5. まとめ

3. まとめ  
本研究では、全超電導回転機の回転子の静止・回転条件における実験機の3次元モデルで有限要素法を用いた数値解析を行った。実験と比較を行うことで両者はほぼ一致し、また、ガス圧力依存性を得ることができた。今後は、本研究で使用した実験式を用いた熱伝導解析を実機モデルの電動航空機推進用全超電導モータに適用し熱侵入の数値解析を行い、実用的な設計に向け効率的な回転子冷却を実現するための熱設計を行う予定である。

参考文献

1. Y. Terao, et. al. "Electromagnetic analysis of fully superconducting motors employing dilute gas rotor and liquid hydrogen stator cooling structure,". Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2545, No. 1, (2023) p. 012027.

## バルク超伝導磁気浮上の矩形補助磁石追加による磁気剛性向上

Improved Magnetic Stiffness of Bulk Superconducting Levitation by adding Auxiliary Magnets

二村 宗男, 石井 貴之, 佐藤 明(秋田県立大)

FUTAMURA Muneo, ISHII Takayuki, SATOH Akira (Akita Pref. Univ.)

E-mail: futamura@akita-pu.ac.jp

### 1. はじめに

磁束ピン止め効果によるバルク超伝導磁気浮上を利用した機械システムは、強い磁気力と磁気剛性を得ることで浮上の安定性が改善し、システムの性能向上とエネルギー損失の抑制につながる。本研究では、固定子側のバルク超伝導体に補助として2個の矩形永久磁石を併用した場合の、補助磁石の寸法、間隔および磁石の浮上高さの違いによる磁気力、磁気剛性から浮上磁石の安定性を評価する。

### 2. 磁気力の測定

断熱容器の中に超伝導体(DyBaCuO、高さ 4.5×幅 25×奥行き 25 mm, 21.3 g)と 2 つの補助磁石(NdFeB, 10×w×25 mm)から構成される固定子を設置する。固定子の上面から 5 mm 上方( $z_0 = 5$  mm)に浮上用磁石(NdFeB, 25×5×3 mm, 5.6 g)を固定し、断熱容器内に液体窒素を注いで超伝導転移させ磁束をピン止めする。冷却後、浮上用磁石を測定部に固定したデジタルフォースゲージを用いて、鉛直方向の磁気力を測定する。デジタルフォースゲージは、z 軸ステージに取り付けられており、浮上用磁石の位置を準静的に移動できる。補助磁石の幅  $w$  は 1, 2, 3, 5 mm の 4 種類とし、2 つの補助磁石の外側を超伝導体の一辺と等しい 25 mm に固定してその内側の空間幅  $d$  が変化することによる磁気力を調べた。

### 3. 結果

磁気力測定の結果を Fig. 1 に、磁気力から算出した磁気剛性の結果を Fig. 2 に示す。超伝導体表面を  $z = 0$  mm としている。Fig. 1 では  $z_0 = 5$  mm において磁場中冷却してから浮上用磁石を一旦  $z = 60$  mm まで遠ざけた後、 $z = 3$  mm まで近づける際の磁気力を▲、その後遠ざける際の磁気力を●で記している。これらの差は小さいことから、 $z = 3$  mm まで近づけることによるピン止め磁束のヒステリシスは無視することにする。補助磁石を追加した固定子は超伝導体のみの固定子に比べて、冷却位置  $z_0$  から離れた際の吸収力が補助磁石の幅を大きくしていくごとに増加した。これは、補助磁石の幅  $w$  が大きくなるほど、浮上用磁石と補助磁石の引き合う力が大きくなるためである。

Fig. 2 の磁気剛性のグラフにおいて、補助磁石を追加した固定子の磁気剛性は、超伝導体のみの固定子に比べ向上しており、補助磁石の幅  $w$  が大きいほど磁気剛性も大きくなつた。冷却位置  $z = 5$  mm において  $w = 5$  mm の補助磁石を追加した固定子は、超伝導体のみの固定子と比べて磁気剛性が 2 倍以上上昇し、鉛直方向の浮上安定性が増加した。

磁束ピン止め位置(初期位置)の違いを調べるために、超伝導体の冷却位置  $z_0 = 3$  mm として磁気剛性も測定した。 $z_0 = 5$  mm の場合と同様に補助磁石の幅  $w = 5$  mm の値が最も高く、また磁気剛性はそれぞれの固定子で  $z_0 = 5$  mm の場合に比べて 2 倍以上増加した。これは、初期冷却位置が低いことによる磁束の増加の影響が大きいが、それに加えて、浮上用磁石から補助磁石に入る磁束線は  $z$  軸に対して浅い角度になることも影響している。これにより、浮上磁石が低い位置( $z$  の値が小さいとき)において鉛直下向きに作用する吸引力が弱まつたために磁気剛性が上昇したことが磁気剛性の向上に影響している。

### 4. 結言

バルク超伝導体の磁束ピン止めを用いた磁気浮上について、浮上安定性の向上を目的に剛性の変化を調べた。超伝導固定子の下部に補助磁石を追加することによって磁気剛性が向上し、追加した補助磁石の幅が広いほど、向上の度合いが大きいことがわかった。浮上磁石の浮上位置と補助磁石の間隔によって、磁気剛性に関与する補助磁石の磁気力を最適値があることが考えられる。

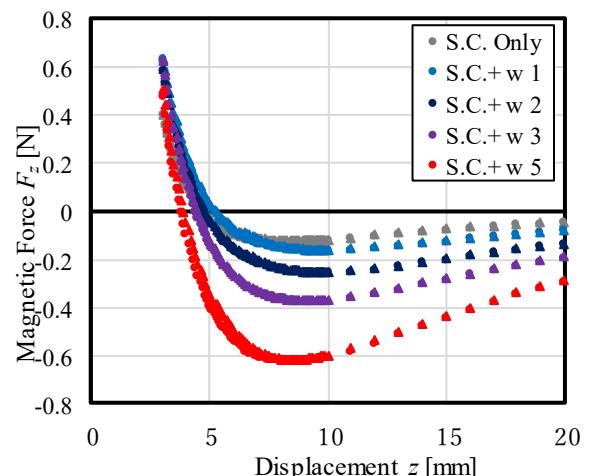


Fig. 1 Magnetic force of various stators.

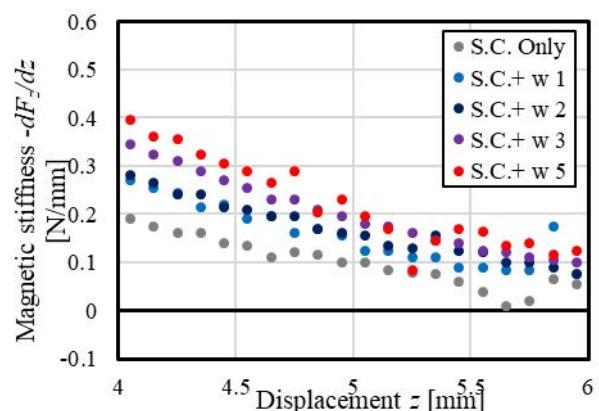


Fig. 2 Magnetic stiffness of various stators.

# バルク超電導体の捕捉磁場分布からの超電導電流分布及び $J_c - B$ 特性の推定

## Estimation of superconducting current distribution and $J_c - B$ characteristics from trapped field distribution in bulk superconductor

飯田 晃太郎, 奥村 麻月, 蛭海 悠人, 秋澤 涼介, 寺尾 悠, 大崎 博之(東京大学);  
高久 諒太(量子場計測システム国際拠点); 松村 知岳(カブリ数物連携宇宙研究機構);  
富田 優(公益財団法人総合技術研究所)

IIDA Kotaro, OKUMURA Satsuki, HIRUMI Yuto, AKIZAWA Ryosuke, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (U-Tokyo);  
Tomotake MATSUMURA (Kavli IPMU); Ryota TAKAKU(QUP); Masaru TOMITA (Railway Technical Research Institute)  
E-mail: 7293682132@edu.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. 序論

超電導磁気軸受(SMB:Superconducting Magnetic Bearing)とは超電導体のピン止め効果による磁気浮上技術を軸受に応用したものであり、一般に永久磁石とバルク超電導体(以下、バルク)で構成される。特にバルクの物性値は軸受の浮上力特性等に大きく関わる[1]。そのため、本研究ではバルクを磁場中冷却(FC)して着磁することで磁束密度分布を測定し、得られた結果をMTALABで逆問題解析を行うことにより、バルク内の電流密度分布について報告・議論する。

### 2. バルク超電導体の着磁実験

Table 1 に本実験で使用したバルクのサイズを示し、Fig. 1 に使用したバルクの写真を示す。超電導マグネットを用いて FC してバルクを着磁させた。次にホールセンサで磁束密度分布を得た。ホールセンサとバルク表面の距離(gap)は 2.0 mm である。

### 3. 逆問題解析( $B \rightarrow J$ )と有限要素法解析( $J \rightarrow B$ )

測定した着磁捕捉磁場特性から逆問題解析を行うことでバルク内の電流密度分布の推定を行った。着磁されたバルク中に流れる電流は円環電流となっている。バルク中の複数の円環電流が任意点に磁界を作る様子を Fig. 2 に示し、複数の円環電流が作る任意の磁場は式(1)のように表せられる。

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{z1} \\ \vdots \\ B_{zm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで係数  $a_{m,n}$  は、バルク内部の微小領域における円環電流から、ビオ・サバールの法則をもとに求めることができる。これにより着磁実験から得られた  $z$  方向磁場分布よりバルク超電導体内部の電流密度分布を推定することができる。また、逆問題解析で推定した電流密度分布を JMAG-Designer を用いた有限要素法解析に反映し、補足磁場分布を得た。Fig. 3 に逆問題数値解析結果と測定結果を示す。非常に良く一致していることが分かる。

### 4. 厚さ方向の電流密度の考慮

厚さ方向の電流密度の違いを考慮するために、gap をバルクの表面、裏面から 0.5~5.0 mm まで変化させて捕捉磁場分布を測定した。gap=0.5 mm の時の結果を Fig. 3 に示す。表の捕捉磁場の方が裏の補足磁場より大きい。これは厚さ方向に電流密度分布が存在しているからだと考えられる。

### 5. 結言

本研究では SMB におけるバルク超電導体の  $J_c - B$  特性を把握するために着磁実験を行い逆問題解析と有限要素法解析からバルク内部の電流密度を推定し、捕捉された磁場分布を実験値と比較した。また、厚さ方向の電流密度を考慮するために表面、裏面両面において gap を 0.5~5.0 mm まで変化させて捕捉磁場を測定した。今後はそのデータに基づいて厚さ方向に 3 分割した計 39 分割で逆問題解析をし、さらに各点の  $J_c - B$  特性を議論する予定である。

### 参考文献

1. Satsuki Okumura, et al., 36th Int. Symp. on Supercon., Wellington, New Zealand, AP7-4, Nov. 2023.

Table 1 Specifications of the bulk superconductor

Parts	Scale
Diameter	26 mm
Height	12 mm



Fig. 1 Bulk superconductor

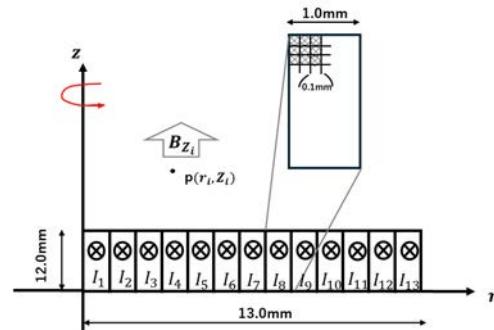


Fig. 2 Inverse problem analysis method

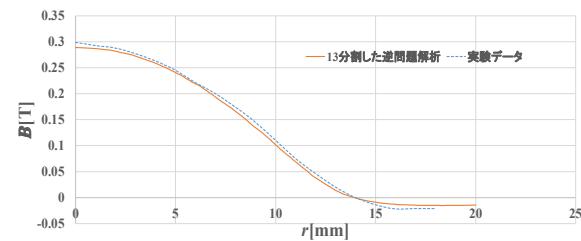


Fig. 3 Comparison of the trapped magnetic field distribution between the measured results and those calculated by inverse problem analysis

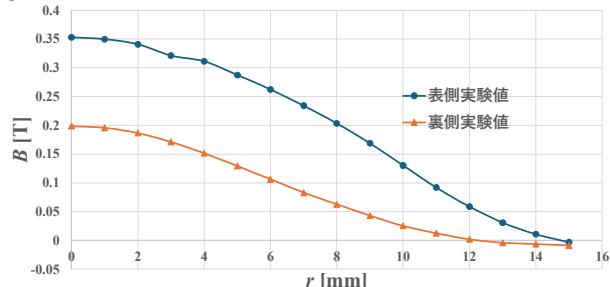


Fig. 4 Trapped magnetic field distribution in front and back at 0.5 mm

# 磁気プラズマセイルの推進加速度向上に適した HTS コイルの輻射熱シールド構成

## Radiation heat shield configuration of an HTS coil suitable for improving propulsive acceleration of magnetic plasma sail

淡路 恵, 長崎 陽, 津田 理 (東北大)  
 AWAJI Rei, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)  
 E-mail: awaji.rei.s2@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

次世代の宇宙機推進システムとして、超電導コイルがつくる磁場空間で太陽風プラズマを受け止めて推力を得る、磁気プラズマセイルの研究開発を行っている。本システムの推力は磁場空間の大きさに依存するため、磁気モーメントが大きいほど推力も大きくなる。なお、磁気モーメントはコイルの囲む面積、電流値、巻数の積で表される。先行研究では、多積層 REBCO コイルにおいて、梯子型補強構造を提案し、軸方向圧縮応力の低減による臨界電流向上により高磁気モーメント化を行った。このコイルの臨界電流向上は、超電導コイルの運転温度低減によっても可能であるが、これには重量を伴う輻射熱シールドが必要となる。そこで、本研究では、磁気プラズマセイルにて超電導コイルを効果的に冷却でき、最大の推進加速度が得られる輻射熱シールド構成について検討した。

### 2. 解析方法

解析に用いた宇宙機モデルを Fig.1 に示す。また、宇宙機各部の材料やコイルの詳細を Table.1 に示す。なお、宇宙機各部のモデル化は JAXA による SPICA ミッション提案書<sup>[1]</sup>を参考とした。また、太陽光や惑星からの輻射熱はすべて宇宙機の構造体で遮断され超電導コイルには直接当たらないとした。このため、熱源としては、室温(300K)である Bus 部からの輻射熱、太陽光によって加熱される太陽光パネルからの輻射熱、コイルを支える支持トラスを介した伝熱、コイル接続部やスイッチ等でのジュール発熱を扱うこととした。なお、伝熱解析には 3 次元有限要素法を用いた。

まず、輻射シールドの、最上面と最下面を固定し、その間に輻射シールドを等間隔で配置した際に、推進加速度が最大となるシールド枚数を検討した。そして、得られた輻射シールド枚数において、最上面と最下面の位置が推進加速度に及ぼす影響を検討した。

### 3. 解析結果及び考察

各輻射シールド枚数におけるコイル内最大温度から通電电流( $I_c$  の 80%)を決定し、推力を計算した。そして、輻射シールド枚数から全体の重量を算出し、宇宙機の推進加速度を計算した。この結果を Fig.2 に示す。推進加速度は、シールド枚数が 2 枚の時に最大となり、シールド枚数が増えるにつれて推進加速度は減少した。また、シールド枚数が 3 枚以上の時のコイル温度は、2 枚の時よりも低くなつたが、シールドの重量増加が顕著となり、推進加速度は低下した。

また、2 枚の輻射シールドの位置を変えた場合のコイル温度と推進加速度を算出した。この結果を Table. 2 に示す。これより、最下面を Bus 部から離して配置した時に温度が最低となり、最大の推進加速度が得られた。これまでの設計指針では、輻射シールド 4 枚にて 20K での運

用が想定されているが、その場合よりも推進加速度を約 15%向上させることに成功した。

Table.1 Specifications of magnetic sail

HTS tape	FYSC-SCH04
coil case Material	A6061
Bus side panels Material	AL-1/4-5056-001P
Supporting trusses Material	CFRP
Number of turns	23/coil
Stack number of coils	150
Inner radius of coil	2.5m
Radiosity of MLI	0.03

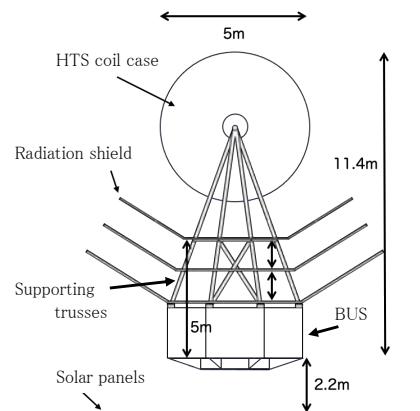


Fig. 1 Analysis Model

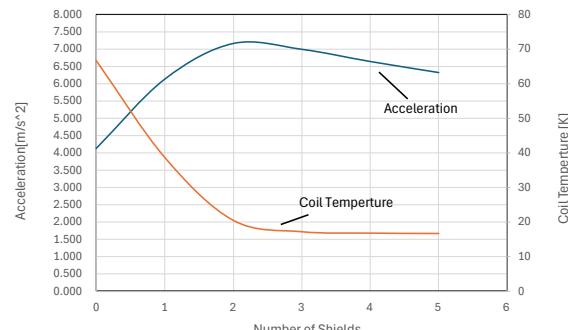


Fig. 2 Dependence of acceleration and temperature on the number of radiation shields

Table. 2 Dependence of coil temperature and acceleration on shield position

Number of Shields	Shield position	Coil temperature [K]	Acceleration [m/s^2]
2	bottom-top	20.5	7.164
	bottom-middle	22.1	6.976
	middle-top	18.3	7.406

### 参考文献

- 宇宙航空研究開発機構 SPICA ミッション提案書(第 2 版) 第七章

# 能動的蓄冷式磁気冷凍を活用した液体空気貯蔵システムの性能評価

## Performance Evaluation of Liquid Air Energy Storage Utilizing Active Magnetic Regenerative Refrigeration

秋谷 一樹, 石田 政義(筑波大学); 神谷 宏治, 夏目 恭平, 白井 肇, 関 孝峻(NIMS)  
AKIYA Kazuki, ISHIDA Masayoshi (TSUKUBA Univ.); KAMIYA Koji, NATSUME Kyohei, SHIRAI Tsuyoshi, SEKI Takatoshi  
 (NIMS)  
 E-mail: s2320831@u.tsukuba.ac.jp

### 1. はじめに

再生可能エネルギーの大量導入に伴う余剰電力への対応として、様々な利点を持つ液体空気貯蔵システム(LAES : Liquid Air Energy Storage)が注目されている[1]。一方、従来の LAES における液化過程は、ジュールトムソン膨張を用いるため、これ以上の大幅な高効率化が困難であるという課題を持つ。本研究では、空気の液化過程を効率の低いジュールトムソン膨張から固体式で高効率な磁気冷凍に置き換えた、磁気冷凍 LAES システムを提案する。磁気冷凍の中でも、運転温度範囲の広い能動的蓄冷式磁気冷凍(AMR : Active Magnetic Regenerative Refrigeration)を LAES に適用するとして、エネルギー効率を計算によって評価した。

### 2. 目的

AMR を水素の液化や室温空調に適用した研究は報告されているが、空気液化に適用した研究の報告はない。本研究では、AMR を LAES に適用し、従来のクロードサイクルを用いた気体式冷凍機を適用した場合と比べて、エネルギー効率がどのように変化するのかを計算によって明らかにする。

### 3. 評価方法

図 1 に本研究で提案する LAES の PFD(Process Flow Diagram)を示す。本図は 3 つの領域に分かれ、それぞれ排熱領域(Heat Exhaust)、空気液化領域(Air Liquefaction)、発電領域(Power Generation)となっている。本研究では、まず排熱領域と空気液化領域にある AMR ブロックについて、入力に対する出力を数値計算で求める。次にこの AMR ブロックを PFD に組み込み、圧縮機、熱交換器、膨張タービンなど各構成機器のエンタルピーバランスを計算することで、システム全体の性能を求める。

#### 3-1. AMR ブロックの計算

液化温度近傍における AMR の液化能力を一次元モデルによって求めた。本モデルの磁性体材料は、分子場近似により磁気的な物性値が求められる仮想磁性体を用いる[2]。

#### 3-2. LAES システム計算

LAES システムにおける各過程を仮定したのち、構成機器前後における流体の温度、圧力、比エンタルピー、比エントロピーをそれぞれ求める。これらは冷媒熱物性データベースソフトウェア NIST REFPROP version10.0 を用いて求める。このとき各構成機器でのエンタルピーバランス、および LAES システム全体でのエンタルピーバランスが取れていることを確認する。

次に、求めた各機器の流入側と流出側の状態量からエクセルギーの変化分を求めた。エクセルギーの変化分は式(1)で表される[3]。ここで  $E$  はエクセルギー、 $H$  はエンタルピー、 $S$  はエントロピーを表し、添え字の 1,2 は流入側と流出側を示す。

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (H_2 - H_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (1)$$

### 4. 結果

LAES での各機器のエクセルギー変化量について、従来の気体式冷凍システムと本システムとの比較結果を Figure 2 に示す。エクセルギー損失は、AMR を用いた LAES システム

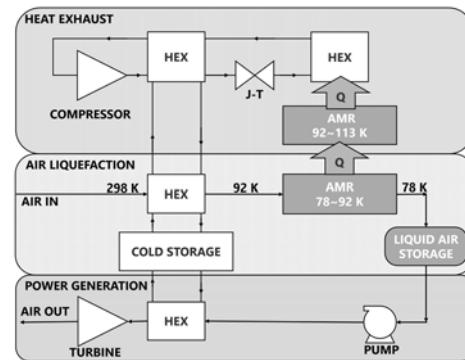


Fig. 1 Process flow diagram of proposed LAES system

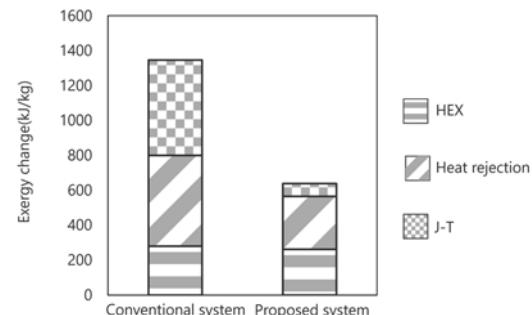


Fig. 2 Exergy changes for the LAES plant

の方が小さいことがわかり、エネルギーをより有効利用できている。

### 5. まとめと今後

本研究ではAMRを用いたLAESを提案し、その性能の評価を行った。AMRを用いることでLAESの性能向上が可能であることを示した。本研究においてAMRの排熱温度はLNG冷熱利用を見越した温度となっているが、今後は磁性材料を複数用いることでAMRにより室温から液化までの全温度領域をカバーした際の効率について検討したい。

### 参考文献

- 内山洋司, 平山省一, 佐藤禎司, : 液体空気貯蔵ガスタービン発電システム-LNG冷熱を利用した高効率発電システム-, エネルギー・資源, Vol.12 (1991) p73-78
- 橋本巍洲, : 超伝導を支える新低温技術 磁気冷凍と磁性材料の応用, 工業調査会
- Giuseppe Leo Guizzi, et al.: Thermodynamic analysis of a Liquid Air Energy Storage System, Energy, 93 (2015) p1637-1647

# MgB<sub>2</sub> ラザフォード導体短尺試験のための銅電流リードの開発

## Development of Cryocooler Cooling Copper Current Leads for Short Sample Tests of MgB<sub>2</sub> Rutherford Cables

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, 力石浩孝(NIFS)

YAJIMA Kenta, XU Hang, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); NITTA Tanzo (Univ. of Tokyo);

SHINTOMI Takakazu (KEK); HIRANO Naoki, CHIKARAISHI Hirotaka (NIFS)

E-mail: ce241036@meiji.ac.jp

### 1 はじめに

著者らは、電力系統の固有値測定を目的とした SMES 応用に向けて MgB<sub>2</sub> を用いたラザフォード導体を製作することを検討している。ここで、MgB<sub>2</sub> 素線に印加される曲げひずみに対する臨界電流特性の劣化の有無を評価するため、冷凍機伝導冷却による導体短尺試料試験の実施を計画している。曲げひずみを印加しない MgB<sub>2</sub> 素線の臨界電流は 20 K、ゼロ磁場下で 600 A 程度と予想されており、通電試験に用いる電流リードは 600 A 通電可能な設計とする必要がある。冷却能力の低い冷凍機 2 段目の熱負荷低減のために、電流リードは室温から冷凍機 1 段目までの銅電流リード、冷凍機 1 段目から 2 段目までの高温超電導体 (HTS) 電流リードで構成される。本発表では、微分方程式の数値的解法によって最適設計した銅電流リードの開発状況について報告する。

### 2 実験装置

Fig.1 にクライオスタットの構成を示す。冷凍機は住友重機械工業製の RDK-415D2 を使用する。銅電流リード低温端およびアルミニウム板で製作したシールド容器は冷凍機 1 段目と接続されている。なお、冷凍機 2 段目には MgB<sub>2</sub> 導体短尺試料を設置する予定である。

### 3 リード最適設計と通電試験

銅電流リードの低温端から高温端の方向に向かって幅  $dx$  で要素分割したときの位置  $x$  に対する温度  $T$  についての定常状態での熱平衡方程式を立て、 $d^2T/dx^2$  について整理すると次のように表される。

$$\frac{d^2T}{dx^2} = -\frac{1}{\lambda(T)} \frac{d\lambda(T)}{dT} \left( \frac{dT}{dx} \right)^2 - \frac{I^2 \rho(T)}{A^2 \lambda(T)} \quad (1)$$

ここで、 $A$  はリードの断面積、 $\rho$  は電気抵抗率、 $\lambda$  は熱伝導率、 $I$  は電流である。

銅リードの最適な長さと断面積の比は、式 (1) に対して高温端温度が所望の値となるような  $dT/dx|_{x=0}$  を計算を繰り返すことにより定め、前進差分法を用いて数値計算することにより求めた。銅リード低温端温度 60 K、高温端温度 300 K、電流 600 A としたとき、リードが熱暴走せず、高温端からの侵入熱が最小となる長さ  $L$  と断面積  $A$  の比は  $L/A = 6.32 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$  と求められた。ただし、安全のためこれに 0.8 を乗じた形状比を採用した。断面積 60 mm<sup>2</sup> の平編銅線を 2 本重ねて銅電流リードを構成したが、平編銅線の編込率 20 % を考慮し、長さは 500 mm とした。600 A 通電時の銅電流リードによる冷凍機 1 段目に対する熱負荷はリード 1 本あたり約 27.3 W と概算された。

通電時の銅電流リードの温度分布を確認するためにリード低温端を銅バーで短絡して 604 A、630 秒間の通電試験を実施した。通電開始直前の銅電流リード低温端の温度は 65.0 K であり、HTS 電流リードが使用可能な

温度となった。しかし、電流値が 604 A に到達してから 314 秒後に 70 K を超えることが確認された。銅電流リード各部の温度が最大となったのは 1A/s の速さで電流を減少させてから約 200 秒後であり、そのときのリードの温度分布および、定常状態のリードの温度分布の計算値を Fig.2 に示した。実験値と計算値に大きな乖離が生じているのは温度測定に使用した熱電対 (リード低温端は Cernox 温度計を使用) の熱接触に問題があったためであると考えられる。今後、銅電流リード低温端が 70 K 以下となる時間を延ばすため、さらに熱侵入の少ない銅電流リードを製作する予定である。

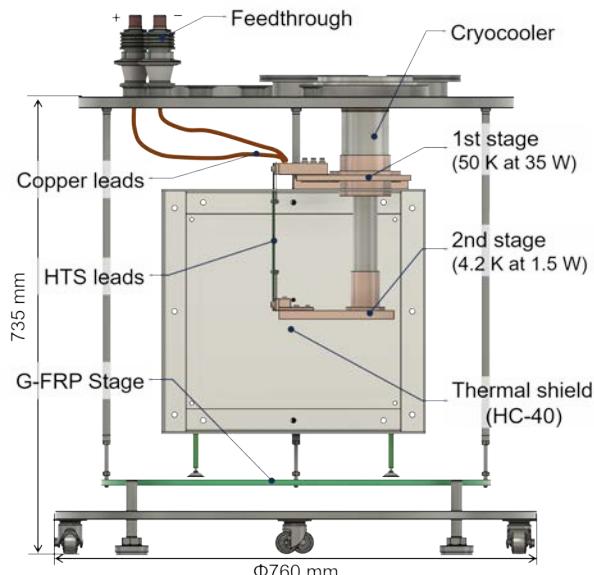


Fig. 1 Installation of the cyrocooler and the current leads in the cryostat.

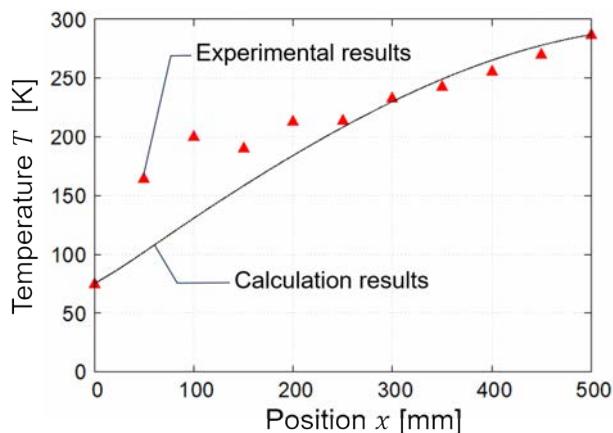


Fig. 2 Copper current leads energization test results.

# LHC 高輝度化アップグレード用超伝導磁石の開発 (20)

## - 7 m 実機磁石製造状況と磁石試験結果

Development of superconducting magnets for high-luminosity LHC upgrade  
- Production status and test results of 7 m-long series production magnets

菅野 未知央, 鈴木 研人, 中本 建志, 池本 由希子, 岡田 尚起, 岡田 竜太郎, 萩津 透, 川又 弘史,  
高橋 直人, 田中 賢一, 寺島 昭男 (高エネ研); 木戸 修一, 柳澤 正樹, 田原 大夢 (日立製作所);  
西 将汰 (神戸大); 木村 誠宏 (東京大学); 市原 直 (フューザックテクノロジーズ);

PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)

SUGANO Michinaka, SUZUKI Kento, NAKAMOTO Tatsushi, IKEMOTO Yukiko, OKADA Naoki,  
OKADA Ryutaro, OGITSU Toru, KAWAMATA Hiroshi, TAKAHASHI Naoto, TANAKA Kenichi,  
TERASHIMA Akio (KEK); KIDO Shuichi, YANAGISAWA Masaki, TAHARA Taimu (Hitachi, Ltd.);  
NISHI Syota (Kobe University); KIMURA Nobuhiro (The University of Tokyo);  
ICHIHARA Tadashi (Fusac Technologies); PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)

E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

### 1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ルミノシティを現行 LHC の 10 倍以上である  $3000 \text{ fb}^{-1}$  まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。この目標の実現には、衝突点近傍の磁石システムの性能向上が不可欠であり、KEK はその中でビーム分離双極磁石 (D1 磁石, MBXF) の開発を担当している。重要な要求性能は、150 mm の大口径、35 T·m の積分磁場 (主双極磁場 5.6 T, 運転温度 1.9 K, 定格電流 12.11 kA), 想定吸収線量 25 MGy に対する耐放射線性などである。超伝導コイルには Cu/Nb-Ti ケーブルが用いられている。日本の分担として、7 m 長の実証機 1 台と実機 6 台を物納貢献することになっており、現在メーカーにおいて製造が進められている。本講演では、実機磁石製造の状況と性能評価試験の結果について報告する。

### 2. 実機磁石、コールドマスの状況

以下の説明で「磁石」は励磁可能な状態ではあるが両端が開放された状態、「コールドマス」は両端部の配管溶接が完了し、高圧ガス容器として完成された状態を指す。D1 磁石は、メーカーでの磁石組立完了後に一旦 KEK において性能評価のための冷却・励磁試験が行われる。その後、メーカーにてコールドマス組立が行われ、耐圧気密検査合格後に KEK に輸送される。最後に KEK で常温磁場測定を行い、CERN に発送される。実証機は既に CERN に輸送済みで横型クライオスタットでの励磁試験も完了し

ている。本件発表の時点では、MBXF1 は CERN への海上輸送、MBXF2 はコールドマス組立、MBXF3 は KEK での磁石試験、MBXF6 は日立製作所での磁石組立をそれぞれ実施予定である。

### 3. 実機磁石の性能評価試験

KEK で行った磁石試験で得られた実証機 (MBXFP1) と実機磁石 (MBXF1, 5, 2) のトレーニングプロットを Fig. 1 に示す。全ての実機磁石が受入電流に到達したことがわかる。MBXF1 と MBXF2 では、室温までの昇温、1.9 K への再冷却後の良好なトレーニングメモリーも確認された。この 2 台は、受入電流での 4 時間連続通電にも成功している。

Harmonic coil を用いた磁場測定により、磁場精度の評価も行なっている。同一コイル断面設計の実機磁石 3 台では、設計上最も大きな多極磁場成分が発生する 6 極成分で OPERA 3D によるシミュレーションと比較して数 unit 以内 (1 unit は主双極磁場の  $10^4$  と定義) に調整されていることが確認された。また、実機磁石間での良好な再現性も確認されている。

### 4. まとめ

HL-LHC のための D1 磁石、コールドマスの製造が順調に進んでいる。当日は、より詳細な磁石試験結果について報告する予定である。

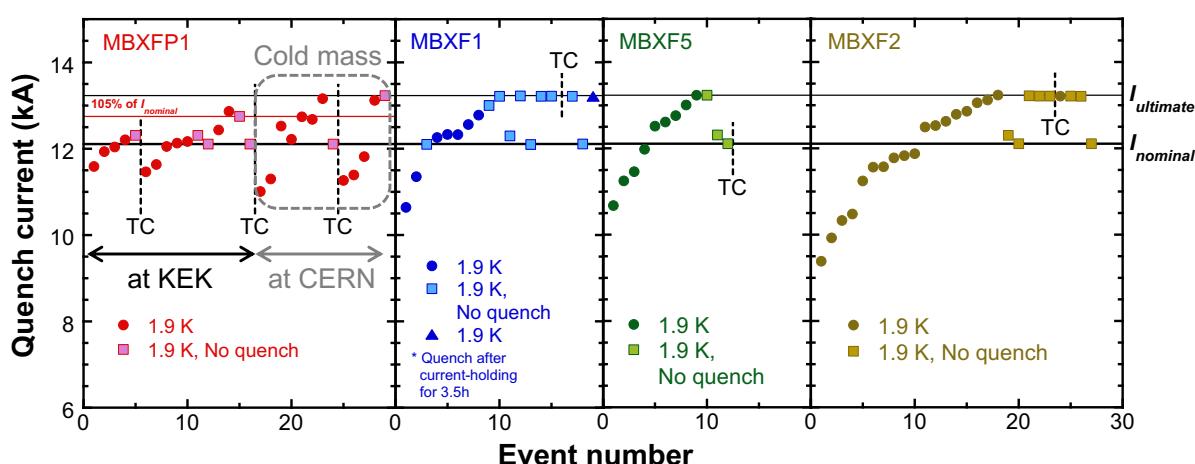


Fig. 1 Training plot of prototype and series production magnets. TC stands for a thermal cycle.

# LHC高輝度アップグレード用超伝導双極磁石の開発 (21) — CERNにおける実証機コールドマスの冷却励磁試験

## Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (21) – Tests of prototype cold mass at CERN

鈴木 研人, 菅野 未知央, 中本 建志, 池本 由希子, 岡田 尚起, 萩津 透, 川又 弘史, 寺島 昭男(KEK);  
木村 誠宏(東大);市原 直(フューザック・テクノロジーズ);

WILLERING Gerard, FISCARELLI Lucio, PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)

SUZUKI Kento, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, IKEMOTO Yukiko, OGITSU Toru, OKADA Naoki,  
KAWAMATA Hiroshi, TERASHIMA Akio (KEK);  
KIMURA Nobuhiro (Univ. of Tokyo); TADASHI Ichihara (Fusac Technologies);  
WILLERING Gerard, FISCARELLI Lucio, PEREZ Juan Carlos, TODESCO Ezio (CERN)

E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

### 1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では欧州原子核機構(CERN)で計画されているLHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)への日本からの貢献としてビーム分離用双極超伝導磁石(通称D1、磁石名MBXF)の製造を進めている。本磁石は定格電流12.11 kAにて積分磁場35 T·mを発生する設計である。初のフルスケール(7 m長)となるD1実証機(MBXFP1)は2020年から2021年にかけてその製造と性能評価が行われ[1]、コールドマス組立後に2023年にCERNへ輸送された[2]。本発表では、CERNで実施されたD1実証機コールドマス(LMBXFP1)の冷却励磁試験について報告する。

### 2 試験項目

CERNにおけるLMBXFP1励磁試験は、2021年にKEKにて実施した磁石励磁試験のトレーニングメモリを確認するのみでなく、国内のコールドマス組立時に追加されたバスリードを含めた初めての性能評価となる。特に、KEKでは設備制約のため受入電流値となる13.23 kAに到達する事ができなかったので、本試験にて最終的なトレーニング性能が評価される事になる。また、D1磁石はクエンチ保護ヒーター(QPH)を用いたクエンチ保護設計となっており、KEKでは蒸発ヘリウムガス回収能力の制約から定格電流以上の性能評価ができなかったため、QPHに関してもやはり本試験で最終的な評価が下される。加えて、D1磁石の磁場精度評価についてもKEKの試験設備の環境と異なり本番仕様である鉄製クライオオスタットを含めた環境下で試験を行うため、磁場分布の変化を確認する初めての試験となる。

### 3 トレーニング試験結果

CERN試験で得られたクエンチトレーニングの結果をFig.1に示す。ここでは2021年に実施したKEK試験の結果も加えている。本トレーニングではKEK試験と同様、1度の昇温サイクルを挟んだ2回の冷却試験(CD1, 2)にわたって実施された。KEKの試験では定格電流値は超えていたものの、CERN輸送後のトレーニングでは初回のクエンチ電流は11 kA付近と、メモリの消失が見られた。しかし、最終的にはKEKで果たせなかった受入電流値に到達しただけでなく、当該電流値にて8時間の長時間通電にも成功しており、良好なトレーニング性能と新たに追加したバスリードの健全性が確認された。なお、上述のメモリ消失についてはKEKのトレーニングが不十分だった可能性も指摘されており、KEK試験で既にトレーニングに成功しているD1実機の今後のCERN試験にてメモリ消失の有無を改めて確認する予定である。

### 4 磁場精度評価

D1磁石の磁場精度について、主要誤差成分であるノーマル6極成分( $b_3$ )はCERNの鉄クライオオスタット環境下ではKEK試験環境と比べて定格電流通電で6.1 unit増加する事が計算で明らかとなっていた( $1\text{ unit} = 10^{-4}$ )。CERN試験において回転コイルを用いた磁場精度評価を実施した結果、 $b_3$ の増加は7.1 unitと認められ、1 unit程度の誤差で予測する事に成功した。この結果を通して、現在製造が進められているD1実機の実運転時の磁場精度の予測が可能となり、既に評価済の実機3台の磁場精度は全て要求仕様を満たしている事を明らかにした。以上により、これまでの磁場設計指針が正しかった事を証明する事ができた。

### 5 クエンチ保護評価

QPH性能評価では遮断後の電流の時間積分値( $MIITs$ )を求めて局所的なピーク温度に焼き直しているが、設計上では仮に受入電流値でクエンチしたとしても350 Kを超えない仕様としている。Fig. 2は2021年のKEK試験に今回のCERN試験で得られた結果を重ねたものだが、KEKの結果を良く再現している事がわかる。さらに本データを解析したところ、受入電流値である13.23 kAでクエンチしたとしても350 Kを超えない温度である事が判明した。また4ヒーター回路(8ストリップ)の内2回路(4ストリップ)しか機能しなかったシナリオを想定した試験も実施し、Fig. 2に示すようにKEKの試験結果の再現している。ここでは定格電流値12.11 kAを最大値として $MIITs$ を測定したが、得られた結果からクエンチ時のピーク温度は350 Kを超えない事がわかり、最悪の場合でもクエンチ保護が可能な設計である事を明らかとした。

### 6 まとめ

LMBXFP1の初めての励磁試験をCERNにて実施した結果、良好なトレーニング性能である事を確認した他、磁場精度とクエンチ保護性能が設計通りである事を明らかとした。

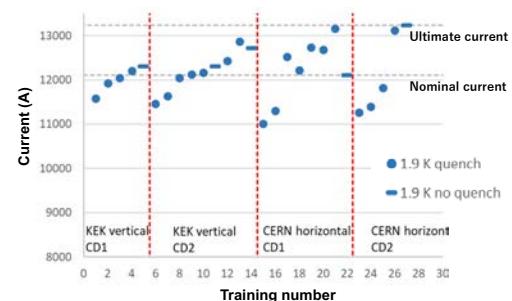


Fig. 1: Training summary of LMBXFP1.

