



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.109 (2025)

第109回 2025年度春季

低温工学・超電導学会 研究発表会 講演概要集

2025年
5月28日，29日，30日

タワーホール船堀+WEB

〒134-0091 東京都江戸川区船堀4-1-1

主催 公益社団法人 低温工学・超電導学会

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

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

109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.

2025 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会

2025 年 5 月 28 日 (水) ~5 月 30 日 (金)

会 場： タワーホール船堀 + WEB

所在地：〒134-0091 東京都江戸川区船堀 4-1-1

参加費： 今回より参加費が一部改訂になっています。

お支払いはクレジットカード、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 (4 月 23 日 (水) ~ 5 月 14 日 (水) 17 時)

正会員 * 12,000 円, 賛助会員 ** 13,000 円, 協賛等団体会員個人 *** 17,000 円, 学生 4,000 円,
非会員 (一般) 22,000 円, 非会員 (学生) 5,000 円

期限後申込 (5 月 14 日 (水) 17 時以後)

正会員 * 14,000 円, 賛助会員 ** 15,200 円, 協賛等団体会員個人 *** 20,000 円, 学生 5,000 円,
非会員 (一般) 26,000 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 6,000 円 (期限後申込は 7,000 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： 5 月 29 日 (木) 18:30 - 20:30

会場：大庄水産 船堀店

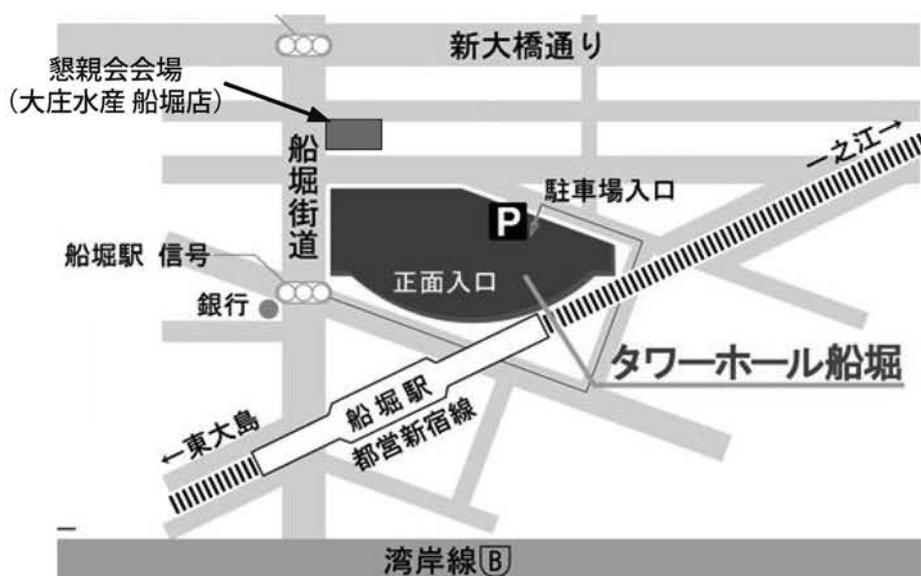
参加費：6,500 円

主 催： 公益社団法人 低温工学・超電導学会

電話：03-3818-4539 Fax：03-3818-4573

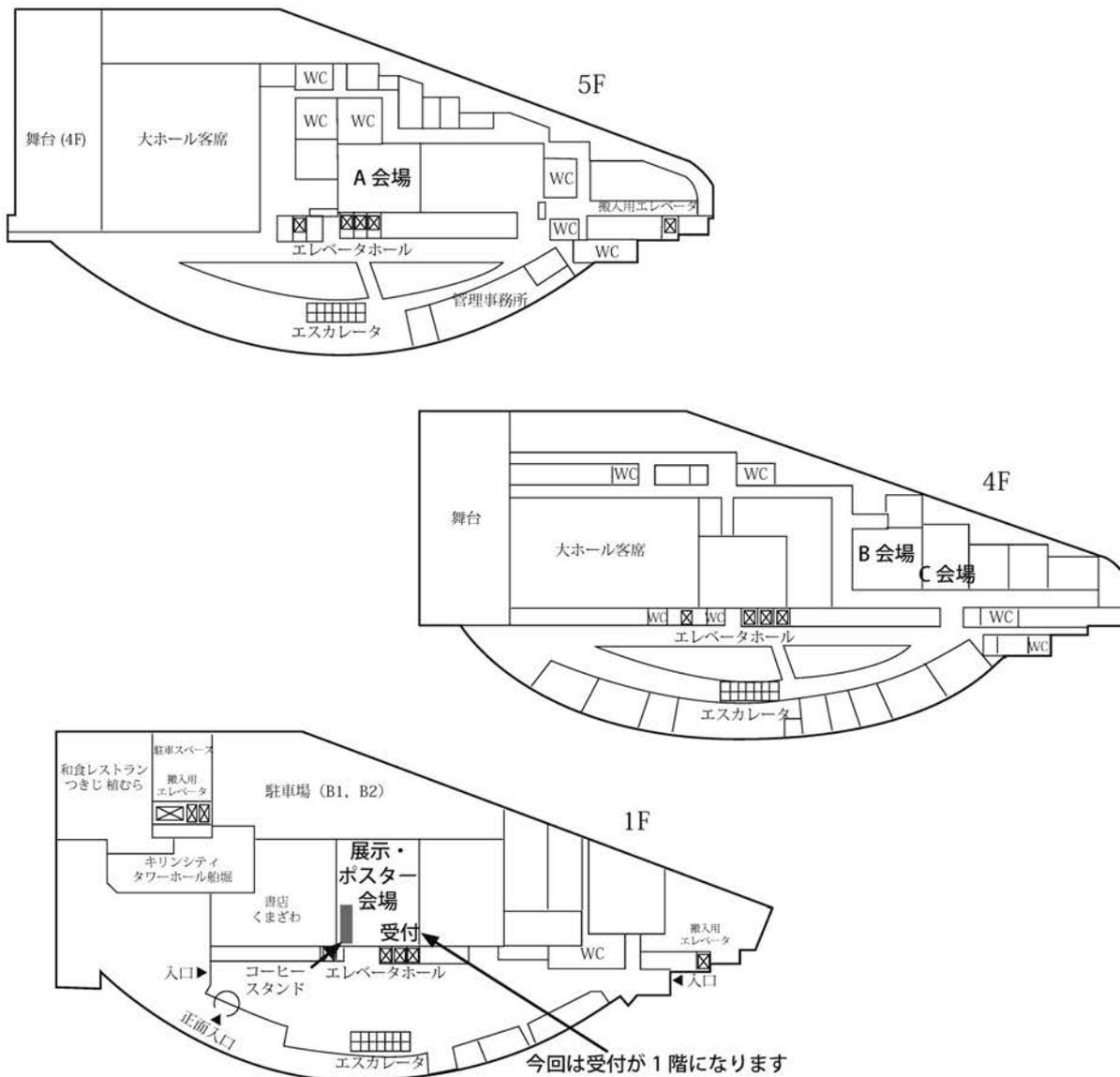
協 賛： 応用物理学会, 電気学会, 日本物理学会, 日本機械学会, 日本表面真空学会, 日本冷凍空調学会

交通案内：都営新宿線「船堀駅」北口より徒歩 1 分



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

会場配置図：タワーホール船堀



講演の形式：詳細は低温工学・超電導学会のホームページをご覧ください。

<https://www.csj.or.jp/conference/2025s/>

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を使用させていただきます。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120cm、高さ180cmのパネルが用意されます。ポスターは、同一セッション内の他の発表者も見られるよう手短紹介が始まる30分前には指定の場所に掲示し、終了後は直ちに撤去してください。パネルには講演番号しか掲示されていませんので、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(5月28日、5月30日)の「ポスター手短紹介」にて1件1分以内で概要を話させていただきます。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。

2025 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会 セッションテーブル

	A 会場	B 会場	C 会場
5 月 28 日 (水)	受付 10:00 ~		
	11:00 - 12:00 高エネルギー加速器 (1) p. 1	10:45 - 12:00 HTS 輸送・交流特性 (1) p. 11	10:15 - 11:15 産業応用 (1) p. 21
			11:30 - 12:00 液体水素環境材料試験 p. 25
	昼食		
	ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 13:45 (A 会場)		
	ポスターセッション I 13:45 - 15:00 (Poster 会場) REBCO 線材・導体 p. 33, 高エネルギー加速器 (2) p. 36, 小型冷凍機コンポーネント (1) p. 37, 回転機用高温超電導導体 p. 38, 回転機 (1) p. 41, 産業応用 (2) p. 45		
	15:15 - 16:45 核融合・導体・線材 p. 5	15:15 - 16:30 HTS 輸送・交流特性 (2) p. 16	15:15 - 16:45 回転機 (2) p. 27
小型核融合調査研究会開催セッション 17:00 - 19:00 (A 会場)			
5 月 29 日 (木)	9:30 - 11:00 超電導・低抵抗接合 p. 49	9:30 - 10:45 HTS 電気機械特性 p. 59	9:30 - 10:45 計測・物性 p. 69
	11:15 - 12:15 安定性・コイル保護 p. 55	11:00 - 12:15 ピンニング p. 64	11:00 - 12:15 熱伝達・冷却システム (1) p. 74
	昼食		
	特別セッション 13:15 - 14:00 (A 会場) フェロー塾「社会実装を目指し続けた超電導応用技術開発」		
	論文賞受賞記念講演 14:15 - 16:00 (A 会場) p. 79		
	山藤 馨先生追悼セッション 16:15 - 17:00 (A 会場)		
	社員総会 17:15 - 18:15 (A 会場)		
懇親会 (大庄水産 船堀店) 18:30 - 20:30			
5 月 30 日 (金)	9:30 - 10:30 無絶縁 REBCO コイル p. 85	9:15 - 10:30 バルク作製 (1) p. 98	9:15 - 10:30 冷却システム (2) p. 112
	ポスター手短紹介 10:45 - 11:00 (A 会場)		
	ポスターセッション II 11:00 - 12:15 (Poster 会場) HTS 輸送特性・解析 p. 126, HTS 交流損失・構造 p. 130, 小型冷凍機コンポーネント (2) p. 134, 水素資源 p. 135, HTS マグネット p. 136, 着磁特性 (1) p. 139		
	昼食		
	13:15 - 14:15 SCSC ケーブル (1) p. 89	13:15 - 14:00 REBCO 薄膜 p. 103	13:15 - 14:30 小型冷凍機 p. 117
14:30 - 15:45 SCSC ケーブル (2) p. 93	14:15 - 15:45 バルク作製 (2)・着磁特性 (2) p. 106	14:45 - 15:45 MgB ₂ p. 122	

※プログラムの詳細は <https://csj.or.jp/conference/2025s/> をご覧ください。

2025 年度春季低温工学・超電導学会研究発表会 実行委員会

現地実行委員会

委員長	石山 敦士	早稲田大学
委員	植田 浩史	岡山大学
	村上 陽之	量子科学技術研究開発機構
	王 旭東	高エネルギー加速器研究機構
	宮城 大輔	千葉大学

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
--	-------	-----------

■小型核融合調査研究会開催セッション「加速する世界の高温超電導小型核融合開発」

日時：5月28日（水）17:00～19:00

場所：A会場

■フェロー塾

日時：5月29日（木）13:15～14:00

場所：A会場

「社会実装を目指し続けた超電導応用技術開発」

石山 敦士（早稲田大学）

■論文賞受賞記念講演

日時：5月29日（木）14:15～16:00

場所：A会場

論文賞（学術）

受賞者：長崎 陽（東北大学），津田 理（東北大学）

対象論文：「高温超電導コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの商用周波数運用時における電力伝送特性」

低温工学 第58巻1号，19～26頁

論文賞（技術）

受賞者：伊東 徹也（テラル株式会社，新潟大学），福井 聡（新潟大学），河島 裕，緒方 康博（テラル株式会社），

古瀬 充穂（(国研)産業技術総合研究所），渡部 智則（中部電力株式会社），小川 純（新潟大学）

対象論文：「高温超電導マグネットを用いたアルミ押出成形用400kW級直流誘導加熱装置の開発」

低温工学 第58巻3号，124～131頁

解説論文賞

受賞者：伴野 信哉（(国研)物質・材料研究機構）

対象論文：「第3元素添加Nb₃Sn線材のSn拡散と微細組織」

低温工学 第58巻3号，95～107頁

■山藤 馨先生追悼セッション

日時：5月29日（木）16:15～17:00

場所：A会場

5月28日(水)
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。

5月28日(水) A会場 11:00-16:45

高エネルギー加速器(1) 11:00-12:00 座長: 諏訪友音

- 1A-a01 加速器用HTSマグネットの開発(13-1) - 溝巻きREBCO補正2極マグネットの開発 - 1
土屋清澄, 王旭東, 寺島昭男(KEK); 菊池章弘(NIMS)
- 1A-a02 加速器用HTSマグネットの開発(13-2) - 不均一銅メッキREBCO線材を用いたREBCO丸型ケーブルの
4.2Kと磁場中の臨界電流特性 - 2
王旭東, 土屋清澄, 寺島昭男(KEK); 田邊豪(潤工社); 菊池章弘(NIMS)
- 1A-a03 永久電流通電MRI磁石の受動シミングされた磁場における強度分布変動原因の定量的検討 3
阿部充志, 佐々木憲一, 荻津透, 三部勉, 下村浩一郎(KEK); 杉田萌, 高柳智弘(原子力機構);
飯沼裕美(茨城大)
- 1A-a04 真空環境下でガンマ線照射された超伝導マグネット含浸用樹脂の曲げ強度 4
王旭東(KEK); 菊池章弘(NIMS); 竹内正基(RIMTEC); 村上陽之, 園田翔梧,
濱田一弥(量研機構)

昼食 12:00-13:00

核融合・導体・線材 15:15-16:45 座長: 鈴木研人

- 1A-p01 JT-60SA超伝導コイルの絶縁補強の進捗 5
村上陽之, 土屋勝, 大西祥広, 山本聡, 宇野淳也, 園田翔梧, 濱田一弥(量研機構)
- 1A-p02 JT-60SA超伝導コイルにおける高電圧保護のためのホットスポット温度評価 6
園田翔梧, 村上陽之, 濱田一弥(量研機構); ZANI Louis (Fusion for Energy)
- 1A-p03 ITER中心ソレノイド導体の分流開始温度と導体構造の相関 7
諏訪友音, 磯野高明, 辺見努(量研機構)
- 1A-p04 スパース・タブロー法の発展型アルゴリズムを用いた大型CIC導体の高速電流分布解析 8
谷貝剛, 金子和宏, 星野壮太(上智大); 伴野信哉, 北口仁(NIMS); 宇藤裕康(量研機構);
濱島高太郎(東北大)
- 1A-p05 HTS STARS導体の機械的エッジジョイントにおける接合抵抗の導体構造依存性 9
比村元彦, 伊藤悟(東北大); 柳長門(NIFS); 橋爪秀利(東北大)
- 1A-p06 内部スズ法Nb₃Sn線材におけるTi・Zn共添加手法の検討 10
伴野信哉(NIMS); 谷貝剛(上智大)

5月28日(水) B会場 10:45-16:30

HTS輸送・交流特性(1) 10:45-12:00 座長: 高山茂貴

- 1B-a01 様々なRE123薄膜における酸素組成制御 11
下山淳一, 相楽和豊, 畠直輝, 元木貴則(青学大); 吉原健彦, 本田元気, 小林慎一(住友電工)
- 1B-a02 REBCO多岐線の製造方法と微細構造 12
金沢新哲, 陰山彰, 中西優斗, 竹本悠莉(室蘭工大)
- 1B-a03 差動コイル式磁化測定システムの開発によるミリサイズのREBCO線材の交流損失測定 13

金沢 新哲, 西山 凌平 (室蘭工大)

- 1B-a04 低温磁場環境下における REBCO 長尺線材の I_c のバラツキの実測と測定条件の影響に関する考察 ----- 14
木須 隆暢, 呉 澤宇, 東川 甲平 (九大)
- 1B-a05 ハイエントロピー型 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超伝導薄膜における照射耐性の向上 ----- 15
山下 愛智, 山中 慎大, 室井 孝太, 水口 佳一 (都立大); 金子 卓人, 大野 直子 (横浜国大)

昼食 12:00 - 13:00

HTS 輸送・交流特性 (2) 15:15 - 16:30 座長: 松本 明善

- 1B-p01 パルス電流と回転ステージを組み合わせた 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 ----- 16
土屋 雄司 (東北大); SOURICE Hugo, BADEL Arnaud (Grenoble Alpes 大); 野島 渉平 (東北大);
水野 謙一郎 (MTL); 小濱 芳允 (東大); 淡路 智 (東北大)
- 1B-p02 機械学習を導入したリール式磁気顕微観察による REBCO 線材の局所不均一性の汎用的解析手法の検討:
空間解像度による影響 ----- 17
呉 澤宇, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)
- 1B-p03 水平配列 REBCO 超伝導線材の交流損失特性 ----- 18
佐々 滉太, 大石 遼真, 姫野 雄輝, 末永 隆笑, 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓 (九大)
- 1B-p04 積層厚膜型 Bi2223 短尺テープの作製 ----- 19
太久保 龍一, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)
- 1B-p05 接続部のある線材 Bi22223 と RE123 の短絡電流試験 ----- 20
山口 作太郎, 林 一冨, 仁田野 陽菜, 神田 昌枝, IVANOV Yury, 渡辺 裕文 (中部大)

5月28日 (水) C会場 10:15 - 16:45

産業応用 (1) 10:15 - 11:15 座長: 小田部 荘司

- 1C-a01 EV の急速充電用超電導 DCDC コンバータの高昇圧比・大電流化 ----- 21
谷貝 剛 (上智大); 槇田 康博, 新富 孝和 (KEK); 平野 直樹 (NIFS); 濱島 高太郎 (東北大)
- 1C-a02 ワイヤレス電力伝送用高 Q 値 LC 共振器のための超低損失コンデンサの開発 ----- 22
三品 海京, 作間 啓太, 關谷 尚人 (山梨大)
- 1C-a03 並列巻線を適用した kA 級 SMES ケーブルの電流分布評価 ----- 23
東川 甲平, 宮崎 智也, 木須 隆暢 (九大); 佐藤 迪夫, 塩原 敬 (SWCC)
- 1C-a04 磁気分離法による汚染土壌中からの常磁性粘土鉱物の分離プロセスの検討 ----- 24
三島 史人, 野村 直希, 西嶋 茂宏 (福井工大)

休憩 11:15 - 11:30

液体水素環境材料試験 11:30 - 12:00 座長: 谷貝 剛

- 1C-a05 液化水素関連機器の研究開発を支える材料評価基盤の整備 ----- 25
小野 嘉則, 和田 健太郎, 早川 正夫, 片山 英樹, 日比 政昭, 清水 禎 (NIMS)
- 1C-a06 液化水素および低温水素ガス環境下での引張特性評価 ----- 26
小野 嘉則, 和田 健太郎, 寺田 隼斗, 福田 真菜, 小松 誠幸, 由利 哲美, 緒形 俊夫, 早川 正夫,
片山 英樹, 日比 政昭, 清水 禎 (NIMS)

昼食 12:00 - 13:00

回転機(2) 15:15 - 16:45 座長：小柳 圭

1C-p01	鉄心スロット内に配置した多芯金属撚線における損失の定量的評価-----	27
	柁川一弘, 豆塚 佑斗, 古椿 雅裕 (山理大); 中村 武恒 (京大); 菊池 章弘 (NIMS); 増田 直樹, 三浦 知仁 (西島)	
1C-p02	永久磁石回転子を用いた交流損失測定装置の精度向上-----	28
	奥村 皇月, 大久保 洗希 (東大); 寺尾 悠 (京大); 淵野 修一郎, 大崎 博之 (東大)	
1C-p03	極低温液化ガス向けポンプに用いる超電導磁気軸受及びモータ回転子試験装置-----	29
	寺尾 悠 (京大); 奥村 皇月, 淵野 修一郎 (東大)	
1C-p04	高温超電導誘導同期モータにおける自律回転安定性の理論検討と超高速起動試験-----	30
	中村 武恒, 中田 雅大 (京大)	
1C-p05	三相通電時の巻線内転位を適用した三本並列導体を用いた電機子コイルの電流分流通特性の評価-----	31
	川崎 剛輝 (都城高専); 井上 智博, 木村 優大, 三浦 峻, 宮崎 寛史 (九大); 川越 明史 (鹿児島大); 岩熊 成卓 (九大)	
1C-p06	液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(4) - 液体水素試験結果 - -----	32
	大屋 正義, 嶋田 健, 大淵 匠真, 後燈明 拓見, 岡部 宗也, 鈴木 大聖 (関西学院大); 今川 信作, 濱口 真司 (NIFS); 小林 弘明 (JAXA)	

ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 13:45 (A会場)

5月28日(水) ポスターセッションI Poster会場 13:45 - 15:00

REBCO線材・導体 13:45 - 15:00 座長：元木 貴則

1P-p01	高配向度 REBa ₂ Cu ₃ O _y の作製に向けた磁場配向用磁石アレイ幅の検討-----	33
	AHMED Muhammad Afiq, 足立 伸太郎, KAHAGALLA Pamoda, 福山 風人, 木村 史子, 堀井 滋 (京都先端科学大)	
1P-p02	REBCO ロバストコイル構造を模擬した2枚バンドル REBCO 導体における転流現象-----	34
	土屋 雄司, 矢口 結翔, 櫻井 響介, 淡路 智 (東北大)	
1P-p03	航空機用電気モーター向け RE 系超電導線材の工業規模の細線化加工-----	35
	中村 美幸 (Faraday Factory Japan); 町 敬人, 廣瀬 陽代, 和泉 輝郎 (産総研); 岩熊 成卓 (九大); PETRYKIN Valery, LEE Sergey (Faraday Factory Japan)	

高エネルギー加速器(2) 13:45 - 15:00 座長：村上 陽之

1P-p04	FPGA 統計処理を活用したクエンチ前兆を捕捉するイベントトリガーシステムの開発-----	36
	鈴木 研人, 菅野 未知央, 中本 建志, 池本 由希子, 荻津 透, 田中 賢一, 岡田 竜太郎, 高橋 直人 (KEK)	

小型冷凍機コンポーネント(1) 13:45 - 15:00 座長：仲村 直子

1P-p05	CuFe _{1-x} Al _x O ₂ の 4 K 蓄冷材としての GM 冷凍機による性能評価-----	37
	増山 新二 (大島商船高専); 寺田 典樹, 間宮 広明, 齋藤 明子 (NIMS)	

回転機用高温超電導導体 13:45 - 15:00 座長：寺尾 悠

1P-p06	液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(1) - 単線 1 ターンコイル検証 - -----	38
	大淵 匠真, 嶋田 健, 大屋 正義 (関西学院大); 今川 信作 (NIFS)	
1P-p07	液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(2) - 単層集合導体模擬コイル検証 - -----	39
	嶋田 健, 大淵 匠真, 大屋 正義 (関西学院大); 今川 信作 (NIFS)	
1P-p08	液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(3) - 液体窒素試験 - -----	40
	後燈明 拓見, 岡部 宗也, 嶋田 健, 大淵 匠真, 大屋 正義 (関西学院大); 今川 信作 (NIFS)	

回転機(1) 13:45 - 15:00 座長：大屋 正義

1P-p09	永久磁石回転子・超電導電機子巻線の同期モータの設計検討-----	41
	下村 悠斗, 大崎 博之 (東大); 寺尾 悠 (京大)	
1P-p10	超電導コイルに回転磁界を印加したときの交流損失測定における渦電流の影響-----	42
	大久保 洗希, 奥村 卓月 (東大); 寺尾 悠 (京大); 淵野 修一郎, 大崎 博之 (東大)	
1P-p11	REBCO 転位並列導体で構成したレーストラック型電機子コイルの同期モータ環境下における電流 分流特性-----	43
	木村 優大 (九大); 川崎 剛輝 (都城高専); 石原 昌幸, 井上 智博, 三浦 峻, 宮崎 寛史 (九大); 川越 明史 (鹿児島大); 岩熊 成卓 (九大)	
1P-p12	非線形電流輸送特性の磁場ベクトル依存性を考慮したかご形誘導モータにおける 高温超伝導ロータバーの精密設計-----	44
	山本 真嘉, 中村 武恒 (京大)	

産業応用(2) 13:45 - 15:00 座長：東川 甲平

1P-p13	超伝導線材とハルバツハ配列永久磁石を用いた磁気浮上工具の有限要素法による電磁界解析-----	45
	清水 拓真, 小田部 エドモンド 荘司, 鈴木 恵友, 山本 颯真 (九工大)	
1P-p14	極低温下における半導体素子の導通特性-----	46
	増田 光希, 許 航, 野村 新一 (明治大); 力石 浩孝 (NIFS)	
1P-p15	円形流路断面を持つ電磁力型海水・油分離装置の構造と分離実験-----	47
	白石 浩貴, AMORIM Kenji, 青山 陽志, 秋田 有輝, 浅野 晃平, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二 (神戸大)	
1P-p16	高温超電導応用分野における有限要素電磁界解析の適用性について-----	48
	渡辺 陽平, 片桐 弘雄, 佐野 広征, たに 浩司, 山田 隆 (JSOL)	

小型核融合調査研究会開催セッション 17:00 - 19:00 (A会場)

5月29日(木) A会場 9:30 - 18:15

超電導・低抵抗接合 9:30 - 11:00 座長：筑本 知子

2A-a01	YbBCO 中間層による REBCO 線材間超伝導接合の作製-----	49
	加藤 志織, 千野 好輝, 佐野 優太, 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)	
2A-a02	EuBCO 線材の超電導接続技術と接続抵抗評価(1) 超電導粉末を用いた接続構造の作製・評価-----	50
	江口 朋子, ALBESSARD 恵子 (東芝); 武田 泰明, 西島 元 (NIMS)	
2A-a03	EuBCO 線材の超電導接続技術と接続抵抗評価(2) 閉ループ試料を使った電流減衰測定-----	51
	武田 泰明 (NIMS); 江口 朋子, ALBESSARD 恵子 (東芝); 西島 元 (NIMS)	
2A-a04	量産評価用ジョイントテスト装置の開発(III) - ループインダクタンスの算定・検証方法 - -----	52
	横山 彰一 (JASTEC)	
2A-a05	REBCO 線材の半田フリー音波接合における接合抵抗率のモデリングと推定に関する検討-----	53
	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)	
2A-a06	REBCO テープ線材のインジウム箔を用いたラップジョイントにおける接合抵抗の接合前プロセス および保管温度に対する依存性評価-----	54
	田村 怜於, 伊藤 悟 (東北大); 柳 長門 (NIFS); 橋爪 秀利 (東北大)	

休憩 11:00 - 11:15

安定性・コイル保護 11:15 - 12:15 座長：王 旭東

2A-a07	HTS コイルにおけるオーバーシュート法の遮蔽電流磁場変動抑制効果に関する簡易解析-----	55
--------	--	----

秦 優作, 後藤 大人, 長崎 陽, 津田 理 (東北大)

2A-a08	RE系線材による非含浸パンケーキコイルの超電導特性および伝熱特性評価試験-----	56
	小柳 圭, 大谷 安見, 真島 周也, 宇都 達郎, 稲富 誉也 (東芝 ESS); 下山 禎朗, 内田 健哉 (東芝); 伊藤 智庸, 戸坂 泰造 (東芝 ESS)	
2A-a09	REBCO 3 ターンコイルの液体水素/窒素中の熱暴走におけるカプトン絶縁の影響-----	57
	今川 信作 (NIFS); 大屋 正義 (関西学院大); 白井 康之 (京大); 濱口 真司 (NIFS); 岩本 晃史 (阪大); 小林 弘明 (JAXA)	
2A-a10	Nb ₃ Al 極細線材を用いた REBCO 線材のクエンチ検出手法の基礎研究-----	58
	伊藤 悟, 千藏 陽大 (東北大); 西島 元, 菊池 章弘 (NIMS); 橋爪 秀利 (東北大)	

5月29日(木) B会場 9:30-12:15

HTS 電気機械特性 9:30-10:45 座長: 岡田 達典

2B-a01	パルス通電法を用いた REBCO 線材の中低温域における電気機械特性評価-----	59
	久米 俊輔, 土屋 雄司, 淡路 智 (東北大)	
2B-a02	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(2) 塑性変形の効果-----	60
	長村 光造 (応用科学研); 町屋 修太郎 (大同大)	
2B-a03	REBCO 薄膜のナノインデントによる硬さ評価方法の検討(その2)-----	61
	浦中 智貴 (九大); 立木 実, 松本 明善 (NIMS); 山田 穰 (中部大); 寺西 亮 (九大)	
2B-a04	REBCO 切断面の断面観察-----	62
	町屋 修太郎 (大同大); 長村 光造 (応用科学研); ZHANG Yifei (SuperPower)	
2B-a05	パルス電流測定による高性能ステンレス鋼/銀シース Ba _{1-x} K _x Fe ₂ As ₂ テープの輸送特性-----	63
	羅 珺怡 (東北大); 韓 萌 (IEECAS); 久米 俊輔, 土屋 雄司 (東北大); 馬 衍偉 (IEECAS); 淡路 智 (東北大)	

休憩 10:45-11:00

ピンニング 11:00-12:15 座長: 土屋 雄司

2B-a06	REBCO 薄膜線材の磁束ピンニングの TDGL 解析 - ピン体積分率の効果-----	64
	松本 要, 堀出 朋哉, 吉田 隆 (名大)	
2B-a07	酸化物原料を用いた FF-MOD 法共添加 Y123 薄膜の厚膜化-----	65
	相楽 和豊, 畠 直輝, 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)	
2B-a08	FF-MOD 法 Gd123 超伝導薄膜の新奇 Gd214 人工ピン導入による高 J _c 化-----	66
	石井 涼太, 三浦 大介, 垂水 聖也, 堀内 柚冶 (都立大)	
2B-a09	Ca 組成が (Y _{1-x} Ca _x)Ba ₂ Cu ₃ O _y 線材の超伝導特性に及ぼす影響-----	67
	中島 恒成, 藤本 竜那, 大木元 勇貴, 三浦 正志 (成蹊大)	
2B-a10	Gurevich-Cooley の粒界ピンニングモデルの一軸異方的超伝導への拡張 - Ba122 線材における I _c の磁場ヒステリシスの理解に向けて - -----	68
	岡田 達典 (九工大)	

5月29日(木) C会場 9:30-12:15

計測・物性 9:30-10:45 座長: 岩本 晃史

2C-a01	量子コンピュータ用大型希釈冷凍機の開発-----	69
	野末 竜弘, 木村 豊, 斎藤 政通, 大塚 洋一 (アルバック・クライオ); 西尾 樹, 藤原 裕也 (アルバック)	
2C-a02	短絡電流試験時の歪みゲージ測定-----	70
	神田 昌枝, 山本 実奈, 仁田野 陽菜, IVANOV Yury, 渡邊 裕文, 山口 作太郎 (中部大)	
2C-a03	超伝導体内部に侵入した水素が引き起こす量子現象-----	71

太子周, 落合陽介, 小池健生, 志賀雅亘, 橋爪健一, 稲垣祐次, 河江達也 (九大)

- 2C-a04 高純度銅線を用いた低温・低発熱ステッピングモーターの11K以下における発熱特性----- 72
秋澤涼介 (東大); 飯田光人 (たすく); 相澤耕佑 (東大); 片山伸彦 (カブリ数物宇宙連携研究機構);
草間光治 (AES); 前田明日香, 松村知岳, 中川潤 (カブリ数物宇宙連携研究機構); 大崎博之,
奥村阜月 (東大); 桜井雄基 (諏訪理科大); 高久諒太 (KEK); HOANG Thuong (Minnesota 大);
GHIGNA Tommaso (KEK); 寺尾悠 (京大)
- 2C-a05 液体窒素温度における磁気シールド用軟磁性材料の磁気特性評価----- 73
白石智也, 川原健太郎, 井上良太, 植田浩史, 金錫範 (岡山大)

休憩 10:45 - 11:00

熱伝達・冷却システム (1) 11:00 - 12:15 座長: 増山新二

- 2C-a06 液体窒素中における樹脂コーティング伝熱面のライデンフロスト温度----- 74
高畑一也 (NIFS)
- 2C-a07 液体窒素沸騰冷却におけるT型特殊フィンの構造検討----- 75
結城光平, 松尾奏朗, 結城和久 (山理大)
- 2C-a08 蒸発水素ガスにおけるパラ-オルト変換反応速度に及ぼす貯蔵圧力と温度の影響----- 76
岡島大地, 前川一真, 藤川静一, 武田実 (神戸大)
- 2C-a09 液体水素タンクにおける真空断熱層劣化時の模擬実験----- 77
高田卓, 濱口真司, 鷹見重幸 (NIFS); 野澤正和 (タイ高専); 小林弘明 (JAXA)
- 2C-a10 多層断熱材の巻き方の違いによる熱侵入量測定----- 78
渡邊裕文, 小林裕彬, 加藤向志, 大塚真琴, 神田昌枝, 山口作太郎 (中部大)

昼食 12:15 - 13:15

特別セッション 13:15 - 14:00 (A会場)

フェロー塾 「社会実装を目指し続けた超電導応用技術開発」
石山敦士 (早稲田大学)

休憩 14:00 - 14:15

論文賞受賞記念講演 14:15 - 16:00 (A会場) 座長: 仲井浩孝

- 2S-p01 高温超電導コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの商用周波数運用時における電力伝送特性----- 79
長崎陽, 一條裕貴, 津田理 (東北大)
- 2S-p02 高温超電導マグネットを用いたアルミ押出成形用400kW級直流誘導加熱装置の開発----- 81
伊東徹也 (テラル, 新潟大); 福井聡 (新潟大); 河島裕, 緒方康博 (テラル); 古瀬充穂 (産総研);
渡部智則 (中部電力); 小川純 (新潟大)
- 2S-p03 第3元素添加Nb₃Sn線材のSn拡散と微細組織----- 83
伴野信哉 (NIMS)

休憩 16:00 - 16:15

山藤馨先生追悼セッション 16:15 - 17:00 (A会場)

休憩 17:00 - 17:15

社員総会 17:15 - 18:15 (A会場)

懇親会 (大庄水産 船堀店) 18:30 - 20:30

5月30日(金) A会場 9:30 - 15:45

無絶縁 REBCO コイル 9:30 - 10:30 座長：曾我部 友輔

3A-a01	スマート絶縁コイルに向けた $(\text{Pr}_{0.8}\text{Sm}_{0.2})_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{CoO}_3$ 金属 - 絶縁体転移物質スラリーの作製-----	85
	櫻井 響介, 土屋 雄司 (東北大); 田橋 正浩, 後藤 英雄 (中部大); 淡路 智 (東北大)	
3A-a02	抵抗制御界面を実装した no-insulation (NI) コイルの熱伝導特性-----	86
	今西 翔音, 田中 湧也, 川畑 瑞穂, 中村 一也, 高尾 智明 (上智大); 小林 賢介, 朴 任中, 山崎 俊夫, 柳澤 吉紀 (理研)	
3A-a03	異なる抵抗率の導電性樹脂で含浸した高温超電導コイルの伝導冷却試験-----	87
	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)	
3A-a04	ダミーコイルを用いた遮蔽電流低減手法に関する検討-----	88
	間藤 昂允, 野口 聡 (北大)	

ポスター手短紹介 10:45 - 11:00 (A会場)

昼食 12:15 - 13:15

SCSC ケーブル(1) 13:15 - 14:15 座長：横山 彰一

3A-p01	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (1): 概要-----	89
	雨宮 尚之, 曾我部 友輔 (京大); 高山 茂貴, 野中 利昭 (東芝); 福井 聡 (新潟大); 原 英和 (古河電工); 坂本 久樹 (SuperPower)	
3A-p02	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (2): 新概念 SCSC-IFB ケーブルと初期実験結果-----	90
	雨宮 尚之, 上垣 柊季, 曾我部 友輔 (京大)	
3A-p03	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (3): SCSC-IFB ケーブルの磁化損失解析-----	91
	曾我部 友輔, 宮腰 真卓人, 雨宮 尚之 (京大)	
3A-p04	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (4): コイル化にむけた要素試験用短尺ケーブルの機械特性評価-----	92
	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); 菅野 未知央 (KEK); 福井 聡 (新潟大); 藤野 正人, 高橋 明, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	

休憩 14:15 - 14:30

SCSC ケーブル(2) 14:30 - 15:45 座長：淡路 智

3A-p05	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (5): 臨界状態モデルと異なる電圧-電流特性を踏まえた SCSC ケーブルにおけるヒステリシス損失の実験則-----	93
	重政 茉於, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
3A-p06	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (6): 多層 SCSC ケーブルにおける結合損失特性の温度依存性-----	94
	上垣 柊季, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)	
3A-p07	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (7): SCSC ケーブルで構成されるマグネットの磁界精度評価手法に関する検討-----	95
	曾我部 友輔, 林 遼一, 雨宮 尚之 (京大)	
3A-p08	SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (8): SCSC ケーブルを電機子巻線に適用した同期電動機の電磁設計の比較-----	96

福井聡, 坂下涼介, 小川純 (新潟大); 曾我部友輔, 雨宮尚之 (京大)

- 3A-p09 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (9): 長手方向位置依存性を含めた 2 層スパイラル導体の層間電流分布測定----- 97
許光燾, 小山湧也, 曾我部友輔, 雨宮尚之 (京大)

5月30日 (金) B会場 9:15 - 15:45

バルク作製 (1) 9:15 - 10:30 座長: 山本明保

- 3B-a01 SmBCO シードプレートを用いた SDMG 法による Ag 添加 GdBCO バルクの育成と超伝導特性----- 98
芦生龍太郎, 箱石裕人, 内藤智之 (岩手大)
- 3B-a02 SDMG 法による希薄不純物ドーブ REBCO バルクの育成と捕捉磁場特性----- 99
國本慧太, 元木貴則, 遠藤淳, 浅古諒, 松永直也, 下山淳一 (青学大)
- 3B-a03 一方向溶融成長法による Ag 添加 YBCO 超伝導体バルク作製におけるバッファーペレットの効果----- 100
箱石裕人, 内藤智之 (岩手大)
- 3B-a04 サイズや希土類の異なる SDMG 法 REBCO バルクの中低温捕捉磁場特性----- 101
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)
- 3B-a05 SDMG 法によるマルチシードを用いた大型 REBCO バルクの育成と捕捉磁場特性----- 102
遠藤淳, 元木貴則, 國本慧太, 浅古諒, 松永直也, 下山淳一 (青学大)

昼食 12:15 - 13:15

REBCO 薄膜 13:15 - 14:00 座長: 内藤智之

- 3B-p01 FF - MOD 法による中軽希土類元素を含む REBCO 薄膜の作製----- 103
畠直輝, 相楽和豊, 元木貴則, 下山淳一 (青学大)
- 3B-p02 Sr 組成が TFA-MOD 法 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の超伝導特性に及ぼす影響----- 104
梶竜誠, 海谷真大, 大木元勇貴, 三浦正志 (成蹊大)
- 3B-p03 Zr をパターニングした基板上でマルチフィラメント化した YBCO 膜の Zr 直上における通電特性----- 105
藤本大貴 (九大); 松本明善, 大井修一, 立木実 (NIMS); 寺西亮 (九大)

休憩 14:00 - 14:15

バルク作製 (2)・着磁特性 (2) 14:15 - 15:45 座長: 原田直幸

- 3B-p04 密閉カプセル内における気相 Mg を用いた MgB_2 バルク体の作製と捕捉磁場特性----- 106
覚前陽太, 内藤智之 (岩手大)
- 3B-p05 超音波照射またはボールミリングによって微細化した B 粉末を用いた MgB_2 バルク体の作製と捕捉磁場特性----- 107
柚澤友介, 内藤智之 (岩手大)
- 3B-p06 トポタクティク反応を用いた SmFeAsO 多結晶バルクに対する水素ドーブの検討----- 108
霜山郁弥, 石渡翔大, 山本明保 (東京農工大); 生田博志 (名大)
- 3B-p07 高混合エネルギーを用いた放電プラズマ焼結 K ドープ Ba122 バルクの作製----- 109
水登伊知郎, 石渡翔大, 霜山郁弥, AYUKARYANA Nur Rahmawati, 清水和花, 山本明保 (東京農工大)
- 3B-p08 パルス着磁した超伝導バルク磁石による単極 NMR 磁極とその磁場分布----- 110
岡徹雄 (芝浦工大); 渡邊飛龍, 高橋雅人 (理研); 坂井直道 (芝浦工大); 横山和哉 (足利大)
- 3B-p09 プレ着磁の過程を加えた新たなパルス磁化法の提案----- 111
横山和哉 (足利大); 岡徹雄 (芝浦工大)

5月30日(金) C会場 9:15-15:45

冷却システム(2) 9:15-10:30 座長:山田智弘

3C-a01	1D-CAEを用いたガス冷却超電導磁石の熱設計-----	112
	高木 紀和, 高橋 政彦, 栗山 透, 土橋 隆博, 武輪 裕之(東芝 ESS); 高橋 弘紀, 淡路 智(東北大)	
3C-a02	月震観測モジュールの熱設計と熱解析(その1)-----	113
	飯田 光人(たすく); 新谷 昌人(東大); 川村 太一(IPGP); 小野寺 圭祐(岡山大); 田中 智(JAXA)	
3C-a03	レーザー核融合実験用液体重水素ターゲット冷却装置の開発-----	114
	岩本 晃史, 唐木 優河, 藤岡 慎介(阪大)	
3C-a04	核融合ポロイダルコイルの液体水素冷却の予備的研究-----	115
	星野 昌幸(前川); 仲村 直子, 平野 直樹(NIFS)	
3C-a05	液体水素充填ステーションのゼロボイルオフの研究-----	116
	WANG Chenguang, 李 遠鑑, ZHANG Shurui, ZHANG Cunman, XUE Mingzhe, 朱 紹偉(同済大)	

昼食 12:15-13:15

小型冷凍機 13:15-14:30 座長:斎藤明子

3C-p01	JTバルブレス4KJT冷凍機の実験研究-----	117
	李 遠鑑, 朱 紹偉(同済大)	
3C-p02	パルスチューブ冷凍機シミュレーションと冷媒測定による精度考察-----	118
	西尾 樹, 藤原 裕也, 森平 淳志(アルバック)	
3C-p03	共用イナータンスチューブパルス管冷凍機の調相バッファの実験研究-----	119
	ZHANG Shurui, WANG Chenguang, 朱 紹偉(同済大)	
3C-p04	ErCo ₂ 系磁性体材料を用いた能動的蓄冷式磁気冷凍機の運転温度特性-----	120
	小林 大輝(筑波大); 白井 毅, 夏目 恭平, 神谷 宏治(NIMS); 石田 政義(筑波大)	
3C-p05	静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討(3)-----	121
	脇 耕一郎, 恩地 太紀, 浮田 啓悟, 坂本 泰明, 富田 優(鉄道総研); 平野 直樹, 小野寺 優太(NIFS)	

休憩 14:30-14:45

MgB₂ 14:45-15:45 座長:木内勝

3C-p06	B過剰前駆体を用いた拡散法によるCドープMgB ₂ バルクの作製-----	122
	野尻 将太, 那須川 雄大, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大); 秋池 良, 召田 雅実(東ソー)	
3C-p07	Premix-PICT 拡散法 MgB ₂ バルクにおけるTiB ₂ 添加効果-----	123
	那須川 雄大, 野尻 将太, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大); 秋池 良, 召田 雅実(東ソー)	
3C-p08	MgB ₂ 線材において鉄シースの結晶粒径が応力ひずみ曲線に与える影響-----	124
	田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立); 菅野 未知央(KEK); 松本 明善, 西島 元(NIMS)	
3C-p09	MgB ₂ 線材を用いた液体水素用液面センサーの高性能化に関する研究-----	125
	中川 陽介, 武田 実, 前川 一真(神戸大); 福本 祥一, 高田 芳宏(山本電機製作所)	

ポスター手短紹介 10:45-11:00 (A会場)

5月30日(金) ポスターセッションII Poster会場 11:00-12:15

HTS輸送特性・解析 11:00-12:15 座長:金沢新哲

3P-p01	希土類系超電導線材を複数枚積層した超電導複合導体の電流輸送特性評価-----	126
	宇都宮 銀汰, 安部 信吾, 高橋 正希, 田代理一郎, 井上 昌睦(福岡工大)	
3P-p02	超電導複合導体の広範な電界範囲にわたる通電測定と臨界電流の統計分布解析-----	127
	山口 優斗, 宇都宮 銀汰, 田代理一郎(福岡工大); 中村 武恒(京大); 井上 昌睦(福岡工大)	

- 3P-p03 TFA-MOD 法により作製した人工ピンニングセンター導入型 REBCO 線材の磁場中臨界電流特性----- 128
高城 凜, 隠崎 遼河, 関戸 真矢, 田代理一郎 (福岡工大); 小山田 拓真, 佐藤 迪夫,
塩原 敬 (SWCC); 土屋 雄司, 淡路 智 (東北大); 井上 昌睦 (福岡工大)
- 3P-p04 高温超電導複合導体の電流導入部の電圧発生に関する有限要素解析----- 129
田代理一郎, 安部 信吾, 宇都宮 銀汰, 高橋 正希, 井上 昌睦 (福岡工大)

HTS 交流損失・構造 11:00 - 12:15 座長：柁川一弘

- 3P-p05 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の検討----- 130
新藤 大靖, 川畑 秋馬 (鹿児島大)
- 3P-p06 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磁化曲線の測定と交流損失特性の評価 --- 131
濱田 大夢, 岩村 周, 川畑 秋馬 (鹿児島大)
- 3P-p07 深層学習を用いた超伝導材料微細構造のセマンティックセグメンテーションの検討----- 132
伊藤 海音 (東京農工大); 嶋田 雄介 (九大); 安東 昂亮, 徳田 進之介, 西谷 慶輝,
山本 明保 (東京農工大)
- 3P-p08 BSCCO 超電導線材のフィラメントの破壊挙動の観察----- 133
白木原 蒼, 町屋 修太郎 (大同大); 長村 光造 (応用科学研)

小型冷凍機コンポーネント (2) 11:00 - 12:15 座長：仲村直子

- 3P-p09 薄板組立型熱スイッチの内部フィンの高密度化の研究----- 134
前河 大貴, 山本 壮真, 原田 義輝, 下元 一輝, 小田 靖久 (摂南大)

水素資源 11:00 - 12:15 座長：渡邊 裕文

- 3P-p10 バイオマス資源の熱分解ガスの深冷分離による水素の抽出の研究----- 135
渡邊 遼菜, 林 匠, 西田 凌, 日野 広生, 小田 靖久 (摂南大); 仲村 直子 (NIFS)

HTS マグネット 11:00 - 12:15 座長：藤田 真司

- 3P-p11 高温超伝導 2 極磁石の磁束跳躍がもたらす誤差磁場評価に向けた測定プローブの開発----- 136
鈴木 研人 (KEK)
- 3P-p12 REBCO コイルの電流分布挙動における巻線密度の影響----- 137
武居 淳一郎, 間藤 昂允, 野口 聡 (北大)
- 3P-p13 33T-CSM 用内挿 REBCO コイルにおける遮蔽電流誘起応力・ひずみ数値解析：端面含浸の効果----- 138
野島 渉平, 土屋 雄司, 長崎 陽, 津田 理, 淡路 智 (東北大); ARNAUD Badel (Grenoble Alpes 大);
ALEXANDRE Zampa (東大)

着磁特性 (1) 11:00 - 12:15 座長：岡 徹雄

- 3P-p14 円筒型積層コーテッドコンダクターにおける強磁場捕捉----- 139
于澄 (東大)
- 3P-p15 幅が広い希土類系酸化物超伝導テープ線材を用いて作製した無接続コイルの検討----- 140
原田 直幸, 片山 哲汰, 高橋 慶, 上山 明日羽, 村上 大夢 (山口大)

加速器用 HTS マグネットの開発 (13-1)

—溝巻き REBCO 補正 2 極マグネットの開発—

Development of HTS Accelerator magnet (13-1)

-Study of groove winding REBCO corrector dipole-

土屋 清澄, 王 旭東, 寺島 昭男 (KEK), 菊池 章弘 (NIMS)

TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xudong, TERASHIMA Akio (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

我々は加速器用 HTS マグネットの基礎開発を進めており、その一環として、溝巻きコイル製作法の検討を始めた。この方法は 3D プリンターで製作する溝付き巻線マンドレルに複数枚の REBCO 線材を埋め込み含浸するもので、高いコイル電流密度と強固な電磁力支持が期待され、高磁場磁石製作法の一つとなり得るものである。開発の第一歩として HTS 6 極マグネット用の REBCO 鞍型補正コイルの試作開発を進めているので、その設計と開発の現状について報告する。

2. 補正 2 極マグネットの設計

先に開発した SuperKEKB 用 HTS 6 極マグネット[1]の内側に挿入できる補正 2 極マグネットを想定して 2 mm 中の REBCO 線材を用いた溝巻コイルの設計を行なった。

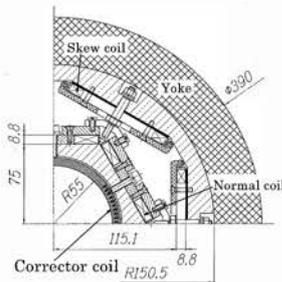


Fig. 1 A dipole corrector coil assembled into the HTS sextupole magnet.

2 層コイルを設計した。各ターンの位置は 6 極成分磁場の積分値ができるだけ小さくなるように選んだ。補正 2 極コイルの設計諸元及び磁場分布を Table1 及び Fig. 3 に示す。

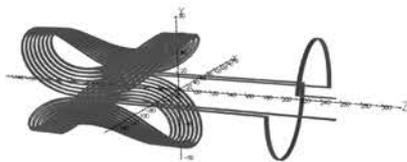


Fig. 2 Opera 3D model of the dipole corrector coil.

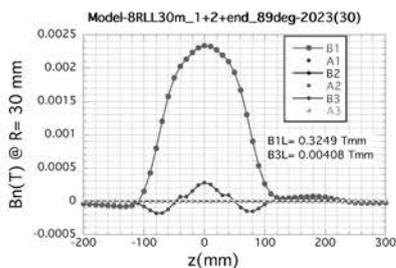


Fig. 3 Multipole field distribution along the axial direction of the dipole corrector coil.

Table 1 Design parameters of the dipole corrector coil.

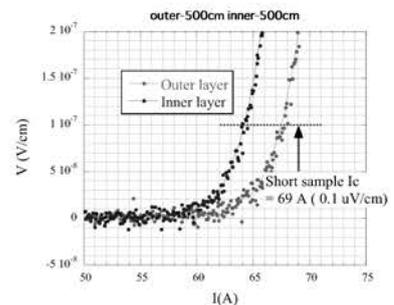
Parameter	Value
Bore inner radius	55 mm
Coil length	206 mm
Number of turns / pole	8 x 2 turns
Operating current	10 A
Central field	~23 Gauss
Integrated dipole strength	0.325 T mm
Effective length	139.1 mm
Inductance	0.13 mH
Conductor	2 mm wide REBCO tape

3. 補正 2 極コイルの試作開発

この開発では次の 3 つの項目に焦点を絞った。1) 3D printer を用いた巻線マンドレルの設計・製作方法、2) 巻線による線材特性の劣化の有無、3) 含浸技術。1) では試作マンドレルの製作精度、巻線形状と 3D printer 用モデル製作法などの調査・開発を、2) では種々の試作マンドレル (現状は樹脂製) を使ったコイルの巻線試験、コイルの 77 K 通電試験などを行なった。Fig. 4 に試作溝巻コイル (未含浸) とその 77K 通電試験結果を示す。内層コイルと外層コイルの V-I 曲線 (Ic 値) に僅かな差が見られるが、両者の n 値が 30 と 29 であることから、巻線による線材特性の劣化は殆ど無いと考えている。このコイルを staycast で含浸した後の 77K 通電試験では、内層と外層のコイル Ic 値は約 20 A と 40 A であった。これは樹脂マンドレルの熱収縮率が約 1.3 % と大きいためと考え、現在、金属製マンドレル (SUS316L) の検討を始めている。



(A)



(B)

Fig. 4 Test winding coil: (A) and the V-I curves of the inner and outer coils excited at 77 K: (B)

謝辞

3D printer による造形では、高エネルギー加速器研究機構の機械工学センターの方々大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます

参考文献

1. 土屋 他, 低温工学 59 巻 4 号 (2024) p. 246.

加速器用 HTS マグネットの開発 (13-2)

—不均一銅メッキ REBCO 線材を用いた REBCO 丸型ケーブルの 4.2 K と磁場中の臨界電流特性—

Development of the HTS accelerator magnet (13-2)

—Critical current characteristics of REBCO round cable fabricated using non-uniform copper-plated REBCO tapes 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

加速器用高磁場マグネットには、数 kA の大電流導体が求められる。この導体の 1 つの候補として、小径丸線コアへ REBCO 線材をスパイラル状に巻き付けたフレキシブルな丸型ケーブルが考案されている。我々はこの丸型ケーブルの製作パラメータと臨界電流 (I_c) の関係を測定評価し、加速器用高磁場マグネットに求められる通電性能と機械特性を有するケーブル開発を進めている [1, 2]。今回、市販線材の超電導層側に銅メッキを追加した不均一銅メッキ線材を直径 1.9 mm コアに巻き付けた丸型ケーブルを製作し、4.2 K 液体ヘリウム中で外部磁場 18 T までの臨界電流特性を測定したので、その結果について報告する。

2. 不均一銅メッキ REBCO 線材によるケーブル試作

市販 REBCO 線材 (SuperPower 社 SCS2030-AP、幅 2 mm) の超電導層側へ厚み約 45 μm の銅メッキを追加し、超電導層が線材断面の中心に近づくように配置した (Fig. 1)。直径約 1.9 mm の撚線コアに不均一銅メッキ線材を 4 枚巻き付けて、長さ約 0.3 m の 2 層ケーブル (2 枚/層) を製作した。77 K 自己磁場中での I_c と n 値は 219 A と 25 であり、事前に測定した各線材 I_c の合計値とほぼ一致した (Fig. 2)。先行研究 [2] では、この市販線材を直径 2.4 mm 未満のコアに巻付けたケーブルを試作したが、その I_c は劣化した。本研究により、銅メッキ追加をすればコア径を 1.9 mm まで小さくしてもその特性劣化は生じないことが明らかとなった。

3. 4.2 K 磁場中の臨界電流特性

REBCO 線材は U 型ホルダー (タップ間: 24 mm テープ長) を、ケーブルはソレノイド型ホルダー (タップ間: 106 mm ケーブル長) を用いて (Fig. 3)、4.2 K と最大 18 T の外部磁場下で I_c 測定を行った。線材 I_c とケーブル I_c は垂直磁場下で 1.0 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準で評価した。線材とケーブルの I_c 磁場依存性と Lift factor = $I_c(4.2 \text{ K}, B) / I_c(77 \text{ K})$ を Fig. 4 に示す。電源容量の関係でケーブル I_c の測定は 12 T から 18 T までの外部磁場下で行った。ケーブル I_c の計算値は、ケーブル $I_c(77 \text{ K}) \times$ 線材 I_c の Lift factor により求めた。ケーブル I_c の実測値は計算値とよく一致しており、誤差は約 1% であった。同様に、線材とケーブルの Lift factor もよく一致しており、低磁場領域のケーブル I_c の計算値も妥当であると考えられる。

試作ケーブルと同じ直径 1.9 mm コアと不均一銅メッキ線材を用いて設計した多層ケーブルの電流密度 (4.2 K, 18 T) を Fig. 5 に示す。線材幅 2 mm として各層の巻き付け本数を調整するため、巻く外径によって電流密度の上昇幅が変動する。線材 I_c の劣化が生じない外径 2.4 mm 以上は市販線材を用いた。不均一銅メッキ線材と市販線材を用いたハイブリッド構造のケーブルは、市販線材のみのものより電流密度を向上できることが示された。外径 3 mm の電流密度は 500 A/mm^2 を超え、市販線材のみの場合の約 1.24 倍となった。

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。

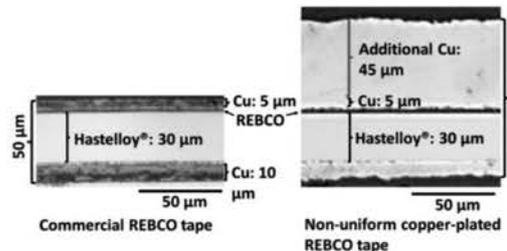


Fig. 1 Cross-sectional photographs of a commercial REBCO tape and a non-uniform copper-plated REBCO tape with a 45 μm additional copper plating on the REBCO layer side.

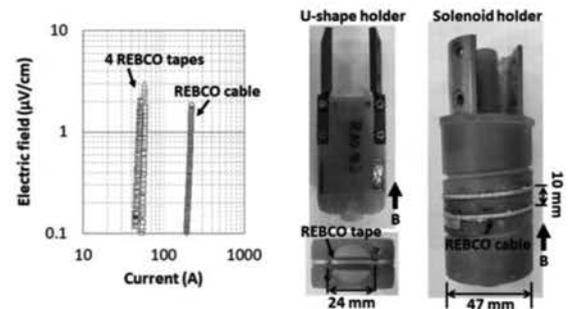


Fig. 2 Measured I_c results (log-log scale) of the REBCO holders for the I_c measurements of the REBCO tape and cable at 77 K.

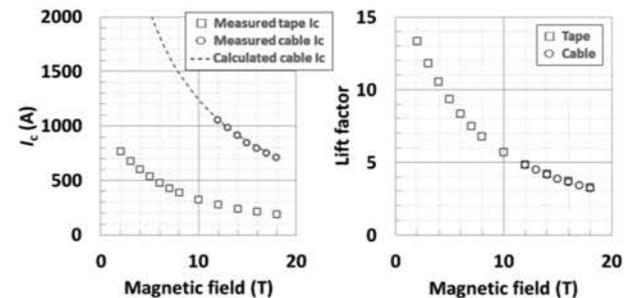


Fig. 4 Magnetic field dependence of the I_c and lift factor of the REBCO tape and cable measured at 4.2 K.

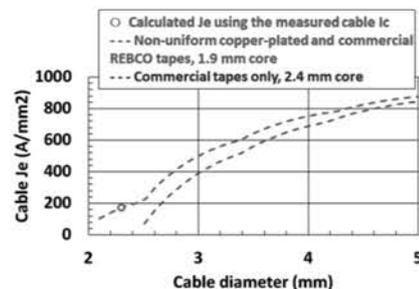


Fig. 5 REBCO cable J_e designed using the non-uniform copper-plated and commercial REBCO tapes at 4.2 K and 18 T.

参考文献

1. X. Wang, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 34 (2024) 4801205
2. X. Wang, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 35 (2025) 4800505

永久電流通電 MRI 磁石の受動シミングされた磁場における強度分布変動原因の定量的検討

Quantitative study on long term stability and variation causes of passively shimmed magnetic field in a persistent current MRI magnet

阿部充志、佐々木憲一、荻津 透、三部 勉、下村浩一郎(高エネ研)、杉田 萌、高柳智弘(JAEA)、飯沼裕美(茨城大)、
MuSEUM Collaboration
ABE Mitsushi, SASAKI Ken-ichi, OGITSU Toru, MIBE Tsutomu, SHIMOMURA Koichiro (KEK);
SUGITA Moe, TAKAYANAGI Tomohiro (JAEA); IINUMA Hiromi (Ibaraki Univ.)
E-mail: abemk@post.kek.jp

1. はじめに

J-PARCで準備中の muon 磁気能率、電気能率(g-2/EDM)と muonium 超微細構造 (MuSEUM: Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave) の精密測定実験では、空間的・時間的に±0.1 ppm(均一度 0.2ppm)以内に調整された超良好均一磁場領域を必要とする。受動(鉄片利用)シミングにより空間均一度を実現し、永久電流の超電導磁石(再利用全身 MRI 磁石)により時間的変動を抑える。通常、MRI では直径 50cm 球で 10ppm 程度の均一度である[1]が、MuSEUM 実験では 20cm 直径 30cm 長の楕円体で 0.2ppm の均一度を必要とする。既に、この空間均一度が実現可能なことは示した[2,3]。また、前回の報告[4]では、時間安定性に室温が影響し、Bloch 3/2 乗則[5]に加え、シム片位置の室温依存の移動が、磁場変化を起こしている可能性を議論した。今回は、その後の知見を含め、詳細・定量的に議論する。

2. 検討方法

梅雨末期から盛夏にかけて、空調のない実験室に磁石を 1.2T の永久電流運転で 2 ヶ月間保持(GC 不使用)した。この間、観測された磁場変化は、(1) 誤差磁場抑制コイル[6] (EIS)の影響、(2) 液体 He 注入で 500 l (62.5 kg)で 0.56 μT の磁場増加、(3) 永久電流の減衰(0.11μT/62 日)、および、(4) 本研究の主題である T^{RM} 依存の磁場変動である。そして、この期間、(2)の注液は無くした。(1)では EIS のリセット後に磁場計測し影響を抑制した。永久電流減衰の影響を少なくするために、磁場計測は、23 日間(0.04μT 減衰)に集中して 9 回の計測を行い、室温 24.9~30.7℃の範囲で、40cm 球面上の 576 点で磁場データを取得した。

3. 室温変化と磁場変動の関係

観測の磁場強度 B_i は線形に室温変化したので、一次式

$$B_i(T^{RM}) = a_i^{OB}(T^{RM} - T_0^{RM}) + B_i^0(T_0^{RM}) \quad (1)$$

で、観測の温度係数 a_i^{OB} と B_i^0 を最小二乗法(LSM)で決めた。 T_0^{RM} は 298K である。各位置 i のシム鉄片が作る磁場 B_i^{SH} との関係を図.1 に示す。シム鉄片磁場 $|B^{SH}|$ が強い位置で、 a_i^{OB} は大きい。実空間では、計測領域の上部である。また、 T^{RM} 上昇で磁化減少の Bloch $T^{3/2}$ 則のみでは説明不可である。

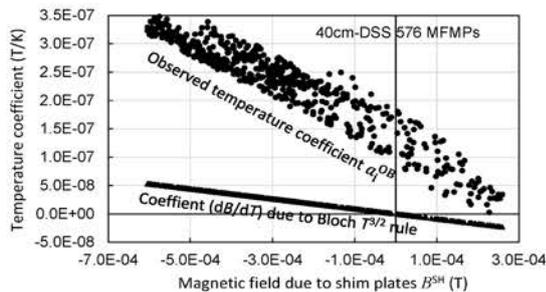


Fig. 1 Correlation between room temperature coefficients a_i^{OB} and magnetic field strength due to shims B^{SH} strength.

そこで、温度係数 a_i^C を複数の原因で算出する式を、

$$a_i^C = \sum_k f_k a_{ik}^C \quad (2)$$

とし、 a_i^{OB} 576 個の説明を試みる。 a_{ik}^C は物理的・工学的に求めた温度係数、 k は原因番号である。Bloch 則($k=1$)の a_{i1}^C は正しい($f_1=1.0$)とするが、他(電流変化、シム片配置位置移動、軸周りの回転、計測点移動)は熱膨張/収縮に基づくが、樹脂・複合材の線膨張率 γ は不正確なので、 f_k 値は LSM で決めた。

4. 検討結果

Fig. 2 は LSM で求めた a_i^C と a_i^{OB} の関係を示すが、よく一致しており、LSM 計算が成功している。また、 a_{ik}^C のうち、Bloch 則($k=1$)と電流変化($k=2$)も図中に示した。後者はシム鉄片移動により超伝導コイルとの磁氣的相互作用の変化を反映している。Table 1 に寄与(%)を平均(Ave.)と分布(Dist.)で示す。 $k=2$ を含めシム鉄片の移動の寄与が大きい。また、 $k=5$ が誤差磁場中の MFMPs 移動であることを考えると、すべての項目で誤差磁場の縮小が温度係数の抑制に有効であると言える。

Table 1 LSM result and contributions of the causes

k	Causes from LSM result		Contribution %	
			Ave.	Dist.
1	Bloch $T^{3/2}$ rule (No LSM fit)	Plotted in Fig. 2	11.7	23.5
2	Persistent current $\rightarrow \Delta B$	Plotted in Fig. 2	56.1	0.0
3	Shims radial movement with $\gamma=4.43 \times 10^{-5}/K$		2.8	28.4
4	Shims axial movement with $\gamma=1.00 \times 10^{-4}/K$		34.0	40.4
5	MFMPs translational move at $0.80 \times 10^{-5}m/K$		-5.0	5.1

MFMP: Magnetic Field Measurement Point
Ave.: $\sum_i a_i^{OB} a_{ik}^C$, Dist.: $\sum_i (a_i^{OB} - \overline{a_i^{OB}}) a_{ik}^C$

参考文献

1. T. C. Cosmus, M. Parizh, IEEE TAS vol. 21 (2011) p.2104.
2. 阿部、他、低温工学, 58 (2023) 132-139.
3. K. Sasaki, et al., IEEE TAS vol. 32, (2022) p.9002107.
4. M. Abe, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol. 104 (2022) p.72.
5. C. Kittell, 「固体物理学入門下」第 12 章、丸善株式会社.
6. ライヒエルド、他、特許第 2609295 号、1997 年 2 月 13 日.

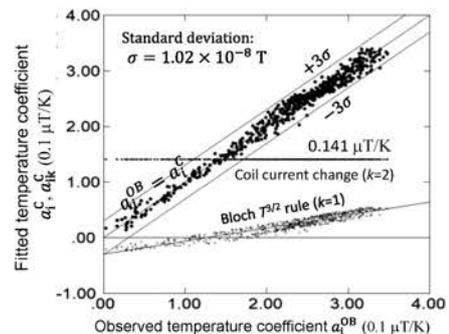


Fig. 2 Comparison between fitted and observed coefficients, with contributions from the Bloch $T^{3/2}$ rule (a_{i1}^C) and coil current change (a_{i2}^C).

真空環境下でガンマ線照射された超伝導マグネット含浸用樹脂の曲げ強度

Flexural Strength of Resins for Impregnating Superconducting Magnets Irradiated with Gamma-ray in a Vacuum Environment

王 旭東(KEK), 菊池 章弘(NIMS), 竹内正基(RIMTEC Corp.), 村上陽之, 園田 翔梧, 濱田 一弥(QST)

WANG Xudong (KEK), KIKUCHI Akihiro (NIMS), TAKEUCHI Masaki (RIMTEC Corp.),
MURAKAMI Haruyuki, SONODA Shogo, HAMADA Kazuya (QST)
E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

我々はジシクロペンタジエン樹脂である TELENE®をベースとした超伝導磁石含浸用高比熱樹脂の開発を行っている。モノマーのジシクロペンタジエンは従来の含浸用樹脂であるエポキシ CTD-101K®より粘性が低く、高比熱材粉末を混ぜることで超伝導磁石の含浸性能と熱的安定性を向上させることが期待される。加速器や核融合の磁石へ応用する場合、放射線環境下で樹脂の特性変化が想定され、これまでに大気雰囲気中でガンマ線照射実験と曲げ強度測定を行ってきた[1]。本発表は、CTD-101K®とTELENE®を含む3種類の樹脂に対して真空雰囲気中で約18 MGyまでガンマ線照射実験を行い、照射前後の曲げ強度を評価したので報告する。

2. ガンマ線照射実験

試験サンプルは、エポキシ CTD-101K®, ジシクロペンタジエン樹脂の TELENE®(RIMTEC 社)、TELENE®に Gd₂O₃S 粉末を43 wt%混ぜた3種類のものを用意した。各樹脂を固化させた後に、長さ100 mm×幅8 mm×厚さ4 mmに切り出して、Fig. 1に示すガラス管へ封入して真空引きを行った。真空封入後の初期真空度は、CTD-101K®が約10⁻² Pa、TELENE®のみとGd₂O₃S粉末を混ぜたものがともに約10⁻⁴ Paであった。3種類の樹脂をそれぞれ4本のガラス管へ複数本真空封入して、QST 高崎量子応用研究所にあるコバルト60線源を用いてガンマ線照射実験を行った。線源付近にガラス管を設置し、最初にガラス管の前面と背面に取り付けた線量計から線量率を測定した。測定した線量率6-8 kGy/hourの条件で照射を継続し、4本のガラス管から線量が約1 MGy、約5 MGy、約10 MGy、約18 MGyに達したものを抜き取り、それぞれのガラス管内に析出したガス量を測定した(Fig. 2)。実測した析出ガスの圧力とガラス管を含めた全体の容積から物質質量(23.6°C、1気圧)を計算した。線量増加に伴い全樹脂からガスの析出量が増加し、5 MGy以上では TELENE®はCTD-101K®の約1.3倍であった。

3. ガンマ線照射前後の曲げ強度

ガンマ線照射実験前後に各線量でそれぞれの樹脂から3サンプルを用いて三点曲げ実験を行い、その応力-ひずみ特性を求めた。Fig. 3に示す測定装置を用いて、支点間距離L=64 mmでサンプルを支持し、試験速度2 mm/minで上から荷重Fを加えた。測定した荷重とたわみsを用いて、曲げ応力 $\sigma = 3FL / 2wh^2$ と曲げひずみ $\epsilon = 6sh / L^2$ を計算した。wとhはサンプルの幅と厚みである。各線量における応力-ひずみ特性から、各樹脂の曲げ強さ(最大曲げ応力)と曲げ弾性率(0.05%と0.25%のひずみに対する応力の差をひずみの差で除した値)を求めた(Fig. 4)。TELENE®のみとGd₂O₃S粉末を混ぜたものは、5 MGy付近まで曲げ強さが上昇し、5 MGy以上では低下する結果となった。一方、曲げ弾性率は線量の増加とともに継続して上昇し、Gd₂O₃S粉末を混ぜた樹脂は10 MGy以上でCTD-101K®を上回る結果となった。CTD-101K®は曲げ強さも曲げ弾性率も線量の増加に対してほぼ一定となった。データのばらつきは線量の推定誤差、サンプル製作のばらつき、測定誤差が主要因と考えられる。

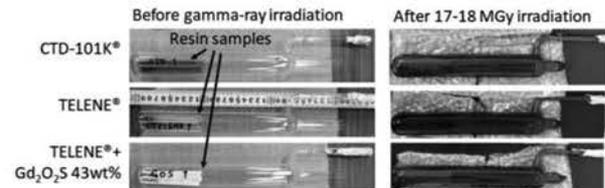


Fig. 1 Three types of resin samples sealed in glass tubes before gamma-ray irradiation and after 17-18 MGy irradiation.

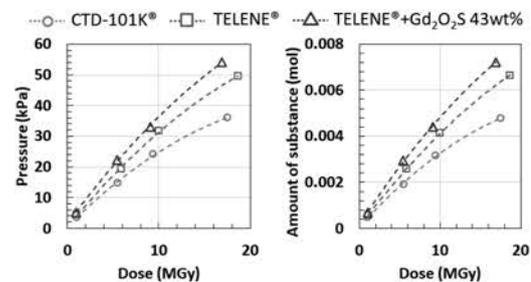


Fig. 2 Measurement results of precipitated gas after gamma-ray irradiation.

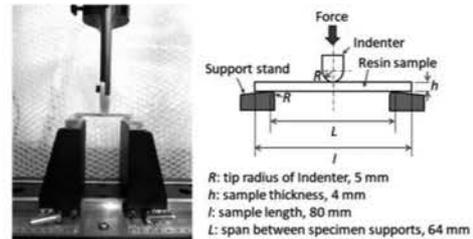


Fig. 3 A Photograph and schematic of the three-point bending test.

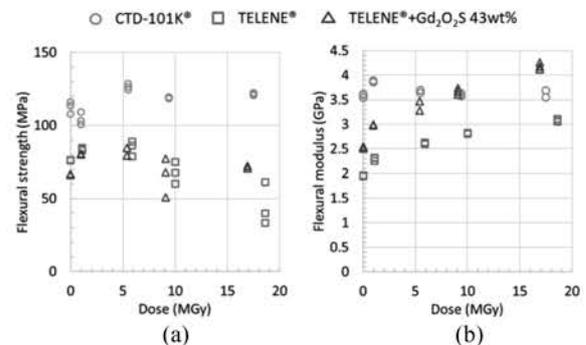


Fig. 4 (a) Flexural strength and (b) flexural modulus of the resins as a function of irradiation dose.

謝辞

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

参考文献

1. X. Wang, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 35 (2025) 7700104

JT-60SA 超電導コイルの絶縁補強の進捗

Progress of in-situ insulation reinforcement for JT-60SA superconducting coils

村上 陽之, 土屋 勝彦, 大西 祥広, 山本 聡, 宇野 淳也, 園田 翔梧, 濱田 一弥(QST)
 MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, ONISHI Yoshihiro, YAMAMOTO Satoshi,
 UNO Junya, SONODA Shogo, 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)の超電導コイルは、次回運転における定格運転を目指し、真空・極低温の運転条件における耐電圧性能を現状の3.2kV程度から5.0kV程度まで向上させるため絶縁補強作業を進めている。放電は絶縁の欠陥部を通じたパッシェン放電により生じており、隙間を完全に埋めきることが絶縁を向上させるために重要である。

これまでに現地作業における絶縁補強方法として、ガラス+ポリイミドテープをエポキシ樹脂と共に巻きつける方法(塗巻き)、ガラスフィラーを混合したエポキシ樹脂で含浸する方法(キャストリング)、ガラスフィラーを混合したエポキシ樹脂に硬化促進剤を加え粘土状になった樹脂で欠陥部を塗り固める方法(ブラスタリング)を開発した[1]。作業空間や作業性に応じて、それぞれの方法を選択あるいは組み合わせて絶縁補強作業を実施している。また、人が直接アクセスできない狭隘部においては、スプレーノズルを取り付けたチューブを差し込み、絶縁対象にエポキシ樹脂を吹きかける方法(スプレー法)を開発し[2]、狭隘部の絶縁補強作業を計画している。

一方で、クエンチ検出のための高電圧ケーブル(外径3mm)の対地絶縁下側からの取り出し部は、ケーブル周囲に大きな隙間が存在し、スプレー法では樹脂が垂れ流れてしまうため絶縁補強が困難であることが分かった。そこでアクセスが困難な狭隘部でも大きな隙間を埋めることが可能な方法として、高粘度の樹脂を用いた補強方法を新たに開発した。

本発表では、開発した高粘度樹脂による絶縁補強手法および絶縁補強作業の進捗について報告する。

2. ケーブル取り出し部の絶縁補強手法の開発

ケーブルの取り出し部のサンプルを製作しスプレー法で絶縁補強を試みた結果、合計23回の吹付を行っても樹脂は垂れ流れてしまい隙間を埋めることができなかった(図1)。隙間の大きな欠陥部はエンドスコープによる目視で位置を確認できることから、樹脂が垂れないように粘度を高め、ローラーで欠陥部に狙いを定めて直接盛り付ける方法の開発を進めた。

樹脂の粘度が低すぎる場合は垂れ流れて隙間が開いてしまう一方で、粘度が高すぎるとケーブルの裏側に隙間が残ってしまい十分な絶縁補強が行えない(図2)。そこで、樹脂は時間と共に粘度が上昇することに着目し(図3)、ケーブルの裏側へも樹脂が入るように比較的粘度が低い状態(1500 mPa/sec程度)から樹脂の塗り付けを開始し、樹脂が垂れ流れた結果表れてくる隙間には再度樹脂を塗り重ね、十分粘度が上昇し垂れ流れなくなるまで樹脂を継ぎ足した。硬化直前の樹脂の粘度は加速度的に上昇するため、垂れ流れる速さは急激に減少し、最終的には実用的な塗り付け作業時間(2~3時間程度)で狙い通りに塗り付けることができた(図1右端)。

最初のサンプルは、真空中の耐電圧試験(パッシェン試験:約10~1000 Pa)、液体窒素による5回の冷却試験および冷却後パッシェン試験の結果、10 kVまで放電がないことを確認した。現在は追加検証用のサンプルを製作しており、最初のサンプルと同様に試験の合格が確認できれば、実機の補修に着手する予定である。

3. JT-60SA 超電導コイルの絶縁補強計画と進捗

2026年夏の次回運転までに実施する絶縁補強の対象数および2025年3月時点の進捗は、塗巻き+ブラスタリングによる冷媒導入部の補強(41ヶ所全数完了)、塗巻き+ブラスタリング+キャストリングによるジョイントボックスの補強(28ヶ所、うち14ヶ所完了)、スプレー法による冷媒導入部の補強(100ヶ所)、高粘度樹脂法によるケーブル出口の補強(12ヶ所)である。スプレー法および高粘度樹脂法による狭隘部の絶縁補強は2025年4月より開始する。当日の発表では最新の絶縁補強の進捗に加え運転再開までの試験計画について報告する。

参考文献

- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.103
- H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 108 (2024) p.122

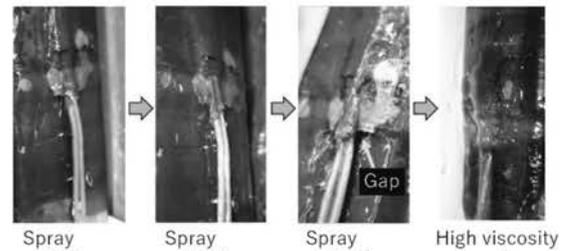


Fig. 1 Insulation reinforcement for cable extraction. High-viscosity resin can cover the large gaps around the cable.