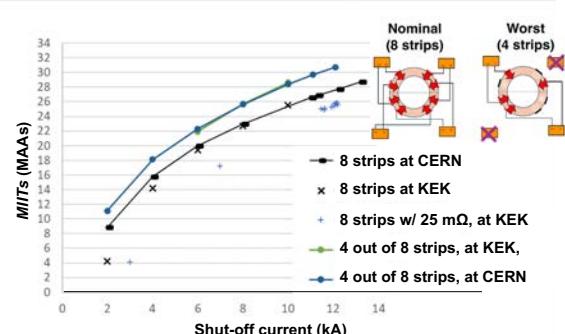


Fig. 2: Measured  $MIITs$  for each shut-off current.

### 参考文献

1. M. Sugano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) 4003407
2. M. Sugano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 34 (2024) 4002106

# SuperKEK アップグレード用 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導 4 極電磁石の開発 – Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導 4 極電磁石開発概要 –

## Development of Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Quadrupole Magnet for SuperKEKB Up-Grade – Development Overview of the Nb<sub>3</sub>Sn Quadrupole Magnet –

ARIMOTO Yasushi, AOKI Kazuyuki, MASUZAWA Mika, NAKAMURA Shu, OGITSU Toru, OHUCHI Norihiro, OKI Toshiyuki, TOBIYAMA Makoto, SUZUKI Kento, UEKI Ryuichi, WANG Xudong (KEK/SOKENDAI); AMBROSIO Giorgio, GOURLAY Stephen, KASHIKHIN Vadim, KASHIKHIN Vladimir, MARINOCZI Vittorio, STOYNEV Stoyan, VELEV Gueorgui, XU Xingchen (Fermilab); HARA Hidekazu, MUN Ka Kei, NAKAO Kengo, SUGIMOTO Masahiro, TANIGUCHI Ryo (Furukawa Electric)

E-mail: [yasushi.arimoto@kek.jp](mailto:yasushi.arimoto@kek.jp)

### 1. Introduction

SuperKEKB is an energy-asymmetric double-ring collider with a 7 GeV electron beam and a 4 GeV positron beam, aiming for a peak luminosity ten times higher than KEKB. In 2022, SuperKEKB achieved a luminosity of  $4.7 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , double that of KEKB. We are still tuning and making minor modifications to reach the target luminosity. However, the Belle II physics experiment group is pushing for faster progress. Improvements such as extending the beam lifetime, enhancing injection efficiency, and reducing beam instability are necessary to meet these demands. An essential modification is adjusting the final focusing superconducting magnet (QCS), which focuses the beam at the interaction point (IP). Our optics studies show that moving the final-focus quadrupole for the positron beam (QC1P) 100 mm closer to the IP will increase the dynamic aperture and extend beam lifetime, offering great potential for future success[1]. Fig. 1 shows the current and proposed QCS at the same scale.

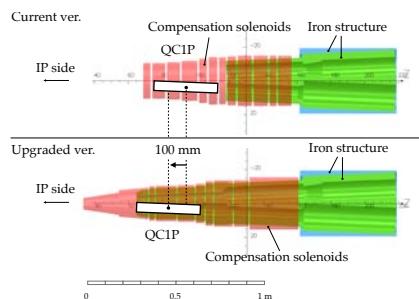


Fig. 1. Comparison of the layout of QC1P on the current and the upgraded version.

### 2. From NbTi to Nb<sub>3</sub>Sn magnet

Several important factors must be considered to move QC1P 100 mm closer to the IP. First, to avoid spatial interference with the adjacent beamline, the thickness of the magnet must be reduced to below 2 mm. Increasing the packing factor of the cable and using high  $J_C$  superconducting cable is an effective way to achieve this. Additionally, to prevent quenching caused by beam-induced radiation heating the superconducting coil due to orbit deviations requires a temperature margin of over 4 K; quenching occurs about ten times yearly on SuperKEKB QCS, causing 2 to 3 hours of downtime. Furthermore, the filament diameter must be kept below 5  $\mu\text{m}$  to minimize magnetic field drift caused by flux creep. To meet these requirements, a rectangular cross-section Nb<sub>3</sub>Sn cable produced by the bronze method will be used.

KEK, Fermilab, and Furukawa Electric are developing a cable that meets these specifications, outlined in Table 1.

### 3. Magnet configuration

The QC1P coil, with an inner bore radius of 22.5 mm, is based on a one-layer  $\cos 2\theta$  design surrounded by a magnetic yoke (Fig. 2). The magnetic field gradient of QC1P is  $80 \text{ T m}^{-1}$ , with an effective field

length of 337 mm. The designed magnet generates the specified field strength at non-copper  $J_C$  of  $2800 \text{ A mm}^{-2}$ . The main parameters of the magnet are shown in Table 2.

Table 1. Requirement parameters for Nb<sub>3</sub>Sn cable of QC1P

Parameters	Values
Coil thickness	< 2 mm
Filament size	< 5 $\mu\text{m}$
Critical temperature @B=2.5 T	> 8.7 K

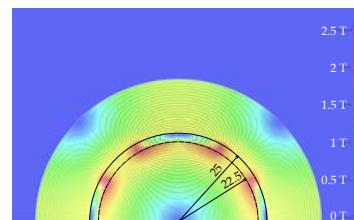


Fig. 2. Calculated magnetic field of Nb<sub>3</sub>Sn QC1P magnet.

Table 2. Main design parameters of Nb<sub>3</sub>Sn QC1P magnet

Parameters	Values
$G$ : Magnetic Gradient	$80 \text{ T m}^{-1}$
$L$ : Effective magnetic length	334 mm
$GL$ : Integrated magnetic field	26.7 T
Inner bore radius	22.5 mm
Relative magnetic field error	$< 1 \times 10^{-4}$
Current density (Non-Cu)	$2800 \text{ A mm}^{-2}$
Magnet current	1700 A
Maximum coil field	2.7 T
Operation temperature	4.7 K

### 4. Development strategy

First, we will fabricate a coil using the actual Nb<sub>3</sub>Sn material and evaluate its performance. During this process, we will perform cold tests by assembling the coil inside a yoke that generates the same magnetic field as the final configuration using a mirror structure. Second, we will design and fabricate a prototype magnet based on the results of the mirror model magnet.

After fabrication, we will perform cold tests with this magnet to investigate the magnetic field quality, quench protection performance, and critical and mechanical properties.

The results of this study will be reflected in the remodeling plan of the SuperKEKB interaction region.

### Reference

1. M. Masuzawa, A. Morita, H. Koiso, K. Aoki, M. Tobiayama, N. Ohuchi, Y. Arimoto, SuperKEKB IR upgrade idea with Nb<sub>3</sub>Sn quadrupole magnets, JACoW IPAC2024 (2024) WEPS74. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPS74.

## 加速器用 HTS マグネットの開発(12) -4.2 K 磁場中の REBCO 丸型ケーブルの臨界電流特性-

### Development of HTS Accelerator Magnet (12)

#### -Critical Current Characteristics of REBCO Round Cables at 4.2 K and in Magnetic Fields-

王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男(KEK); 田邊 豪(潤工社); 菊池 章弘(NIMS)

WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio (KEK); TANABE Suguru (Junkosha Inc.); KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: wanxdon@post.kek.jp

#### 1. はじめに

次世代加速器で提案されている 20 T 級高磁場マグネットに対して、現状で唯一の線材候補である REBCO 線材を用いた大電流導体の開発が求められている。近年、丸線コアへ REBCO 線材をスパイラル状に巻付ける CORC® と STAR® が考案され[1, 2]、フレキシブルな丸型ケーブルとしてコイル開発が期待されている。我々はこの丸型ケーブルの構造をベースに、製作パラメータと臨界電流 ( $I_c$ ) の関係を実験的に評価し、加速器用コイルに求められる電流密度と機械特性を念頭に基礎研究を進めている[3]。高磁場用の REBCO ケーブルの開発において、磁場中のケーブル  $I_c$  評価が必要である。本発表は、先行研究で試作した REBCO ケーブルと新たに製作したケーブル  $I_c$  測定用のサンプルホルダーを用いて、液体ヘリウム冷却(4.2 K)と外部磁場 18 T まで測定したケーブル  $I_c$  を報告する。

#### 2. REBCO ケーブルの 4.2 K 磁場中の臨界電流測定

Fig. 1 に示すように、先行研究で製作した 2 本の長さ 300 mm の REBCO ケーブル (#1, #2)を外径 47 mm のサンプルホルダーの溝に這わせて固定し、液体ヘリウム冷却(4.2 K)にてケーブル  $I_c$  を 2 T から 18 T までの外部磁場中で測定した。ケーブル端部は銅電流リードと約 20 mm の長さで半田接続した(最長 36 mm 接続可能)。使用した REBCO 線材は、SuperPower 社製の SCS2030-AP であり、幅 2 mm と厚み 0.12 mm (Hastelloy®:30 µm、銅メッキ:40 µm/side) である。2 本のケーブルは、直径 1.8 mm の銅撚線コアと REBCO 線材をそれぞれ 1 枚 (#1) と 2 枚 (#2) を用いて製作した。Fig. 1 に示すように外部磁場 ( $B$ ) はケーブルの鉛直方向に対して約 3.9° の傾きを有しており、その鉛直成分 ( $B \perp \text{cable}$ ) は  $B$  の約 99.8% である。通電時にケーブルへ加わる電磁力は、サンプルホルダーの中心へ向かうように電流の向きを設定した。

4.2 K で測定したケーブル #1, #2 の  $I_c$  磁場依存性を Fig. 2 に示し、4.2 K 磁場中のケーブル  $I_c$  を 77 K 自己磁場のケーブル  $I_c$  で割った lift factor を Fig. 3 に示す。使用した REBCO 線材の垂直磁場下 ( $B \parallel c$ ) の  $I_c$  磁場依存性と lift factor も両図に示す。ケーブルと線材の  $I_c$  は、測定した  $I$ - $V$  カーブから線材長に対して 1.0 µV/cm 基準で算出した。Fig. 2 より、線材 1 枚のケーブル #1 の  $I_c$  磁場依存性は、垂直磁場下の REBCO 線材の測定結果とよく一致しており、線材 2 枚のケーブル #2 は期待通りにそれらのほぼ 2 倍となった。なお、サンプルホルダーに固定後のケーブル  $I_c$  は、77 K で #1 と #2 がそれぞれ 44 A と 85 A であり、固定前の直状で測定した  $I_c$  の 46 A と 87 A の 96% と 98% であった。これはサンプルホルダーに巻付けたことによるケーブルの自己磁場の影響と考えられる。Fig. 3 より、4.2 K 磁場中のケーブル  $I_c$  と 77 K 自己磁場のケーブル  $I_c$  から計算した lift factor は、線材自身のものより僅かに高いものよく一致しており、18 T で約 1.7 である。

#### 3. まとめ

4.2 K 磁場中のケーブル  $I_c$  測定に成功した。磁場中のケーブル  $I_c$  は線材  $I_c$  の枚数倍とほぼ一致しており、自己磁場の影響を補正することで線材  $I_c$  から推定可能である。

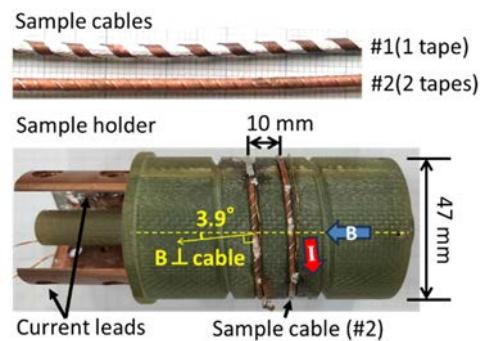


Fig. 1 REBCO round cables and a sample holder for the 4.2 K measurements in magnetic fields.

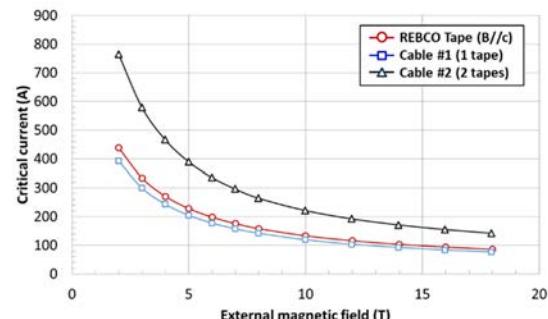


Fig. 2 Magnetic field dependent  $I_c$  of the REBCO cables and REBCO tape at 4.2 K.

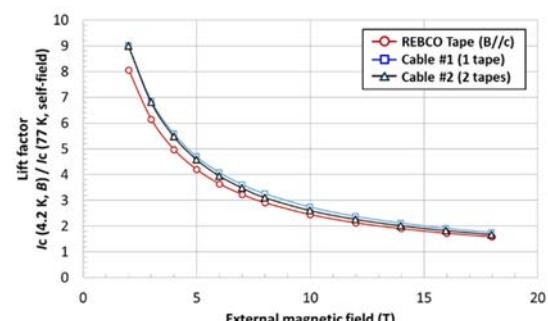


Fig. 3 Lift factor determined by  $I_c$  (4.2 K,  $B$ ) /  $I_c$  (77 K, self-field) of the REBCO cables and REBCO tape at 4.2 K.

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す。

#### 参考文献

1. J. D. Weiss, et al.: Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 014002
2. S. Kar, et al.: Supercond. Sci. Technol., 32 (2019) 10LT01
3. X. Wang, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 34 (2024) 4801205

## JT-60SA 超電導コイルの現場絶縁補強手法の開発

Development of in-situ insulation reinforcement method for JT-60SA superconducting coils

村上 陽之, 山本 聰, 宇野 淳也, 土屋 勝彦, 園田 翔梧, 辺見 努, 濱田 一弥(量研)  
 MURAKAMI Haruyuki, YAMAMOTO Satoshi, UNO Junya, TSUCHIYA Katsuhiko,  
 SONODA Shogo, HEMMI Tsutomu, HAMADA Kazuya (QST)  
 E-mail: murakami.haruyuki@qst.go.jp

### 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、2023年10月23日に初プラズマの生成に成功した[1]。今回のプラズマ運転において、中心ソレノイド(CS)は耐電圧性能を考慮し、10kA-2.0kVに運転条件を制限して実験を行った。2023年12月にプラズマ運転を完了し、昇温前に高真空・極低温の運転条件における超電導コイルの耐電圧試験を実施した。通電前の耐電圧試験において無放電で印加できた2.7kVは超えたものの、CSでは3.2kV程度で放電が発生した。高真空で期待した耐電圧性能の改善が見られないことが判明し、次回運転における20kA-5.0kVの定格運転に向けて絶縁補強が必要であることが分かった。

そこで、クライオスタット内に設置されている中心ソレノイドの絶縁を現場で補強する現場絶縁補強手法の開発を進めた。本発表では、開発した現場絶縁補強手法に関して、手法の確立に向けて実施したモックアップ作業やサンプル試験の結果について報告する。

### 2. スプレー法による現場絶縁補強手法

図1にJT-60SAのトロイダル磁場(TF)コイルとCSを示す。D型のTFコイルは18個円周状に並べられており、TFコイルが作る中心部の円筒空間にCSは設置されている。CSの外周部に取り付けられた冷媒の導入部や計測線の取り出し部が絶縁の補強対象である。TFコイルとCS間の隙間は約70mm、CSの高さは約7mである。7m離れた位置の絶縁対象に70mmの隙間でアクセスできる手法として、エポキシレジンを噴霧し絶縁補強を行うスプレー法の開発を進めた。

図2にスプレー法による絶縁補強手法の概略を示す。作業者やレジンを加圧するポンプは作業空間が確保できる上部に配置する。レジンを噴霧するスプレー・ヘッドをチューブの先端に取り付け、そのチューブを絶縁対象近傍まで垂らし、位置や角度を調整した後にポンプを起動しレジンを噴霧する。スプレー・ヘッドの調整はエンドスコープを用いて遠隔で監視しながら作業できるようにする。このような方法で、絶縁補強が可能であるかモックアップを用いて検証を行った。

### 3. モックアップを用いたスプレー法の検証

絶縁対象である冷媒導入部や、スプレー作業の障害となる配管など、実機を模擬した高さ1.6mのモックアップ試験の様子を図3に示す。モックアップの手前側にはアクリルの板を取り付け、内部の様子を観察できる状態で70mmのギャップを模擬した。パッキン条件では放電するように冷媒導入部サンプルには穴を設けた。スプレー・ヘッドを取り付けたチューブを上部から挿入し、チューブの送り量で高さを、捻じりで水平方向の調整を行い、対象にスプレーできることを確認した。

スプレー後は、液体窒素による5回のヒートショック試験および最大10kV、圧力10~1000Paでのパッキン試験を実施し、問題なく絶縁補強が行えたことを確認した。高さ1.6mのモックアップに加え、実機大の高さ7mのモックアップを用いた試験も実施し、スプレー法を用いてCSの絶縁補強が可能であることを実証した。

当日の発表では、作業中の動画も含めてスプレー法の詳細、モックアップ試験の様子について紹介する。

### 参考文献

1. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.30

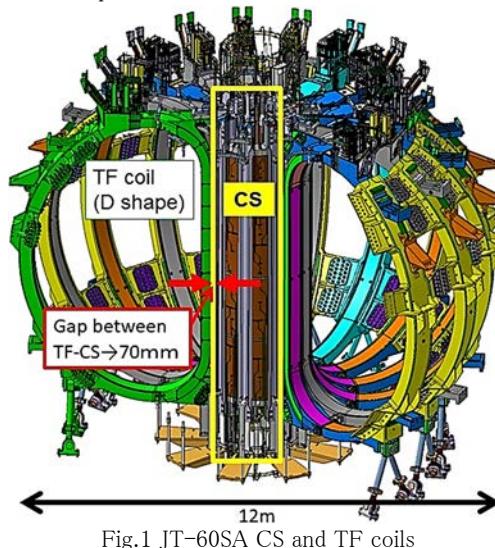


Fig.1 JT-60SA CS and TF coils

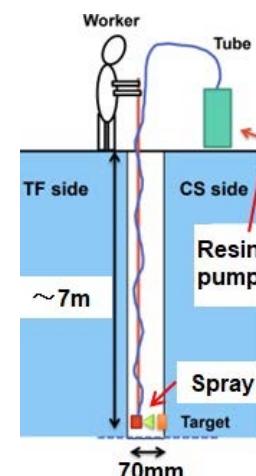


Fig.2 Spray method for in-situ insulation reinforcement

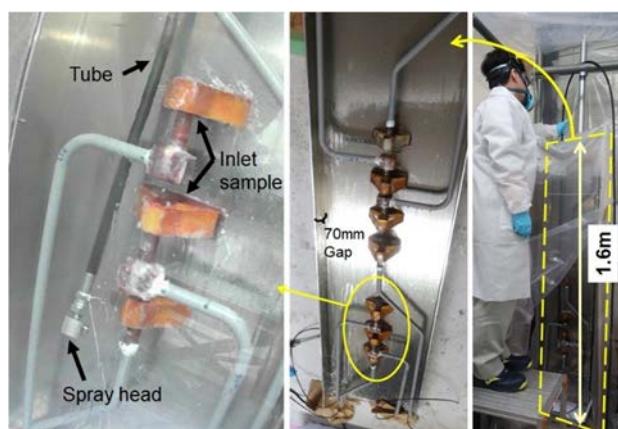


Fig.3 Single module size (1.6m) mockup test

# JT-60SA ポロイダル磁場コイルのクエンチ検出器のローパスフィルタによる クエンチ検出電圧への影響

## Effect of Low Pass Filter on Quench Detection Voltage in Quench Detector of JT-60SA Poloidal Field Coil

園田 翔梧, 村上 陽之, 薄井 勝富, 畠山 昭一, 濱田 一弥(量研機構)

SONODA Shogo, MURAKAMI Haruyuki, USUI Katsutomi, HATAKEYAMA Shoichi, HAMADA Kazuya (QST)

E-mail: sonoda.shogo@qst.go.jp

### 1. はじめに

トカマク型核融合実験装置「JT-60SA」の超電導コイルは2023年に統合試験運転を実施し、ファーストプラズマを達成した[1]。ポロイダル磁場(PF)コイルは6つの平衡磁場(EF)コイル及び4つのモジュールから成る中心ソレノイド(CS)から構成される。PFコイルのクエンチ検出では、巻き線内に設置されたピックアップコイルにより、コイル電流変化時に発生する誘導電圧を除去するようにブリッジ回路の可変抵抗を調整し、常伝導性抵抗を検出する方法を用いている。また、電源のサイリスタによる高周波ノイズを除去するために、クエンチ検出器の信号入力部にRCローパスフィルタが接続されている。PFコイル単独通電試験の際、ローパスフィルタ回路のコンデンサが影響し、コイルの電圧変化時(電流立ち上げや電流立下げ時)にスパイク状ノイズが生じることが確認された[1]。プラズマ運転の際にこのノイズはクエンチ検出の閾値を超える可能性があるため、ノイズの原因を特定し、除去することが必要である。先行研究においてローパスフィルタのコンデンサの静電容量を変化させることでスパイク状ノイズを抑えられることが報告されている[2]。

本研究ではローパスフィルタの抵抗に着目して、回路シミュレーションを実施し、ノイズ低減方法を検討した結果を報告する。

### 2. RC ローパスフィルタの抵抗によるクエンチ検出電圧への影響

EF2コイルのクエンチ検出回路モデルをFig. 1に示す。回路モデルはコイル電流立ち上げによりコイル及びピックアップコイルに発生する電圧を模擬した電圧源、ブリッジ回路、ローパスフィルタから構成されている。回路モデルにおいて、各電圧源の初期条件は0Vである。コイル電圧はt=0秒でコイルの定格電圧である5kVまで電圧を立ち上げ、その後一定に保った。ピックアップコイルの電圧は、ブリッジ回路の可変抵抗を調整した後の電圧分圧比をコイル電圧に乘じた値を用いた。ローパスフィルタ内において、抵抗値及びピックアップコイル側のキャパシタンスは設計値、コイル側のキャパシタンスは先行研究においてEF2コイル単体通電試験でフィッティングした値を用いた[2]。ローパスフィルタの抵抗によるクエンチ検出電圧への影響を評価するため、可変抵抗をローパスフィルタに追加した。

Fig. 2にローパスフィルタ内に可変抵抗を変化させた際のクエンチ検出電圧( $|V_1 - V_2| \times 1000$ )の時間変化を示す。可変抵抗を調整することにより、スパイク状ノイズの大きさをコントロールできることが分かった。Fig. 3に可変抵抗値を変化させた際の最大クエンチ検出電圧を示す。可変抵抗値が約652Ωの時、最大クエンチ検出電圧は最も小さくなつた。また可変抵抗値が約638~666Ωの時、スパイク状ノイズが0.5Vを下回り、クエンチの誤検出は避けられる(EFコイルのクエンチ判定電圧1Vs)。したがって、クエンチ検出器の改良としてローパスフィルタの抵抗を調整する方法では、スパイク状ノイズを低減するために約28Ω以下の分解能で調整できる可変抵抗を追加する必要があることが示された。

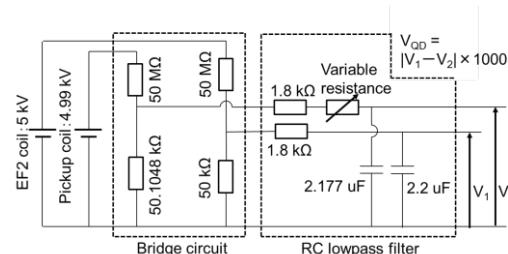


Fig.1 Circuit model for quench voltage of EF2 coil

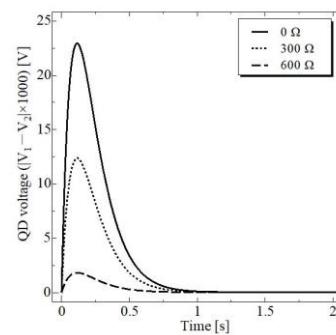


Fig.2 Analysis result of quench voltage

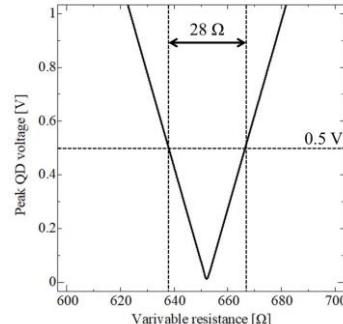


Fig.3 Dependence of quench voltage on variable resistance

### 3. まとめ

本研究では、ローパスフィルタの抵抗によるクエンチ検出電圧への影響を評価した。その結果、ローパスフィルタの抵抗に約638~666Ωの可変抵抗機能を追加することで、クエンチ検出電圧のスパイク状ノイズは0.5Vを以下に低減できることが示された。ローパスフィルタの抵抗を調整する方法では、コンデンサを調整する方法と比較して、ポテンショメータを用いることで、少ない部品数で様々な抵抗値に変更可能である。今後、試験機を用いた試験及び追加解析により、クエンチ検出器の改造方法を決定する計画である。

### 参考文献

1. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.30
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2024) p.83

# クエンチ時に NI REBCO TF マグネットが受ける不平衡な電磁力の調査

## Numerical investigation of unbalanced electromagnetic forces on NI REBCO TF magnets during quench event

榎原 里樹(北大); 石山 敦士(早大); 野口 聰(北大)  
SAKAKIBARA Riki (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)  
E-mail: sakakibara@em.ist.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

高温超電導体が開発されてから、高温超電導マグネットを用いた様々な機器の研究が進められている。特に、高磁場下で優れた性能を持つレアアース系超電導体 (Rare-Earth Barium Copper Oxide: REBCO) が小型核融合炉などの分野で注目されている。小型核融合炉のような高磁場を必要とする機器ではクエンチや常電導転移が大きな問題となる。無絶縁 (No-Insulation: NI) REBCO コイルはターン間の絶縁が取り除かれているため、コイル内の温度が上昇し、局的に常電導状態に転移したときに、電流が径方向に流れることができる。これによって熱的安定性が大幅に向上している。

小型核融合炉はいくつかの D 型 TF (Toroidal Field) マグネットをトロイダル状の磁場をつくるように円形に並べた構造となっている。このマグネットに NI REBCO コイルを使用することを考えると、いくつか注意すべき点が考えられる。その一つとして、TF マグネットの一つもしくは複数のコイルがクエンチにより、マグネット間の電磁力の平衡状態が崩れることが挙げられる。TF マグネットに NI REBCO コイルを用いる場合、外部から運転電流を遮断してもコイル内の電流は時間遅れを伴って減衰する。そのため、クエンチ時にマグネットを直ちに消磁することができない。したがって、運転電流を遮断してからコイル内の電流が減衰している間、TF マグネット間には不平衡な電磁力が働く。本研究では、この力を転倒力と呼称する。

以上のことから、クエンチ時における小型核融合炉内の NI REBCO TF マグネットに働く、転倒力の大きさや分布などを検討する必要がある。本研究では、小型核融合炉の一つである SPARC を参考に、クエンチ時に NI REBCO TF マグネットに働く転倒力をシミュレーションで調査した。

### 2. 回路計算と電磁力の解析

本研究では、文献[1]-[3]で公開されている情報を基に、図 1 および表 1 に示す TF マグネットシステムのモデルを構築し、解析した。このシステムに対する電磁界解析モデルを図 2 に示す。この電磁解析モデルでは、各 NI REBCO コイルを 1 つの等価回路で表現し、それぞれのコイル間が相互インダクタンスにより、電磁的に接続されている。図 2 のモデルから導出される電流方程式を式(1)に、電圧方程式を式(2)に示す。

$$\begin{cases} I_{op}^i - I_L^{i,j} - I_{ct}^{i,j} = 0 & (j = 1) \\ I_L^{i,j-1} + I_{ct}^{i,j-1} - I_L^{i,j} - I_{ct}^{i,j} = 0 & (j \neq 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$R_L^{i,j} I_L^{i,j} + \sum_{i'} \sum_{j'} M_{i',j'}^{i,j} \frac{dI_L^{i',j'}}{dt} - R_{ct} I_{ct}^{i,j} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $R_L$ 、 $I_L$ 、 $R_{ct}$ 、 $I_{ct}$ 、 $I_{op}$ 、 $M$  はそれぞれ、周方向抵抗、周方向電流、径方向抵抗、径方向電流、運転電流、自己・相互インダクタンスである。また、 $i$ 、 $i'$ 、 $j$ 、 $j'$  はそれぞれ、TF マグネットの番号と SP (Single Pancake) コイルの番号を示している。式(1)(2)からなる連立方程式を解くことで各 SP コイルに流れる電流情報を得ることができる。そして、ビオサバールの法則から、磁場分布を求めることができる。

各 TF マグネット  $i$  に働く電磁力  $\mathbf{F}_i$  は式(3)のように表される。

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j=1}^n \sum_{i'=1}^m \sum_{j'=1}^n \oint (\mathbf{I}_{i,j} \times \mathbf{B}_{i,j}^{i',j'}) dl \quad (3)$$

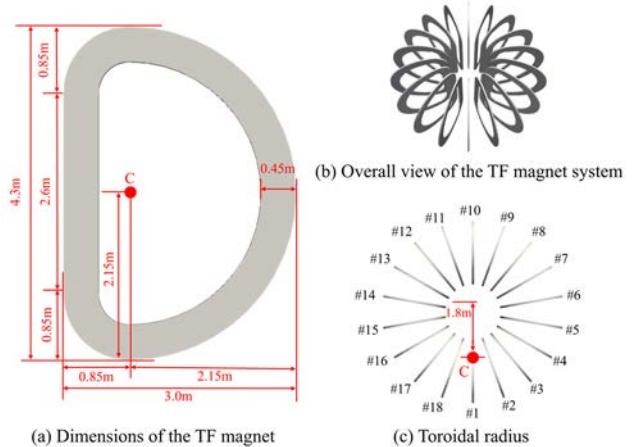


Fig. 1. TF magnet system model.

TABLE I

SPECIFICATION OF TF MAGNET SYSTEM MODEL

Parameters	Values
Number of turns per one SP coil	13
Number of bundled REBCO tapes	200
Number of SP coils per one TF magnet	16
Number of TF magnets	18
Toroidal radius (m)	1.8
Operating current (kA)	31.3

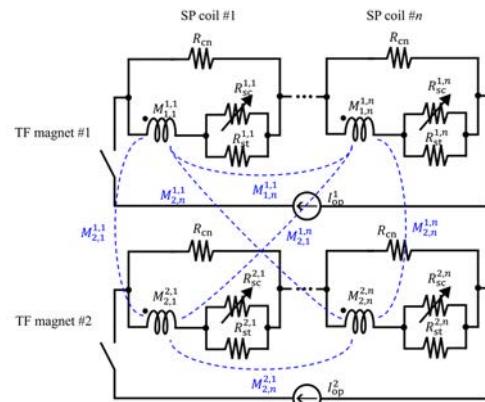


Fig. 2. Equivalent circuit model of TF magnet system.

ここで、 $I_{ij}$ 、 $\mathbf{B}_{ij}$ 、 $n$ 、 $m$  はそれぞれ、TF マグネット  $i$  の SP コイル  $j$  に流れる電流ベクトル、TF マグネット  $i'$  の SP コイル  $j'$  に流れる電流が TF マグネット  $i$  の SP コイル  $j$  に働く磁場、SP コイルの数、TF マグネットの数である。この解析結果については発表当日に報告する。

### 参考文献

- [1] R. F. Vieira, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 2, 2024, 0600615.
- [2] D. G. Whyte, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 2, 2024, 0600218.
- [3] Z. S. Harteig, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 2, 2024, 0600316.

# 核融合マグネットに適用される低融点金属含浸単純積層 REBCO テープ導体のインダクタンス変化由来の誘導電圧の考察

Study of Inductance-Variation Induced Voltage in Simply-stacked REBCO tape conductor impregnated with low-melting point metal Applied to Fusion Magnets

成嶋 吉朗, 濱口 真司, 力石 浩孝, 柳 長門(核融合研、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, CHIKARAISHI Hirotaka, YANAGI Nagato (NIFS, 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への高温超伝導(HTS)技術の導入は、冷却コストの低減や高磁場の生成によるプラズマ性能の向上といった大きな利点をもたらす。一方で、冷却や通電サイクルに伴う材料の劣化などの課題が存在し、実用化に向けた研究が進められている。本研究では、ヘリカル型核融合炉のマグネットへの適用を目指し REBCO テープを積層し、巻き線後に低融点金属で含浸させて作る導体(WISE 導体と呼ぶ)[1, 2]を研究している。本講演では、高磁場環境での WISE 導体通電試験を実施した結果観測された、インダクタンス変化に起因する誘導電圧と考えられる現象について報告する。

## 2. 通電試験結果

図 1 に、 $T = 20\text{K}$ ,  $B = 8\text{T}$  の条件下で電流変化率  $dI/dt = 100\text{A/s}$  で通電した際に WISE 導体で発生する電圧の典型的な波形を導体の概観図とともに示す。電流増加中( $t < 120\text{s}$ )は、 $V_{\text{tot}}$  には大きな電圧の変化は見られないが、 $V_a$  および  $V_b$  には  $t = 100\text{s}$  付近で過渡的な電圧増加(Transient Voltage Rise : TVR)が観測された。通電回数が増えるに従い、TVR 発生時の電圧の最大値は減少し、 $I_{\text{sample}}$  は減少することが分かる(図 2)。一方、TVR 発生時の電圧を時間積分して得られる磁束 $\Phi$ (図3上)は、通電回数によらずほぼ一定である(図3下)。

## 3. 考察

TVR 発生の原因として、導体内の積層 REBCO テープが磁場に垂直方向に動くことによって掃引する面積に比例した磁束の変化で誘導される起電力によるものが考えられる。図 2 より、通電回数が増えるとより低い電磁力でテープが動き始めるようになり、その移動速度が減少することを示唆している。また、図 3 に示す用に TVR 発生時にテープが動く範囲は変わらないと考えられる。

## 4. まとめ

核融合炉マグネットへの適用を目指した単純積層導体試験において、電流を増加させたときに過渡的な電圧増加が観測された。当初はクエンチによる電圧と考えられたが、通電を繰り返すに従いその電圧は減少するとともに電圧発生時間が長くなった。電圧を時間で積分して得られた磁束は通電ごとに変化しないことから、導体内の電流バスまたは積層された REBCO テープそのものが動いていることが示唆されると考えられる。通電回数を重ねることで電圧が抑制される観測結果は、WISE 導体のトレーニング的効果が期待される。

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)

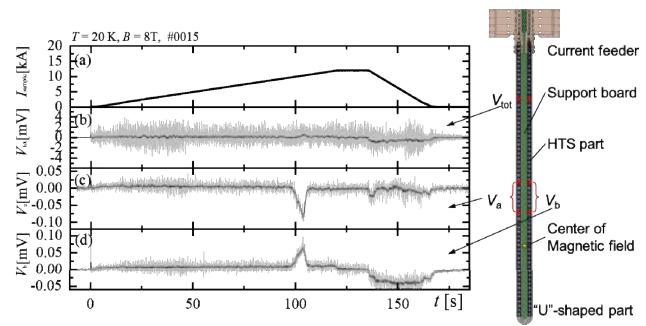


Fig. 1. Waveforms of the (a) sample current, (b) total voltage  $V_{\text{tot}}$ , (c) local voltage  $V_a$ , and (d)  $V_b$ . Schematic of the WISE conductor, showing the positions of the voltage taps, is presented on the right.

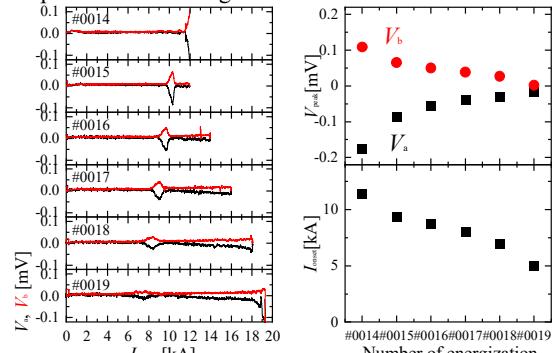


Fig. 2. (Left) The relationship between voltages ( $V_a$ ,  $V_b$ ) and current ( $I_{\text{sample}}$ ) during each energization, progressing from top to bottom. (Right) Trends in voltage (upper) and onset current  $I_{\text{sample}}$  (lower) for each energization.

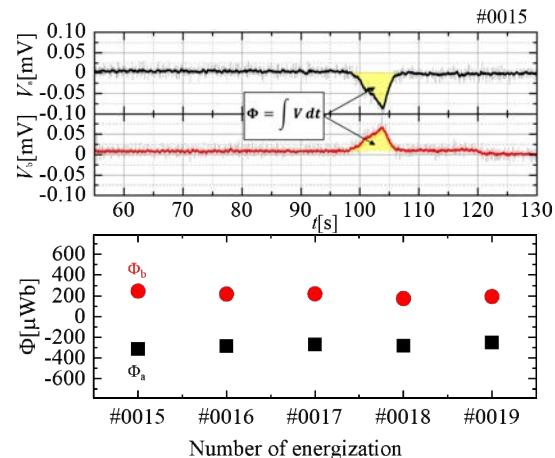


Fig. 3. (Upper) Estimation of the equivalent magnetic flux calculated by integrating voltage over time. The hatched regions represent the integrated areas. (Lower) Trend of equivalent magnetic flux.