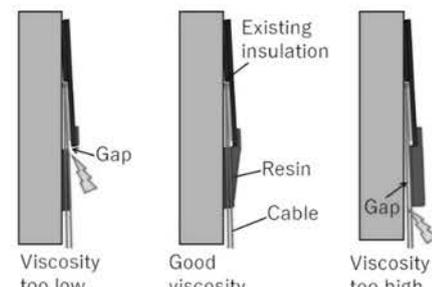


Fig. 2 Importance of viscosity control for insulation reinforcement for cable extraction

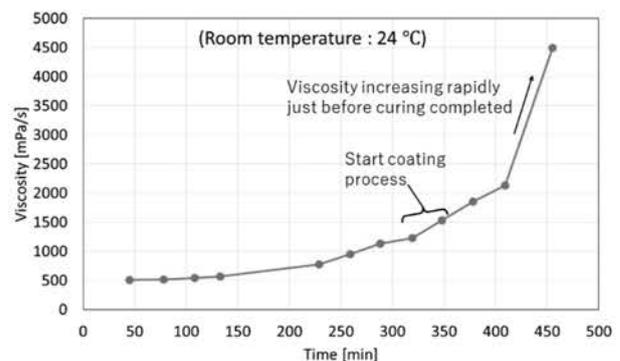


Fig.3 Time dependence of resin viscosity after mixing hardener

JT-60SA 超電導コイルにおける高電圧保護のためのホットスポット温度評価

Estimation of Hot-spot Temperature for High Voltage Protection in JT-60SA Superconducting Coils

園田 翔梧, 村上 陽之, 濱田 一弥 (量研機構), Zani Louis (Fusion for Energy)

SONODA Shogo, MURAKAMI Haruyuki, HAMADA Kazuya (QST), ZANI Louis (Fusion for Energy)

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。プラズマ運転完了後に真空・極低温の運転条件においてPFコイルの耐電圧試験を実施した結果、3.2 kV程度で放電することが確認された。このため、20 kAの定格運転に向けて絶縁補強を行っている。一方でPFコイルの最大運転電流(20 kA)において、クエンチ保護動作を行う場合、遮断抵抗器により超電導コイルのターミナル間に耐電圧を超える電圧が発生し、放電が発生する可能性がある。そこで、耐電圧が改善できない場合に備えて遮断抵抗を下げることを検討しているが、電流遮断時定数が長くなるため、超電導コイルの温度上昇を考慮する必要がある。

本研究では、遮断時の最大電圧が耐電圧を超えないように遮断抵抗の値を30%減少させた際のホットスポット温度を評価した結果について報告する。

2. ホットスポット温度への影響

先行研究において、JT-60SAのEFコイル試験用ケーブルインコンジット導体(CICC)に対して、クエンチ試験を行い、CICC用の1次元温度解析プログラムであるGandalfコードと試験結果の整合性は確認された[2]。本研究ではGandalfコードを用いて、導体最大温度の解析を行った。解析モデルは素線、ジャケット、ヘリウムから構成されている。境界条件として、導体入口における圧力(0.52 MPa)及び質量流量(6 g/s)、温度を与えた。温度は温度マージンが1 Kになるように設定した。素線0.03 mの区間に対して0.1秒間でクエンチが発生する最小の熱量(1251.6 W/m)を与え、クエンチを発生させた。クエンチ検出前の通電電流は20 kAとした。解析に必要なパラメータはT_{bale1}の値を使用した。

クエンチ検出器では、1秒毎に電圧積分値を計算し、積分値が0.5 V.sに達した際にクエンチが発生したと見なし、電流遮断信号を発出する。図1に電流遮断を行わない場合の電圧(V_{max})の時間変化を示す。また、1秒間の積分電圧(IntV)は下記の式から算出した。

$$\text{IntV}(t) = \int_{t-1}^t V_{\text{max}}(t) dt$$

IntVが0.5 V.sに達する直前(t = 2.76秒)に新たな1秒間の積分スレッドが開始された場合の積分電圧(IntV reset)が0.5 V.sまで達するまでに、クエンチ発生時から約3.3秒間要することが示された。また、クエンチ信号を発信してから遮断操作が開始されるまでクエンチ検出システムの影響により0.35秒間要する。したがって、クエンチが発生してから、クエンチ動作が開始されるまで、3.65秒要する。

図2に遮断抵抗を30%減少させた際の素線及びジャケットの温度への影響を示す。クエンチ開始から3.65秒後に通電電流を減衰させた。減衰時定数はダンブ抵抗値とインダクタンスから決定した。ダンブ抵抗を減少させることにより、減衰時定数が増加するため、ジャケットの最大温度は約8.6 K、素線は9.5 K上昇した。また、遮断抵抗を30%減少させた際のジャケットの最大温度は許容値である150 Kを下回った。

Table 1 Numerical Parameters

Flow path length	143.6 m
Central spiral outer diameter	9.0 mm
Nb3Sn and Cu strand diameter	0.82 mm
Cu/non-Cu ratio	1.0
Void fraction	34 %
Strands cross section	169 mm ²
Jacket cross section	424 mm ²
Helium cross section (helium bundle region)	922 mm ²
Helium cross section (helium central region)	636 mm ²

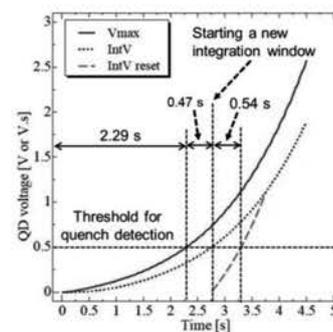


Fig. 1. Analysis result of quench voltage.

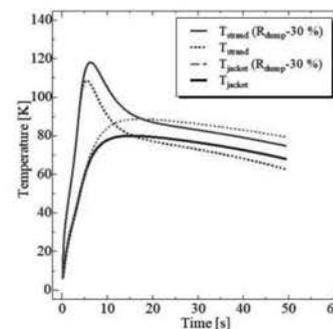


Fig. 2. Effects of dump resistance on strand and jacket temperature.

3. まとめ

本研究では、Gandalfコードを用いて遮断抵抗を30%減少させた際の導体最大温度を推測した。結果、ジャケットの最大温度は許容値である150 Kを下回ることが示された。今後、さらなる確認としてTHEAコードを用いて、クエンチ発生時の最大温度を評価し、遮断抵抗の設計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 p.30, 2023.
2. H. Murakami, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 20, no. 3, pp. 512-516, 2010.

ITER 中心ソレノイド導体の分流開始温度と导体パラメーターの相関

Investigation of Current Sharing Temperature and Conductor Parameters on ITER Central Solenoid Conductor

諏訪 友直, 磯野 高明, 辺見 努(QST)
 SUWA Tomone, ISONO Takaaki, HEMMI Tsutomu(QST)
 E-mail: suwa.tomone@qst.go.jp

1. はじめに

核融合実験炉 ITER の中心ソレノイド(CS)導体(Fig. 1)は Nb₃Sn 超伝導素線を使用した撚線とステンレス管から構成される。CS の運転では最大 13 T における 40 kA 通電が 6 万回行われるため、繰返し電磁力により分流開始温度(T_{cs})が劣化しないことが導体には要求される。

撚線の撚りピッチを短くすることにより繰返し電磁力による劣化を抑制できたため[1]、量研機構は短撚りピッチ CS 導体の量産を行った。CS 導体の研究開発を通し、短撚りピッチ導体 20 本に対して导体性能試験を実施した。原型炉用導体の開発における性能予測を可能とするために、試験データに対する統計解析を行い、Nb₃Sn 素線の臨界電流と有効ひずみ、分流開始温度の相関を求めた。

2. 試験方法

導体に使用された Nb₃Sn 素線は 4 種類あり、A,B,C 社がブロンズ法、D 社が内部拡散法である。CS 導体の撚線は 5 段階となっており、576 本の Nb₃Sn 素線と 288 本の銅線が撚り合わされている。各段階の撚りピッチの設計値は、短撚りピッチ導体は 20-45-80-150-450 mm となっている。

スイスの SULTAN 試験装置を使用し、実機運転と等価電磁力となる磁場 10.8 T、電流 45.1 kA で T_{cs} 測定を実施した。繰返し電磁力は最大で 20,000 回印加した。繰返し電磁力の途中で最大 3 回の室温から 4 K への温度サイクルを与えた。导体内部の Nb₃Sn 素線に加わっているひずみを評価するために、仮想的な一軸ひずみである有効ひずみを(1)式より計算した。

$$E = \frac{E_c}{L_v A} \int \int \left(\frac{I_{op}}{N_{sc} I_c(B, T, \epsilon_{eff})} \right)^n dA dz \quad (1)$$

ここで、 E は電界、 E_c は電界基準、 L_v は電圧端子間距離、 I_{op} は通電電流、 N_{sc} が Nb₃Sn 素線の数である。 $I_c(B, T, \epsilon_{eff})$ は臨界電流の磁場(B)-温度(T)-ひずみ依存性で、 ϵ_{eff} が有効ひずみである。 ϵ_{eff} と n 値をフィッティングパラメーターとし、 T_{cs} 測定時の電界-温度カーブより ϵ_{eff} を計算した。

3. 解析結果

Fig. 3(a)に、繰返し電磁力印加前の有効ひずみと I_c (12 T, 4.2 K)の相関を示す。直線近似の結果、有効ひずみは $\epsilon_{eff} = -0.59 - 3.7 \times 10^{-4} I_c$ 、直線近似と測定値の残差標準偏差 σ は 0.03% となった。また、 T_{cs} と有効ひずみの相関(Fig.3 (b))は、 $T_{cs} = 8.2 + 1.8 \epsilon_{eff}$ 、 σ は 0.2 K となった。

Fig. 2 に繰返し電磁力による有効ひずみ変化を示す。点線は全てのデータに対して直線近似した結果である。繰返し電磁力の回数を N_{EM} とすると、 $\epsilon_{eff} = -0.69 + 0.28 \times 10^{-6} N_{EM}$ 、 σ は 0.03% となった。この結果より、繰返し電磁力に対して、有効ひずみが緩和され、それに伴い T_{cs} が向上したことがわかる。

これらの結果より、ITER と類似の導体の場合、有効ひずみまたは I_c から繰返し電磁力後の T_{cs} を σ が約 0.3K 程度で予測できる。

4. まとめ

合計 20 本の短撚りピッチ CS 導体の T_{cs} 測定結果に対する統計解析を行った。导体性能に関する相関を求め、有効ひ

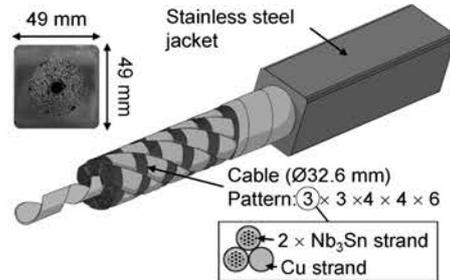


Fig.1 Cable in conduit conductor for ITER Central Solenoid.

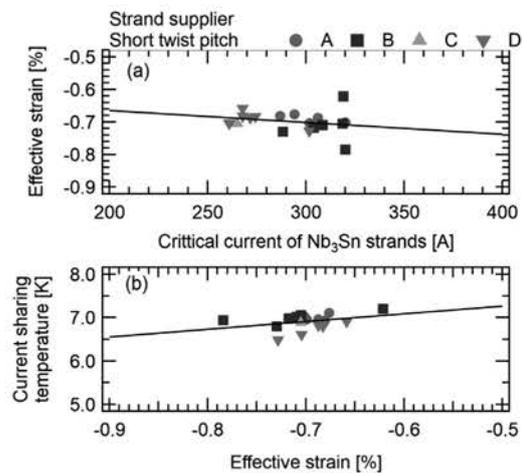


Fig.2 (a)Correlations between critical current (I_c) of Nb₃Sn strands and effective strain and (b) effective strain and current sharing temperature before electromagnetic loading.

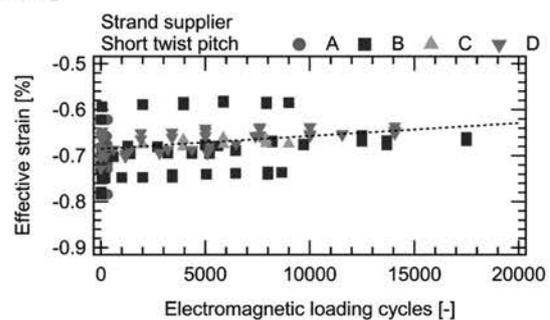


Fig.3 Effective strain vs electromagnetic loading on short twist pitch CS conductors. A dotted line shows result of linear fitting for all data.

ずみまたは I_c から繰返し電磁力後の T_{cs} の予測を可能とした。これにより、原型炉マグネットおよび導体の設計の参考となる导体性能の予測式を得ることができた。

参考文献

- Y. Nabara, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond. vol 24, No. 3, 4200705, June 2014

スパース・タブロー法の発展型アルゴリズムを用いた大型 CIC 導体の 高速電流分布解析

High-speed numerical calculation of current distribution in a large CIC conductor by newly developed Revised Sparse-Tableau method

谷貝 剛, 金子和宏, 星野壮太(上智大学); 伴野信哉, 北口 仁(NIMS); 宇藤裕康(QST); 濱島高太郎(東北大)
 YAGAI Tsuyoshi, KENeko Kazuhiro, HOSHINO Sohta (Sophia Univ.); BANNO Nobuya, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS), UTOH
 Hiroyau (QST); HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.)
 E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

1. はじめに

大型 Cable-In-Conduit 導体(CIC 導体)のサイズ・コストの最適設計において、素線特性を最大限活かせる電流の均流化は重要だが、そのツールとしての詳細な電流分布の直接計算は実現していない。市販の回路シミュレータは汎用性が高く、計算速度が速い一方、大規模回路モデルの解析や、局所クエンチで回路要素が時間的に変動する場合、電流分布計算は事実上不可能である。

本研究では、一般的な回路シミュレータが採用している修正節点電位法(スパース・タブロー法、以下 ST 法)をさらに発展させ、変動する回路要素(ここではクエンチによる常伝導抵抗発生を想定)と局所インダクタンスを1つの回路要素とするアルゴリズムを開発した。これにより連立 1 次方程式の簡素化・計算時間の大幅短縮が実現する。すでに計測が完了した 81 本素線(3×3×3×3)CIC 導体の素線軌道のうち1つの 2 次サブケーブル(9本素線)だけ抜き出し、導体長 128 mm(長手方向分割数 100)に渡って構成した回路モデルの電流分布過渡現象の直接計算に成功した。

2. 修正スパース・タブロー法

ST 法は SPICE 系シミュレータで最も標準的な回路定式化手法である。回路要素を“枝”とし、要素同士の接続点を“節点”とする。節点電圧、枝電圧、枝電流を未知数としたキルヒホッフの電流則、電圧則、枝構成式すべてを用いて連立一次方程式にする。インダクタ素子(インダクタンス L)のコンダクタンス G はシミュレーションの時間幅を Δt として $\Delta t/2L$ で表されるが、修正スパース・タブロー法(Revised Sparse Tableau: RST 法)では、新たに要素抵抗 R_t を追加し、 $G' = \Delta t / (2L + R_t \cdot \Delta t)$ とすることで枝数と節点数を大幅に削減でき、計算時間の短縮に貢献する。インダクタ素子は任意の時刻 t における方程式では、 $t - \Delta t$ 時点の電流値を電流源として保持するため、電源とともに連立一次方程式 $Ax = b$ 右辺の定数ベクトルに組み込まれる。LTspice でモデル化できる簡素な回路モデルをいくつか計算し、結果を比較したところ、LTspice の計算時間の 1/2~1/10 程度の短時間で同じ結果を得ることができた。

3. 9 本素線 CIC 導体への RST 法の適用

ITER 用 CIC 導体の SULTAN 試験では、導体の接続側を

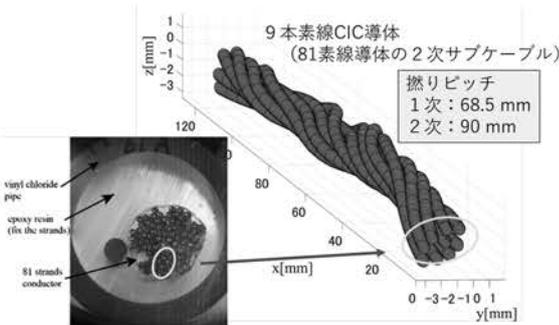


Fig.1 Measured traces of 9-strand CIC conductor

ハンダ含浸して素線間接触抵抗を低減すると、予想外の導体通電初期の電圧発生が観測されている[1]。この解析のため、Fig.1 に示すような 9 本素線 CIC 導体(0.81mm 直径 NbTi・一次撚りピッチ 68.5 mm, 二次撚りピッチ 90 mm)の実測軌道 128mm 分(100 分割)を用いてインダクタンスマトリクスを算出、1 kA のステップ電流を加えた時の電流分布の変化を、電源電極に直結した素線要素間の接触抵抗率を変化させて計算した。RST 法の枝数 4466、節点数 892、最終的に解く方程式の係数行列 A のサイズは $(9824)^2$ であり、LTspice 等でのモデル化は不可能である。電気回路モデル概念を Fig.2 に示す。

4. 接続部の素線間接触抵抗と電流分布の関係

電源の電極接続部と導体間抵抗は $1 \mu \Omega$ で固定し、電極接続部内の素線間接触抵抗率を $0.01 \mu \Omega m$ および $100 \mu \Omega m$ に設定して電源側要素の電流分布解析を行った。Fig.3(a)の通電初期 20 msec で抵抗率の差の影響は見えない。しかし、素線間接触が低抵抗率の Fig. 3 (b)では電流収束に 2 sec 程かかっている一方、(c)の高抵抗率では 1sec 程度と速かった。文献[1]で予想外とされた結果を説明できると考えられる。

謝辞

この研究の一部は R6 原型炉設計共同研究および科研費基盤研究 A(課題番号 21H04477)の助成を受けて実施された

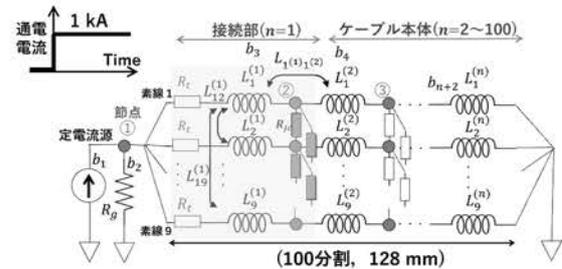


Fig.2 Electric circuit model for 9-strand CIC

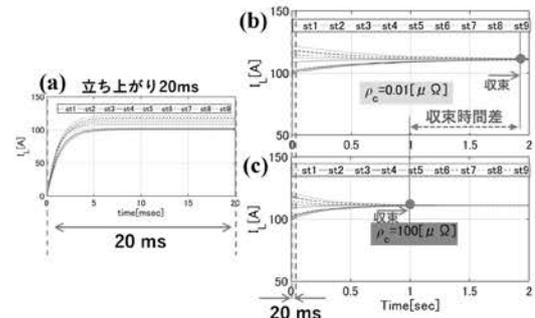


Fig.3 Calculated current distributions with different contact resistances (a) 20ms after current source rises, (b) with $0.01 \mu \Omega m$ and (c) $100 \mu \Omega m$ contact

参考文献

1. B. Stepanov, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, no. 2, (2008), p. 1080.

HTS STARS 導体の機械的エッジジョイントにおける接合抵抗の導体構造依存性

Conductor structure dependence of joint resistance in mechanical edge joints of HTS STARS conductors

比村 元彦, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大); 柳 長門 (NIFS)

HIMURA Motohiko, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.); YANAGI Nagato (NIFS)

E-mail: himura.motohiko.r6@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体 [1] の銅ジャケット側面同士を接合する、機械的エッジジョイントは、着脱可能式分割型高温超伝導マグネットにおける接合手法の 1 種である [2]。先行研究では、銅ジャケット内で REBCO 線材と銅テープを 1 列に積層した構造 (1 列積層構造, Single-Column Structure) における再着脱性と低接合抵抗性が確認された [3]。機械的エッジジョイント用 STARS 導体は、REBCO 線材と銅テープの積層体を銅ジャケットに埋め込んだ構造をしており、銅テープ厚さの増加により接合抵抗は減少するが、導体巻線時に線材に生じる曲げひずみが増加してしまうトレードオフがある。曲げひずみを抑える構造として、ラップジョイント用 STARS 導体 [4] のような、積層導体を複数列に分ける構造が考えられる。そこで本研究では、1 列積層構造と、積層導体を 2 列に分けた、2 列積層構造 (Double-Column Structure) それぞれにエッジジョイントを適用した場合の接合抵抗を比較評価した。

2. 数値解析体系

Fig. 1 に、解析対象である 1 列 16 層積層構造と 2 列 8 層積層構造の接合部断面の概略図を示す。幅 60 mm、厚さ 60 mm の銅ジャケットの片側に 1 列または 2 列の積層導体が収められている。接合部では、積層導体を保護する内側銅ジャケット (厚さ 1 mm) が接触抵抗を模擬する仮想導体 (厚さ 25 μm) と In 箔 (厚さ 100 μm) を介して接合されている。銅ジャケット中の積層導体は、REBCO 線材と銅テープ (各幅 12 mm、厚さ 100 μm)、はんだ含浸領域で構成される。

本研究では、有限要素法 (COMSOL Multiphysics ver.6.3) を用いた数値解析により接合抵抗を計算した。磁場による影響は考慮せず、電位に関するポアソン方程式を支配方程式として電位分布を求めた。また、構成方程式として REBCO 線材の超伝導層に n 値モデルを適用した。パラメータとして、導体を使用する線材枚数と接合長の 2 種類を設定し、1 列積層構造および 2 列積層構造それぞれの接合抵抗を比較した。

3. 解析結果および考察

20 K、導体に流れる電流が導体の臨界電流の 60 % であるときの接合抵抗について、Fig. 2 に接合長 L_{joint} が 100 mm の場合の線材使用枚数依存性を、Fig. 3 に 1 列 16 層積層構造、2 列 8 層積層構造における接合長依存性を示す。どちらも、使用線材数および接合長の増加に伴って接合抵抗は減少した。使用線材数が増加すると、線材間に挿入する銅テープを経由して転流しやすくなり、接合長が増加すると、接合部の面積が増加するためである。

2 列積層構造は、接合部において、外側に位置する積層導体からの転流距離が 1 列積層構造よりも長く、接合抵抗が大きくなると予想できるのに反して、2 列積層構造の方が低くなった。これは、積層導体を 2 列に分けることで、積層導体の上下に位置する銅ジャケットが厚くなり、接合抵抗低減に寄与するためである。接合面の外側に位置する積層導体から転流する電流は主に上下の銅ジャケットを流れる。極低温で銅の導電率が高いときは抵抗が小さくなり、1 列積層構造で積層導体から直接転流するよりも接合抵抗が抑えられる。

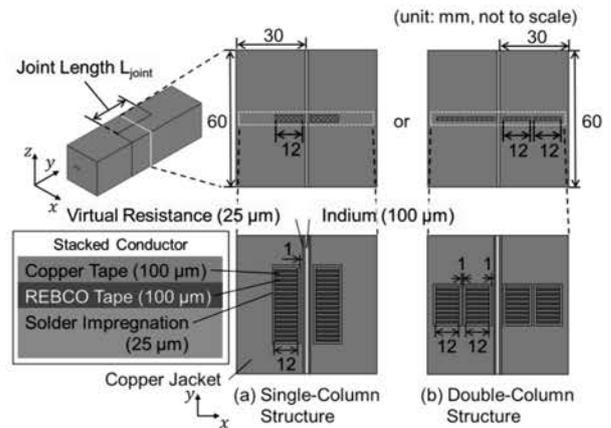


Fig. 1 Conductor configuration with 16 REBCO tapes

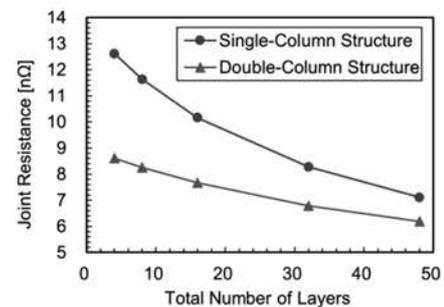


Fig. 2 Dependence of joint resistance on total number of REBCO tape layers (20 K, $L_{\text{joint}} = 100$ mm)

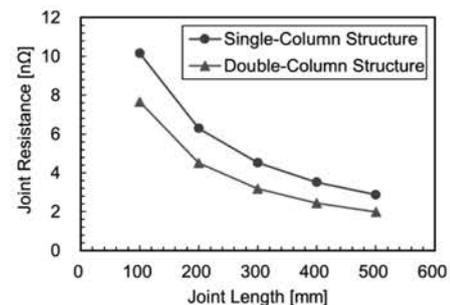


Fig. 3 Dependence of joint resistance on joint length (20 K, 16 Layers)

今後は、磁場による磁気抵抗効果を反映させた導電率を用いて、磁場下における接合抵抗評価を行う必要がある。

謝辞

本研究の一部は NIFS 一般共同研究 (NIFS24KIEA055) および JSPS 科研費 (25K00980) の支援を受けたものです。

参考文献

1. N. Yanagi, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55 (2015) 053021
2. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Plas. Sci., Vol. 40 (2012) 1446
3. S. Sato, et al.: J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1559 (2020) 012110
4. S. Ito, et al.: Plasma Fusion Res., Vol. 9 (2014) 3405086

内部スズ法 Nb₃Sn 線材における Ti・Zn 共添加手法の検討

Investigation of Ti and Zn co-addition method for internal tin processed Nb₃Sn wire

伴野信哉 (NIMS); 谷貝 剛 (上智大学)
Banno Nobuya, (NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 線材における元素添加の研究は高 J_c 化に向けて活発である。その一つである Ti 添加は、 B_{c2} および高磁界 J_c の向上を促す添加元素としてよく知られている。内部スズ法の場合には、前駆体における Ti 添加場所として Nb、Cu 母材、Sn 芯の 3 通りが考えられ、その違いによって Nb₃Sn の層形成にも違いが現れる。加えて、別の興味深い添加元素として、母材へ添加される Zn も断面の相形成に作用する重要な添加元素の一つである。Zn には Cu 母材に残留する性質があり、同時に Nb₃Sn 粒微細化など層の生成促進も確認されている [1]。本研究では、Ti と Zn を共添加した場合、相乗効果が得られるのかどうかを調査している。Nb₃Sn 相形成過程を明らかにし、相形成の観点から最適な Ti・Zn 共添加手法を提案する。

2. 実験方法

試料は以下の手順で作製した。まず誘導炉で Cu-15wt%Zn を溶製し、ドリリングでパイプを準備した。それに純 Sn 芯を挿入して Nb-0.8wt%Ti 合金パイプを被せ、さらに外側に安定化材となる Cu パイプを被せ、スエージング加工とダイス引き抜き加工で直径 0.6mm の線材とした。次にその単芯線を 7 本束ね、外径 3mm、内径 2mm の Cu 材に挿入し、引き抜き加工で直径 0.92mm まで伸線して 7 芯の試料とした (Fig. 1)。比較試料として、Nb/Cu-15Zn/Sn-1.6wt%Ti および Nb-0.8wt%Ti/Cu/Sn の組み合わせで同様の手順で作製した試料も準備した。それぞれ試料名は以下のように名付けた。

- (1) Nb-0.8Ti/Cu-15Zn/Sn: NT-CZ-S
- (2) Nb/Cu-15Zn/Sn-1.6Ti: N-CZ-ST (比較試料)
- (3) Nb-0.8Ti/Cu/Sn: NT-C-S (比較試料)

試料は 500°C/100h の予備加熱ののち、650°C×150h、もしくは 685°C×100h の熱処理を施して Nb₃Sn 層を生成した。画像解析により、Nb₃Sn 層の面積を導出し、短尺試料を用いて通電試験で I_c を計測した後、Nb₃Sn 層の面積で除して J_c とした。 I_c は 1 μ V/cm で定義した。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に NT-CZ-S 試料の 650°C×150h 熱処理後の SEM 像ならびに構成元素の EDS マップを示す。また、Fig. 3 に各試料の SEM 像と Ti マップを比較する。Fig. 3 に示されるように、Nb に Ti を添加した場合 (NT-C-S)、Nb₃Sn 層界面に Ti 化合物は形成されなかったが、Cu に Zn を添加することで厚い Ti 化合物層が現れた。母材に Zn、Sn 芯に Ti を添加した場合 (N-CZ-ST) に比べても、Nb₃Sn 層厚も小さかった。これは Zn が Nb-Ti-Sn-Cu 系化合物を安定化させる効果があることを示唆している。Fig. 4 に示すように、685°C の熱処理を施すことで Nb-Ti-Sn-Cu 系化合物は消失するが、Nb₃Sn 層厚は他と比較してやや薄い。このように一様に Nb に Ti を添加した場合には、Zn の影響で化合物層が界面に形成されてしまい、Nb₃Sn 層生成促進の効果が相殺されてしまうことがわかった。新たな Ti 添加方法の探求が必要である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K04453 の助成を受けた。

参考文献

[1] K. Asai, T. Yagai, N. Banno, IEEE-TAS (2025) 6001505, <https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3539266>

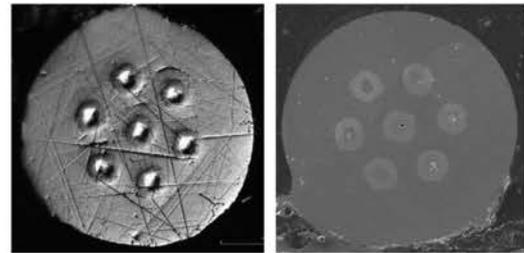


Fig.1. Cross-sections of 7-core Nb₃Sn wires before and after heat-treatment at 650°C×150h.

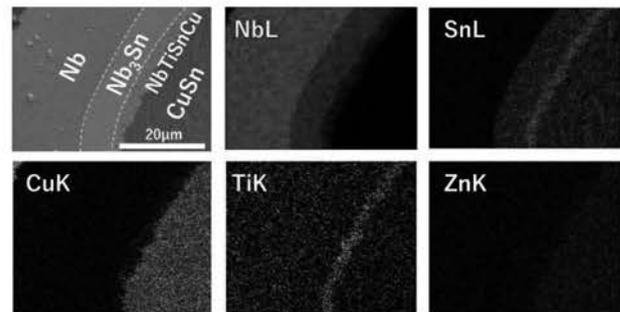


Fig. 2. EDS maps of NT-CZ-S after 650°C for 150 h.

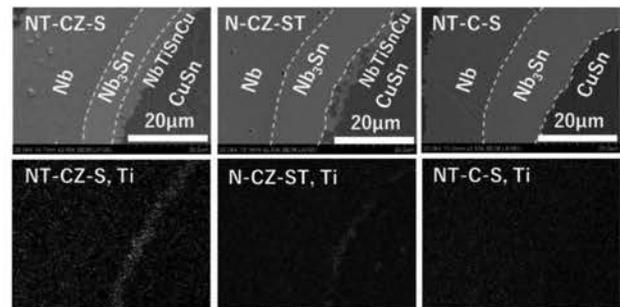


Fig.3. Comparison of Nb₃Sn layer and Ti map after the heat-treatment at 650°C for 150 h.

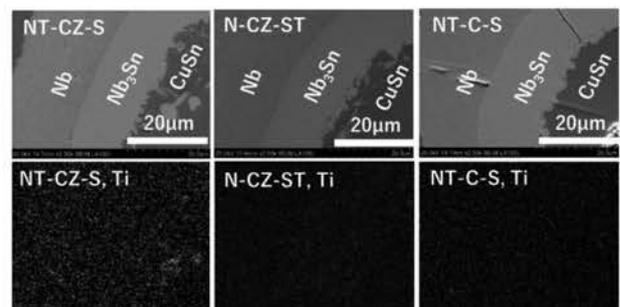


Fig.3. Comparison of Nb₃Sn layer and Ti map after the heat-treatment at 685°C for 100 h.

様々な RE123 薄膜における酸素組成制御

Control of oxygen composition in various RE123 thin films

下山 淳一、相楽 和豊、畠 直輝、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, SAGARA Kazutoyo, HATA Naoki, 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

RE123($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$)はCuO鎖面に大きな酸素不定比性を有し、これが直接キャリア濃度の変化を伴うことから低温物性に大きく影響する。RE123焼結体では一般に $\delta \sim 0.07$ で T_c が最高の最適キャリアドープ状態となり、Y123では92 K台、Gd123では95 K近くに達する。RE123では比較的広い酸素組成範囲で T_c が90 Kを超えるが、弱いオーバードープ状態から弱いアンダードープ状態にまたがるもので、同じ90 K級であっても T_c 以外の物性は大きく変化する。我々はY123焼結体について、弱いオーバードープ状態から最適ドープ状態の結晶粒内の臨界電流特性を比較し、最適ドープ状態は40~70 K、磁場中を除いてオーバードープ状態より劣ることを報告した[1]。一方、RE123薄膜線材においてはキャリアドープ状態と臨界電流特性の関係は十分に調べられていない。そこで本研究ではIBAD基板上に成膜された様々なRE123薄膜に対して酸素量制御を試み、超伝導特性の変化を調べた。

2. 実験

本研究では、Faraday Factory Japan社製のY123線材(PLD法、含 Y_2O_3)、Gd123線材(FF-MOD法、含 BaHfO_3)とY123薄膜(FF-MOD法、含 BaHfO_3)について酸素量制御のためのポストアニールを様々な条件で行い、それらの超伝導特性を c 軸に平行に印加した磁場下におけるSQUID磁束計を用いた磁化測定より評価した。超伝導層の膜厚はそれぞれ $\sim 2 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$ 、 $0.9 \mu\text{m}$ である。

3. 結果と考察

Fig.1に空气中で長時間アニール後急冷したFaraday Factory Japan社製のY123線材のZFC磁化率の温度依存性を示す。as receivedはアニール前の製品で、最も T_c が強く強いオーバードープ状態にあることがわかる。空气中のアニール温度を高くすると伴に T_c は上昇し、450°Cでアニール後急冷した試料はほぼ最適ドープ状態で、475°Cでアニールした試料は弱いアンダードープ状態になり、転移もブロードである。20 Kにおける磁化ヒステリシスの幅より拡張Beanモデルにより計算した J_c の磁場依存性をFig.2に示した。酸素欠損量の増加とともに単調に J_c が低下していることがわかった。この傾向は40 K、77 Kでも、さらに本研究で調べた全てのRE123薄膜試料においても同様であった。つまり、強いキャリアのオーバードープの実現が高臨界電流特性発現に常に有効である。Faraday Factory Japan社製のY123線材に対して空气中、580°Cで3hアニール後、急冷した試料に400°Cでの空气中アニールにより酸素を導入し超伝導特性を調べたところ意外な結果が得られた。Fig.3は銀保護層の有無による超伝導特性の回復の違いを示したもので、銀を除去した試料のほうが超伝導特性の回復が明らかに遅く、このことは銀/Y123界面が酸素吸収の表面反応を速やかにする効果を持つことを示唆している。ただし、銀はY123薄膜内に侵入し積層欠陥を生成するなど、銀保護層形成後の熱処理効果については慎重に考察する必要がある。

参考文献

[1] J. Shimoyama *et al* *Abstract of CSSJ Conf.* Vol.106 (2023) p1.

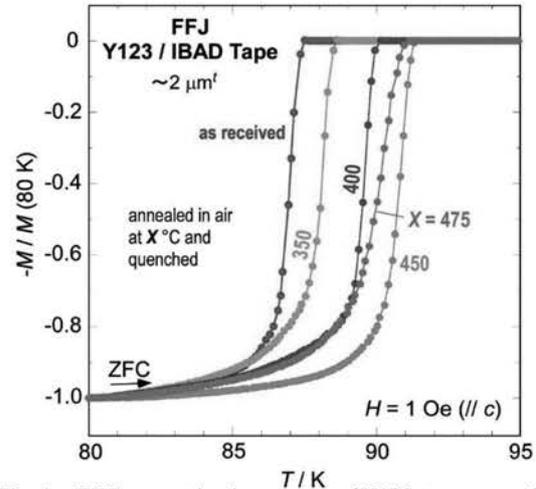


Fig. 1 ZFC magnetization curves of Y123 tapes quenched from various temperatures in air.

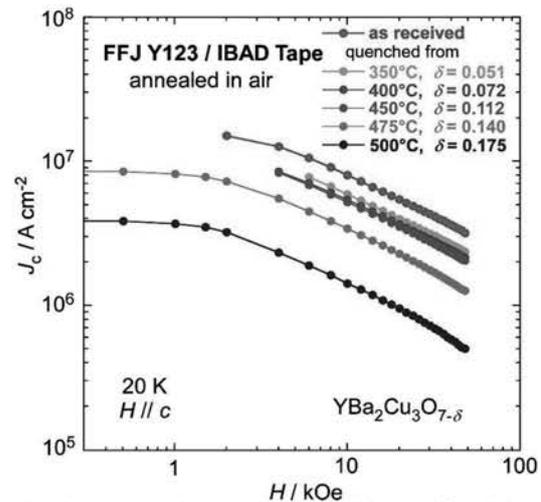


Fig. 2 J_c - H characteristics at 20 K of Y123 tapes quenched from various temperatures in air.