# REBCO テープ線を集合させた大電流容量導体の新しい健全性診断方法の開発2 ～実験的検証～

## Development of a New Diagnostic Method for the Soundness of High-Current Capacity Conductors Assembled from REBCO Tapes: Part 2 -Experimental Verification-

永田 秀輝, 玉利 優斗, 川越 明史(鹿児島大学); 平野 直樹(NIFS)

SHUKI Nagata, YUTO Tamari, AKIFUMI Kawagoe(Kagoshima University); HIRANO Naoki (NIFS)

E-mail: k0294201@kadai.jp

### 1. はじめに

高温超伝導線材である REBCO 線材を数本から数十本ほど集合させ、大電流容量化した導体の開発が進められている。しかしながら、REBCO 集合導体では、機械的な要因による特性劣化の危険性がある。このため、この導体の健全性を数 km にわたって簡便に評価できるシステムが必要である。そこで本研究では、鉄心マグネットを用いた磁化測定による健全性診断方法を提案している[1]。その有効性を、試作した装置で実験的に検証した結果について報告する。

### 2. 測定原理

本提案方法では、ギャップのある同じ寸法の鉄心を 2 個用いる。2 つの鉄心に同じ寸法・巻数の通電用コイルとピックアップコイルをそれぞれセットする。2 つの鉄心マグネットは直列接続して運転する。片方の鉄心のギャップ間にのみ被診断導体を入れる。ピックアップコイルには、サンプルの磁化損失と鉄損に対応する信号と、発生磁界による誘導電圧が観測される。2 つのピックアップコイルの電圧差を測定することによって、被診断導体の状態をより高感度に測定できると考えられる。この電圧差を求めるこことを「キャンセル」と呼んでいる。

### 3. 実験内容

今回使用したサンプルは、無回転の直線導体である縮小版 FAIR 導体 3 本である[2]。サンプルのパラメータを Table 1 に示す。それぞれのサンプルを sample A,B,C とする。これらのサンプルの製法は同じである。測定場所を変えて、サンプルの長手方向の特性差を調べた。サンプル中心(中)とサンプル端から 20mm ずつの位置(上・下)の計 3箇所で測定した。磁場は約 30mm の範囲に印加した。また、キャンセルの方法は、ハード的なキャンセルとソフト的なキャンセルの 2 つの方法で測定した。ハードキャンセルは、2 つのピックアップコイルを直列に接続して直接電圧差を測定する。ソフトキャンセルは、別々に電圧を測定して計算機内で電圧差を計算する。

### 4. 実験結果

Fig.1 にテープ面に垂直磁界を印加したときの各サンプルの測定結果を示す。測定した損失値は、サンプル単位体積あたり、印加磁界一周期あたりの損失エネルギー密度 [J/m<sup>3</sup>] である。

サンプルなしを ◇、sample A,B,C をそれぞれ ○, △, □ で示す。また、ハードキャンセルを大きめのプロット、ソフトキャンセルを小さめのプロットで示している。

測定した損失値は、周波数依存性が観測されなかつたので、ヒステリシス損失であると考えられる。サンプルなしの値は、サンプルありより 1~2 枠小さく、十分な精度で測定できていることが示された。また、ハードキャンセルとソフトキャンセルでサンプルの測定結果は一致した。現状の導体レベルであれば、今回試作した装置でソフトキャンセルでも測定できる可能性が示された。

sample A,C の損失値は上・中・下でおおよそ一致した。しかし、sample B の損失値は上・中・下でばらつきが見られた。各サンプルの上・中・下の損失の平均値に対する測定値の誤差を求めるとき、sample A,C は ±2~3% の範囲で一致していた。しかし、sample B は ±10% ほどの幅があった。以上より、測定場所で損失差が最も大きいのは sample B である。3 つのサンプ

ルの製法は同じであるものの、sample B の損失値のばらつきが大きいことから、本提案方法で sample A,C と比較して、sample B のみ内部の REBCO 積層導体の構造あるいは臨界電流に不健全な領域が含まれることが検出できた。

### 5. まとめ

本研究では、鉄心を用いた磁化測定による新しい健全性診断方法を提案している。その有効性を確かめるために、実験的な検証を行った。その結果、製法が同じサンプルでも内部の REBCO 積層導体の構造あるいは臨界電流に不健全な領域が含まれることが検出できた。また、現状の導体レベルであれば、ソフトキャンセルでも測定できる可能性が示された。

### 参考文献

- [1] S. Nagata, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.106 (2023) p.135
- [2] A. Suruki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.106 (2023) p.75

Table 1 Sample parameters.

Sample name	A	B	C
Diameter [mm]		6.0	
Length [mm]		100	
Jacket material		Aluminum alloy	
Inner conductor material	REBCO Tape and Aluminum sheet		
Inner conductor dimension (Width x Thicknes)	4.0 × 3.0		
Ic [A/cm-w] @L.N2, s.f.	475		
Number of tapes	15		

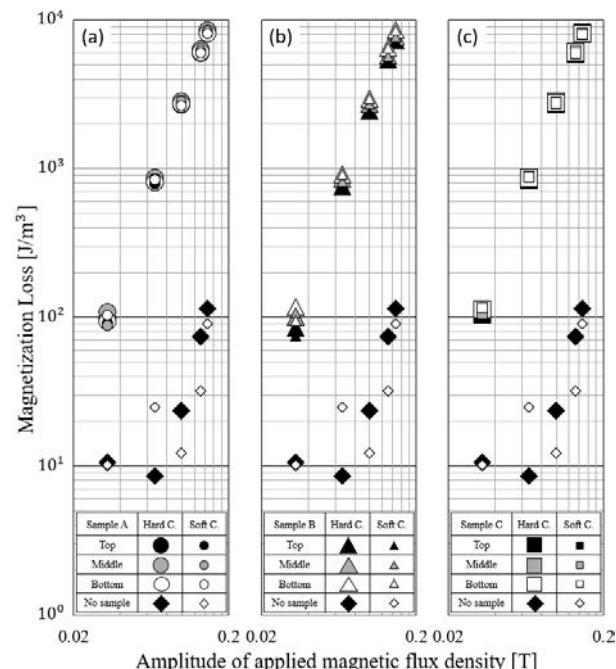


Fig. 1 Experimental results. (a), (b), and (c) are measured losses for samples A, B, and C, respectively.

## 異方性導電率を用いた REBCO 積層大型導体の ヒステリシス損失と結合損失の数値解析

### Numerical Analysis Using Anisotropic Conductivity for Calculating Hysteresis and Coupling Losses in Stacked REBCO Tapes with High Current Capacity

摺木 悠人, 川越 明史 (鹿児島大学); 尾花 哲浩 (核融合科学研究所)  
 ATSUTO Suruki, AKIFUMI Kawagoe (Kagoshima University); Tetsuhiro Obana (NIFS)  
 E-mail: k3261878@kadai.jp

#### 1. はじめに

核融合装置用超伝導マグネットに用いる導体として、REBCO 線を複数枚積層させ、ツイストを施した導体が検討されている。この導体の線材間は電気的に接続されているため、テープ面に対して垂直方向に磁場を印加するとヒステリシス損失が生じ、平行方向に磁場を印加すると結合損失が生じる。このような交流損失特性の計算手法の確立は、実導体の設計指針を立てる上で有用である。良く用いられる手法は、有限要素法である。厳密には、導体を構成する線材ごとにモデル化する必要があるものの、計算リソースの制限から考慮できる線材本数には限界がある。また、積層導体では、一様な矩形断面の超伝導体としてヒステリシス損失を解析することが良い近似になることも示されている[1]。そこで本研究では、積層導体の交流損失を計算する手法として、テープ線 1 枚 1 枚を考慮しない直方体モデルとし、異方性導電率を適用する方法を試した。テープ平面方向と積層方向に異なる導電率を考慮して、JMAG を用いて計算した。本発表では、ヒステリシス損失と結合損失の両方を計算した結果を、実験値と比較しながら報告する。

#### 2. 解析方法

実験によって交流損失を測定済みの積層導体の模擬図を Fig.1(a) に示す。サンプルは、YBCO 線材を 50 本積層させ、全体をはんだ含浸したもので、ツイストされていない直線導体である。寸法は幅 6mm、高さ 7mm、奥行き 96mm である。このサンプルの長手方向の長さを半分にしたモデルを JMAG で作成した。その断面図を Fig.1(b) に示す。テープ平面方向には超伝導特性として  $n$  値モデルの導電率を考慮し、テープ積層方向には常電導の導電率を考慮した。導電率は、交流損失測定実験で得られたサンプルの結合損失をもとに算出し、 $4.43 \times 10^6 [\text{S/m}]$  とした[2]。このモデルに一様交流磁場を印加したときの損失を計算した。磁場印加方向はテープ面に平行方向と垂直方向の 2 パターンで解析を実行し、それぞれの交流損失を計算した。

#### 3. 解析結果と実験結果の比較

Fig.2 に、テープ面に垂直磁場を印加したときの交流損失の数値解析結果と、実験による測定値を示す。縦軸は、サンプル単位体積あたり、印加磁界一周期あたりの損失エネルギー密度 [ $\text{J/m}^3$ ] である。横軸は、印加磁場の磁束密度である。計算結果は、磁場の 3 乗に比例しており、また、実験値とも一致しているため、数値解析によって積層導体のヒステリシス損失を計算できることが示された。

次に Fig.3 に、テープ面に平行磁場を印加したときの結果を示す。縦軸は、交流損失値 [ $\text{J/m}^3$ ] を  $\mu_0 H_m^2$  で割って規格化した値である。 $H_m$  は印加磁界振幅である。横軸は周波数である。テープ面に平行磁場を印加しているため、結合損失のみが発生する。数値解析結果は、実験値とよく一致している。したがって、テープ線 1 枚 1 枚を考慮せずとも、直方体モデルに異方性の導電率を用いることで結合損失を計算できることが明らかになった。

#### 4. まとめ

異方性導電率を用いた数値解析によりヒステリシス損失と結合損失を計算し、実験値との比較をおこなった。計算結果は実験値と近い値をとっており、本研究の計算手法が積層導体の交流損失の計算に有用であることが明らかになった。今後は、斜め方向に磁場を印加し、ヒステリシス損失と結合損失が同時に発生する状態の数値解析を実施する予定である。

#### 参考文献

1. Y. Ueno, et al. Plasma and Fusion Research 16 (2021) 2405071
2. A. Kawagoe, et al. Plasma and Fusion Research 18 (2023) 2405074

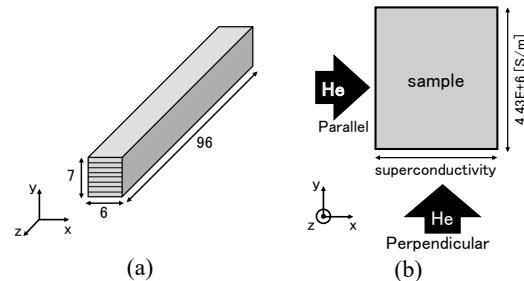


Fig.1 (a)Simulation of a stacked conductor,  
(b)Analysis Model

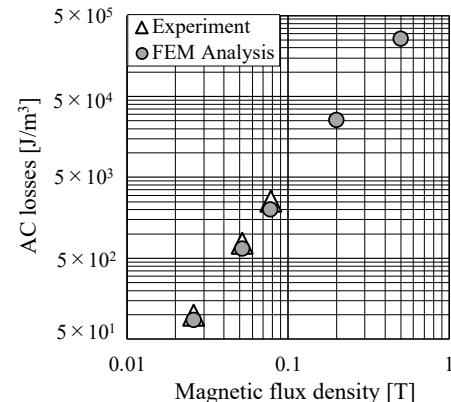


Fig.2 Calculated and measured values of AC losses under perpendicular magnetic field.

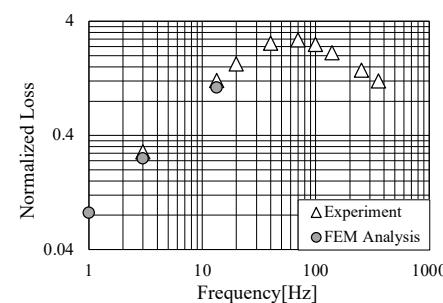


Fig.3 Calculated and measured values of AC losses under parallel magnetic field.

## 「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024 年秋)： (その1)全体概要

### Development of NI-REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2024): (Part 1) Overview

石山 敦士(早大); 野口 聰(北大); 植田 浩史(岡山大); 福田 光宏(阪大); 吉田 潤(住重); 渡部 智則(中電)

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

FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); YOSHIDA Jyun (Sumitomo Heavy Industries Ltd.);

WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power CO.,Inc.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

#### 1. はじめに

多発性転移等の進行がんへの有効性が期待されている標的  $\alpha$  線核医学治療のための  $\alpha$  線放出 RI ( $^{211}\text{At}$ ) 製造用「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を進めてきた。本装置では、空芯の REBCO コイルのみでビーム加速に必要となる磁場を発生させることができ特徴になっている。鉄芯の磁化特性の非線形性を考慮する必要がないため、発生磁場、出力エネルギーを変化させることができ、PET 用 RI 製造等への応用など多機能化が期待できる。まず (その 1) として、これまでの研究成果と 2024 年秋時点での開発状況の概要を報告する。

#### 2. HTS-SC 用 NI-REBCO コイルシステムの開発

加速器応用であることから、まず REBCO 線材の耐放射線性の評価から研究をスタートし (科研費/基盤研究 B:20360130, 2008-2010 年)、次に小型・高強度・出力エネルギー可変の「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」を提案した (基盤研究 A:2324605, 2011~2013 年)。そして HTS-SC を実現するための「5-High コイル基盤技術」を提唱・開発 (基盤研究 A:26249036, 2014-2017 年) した後、集大成として (基盤研究 S:18H05244, 2018-2022 年)、HTS-SC 実機の 1/2 スケールの小型実証用モデルである Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron (UBSC) 用無絶縁 (NI) REBCO コイルシステム (Fig.1, Fig.2) を設計・製作し、冷却・通電特性 (発生磁場可変の可能性、無絶縁コイル・YOROI 構造や遮蔽電流磁場低減法の効果、コイル保護法等) を評価してきた。これらに加え、現在、実用化に向けた課題抽出とそのための対応策等について検討を進めている (基盤研究 B: 22H01478, 2022-2024 年)。

#### 3. NI-REBCO コイルシステムの基盤技術と特性評価

我々は、HTS-SC 用 REBCO マルチコイルシステム開発のための基盤技術として、1)高機械強度化のためのコイル補強構造 (YOROI コイル構造)、2)高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術 (無絶縁コイル巻線技術)、3)高精度の磁場を発生する技術 (遮蔽電流による不整磁場の評価と低減)、4) 5-High 統合技術を活かしたマルチコイル設計最適化技術の確立を目指してきた。

本研究発表会では (全 7 件。内 1 件はポスター)、まず本発表 (その 1) で全体概要を報告した後、(その 2 : 3A-p08) では、NI-REBCO コイルシステムの励磁特性を解析・評価するための回路モデルのみに基づく数値計算法を新たに開発し、UBSC 用 NI-REBCO コイルシステムの励磁特性解析を行った結果を報告する。つぎに (その 3 : 3A-p09) では、(その 2) の解析結果と実験結果の比較による開発手法の妥当性の確認と、励磁遅れと遮蔽電流磁場の影響を低減する通電電流波形の検討結果を報告する。(その 4: 3A-p10) では、遮蔽電流の発生を考慮した UBSC 用 NI-REBCO コイル巻線内の応力分布の解析・評価を行っている。UBSC 用 NI-REBCO コイルシステムの

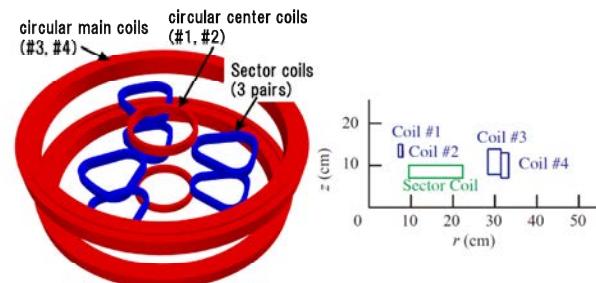


Fig.1 Schematic of NI-REBCO Coil System for UBSC

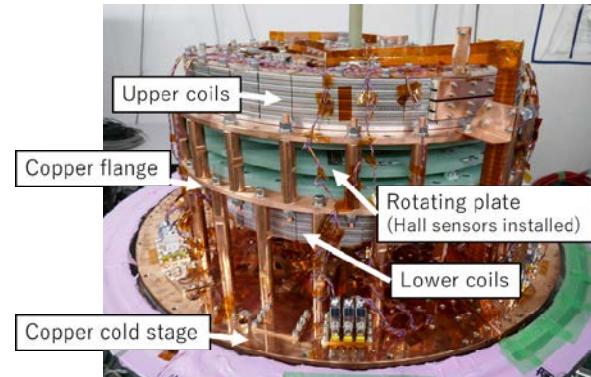


Fig.2 Photo of the fabricated NI-REBCO coil system

励磁試験において、目標定格運転電流 (負荷率: 約 70%) より低い電流値において、上段 Main coil1 (Fig.1) に電圧 (常電導転移) が発生した。実験後、常電導転移が観測されたコイル巻線を取り外し、状況を調査した。これらについて (その 5: 3A-p11) にて報告する。(その 6: 3A-p12) では、実用化の過程で課題となるビーム集束力の不足と多機能化に焦点を当て、等時性磁場と AVF (Azimuthally Varying Field) を考慮した目標磁場の算出、課題解決のためのコイル構成を提案し、磁場分布計算と粒子の軌道計算を用いて評価を行った結果を報告する。最後に (その 7 : 2P-p06, ポスター発表) では、これまで試作・励磁実験 (77K) を行ってきた HTS-SC 用電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源のための NI-REBCO コイルシステムについて、発生磁場の空間分布精度と時間安定性に着目し、実験と数値解析による評価を行った結果を報告する。数値シミュレーションには、(その 2) で報告する回路解析のみによる NI-REBCO コイルの遮蔽電流磁場解析プログラムを用いた。その他、関連の発表として、2P-p04 では、(その 2) の計算法の妥当性の検証として、(絶縁) REBCO コイルを 22 個積層したコイルシステムの励磁実験結果との比較を行った結果を報告する。また、2P-p05 では、NI-REBCO コイルの健全性の監視法として、コイルの一部に発生した劣化の位置と空間的な大きさ (線材長手方向の長さ) を、コイル両端電圧とピックアップコイルにより検出する方法について検討した結果を報告する。

# 「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024年秋): (その2)1/2スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの励磁特性

## Development of NI-REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2024): (Part 2) Excitation Characteristics Analysis of 1/2 Scale Demonstration No-Insulation REBCO Coil System

野口 聰(北大); 折原 菜月, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡山大)

NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); ORIHARA Natsuki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.)  
E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC) の開発の一環として、1/2スケールの小型実証用モデルである Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron (UBSC) 用無絶縁 (NI) REBCO コイルシステムを設計・製作し、励磁検証実験を行なってきている。それと同時に、コイルシステムの電磁特性を評価するためにシミュレーション手法を新たに開発してきた。本報告(その2)では、UBSC NI REBCO コイルシステムの励磁時の電流分布について検証した結果を紹介する。

### 2. 遮蔽電流解析手法

これまでにも、有限要素法による遮蔽電流解析を実施してきた。しかし、UBSC NI REBCO コイルシステムのような大規模コイルシステムでは、解析時間が長大になる。そこで、我々は回路方程式に基づき、かつ要素分割数を抑えた新しいシミュレーション手法を開発してきた[1]。さらに、高精度化を図る改善も検討してきており、開発手法の詳細は、(その7)で紹介している。

また、本報告(その2)では、コイルシステム内の電流分布について検討しているが、遮蔽電流などに起因する電磁力の影響については、(その3)で報告する。

### 3. USBC NI REBCO コイルシステムの励磁特性

開発した USBC NI REBCO コイルシステムのコイル寸法は、2022 年度春季低温工学・超電導学会にて発表してきた[2]。このコイル寸法は、最適アルゴリズム (Simulated Annealing 法) により、加速粒子を陽子と想定し、引き出し口で 5MeV まで加速する設計を実施している。また、可変出力エネルギーを想定しており、5, 4, 2.5 MeV に対応して、通電電流を 540, 483, 382 A と設計している。ただし、設計時には、遮蔽電流の影響は考慮されておらず、REBCO 導体に一様に電流が流れていると仮定していた。また、540 A 通電時で、負荷率約 70% となっており、超伝導特性としては十分に余裕がある運転状況を想定していた。

図1に、USBC NI REBCO コイルの概形図を示す。シミュレーションでは、250 A まで全てのコイルを 0.083 A/s の速度で同時に励磁している。図2に、通電電流値が(a) 100 A, (b) 160 A, (c) 250 A 時の電流分布図を示す。図2(a)より、1番上のメインコイルに大きな遮蔽電流(約 180 A)が誘導されていることが分かる。続いて、図2(b)より 160 A 通電時で、1番上のメインコイルだけでなく、その下のメインコイルにも大きな遮蔽電流が流れている。遮蔽電流の大きさは、約 360 A にも達しており、通電電流と合わせて 520 A 以上にも達している。また、REBCO 導体の反対側端には約 360 A の遮蔽電流が誘導されることを考えると、REBCO 導体全体には相当量の電流が流れていることが窺える。これは、設計時の想定以上であり、負荷率や電磁応力などを検討し、コイル安定性について深い

考察が必要であると思われる。図2(c)ではさらに多くのメインコイルで遮蔽電流が誘導されていることが分かる。

本研究は、科研費基盤研究 S(18H05244)および同 B(22H01478)の助成によって行ったものである。

### 参考文献

- [1] 吉藤夢來ほか、第 105 回 2023 年度春季低温工学・超電導学会 3A-a09, p. 127
- [2] 石山敦士ほか、第 103 回 2022 年度春季低温工学・超電導学会 2C-a02, p. 72

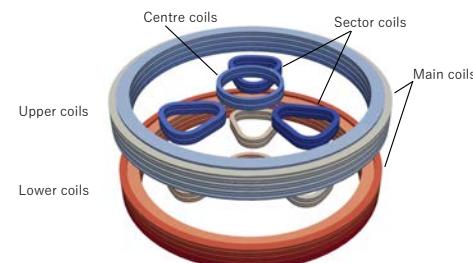


Fig. 1. Schematic view of USBC NI-REBCO Coil System.

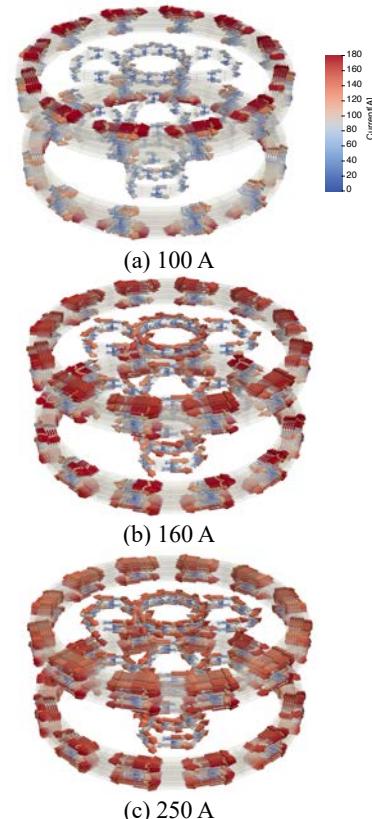


Fig. 2. Current distributions of USBC NI-REBCO Coils.

「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024 年秋)：  
 (その3) 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの励磁特性評価  
 Development of NO-Insulation REBCO coil system for Skelton Cyclotron (Autumn 2024):  
 (Part3) Evaluation of Excitation Characteristics of 1/2 Scale Demonstration No-Insulation  
 REBCO coil system

折原 菜月, 石山 敦士(早大); 野口 聰(北大); 植田 浩史(岡山大); 渡部 友則(中部電力)  
 ORIHARA Natsuki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); NOGUCHI So (Hokkaido University);  
 UEDA Hiroshi (Okayama University); WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Grid Co., Inc.)  
 E-mail: no\_n2k10@akane.waseda.jp

### 1. はじめに

進行がんの治療法である標的  $\alpha$  線核医学治療に用いる  $\alpha$  線放出 RI( $^{211}\text{At}$ )の安定的に製造するために「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][2]。本装置は、空芯無絶縁 REBCO コイルシステムのみで粒子を加速に必要な磁場を発生させる。しかし、無絶縁 REBCO コイルでは、特有の現象「遮蔽電流磁場」「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、これら 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[3]、試作した 1/2 スケール小型実証モデル(UBSC)コイルシステム(Fig.1, Fig.2)の励磁特性実験結果[2] (コイル両端電圧、発生磁場)と励磁特性解析結果を比較・検討した。

### 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とテープ幅方向に分割している。なお、今回は、コイル半径方向に 5 分割、テープ幅方向に 7 分割した。そして、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)を全要素で連立して解くことで周方向電流を算出し、ビオ・サバールの法則より磁場を求めている

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

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

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

### 3. 解析結果例

Fig.3 は、Hall 3, 9(Fig.2)の磁場の時間変化に関する実験結果と解析結果の比較である。本研究で行った数値解析は、磁場の励磁遅れ現象を正確に再現している。また、オーバーシュート法とプロト一付きオーバーシュート法を導入して通常励磁と比較することで磁場の時間安定性を評価し、最も安定する最適な励磁波形を同定した。結果、Fig.4 に示すように、これらの手法を導入することで、通常励磁よりも磁場の変化が早く収束し、安定性が向上した。さらに、必ずしもプロト一時間と設けることなく、オーバーシュート率を最適化することで、高い時間安定性を得ることができるとわかった。

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

### 参考文献

- [1] H.Ueda, et al., IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.29, 4101105, 2019
- [2] R.Kumagai, et al., IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.34, 4400705, 2024
- [3] K.Ota, et al., IEEE Trans. on Applied Supercond. Vol.34, 4400404, 2024

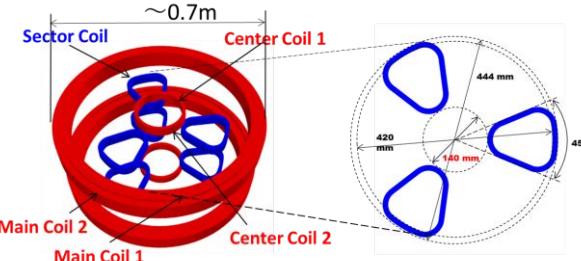


Fig.1 Schematic of the UBSC

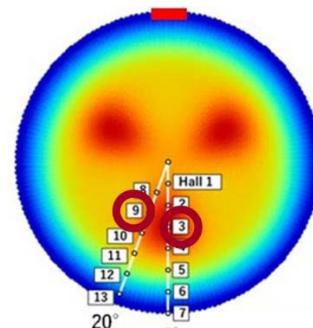


Fig.2 Evaluation points on the particle acceleration plane

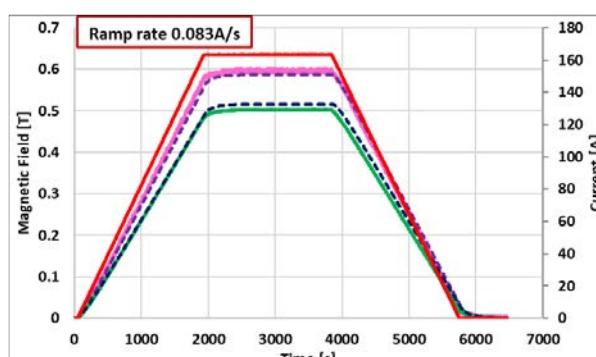


Fig.3 Time variation of the magnetic field during trapezoidal excitation

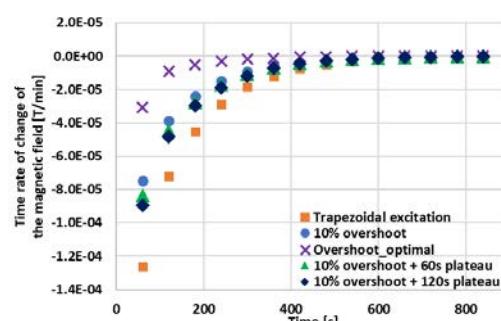


Fig.4 Time rate of change of the magnetic field

「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024 年秋)：  
 (その4) 1/2 スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの応力特性解析  
 Development of No-Insulation REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2024):  
 (Part 4) Stress Characteristics Analysis of 1/2 Scale Demonstration No-Insulation REBCO Coil System

植田 浩史, 山下 葵, 廣田 悠力, 南前 俊介, 井上 良太, 金 锡範(岡山大); 野口 聰(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 Yuki, 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、評価実験および数値解析を行っている[1-3]。本発表では、励磁時の発生磁場、遮蔽電流分布に基づいて、コイル巻線内の不均一な応力分布の解析・評価について報告する。

## 2. 解析モデル

遮蔽電流解析は関連発表(その2)で報告している[3]。その結果に基づいて、応力解析を行った。今回対象にしたものは、(その1)の Fig. 1 で示したコイル概略図の Main coil 3 である[1]。巻線に使用した線材は REBCO 線材で、幅 6 mm、厚さ 0.1 mm である。コイル諸元を Table 1 に示す。Main coil 3 は Main coil 4 とパンケーキコイル 1 段分ずれて配置されている(巻線に際しては、Main coil 3 と Main coil 4 は途中で伴巻される SUS tape の厚さを変えて連続してパンケーキ巻されている)。そのため、(その2)で報告しているようにテープは幅広面に印加される磁場の垂直成分が多く、励磁中の通電電流の負荷率が低い時点では通電電流以上の遮蔽電流は流れている[3]。HTS-SC はセクターコイルがあるため、電磁力分布は回転軸対称ではないので 3 次元解析を行った。応力解析モデルの断面図を Fig. 1 に示す。巻線部以外の巻枠、補強材はなどすべて SUS である。REBCO tape と伴巻き SUS tape を考慮しているが、巻線はパンケーキ巻のらせん構造は考慮せず、同心円になっている。また、REBCO テープの機械特性は複合則で考慮した。REBCO tape, SUS tape, 補強材の間は Gap 要素として、接触、離間、すべりを考慮した。

## 3. 解析結果

今回の解析は、実験で通電した 250 A 時の遮蔽電流が考慮しない場合と考慮した場合の電磁力を基に解析を行った。コイル断面の電磁力分布を Fig. 2 に示す。遮蔽電流により電磁力の分布は巻線の上下に集中しており、大きさは 9 倍ほど大きく、向きは巻線上部では右下に向かって、巻線下部では左上に向かって電磁力が発生している。これは、電流分布が通電電流よりも遮蔽電流が支配的で、結果的に巻線上下で往復電流が流れるためである。巻線長手方向(コイル周方向)応力 Fig. 3 に示す(変形を 100 倍で表示している)。遮蔽電流がない場合は線材長手方向応力が 2.5 MPa である。このとき応力分布を詳細に見ると、電磁力が線材から各ターンの伴巻された SUS テープに伝わり、各 SUS テープの外側で応力が最大値になっている。遮蔽電流がある場合、応力分布は著しく異なり、線材の幅の中心付近に 18 MPa の線材長手方向応力が生じている。電磁力が巻線上下端で逆向きにはたらくことによる変形によると考えられる。詳細な分析は当日報告する。

## 参考文献

[1] 2024 年秋季低温工学・超電導学会講演概要集 3A-p07 (2024)

Table 1 Specifications of Main Coil 1, 2

Main Coil No.	3	4
Coil i.d (mm)	566.26	628.74
Coil o.d (mm)	628.66	665.26
Number of turns (each pancake)	40	51
Number of double pancakes	4	4
Thickness of co-winding SUS tape (mm)	0.68	0.258
Operating current (A)	540	540
Current density (A/mm <sup>2</sup> )	92.31	201.12

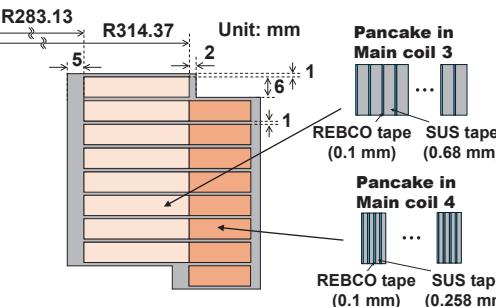


Fig. 1 Cross section of numerical model for mechanical simulation.

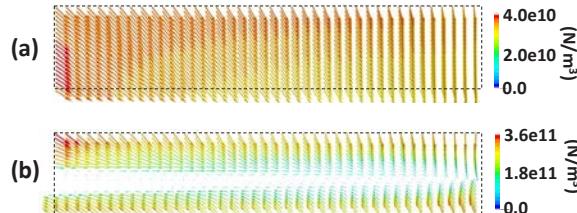


Fig. 2 Lorentz force volumetric density of cross-sectional winding in uppermost coil of Main coil 3 (a) without screening current and (b) with screening current

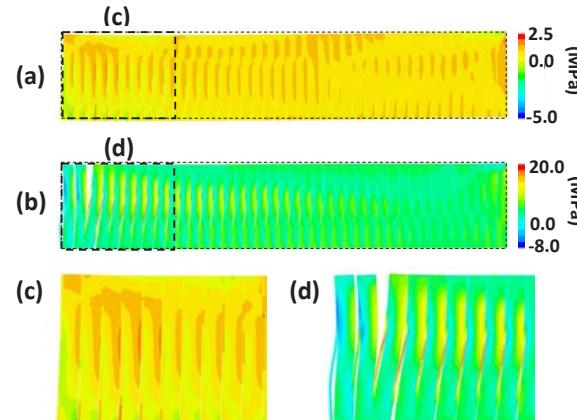


Fig. 3 Longitudinal stress of winding in uppermost coil of Main coil 3 (a) without screening current and (b) with screening current. (c) and (d) are enlarged views. The deformation is shown at a magnification of 100.

[2] 2024 年秋季低温工学・超電導学会講演概要集 3A-a08 (2024)

[3] 2024 年秋季低温工学・超電導学会講演概要集 3A-a09 (2024)

「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024年秋)：  
 (その5) 1/2スケール実証用無絶縁 REBCO コイルシステムの常伝導転移  
 Development of NI-REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2024): (Part 5)  
 Normal-State Transition in 1/2 Scale Demonstration No-Insulation REBCO Coil System

石山 敦士(早大)；野口 聰(北大)；植田 浩史(岡山大)；渡部 智則(中電)  
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.);

WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power CO.,Inc.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

## 1. はじめに

多発性転移等の進行がんへの有効性が期待されている標的  $\alpha$  線核医学治療のための  $\alpha$  線放出 RI ( $^{211}\text{At}$ ) 製造用「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を目指し、実機の 1/2 スケールの小型実証用モデルである Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron (UBSC) 用無絶縁 (NI) REBCO コイルシステム (Fig.1) を設計・製作し、冷却・通電特性の評価実験を繰り返し実施してきた [1]。その中で、本コイルシステムの定格運転電流 (負荷率: 約 70%) を下回る電流値で常伝導転移が検出された。実験後、電圧が発生したコイル巻線を取り外し、状況を調査したので、その結果を (その5) として報告する。

## 2. UBSC 用 NI-REBCO コイルシステムの励磁試験

コイルシステムの諸元は文献 [1] で報告したが、Fig.1 にその概要図を示す。全てのコイルは直列に接続されており同一電源で励磁している。常伝導転移が観測された実験は、励磁速度 0.083A/s で 250A まで励磁し (設定定格電流: 540A。250A までの励磁は今回が初めて)、一旦電流を保持して数秒したところで、M1U ダブルパンケーキコイル (上側コイルの内の最上段の主円形コイル: 等時性磁場を発生) に電圧が発生した。その後も一定電流のまま通電を継続したところ、M2U ダブルパンケーキコイルに抵抗性の電圧が発生し、電源が遮断した。

## 3. 実験後の調査

### 3.1 M1U コイル

最初に電圧が発生した M1U ダブルパンケーキコイルを取り外し、目視により調べた結果、Fig.2(a)(b) のように、下側パンケーキコイルの電極近くの最外層付近で変形が見られた。同図(a)は、YOROI 補強構造の外枠 (Fig.3(a)) を取り外したときの写真である。Fig.2(b) は切り取った最外層の線材の変形付近の写真である。M1U ダブルパンケーキコイルを液体窒素中に置き通電試験を行い、電圧発生箇所を調べたところ (無絶縁コイルのため、巻線内の所望の位置に測定端子を接触させることができない)、Fig.2 の変形箇所以外は抵抗性の電圧は検出されなかつた。

### 3.2 M2U コイル

M2U ダブルパンケーキコイルについて、同様にまず目視により調べたところ、下側パンケーキコイルの最外層付近に焼損箇所が見つかった (Fig.3)。Fig.3(b) は、YOROI 補強構造の外枠を外して、最外層の線材を写した写真である。このコイルについても、液体窒素中で通電試験を行った結果、焼損箇所以外の巻線には劣化は観測されなかつた。

現在、NI-REBCO コイルシステム励磁中の遮蔽電流 [2] や応力分布の解析・評価等を行っている。当日までに得られた結果についても合わせて報告する予定である。

本研究は、科研費基盤研究 S (18H05244) および同 B (22H01478) の助成を受けて行ったものである。

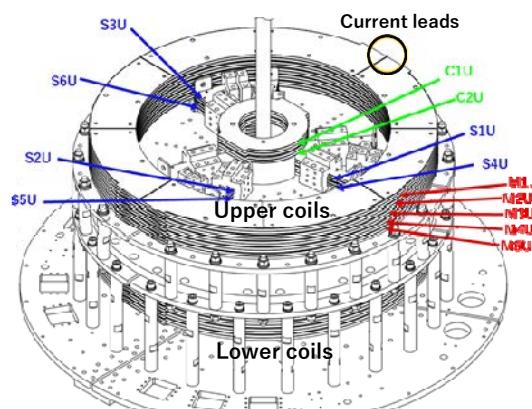


Fig.1 Overview of NI-REBCO coil system for UBSC [1]



Fig.2 Deformation of the outermost turn near the electrode of the lower pancake coil of M1U.

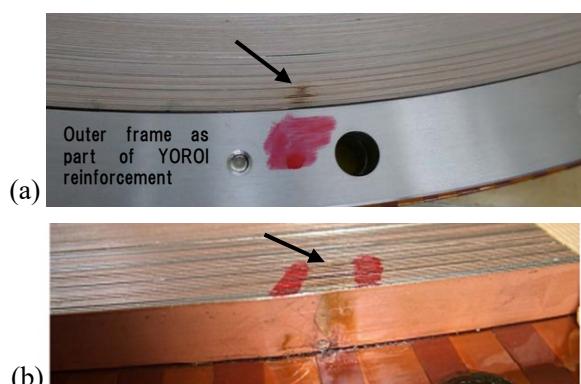


Fig.3. Burnout (?) in the lower pancake coil of M2U

## 参考文献

- [1] R.Kumagai et al. IEEE Trans. on Appl. Supercond.. Vo.34 (2024) 4400705
- [2] 折原他, 2024 年秋季低温工学・超電導学会研究発表会, 3A-p09

# 「スケルトン・サイクロトロン」用無絶縁 REBCO コイルシステムの開発(2024年秋): (その6)スケルトン・サイクロトロン用セクターコイルの設計最適化

## Development of No-Insulation REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Autumn 2024): (Part 6) Design optimization of multiple REBCO sector coils for Skeleton Cyclotron

山下 葵, 廣田 悠力, 南前 俊介, 井上 良太, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大); 野口 聰(北大);

莊 浩謙, 福田 光宏(阪大); 石山 敦士(早大)

YAMASHITA Aoi, HIROTA Yuki, MINAMIMAE Shunsuke, INOUE Ryota, KIM SeokBeom, UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); CHONG TsunHim, FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); Atsushi ISHIYAMA (Waseda Univ.)