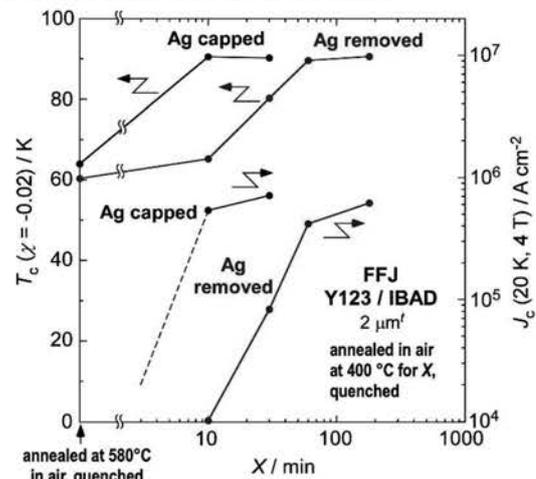


Fig. 3 Recovery process of Y123 tapes during introduction of oxygen by annealing in air at 400°C.

REBCO 多岐線の製造方法と微細構造

Fabrication method and microstructure for REBCO multi-branched wires

金沢 新哲, 陰山 彰, 中西 優斗, 竹本 悠莉(室工大)

KANAZAWA Shintetsu, KAGEYAMA Akira, NAKANISHI Yuto, TAKEMOTO Yuuri (MIT)

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

1. はじめに

REBCO テープ線材は、近年人工ピン入りが市販されるようになり、高磁場応用へに期待がさらに高まるようになった。ピンニングセンターにより線材の高磁場下での臨界電流が向上され、直流機器において応用価値が高い。一方、交流機器への応用にむけた多芯化も進められているが、まだ製品化に至っていない。我々は、ローリングカッターにより多芯線加工を行ってきたが、臨界電流の保持が難しく、最近では芯間にブリッジを数多く有する多岐線の開発を進めている[1]。

REBCO 多岐線の構造は、超伝導層が網状構造となっていることであり、断続的な人工クラックを入れることで形成される。このような構造では、電流経路が複数に分岐され、多芯線のように芯内の単一経路に制限されない。長尺の線材においては、臨界電流が局所的に低い点が現れる可能性があり、多岐構造では電流がその点を迂回して流れるので、臨界電流の保持率が向上されると考えている。しかし、このような多岐構造について、特に人工クラックの微細構造について十分に観察と分析をしていなく、製造方法の検討も十分ではなかったことから、本研究では、製造方法の改善と REBCO 層の微細組織の観察を行うことを目的とした。

2. 実験

REBCO 多岐線の加工には、(株)フジクラ製の GdBCO 線材(幅は 4 mm、厚さは 75 μm 、銅メッキなし、人口ピンなし)を使用した。加工方法はこれまで利用した圧力集中法であり、今回はカッピングマットとしてカプトンテープ(厚さ 50 μm)を線材と SUS304 の間に入れて、ローリング加工を実施した。Fig. 1 にそのイメージを示した。最上部のローラーカッターは3枚のみ表示しているが、実際は1セット37枚で計3セットを使用した。加工負荷は1つのカッターに対して 1 N であり、10回のローリング加工を行った。

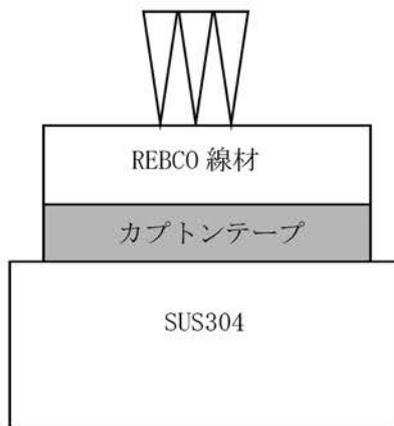


Fig. 1 Fabrication image of REBCO multi-branched wire with a kapton tape

微細構造の観察は電子顕微鏡を用いて、幅が一番大きいクラックを1000倍に拡大して観察し、さらに EDX により中間層に含有されている Y 元素のマッピング解析を行った。

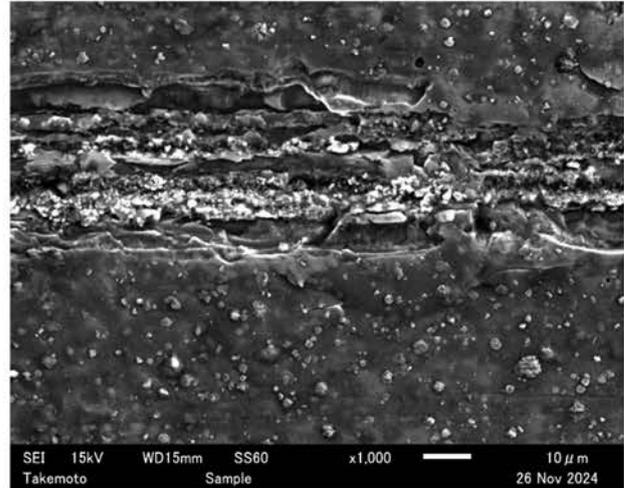


Fig. 2 Crack image on REBCO surface

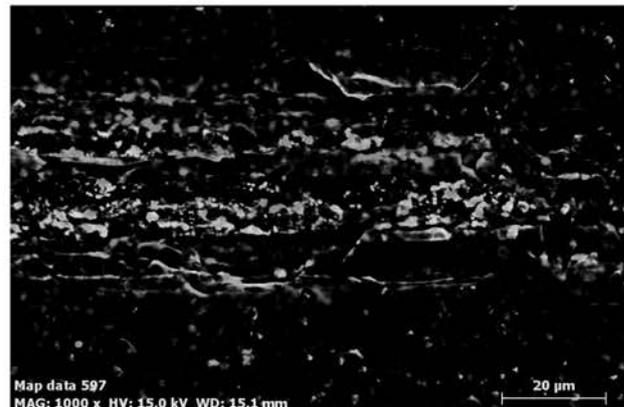


Fig. 3 Y element mapping result for crack

3. 実験結果とまとめ

Fig.2 は REBCO 表面の人工クラックの画像を示し、全体幅が 40 μm 程度である。カプトンテープなしの場合は 60 μm の人工クラックが観察されていたので、それに比べると、クラックの幅が少し減少している。クラック幅の減少は、超伝導層の幅の増加となるので、電流ルートをより多く維持することが可能である。

Fig.3はクラック部位を元素マッピングした結果であり、灰色は中間層で、黒色は超伝導層を示す。クラック内部では中間層がランダムに露出され、このようなことはクラックの深さが中間層に到達していることを意味する。中間層の露出形状は直線的ではないのでこの Fig.3のみで超伝導層が完全に切断されているか判断できないが、Fig.2 のクラック内部が平坦ではないことがみられ、超伝導層が十分に切断された後に表面へ一部露出していると考えている。

参考文献

[1] Ryohei Nishiyama, Shintetsu Kanazawa, Cryogenics 146 (2025) 104011

差動コイル式磁化測定システムの開発による ミリサイズの REBCO 線材の交流損失測定

Measurement of AC-losses for millimeter-sized REBCO wires
with development of a differential coil type magnetization measurement system

金沢 新哲, 西山 凌平(室工大)

KANAZAWA Shintetsu, RYOHEI Nishiyama (MIT)

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

1. はじめに

材料の交流損失には、磁化損(ヒステリシスの面積)と渦電流損があり、絶縁体や抵抗が高い半導体などでは渦電流が小さいため、無視できる場合がある。超電導線材は金属を含めた複合材料であるが、超電導の電気抵抗がゼロであるため、金属に流れる渦電流がほぼなく、渦電流損を考慮しない場合が多い。しかし、多芯構造の超電導線材ではフィラメント間に常伝導シーすを経由した結合損失が存在する。そのため、超電導多芯線の交流損失には、磁化損と結合損が含まれる。最近我々はREBCO多岐線[1]を提案しているが、このような線材のフィラメント間は多くのブリッジを有し、超電導電流が流れるようになっている。そのため、結合損失はほぼ発生しなく、交流損失は磁化損のみであると考えている。

これまで我々は、MPMS磁化測定装置を利用して、REBCO線材の直流磁化(静的な磁化)の測定から磁化損を求めた。実用においては交流磁化(動的な磁化)での評価が必要であり、本研究では交流磁界中で磁化を測定するシステムを製造・開発した。

2. システム構造と実験

差動コイル式磁化測定システムは、主にサンプルを入れる本体と、電圧・磁場計測機器となっている。本体は Fig. 1 に示したように、交流磁場の発生コイル(一次コイル)と、その中心に検出用の小型コイル2つ(二次コイル)、および磁場測定用のホール素子で構成されている。サンプルとホール素子はそれぞれ2つの二次コイルの中心に挿入する。サンプルの磁化の検出において、交流磁界の影響を除去するため、二次コイルの誘導電圧の差動を検出する。測定サンプルは、サイズが4×4 mmのREBCO単芯と多岐線を用いた。測定は液体窒素中で、最大印加磁場が1kG程度である。

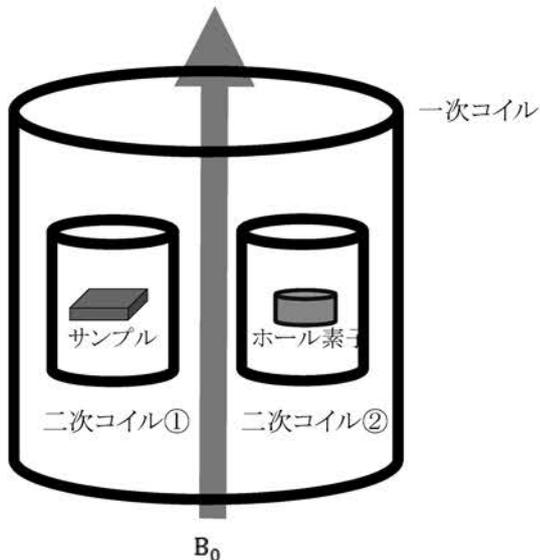


Fig. 1 Main unit image of the differential coil type magnetization measurement system

測定手順は、まず本体を液体窒素中に入れ、サンプルなしの場合の差動を測定し、二次コイル②の位置を調整しながら差動をゼロにした。それから、サンプルを二次コイル①に入れ、磁場と差動を測定した。

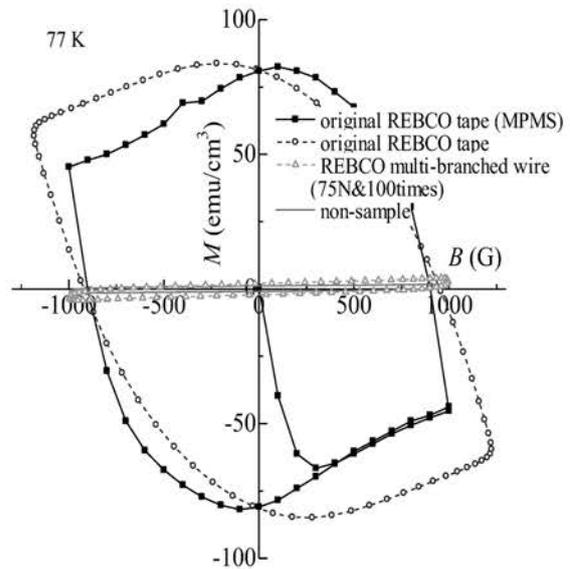


Fig. 2 Magnetic field dependence of magnetization

3. 実験結果とまとめ

今回の測定結果と、これまで MPMS で測定した結果を Fig. 2 に示した。まずサンプルなしの場合、磁化がほぼゼロとなり、ゼロ点調整ができていることがわかる。REBCO 単芯線の場合(○)、大きなヒステリシス曲線が現れ、同じ種類の単芯線を MPMS で測定した磁化曲線(■)の形状と似ている。今回は最大磁場が 1kG を少し超えているので、それによる違いも生じている。磁場ゼロ時の磁化が同じとすれば、ヒステリシス曲線で囲まれた面積が交流損失となる。

REBCO 多岐線(split wire)の磁化は、単芯線より大きく減少されることが測定され、交流損失も大きく改善されている。しかし、損失が非常に小さいため、現在のシステムの測定精度では定量的に解析することが難しく、今後の開発で改善する予定である。

参考文献

[1] Ryohei Nishiyama, Shintetsu Kanazawa, Cryogenics 146 (2025) 104011

低温磁場環境下における REBCO 長尺線材の I_c のバラツキの実測と測定条件の影響に関する考察

Measurement of Spatial I_c Variation of Long REBCO Wire under Low Temperature Magnetic Field Conditions and Consideration on the Influence of Measurement Conditions

木須 隆暢, 呉 澤宇, 東川 甲平(九大)

KISS Takanobu, WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu Univ.)

E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 高温超伝導線材の臨界電流 I_c の空間均一性は、最も重要な要求性能の一つであるにもかかわらず、その評価法については十分に確立できておらず、標準化はもとより、測定条件による見かけ上の変化に関してもほとんど認識されていない。信頼性の高い空間均一性の評価手法の確立は、REBCO 線材の応用の加速のために喫緊の課題といえる。本研究では、長尺線材における低温磁場中の I_c のバラツキについて、磁気顕微鏡を用いた実測によって調べると共に、測定条件の影響について考察を行い、 I_c の標準偏差に対する測定時の空間分解能ならびに試料長の影響を明らかとした。

2. 実験方法

リール式磁気顕微鏡によって幅 4 mm、長さ約 4 m の REBCO 線材を連続搬送しながら液体窒素中で磁化し、線材表面の磁界分布を微小ホール素子を高速走査することによって取得した。得られた磁気像を基に、ピオ・サバル則の逆問題を解くことで I_c の長手方向の変化を導出した。この時の空間解像度は 1 mm であった。同じ試料から 1 cm の短尺試料を切り出し冷却ステージ上に固定し、より高解像度な磁気顕微鏡を用いて、5 K、1 T の条件下において空間解像度 200 μm の磁気像を得たのち、同様に I_c の長手分布を導出した。

3. 実験結果・考察

リール式連続測定によって得られた、4.2 K、1 T における I_c の長手変化を Fig. 1 に示す。次に、長尺試料と短尺試料両者の結果の空間周波数 f に対するパワースペクトルを調べたところ、Fig. 2 に示す様に $1/f$ 型の特性を有することが明らかとなった。さらに、 I_c 導出時の空間解像度を変化させて、 I_c のバラツキより得られる標準偏差 σ_{I_c} を導出したところ、空間解像度ならびに試料長によって見かけ上変化することが分かった。周波数特性を基に、この依存性を記述する解析式として以下を導出した。

$$\sigma_{I_c} = K \sqrt{\ln\left(\frac{f}{f_1}\right)}, \quad \text{where } f = \frac{1}{\Delta x}, f_1 = \frac{1}{L}, K \text{ is constant. (1)}$$

得られた解析式は、Fig. 3 の実線で示す通り実験結果と定量的に良い一致を示した。ここで、定数 K は測定における線材長や空間解像度に依らないことから、線材の空間均一性を表す指標として有用である。

以上により、 I_c の標準偏差を空間分解能ならびに試料長の関数として導出できることを示すと共に、測定条件に依らない試料固有のパラメータの導出法について示すことにより、空間均一性の新たな評価手法の提案を行った。REBCO 線材の実用化において、線材試料の均一性を標準化するために重要な知見になると考えられる。

謝辞: 本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】【JPMJMS24A2】ならびに JSPS 科研費 JP24H00320 の支援を受けたものである。

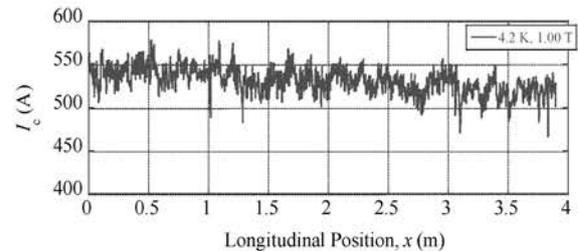


Fig. 1 Longitudinal I_c variation of 4-m-long REBCO CC at 4.2 K and 1 T of external magnetic field, which was measured by a reel-to-reel magnetic microscopy with a spatial resolution of 1 mm.

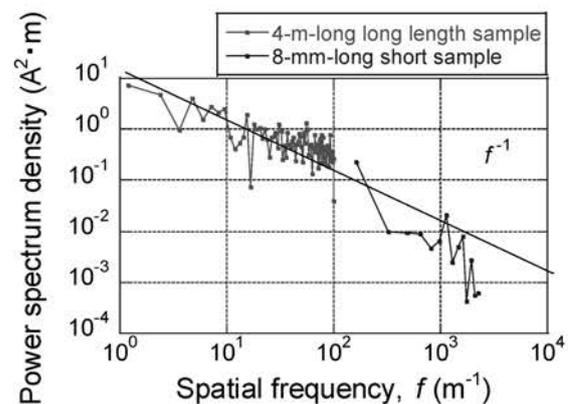


Fig. 2 Spatial frequency dependences of I_c fluctuation observed by the reel-to-reel measurement of 4-m-long sample and a high-resolution measurement of 8-mm-long short sample taken from the same tape.

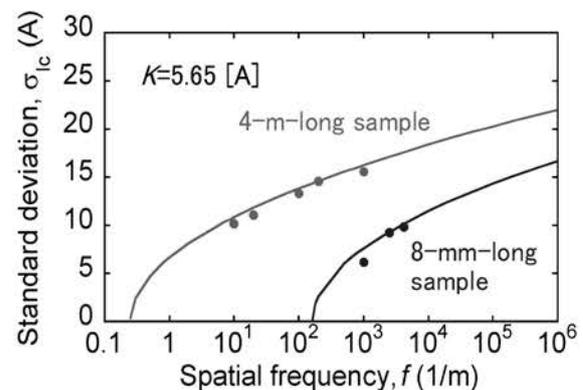


Fig. 3 Change of observed standard deviation of I_c fluctuation, σ_{I_c} , measured by different spatial resolution and sample length. The solid lines are given by eq. (1) with a constant parameter $K=5.65$ [A].

ハイエントロピー型 $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 超伝導薄膜における照射耐性の向上

Improvement of irradiation resistance for

high-entropy-type $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconducting thin films

都立大¹, 横国大² ○山下 愛智¹, 山中 慎大¹, 室井 孝太¹,

水口 佳一¹, 金子 卓人², 大野 直子²

TMU¹, YNU², °Aichi Yamashita¹, Mahiro Yamanaka¹, Kota Muroi¹,

Yoshikazu Mizuguchi¹, Takuto Kaneko¹, Naoko Oono²

E-mail: aichi@tmu.ac.jp

$REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 銅酸化物高温超伝導体($RE123$; RE : レアアース)は、高い超伝導転移温度(T_c)と上部臨界磁場を有することから、次世代型核融合炉での超伝導マグネット応用が期待されている。一方で、核融合反応時に生じる中性子などの放射線照射による超伝導特性の低下が実用上の課題となっている。近年盛んに研究が進んでいるハイエントロピー合金(HEA)において、放射線照射耐性の向上が報告され[1]、核融合炉などの放射線環境下での応用が期待される。これまでに我々は、HEA 概念を従来の合金から化合物へ拡張した新しいハイエントロピー型(HE 型)超伝導体の開発を行ってきた。その中で、 RE サイトを HE 化した $RE123$ の多結晶体及びエピタキシャル薄膜を開発してきた[3-5]。HE 化による照射耐性への影響を明らかにするため、HE 型 $RE123$ 薄膜へのイオン照射実験を試みた。

多結晶体試料の合成とパルスレーザー堆積 (PLD) 法を用いた薄膜作製を行い、得られた試料の超伝導特性等を評価した。He イオン照射前後の磁化測定から、従来の YBCO では超伝導が消失する照射量においても、HE 型 REBCO では超伝導状態が維持されることを明らかにした [5] (図 1)。本講演では、HE 化が照射前後の超伝導特性等に及ぼす影響について議論する。

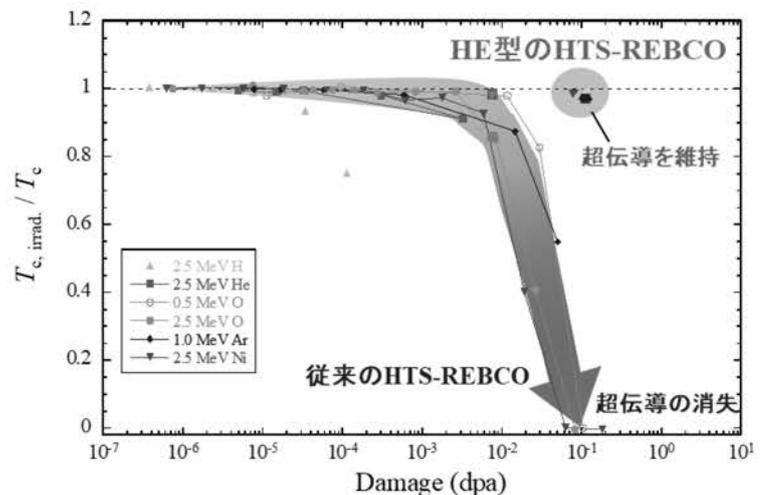


Fig. 1 Damage dependence of $T_{c,irrad.}/T_c$ after various ion irradiation for conventional and HE-type REBCO

引用文献

- [1] Q. Xu *et al.*, *Sci. Rep.* **11**, 608 (2021).
- [2] Y. Syukunami *et al.*, *Physica C* **572**, 1353623 (2020).
- [3] A. Yamashita *et al.*, *R. Soc. Open Sci.* **9**, 211874 (2022).
- [4] A. Yamashita *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, 050905 (2022).
- [5] 「超伝導体及び超伝導体の製造方法」山下愛智等, 特願: 2023-087946, 出願日: 2023/5/29.

パルス電流と回転ステージを組み合わせた 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 by Combination of Pulsed Current and Rotation Stage

土屋 雄司, 野島 渉平, 淡路 智(東北大), Hugo Sourice, 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、4.2-20 Kでの高パフォーマンス運用により 30 T 以上の強磁場マグネット [1]や、次世代コンパクト核融合装置への実装に向けた研究が進展している。REBCO 線材は、その材料固有の強い異方性に起因し、外部磁場の印加角度に対して I_c が顕著な依存性を示す。このため、REBCO 線材の機能評価および応用機器設計において、低温・高磁場環境下における可変温度かつ磁場印加角度可変の I_c 測定技術の確立が重要な課題となっている。

これまで、REBCO 線材の I_c の磁場印加角度依存性の測定は、測定系の発熱を抑制するため線材を幅数 10 μm 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。一方で、超伝導特性の不均一性による再現性の低さや正確な幅の見積もりが課題であった。

そこで本研究では、パルス通電による発熱の抑制に着目した [2]。これまで我々が作製した kA 級パルス電源 [3] と、磁場方向を任意に制御可能な回転機構付きプローブ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。

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 μm)を用いた。パルスレーザーを用いて、試料の幅を約 20 μm 、130 μm 、長さ 1-2 mm のマイクロブリッジに加工した。ブリッジ加工では、電流経路を折り返すことで電磁力を軽減した。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。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]。

3. 実験結果及び考察

図 1 に、パルス電流を用いて測定した REBCO 線材における 20 K、18 T での各磁場印加角度における電流-電圧特性を示す。すべての磁場印加角度にて 2 μV 程度の電圧ノイズが現れた。前回の学会での報告では電圧ノイズは 20 μV であったのに対し [4]、電磁力の抑制が電圧ノイズの低減に有効であることが示された。また、電流容量は DC 電流ではこれまで 10 A 級であったのに対し、パルス通電を用いて 100 A 級の通電測定を達成した。通電後の温度上昇は 0.1 K 程度であったことから、発熱が抑制されたことが明らかになった。

図 2 に、幅 4 mm とパルス電流、幅 130 μm とパルス電流、幅約 20 μm と DC 電流を用いて測定した REBCO 線材における 20 K での I_c の磁場印加角度依存性を示す。マイクロブリッジ加工を施した幅 130 μm の試料について、線

幅に対するスケールした。また、幅 20 μm の試料は、ブリッジ幅の計測が困難であるため、0°方向の I_c の値でスケールした。結果、3, 5 T では I_c の磁場印加角度依存性は良く一致したが、18 T では最大 40% の誤差が見られた。これは、フィッティング電圧範囲の設定による誤差と考えられる。

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すことで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。

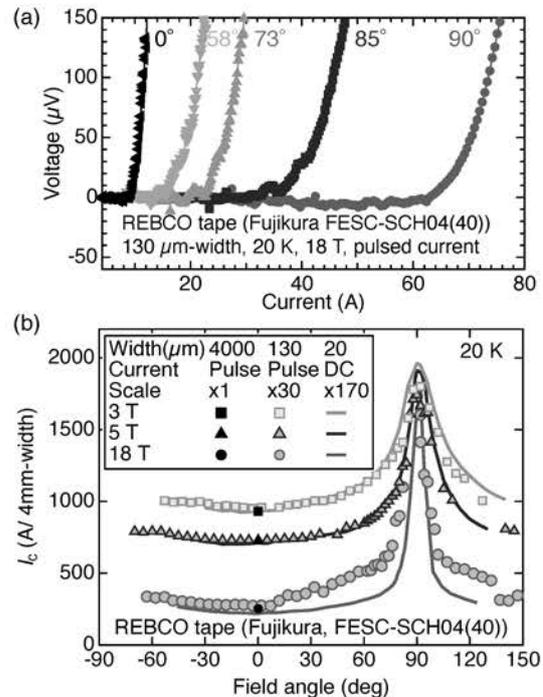


Fig. 1 (a) Current-voltage curves in the REBCO tape at 20 K, 18 T with various magnetic field angles. (b) Field angular dependence of I_c the REBCO tapes with different width from 20 μm to 4 mm.

謝辞

本研究の一部は、科研費 (23K22792)、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] S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **35**, 4300406 (2025).
- [2] F. Sirois *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 3585 (2009).
- [3] Y. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **35**, 9500805 (2025).
- [4] Y. Tsuchiya *et al.*, Abstract of CSSJ Conference, vol. 108, p.64 (2024).

機械学習を導入したリール式磁気顕微鏡による REBCO 線材の局所不均一性の汎用的解析手法の検討: 空間解像度による影響

Generalized Detection Method for Local Inhomogeneities in REBCO Wires by Reel-to-reel Magnetic Microscopy Coupled with Machine Learning Based Analysis: Influence of Spatial Resolution

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

1. はじめに

長尺希土類系高温超伝導REBCO線材における臨界電流 I_c の空間均一性の向上は、各種応用機器の設計において重要な因子である。REBCO線材の品質保証や受け入れ試験に向けて、信頼性の高い評価手法の確立が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によって取得した2次元磁化電流画像に機械学習を導入することで、通常のTapestar™による一次元的 I 測定では検出できていない電流障害因子obstacleを自動的に検出することに成功した。また、現在線材メーカーが採用している複数の主要な製造プロセスによるREBCO線材に対し、製造プロセスによらず適用可能な汎用的な解析手法について検討を進めた[1]。しかしながら、計測時の空間解像度が解析結果に与える影響は未だ十分に明らかとなっていない。本研究では、磁化電流画像の異なる空間解像度による線材局所不均一性の解析結果の違いを検討した。

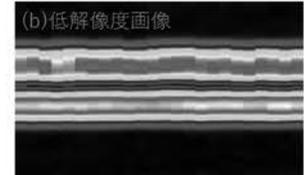
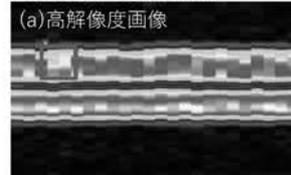
2. 実験方法

PLD法による線幅5 mmの長尺テープ線材を、リール式磁気顕微鏡により測定した。長手方向にカットオフ波長0.6 mmのローパスフィルタによりノイズ除去し、詳細な空間情報を保ったまま面内の磁化電流密度 J 分布を評価できた。また、カットオフ波長1.0 mmを適用することでより低い空間解像度の J 分布に調整した。Obstacleを含む J 分布の画像を教師データとして2つのラベルを定義した。1) obstacleのドメインが独立に存在する: Isolated Obstacleと、2) クラスタ状のドメインを形成する領域: Cluster of Obstacles、2つのラベルを有する物体検出モデルの学習を行った。高解像度と低解像度の2種類/画像を独立で学習し、2つの物体検出モデルを作成した。検出対象の領域をBounding boxで示し、Ground truthであるObstacle領域との重ね具合を示す指標IoU (Intersection over Union)が両方とも79%と十分に高かった。さらにモデルの検出精度に、再現率Recallと適合率Precision両者の調和平均F1-scoreを用いて評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1に学習済みの高解像度モデルを用いて、(a)高解像度 J 画像と(b)低解像度 J 画像検証用データに適用した検出例を示す。(a)画像にBounding boxが正しくObstacle領域を示し、(b)では検出できずRecallが低くなる。また、低解像度モデルを用いて、同様に(c)高解像度 J 画像と(d)低解像度 J 画像検証用データに適用した検出例を示す。(c)と(d)両方とも画像左のObstacle領域が正しく検出されているものの、(c)において健全領域に関わらずObstacle領域としてBounding boxesが付けられPrecisionが低くなる。各100枚の画像を用いて、F1-score解像度を算出しTable 1にまとめた。これらの結果

高解像度モデルを使用



低解像度モデルを使用

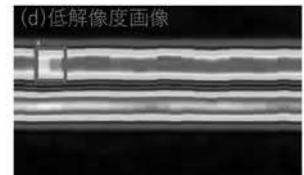
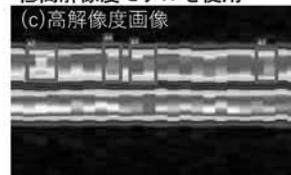


Fig. 1. Object detection results predicted by two models trained by high- and low-resolution J maps as teaching datasets, respectively. Adopting the high-resolution model to (a) high-resolution J map and (b) low-resolution J map, while low-resolution model to (c) high-resolution J map and (d) low-resolution J map.

Table 1. F1-score comparison between object detection model trained by J maps with different resolutions as teaching datasets, adopted to J maps with different resolutions for validation, respectively.

高解像度モデル	92%	51%
低解像度モデル	63%	88%
	検証用高解像度データセット	検証用低解像度データセット

から、教師データと検証データの解像度のミスマッチにより精度が低下するが、低解像度画像を学習させることで低解像度画像にも高い精度の検出が可能であることが分かった。

次に教師データと検出画像の解像度が同じにもかかわらず、検出結果の違いについて検討した。分解能の低下により、Isolated obstacleにおいて、微小な電流障害領域の検出が困難となった。また、Cluster of obstaclesにおいて、Obstacleの検出数はおおそ一致するものの、電流障害領域の面積も広く評価される傾向があることが分かった。

線材の応用先により線材の空間均一性を評価する際の空間解像度が重要となり、本研究では適切な空間解像度の選択に重要な知見を得られた。

謝辞 本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMS24A2 ならびに JSPS 科研費 JP24H00320, JP23K13368 の助成を受けたものである。

参考文献 [1] 呉 *et al.*, 低温秋予稿集(2024), 1P-p15.

水平配列 REBCO 超伝導線材の交流損失特性

AC Loss Property of Horizontal Array of REBCO Superconducting Tapes

佐々 滉太, 大石 遼真, 姫野 雄輝, 末永 隆笑, 三浦 峻, 宮崎 寛史, 岩熊 成卓(九州大学)

SASA Hiromasa, OISHI Ryoma, HIMENO Yuuki, SUENAGA Takaemi, MIURA Shun, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka
(Kyushu University)

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

1. はじめに

交流応用において交流損失は機器の効率低下のみならず、巻線温度上昇の原因となり臨界電流特性等にも影響を及ぼす。そのため交流の超伝導機器を設計する際には交流損失の発生量を正確に見積もる必要がある。モータ等の巻線はレーストラックコイルを積層して構成されることが多く、線材が垂直および水平方向に配列されることになる。そこで本研究では、線材が水平方向に配列された場合に注目し、その交流損失特性を明らかにするために実験と解析を行った。

2. 実験方法

複数枚の短尺の REBCO 超伝導線材を水平方向(線材幅方向)に配置した試料に垂直方向(線材 c 軸方向)の外部磁界を印加し、ピックアップコイル法により測定した磁化から交流損失を算出した。線材の枚数と配置間隔をパラメータとした。試料の諸元と実験条件を Table.1 に示す。

3. 解析方法

線材の配置条件(枚数、間隔)は実験と同じとし、二次元断面のモデルを作成した。COMSOL Multiphysics を用いた有限要素法解析で、T-A 法に基づいて交流損失を算出した。

4. 結果と考察

解析結果の一部を Fig.1 に示す。実験および解析のいずれにおいても以下のような特性が見られた。磁界振幅が小さい場合、線材枚数の増加もしくは配置間隔の減少にともなって交流損失は増加する。線材間のギャップでは遮蔽効果により磁束が集中しており、線材エッジ部には外部磁界より大きな磁界が印加されることとなり、損失が増大すると考えられる。

磁界振幅が大きい場合、交流損失は線材枚数や配置間隔に関わらず、線材 1 枚の場合の特性に一致する。中心到達磁界を上回る磁界では遮蔽効果による反磁界がほとんど影響しないためであると考えられる。

得られた交流損失特性に対して温度スケールリング[1]に基づく規格化を適用し、交流損失を $W/\mu_0 I_{c0}^2$ 、磁界振幅を $B_m/\mu_0 I_{c0}$ に変換した。 I_{c0} は自己磁界下での臨界電流値である。変換後の損失特性の低磁界振幅領域を累乗関数 AB_m^γ でフィッティングした際の係数 A と指数 γ を Fig.2 に示す。配置間隔が超伝導層幅とほぼ同じ 2.05 mm の場合、係数 A と指数 γ は線材枚数に関わらずほぼ一定で、交流損失は線材 1 枚の場合とほぼ一致する。この条件では隣接する線材の遮蔽効果の影響は小さく無視できると考えられる。配置間隔 0.13 mm の場合、係数 A と指数 γ の両方が線材枚数増加にともなって著しく変化する。Bean モデルに基づいて導出された、線材枚数無限大の場合についての解析式[2]では、配置間隔が無限大のとき $\gamma = 4$ であり、間隔を小さくしていくと 2 に漸近することが報告されており、本研究でもそれに矛盾しない結果が得られた。

5. まとめ

線材間の距離を縮めて機器を小型化することは、交流損失の増加とトレードオフの関係にあることを実験および解析から明らかにした。解析では、磁界振幅 0.01 T において、2 枚の線材を 0.13 mm 間隔で並べた場合、1 枚の線材に比べて 1.7 倍の交流損失が発生する結果となった。航空機応用のように冷却系を含むシステム全体での小型軽量化が求められる場合において交流損失を定量的に評価することの重要性が、本研究の実験および解析により一層明確になった。

Table.1 Sample specifications and measurement conditions.

Tape cross-section	2 mm(width)×0.16 mm(thickness)
Superconducting layer	EuBa ₂ Cu ₃ O _y + BaHfO ₃ 1.94 mm(width) × 2.5 μm(thickness)
I_c at 77 K, s.f.	83 A
Temperature	30, 40, 50, 65, 77 K
Applied field	Amplitude: $5 \times 10^{-3} - 2$ T Angle: 90° ($B // c$ -axis)
Number of tapes	1, 2, 3, 5
Distance of gap	0.13, 0.60, 2.05 mm

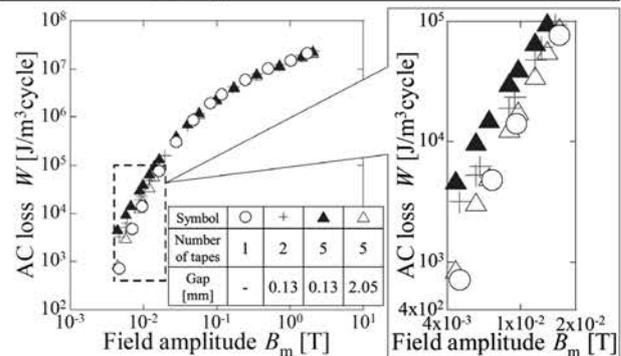


Fig.1 Calculated AC losses.