E-mail: pita4sxf@s.okayama-u.ac.jp

### 1. はじめに

難治性がんの治療法として期待されている  $\alpha$  線内用療法の薬剤に使用する核種を生成するための、小型加速器として非絶縁型(NI)巻線技術を用いた高温超電導(HTS)コイルを応用したスケルトン・サイクロトロン(HTS-SC)を提案している[1]。HTS-SC では、ビーム集束で必須となる azimuthally varying field (AVF)を REBCO コイルで形成する。一般的なスパイラルセクター形状を REBCO 線材で巻線することは難しく、ラジアルセクター形状でビーム集束力を確保する必要がある。本研究では、スパイラルセクター型と同等のビーム集束力を確保するラジアルセクター型コイルで、複数用途において使用可能なセクターコイルシステムを提案し、妥当性を検証したので報告する。

### 2. 安定加速のために必要な磁場

サイクロトロンの加速面内では、azimuthally varying field (AVF)と呼ばれる周方向に交互に強弱つけた磁場分布を形成することで、加速面から垂直方向に外れた粒子を集束させる。この集束力の指標であるベータトロン振動数  $v_z$  は次式で与えられる。

$$v_z^2 = -\beta^2 \gamma^2 + F^2(1 + 2 \tan^2 \varepsilon)$$

ここで、 $\beta$  は粒子の速度と光の速度の比、 $\gamma$  はローレンツ係数である。 $F^2$  はフラッターで、AVF の磁場の段差を表す指標で、 $F^2 = (B - \bar{B})^2 / \bar{B}^2$  で定義される。文字の上の  $\bar{\cdot}$  は周方向平均を表す。 $\varepsilon$  はスパイラル角である。この式からわかるように、右辺を正にするために  $F^2$  と  $\tan \varepsilon$  を大きくすることが、ビーム集束では必須となる。銅鉄コイルでは、鉄の磁極をスパイラル形状に加工することで大きな  $\tan \varepsilon$  を確保している。一方、HTS-SC では、セクターコイルで AVF を形成するが、スパイラル形状は negative bending を含むため REBCO 線材を巻線することは容易ではない。そこで、ラジアルセクター型( $\tan \varepsilon = 0$ )で  $F^2$  に半径依存性を持たせることで集束力を確保することを提案する。空芯コイルだからこそ可能な磁場分布である。

### 3. セクターコイルの設計

HTS-SC は、表 1 に示すように様々な用途に使用されることを目的としている。我々はビーム軌道半径  $r$  に対する  $v_z$  の目標値を以下のように設定した

$$v_z = 0.7071\sqrt{r} - 0.18$$

最も大きな磁場を必要とする  $H^+$  を 50 MeV まで加速するための磁場をセクターコイルの設計目標として、Hill 部分と Valley 部分に必要な磁場を算出し、セクターコイルが出すべき磁場を計算した。図 1(a)は、表 1 の用途で使用するためにセクターコイルが発生する必要な磁場分布である。セクターコイル 1 つでは磁場の大きさを変えることはできるが、磁場分布の傾きを変えることはできない。これらの目標磁場は同一形状のセクターコイルの積層では効果的に達成できない。そこで、(1)磁場を径方向に形状の異なる複数のコイルを並べて、 $F^2$  を増やす、(2)この複数のセクターコイルを別電源励磁することで磁場の傾きを制御することを考えた。従来の設計を参考にして、2 つのコイルを持つセクターコイルを設計した(図 1(b))。図 2 は、表 1 の用途のうち 3 つのターゲットと磁場を示している。各セク

ターコイルの電流密度を調整することで、傾きを再現できる。設計したコイルを、磁場計算と粒子軌道計算を用いて評価した。ベータトロン振動数は、加速器シミュレーションフリープログラム OPAL を使用して計算した。従来の設計と新提案の設計におけるベータトロン振動数と半径の結果を図 3 に示す。新設計の計算では、メインコイルは等時性を考慮した理想的なメインコイルであると仮定している。新設計においてベータトロン振動数は虚数をとらず、改善したことがわかる。

表 1 HTS-SC の用途

Ion	Energy (MeV)	$B_{ave}$ (T) @0.5m	$B_0$ (T)	Applications
${}^4\text{He}^{2+}$	36	1.732	1.715	${}^{211}\text{At}$ $\alpha$ -therapy
${}^4\text{He}^{2+}$	40	1.826	1.806	${}^{210}\text{At}$ $\gamma$ -SPECT
${}^4\text{He}^{2+}$	80	2.589	2.534	K-number
$\text{H}^+$	18	1.232	1.209	PET-CT, ${}^{255}\text{Ac}$ / ${}^{213}\text{Bi}$
$\text{H}^+$	30	1.596	1.546	BNCT, ${}^{99}\text{Mo}$ / ${}^{99m}\text{Tc}$
$\text{H}^+$	50	2.071	1.966	BNCT, ${}^{99}\text{Mo}$ / ${}^{99m}\text{Tc}$
$\text{D}^+/\text{H}_2^+$	40	2.589	2.534	BNCT, ${}^{99}\text{Mo}$ / ${}^{99m}\text{Tc}$

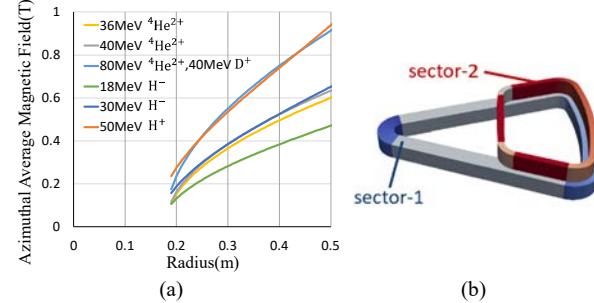


図 1 (a)セクターコイルの要求磁場, (b)新提案のコイル概形

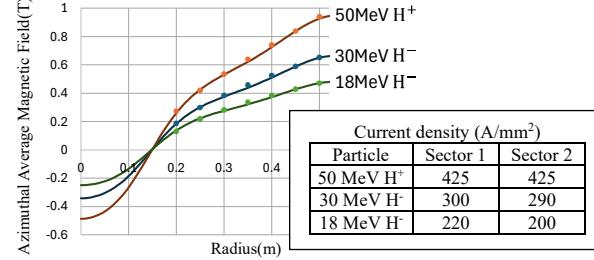


図 2 電流を変化させたときの磁場分布の変化

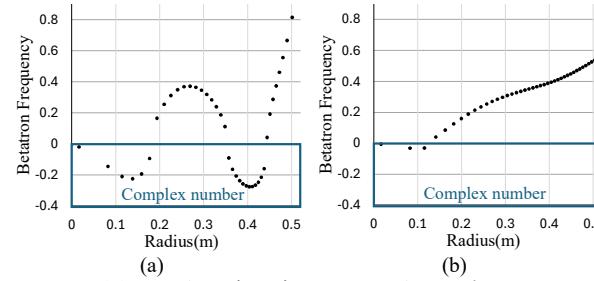


図 3 (a)従来の設計, (b)新提案のコイル設計での $z$ 方向のベータトロン振動数の変化

### 参考文献

- [1] H. Ueda, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4100205 (2013)

## EV の急速充電を実現する液体水素冷却 MgB<sub>2</sub> 昇圧 DCDC コンバータの ヘリウム温度での特性

### Characteristics of MgB<sub>2</sub> DCDC Boost Converter for EV Ultra-Fast Charge Cooled with Liquid Helium

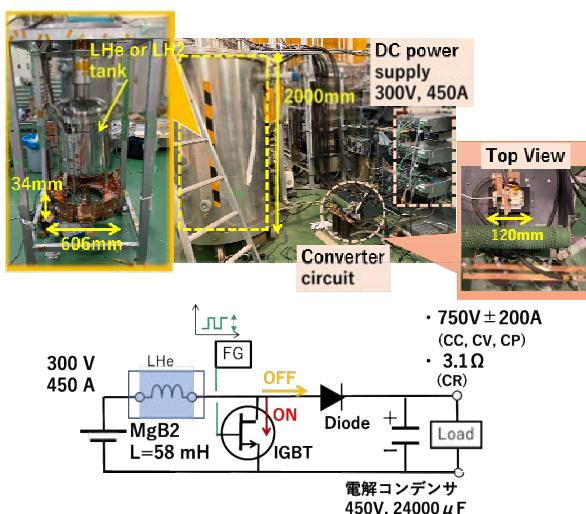
谷貝 剛(上智大学); 横田 康博, 新富 孝和(KEK); 平野 直樹(NIFS); 濱島 高太郎(東北大大学)  
YAGAI Tsuyoshi (Sophia University); MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); HIRANO Naoki (NIFS);  
HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)  
E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

#### 1. はじめに

エネルギー転換および運輸部門で CO<sub>2</sub> 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、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、急速充電器の設置数増は必須である。日本で普及し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、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しているが、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らない。さらに 150kW 以上では充電ケーブルの冷却が必須だが、その電力は上記効率に含まれていない。そこで本グループでは、直流 200V 程度の太陽光発電(PV)電力から直接EVに給電して変換回数を減少させ、変換器単体の高効率化かつケーブル冷却電力も余分にかからない超電導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。インダクタンス 58mH の MgB<sub>2</sub> コイルで入力電力 15kW までの 2 倍昇圧運転を液体ヘリウム冷却条件で行い、12mH の Bi2223 コイル(77K)で 12 kW までの試験結果と比較した。

#### 2. 超電導昇圧 MgB<sub>2</sub> DCDCコンバータ

MgB<sub>2</sub> 超電導コイルをコンバータのインダクタ素子として回路を組んだ。このコイルは 2021 年度に本グループが液体水素間接冷却条件にて 600A 定格通電試験を行ったものである。Fig. 1 は、MgB<sub>2</sub> コンバータ回路の外観とその回路図である。(Bi2223 コイルを用いた回路については[1])



MgB<sub>2</sub> コイルは内径・外径が各々 400 mm, 606 mm 厚み 11 mm のダブルパンケーキ(DP)コイルを 3 つ重ねて直接接続し、インダクタンス L が約 58 mH、20 K の定格電流は 600A である [2]。4.2K のコイル I<sub>c</sub> は推定で 1.6 kA を超える。一方 Bi2223 コイルは内径 100 mm, 243 ターンの DP であり、12 mH、77K 運転で I<sub>c</sub> は 109 A である。一般的な 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高耐圧の IGBT を、整流素子として 300A 程度通電可能なパワーダイオードを用い、スイッチング周波数は 50~200Hz(Bi2223 は < 300Hz)として 2 倍昇圧とした。この設定は PV 出力 200 V を入力として 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。

#### 3. 実験結果

Fig. 2 は、入力電力 < 15kW で昇圧試験を行った変換効率 [%] の結果であり、Bi2223(a)と MgB<sub>2</sub>(b)両方のコンバータ動作を比較している。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 CR モードでは 1.7 Ω、3.1 Ω のグリッド抵抗を用いた。Fig. 2 の○および□マークは、各々 CC, CR モードに対応している。各マークの濃淡はコイル I<sub>c</sub> 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。Bi2223 は入力電力の増加に伴い効率が低下し、かつ高負荷率で効率が下がる傾向がある。一方 MgB<sub>2</sub> コンバータは 95 % 付近からそれ以上の効率をほぼ全域で達成している。交流損失の見積もりでは数 W の損失にしかならないため、500 W(10kW のうち 5 %)に達する損失のほとんどはスイッチング損失と推定される。講演ではさらに詳細な解析結果を報告する。

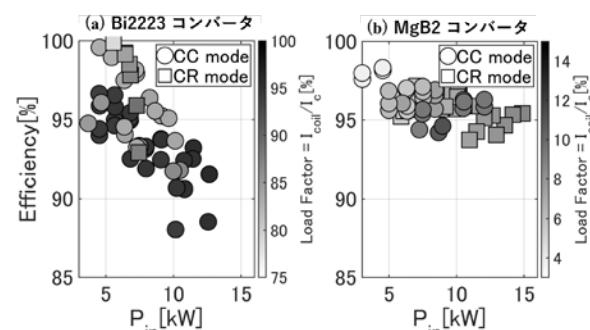


Fig. 2 Comparison of efficiencies of Bi2223 and MgB2 converter vs. input power.

#### 参考文献

1. 谷貝 剛他、2024 年度春季低温工学・超電導学会, 1A-p04.
2. T. Onji, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 33 No.5 (2023) 5700105.

# REBCO 積層導体の交流通電時熱暴走電流の評価

## Evaluation of Thermal Runaway Current of REBCO Stacked Conductors under AC Conditions

玉利 優斗, 永田 秀輝, 川越 明史 (鹿児島大) ; 尾花 哲治 (NIFS)  
TAMARI Yuto, NAGATA Shuki, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.); OBANA Tetsuhiro (NIFS)  
E-mail : k6012488@kadai.jp

### 1. はじめに

REBCO 大型導体を応用する際の定格電流は、交流通電やパルス通電の場合でも、直流で測定した臨界電流を基に決定される。しかしながら交流損失が温度上昇させる可能性があることに加え、電流分布が不均一になる可能性もあるため、交流通電時の安定限界を定量的に把握することは重要である。本研究では、熱暴走電流に注目し、液体窒素浸漬冷却の状態で、その特性を調べた。まず、線材 1 本の熱暴走電流を測定し、その結果が冷却と発熱のバランスで定量的に評価できることを示した。次に、テープ線を集合した導体の熱暴走について調べるために、2 本積層導体の熱暴走電流を測定した。

### 2. 热暴走電流の計算方法

本研究では、まず、線材 1 枚の熱暴走電流を推定した。この方法では、冷却曲線と発熱曲線が接する条件を求める。発熱は、磁束フロー損失と交流損失の和とした。電流振幅が臨界電流未満のときの超伝導線材の交流損失は、薄板断面の Norris の理論式で計算できる。冷却特性は、液体窒素の定常沸騰熱伝達曲線を用いた。発熱と冷却を温度の関数として表し、その交点の有無を調べる。交点があるとき、線材の状態は交点で収束する。2 つの曲線が交わらない場合は、発熱は発散し、熱暴走に至る。2 つの曲線が接するときの通電電流を熱暴走電流  $I_{\text{Tra}}$  と定義した。

### 3. 実験方法

使用したサンプルのパラメータを Table 1 に示す。線材 1 枚の実験では、線材幅すべてを浸漬冷却した場合と、一定の長さの線材表面のみ断熱して長手方向からの伝導冷却とした場合の 2 パターンとした。積層導体の実験では、線材 2 本を重ね、浸漬冷却で行った。接続部の抵抗と線材間の抵抗が熱暴走に及ぼす影響を調べるために、2 本の線材と電流リードとの接続長を変えた場合と、線材間接触回数を変えた場合の測定を行った。それぞれの条件は、線材長を同じにした均一(U)と 2 倍にした不均一(NU)の 2 パターン、接觸回数 1 回の T1 と 5 回の T5 の 2 パターンを組み合わせて 4 パターンとした。

本測定は、60 秒間損失値に変化がないことを確認してから、通電電流を上げていった。60 秒間の通電で、損失が 5% 以上変化したとき、もしくは焼損したときの電流振幅を熱暴走電流とした。

### 4. 結果および考察

各条件の実験結果と計算結果を Fig. 1 に示す。縦軸に臨界電流に対する熱暴走電流の割合、横軸に臨界電流をとつてお

り、◇、□、△は浸漬冷却、○は伝導冷却を表している。線材 1 本のサンプルでは、実験結果と計算結果の差が 5% 以下となっており、よく一致した。この結果から、数値計算による熱暴走電流の推定が可能であることがわかり、本推定法の有効性が示された。また、2 本を積層した全てのサンプルは、2 倍の臨界電流をもつ線材として計算した熱暴走電流よりも小さい電流で熱暴走した。接続抵抗を均一にしたものと不均一にしたものでは熱暴走電流にはほぼ差は無く、線材間の電気接觸状況の違いで差が見られた。

以上のことから、線材ごとの冷却条件や線材間の電気接觸状況による電流分布が、熱暴走電流に影響していることが示される。

### 5. まとめ

REBCO 積層導体の熱暴走電流を測定した結果、計算結果より低い値となった。この結果から、大容量導体の熱暴走電流には冷却状況や電流分布が影響することが予測される。直流で測定した臨界電流を基にした定格電流の決定法では、安全率を過大評価してしまう可能性があることを示した。

Table 1 Sample parameters

sample	Single tape	Stacked tapes
Sperconductor	REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	
Thickness[mm]	0.048	0.096
Width[mm]		4
$I_C$ [A] @L.N <sub>2</sub> , s f.	157	308
Number of tapes	1	2

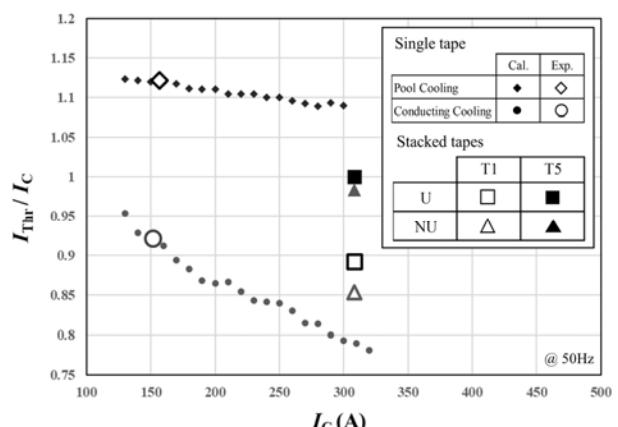


Fig. 1 Critical current dependence of the ratio of thermal runaway current to critical current

## SMES ケーブルの大電流容量化とシステム構成に関する検討

### Study on higher current capacity and system configuration of SMES cables

東川 甲平, 宮寄 智也, 田渕 竜也, 浅野 将輝, 諸井 翔, 木須 隆暢 (九大); 塩原 敬, 佐藤 迪夫 (SWCC); MUYEEN S.M. (カタール大)  
**HIGASHIKAWA** Kohei, MIYAZAKI Tomoya, TABUCHI Tatsuya, ASANO Masaki, MOROI Sho, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);  
SHIOHARA Kei, SATO Michio (SWCC); 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を大幅に緩和できることを示してきた<sup>[1]</sup>。一方、これまでに製作したモデルケーブルは単一の素線を巻線した 100 A 級の電流容量にとどまっていた<sup>[2]</sup>。そこで本研究では、実規模化への取り組みの一環として、複数の素線を並列に巻線した kA 級のモデルケーブルを製作するとともに、系統導入時のシステム構成を検討したので報告する。

#### 2. モデルケーブル製作

製作したモデルケーブルの写真を Fig. 1 に示す。絶縁した 4 mm 幅の REBCO 線材を 8 本並列して 33 ターン巻線し、巻線長を 1.23 m とした。それぞれの素線に電流リードと電圧端子を取り付け、素線ごとの特性も評価できるようにした。また、室温にてそれぞれの素線の自己インダクタンスを測定したところ、すべての素線の自己インダクタンスは 9.80~9.91  $\mu$ H の範囲に収まっており、均一に巻線できていることを確認した。

#### 3. モデルケーブルの特性評価

このモデルケーブルを大気圧沸点下の液体窒素に浸漬し、四端子法によって電流-電圧特性を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。8 本の素線を並列に接続して測定を行った結果を ● で示しているが、現有している 1.2 kA 電源の限界の電流値 (1.28 kA) を通電しても、いずれの素線にも有意な電圧の発生を認めることができなかった。そこで、8 本の素線を直列に接続して測定した結果を ○ で示しており、この際の臨界電流の合計値は 1.56 kA に達した。従って、少なくとも 1.28 kA の電流容量は確認でき、1.56 kA の臨界電流値が見込まれ、kA 級のモデルケーブルの作製に初めて成功したと言える。また、この時の 50 mT の磁界発生下におけるそれぞれの素線の臨界電流値は 186-207 A の範囲にあり、一方で購入した線材の臨界電流値は 196-202 A と記載されていたことから、ほぼ自己磁界程度の素線のパフォーマンスが得られていることがわかる。これは、本ケーブルの巻線構造においては、磁界が線材のテープ面に平行に加わることに起因していると考えられ、本構成の SMES ケーブルの利点の一端を表すものである。

次に、このモデルケーブルが 20 K まで冷却された場合の電流容量を想定し、長さが 1.5 km あることを想定した際のハードウェア閉ループ試験の結果を Fig. 3 に示す。太陽光発電から負荷への電力輸送を本ケーブルによって行うことを想定しているが、定格で発電していた太陽光発電の出力が突然ゼロになる極端な状況でも、負荷には瞬断もなく所望の電力が届けられている様子がわかる。また、測定電圧が全て誘導電圧によるものと仮定し、本モデルケーブルの自己インダクタンスの理論値 (4.99  $\mu$ H) を用いて電流波形を求めた結果、測定値とは完全に重なり、損失は無視でき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 と科学研究費補助金(JP24H00320)による助成を得て行ったものである。

#### 参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., SuST 37 (2024) 115015.  
[2] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 33 (2023) 5400405.

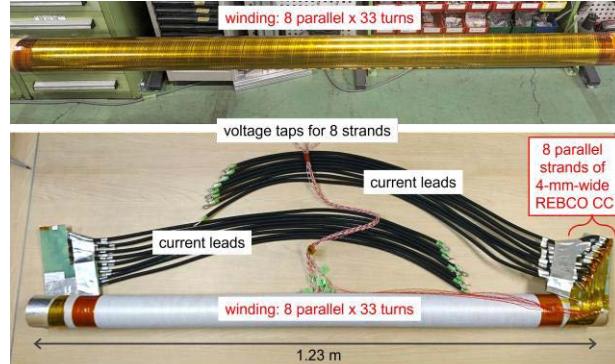


Fig. 1. Photograph of the model cable.

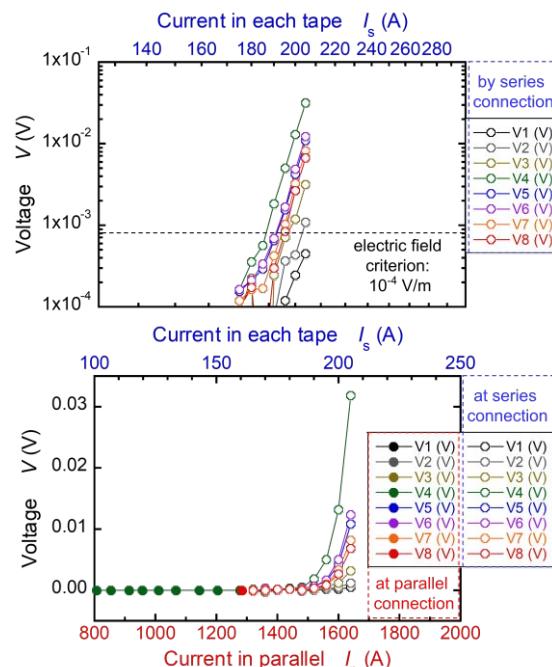


Fig. 2. Current-voltage characteristics of the model cable measured by the four-probe method.

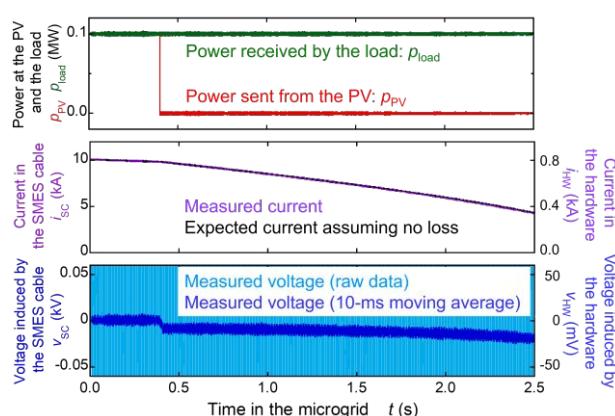


Fig. 3. Results of a hardware-in-the-loop simulation for discharging operation of the model cable.

## 超電導バルク磁石の磁気浮上と小型冷凍機を使った非接触攪拌の検討

Magnetic levitation using HTS bulk magnets and non-contact stirring using a small refrigerator

岡 徹雄(芝浦工大); 関根 芸姫, 菊地 紘生, 青木 正智, 手呂内 拓人, 横山 和哉(足利大); 坂井 直道(芝浦工大); 加藤 好一(佐竹マルチミクス); 逸見 智和(サーマルブロック)

OKA Tetsuo (SIT); SEKINE Iyan, KIKUCHI Hiroki, AOKI Masatomo, TEROUCHI Takuto, YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); SAKAI Naomichi (SIT); KATO Yoshikazu (SATAKE MultiMix Corp.); HEMMI Tomokazu (Thermal Block Co.)

E-mail: superoka49@gmail.com

### 1. はじめに

世界的パンデミックへの対策として日本でも技術開発の流れがある[1]。最近のシングルユースと称する外部からの汚染物質を完全に抑制した製薬工程が提案される中で、非接触攪拌が注目されている。高温超電導バルク体(以下バルク磁石)による磁気浮上はその材料の発見以降即座にその特質が報告されてきたが、着磁の必要がなく冷却するだけで永久磁石を非接触浮上できる特性に市場応用への可能性が示唆されてきた[2]。本研究では液体窒素ではなく、操作が簡単な小型冷凍機を採用し、バルク磁石の浮上特性を評価した。

### 2. 実験方法

実験装置の外観とその水平抗力測定の概要を Fig. 1 に示す。バルク磁石は Gd123 系と呼ぶ円柱状の市販品である。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、真空断熱中の冷凍部を 58 K まで冷却した。測定に際し磁極上部に非磁性スペーサーを介して永久磁石( $\phi 40 \times t20$ , 0.425 T)1 個を常電導時にセットした。Fig. 2 に示すように 6 時間後には最低温度 58 K に達した。抗力測定は手で水平に引っ張って行うが、浮上磁石の倒置を防ぐため、Fig. 1b に示すようにアクリル板でその上下面を支持した。測定には市販のデジタル荷重計を用いその最大値を得た。

### 3. 実験結果

Table 1 に水平抗力の測定結果の一部を示す。水平抗力は攪拌子の離脱時のトルクに直結すると考えられ、その速度依存や浮上精度が重要であるが、現在これらは未考慮である。鉄ヨークの効果によって、保持された高さより浮上ギャップは減少する。ギャップが小さいと水平抗力は著しく上昇する。攪拌機では浮上ギャップ内に容器バッグの壁があるため、広いギャップを必要とするが、例えばギャップ 10 mmでの測定値は 9.947 N であり、設計基準である 9.523 N を上回った。なお、前回報告した浮上性能は 10 N を超えており、今回のそれを大きく上回った(表中 No.5\*)ことから、バルク磁石の性能向上とその安定が求められる。

### 4. 結論

スターリング冷凍機により冷却し、磁気浮上させた永久磁石を非接触攪拌機に利用する際の水平抗力を簡便な測定法により評価し、製品応用の基準となる性能を超える性能が得られた。これは近い将来の市場投入を暗示し、ワクチン製造など様々な分野への展開が期待できる。

### 謝辞

本発表は令和 3 年に開始された経済産業省のプロジェクト「ワクチン開発・生産体制強化戦略」に関連して実施された。

### 参考文献

1. [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/bio/vaccine\\_development](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/bio/vaccine_development) ワクチン開発・生産体制強化
2. 村上雅人ら, 電気学会研究会 ASC06-48, 45-48, 2006

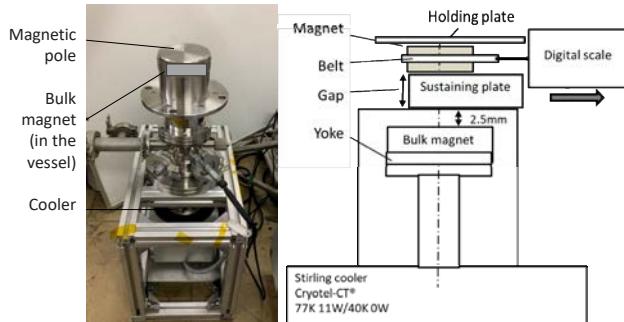


Fig. 1 A bulk magnet and the magnet system using a Stirling cooler (a) and the illustration of experimental setup for horizontal drag force measurement (b)

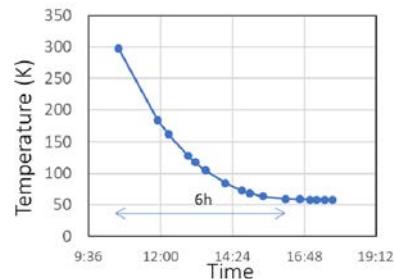


Fig. 2 Cooling curve of bulk magnet system

Table 1 Horizontal drag force/stress

No.	Spacer (mm)	Air gap (mm)	Horizontal drag force (kgf)	Horizontal drag stress (N)
1	11	10	1.015	9.947
2	11	9	1.001	9.810
3	10	8.5	1.013	9.927
4	10	5.5	1.730	16.95
5*	11	10	1.05	10.29

\* Nippon Steel  $\phi 60 \times t20$

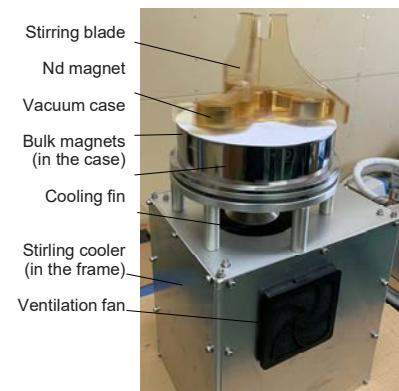


Fig. 3 Drive unit of non-contact stirrer

## 磁化方向の異なるリング状永久磁石と積層超電導リングを用いた超電導磁気軸受の電磁力特性に関する考察

Consideration of electromagnetic characteristics of superconducting magnetic bearings with ring-shaped permanent magnets with different magnetization directions and laminated superconducting rings

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

超電導磁気軸受は超電導体と永久磁石間のピン止め力を利用し、非接触かつ複雑な制御なしで安定して磁気浮上・回転が可能であり、回転機における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  $\phi 140$  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]、本発表では、リング磁石の着磁方向に関して軸方向着磁と径方向着磁の場合の電磁力等の違いについて考察行つた結果を報告する。

### 2. $\phi 140$ mm の超電導磁気軸受の概要

Fig. 1 に、提案する超電導磁気軸受の概念図を示す。Faraday Factory Japan 製の 12 mm 幅の線材であり、臨界電流  $I_c$  は 300 A 以上である。また超電導体の占積率を稼ぐために、安定化銅層を抜いた構造にしている。これをリング状に巻いて補強し、内径 64 mm、外径 140 mm に成型する。一方、リング磁石(PM)は、内径 50 mm、外径 60 mm の軸方向着磁(図 1 左)もしくは、内径 48 mm、外径 60 mm の径方向着磁(図 1 右)の PM を使用し、2 種類の磁気軸受を構成する。

### 3. 有限要素法による電磁力の解析モデル

まず Fig. 2 に示す様に、有限要素法解析ソフトである JMAG-Designer®にて 2 次元軸対称モデルを構築・解析を行う。超電導体部分(SC)を空気領域とし、永久磁石(PM)が中心にある際のベクトルポテンシャル境界を外周に固定設定する事でピン止め効果を近似する磁束凍結モデルで考察を行う。すなわち初期位置の磁束密度分布を Fig. 2 の点線部分に記憶させておき、永久磁石のみ鉛直上方向に約 1 mm ずつ移動させた場合の  $-z$  方向に働くスラスト方向電磁力を 2 つのリング磁石に対して調べる。

### 4. スラスト方向電磁力の解析結果

Fig. 3 に軸方向着磁(Axial)及び径方向着磁(Radial)のリング磁石を移動させていった場合の  $-z$  方向のスラスト力の解析

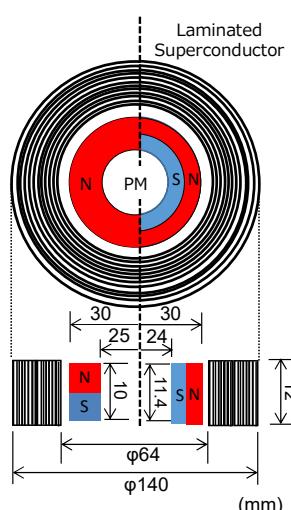


Fig. 1 Two kinds of superconducting (SC) magnetic bearings using different magnetizing direction

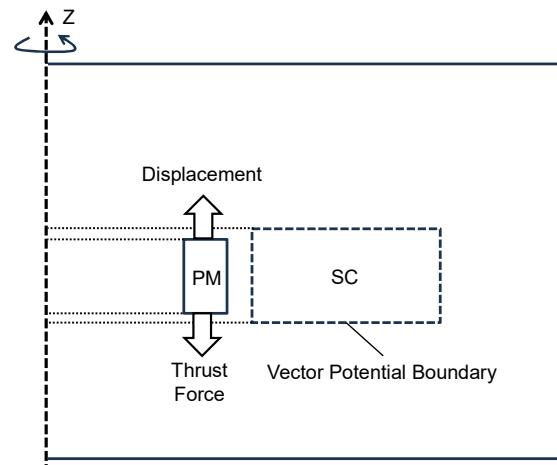


Fig. 2 Two-dimensional axial symmetry analysis model

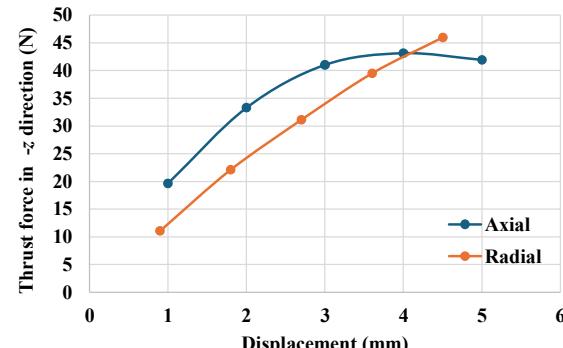


Fig. 3 Thrust force of the two superconducting magnetic bearings using different magnetization direction

結果を示す。はじめは軸方向着磁の方が 2 倍弱程大きな力が働くが、4 mm の変位を境に力が逆転し、軸方向着磁の磁石の電磁力は減少することが分かる。これは、超電導体内に収まっている分には軸方向着磁の磁力線のピン止め力が高くなるが、一度超電導体部分から PM の先端部が  $+z$  方向に移動してはみ出することで磁力線が漏れてしまい、力が弱まってしまったものと考えられる。一方で、径方向着磁の PM による磁力線は 4 mm を超えても超電導体内へピン止めされている磁力線の量が軸方向長着磁の場合よりも多かったためこのような逆転現象が起こっていると考えられる。紙面の都合上、上記の解析結果に加え、実験結果等も交えた内容に関しては講演当日に報告・議論する。

### 謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)として実施した。

### 参考文献

1. Y. Terao, et al.: Applied Superconductivity Conference 2024, 2L0r2B-02 (2024).

## 常磁性流体を用いた淘汰管磁気分離装置の検討

### Study on a selection tube magnetic separator using a paramagnetic fluid

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

福島原子力発電所事故時に、大気中に放出された放射性物質は、降雨等により主に発電所周辺の土壤に沈着し大量の放射線汚染土壤となった。そして、表土の剥ぎ取り等の除染が行われ、その推定量は 1200 万 m<sup>3</sup>であり、最終処分場地選定の難しさや、保管容量に限りがあるため、放射線汚染土壤の減容化は不可欠である。その土壤中の特に永久電荷やフレイドエッジのようなセシウムイオン吸着サイトを持ち、かつ常磁性を示す小粒系の粘土鉱物(バーミキュライト)を選択的に分離できれば、さらなる減容化につながると考えられる[1]。

そこで、粒径の小さな常磁性粒子の磁気分離法が期待されている。常磁性粒子の磁気分離は 5T 以上では効果が高いが、その導入・管理コストや自動運転などを考慮すると、磁気分離装置としては、できるだけ強磁場を適用せず分離効率を上げることが工業的には求められる。そこで、現在、我々は常磁性体に対して低磁場で使用できる淘汰管磁気分離装置の開発を進めている。減容化手法として、常磁性の作業媒体を用いた淘汰管磁気分離法を検討したので報告する。

#### 2. 淘汰管磁気分離法の原理

淘汰管とは、液中に懸濁した粒子が沈降する速度と装置下部から送液した作業媒体の上昇速度との関係により、粒子に作用する合力を利用して、微粒子を粒径によって選別する装置である。淘汰管内の粒子には、流体によるドラッグ力  $\mathbf{F}_D$ 、浮力  $\mathbf{F}_p$ 、重力  $\mathbf{F}_g$  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(作業媒体)の速度  $v_f$  を 0 としたときに導かれる粒子の沈降終端速度  $v_s$  を式(2)に示す。この沈降終端速度  $v_s$  に対して、淘汰管の底部から同速度の上昇流を流入させることで、粒子は見かけ上無重力となり、管内に浮遊することとなる。

$$\mathbf{F} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_p - \rho_f) - 6\pi\eta r (v_f - v_p) \quad (1)$$

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

ここで、 $r$  は粒子半径 [m]、 $\rho_p$  は粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_f$  は粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\eta$  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。

上記の淘汰管内で見かけ上無重力状態となった粒子に磁気力を作用させると、ドラッグ力は限りなく小さくなるので、従来の磁気分離法に比較し、低磁場(0.5T~2T 程度)でも磁気分離が可能となる。

#### 3. 常磁性流体を用いた淘汰管磁気分離法の検討

密度と粒径分布がおよそ等しい常磁性を示す黒ガラスと反磁性を示す黄色ガラスの粒子の混合物を、模擬試料とした。

水を作業媒体とし、淘汰管磁気分離を行うと、管内に粒子が浮遊し、常磁性を示す黒ガラスは、磁場発生源に磁気けん引される。黒色ガラスが磁気けん引される過程で、その経路(同位置)には黄色ガラスも一様に浮遊・分布しているため、黒ガラス群に巻き込まれるように黄ガラスも磁場発生源側の管壁に集積する場合があり、分離の弊害となる。

また、上記において、黒色ガラスは管壁側に集積されるが、その管内の領域に黄色ガラスが一様に分布するため、集積した黒ガラスのみを精密に回収することは困難である。

そこで、我々は、淘汰管内の作業媒体の磁化率を制御することで、分離対象物の管内動態の改善を図った。

具体的には、磁場発生源に対し、常磁性を示す黒色ガラスには引力が、反磁性を示す黄色ガラスには斥力が作用するよう、粒子に作用する磁気力(粒子の体積を V とした場合、磁気力  $F_M$  を一次元表記で表すと式(3)となる。)の式中の作業媒体の磁化率  $\chi_f$  がそれぞれの粒子の磁化率  $\chi_p$  黒色ガラスと  $\chi_p$  黄色ガラスの中間( $\chi_p$  黄色ガラス <  $\chi_f$  <  $\chi_p$  黒色ガラス)になるようにした。

$$F_M = V \frac{(\chi_p - \chi_f)}{\mu_0} B_x \frac{dB_x}{dx} \quad (3)$$

ここで V は粒子の体積、 $\chi_f$  は流体の磁化率、 $\chi_p$  は粒子の磁化率、B は外部印加磁場[T]である。

黒色ガラス(平均粒子径 125μm、体積磁化率  $3.17 \times 10^{-4}$ )と黄色ガラス(平均粒子径 125μm、体積磁化率  $-0.86 \times 10^{-6}$ )を用いた。作業媒体には、硫酸マンガン水溶液(ナカライテスク、MnSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O) 5wt%を用いた。磁気天秤を用い、それぞれの粒子と硫酸マンガン水溶液の磁化率測定を行い、その濃度(磁化率)を決定した。そして、淘汰管磁気分離における各粒子の管内分布および動態についての確認実験を実施した。

実験装置として、内径 13 mm、長さ 40cm の塩ビパイプ管を用いた淘汰管を作製した。淘汰管の高さ 20cm の位置の側面に、最大磁束密度 1.3 T の永久磁石回路を配置した状態で、平均流速 1.3 cm/s で硫酸マンガン水溶液送液し、それぞれのガラス粒子を淘汰管内に浮遊させた。その際、淘汰管内部には磁気フィルタ(SUS430 製、線径 0.6 mm、20 メッシュ)を黒色ガラスの集積部として配置した。

その実験結果の様子(写真)と各ガラス粒子の管内分布を模式図に表し Fig.1 に示す。図の結果が示すように、黒ガラスは、磁場に磁気けん引され磁気フィルタに捕獲された。また、黄色ガラスは、その流体の斥力により磁石と反対側の管壁側に流された。黒ガラスと黄色ガラス粒子との間には、粒子が存在しない空間もあり、水を作業媒体とした場合に比べ、精密に分離が行われていることが示された。

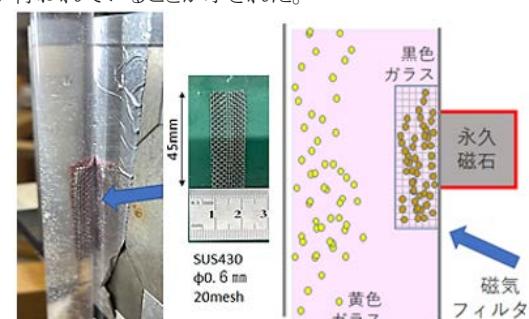


Fig.1 Schematic illustration of selection tube magnetic separation using paramagnetic fluid as the working medium.

#### 4. まとめ

本研究では、作業媒体の磁化率を制御し、淘汰管磁気分離実験を行った。その結果、管内での各粒子の分布状況の改善を図ることに成功した。今後の課題として、実用化に向け、管内に仕切り板を設け、流速を制御し、連続処理を可能とすることである。

#### 参考文献

- [1] A.Nagahama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.149

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費(24K15358)による助成を受けました。

## BWR 中の CRUD に対する磁気分離法の応用の可能性

### Applicability of magnetic separation to CRUD processing in BWR decommissioning

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 Fumihiro (FUT); SEKINE Tomokazu (ICUS)

E-mail: nishijima@fukui-ut.ac.jp

#### 1. はじめに

今後、廃止措置に供される原子力プラントの数は建設されるプラント数を超えると言われている[1]。2019年7月1日現在、世界の181基、78.1GWの原子炉が永久停止した。また、平均寿命を40年と仮定すると、2030年までにさらに207基が、2059年までにさらに125基が停止することになる。(この推定には、長期運転の可能な28基等は考慮されていない。)これに伴い、世界の原子炉の廃止措置サービス市場規模は、2024年から2030年までの期間中に、6.2%で成長すると推定されている[2]。

このような現状に鑑み、本研究ではBWRの廃止措置について検討した。前回の報告は、PWRであったが、今回はBWRである。BWRは全世界の原子炉の18%程度であるが、放射性CRUDの生成量はPWRよりBWRの方が多いことが理由である。PWRの1/3~1/2の量である。これは、PWRの冷却系統が一次系と二次系に分かれており、放射性CRUDは一次系のみに発生することが理由の一つである。

CRUDとは、冷却系に発生する金属酸化物のことであり、構造物の一部が冷却水に溶け出し、原子炉コアで中性子照射され、放射化したものである。これが改めて冷却材とともにシステム中を循環し、配管系に付着して、周囲の空間線量を高くるものである。このため、作業員の被ばくを低減するためには、このCRUDの除去が重要になってくる。

BWRの廃止措置は、大まかに、以下のプロセスで行われる。使用済燃料排出、系統除染、安全貯蔵、解体撤去、建屋の解体撤去である[3]。本研究は、この、系統除染に磁気分離の応用の可能性を検討するものである。

システムの廃止措置では、作業員の被ばく量の低減、放射性廃棄物の管理、環境保護、(法令順守)などが適切に実施されることが求められる。その中でも、実際に廃止措置を始めるためには、まず、作業員の被ばく量を低減することが重要となる。これが系統除染が必要となる理由である。

#### 2. BWRの除染

BWRでは、原子炉圧力容器、余熱除去系、原子炉冷却材浄化系、原子炉再循環系などが主な系統除染(化学除染)の対象となっている[4]。

BWRでは核燃料表面で冷却水中の不純物が析出することを抑制するため、給水を高純度水度(0.06~0.08 μs/cm)にすることが行われている。さらに、酸素を適量(20~60ppb)導入し、配管表面に酸化皮膜を形成し、腐食を抑え、腐食生成物が燃料表面で放射性クラッドになることを抑制している。[5]

上述の理由で、BWRクラッドの主成分はヘマタイトを主とした鉄酸化物である。クラッドは酸化性環境で発生するため鉄は、主に3価の状態にある。このため除染は、鉄イオンを3価から2価に還元して溶解する還元溶解を採用している[6]。(Crが含まれている場合は、Crが難溶性の3価になっている。このため酸化させ、水溶性の6価のイオンにして除去する。[6])

#### 3. 廃棄物の減容化の必要性

図にBWRの系統除染の模式図を示す[7]。基本的に、溶解された放射性イオンは、イオン交換樹脂にて回収される。その後、放射性イオンやクラッドを含むイオン交換樹脂は再生成されるか、あるいは、廃棄されることになる。

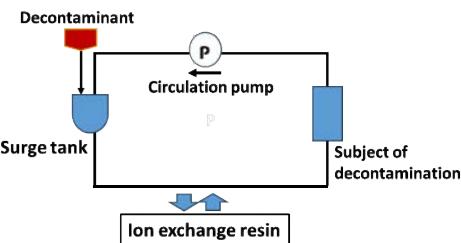


図 系統除染の模式図

稼働中のBWRの原子炉冷却材浄化系にはイオン交換樹脂が設置されている。この使用済みイオン交換樹脂あるいは、それらを再生した際に発生する廃液は、セメント固化され貯蔵されている。しかし、本手法では廃棄物の体積が大きく、減容化が重要となっており、廃棄物量を低減する試みがなされている。[8]

廃止措置においても、同様の問題が想定され、系統除染で使用したイオン交換樹脂の減容化、あるいはその際に発生する廃液の処理が重要となることが想定されている。

#### 4. 磁気分離の応用の可能性

前回の発表では、PWRの化学体積制御系(CVCS)で使用されたイオン交換樹脂からRIを酸洗浄で分離し、強磁性吸着材でRIを吸着させ、磁気分離を実施する手法について報告した。今回、BWRにおいては、廃止措置における系統除染への応用を検討した。上述のように、系統除染も最終的には、RIを吸着したイオン交換樹脂で回収することになるため、PWRと同様の手法が利用できると判断された。

#### 5. 結論

BWRの廃止措置における系統除染を想定し、そのプロセスに磁気分離の応用が可能かどうかを検討した。その結果、PWRの場合と同様に、イオン交換樹脂から洗い出された放射性のイオン(主として<sup>60</sup>Coや<sup>58</sup>Co)を強磁性吸着剤に吸着させ、磁気分離する手法が可能であると判断された。

#### 参考文献

- [1] [www.berlin-ec.com/salzburg2019/files/WealerDecommissioning.pdf](http://www.berlin-ec.com/salzburg2019/files/WealerDecommissioning.pdf)
- [2] <https://www.verifiedmarketreports.com/product/nuclear-decommissioning-services-market/>
- [3] <https://www.nfi.co.jp/e/product/backend>
- [4] [https://wchem.sakura.ne.jp/wp/wp-content/uploads/2019/09/第24回定例研究会\\_2.pdf](https://wchem.sakura.ne.jp/wp/wp-content/uploads/2019/09/第24回定例研究会_2.pdf)
- [5] 石榑顕吉, 内田俊介, 大沢安隆, 立川圓造, 長尾博之, 目黒芳紀, 原子炉の水化学-研究現状と今後の課題, 日本原子力学会誌, Vol. 29, No.4 (1987) pp273-278
- [6] 諏訪武, 安中秀雄, “原子炉除染技術の現状”, 防食技術, 32, 721-729 (1983)
- [7] [https://www.energia.co.jp/atom\\_haishi/gaiyou/pdf/keitoujyosen.pdf](https://www.energia.co.jp/atom_haishi/gaiyou/pdf/keitoujyosen.pdf)
- [8] 入江弘光, 高原俊夫, 大東祥晃, BWR型発電所における最近の廃棄物処理の動向, 日本原子力学会誌, Vol. 23, No. 12 (1981) pp886-890

# 高温超電導三相電機子巻線の非線形抵抗に伴う不平衡電気特性に関する一考察

## A Consideration on Unbalanced Electrical Characteristics of a High-temperature Superconducting Three-phase Armature Windings due to Nonlinear Resistance

中村 武恒 (京大)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

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

### 1. はじめに

高温超電導体を用いる三相交流モータは、高効率かつ高出力密度を実現する回転機として期待されており、現在では航空機等の輸送機器を対象として世界的に多くの研究開発が行われている。また、同回転機の究極の構成として、全ての巻線を高温超電導化する全高温超電導モータが想定されている[1]。全高温超電導モータの優位性としては、巻線の低損失化に伴う高効率特性や、あるいは磁性体コアを排除した軽量構成に伴う高出力密度化が挙げられている。しかしながら、現状において可能な限りの文献調査をしても、筆者の知る限り上記ロジックに基づく開発成功例（例えば、1,000 rpm 以上の現実的回転数における試験例や、あるいは負荷回転試験例）は、主流の同期モータについて残念ながら皆無である。

筆者らは、2005 年より高温超電導誘導同期モータ(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)を対象として、理論的・解析的・実験的研究を行ってきた。その基本特性は、例えば文献[2]にて報告している。また近年では、全高温超電導機について企業や他大学の協力のもと、1,000 rpm を超える安定した回転試験成功[3]、軽負荷時加減速試験成功[4]、38 kW の実負荷試験成功や同特性の非線形等価回路による定量評価成功[5]、曲げ直径 20 mm の HTS コイルを用いた発電試験成功[6]、Face-to-Face Double Stacked HTS 導体を用いた曲げ直径 17 mm の固定子巻線による非超電導駆動成功[7]他の成果を上げている。

上記豊富な研究開発の経験をもとに、本講演では全高温超電導回転機を実現するまでのリスクを明確化する。即ち、一般的電圧型インバータ駆動のシステムを対象として、三相交流回路の知識を用い、三相交流電機子巻線の高温超電導化のリスクと対策に関する検討結果を報告する。

### 2. 全高温超電導電機子の思考実験と負荷回転試験結果

一般的な輸送機器モータは、電圧型インバータによって駆動される。従って、本研究では電圧入力に対する応答を議論する。Fig. 1 には、一般的な三相電機子巻線(Y 結線)の結線図を示す。高温超電導電機子巻線では、同図の巻線抵抗  $R$  が当該巻線電流瞬時値に依存して非線形的に変化する。一方で、例えば巻線のインダクタンス( $L$ )が非常に小さい場合、HTS 固定子巻線の瞬時電流は Fig. 1(挿入図)の非線形電圧-電流構成関係に支配されることになる。よく知られているように、HTS の電圧-電流特性は臨界電流( $I_c$ )を基準にして、それよりも低電流領域では量子化磁束の Stick-slip 運動に伴うヒステリシス損失が、それよりも高電流領域では磁束フロー損失が上記  $R$  を支配することになるが、一般には  $I_c$  未満の電流領域で使用することになる。さらに、上記  $R$  は HTS の経験磁界ベクトルに依存することになり、特に主磁束を通す鉄心コアを有さない空芯構造では大きく影響を受けて三相不平衡のリスク(例えば焼損)が危惧される。紙面の制約から、上記三相不平衡電気特性に関する思考実験の解析的検討については講演当日に報告するが、例えば 50 kW 級全超電導 HTS-ISM の負荷試験(Fig. 2)[8]では、鉄心コアを有しているにも関わらず 120 A 程度以上の電流領域( $I_c$ : 400 A 程度)において三相不平衡状態に移行してしまうことが分かっている。なお、

上記した HTS 電機子巻線の三相不平衡の問題は電流制御型インバータを用いれば基本的には解決する。しかしながら、当該インバータは回路構成等が複雑で一般的でなく、システムのコスト高に繋がる。さらには、HTS 電機子巻線が低インピーダンスであるが故に輸送電流を外部回路的に制御する必要があり、即ちインバータ側の損失増大に伴ってシステム効率低下に繋がってしまうリスクもあり、現在検討を進めている。

### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22H01471, 23K22742)の助成を受けた。

### 参考文献

1. K. S. Haran, et al.: Supercond. Sci. Technol., vol. 30, (2017) 123002
2. T. Nakamura and Y. Ogama: J. Appl. Phys., vol. 136 (2024) 093903
3. D. Sekiguchi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 22, no. 3 (2012) 5200904
4. T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5 (2019) 5203005
5. T. Nakamura, et al.: Physica C, vol. 578 (2020) 1353662
6. T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, no. 6 (2022) 5202205
7. Y. Gao, et al., under review
8. T. Nakamura, et al., in preparation

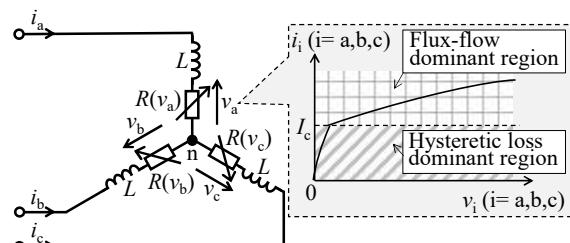


Fig. 1 Wiring diagram of three-phase HTS armature windings ( $(i_a, i_b, i_c)$ : instantaneous values of three-phase currents,  $(v_a, v_b, v_c)$ : instantaneous values of three-phase voltage drops across  $R$ ,  $L$ : self-inductance,  $R(v_i)$  ( $i = a, b, c$ ): HTS winding resistance as a function of  $(v_a, v_b, v_c)$ , (Inset)  $v_i$  vs.  $i_i$  characteristic of the HTS winding when  $L$  is small enough ( $i = a, b, c$ ).

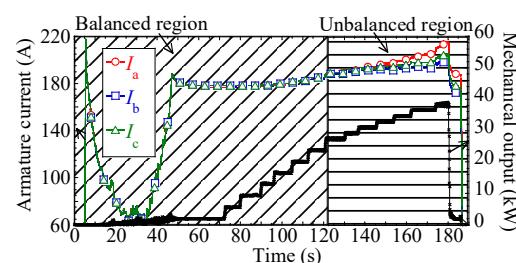


Fig. 2 Experimental results of changes in three-phase currents during load application for a 50 kW-class fully HTS-ISM ( $I$ : Effective value of armature current) [8].

# 新しいかご形巻線構造を有する高温超電導誘導同期モータの回転特性評価

## Rotational Characteristics Evaluation of a High-Temperature Superconductor Induction /Synchronous Motor with a New Squirrel-Cage Winding Structure

REN Mengyi, 中村 武恒 (京大)

REN Mengyi, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

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

### 1. はじめに

我々は、高温超電導かご形回転子巻線を有する高温超電導誘導／同期モータ (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) の研究を行っている [1]。また、現在はこれまでの研究成果をもとに複数の応用開発を産学連携あるいは産官学連携の取り組みとして行っている。例えば、我が国における水素サプライチェーン構築のための HTS-ISM を搭載した液体水素遠心式サブマージポンプ (回転数: 5,000 rpm) では、NEDO プロとして世界最大流量 (30.5 m<sup>3</sup>/h)、世界最高圧 (1.6 MPaG) を実現した [2]。本開発については、高温超電導モータとして世界初の商用化間近の状況にある。

一方で、HTS-ISM の種々実用に際して、その性能を保証しながら製造技術の観点からの改善も要求される。特に、HTS-ISM の性能の要である HTS かご形回転子巻線を実現するためには、現状は HTS ロータバーと HTS エンドリングの接合をハンドによって施工しており、高出力化の際には製造技術あるいは当該接合部発熱の観点からの課題が大きくなる。

我々のグループでは、上記課題を解決する手段の一つとして新かご形巻線構造を提案している [3]。本講演では、上記提案を発展させて電磁気学的かつ電気回路学的に機械出力を実現できる HTS かご形巻線構造を検討し、その特性を 2 次元電磁界解析によって明らかにしたので報告する。

### 2. 新しいかご形巻線構造の概要

Fig. 1 には、HTS-ISM の断面概略図を示す。同図の回転子巻線(高温超電導体)について、新しい構成を検討した。Fig. 2(a)には、従来型かご形巻線の基本構造を示す。同図に示すように、ケイ素鋼板コアのスロット内に上下に収容される HTS ロータバーが全て HTS エンドリングによって短絡されている。この場合、HTS ロータバーと HTS エンドリングのハンド接続箇所は 24 となる(●印)。一方で、Fig. 2(b)に示す新巻線構造では、例えば速度起電力  $E1^+$  を誘導する HTS ロータバーと速度起電力  $E1^-$  を誘導する HTS ロータバーのみを短絡している。このとき、速度起電力によって誘導される電流は Fig. 2(a)と等価になり、トルクの発現が可能と考えられる。Fig. 2(b)の接続箇所は 6 となり、即ち Fig. 2(a) (従来型かご形巻線) の 1/4 に低減可能である。さらには、Fig. 2(b)の構成ならば予め超電導接続若しくはそれに近い短絡コイルを作製しておいて、それを収容するのみで巻線が完成する。

### 3. 電磁界解析による回転特性検証

5 kW 級 HTS-ISM (回転数: 316.8 rpm) を対象として、その回転特性を 2 次元電磁界解析 (JMAG-Designer<sup>®</sup>) によって検討した。なお、固定子や回転子コア形状、あるいは入力条件は下記 2 種類の巻線について同一である。紙面の制約にて詳細は講演当日に報告するが、従来型かご形巻線 (Fig. 2(a)) について解析したところ、トルク値は 140 Nm であった。一方で、新しいかご形巻線 (Fig. 2(b)) の場合には、Fig. 3 に示すように 150 Nm 程度のトルクが実現されている。即ち、新かご形巻線構造によって従来型巻線と同等以上の出力が期待される。

### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22H01471, 23K22742)の助成を受けた。電磁界解析の一部について、京都大学・垣下典永氏に協力頂いた。

### 参考文献

1. T. Nakamura and Y. Ogama: J. Appl. Phys., vol. 136 (2024) 093903
2. (株)西島製作所ニュース: <https://www.torishima.co.jp/2024/04/12/post-9450/> (2024 年 10 月 20 日閲覧)
3. コール アレクサンドル, 中村 武恒: 出願番号: 特願 2021-147281 (2021 年 9 月 10 日), 国際出願番号: PCT/JP2022/031131 (2022 年 08 月 17 日), 米国出願番号: 18/689,159 (2024 年 03 月 05 日)

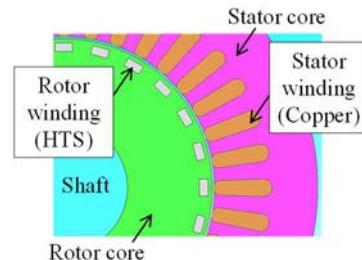


Fig. 1 Cross-sectional view of an HTS-ISM.

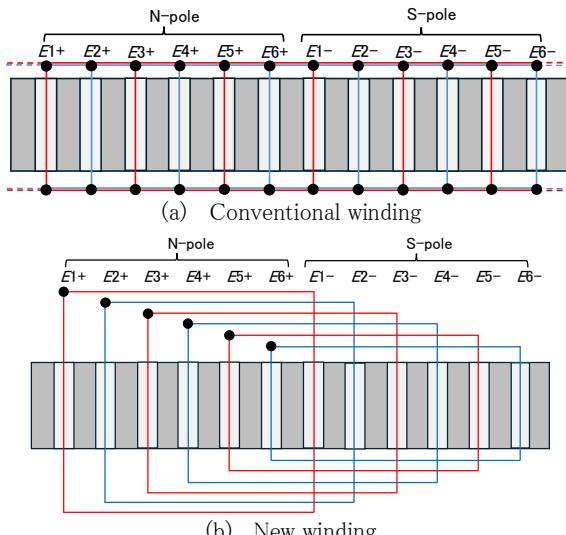


Fig. 2 Schematic diagram of squirrel-cage rotor windings ( $E$ : Motional electromotive force generated by a rotating magnetic field, ●: Soldering point).

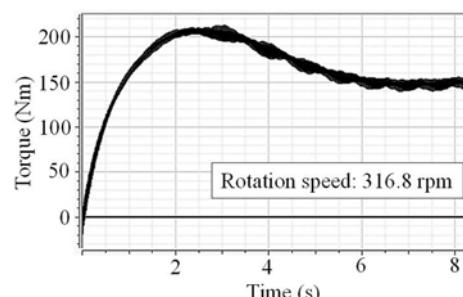


Fig. 3 Analysis result of a 5 kW-class HTS-ISM with a new squirrel-cage rotor winding (Fig. 2(b)).

# 機械的測定法を用いた回転磁界下における $MgB_2$ コイルの交流損失測定

## AC loss measurement of $MgB_2$ coil under rotating magnetic field using mechanical measurement method

奥村 露月, 大久保 洗希, 寺尾 悠, 淀野 修一郎, 大崎 博之(東大)  
OKUMURA Satsuki, OKUBO Koki, TERAO Yutaka, FUCHINO Shuichiro, OHSAKI Hiroyuki (UT)  
E-mail: satsuki-okumura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

高出力密度, 高効率の超電導回転機の産業応用が期待されている。超電導回転機には全超電導回転機と界磁超電導回転機がある。我々は電機子巻線と界磁巻線両方に超電導体を使用する全超電導回転機に注目している<sup>[1]</sup>。全超電導回転機の実現に向け、回転磁界下における電機子巻線の交流損失を把握することは大変重要である。我々は電機子巻線として用いる  $MgB_2$  コイルを対象として回転磁界を印加した環境下での交流損失測定システムを構築した。モータ回転子を模擬したハルバッハ配列の永久磁石を回転させることにより、 $MgB_2$  コイルに回転磁界を印加し、回転系に接続したトルクメータにより測定系のエネルギー収支を交流損失として評価する。本研究では  $MgB_2$  コイルの交流損失を測定し、考察した結果を報告する。

### 2. 実験方法

機械的測定法を使用して  $MgB_2$  コイルの交流損失を測定した。交流損失測定装置を Fig. 1 に示し、 $MgB_2$  コイルの詳細を Table 1 に示す。また、Fig. 2 に交流損失測定装置のエネルギー収支を示す。機械入力  $P_{in}$  により永久磁石ロータが回転すると、永久磁石ロータ機械損失  $W_m$ 、ボビンを含むクライオスタット内外の金属部分の損失  $W_c$ 、 $MgB_2$  コイルの交流損失  $W_{loss}$  が発生する。したがって、 $MgB_2$  コイルの交流損失は以下の式で求めることができる。

$$W_{loss} = P_{in\ u1} - P_{in\ u2} \quad (1)$$

$$= (W_m + W_c + W_{loss}) - (W_m - W_c)$$

なお、 $P_{in\ u1}$  はコイル有の場合の機械入力、 $P_{in\ u2}$  はコイル無の場合の機械入力である。また、温度センサを Fig. 2 に示した 2 か所に取り付けた。A はコイルストレート部であり、B はコイルエンドである。75 Hz から 100 Hz まで周波数を変化させて測定した。

### 3. 結果と考察

Fig. 3 に交流損失測定結果を示す。実験結果より、回転磁界が印加されると損失が発生していることが分かる。周波数依存性を評価するためにはより高精度な測定法が必要である。また、Fig. 4 に 20 K 付近の温度勾配の傾きを示す。A の温度勾配は B の温度勾配より大きい。周波数增加に伴い A の温度勾配も増加する。A での磁場振幅が大きいため、損失が発生し、発熱していると考えられる。B では磁場振幅が小さいため A 付近の発熱が伝搬していると考えられる。ボビンのみの場合と比較してコイル有の場合には温度勾配が大きい。これはコイルによる発熱があることを示し、損失が発生していることを裏付ける。

### 4. まとめと今後の展望

$MgB_2$  コイルの交流損失測定を行った。特に温度変化に注目し、評価を行った。 $MgB_2$  の交流損失は非常に小さいため、永久磁石ロータの機械損やボビンを含むクライオスタット内外の金属部分の損失を低減し、高精度な測定を目指す。

### 参考文献

- [1] Y. Terao, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no. 5, Aug. 2023.

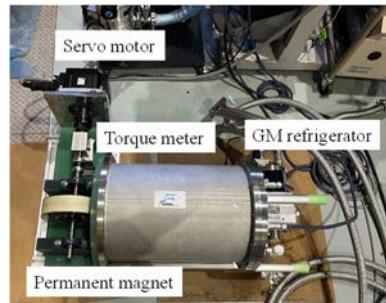


Fig. 1 AC loss measurement equipment based on mechanical input

Table 1 Specification of  $MgB_2$  wire and coil

Parts	Scale
Num. of filaments	36
Filament diameter	63 $\mu$ m
Wire diameter	0.84 mm
Packing factor	0.19
Twist Pitch	100 mm



Fig. 2 Bobbin and temperature sensor location

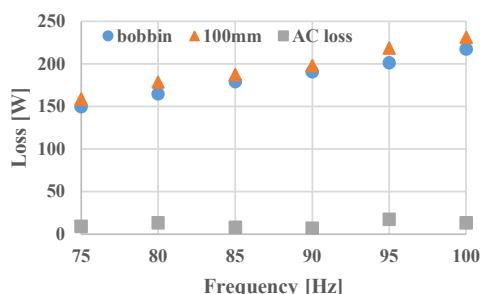


Fig. 3 AC loss measurement results

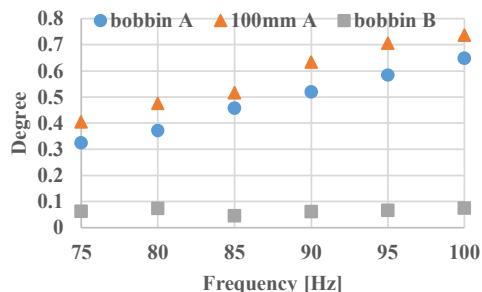


Fig. 4 Temperature gradient around 20K

## 空芯型 REBCO 誘導電動機に用いる回転子のトルク特性評価

### Evaluation of Torque Properties of Air-Cored Rotor in REBCO Induction Motor

安藤 総一郎, 中川 心平, 吉田 尚貴, 川越 明史(鹿大); 宮崎 寛史, 三浦 峻, 岩熊 成卓 (九大);  
 ANDO Soichiro, NAKAGAWA Shinpei, YOSHIDA Masataka, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ);  
 MIYAZAKI Hiroshi, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ)

E-mail: k8183271@kadai.jp

#### 1. はじめに

電動航空機を実現するために、推進システムの軽量化が必要である。そこで我々は、空芯型の全超伝導誘導電動機の研究開発を行っている。空芯型の誘導電動機の最適設計を行うために、空芯型の超伝導回転子に流れる誘導電流を計算できる特性評価手法の確立を目指している。そのためにまず、超伝導線で構成された空芯型の回転子の電磁特性を実験的に測定するシステムの開発を行っている。これまでに、回転磁界中の回転子に流れる誘導電流と平均のトルクを求める方法として、ピックアップコイルを用いる手法の実験的な検討結果を報告してきた[1,2]。本発表では、平均のトルクだけではなく、外部回転磁界ベクトルと回転子の磁気モーメントベクトルの外積によって瞬時トルクを算出した結果を報告する。また、有限要素法による数値解析によって、本測定方法の有効性を検証した結果まで報告する。

#### 2. 原理

誘導電動機のトルクは、回転子が回転中に経験する回転磁界によって発生する。したがって、回転子の誘導電流や損失・トルクの特性を調べるには、回転子を固定した状態で回転磁界を印加する実験で十分である。

トルクの瞬時値を得る方法を説明する。Fig.1 に回転子と印加磁界を示している。次式のように、トルク  $T$  は磁気モーメントベクトル  $m$  と印加磁束密度ベクトル  $B$  の外積で与えられる。

$$T = m \times B \quad (4)$$

回転子軸方向に十分に長い場合、中央付近は長手方向に均一なので、 $x$  方向と  $y$  方向成分を用いて、(4)式は次式で近似できる。

$$T = m_x B_y - m_y B_x \quad (5)$$

トルクの向きは、 $xy$  平面を  $z$  方向から見て反時計回りである。得られた磁気モーメントから、トルクの瞬時値を得ることができることがわかる。

#### 3. 実験

実験で用いた回転子は、6 本のローターバーから構成されたカゴ型回転子である。ローターバー 1 本は、液体窒素中の臨界電流が 110A の YBCO 線材を用いている。エンドリングは、同じ線材を使って 3 ターンのソレノイドコイルで構成し、ローターバーとはんだ付けした。この構造の回転子には、三相分の閉回路が構成される。すなわち、回転磁界中では三相電流が流れる。印加磁界周波数を 0.005~10Hz まで変化させた。また、回転磁界の大きさは 0.5mT と 1mT とし、誘導電流が臨界電流未満になる条件とした。

0.5mT, 0.5Hz の回転磁界を印加したときのトルクの測定値を Fig. 2 に○で示す。このグラフから、トルクの瞬時値は脈動しており、トルクリップルが発生していることがわかった。これは、回転子の各相の接続抵抗が  $R_u=0.3 \mu\Omega$ ,  $R_v=0.22 \mu\Omega$ ,  $R_w=0.22 \mu\Omega$  と不均一となっていたため、誘導電流が対称三相電流にならなかったことが原因と考えられる。

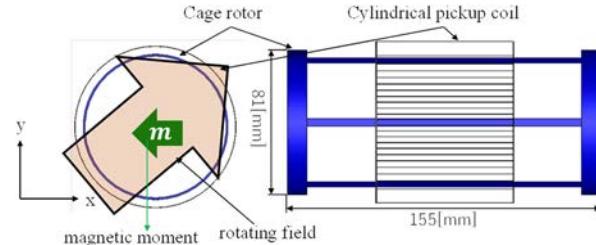


Fig.1 Set up pick-up coil with round cross-section and the squirrel cage type rotor sample. Three pick-up coils were mounted to measure magnetic moments .

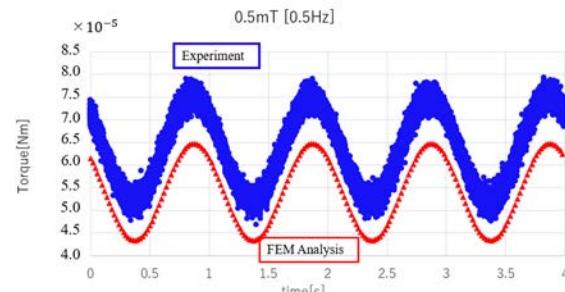


Fig. 2 Instantaneous torque obtained from experimental and analytical results

#### 4. 有限要素法解析

有限要素法数値解析ソフト JMAG を用いて、実験と同様の条件で三次元解析を行なった。三相分のローターバーの接続抵抗を実験と同様に不均一にした。解析結果から求めたトルクを Fig. 2 に△で示す。実験と同様のリップルが発生していることがわかる。平均のトルクには約 17% の誤差があるものの、実験結果が妥当な結果であることが示された。平均値の誤差の理由としては、解析モデルのエンドリングが実験とは異なることが原因だと考えられる。

#### 5.まとめ

本研究では、ピックアップコイルを用いて測定した磁気モーメントと磁束密度の外積によって瞬時値トルクを求める方法について検討を行った。また有限要素法解析によって求めた二次側の損失から求めたトルクと比較を行い外積計算によりトルクを求める手法の有効性を示した。

#### 参考文献

- [1] A. Kawagoe, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 34, no. 5, Aug. 2024, Art. Num. 5203205
- [2] S. Nakagawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.11

#### 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。

# 高温超電導集合導体の低周波交流誘導通電試験に関する基礎検討

## Basic study on low-frequency AC inductive transport current tests of high-temperature superconducting assemble conductors

大屋 正義, 中西 啓太, 嶋田 健, 大淵 匠真(関学); 今川 信作(NIFS)

OHYA Masayoshi, NAKANISHI Keita, SHIMADA Ken, OBUCHI Takuma (Kwansei Univ.); IMAGAWA Shinsaku(NIFS)

E-mail: Masayoshi-Ohya@kwansei.ac.jp

### 1. はじめに

低温超電導大電流導体の通電試験方法として、導体の両端を短絡して低インダクタンスの二次コイルとし、磁気的に結合した高インダクタンスの一次コイルをスイープ励磁して、二次コイルに大電流を誘導する方式[1]が用いられる。開発中の液体水素冷却高温超電導発電機の界磁コイル向け集合導体の通電試験にも同様の手法を用いることを想定しているが、ロゴスキーコイルを用いた誘導電流の測定精度、集合導体の極低抵抗接続技術、誘導電流のゼロリセット手法等が課題である。本報では、一次コイルに交流通電を行う新たな誘導通電方式について基礎検討を行った結果について報告する。

### 2. サンプル諸元

図1に示すように、高温超電導線材1本で1ターンの短絡二次コイルを製作し、一次コイルであるREBCOフィールドコイル[2]の中心に設置した。

二次コイルの内径は144 mmであり、表1に示す2種類の線材を用いてそれぞれ製作した。なお、BSCCOコイルの接続箇所は1か所、REBCOコイルの接続箇所は2か所である。

REBCOフィールドコイルを構成する4個のダブルパンケーキコイルの内径は130 mm、外径は206 mm、ターン数は約444であり、SUS製のコイルケース内に挿入されている。中心空間24 mmを空けてフィールドコイルを組み立て、その空間に二次コイルを配置した。有限要素法により計算した一次コイルと二次コイルのインダクタンスは表2に示すとおりであり、理想的な変流比は479である。二次側コイルには、図1に示すように、誘導電流測定用のロゴスキーコイルと校正用の電流リードを取り付け、誘導通電試験前に校正を行った。

### 3. 誘導通電試験結果

液体窒素冷却下で実施した誘導通電試験結果の一例を図2に示す。線材はREBCO、一次電流の周波数は0.5 Hzである。

一次電流が0.31 Arms以上で一次電流とロゴスキーコイル電圧の位相差が急減した。0.39 Arms以上で二次電流が飽和し、それ以上の領域では二次電流は僅かに減少した。一次電流が0.31 Armsのときの二次電流は156 Armsであり、ピーク値に換算すると221 Aである。本値はREBCO線材のI<sub>c</sub>値である224 Aとほぼ一致した。

試験後に二次コイルを解体して測定した短絡接続抵抗値は35 nΩであり、本抵抗によって発生する位相差を計算すると1.6°である。次に、Norrisのストリップモデルを用いてREBCO線材に発生する交流損失を算出し、上記短絡接続抵抗も含めて二次電流と位相差を計算した結果を図2に実線で示す。二次電流のピーク値がI<sub>c</sub>を超えない領域では交流損失により試験結果を説明できる。

さらに、一次電流が0.33 Arms以上の領域において、n値モデルを用いて過渡回路解析を行った結果を図2に破線で示す(短絡接続抵抗は考慮したが、交流損失は考慮していない)。一次電流が0.45 Armsまでは、二次電流と位相差ともに実測値と計算値はよく一致した。それ以上の領域においては乖離が徐々に大きくなり、線材の温度が上昇してI<sub>c</sub>が低下していることを示唆している。

### 4. まとめ

一次コイルに交流通電を行う新たな誘導通電方式の基礎検討として、超電導線材1本の1ターン短絡コイルの誘導通電試験を実施した。周波数が1 Hz以下では、二次電流のピーク値が線材のI<sub>c</sub>を超えると、ロゴスキーコイルの電圧位相差が急激に減少する現象が確認され、二次コイルのI<sub>c</sub>を判定できる可能性を示した。ロックインアンプを用いてロゴスキーコイル電圧を測定するため、ノイズやドリフトに対して強く、精度の高い測定が可能である。

Table 1 Specifications of HTS wires

Layer	BSCCO	REBCO
Width (mm)	4.5	4.0
Thickness (mm)	0.34	0.07
I <sub>c</sub> @77 K, s.f. (A)	197	224
n value	9	20

Table 2 Calculated self and mutual inductance

Parameters	Inductance (H)
L <sub>1</sub>	4.122×10 <sup>-1</sup>
L <sub>2</sub>	3.924×10 <sup>-7</sup>
M	1.878×10 <sup>-4</sup>

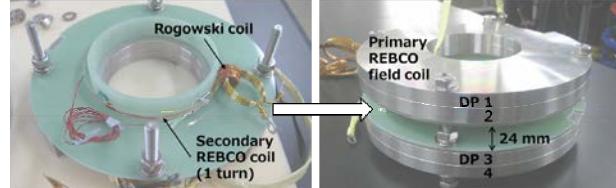


Fig.1 Photograph of test sample (REBCO)

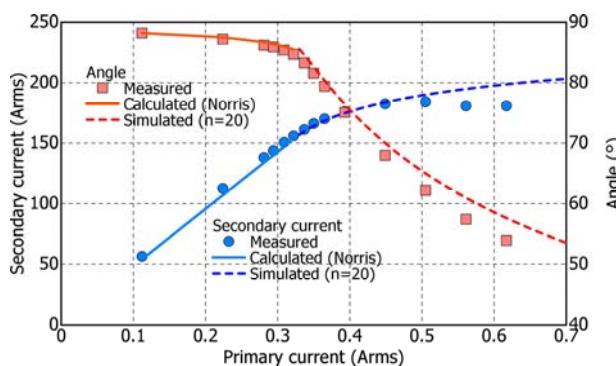


Fig.2 Inductive transport current test result (REBCO, 0.5 Hz)

### 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(JPNP20004)の結果得られたものです。また、本研究の一部は核融合科学研究所(NIFS)の一般共同研究(NIFS23KIIA009)のサポートを受けたものです。

### 参考文献

1. G. B. J. Mulder et al.: Proc. MT-11 (1990) pp. 479-484
2. M. Ohya et al.: J. Phys: Conf. Ser., vol. 2776 (2024) 012010

# 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 2 -平行磁界と垂直磁界が混在する条件での検証-

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: Part2  
-Verification under Conditions of Mixed Parallel and Perpendicular Magnetic Fields-

吉田 尚貴, 安藤 総一郎, 中川 心平, 川越 明史(鹿大); 宮崎 寛史, 三浦 峻, 岩熊 成卓 (九大)  
YOSHIDA Masataka, ANDO Soichiro, NAKAGAWA Shinpei, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ);  
MIYAZAKI Hiroshi, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ)  
E-mail: k0534132@kadaid.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束ねて並列導体とし、転位を施した導体が検討されている[1]。この導体では、製作性向上と特性劣化のリスク低減のために、転位回数をできるだけ低減することが望ましい。従来の研究では、並列導体の電流分布に影響を与えるものとして、テープ面に平行な磁界のみが考慮されてきた。しかしながら、実際のテープ線材にはテープに垂直な磁界も印加され、この垂直磁界が電流分布に影響を及ぼす。これまで、テープ面に垂直な磁界が並列導体を均流化させることを明らかにした[2]。今回は、平行磁界と垂直磁界が混在する条件下での電流分布について、実験的検証を行った結果を報告する。

## 2. 原理

Fig.1(a)は、テープ面に垂直な磁界中にある 2 本並列導体のテープ線断面図を示している。(b)、(c)はそれぞれ、テープ線内の磁束密度分布図を示し、(b)は輸送電流なし、(c)は電流が流れ、偏流している状態を示す。磁束密度の折れ曲がり点を長手方向に結んだ線は電気的中性線と呼ばれ、電界が零の線となる。このため、電気的中性線で構成された閉ループに鎖交する磁束は、次式を満たす。

$$\frac{d}{dt}(\Phi_{e\perp} + \Phi_{e\parallel} + \Phi_s) = 0 \quad (1)$$

ここで  $\Phi_{e\perp}$ 、 $\Phi_{e\parallel}$  は外部磁界による磁束で、それぞれテープ面に垂直な成分と平行な成分である。 $\Phi_s$  はテープに流れる輸送電流による成分である。(b)の輸送電流のない状態では、垂直方向の磁界は、閉ループに鎖交しない。すなわち、外部磁界はテープ面に平行な成分のみが鎖交する。一方で偏流が起きている場合は、電気的中性線の位置が片方だけずれる。それによって垂直方向の磁界も鎖交する。外部磁界が閉ループに鎖交しても(1)を満たすために、 $\Phi_s$  が変化する。すなわち電流分布が変化する。全く転位が無いと、 $\Phi_{e\parallel}$  が非常に大きくなり、大きな偏流が生じる。 $\Phi_{e\parallel}$  をある程度小さくできれば、 $\Phi_{e\perp}$  が電流分布に影響を及ぼす。このとき、電気的中性線が揃うように電流分布が変化し、均流化する。

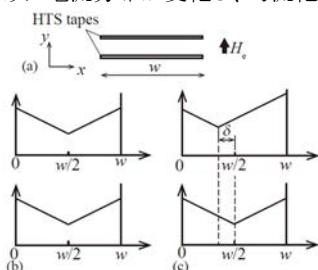


Fig. 1 Two tapes parallel conductor and its cross-section, and the magnetic flux density distributions and the electrical neutral line in each tape in the parallel conductors composed of two tapes.