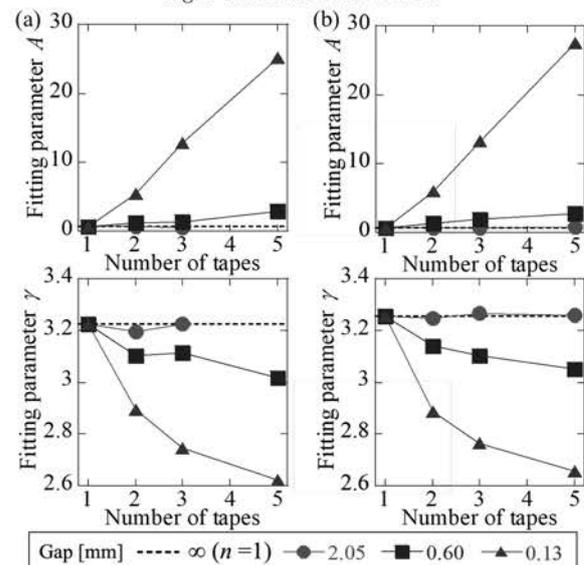


Fig.2 Fitting parameters of (a) measured and (b) calculated AC losses.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(24K17264, 23H00187)、公益財団法人木下記念事業団および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- M. Iwakuma, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 19 (2006) pp.350-358
- Y. Mawatari,: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 44, No. 1 (2009) pp.2-12

積層厚膜型 Bi2223 短尺テープの作製

Preparation of Bi2223 short tapes composed of stacked thick films

大久保 龍一、元木 貴則、下山 淳一(青学大)

OKUBO Ryuichi, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail : c5624045@aoyama.jp

1. はじめに

(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_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。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きた。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 が 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压プレス、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®では十分に生かされなかった。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銀と積層した構造の Bi2223 短尺テープの作製に取り組んでいる。

2. 実験方法

積層 Bi2223 厚膜試料は幅 ~ 5 mm、長さ= 10 cm の銀箔 (30 μm または 50 μm) をスラリーにディップコートし、乾燥後それらを積層し、一軸プレス、一次焼成、中間一軸プレス、2 次焼成、還元ポストアニールの工程で作製した。スラリーは Bi サイトに対して 17.1% の Pb を含む Bi2223 粉末にエタノールと水を 1 : 9 の割合で加え調製したものである。作製した試料に対して XRD、SEM、光学顕微鏡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。また、仕込金属組成を表すパラメーターとして X を $X = \text{Pb}/(\text{Bi}+\text{Pb})$ と定義した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に標準組成 ($X = 0.171$) で作製した積層厚膜材料 (Bi2223 厚膜 4 層) に対して 830°C - 48 h, $P_{\text{O}_2} = 8$ kPa の条件で 1 次焼成を行い、中間一軸プレス後、810°C - 12 h, $P_{\text{O}_2} = 3$ kPa で 2 次焼成、755°C - 48 h, $P_{\text{O}_2} = 1$ kPa で還元ポストアニールを行った試料の表面 XRD を示す。Bi2223 が主相で生成し、Bi2223 の相分率も 96% と高い値を示した。また、00/ l ピークの強度が大きいことから強く c 軸配向していることも確認できた。Fig. 2 にこの試料および同時に作製した別の試料の I - V 特性を示す。 I_c は 36 A, 40 A であり、4 層の膜厚は合計 52 μm , 51 μm であることから、 $J_c = 15000$ A/cm², 12000 A/cm² と見積もられた。これは前回報告した単層厚膜試料よりも高い値である [2]。Fig. 3 に $I_c = 40$ A の試料の光学顕微鏡像を示す。 J_c の改善は積層構造により銀との接触面積が増大し、Bi2223 多芯線材と同様の銀との界面近傍に高度に c 軸配向した緻密な領域が増えたためだと考えられる。講演では線材の構成や仕込金属組成、作製条件の最適化を進めた積層厚膜型 Bi2223 短尺テープの微細組織や超伝導特性についても報告する。

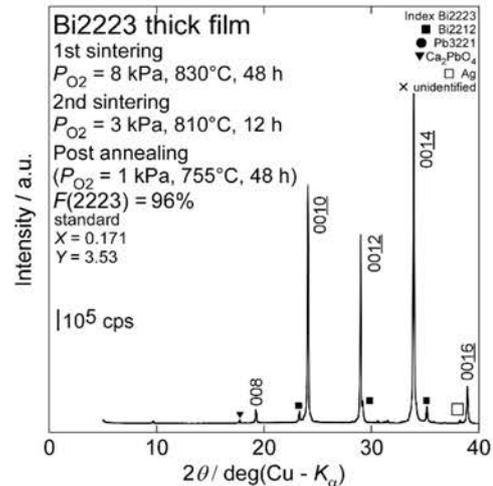


Fig. 1 Surface XRD pattern of Bi2223 thick film in a four layer stacked Ag composite sample after post annealing

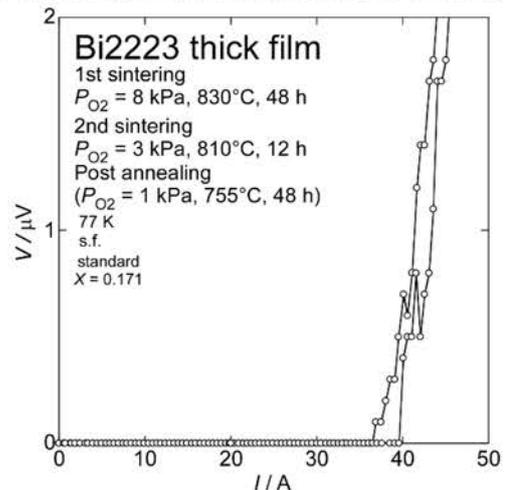


Fig. 2 I - V curves of four Bi2223 thick films layer stacked samples measured at 77 K in self-field.

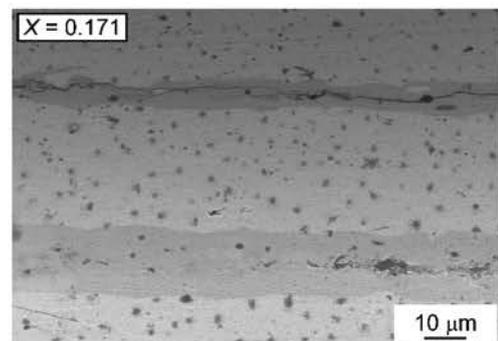


Fig.3 Optical microscope image of polished cross section of four Bi2223 layer stacked sample

参考文献

- [1] J. Shimoyama et al., *Abstract of CSSJ Conference* Vol.105 (2023) p16.
- [2] R. Okubo et al., *Abstract of CSSJ Conference* Vol.108 (2024) p150.

接続部のある線材 Bi2223 と RE123 の短絡電流試験 Short-circuit experiments of Bi2223 and RE123 tape, including their connection parts

山口作太郎, 林一冨, 仁田野 陽菜, 神田昌枝, IVANOV Yury, 渡邊 裕文 (中部大学)
YAMAGUCHI Sataro, HAYASHI Issa, NITANO Hina, KANDA Masae, IVANOV Yury,
WATABAE Hirofumi (Chubu Univ.)
E-mail: yamax@fsc.chubu.ac.jp

1. はじめに

二種類の超伝導テープ線材 (住友電工製 Bi2223, 各社の RE123) の短絡電流試験を継続^{1,2)}している。短絡電流を流すと超伝導が破れると同時に大きな温度上昇が生じるが、RE123 線材 (銅メッキ厚 ≈ 20 ミクロン) ではピーク電流 (パルス幅 ≈ 40 ms) が臨界電流 10 倍程度までであれば、劣化は観測されなかった。しかし、ピーク電流が ~ 15 倍になると、焼損破断した。一方、Bi2223 線材 (銅合金強化線材, パルス幅 ≈ 10 ms) ではピーク電流が ~ 20 倍まで焼損は生じなく、臨界電流の数%の減少が生じた。上記は線材単体の性能試験であり、今後ケーブルでの短絡電流試験が必要になるが、上記の値を基にして安全回路の設計を進めることになる。

以上の結果を踏まえて、次のステップとして長距離送電を考えるとテープ線材の半田接合部があるため、接続部の短絡電流試験が必要になる。半田部は超伝導状態にならないので通常通電時でも常に発熱があり、接続抵抗の低いことが求められる。更に、Bi2223 ではテープ線材は表裏対称であるが、RE123 では非対象であるため、接続部構造は複数想定できるが、今回は Bi2223 と同様な接続方法で試験を行った。

2. 接続部構造と試験装置

半田接合したテープ線材には4つの電圧タップ (B, C, D, E) を取付け、更に銅ブロックとの接続抵抗のモニターのため、銅ブロック側にも電圧タップを2つ (A, F) 取り付けた。Fig. 1 にその模式構造図を示す。そして、電位差 V_{BE} , V_{CD} , V_{BC} , V_{DE} の比較を行った。つまり、半田接合部があるタップ間と無いタップ間の比較を行った。サンプルは3種類あり、自作サンプル (接合部面積 22.5 mm^2 , 85.5 mm^2) 及び住友電工製の接合部 (面積 55.0 mm^2) である。液体窒素温度での接合部抵抗は、それぞれ $204 \text{ n}\Omega$, $45 \text{ n}\Omega$, $70 \text{ n}\Omega$ であった。

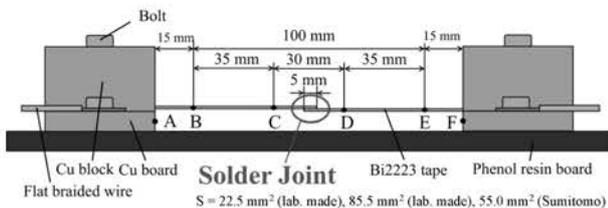


Fig. 1 Schematic structure of solder jointed HTS tapes and copper block connectors

尚、電位差 V_{AB} , V_{EF} の測定を行い、銅ブロックとの接触抵抗の見積を行った。HTS 線材と銅ブロックとの接触面に In シートを挟んでボルトで締め、トルク管理を行う場合と In シートを挟まない場合を比較した。その結果、In シートを使うと接触抵抗が $1/10$ ほどになり、半田接合とほぼ同等になった。このため、それ以降の実験では In シートを常に使うことにした。

更に、パルス通電する電源は電解コンデンサにサイリスタをスイッチ素子として構成した。これは直流送電で利用する電力変換器の直流側出力端に多くの場合に高圧コンデンサを利用する構造を模擬するためでもある。

また、パルス電流通電による線材劣化を調べるために臨界電流 (I_c) 測定を行って来たが、その誤差を複数の方法で比較した。具体的には3回の測定で得たデータの標準偏差、標準誤差を用いるほかに誤差伝搬を用いる方法である。また、接続部抵抗の変化についても計測を行い、評価を行った。

3. 予備実験の結果

Fig. 2 に Bi2223 線材の実験結果の一例を示す。このサンプルは半田接合部面積が 85.5 mm^2 あり、半田接合部の長さは 21 mm ほどである。ピーク電流は 2.7 kA となっている。電圧ピークはそれぞれのタップ間で位相はほぼ揃い、BE 間電圧が一番高く、ついで接続部が無い BC 間と DE 間となり、一番低い電圧波形は CD 間である。これらの電圧差傾向は他の Bi2223 サンプルでも変わらなかった。

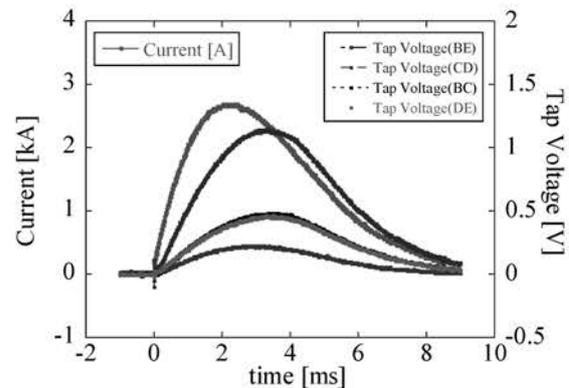


Fig. 2 Waveforms of current and voltages for Bi2223 tape, the peak current is 2.7 kA

電圧タップ間距離は CD 間, BC 及び DE 間では 15%ほど短いだけだが、電圧差は 2 倍ほどなる。つまり、短絡時には実効的に半田接合部のあるタップ間の電圧が低く、結果として発熱も抑制されることが分かった。更に、接合部は線材が電流方向に 2 本あるため、熱容量が 2 倍あり、半田接合温度は他の部分に比べて半分以下になることが期待できる。このため、接合部は通常の線材部分に比べて短絡電流に対して強いと想定している。

参考文献

- 仁田野ほか, 「パルス電流通電時の HTS テープ線材の抵抗時間変化と臨界電流について」 電気学会全国大会, 302C-2, 5-110, March, 2025
- S. Yamaguchi et al., "A Short-Circuit Experiment of High-Temperature Superconductor Tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 5, 2024, Art. no. 8000805

EV の急速充電用超電導 DCDC コンバータの高昇圧比・大電流化

Investigation of higher boost and larger current battery charge for EV with superconducting DCDC converter

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

運輸部門の CO₂ 排出量は、総排出の 20% 近くを占めるため、製造から廃車の排出を考慮すると 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ており、急速充電器の開発は急務である。昨年ダイムラー社が大型トラック向け MW 充電器を発表、今年 BYD が自家用普通 EV 向けの MW 充電を発表し、中国全土に 4000 基の設置計画を公表した。EV の車載バッテリー電圧は 800 V が普及しつつあり、容量も長距離トラックで 600 kWh を超えるものもある。短時間充電には、より高圧の充電器が必要となり、高圧・大電力充電器開発は必須である。

高圧・大電力充電器実現のため、本グループはこれまで MgB₂ や Bi2223 とした液体水素冷却可能なコイルも用いてスイッチング素子・ダイオードと組み合わせた DCDC コンバータを開発してきた[1]。液体水素冷熱と、蒸発ガス冷熱、最終水素ガス利用も想定した低炭素直流電力システムを提案している。昇圧して大電流を充電するコンバータにおいて、充電電流の昇圧比倍の電流通電能力が要求されるインダクタに超電導コイルを適用する有効性を証明した。本講演では、高圧化する EV バッテリーへの急速充電を想定してインダクタ・コイルを 2 つ用いる高昇圧比タイプコンバータの動作試験と、2 倍昇圧 MgB₂ 大電力コンバータの試験結果について報告する。

2. ダブルインダクタ方式高昇圧比コンバータ

Fig.1 は、Bi2223 コイルを 2 つ使用した高昇圧比コンバータ回路である[2]。ここで L1, L2 は同じ 12 mH のインダクタンスである。コンデンサは 12,000 μF でスイッチングに IGBT を 2 つ使用する。この回路の昇圧比 (V_{out}/V_{in}) は、スイッチング周期のうち IGBT がオンになる割合 (デューティ: D) として

$$V_{out}/V_{in} = (1+D)/(1-D) \quad (1)$$

と表せる。2 倍昇圧回路では D = 0.5 で昇圧比は 2 だが、Fig.1 の回路では昇圧比は理論的に 3 となり、より高圧のバ

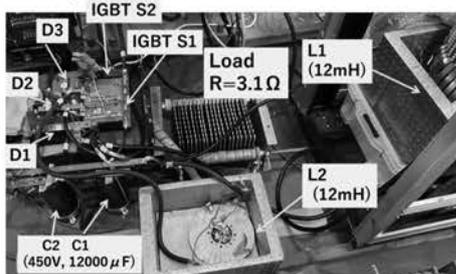
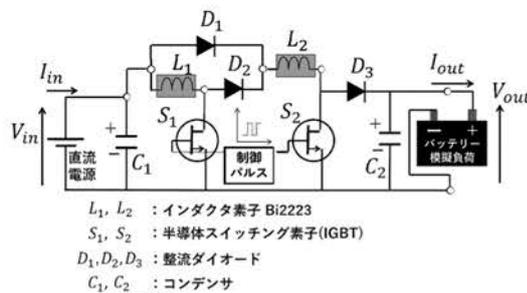


Fig.1 Double-inductor type DC-DC converter circuit

テリー充電回路となる。Fig.1 下はコンバータ回路の写真である。負荷はバッテリーの充電抵抗を想定した 3.1 Ω グリッド抵抗を用いた。

3. 高昇圧比 Bi2223・2倍昇圧 MgB₂ コンバータの試験結果

各々の Bi2223 コイルの I_c は、入力側の L1 が 75 A、出力側に近い L2 は 109 A である。両インダクタにはほぼ同じ電流が流れるため、昇圧比と出力電圧、負荷抵抗 3.1 Ω で決まるインダクタ電流が L1 の I_c を超えないように入力電力を設定、様々な昇圧比で電力変換効率を評価した結果を Fig.2(a) に示す。スイッチング周波数は 50 Hz ~ 150 Hz を選択している。昇圧比は D = 0.52 において実測 3.1 となり、図中の円で囲った条件では 2.3 kW 入力で 90% 近い効率であった。一般に昇圧比が上がると効率は低下する。同じ Bi2223 コイルの 2 倍昇圧コンバータでは、5 kW 入力で 95% を超える効率だったため、効率の低下は昇圧比に起因すると考えられる。入力電力増加に伴って効率上昇の傾向があるため、余裕のある I_c のインダクタ素子導入で、さらに大電力化かつ効率の微増が見込める。

Fig.2(b) は、インダクタンス 58 mH、ヘリウム冷却時 I_c > 1600 A の MgB₂ コイルを用いた 2 倍昇圧コンバータ試験の大電力試験結果である。スイッチング周波数は 32 Hz ~ 150 Hz である。前報の 25 kW 試験で用いた抵抗負荷 3.1 Ω を 1.5 Ω に減少、出力電圧が同程度でも高出力電力を得た。最大 33 kW の試

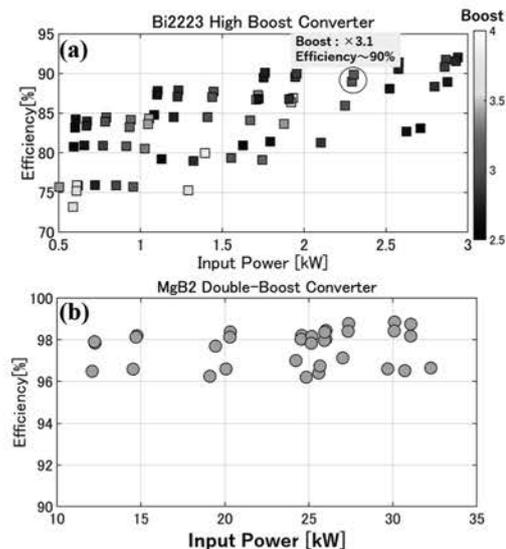


Fig.2 (a) Efficiency of Bi2223 double-inductor type converter operation and (b) MgB₂ double-boost converter

験で 96% 以上の変換効率を実現した。

参考文献

1. T. Yagai, et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 108 (2024) p.134
2. Omar Abdel-Rahim, et al.: CPSS Trans. Power Electronics and Applications, vol. 5, no. 2, (2020), p. 191.

ワイヤレス電力伝送用高 Q 値 LC 共振器のための超低損失コンデンサの開発

Development of Ultra-Low-Loss Capacitor for High-Q LC Resonator for Wireless Power Transfer System

三品 海京, 作間 啓太, 關谷 尚人(山梨大学)

MISHINA Ukyo, SAKUMA Keita, SEKIYA Naoto (University of Yamanashi)

E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

磁界共振結合方式ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer: WPT) は電気自動車やカプセル内視鏡などへの非接触給電に応用されており, WPT の伝送効率を高めるためには高 Q 値な LC 共振器が必要となる. kHz-MHz 帯の WPT 用高 Q 値超伝導 LC 共振器の実現には, 我々が開発した高周波用高温超伝導 (Rare-Earth Ba₂Cu₃O_y: REBCO) 線材を用いた高 Q 値 REBCO コイル [1], [2] に対して十分に低損失となるコンデンサが必要となる.

そこで, 本研究では超低損失コンデンサを開発し, 高 Q 値 REBCO コイルと接続することで WPT 用高 Q 値超伝導 LC 共振器を実現する.

2. LC 共振器の設計

Fig.1(a)に LC 共振器の構造を示す. REBCO コイルは直径 250 mm, 線間距離 4.5 mm, 線幅 12 mm, 線長 9.5 m のスパイラル構造である. また, REBCO コイルとコンデンサの接続に, 線幅 12 mm, 線長 120 mm (片側) のリード線を用いた. コンデンサには平行平板コンデンサを用い (Fig.1(b)), 電極は 25×25×1.5 mm, 誘電体は 25×25×0.5 mm である. LC 共振器の設計には, 三次元電磁界シミュレータ CST studio を用いた. コンデンサの損失要因となる電極の導電率, リード線の導電率, 誘電体の誘電正接を各部ごとに変えて LC 共振器の周波数特性のシミュレーションを行い, LC 共振器の Q 値を計算した. その Q 値から, 高 Q 値超伝導 LC 共振器を実現するために必要なコンデンサ各部の導電率と誘電正接を導出した.

シミュレーションの結果, 超伝導 LC 共振器が最大 Q 値 (8533) を得られる電極の導電率は 1.0×10^6 S/m 以上, リード線の導電率は 1.0×10^9 S/m 以上, 誘電体の誘電正接は 1.0×10^{-6} 以下であることが分かった. 銅の導電率が 5.0×10^8 S/m (@77 K) であるため, 電極板に銅を用いても最大の Q 値が得られる. 一方, リード線は銅の導電率より高くなければならないため, 高周波用 REBCO 線材 (REBCO 導電率 9.0×10^{11} S/m [1]) を用いる. 誘電体にはサファイア (誘電正接 @77 K: 1.0×10^{-7}) を用いることで最大 Q 値が得られる.

3. 超伝導 LC 共振器の測定

設計したコンデンサと REBCO コイル (自己共振周波数: 9.13 MHz, Q 値 (測定): 16065) を接続した超伝導 LC 共振器を作製し測定を行った. 超伝導 LC 共振器は液体窒素 (77 K) によって冷却した. 超伝導 LC 共振器の Q 値はネットワークアナライザを用いて測定した.

Fig.2 に誘電体にサファイア (誘電正接 @77 K: 1.0×10^{-7}) とポリイミド (誘電正接 @77 K: 6.0×10^{-4}) を用いた場合の超伝導 LC 共振器のシミュレーション及び測定の Q 値と銅コイルに市販の積層セラミックコンデンサ CaZrO₃ (誘電正接 @300 K: 1.0×10^{-3}) を接続した銅 LC 共振器の Q 値 (測定) を示す. 共振周波数 (2.2 MHz) は全て同じになるように誘電体サイズを調整した. 誘電体にサファイアを用いた時に超伝導 LC 共振器の Q 値 (測定) は 7963 となり, シミュレーションの Q 値 (8533) に近い値が得られた. この値は, 銅 LC 共振器の測定 Q 値 (406) と比較して約 20 倍 (7963) に相当し, 高 Q 値超伝導 LC 共振器を実現した. また, ポリイミドを用いた場合の Q 値 (測定) は 1568 であり, 例え高 Q 値 REBCO コイル (Q 値 16065) を用い

てもコンデンサの損失が大きいと高 Q 値超伝導 LC 共振器を実現できないことが明らかとなった.

4. まとめ

本研究では, 高周波用 REBCO 線材を用いた高 Q 値 REBCO コイルに対して十分に低損失となる超低損失コンデンサの開発を行った. また, 作製した超低損失コンデンサを高 Q 値 REBCO コイルに接続した超伝導 LC 共振器の測定 Q 値 (7963) は銅 LC 共振器 (406) の約 20 倍に達し, 高 Q 値超伝導 LC 共振器を実現した.

参考文献

1. N. Sekiya et al., IEEE Trans. Superconductivity., vol. 27, no. 4, 6602005, June 2017
2. N. Sekiya et al., IEEE Trans. Superconductivity., vol. 33, no. 3, 6601206, April 2023

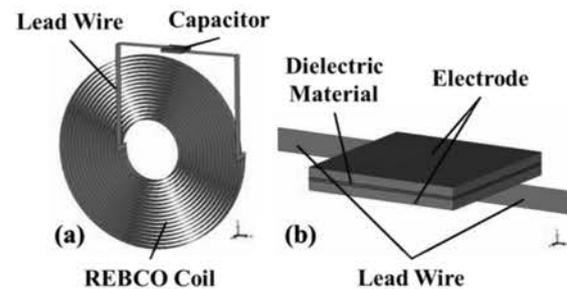


Fig.1 Schematic of (a) LC Resonator and (b) Capacitor

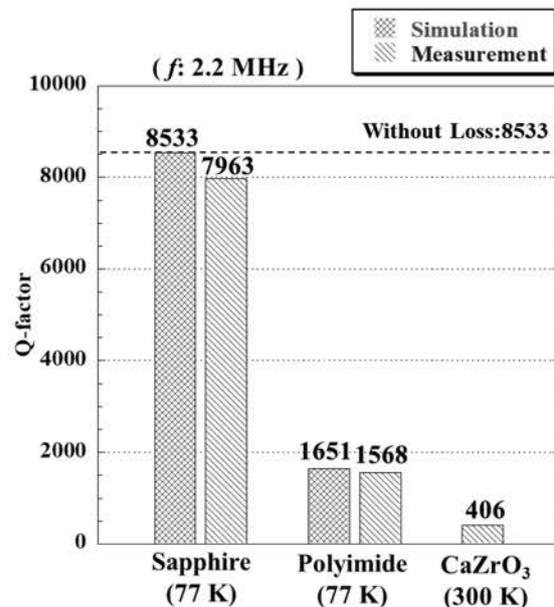


Fig.2 Q-factors of LC resonators with different dielectric materials

並列巻線を適用した kA 級 SMES ケーブルの電流分布評価

Evaluation of current distribution in a kA-class SMES cable with parallel winding configuration

東川 甲平, 宮崎 智也, 木須 隆暢 (九大); 佐藤 迪夫, 塩原 敬 (SWCC)

HIGASHIKAWA Kohei, MIYAZAKI Tomoya, KISS Takano (Kyushu Univ.); SATO Michio, SHIOHARA Kei (SWCC)

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^[1]。一方、実規模応用においては複数の REBCO 線材を並列にして kA 級以上の電流容量を確保することが不可欠となるが、一般には素線ごとの接続抵抗やインダクタンスのばらつきによって電流が均等に分配するとは限らず、これが電流容量の確保への主な懸念事項となる。そこで本研究では、並列巻線によって作製した kA 級 SMES ケーブル^[2]を対象として、素線ごとの電流値を測定するとともに、その周波数依存性から、接続抵抗やインダクタンスが電流分配に与える影響を明らかとした。

2. モデルケーブル

実験に用い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、巻線長は 1.23 m となっている。それぞれの素線に電流リードが取り付けられており、様々な直並列接続の実験が可能となっている。すべての素線を並列に接続した際の電流容量は直流電源を用いた測定によって 1.2 kA 以上あることは確認しているが^[2]、今回は周波数依存性まで評価する必要のあることから現有のバイポーラ電源の上限值である振幅 300 A の測定を行った。

3. 電流分布の評価

上記モデルケーブルを用いた実験結果を Fig. 2 に●印で示す。各素線への電流分配はインピーダンスの逆数の比によって決まるため、低い周波数では抵抗成分が、高い周波数ではインダクタンスが支配的となる。すなわち、低い周波数における素線間の電流のばらつきは端子におけるハンダ接続抵抗のばらつきによるものであり、高い周波数における素線間の電流のばらつきは巻線に由来するものである。従って、この並列巻線自体の精度やポテンシャルを測る上では後者の評価が重要となる。そこで、LCR メータを用いて、各素線の自己インダクタンスと素線間の相互インダクタンスを測定した。具体的には、 i 番目と j 番目の素線の自己インダクタンス (L_i と L_j) は直接測定し、 i 番目と j 番目の素線を直列にした際に得られるインダクタンスが $L_i + 2M_{ij} + L_j$ となることを利用して両素線間の相互インダクタンス (M_{ij}) を求めた。これによって最終的には 8×8 のインダクタンス行列が得られ、接続抵抗のばらつきまで考慮して解析的に求めた結果を Fig. 2 に実線で示している。実験結果を良く表現できていることがわかる。

一方、本モデルケーブルの巻線長は 1.23 m であるが、実規模では km オーダーの長さを想定しており、例えば 1.5 km の長さを想定した場合にはインダクタンスは 1250 倍となる。また素線ごとのインダクタンスのばらつきはランダムに生じるものと考えられる。そこで、モデルケーブルで得られたインダクタンス行列をランダムに素線番号を入れ替えて 1250 回分足し合わせたものを実規模ケーブルのインダクタンス行列と想定した。これによって得られた結果を Fig. 3 に示す。SMES ケーブルの代表的な充放電動作は太陽光発電の急激な変動を吸収する 0.1 Hz 程度の周波数に相当する動作となるが、ほぼ均一な電流分配となることがわかり、本並列巻線手法が SMES ケーブルの大電流容量化に有効に機能することが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、パワーアカデミー研究助成「萌芽研究」ならびに科学研究費補助金 (JP25K01219, 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 35 (2025) 4802305.

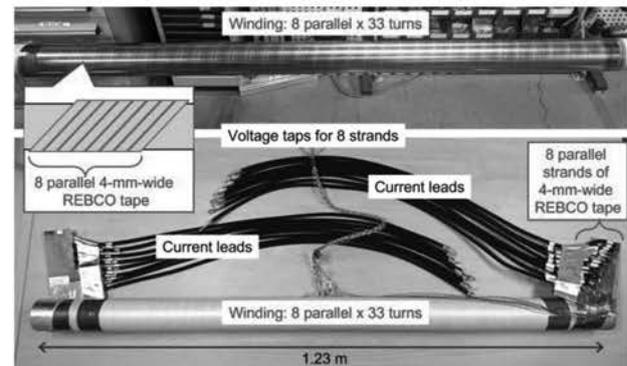


Fig. 1. Photographs of the model cable fabricated with 8 parallel winding of 4-mm-wide REBCO tape.

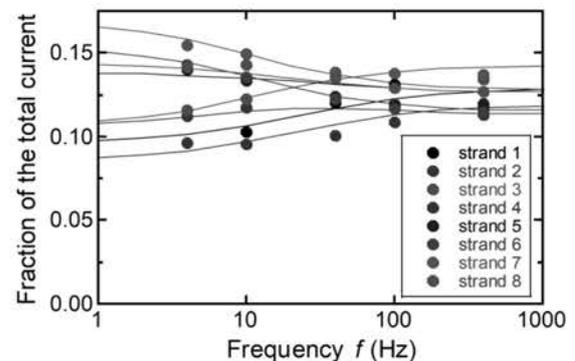


Fig. 2. Frequency dependence of the current fraction in each strand relative to the total current obtained from the 1.23-m-long model cable. Symbols represent experimental data, and solid lines indicate analytical results.

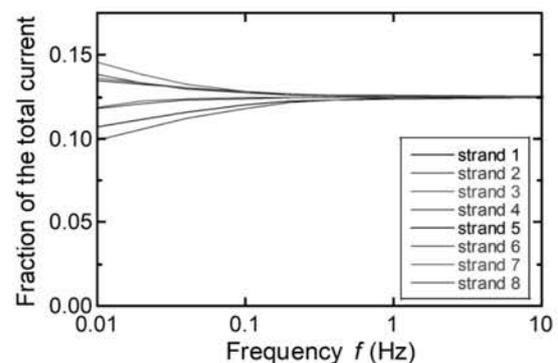


Fig. 3. Frequency dependence of the current fraction in each strand relative to the total current estimated for a 1.5-km-long model cable.

磁気分離法による汚染土壌中からの常磁性粘土鉱物の分離プロセスの検討

Investigation of the separation process of paramagnetic clay minerals from contaminated soil by using magnetic separation

三島史人、野村直希、西嶋茂宏(福井工業大学)

Mishima FUMIHITO, Naoki NOMURA and Shigehiro NISHIJIMA (Fukui University of Technology)

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

1. はじめに

我々は、放射性物質を含有する汚染土壌の減容化プロセスの一環として、淘汰管磁気分離法の適用を検討している。本手法により、セシウムを吸着した常磁性粘土鉱物を選択的に分離する装置を開発している。本手法では、分離対象粒子の密度と体積および磁化が重要なパラメーターとなるため、粒子の分散性の確保が必要である。そこで、粒子間の凝集を引き起こす土壌中の砂鉄や有機物の除去に磁気分離法を前処理として適用した。本報告では、その実験結果および淘汰管磁気分離の前処理としての磁気分離法の有効性、ならびに提案する分離(減容化)プロセスについて報告する。

2. 実土壌中の粘土鉱物の分散性について

先行研究の多段式淘汰管磁気分離法によって、数~100ミクロン程度のパーミキュライト(常磁性体)粒子を任意の粒子径ごとに回収することに成功している[1]。淘汰管磁気分離の作業媒体には水がコスト面でも望ましく、その中性域 pH 下では粘土鉱物はマイナスの表面電荷を持ち、分散状態となる。しかし、砂鉄などは弱いプラスから等電点付近(零)となり、粘土鉱物と凝集して複合体を形成し、見かけの粒子径、密度、磁化において一貫性が失われ、目的対象粒子の挙動を制御するのは困難となる。

3. 土壌中砂鉄の高勾配磁気分離実験

土壌(福井県の耕地土壌)について、砂礫を比重分離後、高勾配磁気分離装置を用いて土壌中の砂鉄を除去した(Fig.1)。顕微鏡観察結果(Fig.2)から、砂鉄除去後の粘土懸濁液は分散していることが確認できた。磁気後の砂鉄は、砂鉄単体と有機物に包含された凝集物として観察された。天然有機物は、中性からアルカリ性に近い環境では負に帯電しており、中性域の水中では正に帯電した酸化鉄と複合体を形成しやすい。そこで、有機物として牛糞肥料2gを蒸留水100ccに入れ、ホモジナイザーで調整後に酸化鉄(Fe₃O₄)0.5gを混合し、磁気分離試験を実施した。その結果、水溶性のフミン酸などの色素成分は残存したが、顕微鏡写真から固形有機物は酸化鉄に吸着し磁気分離されたことが確認できた(Fig.3)。また、磁気分離後の上澄み液に、粘土粒子を添加し、顕微鏡観察をした。結果として水溶性有機物(色素)を含む上澄み液中で粘土粒子が分散することを確認した。

4. 淘汰管磁気分離を利用した減容化プロセス

実土壌を用いた検討より、砂鉄が有機物や粘土鉱物に吸着し粒子間の凝集を促進することを確認した。磁気分離で鉄粉を除去することで、有機物は除去でき、残留した粘土鉱物の分散性が良好になることを確認した。よって減容化プロセスとしてFig.4に示すように比重分離により砂礫を除去し、磁気分離で砂鉄と有機物を前処理して淘汰管磁気分離をすることが望ましいことが分かった。

5. まとめ

実土壌を用いて、粘土鉱物の分散性に関する検討を行った。先に土壌中の砂鉄を磁気分離すると、粘土鉱物の分散性が良好となり、後段の淘汰管磁気分離に有利になることが示され、目的対象とする粘土鉱物の分離フローを確立することができた。

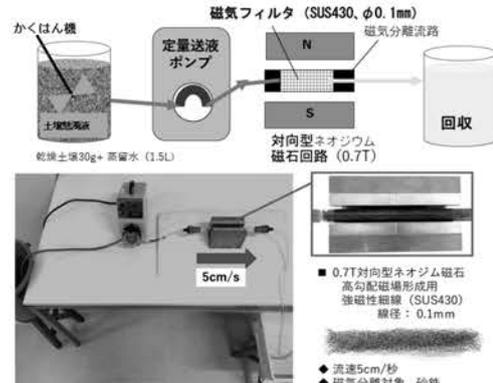


Fig.1 Magnetic separation for iron sand removal from soils.

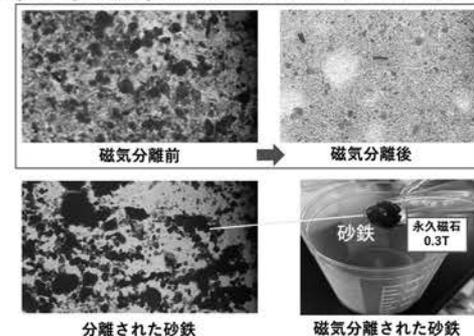


Fig.2 Photomicrograph of magnetic separation of real soil.

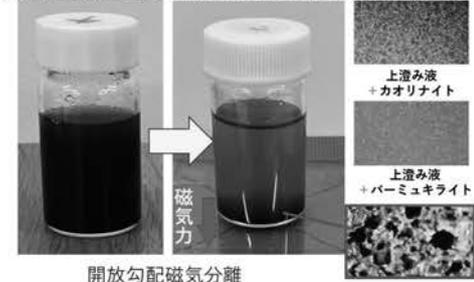


Fig.3 Magnetic separation of organic suspensions with Fe₃O₄.

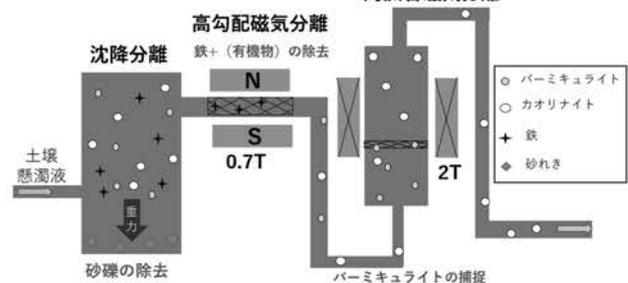


Fig4 Proposed flow for volume reduction of contaminated soil.

参考文献

[1] F.Mishima, et. al.: Progress in Superconductivity and Cryogenics, 25, (3), pp13-17, (2023)

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (24K15358) による助成を受けました。

液化水素関連機器の研究開発を支える材料評価基盤の整備 Developing a foundation for material evaluations to support R&D on liquefied hydrogen-related equipment

小野 嘉則, 和田 健太郎, 早川 正夫, 片山 英樹, 日比 政昭, 清水 禎 (NIMS)

ONO Yoshinori, WADA Kentaro, HAYAKAWA Masao, KATAYAMA Hideki, HIBI Masaaki, SHIMIZU Tadashi (NIMS)

E-mail: ono.yoshinori@nims.go.jp

1. はじめに[1]

NIMS では、「グリーンイノベーション(GI) 基金事業/大規模水素サプライチェーンの構築/液化水素関連機器の研究開発を支える材料評価基盤の整備 (FY2021-2025)」事業を推進している。液化水素の製造、輸送・貯蔵、利用に関わる機器等の低コスト化に資することを目的としており、鉄鋼材料をはじめとする構造材料の液化水素を含む低温水素環境下での機械特性評価に関する研究開発である。水素供給コストを低減するには、既存技術と比較して、大型化・高効率化を通じて各構成機器の設備コスト、運転コストの低減が必要である。しかし、液化水素インフラの場合、極低温や水素環境の過酷な条件で使える材料は限られるため、コストをかけずに大型化するには技術的なハードルが高いのが現状である。

2. 事業概要[1]

本事業では、液化水素関連機器の材料に関する規制見直しや技術開発力強化等に資するため、低温水素環境下での材料の機械特性を評価するための試験設備を整備し、その設備を用いてデータベース(DB)を構築し、その利活用の促進を図ることを目標としている。本事業を進める上で産業界のニーズを適切に取り込むために、「大規模水素サプライチェーンの構築」プロジェクトの実施機関を含む関係機関の有識者からなる「液化水素関連材料評価整備委員会」を組織し、初期段階から試験設備と付帯設備の仕様、評価対象材料の選定、DBフォーマットの仕様など、評価基盤の詳細仕様の検討を進めた。現在、設備設置が完了し、本格稼働にむけた運転を開始した。

3. 評価試験設備の開発[1]

液化水素インフラで使用される材料が曝される環境(温度、圧力)については、液化水素サプライチェーン構築事業や関連機器の開発を進める企業にヒアリングをさせて頂いた。材料が曝される水素環境は、液化水素温度である 20 K~353 K、圧力 5 MPa 以下である。これをふまえて、20 K~353 K までの温度域、大気圧(0.1 MPa)から 10 MPa(インフラでの想定圧力の 2 倍)の圧力域となる水素・ヘリウム環境下で、引張試験、

疲労試験、破壊靱性試験などができる設備の整備を行うこととした。**Fig. 1** は、国内の代表的な水素環境下試験設備と本事業で整備した設備が対象とする温度・圧力範囲を示す。従来設備では、FCV や水素ステーション用の材料評価を目的とした 193 K~573 K、大気圧~140 MPa での試験が可能である(**Fig. 1** 中破線領域内)。WE-NET で導入された設備では、大気圧、液化水素環境での試験ができる。今回整備した設備の試験範囲のうち、20 K~193 K かつ大気圧~10 MPa での水素環境の試験範囲は、公開されている材料評価試験設備としては世界初の温度・圧力領域となり、これまで得られなかった条件下での材料特性を評価できる。また、中空試験片[2]を用いれば、20 K~353 K の温度域で、100 MPa 程度の高圧水素ガス環境での引張試験、疲労試験も可能になる。これらの設備は 2024 年 7 月末に竣工している。

4. 特殊実験施設の開発[1]

試験設備の運転・管理に必要な水素防爆対応の特殊実験施設(**Fig.2**)は、関連法令等を満たし、安全を確保するための保安装置を装備した施設を検討し、基本設計を行なった上で建設を進め、2024 年 2 月に竣工した。24,000 L の液化水素貯槽が同年 3 月末に竣工し、試験設備に供給する特殊ガスと液化水素の配管の設置工事を同年 4 月に行った。施設には、試験設備を設置する防爆実験室と遠隔操作のための機器類がある計測室、試験設備の油圧源や圧縮機、配電盤がある機械室がある。防爆実験室と計測室は各 6 室、機械室は 3 室である。防爆実験室には厚さ 30 cm の障壁を設け、軽量屋根とすることで実験室内で万が一の事態になった時、上方に爆風が抜ける構造である。実験中は有圧換気扇で常時排気し、計測室に対して実験室を陰圧として、万一の水素漏れ時に計測室等への水素侵入を防止している。水素ガス、ヘリウムガス、窒素ガスを備え、圧縮機を利用して、高圧極低温試験機には最高 10 MPa、中空極低温試験機には最高 120 MPa の水素ガスとヘリウムガスを供給できる。

参考文献

1. Y. Ono, et al.: Bull. Iron Steel Inst. Jpn., Vol. 29 (2024) p.788 (in Japanese).
2. T. Ogata: Advances in Cryogenic Engineering Materials, 54, (2008) p.124.