## 3. 実験

前節で説明した垂直磁界による均流化効果を実験的に検証した。サンプルコイルは、Bi-2223 テープ 3 本からなる並列導体で作製したレーストラック状ダブルパンケーキコイルである。線材の臨界電流は、液体窒素中、自己磁界中で 180A である。パンケーキコイル上下段ともに 10 ターン(合計 20 ターン)のコイルである。転位は 1 回のみとし、通電のみでは偏流が残るようにした。各テープに流れる電流をロゴスキーコイルによって測定した。サンプルに交流通電と外部交流磁界を同時に印加して実験を行った。サンプルの電流振幅は 90A、外部磁界振幅は 50mT と 100mT とし、周波数は 10Hz とした。垂直磁界と平行磁界の混在する回転磁界中で測定した。

実験結果を Fig.2 に示す。測定用に引き回したテープ線間に平行な磁界が鎖交していたため、測定結果の電流分布には乱れが生じていた。そのため、平行磁界による遮蔽電流の影響は補正した。通電のみでは不十分な転位により、不均一な電流分布観測された。印加磁界を大きくすると電流分布が均一になる傾向が観測された。このことから、回転磁界中であっても、テープに垂直な成分によって、並列導体の電流分布が均流化する効果があることが実験的に示された。

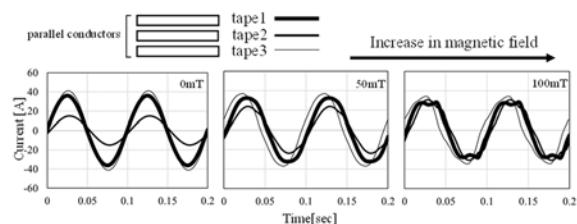


Fig. 2 Measured current distribution between three tapes

## 4. まとめ

今回は垂直磁界が転位並列導体の電流分布に与える影響について回転磁界中の実験によって調べた。これまで、垂直磁界のみの条件下で均流化することを明らかにしていたが、垂直磁界成分によって、回転磁界中でも電流分布が均流化するということが明らかになった。このことから、実用条件下での転位並列導体の転位回数を大幅に低減できる可能性が示された。

## 参考文献

1. A.Kobun, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p.62
2. M. Yoshida, et al.: Abstract of CSSF Conference, Vol. 107 (2024) p. 58

## 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。

## ステップを有する超電導線材の接合における有限要素法を用いた通電特性の評価

Evaluation of current carrying characteristics in superconducting wire joints with steps using finite element method

今泉 圭佑, 張 宇威, 小田部 莊司 (九工大情報工); 赤坂 友幸, 富田 優 (鉄道総研)  
 K. Imaizumi, E. S. Otake, Y. Zhang (Kyushu Inst. of Tech.) ; T. Akasaka, M. Tomita (RTRI)

E-mail: [imaizumi.keisuke110@mail.kyutech.jp](mailto:imaizumi.keisuke110@mail.kyutech.jp)

### 1. はじめに

ビスマス系超電導体は1988年に日本の研究グループによって発見された超電導材料である。その中でも特に  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$  (Bi-2223) は110 K という高い転移温度や希土類元素を全く含まない等の理由からより低コストでの利用可能な超電導材料であるとして注目された。そして Bi-2223 の線材は、電力輸送ケーブルや変圧器、高磁場マグネットなど幅広い分野での応用が期待され、長さ1000 mにわたる超電導線材も開発されている[1]。しかし、電流特性などの性能が RE 系線材に及ばないことや競合メーカーが RE 系を主軸にしていることを理由に、製造中止が発表されている[2]。ここでは Bi-2223 は低磁界応用の輸送ケーブルなどの用途によっては利用される可能性が残っていることから検討を続けている。

本研究では、超電導線材を電力輸送ケーブルとして長距離での送電に対応させるに必要となる超電導線材の接合部における通電特性を明らかにするため、有限要素法(FEM)を用いた計算をおこなった。そして、その計算結果をもとに線材同士の接合部分の臨界電流の変化について評価した。

### 2. 解析方法

本研究では JSOL 社の JMAG を使用して超電導線材の通電特性の計算をおこなった。作製したモデルは幅4.0 mm、厚さ0.3 mmの超電導線材を想定したものである。モデルは Fig. 1 のように、2 枚の超電導線材に高低差を与えて 2 つの一端を接合した。また、接合の長さは10 mmとし、超電導線材の段差(ステップ)は0 mmから20 mmの範囲で変化させた。

以上のような条件をもとに有限要素法を用いて超電導線材の電流-電界特性を計算した。そして、それらの計算結果に基づいて超電導線材のステップと接合が臨界電流に対して及ぼす影響について明らかにした。

### 3. 結果および考察

JMAG を用いて線材を流れる電流に対する電界の様子を解析すると、Fig. 3 のような結果が得られた。

考察にあたって、電界と臨界電流をそれぞれ、電圧を電極間の距離で割った値、電界が  $1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$  のときの電流の大きさと定義した。それらの定義に基づき各モデルの臨界電流を求めるとき、どれも271 Aから274 Aの幅に収まつた。

Fig. 2(a)よりステップの大きさが大きくなるに従って臨界電流の値が下がる傾向にあることがわかる。また、ステップが 20 mm のモデルに限り、他のケースよりも臨界電流の値が大きくなつたことも見て取れる。そして、同様の条件による実験値 (Fig. 2(b)) と Fig. 2(a)を比較すると、値に40 Aの差が見られた。しかし、どちらもステップの差による臨界電流の変化はどれも小さな変化であり、その違いが実用化に際して大きな問題となるとはならないと結論付けた。

以上のことから超電導線材のステップが臨界電流に対して及ぼす影響は極めて小さいものであることがわかった。この理由は自己磁場の影響が接合に与える影響が小さいからであると考えられる。

また、同様の条件で接合した RE 系の超電導線材の計算結果については当日の講演で述べる。

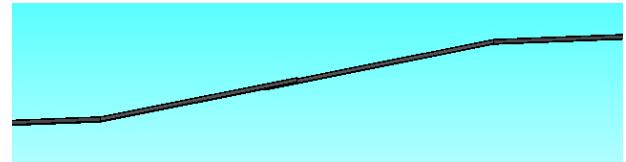
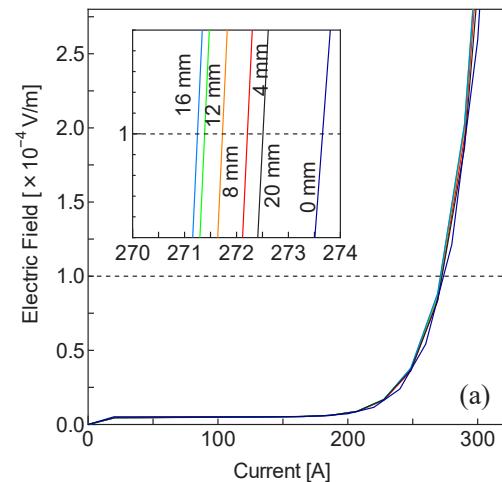
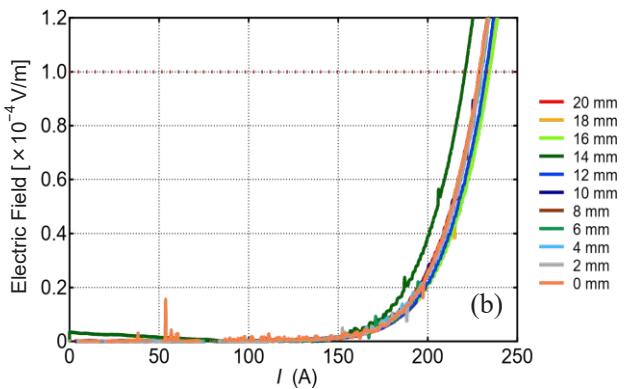


Fig. 1: Superconducting wire with a step at the junctions



(a)



(b)

Fig. 2: I-V characteristics of model with steps.

(a) Analysis value using a computerized wire model.

(b) Experimental values using actual wire (Fig. 11 in Ref. [3]).

### 参考文献

1. Jun-ichi Shimoyama, Abstracts of JSAP Conference, 65 (2023) 1B-a05
2. 住友電工、超電導の研究見直し「独自路線」を修正 – 日本経済新聞. 2024-09-25, 日本経済新聞 電子版, <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF19AZI0Z10C24A8000000/>, (参照 2024-10-22)
3. T. Akasaka et al.: IEEE Trans. Appl. Supercon. 33 (2023) 4800305.

# マイスナー状態にある超伝導薄膜の縦磁場中臨界電流 IV

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

(M2) 毛利 誠一, 小田部 莊司 (九工大情報工); 馬渡 康徳 (産総研)  
 S. Mori, E. S. Otake (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, 3]。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、Ginzburg-Landau (GL) 方程式に基づく数値計算により考察した[3]。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  $J_c$  に加えて、超伝導薄膜内部の磁場およびオーダーパラメータ分布について GL 方程式に基づく数値計算を行い、臨界電流近傍での超伝導薄膜の状態について考察した。

### 2. 一次元 Ginzburg-Landau モデル

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

超伝導薄膜内に量子化磁束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[4]。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

縦磁場中の厚膜( $d_s/\lambda = 5$ )において、通電電流が臨界電流に達したときの厚膜内部の磁場およびオーダーパラメータ分布を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a)は低磁場( $B_a/B_{sh} = 0.1$ )、Fig. 1(b)は高磁場( $B_a/B_{sh} = 0.9$ )の場合である。縦軸は磁場角度  $\theta$ 、過熱磁場  $B_{sh}$  で規格化した  $y$  方向と  $z$  方向の磁場とそれらの絶対値  $B_y, B_z, |\mathbf{B}|$ 、オーダーパラメータ(超伝導電子密度)  $f^2$ 、横軸は  $\lambda$  で規格化した超伝導薄膜の厚さ方向座標  $x/\lambda$  である。

縦磁場中の場合、 $y$  方向の磁場  $B_y$  は通電電流による自己磁場  $B_t$  に、 $z$  方向の磁場  $B_z$  は外部磁場  $B_a$  に主に対応する。

膜厚が厚い場合、超伝導薄膜の中心付近を除き、磁場の角度  $\theta = \text{ArcTan}(B_y/B_z)$  はほぼ一定である。磁場が低い場合、自己磁場により磁場方向が大きく揺られるため  $\theta$  は大きい。一方、高磁場のときは、磁場はほぼ外部磁場に平行であり、 $\theta$  は小さい。

厚膜  $d_s/\lambda = 5$  の場合、通電電流が臨界電流に達したとき、表面での磁場  $B_s$  ( $|\mathbf{B}|_{x=\pm d_s/2}$ ) が  $B_{sh}$  に達し、表面でオーダーパラメータ  $f^2 = 0$  になっている。

横磁場中の磁場およびオーダーパラメータ分布との比較は講演で述べる。

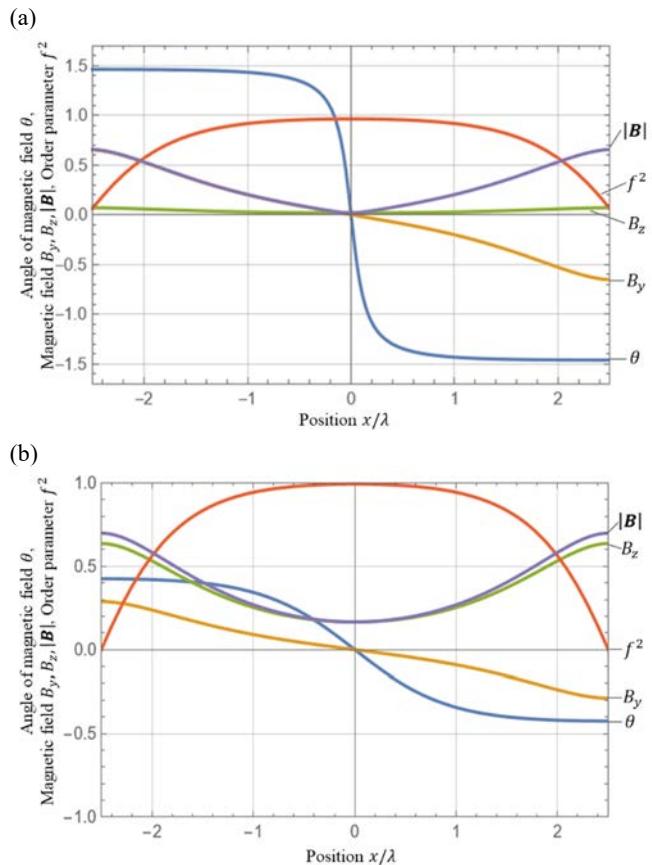


Fig. 1: Magnetic field distributions  $B_y, B_z, |\mathbf{B}|$ , and order parameter  $f^2$  in a superconducting film of  $d_s/\lambda = 5$  exposed to the longitudinal magnetic field at critical current: (a) low magnetic field ( $B_a/B_{sh} = 0.1, J_c/J_{c0} = 0.995$ ) and (b) high magnetic field ( $B_a/B_{sh} = 0.9, J_c/J_{c0} = 0.438$ ).

### 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 方程式による数値計算を行い、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。加えて、超伝導薄膜内部の磁場およびオーダーパラメータ分布についても考察した。

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, 小田部莊司, 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] 毛利誠一, 小田部莊司, 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, 2C-a06 (2024).
- [4] P. G. de Gennes, Solid Stat. Commun. 3, 127 (1965).

# 磁束クリープ・フローモデルを用いた RE 系コート線材の縦磁界下の臨界電流特性の評価

## Evaluation of the Critical Current Characteristics of RE-based Coated Conductors under Longitudinal Magnetic Fields Using the Flux Creep-Flow Model

洗 明鋭, 木内 勝 (九工大)  
 XIAN Mingrui, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.)  
 E-mail: xian.mingrui706@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

現在精力的に開発されている RE 系コート線材において、電流  $I$  の通電方向と平行に外部磁界  $B$  を加える縦磁界下でも、横磁界と比べて臨界電流  $I_c$  が増加することが知られている[1]。ただし、電流と磁界が垂直になる横磁界で特性向上のために導入される人工ピンを導入しても、 $I_c$  が増加する場合もあれば、ほとんど変化しない場合もあり、どのようなピンが縦磁界で有効に作用するのがわからない。

そこで以前から我々のグループで使用している高温度領域での臨界電流特性を理論的に記述できる磁束クリープ・フローモデルに注目し、このモデルを用いて縦磁界下での臨界電流の特性の評価を試みた。本研究は、市販されている RE 系コート線材の縦磁界下での  $I_c$  を測定し、その結果を縦磁界下で特性を考慮した磁束クリープ・フローモデルを用いて解析を行い、どのように  $I_c$  特性が決定されているのかを調べた。

### 2. 実験

縦磁界下での  $I_c$  特性を評価するために市販されている 3 つの RE 系コート線材を用いた。線材の幅は  $w = 4$  mm で表面に Cu メッキが施されている。Table 1 に用いた線材の 77 K における  $I_c$  と超電導層の厚さ  $d$  を示す。

$I_c$  は直流四端子法を用いて電界  $E$ -電流  $I$  特性から電界基準  $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$  V/m を用いて求めた。磁界は、Bi-2223 超電導コイルを用いてテープ面に対して平行で、電流  $I$  通電方向と平行(縦磁界:  $B \parallel I$ )と垂直(横磁界:  $B \perp I$ )に加えた。今回の測定では最大で 0.30 T までの磁界を加えた。全ての測定は液体窒素下で行った。

### 3. 実験結果及び解析

Fig. 1 に 3 つの RE 系コート線材の縦軸を  $I_c/sf$  で規格化した  $I_c/I_{c,sf}$  の磁界依存性を示す。はじめに横磁界の  $I_c/I_{c,sf}$  に注目すると、#2、#3 は似たような磁界特性を示すが、#1 だけ磁界に対する依存性が大きい。一方で、縦磁界下での  $I_c/I_{c,sf}$  は、#1 と #2 が磁界の増加と共にわずかに減少する傾向を示すが、3 つの RE 系コート線材でほぼ同じ縦磁界依存性を示す。従って、作製方法などが異なるが、縦磁界下では横磁界下に比べて  $I_c$  の依存性の違いが小さい。この原因の一つに、低磁界側での大きな自己磁界の影響が考えられる。

ここでは横磁界下での臨界電流特性を記述できる磁束クリープ・フローモデルを用いて[2]、縦磁界下の  $I_c$  特性の解析を行った。磁束クリープ・フローモデルでは、重要なパラメータの一つである磁束クリープの影響がない理想的な臨界電流密度  $J_{c0}$  があるが、ここでは縦磁界下でのピーク特性を考慮して  $J_{c0\parallel}$  を

$$J_{c0\parallel} \propto A \left( 1 + \alpha B^{1/2} \right) (B + B_0)^{\gamma\parallel - 1} \quad (1)$$

と仮定した。ここで、 $A$ 、 $\gamma\parallel$ 、 $\alpha$ 、 $B_0$  はパラメータである。Fig. 1 に #3 に注目し、Table 2 に示すパラメータを用いた解析結果を実線で示す。測定領域で良い一致が得られた。

ここで、3 つの磁界依存性はほぼ同じであるが、 $I_c$  の大きさが異なることから、自己磁界が  $I_c$  特性を決定している可能性がある。そこで、 $B_0$  と  $\alpha$  に注目し、 $I_c$  の大きさに依存する  $A$  の最頻値である  $A_m$  との関係を調べた。Fig. 2 に  $B_0$ 、 $\alpha$  の  $A_m$

依存性を示す。解析結果から  $A_m$  の増加と共に  $B_0$  が緩やかに増加し、一方で、 $\alpha$  は緩やかに減少することがわかった。この結果から  $A_m$  の増加すなわち  $I_c$  の増加による自己磁界の増加は、縦磁界のピークの消滅の原因になる。このために  $I_c$  が高い RE 系コート線材では金属超電導体のようなピーク特性ではなく、似たよう特性になっているものと考えられる。他の線材との比較は当日で行う。

Table 1 Specification of RE-based coated conductors.

	Company	$I_c$ [A]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]
#1	SuperPower	120	1.0
#2	Fujikura	250	2.4
#3	Faraday Factory	160	2.5

Table 2 Used parameters for #3.

$A_m$	$\gamma\parallel$	$\alpha$	$B_0$
$2.6 \times 10^{11}$	0.49	1.7	0.20

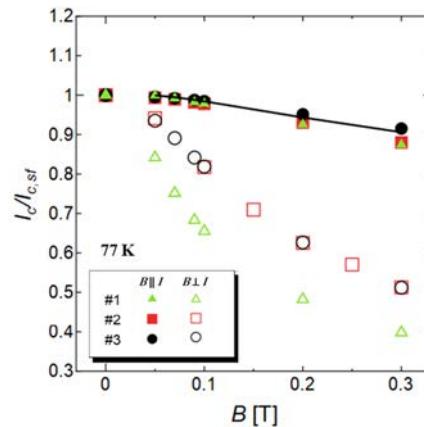


Fig.1 Magnetic field dependence of normalized critical current density.

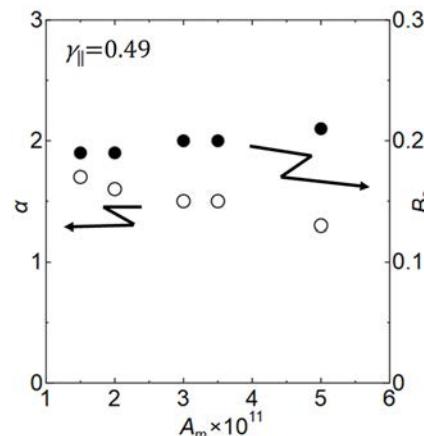


Fig.2 Relationship between  $A_m$  and  $\alpha$ ,  $A_m$  and  $B_0$ .

### 参考文献

1. A. Tsuruta, et al.: JJAP, Vol. 53 (2014), 078003
2. M. Kiuchi, et al., Physica C vol. 278, (1997) p. 62.

## 銀複合 Bi2223 厚膜の作製

### Fabrication of Bi2223/Ag Thick Films

大久保 龍一, 山口 章, 公平 龍之介, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大)

OKUBO Ryuichi, YAMAGUCHI Sho, KOHEI Ryunosuke, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail : c5624045@aoyama.jp

#### 1. はじめに

$(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$  [Bi2223]は高い臨界温度  $T_c \sim 110$  K を有し、容易に  $c$  軸配向組織を得られることから線材やバルクとして材料開発が行われる。なかでも銀シース多芯線材である DI-BSCCO® はこれまで送電ケーブル、超伝導磁石、電流リードなど様々な用途で実用されている。DI-BSCCO® はフィラメントの緻密化に有効な加圧焼成法で作製されているが、我々は大気圧下でも焼成条件によってはフィラメントが二次圧延後の緻密な組織を維持し、 $I_c$  も DI-BSCCO® の 90% 以上となることを報告してきた[1]。また、交流通電以外の多くの応用では多芯構造は不要である。Bi2223 厚膜を積層した構成で十分な可撓性と臨界電流特性を有する金属複合材料が大気圧下焼成で得られれば、工程が簡略化でき製造コストも低減する。我々は、高濃度 Pb 置換による異方性の低下や高圧プレス、還元ポストアニールによるカチオン組成制御の効果、酸素アニールによるキャリアのオーバードープ状態の実現が Bi2223 磁場配向バルクや Bi2223 多芯線材の臨界電流特性向上に有効であることを示してきたが、これらの指針は量産製品である DI-BSCCO® にはあまり生かされなかった。以上の背景のもと、本研究では積層厚膜型 Bi2223 線材開発を目的として、まず銀複合厚膜の作製に取り組んでいる。

#### 2. 実験方法

厚膜試料はスラリーを銀箔上に塗布し、幅  $\sim 1$  cm、長さ  $= 5$  cm に成形後仮焼、一軸プレス、一次焼成、中間一軸プレス、2 次焼成の工程で作製した。スラリーは Bi サイトに対して 17.1-27.5% の Pb を含む Bi2223 粉末と Bi2223 の仮焼粉末(前駆体粉末)を 2:8 の割合で混合し、エタノールとブタノールを加え調製したものである。作製した試料に対して XRD、SEM により構成相や微細組織を調べ、液体窒素浸漬下(77 K)で直流四端子法により臨界電流  $I_c$  を測定した。臨界電流密度  $J_c$  は測定した  $I_c$  に対して断面積を横 1 cm、縦膜厚の長さの長方形と仮定して算出している。また、仕込み金属組成を表すパラメータとして  $X$  と  $Y$  を  $X = Pb/(Bi+Pb)$ ,  $Y = (Sr+Ca+Cu)/(Bi+Pb)$  と定義した。

#### 3. 結果と考察

Fig. 1 に標準組成( $X = 0.171$ ,  $Y = 3.53$ )で作製した厚膜材料に対して  $830^\circ\text{C} - 48$  h,  $P_{O_2} = 8$  kPa の条件で 1 次焼成を行い、中間一軸プレス後、 $810^\circ\text{C} - 12$  h,  $P_{O_2} = 3$  kPa で 2 次焼成した試料と  $755^\circ\text{C} - 48$  h,  $P_{O_2} = 1$  kPa で還元ポストアニールを追加した試料の表面 XRD パターンを示す。どちらの試料でも Bi2223 が主相で生成し、Bi2212 に対する Bi2223 の相分率も 99% と高い値を示した。また、 $00l$  ピークの強度が大きいことから  $c$  軸配向していることも確認できた。しかし、2 次焼成後の試料では Pb を含む不純物のピークが見られたため還元ポストアニールを行った。還元ポストアニールにより Pb を含む不純物のピークは消えたことからカチオン組成制御の効果が厚膜材料でも確認された。Fig. 2 に 2 次焼成後と還元ポストアニールを追加で行った試料の 77 K における  $I-V$  特性を示す。2 次焼成後の試料は  $I_c \sim 33$  A を示し、還元ポストアニール後の試料は  $I_c \sim 40$  A 示した。これは高圧プレスにより高度に  $c$  軸配向した領域が大きいことや高い相分率を示したことが要因であると考えられる。また、還元ポストアニールによる  $I_c$  の向上がみら

れた。講演では複合材料の構成や作製条件の最適化を進めた結果について報告し、本方法による材料の可能性を議論する。

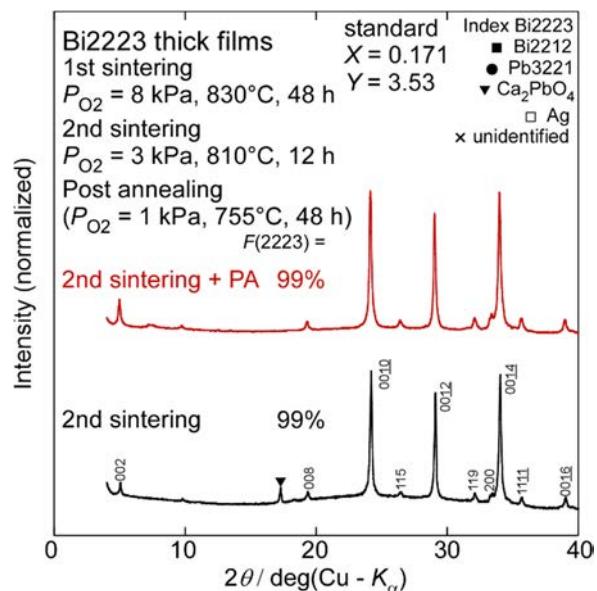


Fig. 1 Surface XRD patterns of Bi2223 thick films after post annealing

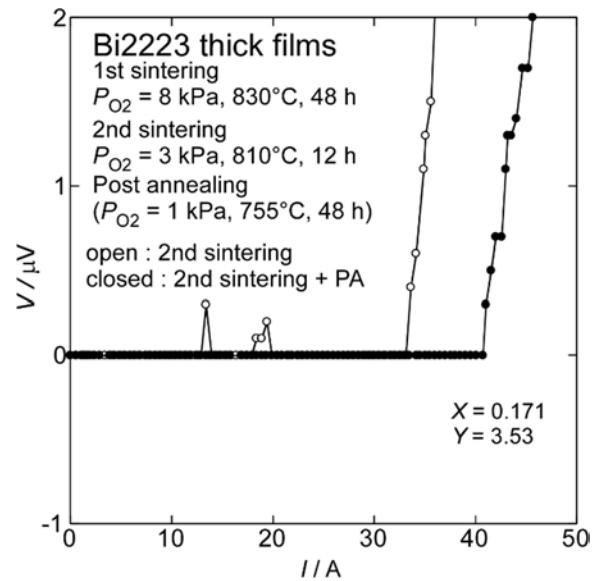


Fig. 2  $I-V$  curves of Bi2223 thick films measured at 77 K in self-field.

#### 参考文献

- [1] J. Shimoyama *et al.*, *Abstract of CSSJ Conference Vol.105* (2023) p.16.

## 伝導冷却下における極細 Nb<sub>3</sub>Sn および Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材の 臨界電流と交流通電損失特性

Critical current and AC transport current loss characteristics of ultrafine Nb<sub>3</sub>Sn and Nb<sub>3</sub>Al superconducting wires under conduction cooling

尾上 凜空, 錦織 敏志, 宇都宮 航生, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大); 菊池 章弘, 飯嶋 安男(NIMS);  
ONOUE Riku, NISHIKOHRI Satoshi, UTSUNOMIYA Kosei, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama Univ.);  
KIKUCHI Akihiro, IIJIMA Yasuo (NIMS)  
E-mail:kim@ec.okayama-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 加速器・核融合炉用高磁場超電導マグネットの開発が進められており, React & Wind (R&W) 法による超電導マグネット作製可能な A15 超電導線材の開発が強く求められている。そこで, 物質・材料研究機構(NIMS)は, Nb<sub>3</sub>Sn と Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材を極細化することで R&W 法で超電導マグネットが作製可能な線材の開発を行っている。現在までに, ブロンズ法で作製された Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線材[1]とジェリーロール法で作製された Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材[2],[3]の線径を 50  $\mu\text{m}$  以下に極細化することで柔軟性を有する線材開発に成功している。本研究では, 実用化に向けて新しく開発された線径 30~50  $\mu\text{m}$  の極細 Nb<sub>3</sub>Sn および Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材を用いて, 伝導冷却下における臨界電流特性および交流通電損失特性について実験的に評価したので, その結果について報告する。

### 2. 実験条件および方法

本実験では, 極細Nb<sub>3</sub>Sn(線径: 30  $\mu\text{m}$  と 50  $\mu\text{m}$ ) と Nb<sub>3</sub>Al(線径: 33  $\mu\text{m}$  と 50  $\mu\text{m}$ ) 超電導線材を試料線材として用いており, 線径 50  $\mu\text{m}$  の Nb<sub>3</sub>Sn および Nb<sub>3</sub>Al 線材の断面写真を Fig.1 に示す。Nb<sub>3</sub>Sn 線材の超電導領域はフィラメント形状であるが, Nb<sub>3</sub>Al 線材は円筒形である。これらの線材は線径が非常に細いことから, 伝導冷却下における臨界電流測定の際, 通電による発熱により断線するリスクが高い。そこで本研究では, 発熱を抑える方法として, パルス通電法と電流スイープ法を適切に組み合わせて臨界電流 ( $I_c$ ) 測定を行った。また, 試料線材の交流通電損失は, ロゴスキーコイルで電流位相を検出し, ロックインアンプを用いて測定した。

### 3. 結果および考察

Fig.2 に測定した4本の試料線材の臨界電流密度 ( $J_c$ ) の温度依存性を示す。各線材の超電導部が占める断面積の割合は, Nb<sub>3</sub>Sn 線材が 6.8%, Nb<sub>3</sub>Al 線材が 33% であり, Nb<sub>3</sub>Sn 線材の  $J_c$  が Nb<sub>3</sub>Al 線材よりも高くなっている。一方で, 工学的臨界電流密度 ( $J_c$ ) に関しては Nb<sub>3</sub>Al 線材の方が優れていることが示された。

線径の異なる Nb<sub>3</sub>Al 線材の交流通電損失の測定結果を Fig.3 に示す。ここで, 異なる臨界電流を持つ試料線材間の比較のために交流損失は  $I_c$  の 2 乗で割ってある。また,  $I_c$  は測定結果の近似式から求められた値を用いた。Nb<sub>3</sub>Al 線材の交流通電損失の線径依存性が殆どないことが確認され, Nb<sub>3</sub>Sn 線材においても同様の傾向が確認されている。一方, 測定値と理論値との差異が見られ, この温度での試料線材の  $n$  値は約 8.6 であり, この低い  $n$  値がビーンモデルに基づく理論値との差異の原因として考えられる。

同線径 (50  $\mu\text{m}$ ) の両線材の交流通電損失を比較した結果を Fig.4 に示す。同じ大きさの交流電流に対して Nb<sub>3</sub>Sn 線材の交流通電損失が Nb<sub>3</sub>Al 線材より大きくなっている。フィラメントが同心円状に配置された Nb<sub>3</sub>Sn 線材の場合, インダクタンスが小さい最外層のフィラメントに顕著な電流の偏りが生じたことが原因として考えられ, 詳しい原因については数値計算等を用いて検討する予定である。

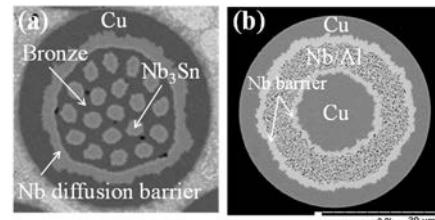


Fig.1 Cross-sectional view of the (a) 19-filaments Nb<sub>3</sub>Sn wire and (b) mono-block Nb<sub>3</sub>Al wire.

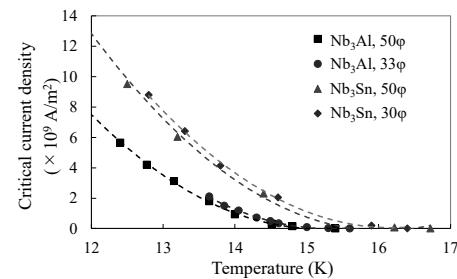


Fig.2 The measured critical current density of Nb<sub>3</sub>Al and Nb<sub>3</sub>Sn wires.

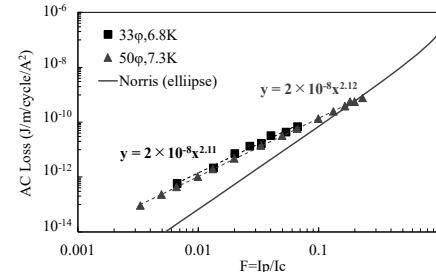


Fig.3 The measured AC transport current losses of Nb<sub>3</sub>Al wires with different wire diameters at 400 Hz.

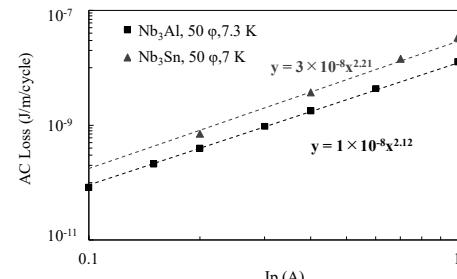


Fig.4 Comparison of AC transport current losses between Nb<sub>3</sub>Al and Nb<sub>3</sub>Sn wires with the same wire diameter (50  $\mu\text{m}$ ).

### 参考文献

- [1] A. Kikuchi, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, no.4, 6000104. Jun.2022.
- [2] A. Kikuchi, et. al., IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng. 756 art no.012016, 2020.
- [3] A. Kikuchi, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.31, no.6000105, Aug. 2021.

## REBCO coated conductor の超伝導層の破壊を考慮した 臨界電流のひずみ依存性モデル

Model for the strain dependence of the critical current in REBCO coated conductors  
considering the superconducting layer fracture

青木 康佑, 小黒 英俊, 久保田 猛, 小倉 健太, 松下 玄(東海大)

AOKI Kosuke, OGURO Hidetoshi, KUBOTA Takeru, OGURA Kenta, MATSUSHITA Gen (Tokai Univ.)

E-mail: h-oguro@tokai.ac.jp

### 1. はじめに

現在、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub> (REBCO, RE は Y または希土類元素) coated conductor のコイル化応用が、強磁場マグネットのみならず、核融合など様々な分野で進んでいる。これは、REBCO の非常に高い超伝導特性に加え、その基板として使われているハステロイの、非常に高い機械強度によって、巨大な電磁力にも耐えうる能力を持つためである。

ところで、REBCO coated conductor の機械特性に関する文献は多く、特に引張りに関しては、実験的に多くのデータが報告され[1]、これらをモデルでまとめたものも既に報告されている[2]。特にモデルによる説明によって、弾性領域における超伝導特性の変化は、非常によく理解ができたといえる。ところが、塑性領域を表した文献はまだ少ない[3]。塑性領域は、セラミック材料である REBCO にとっては破壊する領域となるが、これがモデル化されることで、応用面では破壊しない限界ひずみ/応力の予測につながり、基礎的な面では、何が原因で破壊が起こるのか、の予測につながるため、さらに機械的に強い線材開発の指針を示すことができる。

そこで、我々のグループでは、これまでに研究室で測定した REBCO coated conductor の測定結果に基づき、破壊を考慮した解析モデルを構築した。弾性領域には参考文献[2]を用いてべき乗則を、塑性領域の表現にはワイルブル関数を用いた。このモデルを用いて、破壊に関する要因に関して考察した。

### 2. 解析モデル

REBCO coated conductor の臨界電流  $I_c$  の引張りひずみ  $\varepsilon$  依存性を、破壊領域まで表すことを目的として数式モデルを構築した。弾性領域の表現には文献[2]の通り、べき乗則を用いた。非弾性領域に関して、セラミックの破壊確率を表す関数として、ワイルブル関数が用いられている[4]。そのため、破壊を表す関数としてワイルブル関数を用い、以下の関数を作成した。

$$\frac{I_c}{I_{c0}} = 1 - a\varepsilon^2, (0 \leq \varepsilon < \varepsilon_i)$$

$$\frac{I_c}{I_{c0}} = (1 - a\varepsilon^2) \exp \left\{ - \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{b} \right)^m \right\}, (\varepsilon_i \leq \varepsilon)$$

ここで、 $I_{c0}$  はひずみゼロの時の  $I_c$ 、 $a$  は弾性領域におけるひずみ感受性を表すフィッティングパラメータ、 $b$  は破壊に影響を与えるフィッティングパラメータである。式を場合分けしているのは、 $\varepsilon_i$  より小さいひずみでは破壊が起こらない、と仮定しているためである。文献[3]では  $\varepsilon_i$  を不可逆ひずみとしている。

$m$  はワイルブル関数の形状を表す値であり、破壊確率を表す

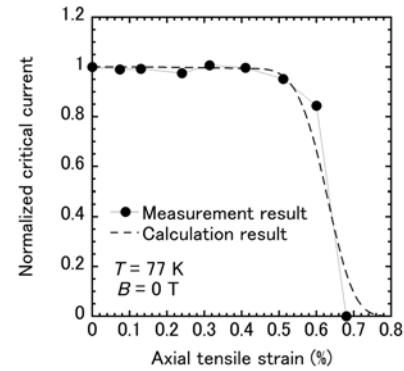


Fig. 1 Normalized critical current as a function of axial applied strain for REBCO coated conductor at 77 K. The points are the measurement results. The dotted line is the calculation result.

場合は  $m > 2$  となる。この  $m$  値は、式の両辺に対して 2 回対数をとった式の傾きから求められる。そこで、フジクラ社製 FYSC-SCH04 に対して、これまでに研究室で測定した  $I_c$  のひずみ依存性の結果、および、論文[5]などの結果から、 $I_c$  が大きく劣化する直前のひずみを  $\varepsilon_i$  とし、この値が小さい順に破壊確率を表 1 のように与え、 $m$  値の導出を行った。その結果、 $m=4.16$  と導出されたため、この値を用いて  $I_c$  のひずみ依存性を考えた。

### 3. 解析結果

過去に研究室で測定した結果と、その結果を用いた計算結果を図 1 に示した。計算では、 $\varepsilon_i = 0.41$  を使用しており、フィッティングパラメータは  $a = 0.0357$ 、 $b = 0.237$  となった。計算結果は実験結果をそれなりに再現しているが、測定数を増やしていくことで  $m$  値がより正確になり、大きく劣化する領域を正確に表せるようになっていくものと考えられる。

ここで、破壊に関する要因として、ヤング率  $E$  がどれだけ関係するか考えてみる。ひずみ  $\varepsilon$  と応力  $\sigma$  はフックの法則で交換可能であり、

$$\frac{I_c}{I_{c0}} = \left( 1 - a \frac{\sigma^2}{E} \right) \exp \left\{ - \left( \frac{\sigma - \sigma_i}{Eb} \right)^m \right\}, (\varepsilon_i \leq \varepsilon)$$

のように書き換えることができる。この式から、ヤング率は大きいほどワイルブル関数の値は大きくなる、つまり破壊確率は小さくなることがわかり、ヤング率は高い方が良いことがわかる。今後は、この検証も含めて測定と統計処理を進める必要がある。

### 参考文献

- C. Barth et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 28 (2015) 045011
- T. Okada et al.: Supercond. Sci. technol., Vol. 33 (2020) 094014
- P. Gao et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) 044015
- H. Matsuba et al.: J. Inst. Elect. Engn. Jpn., Vol. 97 (1977) p. 282
- S. Fujita et al., J. Phys. Conf. Ser.: Vol. 507 (2014) 022007

Table 1 Measurement results of FYSC samples.