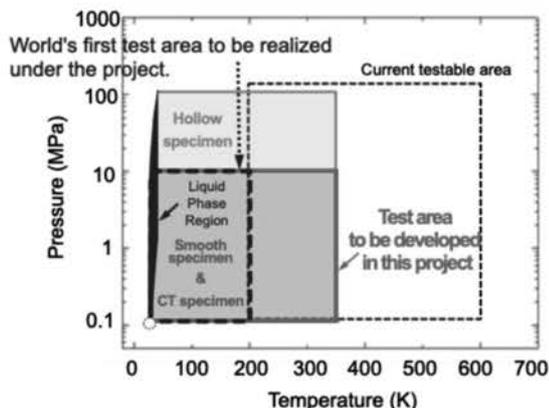


Fig. 1 Testable environment areas in the new testing systems.



Fig. 2 Hydrogen explosion-proof experimental laboratory.

液化水素および低温水素ガス環境下での引張特性評価 Evaluation of tensile properties in liquefied hydrogen and low-temperature hydrogen gas environments

小野 嘉則, 和田 健太郎, 寺田 隼斗, 福田 真菜, 小松 誠幸, 由利 哲美, 緒形 俊夫,
早川 正夫, 片山 英樹, 日比 政昭, 清水 禎 (NIMS)

ONO Yoshinori, WADA Kentaro, TERADA Hayato, FUKUDA Mana, KOMATSU Masayuki, YURI Tetsumi, OGATA Toshio,
HAYAKAWA Masao, KATAYAMA Hideki, HIBI Masaaki, SHIMIZU Tadashi (NIMS)
E-mail: ono.yoshinori@nims.go.jp

1. はじめに

NIMS では、鉄鋼材料をはじめとした構造材料の液化水素を含む低温水素環境下での機械特性評価に関する研究開発として、「グリーンイノベーション (GI) 基金事業 / 大規模水素サプライチェーンの構築 / 液化水素関連機器の研究開発を支える材料評価基盤の整備 (FY2021-2025)」の事業を推進している[1]。本事業は液化水素の製造、輸送・貯蔵、利用に関わる機器等の低コスト化の実現に資することを目的とするものである。本講演では、事業概要と進捗について紹介する。

2. 評価試験設備の開発[1]

課題提案前、液化水素インフラで使用される材料が曝される環境 (温度、圧力) について、液化水素サプライチェーンの構築事業と、関連機器の開発を進める企業の方々にヒアリングをさせて頂いた。材料が曝される水素環境は、液化水素温度である 20 K ~ 353 K、圧力 5 MPa 以下である。この結果をふまえ、20 K から 353 K までの温度域、大気圧から 10 MPa (インフラで想定される圧力の 2 倍) の圧力域となる水素・ヘリウム環境下で、機械的特性試験を可能とする設備の整備を行うこととした。Table 1 に本事業で整備した試験設備の概要を示す。大気圧極低温試験機、高圧極低温試験機 2 台、中空極低温試験機の計 4 台の導入が 2024 年 7 月末に完了している。

3. 新規評価試験設備での引張特性評価

Table 1 に示す新規試験設備のうち、No.1 の大気圧極低温試験機を用いた引張試験で取得した 20 K と 293 K (室温) の応力-ひずみ線図を Fig. 1 に示す。供試材は、SUS316L で 30 mm 厚の板材であり、Ni 当量は 26.9% [2] である。試験は「JIS Z 2277: 2000 金属材料の液体ヘリウム中の引張試験方法」に準拠して実施した。ひずみは 8% までは伸び計の値を、それ以降はスローク / 平行部長さの値をオフセットして示して

いる。引張試験片の平行部の形状は、直径 $\phi 7$ mm、平行部長さ 42 mm である。室温に比べて 20 K では流動応力が高く、大きな加工硬化を示し、振幅の大きなセレーションが発生したあとに破断している。また、室温特性に比べ、20 K の 0.2% 耐力は約 2 倍、引張強度は約 2.7 倍と高強度を示すにもかかわらず、破断伸び、絞り率は約 50% と高い値を示した。事業期間内は SUS316L と A5083-O を評価対象材料として、体系的な特性評価を実施する。また、外部機関とラウンドロビン試験を実施し、新規に整備した評価試験設備の状況を確認していく予定である。

参考文献

1. Y. Ono, et al.: Bull. Iron Steel Inst. Jpn., Vol. 29 (2024) p.788 (in Japanese).
2. T. Hirayama, et al.: J. Japan Inst. Met. Mater., Vol.34, No.5, (1970), p.507 (in Japanese).

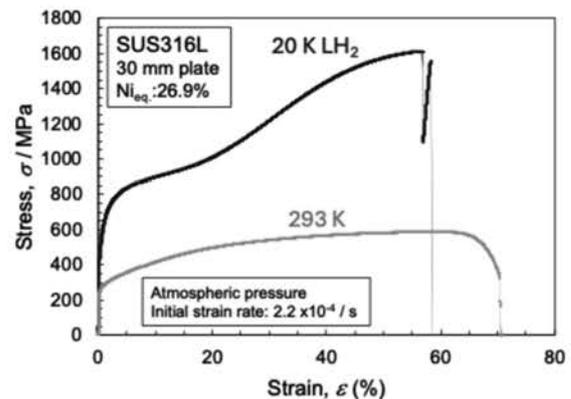


Fig. 1 Stress-strain curves of SUS316L obtained at 20 and 293 K.

Table 1 Summary of the testing machines installed at NIMS.

No	Name of testing machine	Pressure	Environment	Test Temp. / K	Test machine capacity	Test items
1	Atmospheric pressure cryogenic testing machine	Atmospheric pressure	Liquefied hydrogen Liquefied helium Hydrogen gas Helium gas	4 ~ 353	±200 kN	【Single type】 Tensile test, Fracture toughness test, Fatigue crack growth test, Load/strain-controlled fatigue test 【Multi type】 - Tensile test Up to 6 consecutive tests can be performed. - Fracture toughness test Up to 3 consecutive tests can be performed.
2	High-pressure cryogenic testing machine	Atmospheric pressure ~ 10 MPa	Hydrogen gas Helium gas			Tensile test, Fracture toughness test, Fatigue crack growth test
Load/strain-controlled fatigue test						
4	Cryogenic testing machine for hollow test pieces	Hollow test pieces - Inner hollow space: Atmospheric pressure ~ 120 MPa - Outside of hollow test piece: Atmospheric pressure	- Inner hollow space: Hydrogen gas Helium gas - Outside of hollow test piece: Helium gas	20 ~ 353	±100 kN	Hollow test pieces: Tensile test Load/strain-controlled fatigue test
Smooth test pieces - Outside of smooth test piece: Atmospheric pressure		- Outside of hollow test piece: Liquefied hydrogen Hydrogen gas Helium gas	Smooth test pieces: Load/strain-controlled fatigue test			

鉄心スロット内に配置した多芯金属撚線における損失の定量的評価

Quantitative evaluation of losses in multi-strand metal cables located inside iron core slots

柁川 一弘, 豆塚 佑斗, 古栴 雅裕(山理大); 中村 武恒(京大); 菊池 章弘(NIMS); 増田 直樹(西島)

KAJIKAWA Kazuhiro, MAMETSUKA Yuto, FURUKAKOI Masahiro (Sanyo-Onoda City Univ.);

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS); MASUDA Naoki (Torishima Pump Mfg. Co., Ltd.)

E-mail: kajikawa@rs.socu.ac.jp

1. はじめに

モータの電機子巻線に高温超電導線材を適用して汎用的なインバータで電圧駆動すると、三相不平衡電流が流れて巻線が焼損する危険性がある[1]。そこで、高温超電導モータの電機子巻線には金属導体を適用する必要がある[2]。極低温に冷却された金属導体に交流電流を通電すると、抵抗率の低下[3]により Joule 損失の低減が期待できるが、逆に増大する渦電流損失を抑制するために、細い金属素線を多数本束ねた多芯金属撚線が必要となる。そこで、極低温下にある多芯金属撚線で発生する損失を有限要素解析し、導体構造や電機子鉄心スロット内導体数が発生する損失に与える影響を定量的に明らかにする。また、得られた数値計算結果を再現する損失評価方法も新たに提案する。

2. 数値解析方法

電機子鉄心の1つのスロット内に N ターンの導体を放射状に配置した数値解析モデルを Fig. 1 に示す。鉄心スロットの最も深いところから順に導体番号を付けている。考慮対象の導体のみを直径 $2r_s$ をもつ素線で構成された多芯撚線とし、それ以外は同一外径 $2r_h$ をもつ単線とみなすことにする。鉄心の透磁率を無限大と仮定しているため、磁力線は鉄心表面に対して垂直となり、磁界の接線成分 H_t はゼロとなる。一方、回転子鉄心とのギャップ部の磁界は $H_g = NI_e / (2\delta)$ となる。ここで、 I_e は導体1本の通電電流、 δ はギャップ長である。

本研究で用いた4種類の導体の諸元を Table 1 に示す。素線数はそれぞれ 1, 7, 19, 37 であり、導体径 $2r_h$ が同じになるように設定した。抵抗率 ρ_s は 20 K, 0 T における RRR = 100 の銅の値[4]を用いた。特性周波数 f_s は、表皮深さ $\lambda_s = \sqrt{\rho_s / (\pi f \mu_0)}$ が素線半径 r_s に等しくなる周波数 f である。通電電流 I_e は 20 A である。

3. 数値解析結果

COMSOL Multiphysics®を用いた有限要素法 (H 法) による損失の数値計算結果と理論曲線の比較について、7 本撚線を 5 ターン配置した場合の結果を、一例として Fig. 2 に示す。理論曲線は、独自に導出した通電電流に対する単線の Joule 損失の理論式を多芯撚線に拡張したものと、外部印加磁界に対する無限平板の渦電流損失の理論式[5]を円断面に拡張したものの単純ものである。Fig. 2 より、両者は良く一致することがわかる。周波数が低い場合、ターン間の損失の相違はなくほぼ一定であり、Joule 損失が支配的となる。一方、周波数が高くなると、渦電流損失が支配的となり、鉄心スロット開口部に近づくほど損失は大きくなる。

本成果は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の助成事業 (JPNP23004) の結果得られたものである。

参考文献

1. 中村武恒他: 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 (2023) 17p-D215-10.
2. M.D. Sumption, et al.: Cryogenics, Vol. 111 (2020) 103171.
3. 低温工学協会: 「超伝導・低温工学ハンドブック」, オーム社 (1993) p. 1084.
4. Eckels Engineering: CryoComp 5.1 (2011).

5. 船木和夫, 住吉文夫: 「多芯線と導体」, 産業図書 (1995) p. 125.

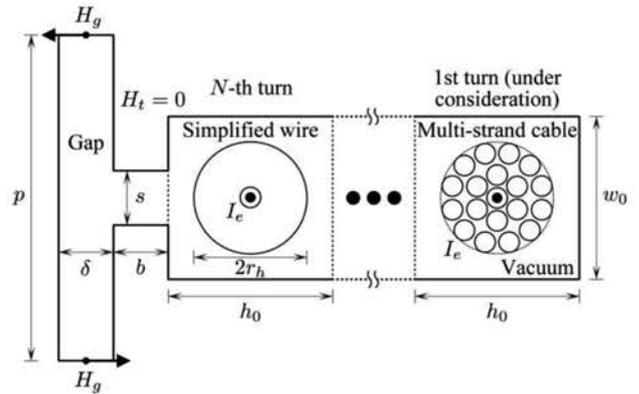


Fig. 1 Numerical analysis model with N turns of conductors located inside one of iron core slots in armature.

Table 1 Specifications of 4 conductors.

Number of strands N_s	1	7	19	37
Diameter of strand $2r_s$ (mm)	0.812 (20AWG)	0.255 (30AWG)	0.143 (35AWG)	0.101 (38AWG)
Diameter of conductor $2r_h$ (mm)	0.812 (20AWG)	0.812 (20AWG)	0.812 (20AWG)	0.812 (20AWG)
Volume fraction of strands ϕ	100%	69.0%	58.9%	57.2%
Resistivity of strand ρ_s (nΩ·m)	0.167	0.167	0.167	0.167
Characteristic frequency f_s (kHz)	0.257	2.60	8.27	16.6
Applied current I_e (A)	20	20	20	20

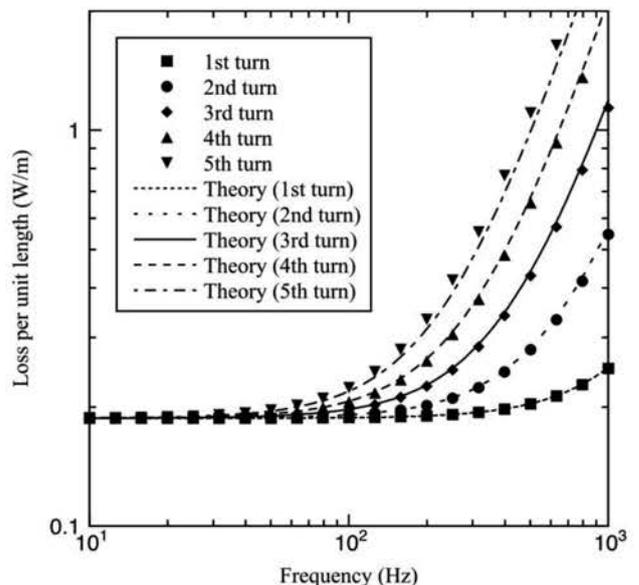


Fig. 2 Comparison between numerical results of losses in 5 turns of 7-strand cables and theoretical curves.

永久磁石回転子を用いた交流損失測定装置の精度向上

Improving the measurement accuracy of AC loss measurement equipment with permanent magnet rotor

奥村 皇月, 大久保 洗希 (東大), 寺尾 悠 (京大), 淵野 修一郎, 大崎 博之 (東大)
 OKUMURA Satsuki, OKUBO Koki (UT), TERAU Yutaka (KU), FUCHINO Shuichiro, OHSAKI Hiroyuki (UT)
 E-mail: satsuki-okumura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

産業界で高出力密度, 高効率な回転機が求められる中で, 全超電導回転機の適用が期待されている。しかし, 回転機においては電機子巻線に回転磁界と交流電流が掃引されるため, 交流損失を把握する必要がある。そこで, 我々は回転磁界下の交流損失を測定する測定装置を構築した。本研究では測定装置の高精度化のため, 新たに温度センサとホールセンサを3個追加設置し, 測定データを増やした。また, 測定装置に発生する損失を分類した。本稿では損失の内訳と温度分布の結果について議論する。

2. 実験方法

実験装置の外観を Fig. 1 に示す。永久磁石(PM)回転子が回転することで回転磁界が発生し, 遮蔽電流による反磁界がPM 回転子にブレーキトルクとして作用する。ブレーキトルクの差から交流損失の算出を行う。式(1)にエネルギー収支を示す。

$$P_{in} = W_m + W_{e_flame} + W_{e_cryo} + W_{e_bobbin} + W_{coil} \quad (1)$$

なお, P_{in} は機械入力, W_m はベアリング等の機械損失, W_{e_flame} はフレームの渦電流損失, W_{e_cryo} はクライオスタットとセカンドステージ, 冷却バス等の渦電流損失, W_{e_bobbin} はボビンの渦電流損失, W_{coil} はコイルの交流損失である。

本実験では4つのケースについて測定を行った。Case1 はクライオスタットを設置しない場合, Case2 はクライオスタットの中に G10 ボビンを設置した場合, Case3 はクライオスタットの中にステンレスボビンを設置した場合, Case4 はクライオスタットの中に MgB_2 コイルが巻かれたステンレスボビンを設置した場合である。Case1 のとき, 発生する損失は機械損失とフレームの渦電流損失のみである($P_{in1} = W_m + W_{e_flame}$)。同様にして, Case2 の機械入力($P_{in2} = W_m + W_{e_flame} + W_{e_cryo}$), Case3 の機械入力($P_{in3} = W_m + W_{e_flame} + W_{e_cryo} + W_{e_bobbin}$)を考えることができる。

また, Case2, Case3, Case4 の場合において温度センサをボビン上の3か所(Fig. 2 参照), セカンドステージ1か所の計4か所に設置した。40 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

Case1 から3の結果より, それぞれの機械入力 P_{in1} , P_{in2} , P_{in3} の測定誤差は ± 0.6 W 程度に収まった。交流損失を測定する上で十分な精度で測定ができていることを確認した。また, P_{in1} , P_{in2} , P_{in3} の結果を使用して W_{e_cryo} , W_{e_bobbin} を算出した(Fig. 3 参照)。70 Hz の場合, $W_m + W_{e_flame}$ は 70.7 W, W_{e_cryo} は 40.5 W, W_{e_bobbin} は 29.0 W だった。 W_{e_bobbin} は周波数に対し2次関数的に増加することから渦電流損失であることが分かる。

Fig. 4 に Case3 における 70 Hz の温度の時間変化を示す。B の温度上昇が顕著である。ボビンにかかる磁場が大きく, 渦電流損失が発生していると考えられる。A と B は同じ場所を示しているが, 温度勾配が異なる。これは温度センサの取付方による。C では磁場振幅が小さいため, A, B 付近の発熱が伝搬していると考えられる。

4. まとめと今後の展望

測定装置の高精度化のため, センサを増やし, 評価をおこなった。また, 測定装置内における支配的な損失を明らかにするため, 4つの Case に分けて測定を行った。ストレート部での温度上昇が顕著であり, 温度上昇において, ボビンの発熱が支配的であることが分かった。

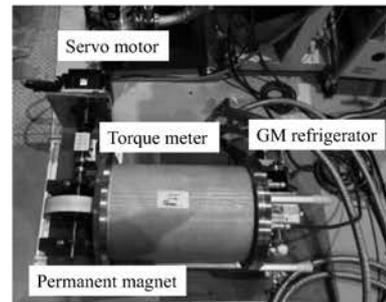


Fig. 1 AC loss measurement equipment based on mechanical input

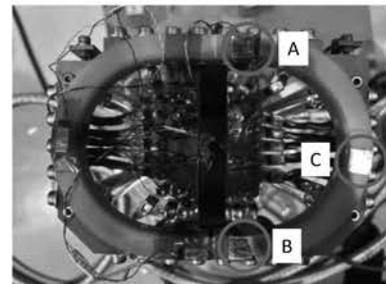


Fig. 2 Bobbin and temperature sensor location

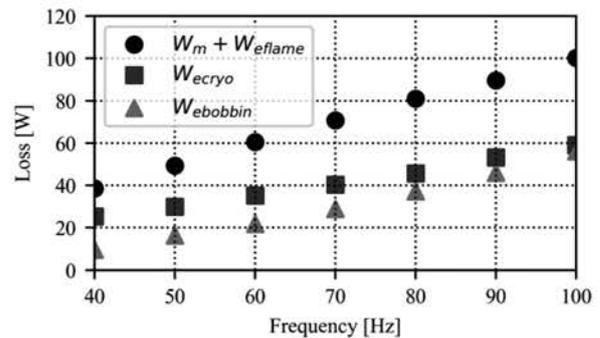


Fig. 3 Relationship between loss and frequency

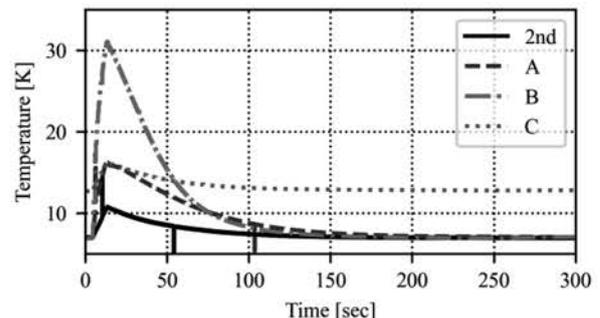


Fig. 4 Change in temperature over time at 70Hz in Case 3

極低温液化ガス向けポンプに用いる超電導磁気軸受及びモータ回転子試験装置 Superconducting magnetic bearings and motor rotor test equipment for use in pumps for cryogenic liquefied gases and laminated superconducting rings

寺尾 悠(京大); 奥村 阜月, 淵野 修一郎(東大)

TERAO Yutaka (Kyoto Univ.); OKUMURA Satsuki, FUCHINO Shuichiro (Univ. of Tokyo)

E-mail: terao.yutaka.5j@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

超電導磁気軸受(SMB)は超電導体と永久磁石(PM)によるピン止め力を利用し、機械的な損失かつ複雑な制御システムを大幅に低減できるポテンシャルを持っている。よって液体水素等の極低温液化ガスのサブマージドポンプに使用すれば、高信頼のシステムが実現できる可能性がある。著者らはこれまでにリング状に巻いた積層超電導線材と永久磁石によるSMBを提案してきた[1, 2]。今回は、前回までの経験を生かして改良したSMBの電磁力測定結果及び、本SMBを搭載したモータ回転子の試験装置に関して紹介する。

2. SMBの概要

Fig. 1に、提案するSMBの概念図を示す。Faraday Factory Japan製の12 mm幅の線材(銅箔なし)であり、臨界電流 I_c は300 A以上である。この線材を使用したリング状積層超電導体(SC)を3段使用する。これまでの経験から、磁場勾配を可能な限り大きくするため、軸方向着磁のリング状PM(内径15 mm-外径20 mm-高さ6 mm)を4段分、同じ極が向かい合うようにして4段分配置した。そして、この積層超電導体とリング状PMの間のエアギャップは1 mmである。

3. スラスト方向電磁力の解析結果

本SMBのスラスト方向の電磁力を測定するため、これまでに行っていた方法[1, 2]により、リング状PMを超電導体内で ± 7 mmの幅で3往復分移動させる。Fig. 2に電磁力の測定結果を示す。1往復目で電磁力が最大で100 N程度出ているが、その後2-3往復した際には最大で60-70 N程度の電磁力となった。これはSMBのSC内に捕捉された、磁束密度の影響であると考察される。しかし、文献[1]の際と電磁力を比較すると、PMのアレンジを変えたことにより22-23 N程度であった電磁力が3倍程度まで増加していることが分かる。

4. 回転試験装置の製作

上記で製作・特性測定を行ったSMBを使用した、モータ回転子の回転試験系をFig. 3に示す。モータ回転子は直径74.2 mmかつ有効長40 mmの市販のモータから改造して流

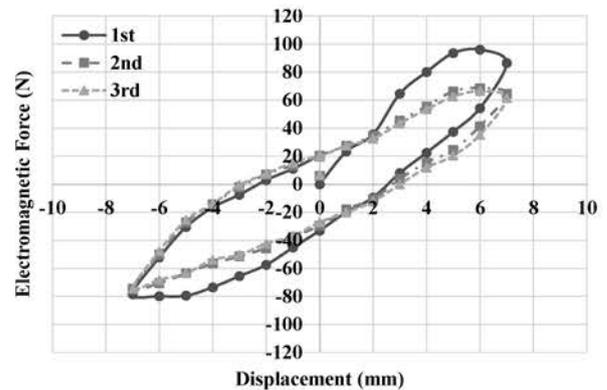


Fig. 2 Thrust force of the superconducting magnetic bearing.

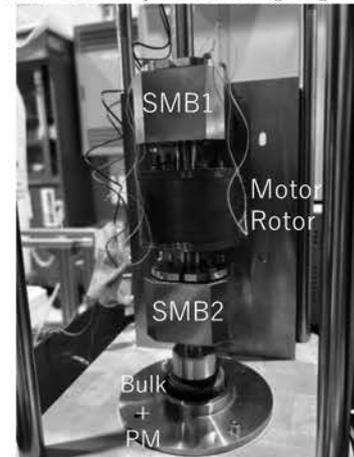


Fig. 3 Arrangement of rotation system of a motor rotor using SMBs.

用した。この回転子の両側にFig. 1に示したSMBを挟み込む形で配置し、全体を鉛直方向に固定する。ただし、SMBが超電導状態となるまでは別途ストッパーで固定する。本回転系はスラスト方向の電磁力だけでなく、ラジアル方向の電磁力を強化するために底部にバルク超電導体(Bulk)と円柱状PMを配置している。まだ試運転段階ではあるが、本回転系が最大1800 rpmでも安定して回転することを確認した。

5. まとめ

極低温液化ガスポンプ向けモータに搭載するためのSMBを製作し電磁力特性を測定し、このSMBを用いた回転試験装置を製作した。SMBのスラスト方向電磁力は最終的に以前の者より60-70 Nと3倍程度の大きさととなり、これによる回転系で1800 rpmでも回転することを試運転にて確認した。

謝辞

本研究は東電記念財団の研究助成(基礎研究)により行われた。

参考文献

1. Y. Terao, et al.: Physica C, 614, 1354401 (2024).
2. Y. Terao, et al.: Applied Superconductivity Conference 2024, 2LOR2B-02 (2024).

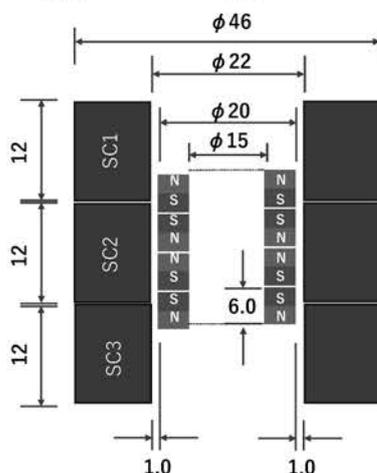


Fig. 1 A SMB using laminated superconductors and ring shape permanent magnets (Unit: mm).

高温超電導誘導同期モータにおける自律回転安定性の理論検討 と超高速起動試験

Theoretical Study of Autonomous Rotation Stability and Ultra-high Speed Start-up Test of a High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor

中村 武恒, 中田 雅大 (京大)

NAKAMURA Taketsune, NAKADA Masahiro (Kyoto Univ.)

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

1. はじめに

高温超電導モータを航空機や自動車他の輸送機器に適用するには、起動時や加減速時他の過渡状態における振る舞いを明らかにすることが不可欠である。特に、停止状態からの起動は全てのモータが避けて通ることのできない駆動モードであるが、一般に当該モードでは瞬間的に過大な起動電流が流れ、また回転系が振動的となって危険な状態に陥るリスクがある。しかしながら、現状の輸送機器用高温超電導モータに関する殆どの研究開発では上記過渡現象に関する報告が極めて少ない。輸送機器側から要求される起動時間に対し、たとえ高温超電導モータであってもクエンチや熱暴走しないようにゆっくり加速していたのでは、その実用化は不可能と考えられる。

我々は、高温超電導体を誘導機のかご形巻線に適用する高温超電導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor)の理論的・解析的・実験的研究を推進している[1]。これまで、起動特性や加減速特性他の過渡現象に関する研究も実施しており、充実した知見を蓄えている[2,3]。特に、我々は高温超電導ロータバーの非線形抵抗を利用した「自律回転安定性(Autonomous Rotation Stability)」のコンセプトを提案しており、急起動に対する安定性を証明している[4]。

本報告では、20 kW 級高温超電導誘導同期モータを用いた自律回転安定性による超高速起動試験を実施した。

2. 自律回転安定性の理論

HTS-ISM では、Fig. 1 のかご形(回転子)巻線に HTS が用いられている。同モータの起動時には、HTS かご形巻線に回転磁界による速度起電力を誘導する必要があるが、これは Fig. 2 の磁束フロー領域に遷移することで実現される。一方、回転子は低損失を求めることから起動後はゼロ抵抗状態に移行する。そして、もしも起動中に回転機が不安定系になると自律的に再度磁束フロー領域に遷移して安定回転を担う。即ち、HTS-ISM の起動時には HTS が電流依存の非線形抵抗を有するが故に、Fig. 2 のように状態に応じて自律的に遷移することで高効率と高安定を両立する起動が実現される。

3. 試験方法

試験対象とした HTS-ISM(三相、4 極)は、JST-ALCA プロジェクトとしてイムラ・ジャパン(株) (旧(株)イムラ材料開発研究所)と共に開発した 20 kW 級機である[5]。同機を液体窒素冷却の専用クライオスタットに収容し、市販のパルス幅変調インバータによって励磁した。なお計測に際しては、サンプリング周波数 1 GHz の超高速計測器を用い、0.4 μ s 毎の瞬時データを取得することで、極めて精密な起動特性の評価を実現した。

4. 結果と考察

Fig. 3 には、急起動試験結果の一例を示す。同図に示すように、20 kW 級機は時刻 0.48 s 付近での起動後瞬時に回転数 800 rpm まで到達し、さらに 0.27 s 後(時刻 0.75 s)には回転数 1800 rpm に収束して定常同期回転状態に移行している。その際、オープンループ制御にもかかわらず全く振動的振る舞いが生じず、ほぼ理想的な加速特性が得られている。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22H01471, 23K22742)の助成を受けた。試験に用いた 20 kW 級高温超電導誘導同期モータは、JST-ALCA プロジェクトとしてイムラ・ジャパン(株)と共に開発したものである。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: J. Appl. Phys., vol. 136 (2024) 093903
2. H. Kitano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3 (2013) 5202505
3. K. Muranaka, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 4 (2016) 5201205
4. 中村 武恒, 他: 特許第 5753462 号 (2015 年 5 月 29 日)
5. T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3 (2015) 5202304

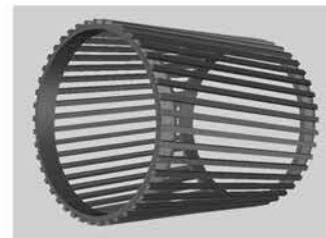


Fig. 1 Schematic diagram of a squirrel-cage rotor winding.

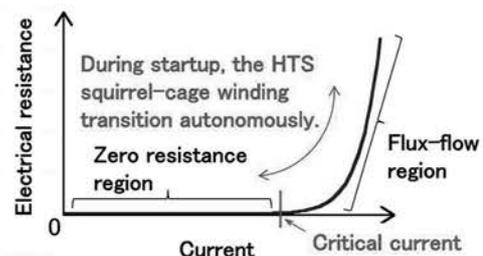


Fig. 2 Transition of the operating point on the electrical resistance-current plane at the startup of the HTS-ISM.

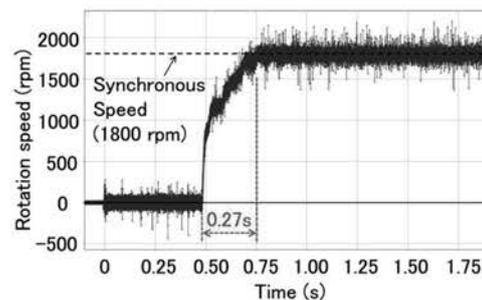


Fig. 3 Experimental result of ultra-high speed start-up characteristic of the 20 kW class HTS-ISM (60 Hz, 77 K).

三相通電時の巻線内転位を適用した三本並列導体を用いた電機子コイルの電流分流特性の評価

Evaluation of Current Distribution Characteristics of Armature Coil Using Three Parallel Conductors Applying Transposition inside the Winding under Three-Phase Current

川崎 剛輝 (都城高専), 井上 智博, 木村 優大, 三浦 峻, 宮崎 寛史(九大), 川越 明史(鹿児島大), 岩熊 成卓(九大)
 KAWASAKI Goki (National Institute of Technology, Miyakonojo College), INOUE Tomohiro, KIMURA Yudai, MIURA Shun,
 MIYAZAKI Hiroshi (Kyushu Univ.), KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.), IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)
 E-mail: goki_kawasaki@cc.miyakonojo-nct.ac.jp

1. はじめに

電動航空機システムの開発に向けて超伝導回転機の研究開発が活発に行われている。このシステムは低電圧・大電流通電による駆動が想定されており、電機子コイルには1,000A以上の電流容量が求められる[1]。そこで、我々は超伝導線材を複数本積層した並列導体による大電流容量化を図っている。これまでの研究によって、3本並列導体で構成されたコイルに対して、単相モデルにおいて均一な電流分布を実現する転位構成が開発された[2]。しかし、実際のモータでは他相コイルとの間に生じる相互インダクタンスも電流分流に影響も与える。そこで、開発された転位方法の三相通電時における効果について実験的に検証し、その結果を報告する。

2. 3本並列導体の転位構成

Fig.1は3本並列導体コイルの均一電流を実現する転位構成を示している。このダブルパンケキコイルの転位構成は3つの積層グループ(Gr.1, Gr.2, Gr.3)で構成されており、それぞれのグループは同じターン数となっている。また、シングルパンケキコイルのターン数に着目すると、Gr.1とGr.2(Gr.3)の巻き数比は1対2となっている。例えば、本実験で使用したサンプルコイルの場合、シングルパンケキコイルのGr.1は3ターン(T_x)で、Gr.2およびGr.3は6ターン、ダブルパンケキコイルのターン数は18である。サンプルコイルはFig.1の転位構成実現のため、コイル巻線内で転位が適用されている。この転位構成は単相通電によって概ね均一な電流分布が実現することが過去の研究で検証されている[2]。

3. 実験方法

Fujikura製の4mm幅のREBCOテープを用いて、Fig.1の3本並列導体の転位構成を実現するサンプルコイルを作製し、三相電機子コイルの試験系を構築した。電機子コイルはそれぞれ18ターンのダブルパンケキコイルで、各相は2つのコイルで構成され、それらのコイルはハンダで接続され、15cmの距離で向かい合うように配置された。この試験系を用いて液体窒素中で三相通電実験を行った。並列導体の各線材に流れる電流はログスキーコイルに発生する電圧から算出した。

4. 結果および考察

Fig.2およびTable1に三相電機子コイルの転位の有無による3本並列導体コイルの解析と通電実験による電流分布は概ね均一な電流分布が実現した。また、Table2は転位適用時の単相及び三相時の電流分流率の測定結果の比較であり、電流分流は概ね変わらない。U相コイルに着目すると、U相コイル内の各素線間のインダクタンスバランスは整っていることが先行研究からわかっている。さらに、V相やW相のコイルとの相互インダクタンスについても転位によって整っていることで、三相通電時においても概ね均一な電流分流が実現されたと考えられる。よって、単相モデルを用いて開発された電機子コイルの転位構成は三相電機子コイルにおいても有効であることが示された。当日は、他相コイルとの相互インダクタンス

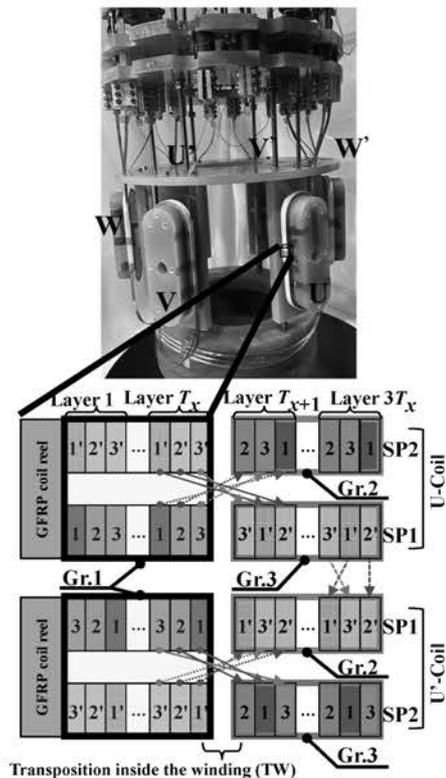


Fig.1 Optimal transposition configuration of the three-strand parallel conductors.

Table 1 Comparison of current distribution of with and without transposition.

	I_1	I_2	I_3
With Trans.	32.4	33.2	34.4
Without Trans.	62.1	24.92	13.1

Table 2 Comparison of current distribution of Single-phase and Three-phase

	I_1	I_2	I_3
Single-phase	34.6	32.6	32.7
Three-phase	32.4	33.2	34.4

が転位でバランスされ、均一な電流分布実現に寄与するかについて、更に解析を実施し、その結果について議論する。

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)および公益財団法人岩谷直治記念財団の助成を受け実施したものです。

参考文献

- M. Filipenko et al.: Sci. Technol., vol. 33, 054002, 2020.
- G. Kawasaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Suercond., vol. 35, no.3, Aug. (2025)

液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(4)

—液体水素試験結果—

AC inductive excitation tests of REBCO assembled conductors in liquid hydrogen (4)

—Liquid hydrogen test results—

大屋 正義, 嶋田 健, 大淵 匠真, 後燈明 拓見, 岡部 宗也, 鈴木 大聖(関学);

今川 信作, 濱口 真司(NIFS); 小林 弘明(JAXA)

Masayoshi OHYA, Ken SHIMADA, Takuma OBUCHI, Takumi GOTOMYO, Soya OKABE, Taisei SUZUKI (Kwansei Univ.);

Shinsaku IMAGAWA, Shinji HAMAGUCHI (NIFS); Hiroaki KOBAYASHI (JAXA)

E-mail: Masayoshi-Ohya@kwansei.ac.jp

1. はじめに

液体水素冷却高温超電導発電機界磁コイル向けに 6 kA 級の高温超電導集合導体を開発中である。液体水素浸漬冷却下において通電試験を行うための誘導通電試験法を検討しているが、ログスキーコイルを用いた誘導電流の測定精度等が課題であり、我々は新たな交流誘導通電方式を提案して基礎検討を行っている。前報[1]では、単層集合導体を用いた短絡二次コイルを試作し、液体窒素冷却下において実施した誘導通電試験結果について報告したが、本報では、液体水素冷却下における誘導通電試験結果について報告する。

2. サンプル諸元

直径 8.6 mm の銅撚線フォーマ上にクラフト紙を 2 枚巻いた後、超電導層を外向きにして 4 mm 幅の REBCO 線材 3 本をスパイラルピッチ 23 mm で集合した[1]。導体を直径 144 mm の FRP 巻枠に沿わせて短絡し、1 ターンの二次コイルを製作した。導体には誘導電流を測定するためのログスキーコイルを取り付けた。

一次コイルとなる REBCO フィールドコイルを構成する 4 個のダブルパンチキコイルの内径は 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[2]。中心空間 24 mm を空けてフィールドコイルを組み立て、その中心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理想的な変流比は 567 である。液体窒素冷却下で予備通電試験を行ったのち[1]、本試験サンプルを能代ロケット試験場のインサートに取り付け、液体水素用クライオスタットに挿入して液体水素冷却下で交流誘導通電試験を実施した。

3. 誘導通電試験結果

液体水素冷却下において、一次電流 I_1 を連続的に徐々に上昇・下降させたときの誘導通電試験結果の一例を図 1 に示す。 I_1 の周波数は 2 Hz である。

I_1 の上昇に対してログスキーコイルを用いて測定した二次電流 I_2 は線形に増加し、一次電流のピーク値 $I_{1,peak}$ が 8.29 A のときに二次電流のピーク値 $I_{2,peak}$ は 4877 A で最大となった。このときの測定波形を図 2 に示す。青破線がログスキーコイル電圧に校正係数を掛けて補正した波形であり、赤実線が積分処理した I_2 の波形である。変流比は 588 である。

$I_{1,peak}$ を 8.47 A に増加させると $I_{2,peak}$ は 723 A まで急減した。その後、一次電流を下降させると二次電流は緩やかに増加し、 $I_{1,peak}$ が 2.99 A のときに上昇時の直線上に復帰した。ログスキーコイル電圧と一次電流の位相差 θ は、二次電流が急減するまではほぼ 90° を示し、0° まで急減した後、復路では徐々に増加した。なお、導体に発生する交流損失を考慮した解析により求めた位相差も 90~89° であり、交流損失の影響は小さい。この後、同様の試験を実施したが、現象は再現した。

今回使用した REBCO 線材の 77 K, s.f. における I_c が 128 A である。20 K, 0.1 T において予測される導体 I_c は 4224 A であ

り、 $I_{2,peak}$ の最大値 4877 A は予想導体 I_c の約 1.15 倍である。線材 3 本をスパイラル導体化したことによる垂直磁場の低減効果が理由として考えられるが、今後詳細検討を行う。

4. まとめ

単層集合導体を用いて 1 ターンの短絡試験コイルを製作し、本コイルを REBCO フィールドコイル内に配置して液体水素冷却下で交流誘導通電試験を実施した。2 Hz 通電時の二次電流ピークの最大値は 4877 A であり、液体水素中で 5 kA 級の大電流誘導試験に成功した。なお、二次電流ピークの最大値 4877 A は、20 K, 0.1 T における導体 I_c 予想値 4224 A の約 1.15 倍であった。

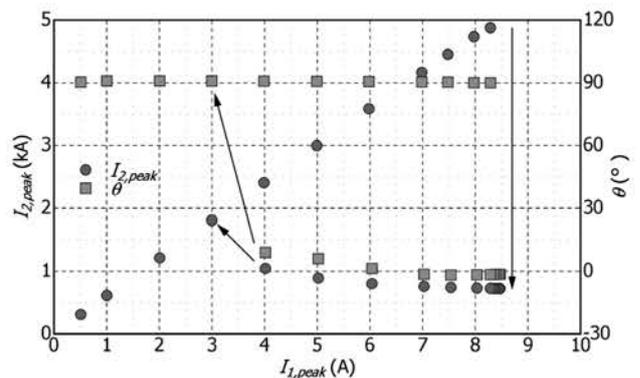


Fig.1 Inductive excitation test result (2 Hz)

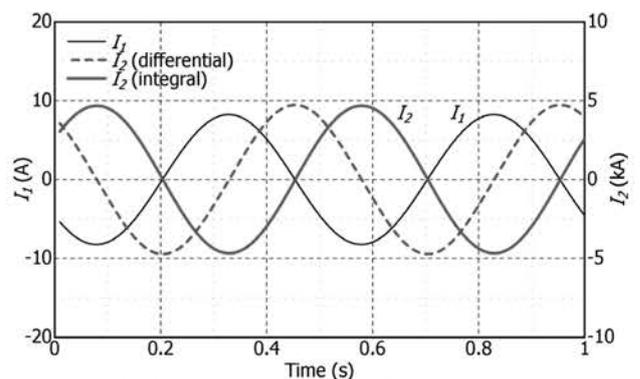


Fig.1 Measured waveforms ($I_{1,peak} = 8.29$ A)

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. T. Gotomyo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 109 (2025) 1P-p08
2. M. Ohya et al.: J. Phys: Conf. Ser., vol. 2776 (2024) 012010

高配向度 REBa₂Cu₃O_y の作製に向けた磁場配向用磁石アレイ幅の検討 Fabrication of Magnetically Biaxial Oriented REBa₂Cu₃O_y by Magnet Arrays with Various Widths

Muhammad Afiq Ahmed, Shintaro Adachi, Pamoda Kahagalla, Futo Fukuyama,
Fumiko Kimura, Shigeru Horii (Kyoto Univ. Adv. Sci. (KUAS))
E-mail: 2022m687@kuas.ac.jp

1. Introduction

Rare-earth based cuprate superconductors (REBa₂Cu₃O_y, RE123) are promising candidates for superconducting applications, such as superconducting cables and high-field electromagnets, operated at 77 K. Furthermore, the microstructure of RE123 materials plays a crucial role in enhancing its superconducting performance, particularly the critical current density (J_c). To achieve high J_c , the RE123 superconductor grains must be biaxially aligned and densified to overcome weak links at grain boundaries in RE123 materials [1,2].

One potential approach for improving grain alignment is the use of magnetic fields during the slip-casting process. In order to simultaneously align the easy and hard axes of magnetization, a biaxial grain-orientation technique using a modulated rotating magnetic field (MRF) has been devised [3,4]. In our previous study, our group successfully achieved the biaxial alignment of DyBa₂Cu₃O_y ($y \sim 7$, Dy123) grains using a Linear-drive type modulated rotating magnetic field (LDT-MRF) equipment with a magnet array capable of generating a static field (SF) of 0.9 T and a rotating field (RF) of 0.8 T [5]. To further enhance the degree of grain orientation in Dy123, particularly at different positions within the magnet array, we are now investigating the effects of using magnet arrays with varying widths and position parallel to the width direction (Y -axis).

2. Experimental method

The conventional solid-state reaction was used to prepare Dy123 polycrystals. For magnetic alignment, the polycrystals were pulverized into fine powders in an agate mortar. The powders were mixed with epoxy resin at a weight ratio of 1: 10 (powder: resin) and placed inside the magnet array. The sample was then magnetically aligned using LDT-MRF system for over 12 hours at room temperature, during which the epoxy resin mixture fully cured. The dimension of the magnetically aligned powder sample is 5 mm^L × 5 mm^W × 2 mm^H. The powder sample remained stationary in the LDT-MRF system, and the magnet array underwent linear reciprocating motion, applying alternating magnetic fields of SF and RF to the sample. After the magnetic alignment of the sample, (103) pole figure measurement was conducted for the bottom surface of the powder sample ($//ab$ -plane).

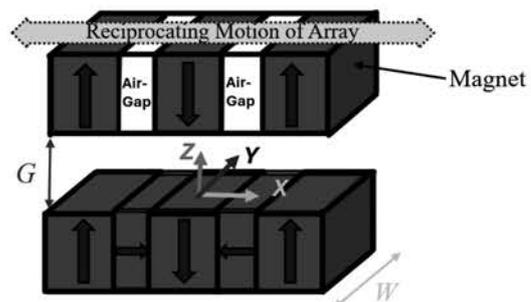
3. Results and discussion

To investigate the effect of the width of magnet array and the sample position along the Y -axis of the array on the degree of grain orientation in the Dy123 powder sample, we utilized three versions of magnet arrays: Magnet Array Version-A, Version-B, and Version-C. Figure 1a shows the schematic of magnet array design. The three magnet arrays differed in two key parameters: the width of the magnets (W) and the air gap between the top and bottom array (G). Figure 1b shows the (103) pole figure of magnetically aligned Dy123 powder sample with version-C ($W=48$ mm and $G=8$ mm) at $X=0$ mm, $Y=15$ mm, measured from the bottom surface. The pole figure plot shows four-fold symmetric spots. The presence of these discrete peaks indicates the biaxial alignment of the Dy123 grains. The symmetry of the peaks means that the a -axis/ b -axis of Dy123 grain is aligned parallel to X -axis/ Y -axis of Figure 1a

and the c -axis is aligned parallel to Z -axis. The measured full width at half maximum (FWHM) of the spots was $\Delta\phi \approx 9^\circ$ in the rotational direction. The narrow FWHM values reinforce the high quality of grain alignment achieved through the LDT-MRF method.

Furthermore, the inclination angle, that is the translation of the spots from $\Delta\psi=45^\circ$, was found to be $\theta_{Inclined} \approx 4^\circ$. In our previous studies using magnet array Version-A ($W=20$ mm and $G=10$ mm) for sample position $X=0$ mm, $Y=3.5$ mm, we found $\theta_{Inclined} \approx 6^\circ$ [5]. The variation in $\theta_{Inclined}$ reflects the sensitivity of grain alignment due to the magnet array geometry. A relatively smaller inclination angle, as observed with Version-C ($\theta_{Inclined} \approx 4^\circ$), indicates a more precise biaxial orientation of Dy123 grains compared to Version-A ($\theta_{Inclined} \approx 6^\circ$). This suggests that the width of the magnet array significantly influences the uniformity of MRF and effectiveness of magnetic alignment across the sample, notably along the Y -axis. The detailed results on how the width of each magnet array affects the degree of grain orientation in the Dy123 samples will be shown in the poster presentation.

(a)



(b)

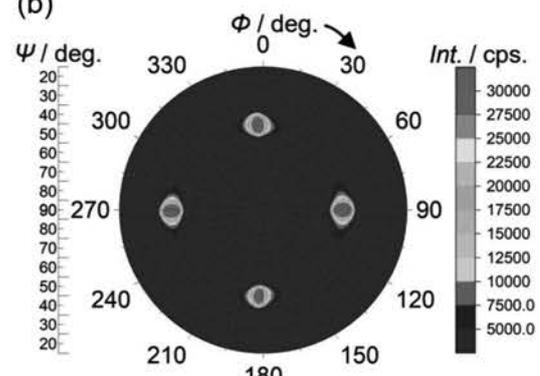


Figure 1. (a) The schematic of magnet array. (b) (103) Pole figure of bottom surface of magnetically aligned Dy123 sample.

References

- [1] D. Dimos et al.: Phys. Rev. Lett. 61 (1998) 219
- [2] J.O. Willis et al.: Physica C 335 (2000) 73
- [3] T. Kimura et al.: Langmuir 22 (2006) 3464
- [4] T. Fukushima, S. Horii et al.: Appl. Phys. Express 1 (2008) 111703
- [5] W.B. Ali et al.: J. Appl. Phys. 134, (2023) 163901

REBCO ロバストコイル構造を模擬した 2 枚バンドル REBCO 導体における 転流現象 Current transfer in a two-bundle REBCO conductor in robust coil structure

土屋 雄司, 矢口 結翔, 櫻井 響介, 淡路 智 (東北大)

E-mail: tsuchiya@tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO 高温超伝導線材は、優れた磁場中臨界電流特性により 30 T 級超伝導マグネットへの応用が期待されている [1]。一方で、局所欠陥に起因するホットスポットの発生は、コイルの熱暴走や焼損を引き起こす可能性があり、安定運転のためのクエンチ保護が重要課題である。これに対し、REBCO 線材の並列接続による冗長化が提案されている [1,2]。我々は、2 枚の REBCO 線材を共巻きしてコイルを構成する REBCO ロバストコイル構造を提案している [1]。この構造は、片方の線材に局所劣化が生じた際に他方への電流転流により熱発生を抑制し、マグネットの安全性向上が期待される。転流現象を評価するために線材長手方向の多点電圧測定が報告されている [3]。しかし、転流時に生じる電圧は、線材長手方向および線材間方向にベクトルとして発生するため、転流現象の定量的理解は未だ不十分である。

そこで本研究では、30T 級超伝導マグネットへの応用を見据え、線材間の電圧を詳細に測定することにより、2 枚バンドル REBCO 導体における転流現象の挙動を実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

REBCO 線材(フジクラ製、FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、安定化 Cu 層厚 40 μm 、臨界電流 214 A)に対して、長さ 10 cm の線材に曲げ加工による局所劣化を導入した。また、長さ 5 cm の線材を重ねて 2 枚バンドル試料を作製した。スプリングコンタクト(テスプロ製)を用いて線材の上下方向に電圧端子を取り付け、線材間の電圧を測定した。図 1(a)および(b)に試料セットアップの外観および電圧測定箇所の模式図を示す。通電測定には DC 電源(菊水電子工業、PAG10-240)を用い、試料を液体窒素で浸漬冷却して行なった。電流を、スワイプレート 8.7 A/s で 0 から 240 A まで増加しながら、高精度オシロスコープ(横河計測社、DL950)を用いて各電圧端子間の電圧差を測定した。

3. 実験結果及び考察

劣化導入部において I_c はゼロに低下していた。図 2 に、V1 から V3 の電圧端子間における電圧の電流依存性を示す。V1 および V2 ではそれぞれ、上向きおよび下向きの電圧が観測され、転流が起こっていることが明らかになった。Cu 安定化層を有する REBCO 線材間のコンタクト抵抗の典型値は、 $10^1\text{-}10^3$ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$) [4]と報告されている。250 A 通電時に V1 端子で 10 mV が発生していることから、転流した電流は 10-250 A であると見積もられた。また、焼損が発生しなかったことから 2 枚バンドル構造がクエンチ保護に有効である可能性が示された。一方、転流した電流の定量的な見積もりに向けて、コンタクト抵抗の評価を行う予定である。

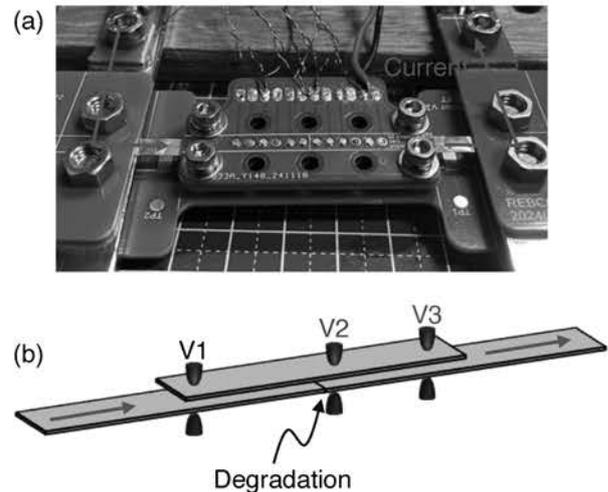
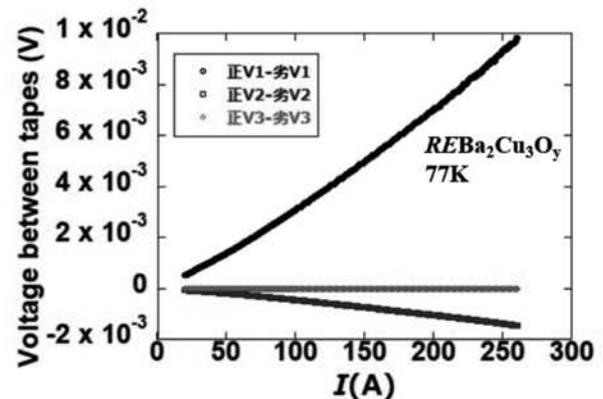


Fig. 1 (a) Appearance and (b) schematic drawing of the sample set up for measurement of current transfer between the REBCO tapes. Deterioration was introduced near the V2 terminal.

Fig. 2 Current dependence of voltages between



REBCO tapes at 77 K.

謝辞

本研究の一部は、科研費 (23K22792, 24K01324)の結果得られたものです。

参考文献

- [1] S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 4300105 (2021).
- [2] T. Kiss *et al.*, Abstract of CSSJ Conference **96**, 144 (2018).
- [3] H. Yamada *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, 6602204 (2022).
- [4] X. Wang *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **26**, 035012 (2013).

航空機用電気モーター向け RE 系超電導線材の工業規模の細線化加工

Industrial-Scale Filamentization of REBCO Coated Conductors for Electric Motors in Aviation

中村 美幸, PetrykinValery, Lee Sergey (FFJ) ; 町 敬人, 廣瀬 陽代, 和泉 輝郎(AIST); 岩熊 成卓 (九大)
 NAKAMURA Miyuki, PetrykinValery, Lee Sergey (FFJ) ; MACHI Takato, HIROSE Hishiro, IZUMI Teruo (AIST);
 IWAKUMA Masataka (Kyushu University)
 E-mail: nakamura@faradaygroup.com

1. はじめに

超電導回転機において、電機子コイルでは交流大電流が必要となる。航空機用やその他の用途の超電導回転機に使用する希土類高温超電導線材(REBCO 線材)は、線材全体にわたって、交流損失低減するという大きな課題に取り組む必要がある。交流損失の支配的な成分であるヒステリシス損失は線材幅に比例するため、線材を幅方向に複数の細い導体に分割するマルチフィラメント線材を採用し、さらにフィラメント間抵抗を確保することによりカップリング損失の低減をさせるレーザースクライビングの開発を進めた。本発表では、産業規模のレーザーフィラメント化における主な課題や、フィラメントの均一性、フィラメント間の抵抗制御、構造的損傷の最小化について報告する。

2. 実験

加工には、パルス幅 7 pses の UV パルスレーザー (Coherent HyperRapid NX355-30)を用いた。ガルバノスキャナを用いて、REBCO 線材を 4 フィラメントに分割した。両端のフィラメント(フィラメント 1 および 4)が裏面の Hastelloy および Cu 層を介して導通しないよう、線材の幅方向端部にもレーザーによる縁切り加工を施しており、厳密には 5 フィラメントに分割されている。レーザースクライビング加工対象の REBCO 線材は、幅 4 mm、厚さ 40 μm の Hastelloy 上に成膜されたもので、最表層には Cu の保護層を有する。

まずは、短尺サンプルを用いて、レーザーパワー、搬送速度、焦点距離、スキャンスピードなどのパラメータについてスクライビング加工の条件検討を行った。この試料に対し、SEM および光学顕微鏡による断面観察、ならびにフィラメント間抵抗および各フィラメントの臨界電流(I_c)測定を行った。

フィラメント間のカップリング損失は、その間の抵抗に反比例することから、まず室温でフィラメント間抵抗の評価を実施した。5 フィラメント構造全体に対する磁場中臨界電流(I_c)の測定は、磁場方向を $H//c$ に設定し、77 K および 70 K で最大 3 T まで行った。

次に、50m 長の REBCO 線材を用いてスクライビング加工を行い、4 フィラメントに分割した。また、スクライビング加工後のフィラメント間抵抗を測定するためにポリイミド電着被覆(厚さ約 30 μm)を行った。

3. 実験結果および考察

レーザースクライブ加工後の REBCO 線材の断面 SEM 画像を Fig. 1 に示す。レーザーの条件(パワー、焦点距離)を変えることによって、ハステロイまで切削されている。焦点距離が最適ではない場合や、レーザーパワーが最適ではない場合は、切削が不十分であったり、溝幅が広すぎるなどの結果となった。

また、加工後のサンプルを光学顕微鏡で観察した結果を Fig. 2 に示す。加工条件が最適ではない場合は、溝幅が長手方向に対して均一ではなかったり、溝の深さが途中で変わるなどの様子が見られた。

フィラメント抵抗の測定結果と磁場中臨界電流の測定結果については、ポスターにて発表する。

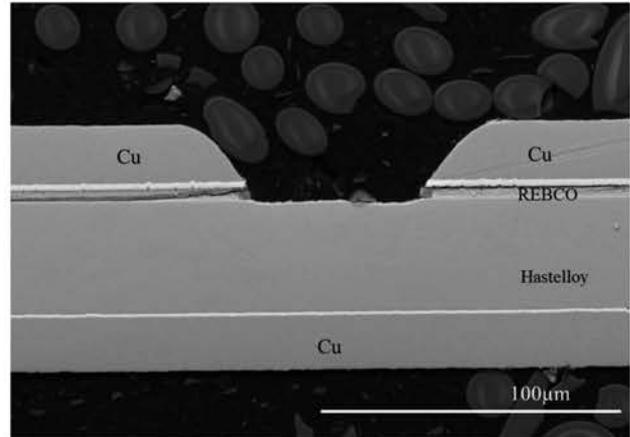


Fig. 1 Cross-sectional SEM of laser-scribed REBCO tape.

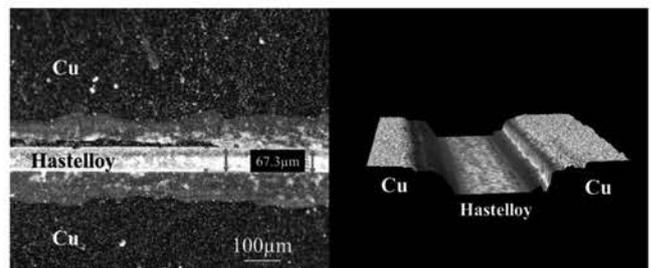


Fig. 2 Cross-sectional SEM of laser-scribed REBCO tape.

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。

参考文献

- 町敬人 他:2024 年秋季低温工学・超電導学会講演概要集(2024) P32

FPGA 統計処理を活用したクエンチ前兆を捕捉するイベントトリガーシステムの開発

Development of an event-triggering system for “quench-precursor” detection using statistical logics in FPGA

鈴木 研人、菅野 未知央、中本 建志、池本 由希子、荻津 透、田中 賢一、岡田 竜太郎、高橋 直人 (KEK)
 SUZUKI Kento, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, IKEMOTO Yukiko, OGITSU Toru, TANAKA Kenichi,
 OKADA Ryutaro, TAKAHASHI Naoto (KEK),
 E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

1 はじめに

LHC 高輝度化アップグレード (HL-LHC) への現物貢献として、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) ではビーム分離用双極超伝導磁石 (通称 D1、磁石名 MBXF) の製造を担当している。KEK が保有する 9 m 長縦型クライオスタットにて、これまでに 4 台の実機 (MBXF1、MBXF5、MBXF2、MBXF3) の励磁試験を行い、全ての磁石で受入電流値である 13.23 kA までのトレーニングに成功している [1]。図 1 にこれまでのトレーニングプロットを示すが、MBXF2、3 では比較的緩やかなトレーニングである事がわかる。またクエンチ箇所の同定に用いる Quench Antenna (QA) のクエンチ時の信号に着目しても、実機間で特徴的な違いが見られている。全ての実機は同じ製造過程を経ているものの、異なるトレーニング傾向やクエンチの振る舞いを示しており、この原因を探るために、クエンチ事象だけでなく通電中に生じるコイルの機械的・熱的擾乱の有無や傾向の解析、そしてクエンチの前触れとなるような事象探知が有効ではないかと考えている。そのため、クエンチ前に生じる異常事象を効率良くかつ包括的に捕捉するためのイベントトリガーシステム (ETS) の構築を試みた。

2 ETS の概要

ETS には NI 製 USB-7856R に搭載されている Field Programmable Gate Array (FPGA) とアナログ入力回路を利用した。従来のクエンチ検出器では、ホイーストンプリッジ回路や FPGA ロジック回路を用いて常伝導転移によるコイル信号 (バランス信号) 等の電圧変化を利用している。一方 ETS の構成にあたっては、バランス信号以外にも様々な信号の過渡現象をリアルタイムに捉える事を目的として、 T -分布と F -分布による棄却検定を利用した統計処理ロジックを FPGA に実装している (図 2)。このロジックでは以下の 2 標本の平均 η と標準偏差 σ を抽出する：1) 参照となる通常時の電圧値 v_j (標本数 m) から求めた η_0 と σ_0 、2) 時刻 t で得られる連続した v_i (標本数 n) から求めた $\eta(t)$ と $\sigma(t)$ 。これらの変数から図 2 に示す F 値と T 値を計算する。 F 値は 2 標本の分散の比較、 T 値は平均の比較を示し、これらの差が予め設定した有意水準 (閾値) を超過したか否かで検定を行う。そして、この検定を FPGA で処理することでリアルタイム異常検知が可能となる。さらに応用して異常時のみデータ取得をするようなトリガ回路を組む事で、効率良いデータ収集が実現する。

3 試験運用結果

2025 年春より行われている MBXF5 の第 2 サイクル励磁試験にて ETS の試験運用を実施した。MBXF5 のトレーニング試験中に ETS で得られた波形を図 3 に示した。ここでは入力値である QA 信号に対して上記の FPGA の統計ロジックを適用し、 T -検定と F -検定プロセスをリアルタイムで処理している様子を示している。サンプリングレートは 10 kHz、また検定に使用しているサンプル数は $n=m=1000$ (10 ms 相当) とした。途中 QA の信号で wire motion 的な信号が現れているが、これが F -検定によって顕な変化量としてエンコードされ、閾値を超えた $t=50000 \mu\text{s}$ あたりでイベントトリガーを発報している。一方 T 値は wire motion のような信号に対してはおおよそ不感である。現状まだ性能評価の過程にあるが、単に変化を捉えるだけでなくイベント識別の可能性も期待できる。

4 まとめと展望

MBXF5 の第 2 サイクル励磁試験から ETS の試験運用を行っている。本発表にてこれまで得られた全データの解析結果

を報告するとともに、海外で進められている異常検出器との比較、さらには高速クエンチ検出の可能性についても言及する。

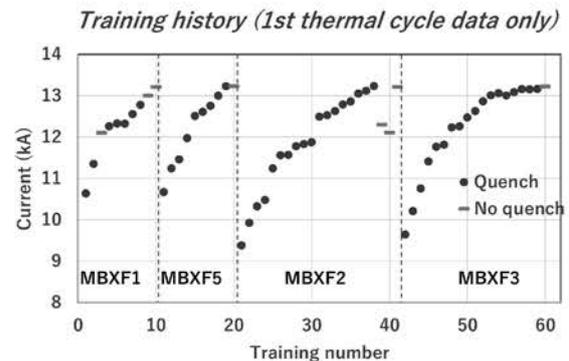
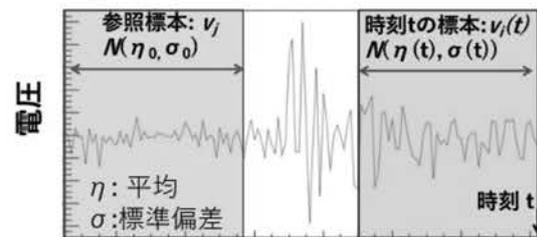


Fig. 1: Training summary of MBXF. Only the 1st thermal-cycle data are shown.



$$F\text{値: } q_F(t) = \frac{\frac{1}{n} \sum_i (v_i(t) - \eta(t))^2}{\frac{1}{m} \sum_j (v_j - \eta_0)^2} = \frac{\sigma(t)^2}{\sigma_0^2}$$

$$T\text{値: } q_T(t) = \frac{\eta(t) - \eta_0}{\sigma_0 / \sqrt{n}}$$

Fig. 2: Real-time data processing of T and F tests implemented in the FPGA logic.

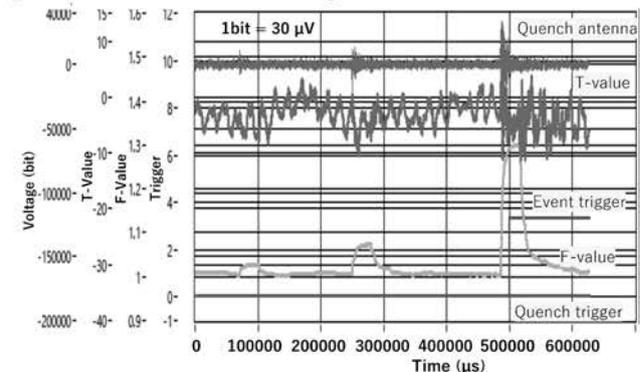


Fig. 3: Snapshot of waveforms obtained by the ETS.

参考文献

1. M. Sugano *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. doi:10.1109/TASC.2025.3556093

CuFe_{1-x}Al_xO₂ の 4 K 蓄冷材としての GM 冷凍機による性能評価

Performance evaluation of CuFe_{1-x}Al_xO₂ as a 4 K regenerator material using a GM cryocooler

増山 新二 (大島商船高専), 寺田 典樹, 間宮 広明, 齋藤 明子 (NIMS)

MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College), TERADA Noriki, MAMIYA Hiroaki, SAITO T. Akiko (NIMS)

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

1. はじめに

蓄冷式冷凍機の到達温度や冷凍能力は、充填されている蓄冷材の比熱に起因する熱容量が大きく関係する。当然ながら、大きいことが望ましい。現在、4 K 用の代表的な蓄冷材は HoCu₂, Er₃Ni, Gd₂O₃S などが挙げられ、これらの共通点としては、希土類元素が含まれていることである。したがって、希土類元素の調達状況が製造コストに大きく影響するため、銅やステンレスなどの金属蓄冷材と比較すると、とても高価である。

そこでわれわれは、希土類元素を含まない CuFe_{1-x}Al_xO₂ に注目した。今回は、Al 含有量 (x) を変化させた数種類の材料を合成し、GM 冷凍機の 2 段階蓄冷材として充填したときの冷凍性能評価を行った。以下に、CuFe_{1-x}Al_xO₂ の比熱特性、冷凍能力結果などを報告する。

2. CuFe_{1-x}Al_xO₂ の比熱特性と 2 段階蓄冷器

図1に CuFe_{1-x}Al_xO₂ の比熱特性を鉛 (Pb), HoCu₂ と共に示す。この材料の特徴は、温度の低下とともに比熱も小さくなるが、15 K 付近で特性が改善し、4 K レベルにおいても有限な値を有する。また、Al 含有量 (x) をわずかに数パーセント増加させることで、比熱のピークが小さくなるとともに、10 K 以下の比熱が、若干ではあるが、大きくなる。CuFe_{1-x}Al_xO₂ の比熱の根源は電子のフラストレーション効果によるもので、現在の代表的な 4 K 用の蓄冷材の磁気比熱効果とは異なる。今回は、1,000°C 程度の温度で固相反応法により x=0, 1, 2, 3, 5% の 5 種類の材料を合成した。粒径はいずれも 200~500 μm であり、その一例を図2に示す。合成された材料は、球状ではないが、GM 冷凍機にはそのまま充填した。空間充填割合は 50% 程度であった。

実機試験で使用された 2 段階 GM 冷凍機は RDK-101D (SHI) で、圧縮機 (CNA-11) の定格電力は 1.3 kW@60 Hz である。その 2 段階蓄冷器の低温側 50% に CuFe_{1-x}Al_xO₂ 粒、高温側 50% に Pb 球 (すべての実験において共通) が充填された。図2に 2 段階蓄冷器構造の概略図を示す。

3. 冷凍能力結果

冷凍能力試験は、1, 2 段階ステージが最低到達温度で安定した後、2 段階ステージに設置した電気ヒータにより定常熱流を加えた時の冷却ステージ温度を測定する方法とした。なお、1 段階ステージは外部からの温度調整は行っていない。図3に Al 含有量 (x) の異なる 5 種類の CuFe_{1-x}Al_xO₂ の冷凍能力結果を示す。いずれの材料も 3 K 台の到達温度を示し、4.2 K で冷凍能力を発揮できることが確認された。また、図3に同時に示される Pb, HoCu₂ の測定結果と比較すると、10 K 以下において、Pb よりは大きく、HoCu₂ よりは小さくなっている。

Al 含有量 (x) による 4.2 K での冷凍能力を図4にまとめた。結果は、凸型の特性を示し、x = 2% の時にもっとも大きな冷凍能力が発揮された。

4. まとめ

フラストレーション効果により、15 K 以下で比熱特性が改善する CuFe_{1-x}Al_xO₂ を蓄冷材として充填した実機試験から、4.2 K で冷凍能力を発揮できることが実証された。希土類元素を含まない材料での能力としては、極めて優れていると思う。今後、合成法も含めた最適条件の探索、ならびに球状加工することで、さらなる能力改善が見込まれると考えられる。

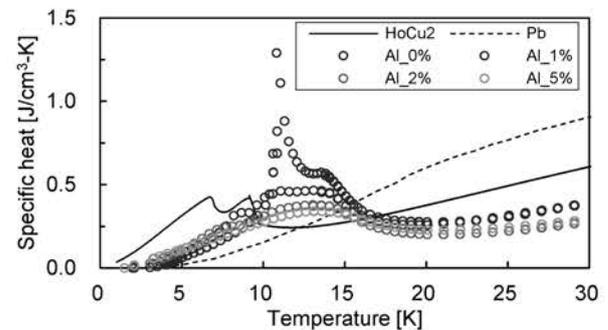


Fig. 1. Specific heat characteristics of CuFe_{1-x}Al_xO₂, Pb and HoCu₂.

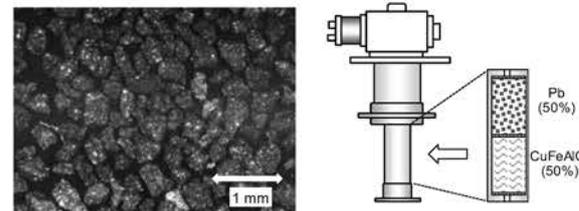


Fig. 2. Photo of synthesized CuFe_{1-x}Al_xO₂ grains and schematic of the second-stage regenerator configuration.

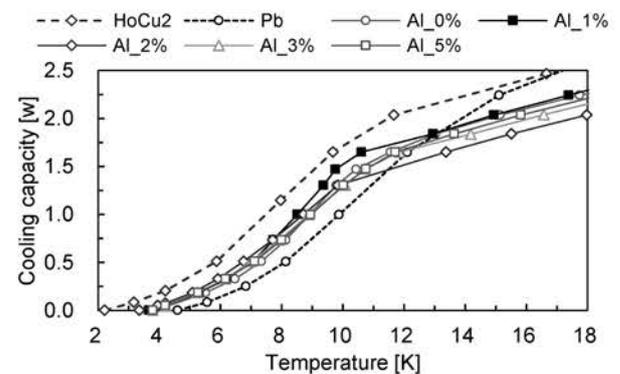


Fig. 3. Cooling capacity results of CuFe_{1-x}Al_xO₂ with varying Aluminum content (x), alongside Pb and HoCu₂.

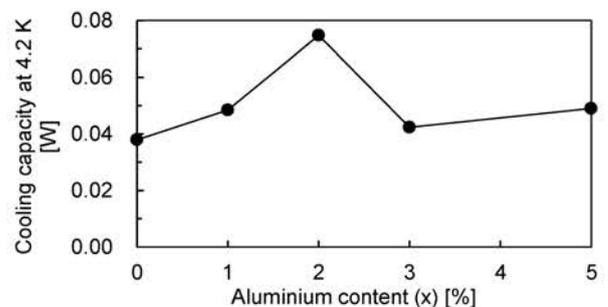


Fig. 4. Dependence of cooling capacity at 4.2 K on Aluminum content (x) of CuFe_{1-x}Al_xO₂.