$I_c$ (A) ( $T = 77$ K)	Fracture strain (%)	Fracture probability (%)
76.1	0.28	20
98.9 (0.4 T)	0.35	40
163.1	0.41	60
217.67	0.502	80
219 (Ref.[5])	0.54	99

# パルス通電法を用いた REBCO 線材の電気機械特性の温度依存性評価

## Evaluation of Electro-Mechanical Properties of REBCO Tapes at Variable Temperatures Using Pulsed Current

久米 俊輔, 土屋 雄司, 淡路 智(東北大)

KUME Shunsuke, TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: kume.shunsuke.t5@dc.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 程度の中温度域での高パフォーマンス運用が注目されている。強磁場超伝導機器では、REBCO 線材に大きな電磁力が印加されるため、機器の設計に向けて電気機械特性(応力 $\sigma$ -ひずみ $\epsilon$ -臨界電流 $I_c$ 特性)の評価が重要である。これまでに、液体浸漬冷却を用いた 77 K や 4.2 K における REBCO 線材の電気機械特性について報告がなされている[1]。一方で、中温度域ではガス冷却の冷却能力が小さく、さらに  $I_c$  が kA を超え電流リードのジュール発熱が大きいため、電気機械特性の評価が難しいことが課題であった。

そこで本研究では、電流リードの発熱を抑制するためにパルス通電法[2]を用いることで、4.2-77 K の広い温度条件で REBCO 線材の電気機械特性を測定した。

### 2. 実験方法

試料は、フジクラ社製の REBCO 線材(FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、Cu 安定化層 40  $\mu\text{m}$ )を用いた。これは、東北大において 33 T の無冷媒超伝導マグネットの開発に使用されている線材と同様である[3]。この REBCO 線材における 4.2-77 K の電気機械特性を評価した。試料の冷却には、液体窒素浸漬冷却および He ガスフロークライオスタットを用いた。応力は、レバー式引張プローブを用いて印加した。通電測定は、パルス電源(電圧 10 V、電流 1,000 A)を用い、電界基準 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  によって  $I_c$  を決定した。また、同じ仕様の試料について複数回電気機械特性を測定した。得られた応力 $\sigma$ -ひずみ $\epsilon$ 曲線(SS 曲線)から、 $\epsilon = 0 - 0.3\%$ の間の実効的ヤング率  $E_{0.3\%}$  を算出した。降伏応力 $\sigma_y$ および降伏ひずみ $\epsilon_y$ は SS 曲線の直線的な弾性領域の終わり、つまり、 $\epsilon = 0 - 0.3\%$ 間の直線から外れる点を応力およびひずみとして、それぞれ算出した。

### 3. 実験結果および考察

図 1 に、REBCO 線材の(a) 室温、(b) 77 K、(c) 4.2-7 K における引張応力-ひずみ曲線を示す。全温度で  $\epsilon = 0.4 - 0.5\%$ まで直線的な振る舞いを示し、それ以上の $\epsilon$ では傾きが低下し塑性変形を示した。 $E_{0.3\%}$ は、室温、77 K、4.2 K で、それぞれ約 122 GPa、約 136 GPa、約 137 GPa であり、温度の低下に伴い増加した。次に、 $\sigma_y$ は、温度の低下に伴い増加し、室温、77 K、4.2 K でそれぞれ 510 GPa、690 GPa、838 GPa であった。一方で、降伏ひずみ $\epsilon_y$ は、室温、77 K、4.2 K の温度域で約 0.5%であり、温度に依存しなかった。

$E_{0.3\%}$ の温度依存性について、REBCO 線材を構成する材料の機械特性から議論する。表 1 に、各温度での REBCO 線材の実効的ヤング率  $E_{0.3\%}$  および、Cu、Hastelloy のヤング率[4]を示す。今回測定した REBCO 線材は、Cu 安定化層が 50%以上、Hastelloy 基板が約 40%を占める。REBCO 線材の  $E_{0.3\%}$  の温度依存性は、主な構成要素である Cu のヤング率の温度依存性が主に影響していると考えられる。

図 2 に、パルス通電法を用いた 77 K における EMP 特性( $I_c - \epsilon$  および  $\sigma - \epsilon$ )を示す。 $I_c$  は、 $\epsilon = 0.35\%$ 程度から急激に減少し、 $\epsilon = 0.5\%$ で 0 A まで不可逆に減少した。 $I_c$  が不可逆的にとなるひずみをゼロひずみ  $I_c$  の 98%で定義すると、約 0.375% であった。図 1 と同様に、SS 曲線は約 0.5%で急激に

傾きが減少し、同時に  $I_c$  が 0 A に減少した。これらの結果は、77 K における REBCO 線材の典型的な電気機械特性[1]と同等であり、電気機械特性の評価にパルス通電法が適応可能であることを示している。

当日は、Cu 安定化層の降伏や、REBCO 線材の構成材料の複合則を考慮して、REBCO 線材の電気機械特性の温度依存性について議論する予定である。

Table.1  $E_{0.3\%}$  of REBCO tape and Young's modulus  $E$  of Cu and Hastelloy at each temperature.

T (K)	$E_{0.3\%}$ (GPa)	$E$ (GPa)	$E$ (GPa)
	REBCO tape	Cu [4]	Hastelloy [4]
300	122	129	214
77	136	138	222
4.2	137	139	222

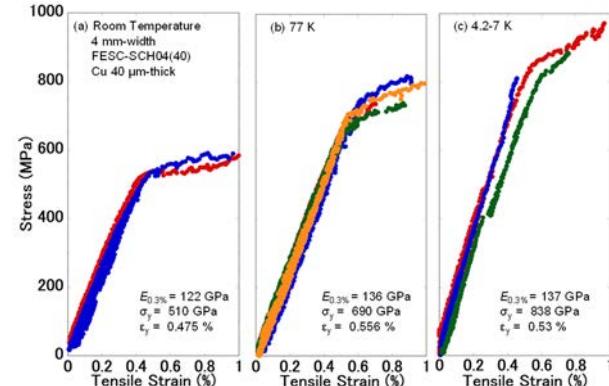


Fig. 1 Stress-strain curves of tensile tests of FESC-SCH04(40) at (a) room temperature, (b) 77 K, and (c) 4.2-7 K.

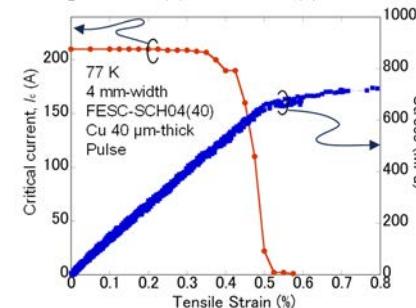


Fig. 2 Electro-mechanical properties ( $I_c - \epsilon$ , stress-strain) at 77 K measured with pulsed current method.

### 謝辞

本研究の一部は、科研費(22H00142)、NEDO の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。東海大学小黒英俊准教授には測定法に関して有益な助言をいただきました。

### 参考文献

- [1] C Barth *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **28**, 045011 (2015).
- [2] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **33**, 8001105 (2023).
- [3] A. Badel *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 4301205 (2024). S. Awaji *et al.*, submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond.
- [4] H. M. Ledbetter, Cryogenics **22**, 653 (1982).

## REBCO テープ線材における臨界電流のねじり・引張変形依存性

Torsion dependence of critical current under tensile load for REBCO tape

長村 光造(応用科学研); Cheggour Najib(Super Power); 町屋 修太郎(大同大)

OSAMURA Kozo(RIAS); Cheggour Najib(Super Power); MACHIYA Shutaro(Daido Univ)

Kozo\_osamura@rias.or.jp

1. はじめに: 脆い超電導酸化物を含む REBCO テープ線材の実用化においては機械特性と臨界電流の応力・歪依存性の向上がつよく求められる。とくに製造・実用の現場では曲げ・ねじりが加わるため、それらの定量的な特性把握は不可欠である。本報告では臨界電流のねじり・引張変形依存性の調査結果を報告する。引張応力が低いときはねじりによっても臨界電流は可逆的な変化を示すが、応力が高くなると同程度のねじり量でも不可逆な変化を示すようになることが明らかとなった。

2. 実験方法: 試料には幅 4mm, 厚さ 0.1~0.2 mm の REBCO テープを使用した。本実験で用いた自作らせん・引張治具を Fig. 1 に示す。テープ試料の上端部をボールベアリングで引張軸に対して  $\theta$  だけ回転できるようにしてある。これによりテープ下端を基準してテープに引張荷重  $P$  のもとで  $\theta$  だけ回転が可能となる。試料部分を液体窒素に浸漬し臨界電流測定を行った。

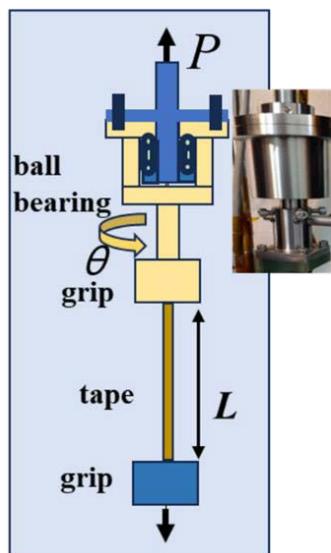


Fig.1 Tool for critical current measurement under the torsion-tension application.

3. 試験結果と考察: Fig. 2 に規格化した臨界電流 ( $I_c/I_{c0}$ ) の引張応力依存性を示す。 $I_c/I_{c0}$  は応力と共に減少するが、この応力範囲は可逆限界応力範囲内にあり、引張応力についてゼロに戻すと  $I_c/I_{c0}$  は 1 に戻る。例えば図に示すように引張応力を約 350MPa 印加したままで、180°のねじりを加えてから、もとに戻す。ここで観察される一般的な変化は(1) p1 から p2 に向けて臨界電流は減少し、(2) ねじりを戻すとほぼ p2 から p3 に臨界電流は回復するが 100%ではない。ここでその変化 p3-p1 を  $\Delta I_c/I_{c0}$  とするところの変化は弾塑的な変化によるものとして定性的に理解される。さらにテープ長さ ( $L$ ) により規格化した  $(p_2 - p_1)/L$  はほぼ一定となる。

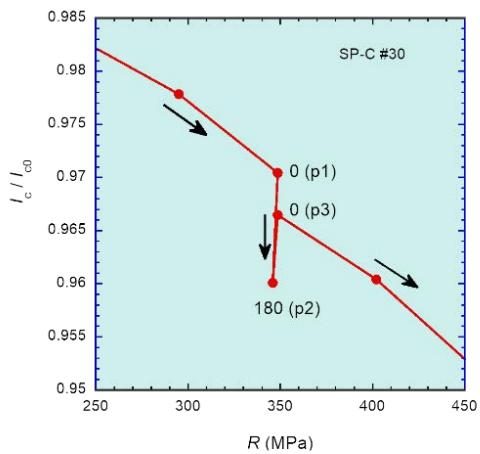


Fig.2 Torsion dependence of critical current under tensile load

ここで試料に加わる力は引張応力とねじりによるせん断応力の和となるが、その定量的な解析のため 3 次元応力の数値解析を行った。臨界電流は弾性歪の増加により減少するが、ねじりによる弾性歪の引張軸方向への成分が加わることで理解することができる。

謝辞: 本研究に関して議論頂いた核融合科学研究所の菱沼良光博士に感謝いたします。

# REBCO 薄膜のナノインデンターによる硬さ評価方法の検討

## Consideration of evaluation condition in Nanoindentation method for hardness test of REBCO films

浦中 智貴(九大);立木 実, 松本 明善(NIMS);山田 穣(中部大);寺西 亮(九大)

URANAKA Tomoki (Kyushu Univ.); TACHIKI Minoru, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS); YAMADA Yutaka (Chubu Univ.);

TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.)

E-mail: uranaka.tomoki.491@s.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (REBCO) 薄膜線材は、高磁場中でも高い臨界電流密度をもつことから磁場を発生させる超伝導コイルに使われている[1]。磁場発生による分析機器の精度向上や核融合発電などの新たな分野での応用を目指したさらなる高磁場応用が求められる。しかし高磁場中では大きな電磁力がかかることによって REBCO 層にクラックが生じるという課題が報告されており[2]、高強度化が必要である。我々は高強度化に向けた REBCO 薄膜の機械的特性の評価に注目しており、特にナノインデンターを用いた硬さ試験の検討を行っている。ここで、ナノインデンターは圧子の押し込みによって荷重と変位を連続的に測定し微小領域の硬さ評価ができることで知られている[3]。ナノインデンターを用いた REBCO 薄膜の硬さ試験の試験条件について、試験条件の一つである圧子押し込み時の最大荷重が測定値に影響を与えることが分かっており、基板や表面凹凸の影響を受けないような適切な最大荷重を選択することが重要である[4]。

本報告では、REBCO 層の硬さを適切に測定・評価するための試験条件を明らかにすることを目的として、REBCO 層の膜厚の違いによって基板の影響が少なくなる最大荷重の範囲がどのように変化するか調査した。

### 2. 実験方法

ナノインデンターを用いて GdBCO 薄膜の硬さ試験を行った。測定に使用した薄膜試料はパルスレーザー蒸着法にて作製し、基板には SrTiO<sub>3</sub> (STO) 基板を用いた。膜厚が約 4 倍程度異なるような条件で作製することで膜厚が異なる 2 つの試料を準備した。以後膜厚が小さい試料を GdBCO (thin)、膜厚が大きい試料を GdBCO (thick) と表記する。硬さ試験は最大荷重を 0.5 mN から 500 mN の範囲で条件を振り、得られた荷重-変位曲線から硬さの値を算出し[5]、硬さ評価を行った。なお押し込みにはバーコピッチ圧子を使用し、測定点を 10 点設定して最大値と最小値を除く測定値の平均を算出した。

ここで薄膜試料の測定値における基板の影響の有無は、STO 基板のみの結果から硬さの値が乖離している最大荷重に注目し、その荷重より小さい領域では基板の影響が少ないと判断した。

### 3. 結果と考察

Fig.1 には膜厚の異なる 2 つの GdBCO 薄膜と STO 基板のみの硬さ( $H_{IT}$ )と最大荷重( $P_{max}$ )の関係を示している。まず STO 基板のみの試料の結果では、最大荷重が小さくなると硬さの値が大きくなる傾向が見られた。

赤のプロットで示す GdBCO (thin) では最大荷重が 100~200 mN の間で乖離していると見積られる。また緑のプロットで示す GdBCO (thick) では最大荷重が 200~500 mN の間で乖離していると見積られる。以上より、薄膜の硬さ評価において基板の影響が少なくなる最大荷重は、膜厚が大きくなることで大きい方にシフトすることが示された。

薄膜試料において、GdBCO (thin) の最大荷重 1 mN 以下、GdBCO (thick) の最大荷重 10 mN 以下の測定点では、STO 基板のみの結果に見られるような単純増加ではなく、測定値

に上下があることが示され、特に GdBCO (thick) では硬さの値の変動がより大きくなっている。薄膜の硬さ測定において、最大荷重が小さいときには試料表面の析出物や凹凸の影響を受けやすいことが分かっており[4]、このことから測定値が上下する要因として試料表面の形態が考えられる。特に REBCO 薄膜を厚膜化すると表面での結晶の乱れが生じやすくなると報告されており[6]、GdBCO (thick) では表面の影響を受けて、測定値の変動が大きくなつたと推察される。

### 4. まとめ

薄膜の硬さ測定において、膜厚が大きくなることでより大きな最大荷重でも基板の影響が少なくなることが分かった。また厚膜化によって表面の凹凸が増大するため、表面の影響が大きくなる最大荷重は避けるべきであることが分かった。

以上より、薄膜試料の適切な硬さ測定には基板の硬さの影響や試料表面の影響を少なくする必要があり、これらの影響が少なくなる最大荷重を選択することが重要であることが明らかになった。また膜厚が大きい薄膜では、適切な最大荷重の範囲が最大荷重の大きい方に拡がることが示された。

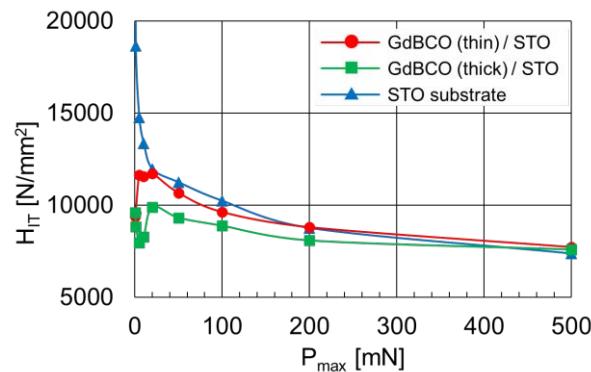


Fig.1 Relationship between mean value of hardness ( $H_{IT}$ ) and maximum load ( $P_{max}$ )

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 22H0219 および 22H02021、ならびに NIMS の Joint Research Hub Program の助成を受けて実施した。硬さ試験は九州大学工学研究院材料工学部門の田中研究室に協力していただいた。

### 参考文献

1. Y.Nagasaki et al., IEEE TAS., 31, 5 (2021) 8400405
2. S.Hahn et al., Nature, 570 (2019) 496-499
3. 権田俊一, 2020 版薄膜作製応用ハンドブック, エヌ・ティー・エス (2020) 214
4. 浦中智貴ら, 2024 年度 低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 支部研究成果発表会
5. W.C.Oliver and G.M.Pharr, J. Mater. Res., 7 (1992) 1564-1583
6. 衣斐顕ら, 低温工学, 39, 11 (2004) 567-571

## SUS 補強 MgB<sub>2</sub>線材におけるフィラメント部の残留圧縮ひずみの推定

### Estimation of residual compressive strain in the filaments of SUS reinforced MgB<sub>2</sub> wire.

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立)  
 TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi)  
 E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

#### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>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、MgB<sub>2</sub>コイルにおける巻線位置高精度化や低コスト化のために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、コイル巻線時の引張りや曲げに伴う印加ひずみによる $I_c$ 劣化を防ぐ必要がある。室温におけるMgB<sub>2</sub>線材の不可逆ひずみは主に、MgB<sub>2</sub>生成時の熱処理温度から室温への冷却に伴ってMgB<sub>2</sub>フィラメントへ加えられる残留圧縮ひずみに支配されると考えられている。

#### 2. SUS 補強 MgB<sub>2</sub>線材のひずみ耐性の確認

前回までの報告で、比較的線膨張係数の大きなステンレス鋼(SUS)を“圧縮材”として使用したMgB<sub>2</sub>線材が良好なひずみ耐性を持つことを示してきた[1, 2]。Table 1 および Fig.1 にSUSで補強したWire(a), SUSとMonelで補強したWire(b)の占積率および断面写真を示す。Wire(b)はWire(a)の最外層にMonel層を加えた構成である。

Fig.2 にひずみ耐性の測定結果を示す。直線状に熱処理した短尺サンプル線材に対し、様々な半径を有するボビンを用いて曲げ負荷を加えた後に $I_c$ を測定した結果であり、横軸は曲げによりフィラメント部に加えられた最大引張りひずみである。 $I_c$ の劣化境界近傍においては、同じ印加ひずみに対しWire(a)は3サンプルを、Wire(b)は2サンプルを測定した。Wire(a)の不可逆ひずみは0.44%程度、Wire(b)が0.61%程度であった[1, 2]。SUSを含まずMonelのみで補強したMgB<sub>2</sub>線材の不可逆ひずみ 0.19%[3]と比べると2~3倍のひずみ耐性が得られていた。

#### 3. 残留圧縮ひずみの推定値

熱処理後の室温への冷却に伴う残留圧縮ひずみは、構成材料の線膨張係数、ヤング率および占積率で求められる。冷却途中で降伏する銅などが含まれる場合は、該当する材料の降伏点(ひずみ、応力)および加工硬化係数(降伏後の応力-ひずみ曲線の傾きに相当)が必要である。降伏する材料を含む際の残留ひずみの算出方法は参考文献[4]に詳しい。

公開されている素材としてのステンレス鋼などの線膨張係数およびヤング率を用いて、熱処理温度 600°Cから室温まで冷却した際のWire(a)およびWire(b)のMgB<sub>2</sub>フィラメントに加わる残留圧縮ひずみを算出すると-0.24%および-0.27%であった。“圧縮材”的占積率を増やすことで残留圧縮ひずみが増加する傾向であったが、これらの絶対値とWire(a), Wire(b)の室温での許容ひずみの実測値 0.44%, 0.61%との乖離は大きい。差異に関する検討結果は当日報告する。

#### 4. 応力-ひずみ曲線の比較

Wire(a)およびWire(b)の室温における応力-ひずみ曲線(SS曲線)をFig.3に示す(図中2,000  $\mu\epsilon$ 以下の領域には除荷による往復測定も含まれている)。両線材のSS曲線に共通する特徴は、280 MPa程度に変曲点がある点と、480 MPa程度でSS曲線がフラットになっている点である。後者はWire(a)では4,200~4,400  $\mu\epsilon$ 、Wire(b)では5,900~6,300  $\mu\epsilon$ の領域で観測されており、これらの範囲は先に評価した許容ひずみの値の近傍である。さらなる検討結果を当日報告する。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、残留圧縮ひずみの推定にご協力いただいたKEKの菅野未知央氏、 $I_c$ 測定にご協力いただいたNIMSの松本明善氏に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

1. H Tanaka et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.100 (2020) p.143
2. H Tanaka et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.105 (2023) p.123
3. H Tanaka et al. : IEEE TAS 28 (2018) 8400605
4. M. Sugano et al. : Physica C 412-414 (2004) 1114-1119

Table 1. Filling factors of SUS reinforced Wire(a) and SUS+Monel reinforced Wire(b).

	MgB <sub>2</sub>	Fe	Cu	SUS	Monel
Wire(a)	28.3%	33.7%	16.5%	21.5%	-
Wire(b)	18.9%	21.5%	19.4%	19.3%	20.9%

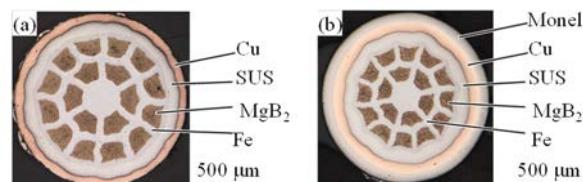


Fig.1 Cross-section views of Wire(a) and Wire(b).

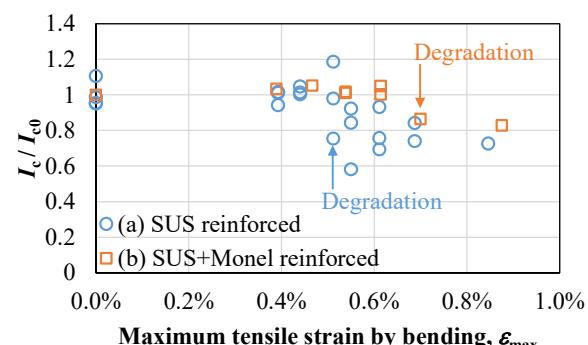


Fig.2 Measurement results of bending strain tolerance.

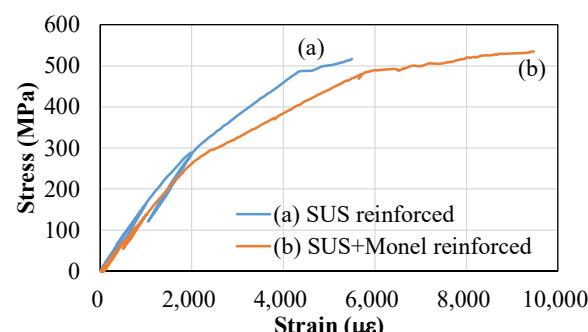


Fig.3 Stress-Strain curves of Wire(a) and Wire(b).

# REBCO iGS 接合の抵抗および電圧-電流特性

## Resistance and voltage-current characteristics of REBCO iGS joint

武田 泰明, 西島 元, 北口 仁 (NIMS)  
TAKEDA Yasuaki, NISHIJIMA Gen, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

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

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (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 ( $R_j$ ) を示し、iGS 接合を持つ NMR 内挿コイルを使った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に実装された iGS 接合において、運転電流での  $R_j$  は十分に低いことが求められる。この低い  $R_j$  を評価できる電流減衰測定には時間がかかるという課題がある。我々が開発した  $R_j$  評価装置[4]によって従来よりも効率的な測定が可能となったが、電流、温度、磁場などの測定条件を様々に変えた  $R_j$  評価にはいまだ長時間を要する。一般的な手法で測定できる電圧範囲において iGS 接合の電圧-電流特性を把握し、低い  $R_j$  を見積もることができれば有用である。

本報告では、iGS 接合の抵抗および電圧-電流特性を議論する。10<sup>-8</sup> V での  $I_{cj}$  と  $n$  値モデルを使って、低い  $R_j$  を維持しつつ接合に流せる電流の最大値を見積もる方法を提案する。

### 2. 実験方法

1 本の線材からなり、iGS 接合を持つ 1 ターン REBCO 閉ループ試料 (直径 100 mm, 自己インダクタンス ( $L$ ) 0.47  $\mu$ H) を用いた。我々の  $R_j$  評価装置[4]を用いて、0.1–1 T の磁場 ( $B//c$ ) を iGS 接合に印加し、30–85 K 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  $I_{loop-t}$  から接合電圧  $V_j = -L(\Delta I_{loop}/\Delta t)$  を 0.5– $2 \times 10^{-8}$  V の電圧範囲で計算し、電圧基準  $V_c = 10^{-8}$  V の  $I_{cj}$  と、 $n$  値モデル  $V_j = V_c(I_{loop}/I_{cj})^n$  における  $n$  値を評価した。さらに、 $I_{loop-t}$  を様々な時間範囲で  $I_{loop}(t) = I_{loop}(0)\exp(-R_j t/L)$  にフィッティングし、各  $I_{loop}$  における  $R_j$  を評価した。

### 3. 結果と考察 [5]

電流減衰測定から得た 0.5 T, 10<sup>-8</sup> V における  $I_{cj}$  と  $n$  値の温度依存性を Fig 1(a) に示す。これらは、REBCO 線材の典型的な  $I_{cj}$  と  $n$  値の温度依存性[6][7]とよく似た傾向であった。

ここで  $V_j = R_j I_{loop}$  と  $n$  値モデルから、負荷率  $F = I_{loop}/I_{cj}$  を使うことで  $R_j = (V_c/I_{cj})F^{n-1}$  が得られる。負荷率が決まれば、対応する  $R_j$  を  $I_{cj}$  と  $n$  値から計算することができる。Fig. 1(b) に、0.5 T における  $F = 0.4$ – $0.9$  での  $R_j$  の温度依存性を示す。 $I_{cj}$  と  $n$  値は Fig. 1(a) の値を使った。 $R_j$  の式から予想される通り、 $F$  が大きいほど  $R_j$  は高くなつた。30–65 K では温度とともに  $R_j$  は緩やかに増加した。この温度範囲では  $n$  値はほぼ一定であるため、この緩やかな  $R_j$  の増加は  $I_{cj}$  の低下に由来するものである。一方、65–85 K の温度上昇に伴う  $R_j$  の急激な増加は、 $I_{cj}$  と  $n$  値両方の低下によるものであると考えられる。

$R_j$  の式を変形すると、 $F = (R_j I_{cj}/V_c)^{\frac{1}{n-1}}$  が得られる。この式を使えば、目標とする  $R_j$  を達成できる最大の負荷率を計算す

ることができる。Fig. 1(c) に、0.5 T での負荷率の計算値 ( $F_{cal}$ ) および実験値 ( $F_{exp}$ ) の温度依存性を示す。目標  $R_j$  は 10<sup>-12</sup>, 10<sup>-13</sup>  $\Omega$  とし、 $F_{cal}$  の計算には Fig. 1(a) の  $I_{cj}$  と  $n$  値を用いた。 $F_{exp}$  と  $F_{cal}$  はよく一致しており、より低い目標  $R_j = 10^{-13}$   $\Omega$  の場合でも、それらの差は最大で 0.037 (3.7%) であった。 $n$  値モデルを使うことによって、10<sup>-8</sup> V での  $I_{cj}$  と  $n$  値から目標  $R_j$  を達成できる負荷率の最大値、すなわち接合に流せる電流の最大値のおおよその見積もりが可能であることが示唆された。

### 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] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30** (2020) 9000204.
- [5] Y. Takeda *et al.*, submitted to *IEEE TAS*.
- [6] G. Nishijima *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1435** (2012) 258–264.
- [7] C. Senatore *et al.*, *SuST* **29** (2016) 014002.

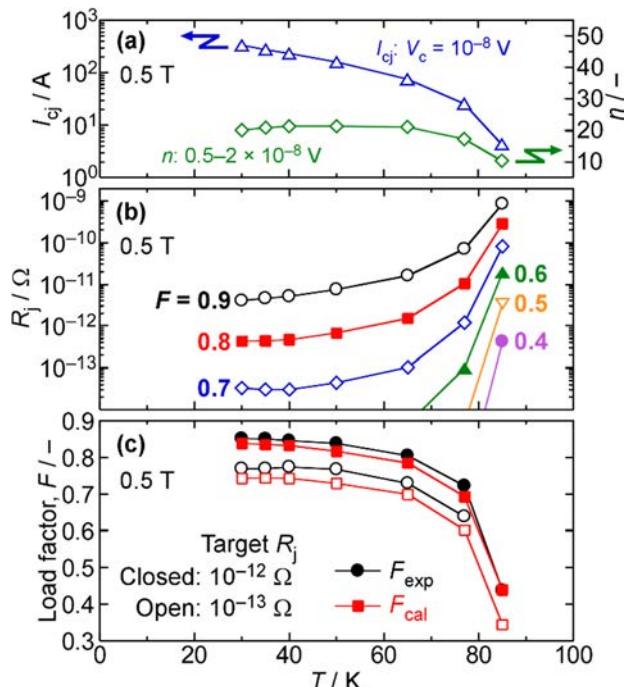


Fig. 1 (a) Temperature dependence of  $I_{cj}$  and  $n$  value at 0.5 T and  $10^{-8}$  V. (b) Temperature dependence of  $R_j$  calculated using  $I_{cj}$  and  $n$  value shown in (a) with  $F$  of 0.4–0.9.  $R_j$  increases with increasing the temperature, which is due to the decrease in  $I_{cj}$  and  $n$  value. (c) Temperature dependence of  $F$  at 0.5 T for a target  $R_j$  of  $10^{-12}$  and  $10^{-13}$   $\Omega$ . The calculated  $F$  ( $F_{cal}$ ) agrees well with that experimentally obtained ( $F_{exp}$ ). [5]

# Cu 安定化層を有する REBCO 線材の半田フリー音波接合プロセスの物理モデル に関する考察と数理モデルの導出

## Consideration on Physical Model of Solder-Free Sonic Welding Process for Cu-Stabilized REBCO Coated Conductors and Derivation of Mathematical Model

世良 真也, 呉 澤宇(九大); 鈴木 賢次(鉄道総研); 東川 甲平, 木須 隆暢(九大)  
 SERA Shinya, WU Zeyu (Kyushu Univ.); SUZUKI Kenji (RTRI); HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.)  
 E-mail: s.sera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導( $REBa_2Cu_3O_x$  : REBCO)線材の実応用化には、低抵抗で作業性および再現性に優れる接合技術の確立が不可欠である。一般的に用いられる半田接合では、接合抵抗率は典型的に  $50 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  程度(@77 K)に留まっており、熱処理による特性低下も懸念される。熱処理が不要で高い作業性を有する低抵抗接合法として音波接合が提案されている。音波接合は Anvil 上に重ね合せた試料に対して Horn で加圧しながら高周波振動を印加し、接合界面に拡散接合を促す接合法である。この手法では、1 s 程度で接合界面に金属結合を形成できるため、金属安定化層を有する REBCO 線材の接合において高いポテンシャルが期待される。しかし、従来法では音波振動のみの印加では界面のボイドにより接合抵抗率が  $100 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  と高く、低抵抗の実現には半田や In 箔の併用が不可欠であった[1], [2]。これに対し、我々は音波接合プロセスを精査することで、音波エネルギーのみで  $I_c$  の劣化なく Cu 安定化された REBCO 線材を  $17 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  の低抵抗率で制御性良く接合できることを報告した[3]。本研究では、音波接合プロセスの物理的な接合メカニズムを考察し、音波接合プロセスの数理モデルの導出を試みた。

### 2. 実験方法

本研究では、 $20 \mu\text{m}$  厚の Cu 層を有する PLD 法で成膜された  $3 \text{ mm}$  幅 REBCO 線材を用いて、入力パワーおよび投入エネルギーを変化させて Cu-Cu 接合試料を作製した。このとき、超伝導層同士を向かい合わせてラップジョイントを形成し、荷重  $1750 \text{ N}$  下で  $15 \text{ kHz}$  の音波振動を印加した。これらの接合試料に対して、4 端子法で接合抵抗  $R_j$  を測定し、接合面積を乗じることで接合抵抗率  $\rho_j$  を算出した。

### 3. 実験結果・考察

Fig. 1 に異なるパワーで作製した Cu-Cu 接合における接合抵抗率  $\rho_j$  のエネルギー依存性を示す。接合抵抗率はエネルギーに対して指數関数的に減少し、十分なエネルギーを投入すればある一定値に収束した。また、パワーが大きいほど、接合抵抗率の飽和にするエネルギーが小さくなる傾向を示した。本結果より、我々は以下の数理モデルを提案する。

$$\rho_j(E, P) = \frac{\rho_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha - \exp\left[-\frac{E}{U(P)}\right]} \quad (1)$$

ここで、 $\rho_0$  は接合抵抗率の飽和値、 $\alpha/(1+\alpha) \approx \alpha$  は加圧のみによる接触割合( $0 < \alpha << 1$ )、 $U(P)$  は結合エネルギーを示す。結合エネルギーは金属材料間の結合に必要なエネルギーに相当し、パワーすなわち接合部温度(反応場温度)によって変化すると考えた。また、 $\rho_0$  は線材自身が持つ界面抵抗率( $R_{\text{REBCO/Ag}} + R_{\text{Ag/Cu}}$ )によって決定されると考えられ、PLD 線材の界面抵抗率は  $5 \sim 15 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  と報告されている[4]。つまり、接合抵抗率は  $10 \sim 30 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  であり、我々が達成した最小値は  $9.6 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  のため、本研究では  $\rho_0$  を  $10 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$  と仮定した。式(1)を Fig. 1 の実験値に対して  $\alpha$ 、 $U(P)$  をフィッティングパラメータとして Fit した結果を実線で示している。このとき、 $\alpha = 0.0679$ 、 $U$  は Fig. 1 内に示す通りであった。提案した数理モデルは実

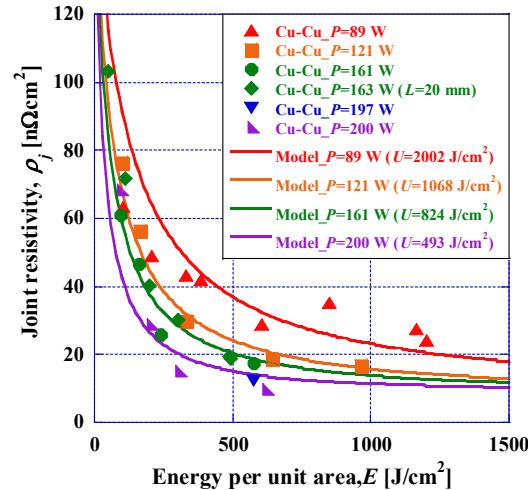


Fig. 1 Comparison of experimental result and fitting curve. Assuming  $\rho_0=10$ ,  $\alpha$  and  $U$  were fitted by the least squares method as fitting parameters.

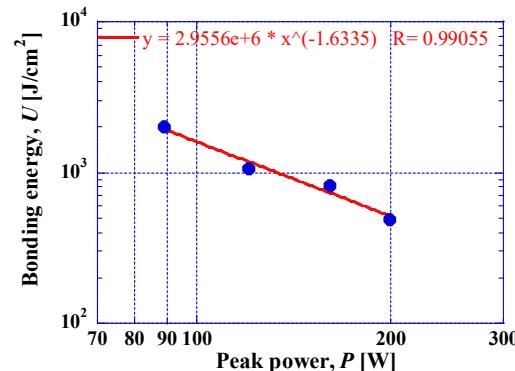


Fig. 2 Peak power dependence of bonding energy  $U$ . From this result, the functional form of  $U$  is considered to be a power law form with respect to  $P$ .

験値をよく再現できた。このとき、結合エネルギー  $U$  の変化は Fig. 2 に示すように  $P$  に対してべき乗で減少することが判明した。以上により、音波接合における接合抵抗率の大きさをプロセス条件をもとに定量的に記述することが可能となった。

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.*, vol. 26, no. 4, 2016, Art. no. 6601704.
- [2] S. Ito et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, 2019, Art. no. 6600405.
- [3] S. Sera et al., *Abstracts of CSSJ Conf.*, vol. 107 (2024), 1A-p07.
- [4] S. Ito et al., *Nucl. Fusion*, vol. 61, no. 11, Art. no. 115002, 2021.

# 常伝導金属により接合した超伝導テープ線材に関するモデリング

## Modeling of joint resistance of superconducting tapes joined with normal metals

馬渡 康徳 (産総研)  
**MAWATARI Yasunori (AIST)**  
 E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

### 1. はじめに

超伝導線材の接合において、その接合部分の長さが十分長い(接合面積が十分広い)と接合抵抗が十分小さくなることが期待されるが、接合部分が大型化する懸念がある。はんだ等の常伝導層を介した接合において、超伝導線材の抵抗はゼロとすると、接合抵抗は、単に常伝導層の抵抗だけで決まり、接合の長さに反比例する。一方、接合長さがある閾値を超えると、接合抵抗は接合長さによらず一定となることが報告されている[1,2]。また、通電電流が大きい場合など、超伝導線材の抵抗が無視できない場合、接合全体の抵抗がどのようになるか明らかではない。

本研究では、常伝導金属層を挟んで超伝導テープ線材の端部同士を重ねた接合について、一次元分布定数回路モデルにより接合部分の電流分布を解析し、接合全体の抵抗が接合長さなどにどのように依存するか理論的に考察した。

### 2. 一次元分布定数回路モデルによる電流分布

常伝導層を介して 2 枚の超伝導テープ線材を重ねた接合のモデルとして、Fig. 1 のように、単一の常伝導層を挟んだ 2 枚の超伝導層による接合について考える。超伝導線材の安定化材の抵抗や界面の接触抵抗などの影響も含めて、均質化した単一の常伝導接合層とするモデルが有効である[2]。簡単のため、線材の幅方向および厚さ方向の依存性を無視し、電流分布は線材の長手方向( $x$  方向)にのみ依存する一次元モデルを考える。接合部分は  $0 < x < a$  にあり、Fig. 1 の上部の超伝導層に流れる電流を  $I_1$  とすると、下部の超伝導層に流れる電流は  $-I_1$  であり、また線材の通電電流(接合していない  $x > a$  の超伝導層に流れる電流)を  $I_0$  とする。接合部分  $0 < x < a$  において、常伝導層の単位長さあたりのコンダクタンスを  $G_j$  [S/m] および超伝導層の単位長さあたりの抵抗を  $R_s$  [ $\Omega/m$ ] として、分布定数回路モデルに基づく回路方程式を導いた。ただし、常伝導層のコンダクタンス  $G_j$  は一定とし、超伝導層の非線形抵抗  $R_s$  の電流依存性として、次の幕乗則モデルを仮定した。

$$R_s(I_0) = \frac{E_c (|I_0|)}{I_c} \left( \frac{|I_0|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (1)$$

ここで、 $I_c$  は超伝導層の臨界電流、 $E_c$  は電界基準、および  $n$  は電流・電圧特性の  $n$  値である。

分布定数回路方程式より、規格化した電流分布  $y = I_1/I_0$  について次の微分方程式が得られる。

$$b^2 \frac{d^2 y}{dx^2} = y^n \quad (2)$$

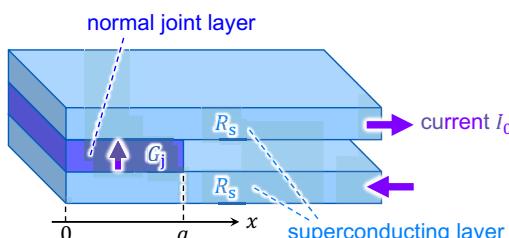


Fig. 1: Schematics of two superconducting layers with a normal junction layer in between.

ここで、 $b$  は次で定義される特徴的長さである。

$$b \equiv [2G_j R_s(I_0)]^{-1/2} = \left[ \frac{2G_j E_c}{I_c} \left( \frac{|I_0|}{I_c} \right)^{n-1} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

例えば、 $G_j = 10^{10}$  S/m、 $n = 20$ 、 $E_c = 10^{-4}$  V/m、 $I_c = 100$  A、および  $|I_0|/I_c = 0.7$  とすると、 $R_s = 1.1$  n $\Omega$ /m および  $b = 0.21$  m である。また、 $y(x)$  の境界条件は次のとおり。

$$\begin{cases} y = 0 & \text{at } x = 0, \\ y = 1 & \text{at } x = a \end{cases} \quad (4)$$

(2),(4)式で  $x$  を接合長さ  $a$  で規格化すれば分かることおり、2 つのパラメータ  $a/b$  および  $n$  のみで電流分布が決まる。

超伝導層において長手( $x$ )方向に流れる規格化した電流  $y$  に対して、常伝導接合層を通過する規格化した電流は  $a(dy/dx)$  で与えられる。接合長さが短い場合  $a/b \ll 1$  では、超伝導層内の電流分布は線形  $y \simeq x/a$  であり、従って常伝導接合層の電流分布は一様  $a(dy/dx) \simeq 1$  である。一方、接合長さが長い場合  $a/b \gtrsim 1$  では、接合層を通過する電流は接合層の端部  $x \sim a$  に集中する。

### 3. 接合抵抗

接合全体の接合抵抗  $R_j$  は、 $x = a$  における上下の超伝導層の電位差を通電電流  $I_0$  で除して定義される。接合抵抗  $R_j$  の接合長さ  $a$  依存性の数値計算結果を Fig. 2 に示す。接合長さが短い場合  $a/b \ll 1$  は、本稿の冒頭に述べたような超伝導層の抵抗が無視できるほど小さい場合に相当し、接合抵抗は  $R_j \simeq 1/(G_j a)$  で与えられる。一方、接合長さが長い場合  $a/b \gtrsim 1$ 、接合抵抗は接合長さ  $a$  によらず一定である。この場合、常伝導層の抵抗のみならず、超伝導層の抵抗  $R_s$  も接合抵抗  $R_j$  に影響を及ぼしている。このような振る舞いは、文献[1,2]の報告結果をうまく表している。

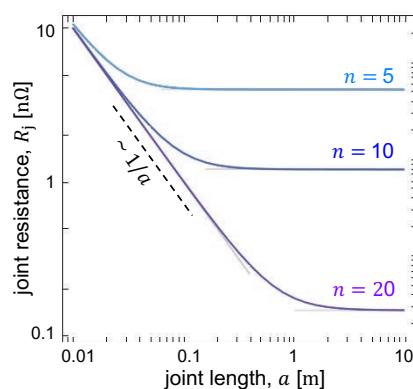


Fig. 2: Dependence of the joint resistance  $R_j$  on the joint length  $a$  for  $G_j = 10^{10}$  S/m and  $I_0/I_c = 0.7$ .

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] Y. Pan et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **27**, 6601905 (2017).
- [2] Y. Pan et al., Supercond. Sci. Technol. **31**, 095004 (2018).

(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**

阿部 格	(東芝 ESS)	<b>3, 10, 11</b>
阿部 吉三	(千葉大)	<b>23</b>
阿部 健汰	(岩手大)	<b>79</b>
相廣 祐介	(九工大)	<b>26</b>
赤坂 友幸	(鉄道総研)	<b>99, 100, 107, 147</b>
秋池 良	(東ソ一)	<b>80</b>
秋谷 一樹	(筑波大)	<b>116</b>
秋澤 涼介	(東大)	<b>114</b>
AMBROSIO Giorgio	(Fermi Lab.)	<b>120</b>
雨宮 尚之	(京大)	<b>5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,</b> <b>14, 15</b>
安藤 総一郎	(鹿児島大)	<b>144, 146</b>
安藤 竜弥	(日立ハイテク)	<b>53</b>
青木 和之	(KEK)	<b>24, 120</b>
青木 康佑	(東海大)	<b>152</b>
青木 正智	(足利大)	<b>137</b>
新井 樹	(東海大)	<b>31</b>
有本 靖	(KEK)	<b>24, 120</b>
有田 拳	(九工大)	<b>93</b>
浅井 航希	(上智大)	<b>18, 19, 20</b>
浅香 海斗	(横浜国大)	<b>91</b>
浅古 謙	(青学大)	<b>82</b>
朝倉 優哉	(九大)	<b>104</b>
浅野 将輝	(九大)	<b>136</b>
芦生 龍太郎	(岩手大)	<b>98</b>
淡路 恵	(東北大)	<b>115</b>
淡路 智	(東北大)	<b>2, 21, 22, 29, 31, 50, 64,</b> <b>65, 68, 153</b>

**B**

馬場 智澄	(NIFS)	<b>125</b>
BADEL Arnaud	(Grenoble Alpes 大)	<b>64</b>
伴野 信哉	(NIMS)	<b>18, 19, 20</b>

**C**

CHEGGOUR Najib	(SuperPower)	<b>154</b>
近森 希望	(鹿児島大)	<b>54, 57</b>
力石 浩孝	(NIFS)	<b>117, 125</b>
莊 浩謙	(阪大)	<b>103, 133</b>

**D**

土橋 律	(東京理科大)	<b>87</b>
------	---------	-----------

**E**

江口 朋子	(東芝)	<b>3</b>
遠藤 淳	(青学大)	<b>75, 82</b>

**F**

FISCARELLI Lucio	(CERN)	<b>119</b>
淵野 修一郎	(東大)	<b>48, 138, 143</b>
藤川 静一	(神戸大)	<b>84, 86</b>
藤野 正人	(京大)	<b>10, 11</b>
吹場 活佳	(静岡大)	<b>36</b>
福田 光宏	(阪大)	<b>103, 128, 133</b>
福井 聰	(新潟大)	<b>5, 7, 10, 11, 13</b>
福本 祐介	(鉄道総研)	<b>106, 107</b>
福山 寛	(東大)	<b>43</b>
二村 宗男	(秋田県立大)	<b>113</b>

**G**

高 雲飛	(京大)	<b>52</b>
後藤 英雄	(中部大)	<b>2</b>
後藤 拓也	(ヘリカルフュージョン)	<b>125</b>
GOURLAY Stephen	(Fermi Lab.)	<b>120</b>

**H**

灰田 悠希	(東大)	<b>51</b>
箱石 裕人	(岩手大)	<b>74, 98</b>
濱田 一弥	(量研機構)	<b>122, 123</b>
濱田 凌輔	(九工大)	<b>26</b>
濱田 大夢	(鹿児島大)	<b>57</b>

濱口 真司	(NIFS)	<b>45, 47, 125</b>
濱島 高太郎	(東北大)	<b>23, 34, 134</b>

濱本 拓郎	(九工大)	<b>26</b>
原 英和	(古河電工)	<b>5, 120</b>

原 知輝	(KHK)	<b>87</b>
原田 泰宏	(JFE スチール)	<b>46</b>

長谷川 博紀	(金沢大)	<b>38</b>
畠山 昭一	(量研機構)	<b>123</b>

甘日出 好	(近畿大)	<b>95, 96</b>
林 遼一	(京大)	<b>8</b>

逸見 智和	(サーマルブロック)	137	岩熊 成卓	(九大)	55, 56, 110, 111, 144, 146
東川 甲平	(九大)	30, 63, 136, 158	岩本 貴大	(岡山大)	71
姫野 雄輝	(九大)	55, 56	岩崎 韶	(青学大)	80
平井 寛一	(大陽日酸)	48	和泉 輝郎	(産総研)	32, 55
平本 幸暉	(神戸大)	86			
平野 直樹	(NIFS)	34, 40, 117, 126, 134			<b>K</b>
平塚 善勝	(住重)	41	掛谷 一弘	(京大)	92
平山 貴士	(住重)	37	垣内 政哉	(京大)	12
廣瀬 陽代	(産総研)	32, 55	隱崎 遼河	(福岡工大)	61
廣田 悠力	(岡山大)	131, 133	神谷 宏治	(NIMS)	39, 116
蛭海 悠人	(東大)	114	金尾 憲一	(住重)	41
菱沼 良光	(NIFS)	22	神田 昌枝	(中部大)	46, 105
本田 元氣	(住友電工)	27, 28, 29, 78	金木 大祐	(岩手大)	16
本多 尚	(京大)	9	蟹江 澄志	(東北大)	29
本田 翔也	(福岡工大)	61	KASHIKHIN Vadim (Fermi Lab.)	120	
堀 伊吹	(静岡大)	36	KASHIKHIN Vladimir (Fermi Lab.)	120	
掘出 朋也	(名大)	25	柏木 涼太	(九大)	55, 56, 110, 111
堀江 征生	(金沢大)	38	片岡 小春	(九大)	104
堀口 佳吾	(青学大)	27, 28, 78	片山 翔太	(大同大)	68
			加藤 好一	(佐竹マルチミクス)	137
			川畠 秋馬	(鹿児島大)	54, 57
市原 直	(フューザック・テクノロジーズ)	118, 119	河江 聖延	(神戸大)	86
井出 郁央	(名大)	52	川越 明史	(鹿児島大)	126, 127, 135, 146, 144
飯田 晃太郎	(東大)	114	川又 弘史	(KEK)	118, 119
飯嶋 安男	(NIMS)	58, 151	河野 亮介	(東大)	109
池本 由希子	(KEK)	118, 119	川嶺 秀亮	(神戸大)	86
池内 正充	(前川)	48	木戸 修一	(日立)	118
今川 信作	(NIFS)	145	紀井 俊輝	(理研)	76
今泉 圭佑	(九工大)	147	菊池 章弘	(NIMS)	22, 24, 58, 121, 151
稻垣 充	(住友電工)	29	菊地 紘生	(足利大)	137
猪俣 潤	(上智大)	34	金錫範	(岡山大)	58, 69, 70, 71, 131, 133, 151
井上 昌睦	(福岡工大)	59, 60, 61, 62	木村 誠宏	(東大)	118, 119
井上 良太	(岡山大)	58, 69, 70, 71, 131, 133,	木佐貫 晋吾	(大阪公立大)	49
		151	岸川 義明	(KHK)	87
石田 政義	(筑波大)	116	木須 隆暢	(九大)	30, 63, 136, 158
石原 篤	(鉄道総研)	99, 107	北口 仁	(NIMS)	157
石井 貴之	(秋田県立大)	113	北澤 英明	(NIMS)	38
石川 和洋	(京セラ)	38	木内 勝	(九工大)	26, 149
石渡 翔大	(東京農工大)	81	小林 弘明	(JAXA)	36
石山 敦士	(早大)	101, 102, 103, 124, 128,	小林 宏奏	(千葉大)	23
		129, 130, 131, 132	小林 亮太	(京大)	92
伊藤 聰	(JASTEC)	48	小林 慎一	(住友電工)	27, 28, 29, 78
伊東 智寛	(住友電工)	29	児玉 一宗	(日立)	156
伊藤 智庸	(東芝 ESS)	3	小濱 芳允	(東大)	64
IVANOV Yury	(中部大)	46, 105	公平 龍之介	(青学大)	150

小池 祐太郎	(住重)	37	宮城 大輔	(千葉大)	23			
小泉 太護	(大阪公立大)	<b>49</b>	宮本 将志	(京大)	92			
駒込 敏弘	(前川)	34	宮本 望夢	(福岡工大)	61			
薦田 遥暉	(岡山大)	<b>69, 70</b>	宮崎 寛史	(九大)	55, 56, 104, 110, 111, 144, 146			
小瀧 博司	(日立)	156	宮崎 智也	(九大)	136			
高阪 勇輔	(大阪公立大)	49	宮澤 順一	(ヘリカルフュージョン)	125			
小山 淳也	(京大)	15	水野 謙一郎	(MTL)	64			
小柳 圭	(東芝 ESS)	3	水登 伊知郎	(東京農工大)	81			
久保 毅幸	(KEK)	<b>89</b>	門田 健太	(大阪公立大)	49			
久保田 猛	(東海大)	152	毛利 誠一	(九工大)	<b>148</b>			
久米 俊輔	(東北大)	<b>153</b>	森田 充	(日本製鉄)	<b>83</b>			
國本 慧太	(青学大)	75, 82	諸井 翔	(九大)	136			
倉知 侑希	(同志社大)	<b>94</b>	諸永 拓	(NIMS)	18			
栗原 佑太	(東海大)	65	元木 貴則	(青学大)	27, 28, 75, 78, 80, <b>82</b> , 150			
来栖 努	(東芝 ESS)	53	MUN Ka Kei	(古河電工)	120			
桑名 一徳	(東京理科大)	87	村上 陽之	(量研機構)	<b>122</b> , 123			
<b>L</b>								
LEE Sergey	(FFJ)	30	MUYEEN S. M.	(カタール大)	136			
呂 高泰	(東大)	<b>108</b>	<b>N</b>					
<b>M</b>								
町 敬人	(産総研)	<b>32, 55</b>	永井 鳩介	(東海大)	65			
町屋 修太郎	(大同大)	66, <b>67</b> , 68, 154	永石 竜起	(住友電工)	29			
前川 一真	(神戸大)	84, 85, 86	長崎 陽	(東北大)	115			
楨田 康博	(KEK)	<b>34, 48, 134</b>	永田 秀輝	(鹿児島大)	<b>126</b> , 135			
MARINOZZI Vittorio	(Fermi Lab.)	120	内藤 智之	(岩手大)	16, 17, 74, 79, 98			
増澤 美佳	(KEK)	120	中林 正史	(日本製鉄)	83			
間藤 昂允	(北大)	<b>1</b>	中川 久司	(産総研)	<b>44</b>			
松本 明善	(NIMS)	59, 60, 62, 155	中川 心平	(鹿児島大)	144, 146			
松本 要	(名大)	<b>25</b>	中本 建志	(KEK)	4, 118, 119			
松本 一昭	(栃木カネカ)	46	中村 美幸	(FFJ)	30, 55, 56			
松本 宏一	(金沢大)	38	中村 衆	(KEK)	120			
松村 知岳	(Kavli IPMU)	114	中村 武恒	(京大)	<b>141</b> , 142			
松永 直也	(青学大)	82	中西 啓太	(関西学院大)	145			
松永 信之介	(岐阜高専)	<b>39, 88</b>	中納 晓洋	(KHK)	<b>87</b>			
松野 哲也	(有明高専)	93	中尾 健吾	(古河電工)	120			
松尾 祐斗	(福岡工大)	61	楢崎 勝弘	(新居浜高専)	41			
松岡 杏祐	(東海大)	<b>21, 50</b>	成嶋 吉朗	(NIFS)	<b>125</b>			
松下 玄	(東海大)	152	夏目 恭平	(NIMS)	39, 116			
馬渡 康徳	(産総研)	148, <b>159</b>	西 将汰	(神戸大)	<b>4</b> , 118			
召田 雅実	(東ソ一)	80	西田 雄詞	(九大)	55			
南前 俊介	(岡山大)	131, 133	西島 元	(NIMS)	157			
三島 史人	(福井工大)	<b>139</b> , 140	西嶋 茂宏	(福井工大)	139, <b>140</b>			
三戸 利行	(NIFS)	45, 48	西川 泰生	(京大)	<b>14</b>			
三浦 優	(九大)	144, 146	錦織 敏志	(岡山大)	<b>58</b> , 151			
			西本 守	(東芝 ESS)	3			
			西田 雄詞	(九大)	56			

仁田 旦三	(東大)	117	逢坂 昇汰	(東工大)	40
野口 聰	(北大)	1, 101, 103, 124, 128, <b>129</b> , 130, 131, 132, 133	長村 光造	(応用科学研)	66, 67, 154
野元 一宏	(三菱電機)	53	小田部 莊司	(九工大)	93, 147, 148
野村 直希	(福井工大)	139, 140	大谷 安見	(東芝 ESS)	3
野村 涼太	(福岡工大)	60	大塚 清見	(住重)	41
野村 新一	(明治大)	117	小山田 賢治	(KHK)	87
野中 利昭	(東芝 ESS)	5, 10, 11			<b>P</b>
能登 裕之	(NIFS)	22	PEREZ Juan Carlos (CERN)		119, 118
野澤 正和	(秋田高専)	47	PETRYKIN Valery (FFJ)		30
野末 竜弘	(アルバック・クライオ)	44			
沼澤 健則	(NIMS)	38			<b>R</b>
NUR RAHMAWATI Ayukaryana (東京農工大)	81		REN Mengyi (京大)		<b>142</b>

## O

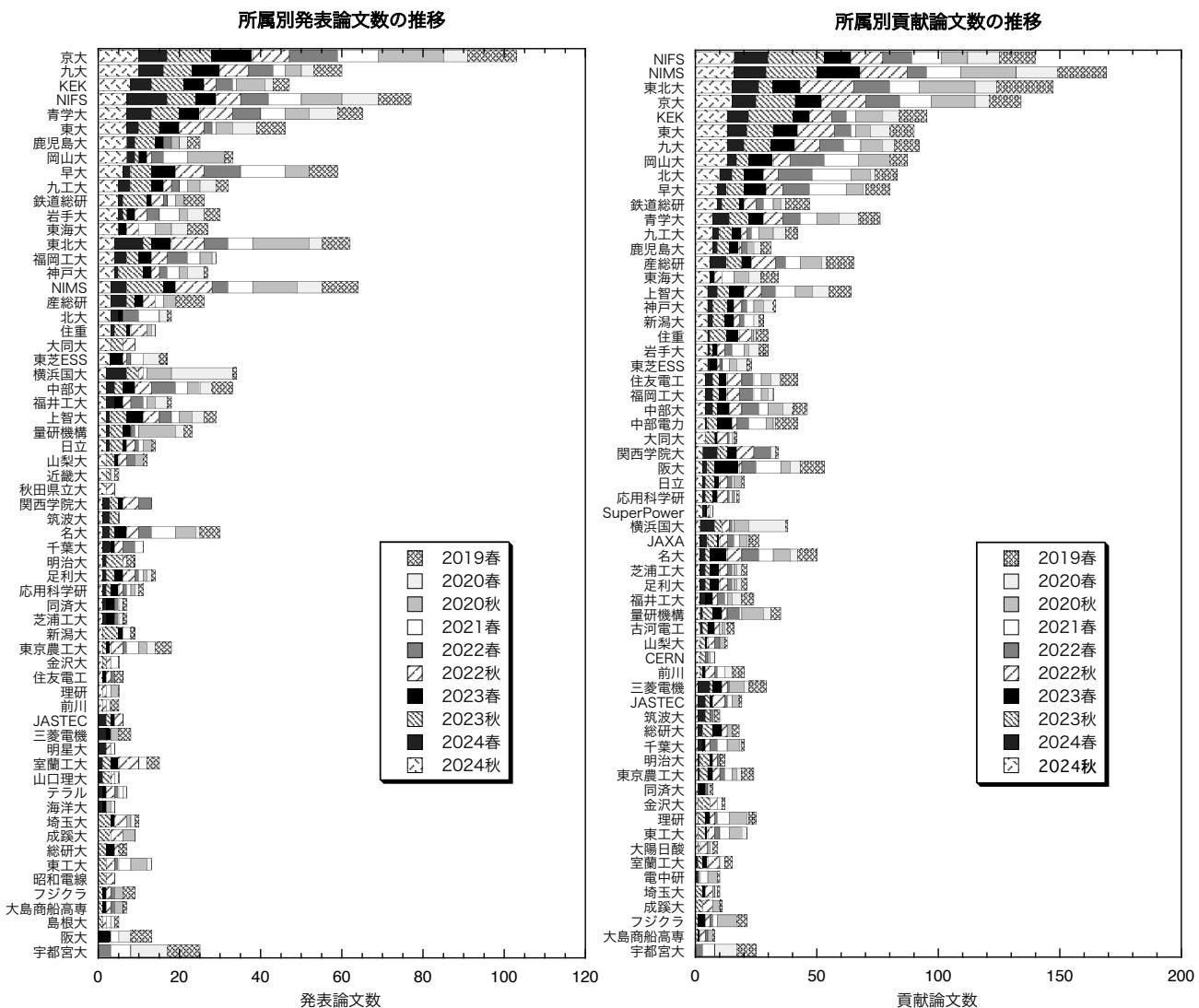
尾花 哲浩	(NIFS)	127, 135
大淵 匠真	(関西学院大)	145
小笠原 敦	(三菱電機)	53
緒方 隆充	(鉄道総研)	107
小川 純	(新潟大)	13
荻津 透	(KEK)	4, 12, 118, 119, 120
小黒 英俊	(東海大)	21, 22, 31, 50, 65, <b>152</b>
大橋 克也	(東海大)	21, 50
大崎 博之	(東大)	108, 109, 112, 114, 143
大内 徳人	(KEK)	24, 120
大屋 正義	(関西学院大)	88, 138, <b>145</b>
大石 遼真	(九大)	<b>55</b> , 56
大石 崇史	(早大)	<b>102</b>
岡 徹雄	(芝浦工大)	<b>77</b> , <b>137</b>
岡田 尚起	(KEK)	118, 119
岡田 竜太郎	(KEK)	118
岡田 達典	(九工大)	2, 29
岡井 敬一	(JAXA)	112
岡島 大地	(神戸大)	84
岡本 洋	(秋田県立大)	33
岡村 哲至	(東工大)	40
大川 祐平	(東海大)	<b>65</b>
大木 俊征	(KEK)	120
大久保 洑希	(東大)	143
大久保 龍一	(青学大)	<b>150</b>
奥村 韶月	(東大)	<b>114</b> , <b>143</b>
恩地 太紀	(鉄道総研)	99, 107
小野寺 優太	(NIFS)	40, 45, 125
尾上 凜空	(岡山大)	<b>58</b> , <b>151</b>
大井 修一	(NIMS)	62
折原 菜月	(早大)	<b>129</b> , <b>130</b>

## S

相楽 和豊	(青学大)	<b>27</b> , 28, 78
鷺山 玲子	(東大)	48
斎藤 明子	(NIMS)	38
斎藤 政通	(アルバック・クライオ)	44
堺 健司	(同志社大)	94
坂井 直道	(芝浦工大)	137
榎原 里樹	(北大)	<b>124</b>
坂本 久樹	(SuperPower)	5
坂本 溪太	(東芝 ESS)	<b>10</b> , 11
坂本 勇樹	(JAXA)	36
坂下 涼介	(新潟大)	13
作間 啓太	(山梨大)	72, 97
櫻井 韶介	(東北大)	<b>2</b>
佐野 尊	(KHK)	87
佐々 澄太	(九大)	55, 56
佐田 敦也	(九大)	104
佐藤 倖希	(大同大)	<b>66</b>
佐藤 正宗	(九大)	110, 111
佐藤 麻哉	(鹿児島大)	<b>54</b>
佐藤 迪夫	(SWCC)	136
佐藤 更	(神戸大)	84
佐藤 祐喜	(同志社大)	94
佐藤 明	(秋田県立大)	113
関 孝峻	(NIMS)	116
関根 芸妍	(足利大)	137
関根 智一	(ICUS)	140
関戸 真矢	(福岡工大)	<b>59</b> , 60
關谷 尚人	(山梨大)	72, 97
世良 真也	(九大)	<b>30</b> , <b>158</b>
柴野 佑太	(KHK)	87
志賀 優多	(KHK)	87

重政 茉於	(京大)	<b>6</b>	武田 実	(神戸大)	84, 85, 86			
島田 亜緒	(早大)	<b>103</b>	武田 泰明	(NIMS)	<b>157</b>			
嶋田 健	(関西学院大)	145	竹花 立美	(KHK)	87			
嶋田 雄介	(九大)	81	武中 悠一郎	(神戸大)	<b>86</b>			
清水 和花	(東京農工大)	81	玉利 優斗	(鹿児島大)	126, <b>135</b>			
下之園 勉	(東芝 ESS)	10, 11	田部 宏太郎	(静岡大)	36			
下山 淳一	(青学大)	27, <b>28</b> , 75, 78, 80, 82, 150	田邊 豪	(潤工社)	121			
新富 孝和	(KEK)	34, 117, 134	田中 秀樹	(日立)	<b>156</b>			
塙原 敬	(SWCC)	136	田中 啓文	(九工大)	93			
塙崎 琉登	(岡山大)	71	田中 賢一	(KEK)	118			
白井 穀	(NIMS)	116	田中 芳実	(住重)	<b>52</b>			
白木原 蒼	(応用科学研)	67	谷口 博康	(大阪合金)	22			
白土 裕一朗	(福岡工大)	<b>59, 60</b>	谷口 謙	(古河電工)	120			
宍戸 寛明	(大阪公立大)	49	谷口 貴紀	(東北大)	51			
曾我部 友輔	(京大)	5, 6, 7, 8, <b>9</b> , 10, 11, 13, 14, 15	田上 裕之	(NIFS)	<b>51</b>			
園田 翔梧	(量研機構)	<b>122, 123</b>	田島 穎久	(岩手大)	<b>17</b>			
SOURCE Hugo	(Grenoble Alpes 大)	64	寺西 亮	(九大)	155			
STOYNEV Stoyan	(Fermi Lab.)	120	寺尾 悠	(東大)	108, 109, 112, 114, <b>138</b> , 143			
須田 公平	(静岡大)	36	寺島 昭男	(KEK)	118, 119, 121			
末本 祐也	(東ソ一)	80	手呂内 拓人	(足利大)	137			
末永 恋太郎	(九大)	110, 111	飛山 真理	(KEK)	120			
末永 隆笑	(九大)	55, 56	戸田 亮	(東大)	<b>43</b>			
菅野 未知央	(KEK)	4, <b>12</b> , 68, <b>118</b> , 119	TODESCO Ezio	(CERN)	118, 119			
杉本 啓太郎	(京大)	92	戸川 欣彦	(大阪公立大)	49			
杉本 昌弘	(古河電工)	120	富田 優	(鉄道総研)	40, <b>73</b> , 99, 106, <b>107</b> , 114, 147, 100			
摺木 慎人	(鹿児島大)	<b>127</b>	戸坂 泰造	(東芝 ESS)	3, 10, 11			
鈴木 賢次	(鉄道総研)	158	坪田 修一郎	(栃木カネカ)	46			
鈴木 研人	(KEK)	4, 118, <b>119</b> , 120	土屋 勝彦	(量研機構)	122			
鈴木 孝明	(日立)	156	土屋 清澄	(KEK)	121			
<b>T</b>								
田渕 竜也	(九大)	136	土屋 雄司	(東北大)	<b>64, 153</b>			
立木 実	(NIMS)	59, 60, 62, 155	津田 理	(東北大)	23, 115			
田原 大夢	(日立)	118	辻本 学	(産総研)	92			
田橋 正浩	(中部大)	2	津森 将彦	(九大)	<b>110, 111</b>			
高田 順	(NIFS)	<b>47</b>	恒松 正二	(住重)	41			
高橋 明	(京大)	10, 11	鶴留 武尚	(住重)	37			
高橋 直人	(KEK)	118	堤 隼汰	(金沢大)	38			
高橋 俊一	(山梨大)	<b>72</b>	<b>U</b>					
高畠 一也	(NIFS)	<b>35</b>	植田 浩史	(岡山大)	58, 69, 70, 71, 101, 103, 128, 129, 130, <b>131</b> , 132, 133, 151			
高城 凜	(福岡工大)	60	上垣 栄季	(京大)	<b>7</b>			
高久 謙太	(QUP)	114	植木 竜一	(KEK)	<b>24, 120</b>			
鷹見 重幸	(NIFS)	47	宇野 淳也	(量研機構)	122			
高山 茂貴	(東芝 ESS)	5, 10, <b>11</b>						
武田 航太郎	(山梨大)	<b>97</b>						

浦中 智貴	(九大)	<b>155</b>	山本 春海	(鉄道総研)	<b>106, 107</b>
宇佐美 雄生	(九工大)	93	山本 優	(JSA)	24
薄井 勝富	(量研機構)	123	山本 聰	(量研機構)	122
宇都 達郎	(東芝 ESS)	3, 10, 11	山中 陸央	(横浜国大)	<b>90</b>
宇都宮 航生	(岡山大)	58, 151	山梨 裕希	(横浜国大)	90, 91
宇都宮 銀汰	(福岡工大)	<b>62</b>	山下 葵	(岡山大)	131, <b>133</b>
<b>V</b>					
VALIKOV Roman (FFJ)		30	山下 陽也	(神戸大)	<b>85</b>
VELEV Gueorgui (Fermi Lab.)		120	山崎 崇平	(京セラ)	38
<b>W</b>					
和久田 穀	(日立)	<b>53</b>	山崎 祐司	(神戸大)	4
王 旭東	(KEK)	<b>120, 121</b>	柳 長門	(NIFS)	88, 125
渡邊 裕文	(中部大)	46	柳澤 正樹	(日立)	118
渡部 智則	(中部電力)	128, 130, 131, 132	矢野 俊	(鉄道総研)	<b>99, 100, 107</b>
WILLERING Gerard (CERN)		119	安田 仰	(住重)	41
吳 澤宇	(九大)	<b>30, 63, 158</b>	安田 宏大	(秋田県立大)	<b>33</b>
<b>X</b>					
洗 明銳	(九工大)	<b>149</b>	矢田 裕貴	(総研大)	22
許 光輝	(京大)	<b>15</b>	矢崎 一斗	(千葉大)	<b>23</b>
許 航	(明治大)	117	横山 和哉	(足利大)	<b>77, 137</b>
XU Xingchen	(Fermi Lab.)	120	吉田 潤	(住重)	103, 128
<b>Y</b>					
谷貝 剛	(上智大)	18, 19, 20, 34, <b>134</b>	吉田 幸市	(九大)	55, 111
矢島 健大	(明治大)	<b>117</b>	吉田 尚貴	(鹿児島大)	<b>144, 146</b>
山田 穩	(中部大)	155	吉田 隆	(名大)	25
山口 作太郎	(中部大)	<b>46, 105</b>	吉藤 夢来	(早大)	<b>101</b>
山口 章	(青学大)	150	吉原 健彦	(住友電工)	27, 28, <b>29, 78</b>
山切 紫雲	(東大)	<b>112</b>	吉川 信行	(横浜国大)	90, 91
山本 明保	(東京農工大)	<b>81</b>	吉澤 侑希	(東海大)	<b>21, 50</b>
<b>Z</b>					
ZHANG Yifei		(SuperPower)	ZHANG Yifei	(SuperPower)	66
張 宇威	(九工大)		張 宇威	(九工大)	147
朱 紹偉	(同済大)		朱 紹偉	(同済大)	<b>42</b>



### 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。

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](mailto: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



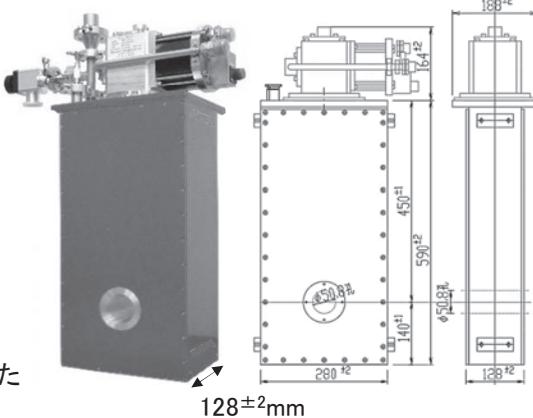
## 超薄型 無冷媒超電導マグネット

国内初!!

超電導マグネット厚さ128 $\pm$ 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128mm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64mmを実現いたしました

- ▶最大発生磁界±6T
- ▶室温ボア径  $\phi$  50.8mm
- ▶国内外最高クラスの高均一度  
均一度:  $\pm 0.1\%$  / 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

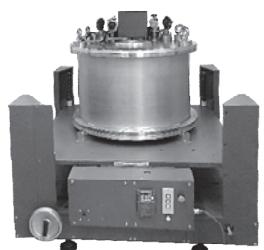


## 無冷媒超電導マグネットシリーズ

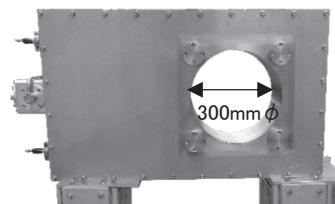
超電導マグネットメーカーとして設計から製作まですべて自社で実施しています  
使用用途に応じた超電導マグネットの製造が可能です。ご要望をお聞かせください

### 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
ヘルムホルツコイル	10T	70mm
	5T	50mm
	7T	50mm

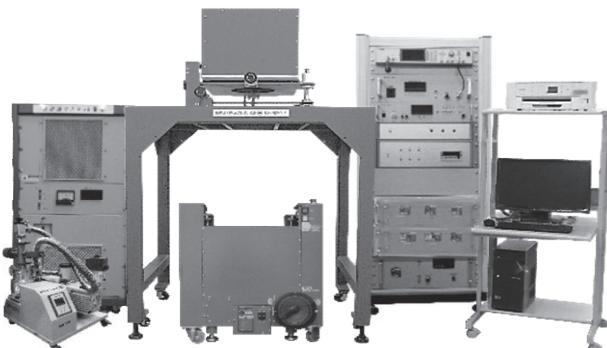


▲10Tソレノイドコイル  
オプション: GP-IB制御装置付き台車



▲5Tソレノイドコイル  
室温ボア径 300mm  $\phi$

## 無冷媒超電導マグネット式高感度VSMシステム

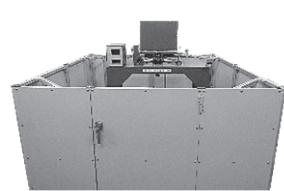


### -システム構成例-

◀ 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



▲シールド製作も可能

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フルーブ測定 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



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>



HP

最先端テクノロジーを支える!!



# 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动運転
- 8,000時間以上の連続運転
- 数多くの納入実績
- 万全のメンテナンス体制
- 消費電力が小さく、ランニングコストが低い
- 圧縮機をガス設備とすることが可能

主な仕様				
機種		L70	L140	L280
圧力1.0MPaG <sup>※1</sup> 未満時 の保証液化能力 <sup>※2</sup> ( )内はLN <sub>2</sub> 予冷なし	周波数 50Hz	32~63L/h (14~29L/h)	79~108L/h (34~50L/h)	153~233L/h (76~115L/h)
	周波数 60Hz	40~63L/h (18~29L/h)	79~107L/h (33~49L/h)	143~216L/h (69~106L/h)
概略寸法(mm)	Φ×H	1,100×2,600	1,300×2,600	1,600×2,600
消費電力(kW) (液化用圧縮機)	50Hz	42~76	89~114	141~210
	60Hz	51~75	91~113	133~224

※1:1.0MPaG以上も可能。  
※2:液化能力は純He使用時のものです。

※標準仕様以外にも、御要望により各種設計・製作致します。

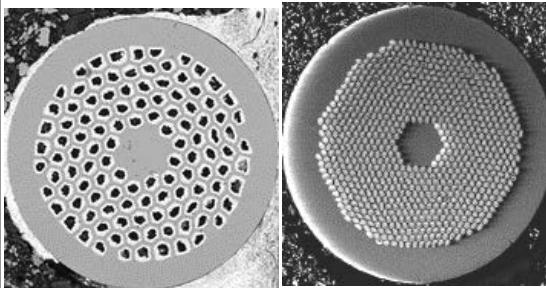
写真

Model type L280

### ■ 大陽日酸株式会社 ■

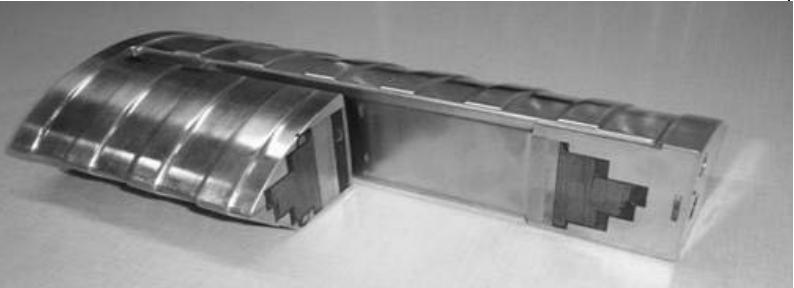
オンサイト・プラントユニット  
プラント事業部 宇宙・低温機器営業部  
〒210-0861 川崎市川崎区小島町6-2(京浜事業所)  
Tel:044-288-6937 Fax:03-6866-0111

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MgB<sub>2</sub>線をご提供いたします。またMgB<sub>2</sub> 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、Nb<sub>3</sub>Sn、MgB<sub>2</sub>、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 MgB<sub>2</sub> wire

High Jc Nb<sub>3</sub>Sn wire



MgB<sub>2</sub> 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

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

URL <http://www.nikiglass.co.jp>

TEL : 03-4218-4700 FAX : 03-4212-3423  
TEL : 06-6390-3220 FAX : 06-6390-3221

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ューコンプレッサーの採用、精製器内蔵などによる高効率、高信頼性のシステム

#### ●標準および特殊仕様の冷凍装置



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、各種クライオスタッフ、各種真空配管

ヘリウムガス回収用機器（高圧圧縮機、長尺容器、ガスバッグ）

リンデ社ヘリウム液化装置国内販売代理店

**小池酸素工業株式会社**  
**KOIKE SANSO KOGYO CO., LTD.**

<http://www.koikeox.co.jp>

ガス部 極限グループ

〒136-0072 東京都江東区大島9-1-1

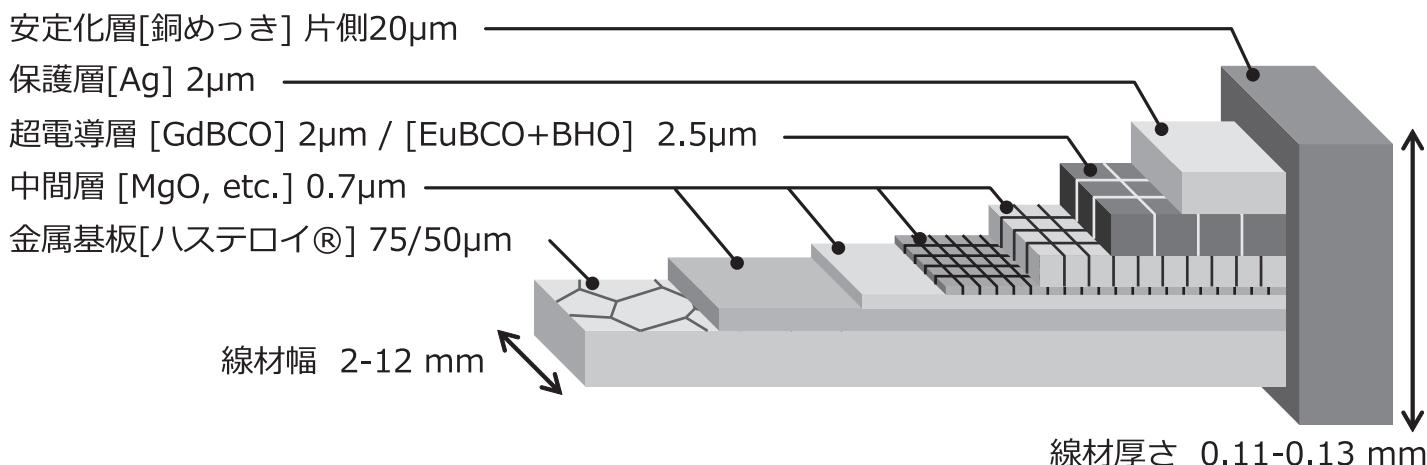
TEL03-5875-5045 FAX03-5875-5496

## ■ 特徴

- マグネット応用に適した高機械強度・高臨界電流特性
- フジクラ独自の主要製造技術 IBAD・PLD法
- 人工ピン導入により低温・高磁場での磁場中臨界電流特性を向上



## ■ 線材構造



## ■ 製品ラインアップ

型番	線材幅 [mm]	線材厚さ [mm]	金属基板 [μm]	安定化層 [μm]	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 *2
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。

# 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・デロームによりエア・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。

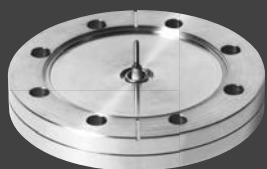
### 薄肉溶接パイプ

- ・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
- ・ニッケル電鋳スタンバ溶接
- ・チタン製医療器具
- ・クライオスタッフ銅部品溶接
- ・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  
トランシスファーチューブ溶接組立
- ・VCRなど真空継手溶接
- ・ウエハー搬送口ボット部品
- ・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](mailto:info@nkw.co.jp)



アルバック・クライオ株式会社

# 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



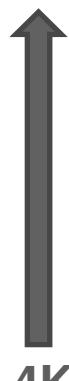
77K



20K



10K



4K



&lt;10mK

### 全自動無冷媒 [開発中] 希釈冷凍機



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フ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。
- ヘリウムの補充作業が不要となり、自動制御による連続無人運転が可能です。

型式	TRG-375DS	TRG-340DS
再凝縮能力※1)	18 L/day	10 L/day
消費電力	13kW/15kW (50/60 Hz)	
寸法(mm)※2)	W:740 D:740 H:1,670	



装置全体写真



設置例



装置全体写真



設置例

型式	TRG-330PT
再凝縮能力※1)	6 L/day
消費電力	6.5kW/7.5kW (50/60 Hz)
寸法(mm)※2)	本体 Φ:200 H:700 制御ユニット W:500 D:580 H835



BRUKER製 ASCEND400への取付例

## NMR装置搭載モデル TRG-305DS



推奨

本機はブルカージャパン株式会社殿より同社のNMR装置に付帯する設備として、ご推奨頂いております。

### 本機の特長

- 防振用ベローズ搭載
  - 既存NMRへの後付が可能
  - 液体ヘリウムのトランസファー不要
  - 設置に必要な天井高を大幅に緩和
- ※当社従来比

型式	TRG-305DS
再凝縮能力※1)	1 L/day
消費電力	6.5kW/7.5kW (50/60 Hz)
寸法(mm)※2)	本体 Φ:190 H:660 制御ユニット W:530 D:400 H660

※1) 300Kのヘリウムガスを使用した場合となります。

※2) トランസファー部は含みません。

※外観・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 ガス事業部 営業開発部 機器・工事営業課

TEL:03-5788-8305 (代) E mail:U04200@tn-sanso.co.jp



**TAIYO NIPPON SANZO**  
The Gas Professionals