【謝辞】

本研究は、JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) JPMJTR24T1 の支援を受け実施された。ここに感謝する。

液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(1)

—単線 1 ターンコイル検証—

AC inductive excitation tests of REBCO assembled conductors in liquid hydrogen (1)

—One-turn coil with single HTS wire—

大淵 匠真, 嶋田 健, 大屋 正義(関学); 今川 信作(NIFS)

Takuma OBUCHI, Ken SHIMADA, Masayoshi OHYA (Kwansei Univ.); Shinsaku IMAGAWA (NIFS)

E-mail: gth98941@kwansei.ac.jp

1. はじめに

数百 MW 級の液体水素冷却高温超電導発電機の開発を目指しており、界磁コイル巻線に用いる高温超電導集合導体の液体水素冷却下における数 kA 級の通電試験方法として、低温超電導大電流導体の通電試験に用いられる誘導通電方式[1]を検討している。導体の両端を短絡した低インダクタンスの二次コイルに対して、高インダクタンスの一次コイルを励磁することにより大電流を誘導する。ログスキーコイルを用いた誘導電流の測定精度が課題であり、新たな交流通電方式を提案している。本方式の基礎検証として、REBCO 線材及び BSCCO 線材それぞれ1本を用いて 1 ターンの短絡二次コイルを製作し、交流誘導通電試験を実施した結果について報告する。

2. サンプル諸元

二次コイル用 REBCO 線材の諸元を表 1 に示す。線材を直径 144 mm の巻枠に沿わせて短絡接続した 1 ターンの二次コイルと REBCO フィールドコイルを図 1 に示す。二次コイルに誘導する電流を測定するためのログスキーコイルと、ログスキーコイル校正用の電流リードを設けた。

一次コイルとなる REBCO フィールドコイル[2]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 460 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、その中心空間に二次コイルを配置した。有限要素法を用いて計算した一次コイルと二次コイルの理想的な変流比は 496 である。本試験構成で液体窒素冷却下の交流誘導通電試験を実施した。

3. 誘導通電試験結果

液体窒素冷却下で実施した REBCO 線材コイルの誘導通電試験結果と解析結果の比較を図 2 に示す。過渡回路解析には、式(1)に示す n 値モデルを用いて計算したフラックスフロー抵抗 R_s と二次コイルの短絡接続抵抗 (120 nΩ を想定) を考慮した。 I_c は線材の臨界電流、 I_2 は二次電流、 L は線材長である。一次電流の周波数は 2 Hz である。

$$R_s = 1.0 \times 10^{-4} \times \frac{I_2^{n-1}}{I_c^n} \times L \dots (1)$$

一次電流のピーク値が 0.22 A までは一次電流に比例して二次電流も上昇したが、その後、徐々に誘導率が低下した。ログスキーコイル電圧と一次電流の位相差は、一次電流のピーク値が 0.22 A までは徐々に減少したが、0.24 A 以上で急減した。位相差が急減した時の二次電流のピーク値は 109 A であり、線材の I_c (106 A) とほぼ一致した。

図 2 に示すように、試験結果と解析結果は概ね一致したが、低電流領域において位相差が徐々に減少した現象について交流損失の影響を解析した。一次電流のピーク値が 0.08 → 0.22 A の領域において位相差が 87.8 → 85.7° まで約 2° 減少したのに対して、Norris の通電損失を考慮した解析により求めた位相差も 2.4° 減少したことから、低電流領域で生じた位相差の原因は交流損失と結論づけた。

4. まとめ

REBCO 集合導体の液体水素冷却下における大電流通電試験に向けて新たな交流誘導通電試験方式の検討を行っている。基礎検証として REBCO 線材 1 本を用いて 1 ターンの短絡二次コイルを製作し、REBCO フィールドコイル内に配置して液体窒素冷却下で交流誘導通電試験を実施した。二次電流のピーク値が I_c に達すると位相差が急減する現象を確認し、ログスキーコイルの電圧信号を用いて導体の I_c を検知できる可能性を示した。また、低電流領域において生じる位相差は交流損失によって説明可能なことを示した。当日は BSCCO 線材の試験結果についても報告する。

Table 1 Specifications of REBCO wire (Fujikura, FESC-SCH04-FPI, $I_c=106$ A)

Width (mm)	4.0
Thickness (mm)	0.11
Substrate	Hastelloy, 50 μm
Stabilizer	Copper, 20 μm per side

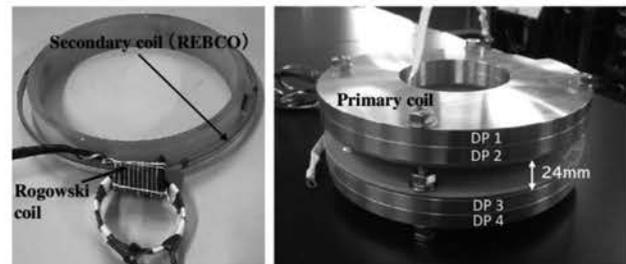


Fig.1 Photograph of test sample

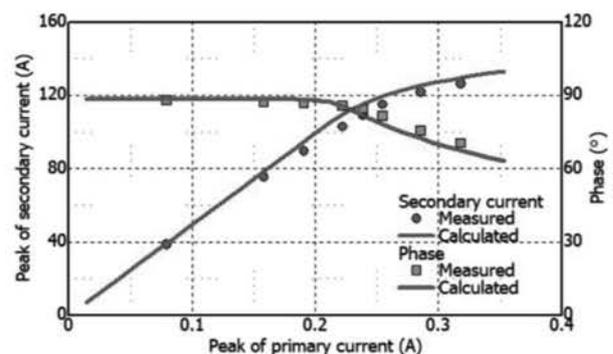


Fig.2 Results and analysis of inductive excitation test (2 Hz)

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の一般共同研究 (NIFS23K1IA009) 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) 01201

液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(2)

—単層集合導体模擬コイル検証—

AC inductive excitation tests of REBCO assembled conductors in liquid hydrogen (2)

—Single layer conductor mock coil—

嶋田 健, 大淵 匠真, 大屋 正義(関学); 今川 信作(NIFS)

Ken SHIMADA, Takuma OBUCHI, Masayoshi OHYA (Kwansei Univ.); Shinsaku IMAGAWA (NIFS)

E-mail: hhj49808@kwansei.ac.jp

1. はじめに

数百 MW 級の液体水素冷却高温超電導発電機の界磁コイル向け高温超電導集合導体の液体水素冷却下における数 kA 級の通電試験に新たな交流誘導通電方式を用いることを検討している。本通電方式を確立するため、 I_c が自明な REBCO 線材および BSCCO 線材 1 本をそれぞれ用いて 1 ターンの短絡二次コイルを製作して交流誘導通電試験を行い、誘導通電試験の構成と、ログスキーコイル電圧信号を用いた I_c 測定の可能性について検証してきた。本研究では、高温超電導線材 3 本を用いた単層集合導体の交流誘導通電試験に移る前に、REBCO 線材 3 本を用いた 1 ターン×3 並列の短絡二次コイルを製作し、一次コイルである REBCO フィールドコイル内に設置して交流誘導通電試験を実施した結果について報告する。

2. サンプル諸元

二次コイルに使用した REBCO 線材の諸元を表1に、二次コイルの構成と写真を図2に示す。直径 144 mm、高さ 15 mm の FRP 巻枠に対して、線材間の偏流を抑制するため、3 本の REBCO 線材を 120°ずつ位置をずらし、インダクタンスが揃うように交差させながら斜めに巻線してそれぞれ短絡した。線材 3 本に誘導する二次電流を一括で測定するためのログスキーコイルと、ログスキーコイル校正用の通電リード線を取り付け、誘導通電試験前に常温および液体窒素冷却下でログスキーコイルの校正を実施した。

一次コイルとなる REBCO フィールドコイル[1]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 460 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、その中心空間に二次コイルを配置した。本試験サンプルを液体窒素で冷却して誘導通電試験を実施した。

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。一次電流の周波数は 0.5 Hz である。丸ドットはログスキーコイル電圧に対して一次電流と同位相成分の実効値から換算した二次電流のピーク値 $I_{2,peak}$ 、四角ドットはログスキーコイル電圧と一次電流の位相差 θ を示す。

一次電流の増加に対して、二次電流はほぼ線形に上昇したが、徐々に誘導率が低下した。一次電流のピーク値 $I_{1,peak}$ が 0~0.3 A の領域において求めた変流比は 609 であり、予想値とほぼ一致した。一方で、ログスキーコイル電圧の位相差は低電流領域で徐々に低下した後、 $I_{1,peak}$ が 0.52 A 付近から急激に減少し始めた。この時の二次電流のピーク値 $I_{2,peak}$ は 302 A (変流比 584) である。本値に対して、二次コイルに使用している REBCO 線材の I_c は 106 A であり、3 本の I_c 総和は 318 A である。両者の差は約 5% であり、3 本の線材に均等に電流が流れるように巻き方を揃えたが、わずかに偏流が発生した可能性がある。また、低電流領域において発生した位相差の減少には交流損失が影響していると考えており、三次元磁場解析による検討を進めている。

4. まとめ

3 本の REBCO 線材を用いた 1 ターン×3 並列の短絡二次コイルを製作し、REBCO フィールドコイル内に配置して液体窒素冷却下で交流誘導通電試験を実施した。 $I_{1,peak}$ が 0.52 A 付近からログスキーコイル電圧の位相差が急激に減少した。このときの $I_{2,peak}$ の値 302 A は二次コイルに使用した線材 I_c 総和 318 A の 95% であり、線材間でわずかに偏流が発生している可能性がある。引き続き、上記偏流の発生原因を追究するとともに、3 本の REBCO 線材を用いた高温超電導集合導体を製作し、液体窒素冷却下および液体水素冷却下において交流誘導通電試験を実施する。当日は、一次電流の周波数が 1 Hz、2 Hz の場合の誘導通電試験結果についても報告する。

Width (mm)	4.0
Thickness (mm)	0.11
Substrate	Hastelloy, 50 μ m
Stabilizer	Copper, 20 μ m per side

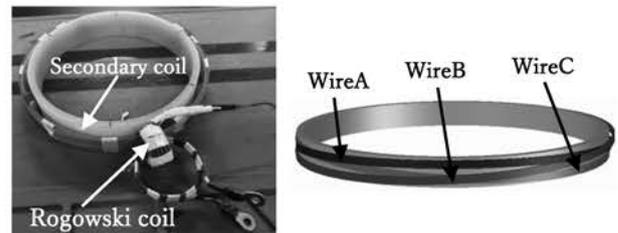


Fig.1 Secondary coil sample

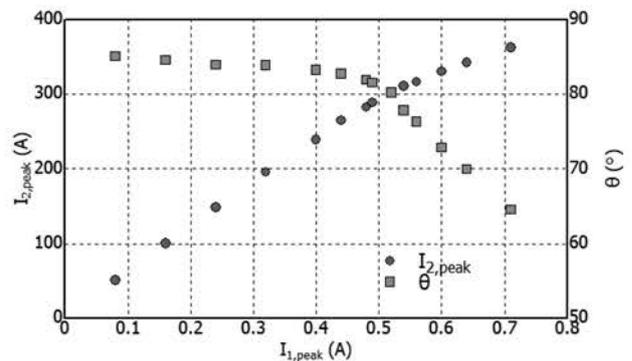


Fig.2 Inductive excitation test result (0.5 Hz)

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. M. Ohya et al.: J. Phys. Conf. Ser., vol. 2776 (2024) 01201

液体水素冷却下における高温超電導集合導体の交流誘導通電試験(3)

—液体窒素試験結果—

AC inductive excitation tests of REBCO assembled conductors in liquid hydrogen (3)

—Liquid nitrogen test results—

後燈明 拓見, 岡部 宗也, 嶋田 健, 大淵 匠真, 大屋 正義(関学); 今川 信作(NIFS)

Takumi GOTOMYO, Soya OKABE, Ken SHIMADA, Takuma OBUCHI, Masayoshi OHYA (Kwansei Univ.)

Shinsaku IMAGAWA (NIFS)

E-mail: gah99952@kwansei.ac.jp

1. はじめに

高温超電導発電機の界磁巻線の超電導化に必要な数 kA 級の集合導体を開発している。液体水素冷却下で大電流通電試験を行うため、低温超電導導体の通電試験に用いられるスイープ誘導通電方式[1]をアレンジした交流誘導通電方式を検討している。高温超電導線材単体を用いた 1 ターン短絡コイルの交流誘導通電試験に引き続き、単層集合導体の両端を短絡した 1 ターン短絡コイルの製作を行った。本報では、製作した 1 ターン短絡コイルの液体窒素冷却下における交流誘導通電試験結果について報告する。

2. サンプル諸元

二次コイルに使用した超電導線材の諸元を表1、単層集合導体の諸元を表2に示す。直径 8.6 mm のフォーマ上にクラフト紙を 2 枚巻き、その上に超電導層を外向きにして REBCO 線材 3 本をスパイラルピッチ 23 mm で集合した。最後にクラフト紙を 4 枚巻き、線材を保護した。導体を直径 144 mm の FRP 巻枠に沿わせて短絡した 1 ターンコイルの写真を図 1 に示す。導体に誘導する電流を測定するためのログスキーコイルと、ログスキーコイル校正用の電流リードを設け、通電試験前に校正を行った。

一次コイルとなる REBCO フィールドコイル[2]を構成する 4 個のダブルバ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、その中心空間に二次コイルを配置した。本試験サンプルを液体窒素で冷却して交流誘導通電試験を実施した。

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。一次電流の周波数は 0.5 Hz である。

一次電流のピーク値 $I_{1,peak}$ が 0.68 A 以上でログスキーコイル電圧と一次電流の位相差が減少した。また、このときの二次電流のピーク値 $I_{2,peak}$ は 391 A である。二次コイルを構成する単層集合導体に使用した線材 I_c の合計は 384 A であり、上記二次電流のピーク値と概ね一致した。ログスキーコイルの電圧信号を用いて導体 I_c を検知できる可能性を示した。

磁場解析ソフト FEMM を用いて計算した二次コイルの自己インダクタンスと一次コイルとの相互インダクタンスはそれぞれ 3.49×10^{-7} H と 1.98×10^{-4} H である。Norris の式を用いて、導体の負荷率が 1 以下の領域において交流損失を計算して 1 周期の平均抵抗値を算出し、上記インダクタンスの値を用いて位相差を計算した結果は図 2 の三角ドットであり、負荷率 0.98 でも 0.8° と影響は小さいことを確認した。

次に、 n 値モデル ($n=20$) を用いて過渡回路解析を行った結果を図 2 に四角ドットで示す。導体の接続抵抗は事前に製作した短絡接続部の抵抗値 11.3 nΩ を用いた。一次電流が 0.68 A のとき、二次電流の解析値は 383 A であり、実測値との差異は 2.1 % で概ね一致している。位相差に関しては、実測値が 87.4°、解析値は 86.2° であり、差異は 1.4 % である。

4. まとめ

単層集合導体を用いて 1 ターンの短絡二次コイルを製作し、REBCO フィールドコイル内に配置して液体窒素冷却下で交流誘導通電試験を実施した。0.5 Hz 通電時において、ログスキーコイル電圧の位相差が急減し始めるときの二次電流ピーク値は 391 A であり、導体に使用した線材 I_c の総和 384 A とほぼ一致した。引き続き実施した液体水素冷却下における誘導通電試験結果は 1C-p06 で報告する。

Table 1 Specifications of HTS wires (SuperPower)

Width (mm)	4.0
Thickness (mm)	0.07
I_c @77 K, s.f. (A)	128

Table 2 Specifications of assembled conductor

Layer	Material	O.D. (mm)	Pitch (mm)
Former	Copper strand	8.6	
Cushion	Kraft paper	9.1	
HTS	REBCO	9.4	23
Protection	Kraft paper	10.2	

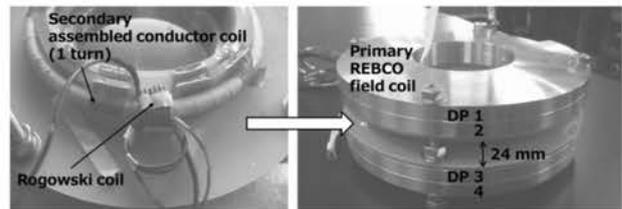


Fig.1 Photograph of test sample

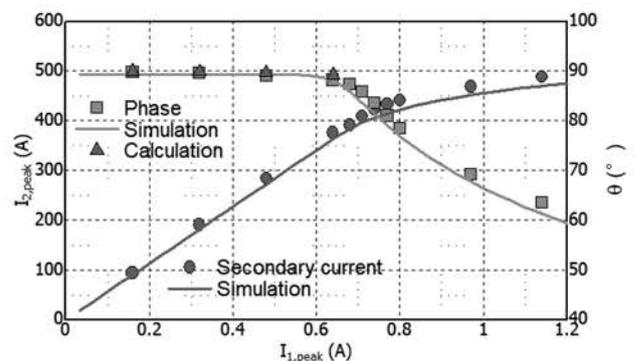


Fig.2 Inductive excitation test result (0.5 Hz)

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の一般共同研究 (NIFS23K1IA009) のサポートを受けたものです。

参考文献

- G. B. J. Mulder et al.: Proc. MT-11 (1990) pp. 479-484
- M. Ohya et al.: J. Phys: Conf. Ser., vol. 2776 (2024) 012010

永久磁石回転子・超電導電機子巻線の同期モータの設計検討

Design Study of a Synchronous Motor with a Permanent Magnet Rotor and Superconducting Armature Windings

下村 悠斗, 大崎 博之(東大), 寺尾 悠(京大)

SHIMOMURA Yuto, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo), TERAO Yutaka (Kyoto Univ.)

E-mail: shimomura.yuto24@ae.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、グローバル化や LCC の普及により航空機旅客輸送量の増加が見込まれている。これに伴い、航空機による温室効果ガス排出量も 2030 年までに大きく増加する見込みであり、その削減が喫緊の課題となっている。特に、航空機の電動化は有力な対策の一つとされているが、機体重量制約の観点から、駆動用モータの高出力密度化が不可欠である。

本研究では、界磁に永久磁石、電機子に超電導巻線を適用した同期モータの設計検討を行う。従来は界磁側に超電導巻線を適用した界磁超電導回転機や、電機子と界磁の両方を超電導化した全超電導回転機の設計が多数行われてきた。しかし、回転体上での低温維持は技術的課題が多く、さらなる信頼性向上や省メンテナンス化が求められている。そこで本研究では、界磁側に永久磁石を、電機子側を超電導巻線とする構造にし、JMAG Designer による解析を用いてその有効性を検討する。

2. 設計方法

本研究では、航空機への適用を想定し、2 MW・5000 rpm の同期モータを設計対象とする。構造は、界磁に永久磁石、電機子に超電導コイルを配置した形式としている。

極数は 4 とする。極数を減らすことで交流損失の低減が期待できる一方、コイルエンド長の増大というトレードオフが存在するため、これらを考慮した最適なバランスとして採用した[1]。

また、超電導線材が高い電流密度を実現できる特性を活かし、電機子巻線の支持部に非磁性・軽量な FRP 等の材料を用いる空芯構造を採用し、機器重量の低減を図っている。

その他、主な設計方針は以下の通りである。

- 電機子巻線部の電流密度は 100 A/mm²とし、20 K での運転を想定。
- 高調波成分の低減を目的に分数スロット(スロット数 27)を採用。
- クライオスタットスペースとして、電機子巻線上下に 20 mm 以上のスペースを確保。
- 出力 2 MW を満足しつつ、出力密度の最大化を設計目標とした。

3. 結果と今後の展望

設計検討により得られた主要諸元を Table 1 に、モータ断面の概略図を Fig. 1 に示す。また、出力密度向上に向けたバックヨーク外径の検討結果を Fig. 2 に示す。

バックヨーク外径を小さくすることで機器重量は低減し、出力密度は向上する。しかし、外径をある値以下とした場合、磁気飽和によってトルクが減少し、設計目標の 2 MW 出力を達成できないことが確認された。

以上の結果より、今後は出力密度向上のための各設計パラメータの最適化検討に加え、他の電磁特性や損失特性の詳細な評価を進め、最終的な設計最適化を図る予定である。

参考文献

- [1] Y. Terao, et al., 2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 79-86.

Table 1. Motor specifications

Rated power output	2 MW
Rated rotational speed	5000 rpm
Rated frequency	166.7 Hz
Number of poles	4
Number of slots	27
Operating temperature	20 K
Outer diameter of stator	416 mm
Effective length	440 mm
Permanent magnet (PM)	Nd-Fe-B
Residual magnetic flux density of PM	1.4 T
PM Outer diameter	260 mm
Magnet thickness	58 mm
Back yoke	50A1000
Back yoke width	46 mm
Rated winding current density	100 A/mm ²
Rated current	210 A
Number of turns	100

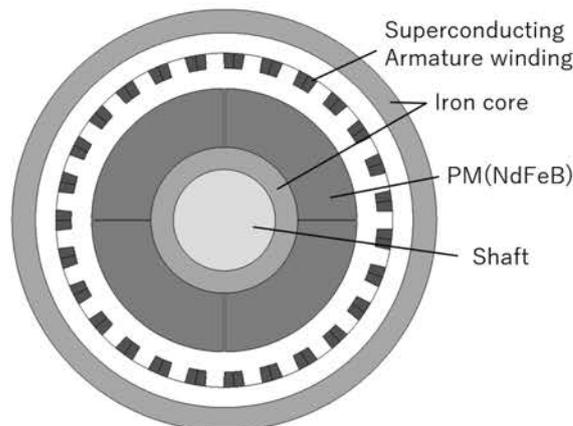


Fig. 1 Schematic diagram of a superconducting motor

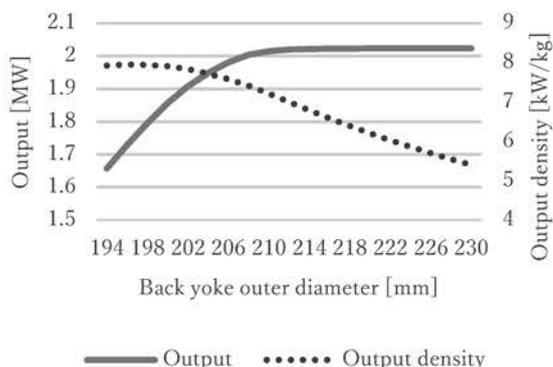


Fig.2 Analysis results regarding the back yoke

超電導コイルに回転磁界を印加したときの交流損失測定における渦電流の影響

Influence of Eddy Currents on AC Loss Measurement by Applying a Rotating Magnetic Field to a Superconductor Coil

大久保 洗希, 奥村 阜月(東大), 寺尾 悠(京大), 淵野 修一郎, 大崎 博之(東大)
 OKUBO Koki, OKUMURA Satsuki (Univ. of Tokyo), TERAO Yutaka (Kyoto Univ.),
 FUCHINO Shuichiro, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)
 E-mail: okubo-koki24@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

超電導材料は、電気抵抗ゼロや高電流密度といった特性を有することから、大電流の通電や高磁界の発生が可能であり、革新的な次世代機器・システムへの応用が期待されている。実際、MRI 装置や超電導リニアなど、直流を利用した超電導システムがすでに実用、あるいはほぼ実用の段階にある。

一方で、交流応用については、交流損失や冷却の課題から実用化が困難とされてきた。しかし近年では、高温超電導体の適用により、交流応用への可能性が注目されている。超電導体に交流電流や交流磁界を印加すると、交流損失と呼ばれるエネルギー損失が発生するため、交流応用においてはこの損失を正確に評価することが不可欠である。

本研究チームでは、回転機応用の研究を進める中で、回転磁界印加時の交流損失測定を実施している[1]。その測定において、装置各部に誘導される渦電流の影響があることがわかっている。そこで本稿では、測定装置内にホールセンサを設置し、回転磁界印加時に装置内部で発生する渦電流の影響について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

交流損失測定装置を Fig.1 に、コイルボビンに設置したホールセンサを Fig. 2 に示す。ホールセンサはコイルボビンの中心部、直線部、曲線部の 3 か所に設置してあり、それぞれの地点で磁場を観測している。

磁場測定の実験は以下の 4 種類を実施した。

1. 定常状態の磁場の測定
2. FRP 製のコイルボビンの場合の磁場の測定、
3. ステンレス製コイルボビンの場合の磁場の測定
4. ステンレス製コイルボビンに MgB₂ 線材を巻いた超電導コイルを設置した場合の磁場の測定

実験 1 に関しては、永久磁石回転子を手でゆっくりと回転させながら、設置したホールセンサで磁場を測定した。実験 2~4 に関しては、それぞれ 40~100 Hz の範囲において 10 Hz 刻みの回転周波数で永久磁石を回転させ、設置したホールセンサで磁場を測定した。

3. 結果と考察

Fig. 3 に、50Hz の回転磁界印加時にコイル中心部のホールセンサで観測した磁場波形と、永久磁石回転子が定常状態においてつくる磁場分布を対応させた波形との比較を示す。実験結果の静磁場波形から、永久磁石回転子がつくる静磁場は振幅約 0.17T の回転磁界を作り出している。回転周波数が 50Hz の回転を加えた場合の磁場波形は定常時と非常に近い値を取ることがわかった。

観測される磁場の周波数依存性を評価するために、90Hz における同様な比較結果を表したグラフを Fig. 4 に示す。Fig. 3 と Fig.4 から、回転周波数が高くなるにつれて、観測される磁場の振幅が大きくなっていることが確認できる。このような結果が得られた理由としては、回転周波数が大きくなるにつれて、クライオスタットやセカンドステージに誘導される渦電流の大きさが大きくなり、その渦電流によって生じる磁場が大きくなったためであると考えられる。

4. まとめ

永久磁石回転子を使った交流損失測定において、ホールセンサを使って渦電流の影響を調べたところ、周波数が高くなると、渦電流によって発生する磁場が無視できない程度に大きくなるのが明らかになった。今後はこの磁場が交流損失測定に与える影響とその低減方法を検討する予定である。

参考文献

- [1] Y. Terao, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no. 5, 2023, Art. no. 3600305

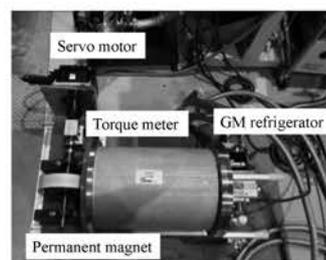


Fig. 1 AC loss measurement equipment using PM rotor

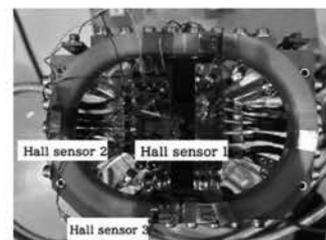


Fig. 2 Hall sensors placed on the coil bobbin

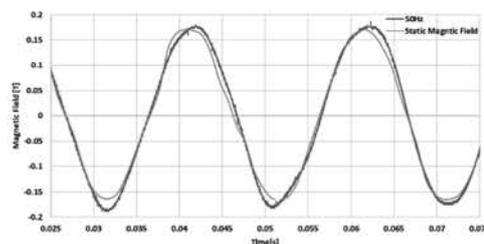


Fig. 3 Comparison of measurement waveforms (50 Hz)

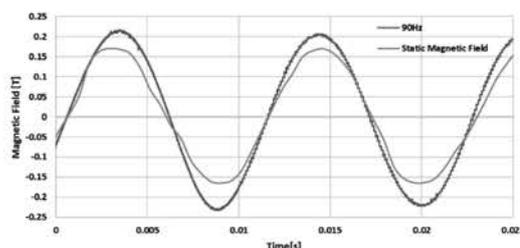


Fig. 4 Comparison of measurement waveforms (90 Hz)

REBCO 転位並列導体で構成したレーストラック型電機子コイルの同期モータ環境下における電流分流特性

Current Distribution Characteristics in Armature Racetrack Coils Composed of Four REBCO-Parallel Conductors under Magnetic Field Environment of a Synchronous Motor.

木村 優大(九大), 川崎剛輝(都城高専), 石原昌幸, 井上智博,
三浦峻, 宮崎寛史(九大), 川越明史(鹿大), 岩熊成卓(九大)

KIMURA Yudai, KAWASAKI Goki, ISHIHARA Masayuki, INOUE Tomohiro,
MIURA Shun, MIYAZAKI Hiroshi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ); KAWAGOE Akihumi (Kagoshima Univ)
E-mail: kimura.yudai.828@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

大電流化に向けて転位並列導体を用いた超伝導電機子コイルは、テープ状線材の積層順を巻線過程で入れ替えることで素線間の鎖交磁束を打ち消し、偏流を低減できる点で優れている。我々はこれまで、変動磁場環境下でも電流分流を均一化するため、3 並列と 4 並列において同相間で対称となる転位手法を提案し、単相および三相における転位の有効性を実験的に明らかにした[1]。実際の同期モータ環境下では、電機子コイルの自己磁場や他相からの磁場だけでなく、界磁の磁場の影響も受ける。本研究では界磁に 2 極のネオジウム磁石を使用した回転機の電流分流を解析し、転位並列導体の有効性を評価した。

2. 検証方法

本研究では、有限要素法を用いて電流分流解析を行った。Table. 1 に解析モデルの諸元、Fig. 1 に今回使用した電機子と界磁の配置図および巻線転位構造を示す。

3. 結果及び考察

Fig. 2 に、(a) 転位を導入していない (b) 転位を導入した 3 並列導体の界磁がある場合と無い場合における電流分流のターン数依存性を示す。Fig. 2(a)より、ターン数が少ない場合、界磁の磁場の影響で I_A および I_C が大きく偏流した。 I_B については、同相間で対称性が保たれていることから、界磁の有無による影響はなかった。一方、Fig. 2(b)より、転位がある場合は界磁の有無による電流分流の変化は見られず、これは、同相間で対称となる転位により界磁からの鎖交磁束を打ち消したことで界磁の影響を受けなかったと考えられる。以上のことから、界磁の有無に関わらず、同相間で対称な転位が有効であることが示唆される。今後は、この結果を基に実験的に検証を進める。

参考文献

1. S. Miura, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 34(2024) 5200905

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP24K07433 および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受けて実施したものである。

Table. 1 Specifications of armature coils and field magnet

Parameter	Characteristic/Value
Coil configuration	Racetrack coil
Winding method	Double-pancake winding
Number of parallel Conductor	3
Number of double-pancake for one coil	1
Total turn number	4 ~ 32
Armature inter-phase distance	150 mm
Air gap length	15 mm
Surface magnetic field of the field	0.40 T
Magnetic field from the field on the armature surface	0.17 T

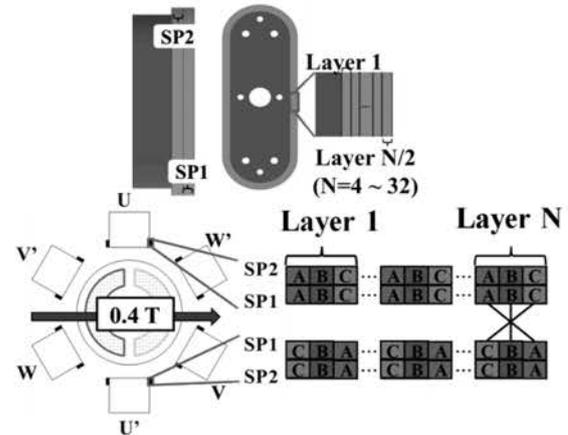


Fig. 1 Layout of armature and field magnet and transposition configuration of the three-strand parallel conductor

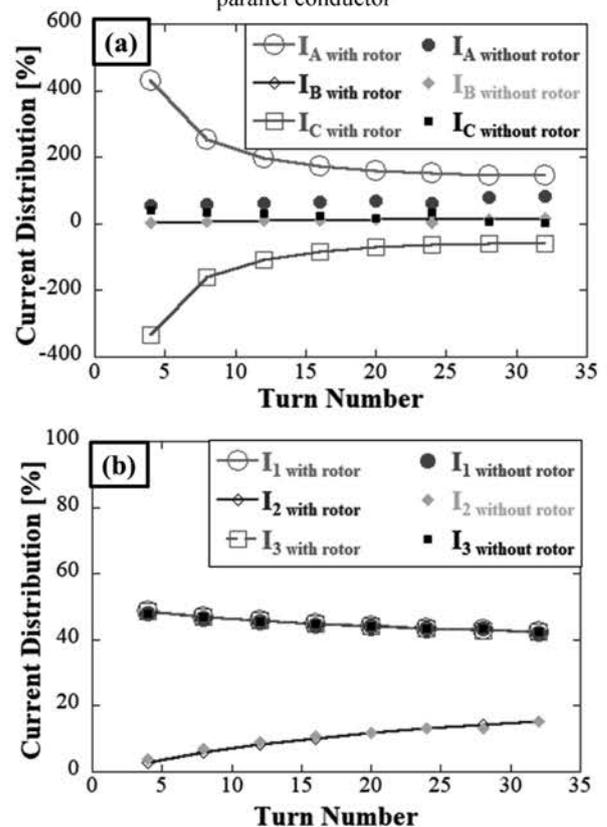


Fig. 2 Analytical results of the dependence of the current distribution ratio at a frequency of 200 Hz with rotor and without rotor (a)without transposition (b)with transposition.

非線形電流輸送特性の磁場ベクトル依存性を考慮したかご形誘導モータにおける高温超伝導ロータバーの精密設計

Precise Design of High Temperature Superconducting Rotor Bars in Squirrel-cage Induction Motor Considering Magnetic Field Vector Dependence of Nonlinear Current Transport Property

山本 真嘉, 中村 武恒(京大)

YAMAMOTO Masayoshi, NAKAMURA Taketsune(Kyoto University)

E-mail: yamamoto.masayoshi.78s@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

二酸化炭素排出量の削減という社会的動向の中で、輸送機器の電動化が進められている。超伝導モータは、高出力密度と高効率という特性から積極的に研究が進められており、特に航空機の電動化に伴い、推進システム用超伝導モータの開発が活発に行われている。

本研究室では、高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction / Synchronous Motor, HTS-ISM) の研究を進めている。HTS-ISM は、回転子巻線に高温超伝導線材を用いた超伝導モータの一種であり、従来の誘導モータの単純な構造を踏襲している。

先行研究では、自己組織化設計法を用いた航空機駆動用 20 MW 級 HTS-ISM を設計し、有限要素法による非線形電磁界解析を通じて、最大効率 97.1%、最大出力密度 33.4 kW/kg を達成した。[1,2] 効率改善の大きな要因として、磁束密度の空間高調波成分が従来の二分布巻きモデルから減少したことによる超伝導線材の交流損失の低減があげられる。一方で、航空機駆動用超伝導モータには、冷却機構への熱負荷低減の観点から、さらなる高効率化が求められている

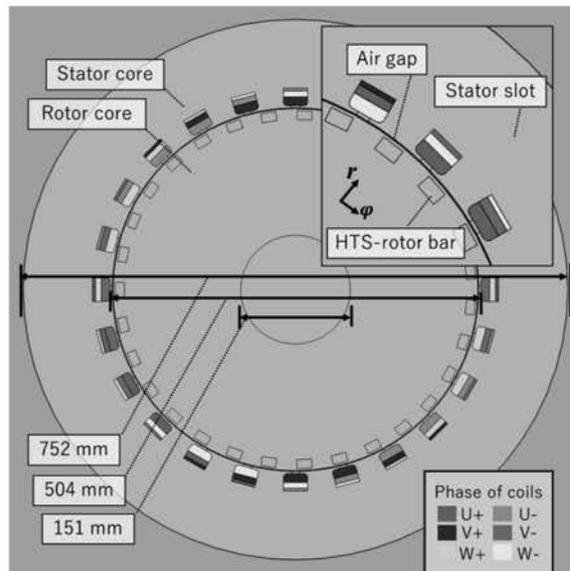


Fig. 1. Designed 20 MW-class HTS-ISM

2. 概形、固定子及び回転子の設計手法

220 人乗り電動航空機駆動用超伝導モータとして必要とされる 20 MW 級モータの設計に際し、モータの出力方程式に基づく基本的概形の設計を行った(式1)。

$$P_m = D^2 L A B N \quad (1)$$

P_m 機械出力, D ロータの直径, L モータの有効軸長, AC 電気装荷, B 磁気装荷, N 回転速度

高効率が要求される航空機駆動用超伝導モータの設計に際し、滑らかな正弦波状回転磁界の生成が必要であるという見解から、固定子は自己組織化設計法を用いた設計を行った。回転子については、議論の単純化のため、REBCO 線材を用いたロータバーによる単純な設計とした。また、磁場角度依存性による損失の影響を観測するため、超伝導ロータバーの径方向に対するc軸の結晶方位 θ を変化させた数種類のモデルを作成した。

3. 解析手法

有限要素法による電磁界解析によってシミュレーションを行った。解析ソフトウェアは COMSOL Multiphysics を使用した。超伝導領域を含む回転子領域を H 法、その他の領域は A 法で計算する AH 法によって解析を行った。

4. HTS-ISM の超伝導ロータバーにおける損失

各モデル間で超伝導線材における損失を解析した結果、ロータの回転周期の 1/2 に対応する損失のリップルが生じていることが確認された。(Fig. 2.) また、結晶方位を 90 度回転させたモデルでは、損失リップルの発生タイミングが変化することが確認された。この現象から、かご型超伝導誘導モータにおける REBCO 線材の角度 θ によって交流損失を低減させる可能性があることを示した。加えて、交流損失を低減するロータバーの設計について提案を行う。

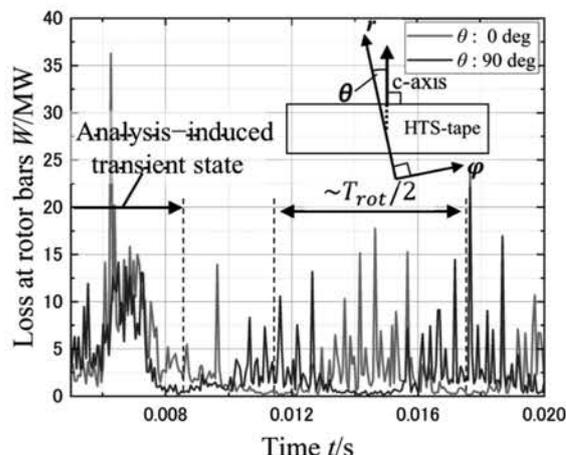


Fig. 2. Loss in superconducting rotor bars (θ : angle between the radial direction and the c-axis)

参考文献

1. T. Nakamura and Y. Kido, Self-Assembling Design Method of Stator Slots for AC Rotating Machines, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 20(2024), DOI:10.1002/tee.24213,579-588, <https://doi.org/10.1002/tee.24213>.
2. M. Yamamoto and T. Nakamura, Electromagnetic design and performance analysis of a 20 MW-class high temperature superconducting induction/synchronous motor for electric aircraft applications using a self-assembling design method, Phys. C, Volume 632(2025), 1354690, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2025.1354690>.

超伝導線材とハルバッハ配列永久磁石を用いた磁気浮上工具の有限要素法による電磁界解析

Electromagnetic field analysis of Superconductive Assisted Machine using superconducting tape and Halbach array by FEM

清水 拓真, 小田部 荘司, 鈴木 恵友, 山本 颯真

SHIMIZU Takuma, OTABE Edmund Soji, SUZUKI Keisuke, YAMAMOTO Soma

E-mail: shimizu.takuma258@mail.kyutech.jp

1. 緒言

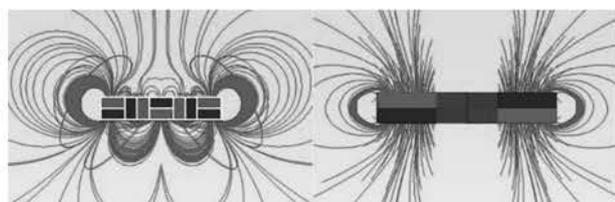
中空加工技術では、部品形成時間の長さによる生産性の低さや、加工の難しさが課題となっている。その解決策の1つとして、主に超伝導バルクと永久磁石で構成されている磁気浮上工具に注目している[1]。超伝導バルクの性能向上の一方で、近年は超伝導体の線材化の研究が進み、高性能な線材が開発されている。また、従来の研究では、リング状の片側4極永久磁石と、超伝導バルクもしくは超伝導線材が用いられていたが、超伝導バルクでは軽量化が難しく、超伝導線材では強い反発力を得ることが困難であるという問題があった。コンパクトさと強い反発力を両立するためには、永久磁石に対する工夫が必要であると考え、本研究では、5つの棒状の永久磁石をハルバッハ配列に並べ、超伝導線材を用いたモデルと、従来のリング状の片側4極永久磁石と超伝導線材を用いたモデルの2種類を用いて電磁界解析を行い、コンパクトで強い反発力を得る方法を調べた。

2. 解析方法・モデルの詳細

本研究ではこの磁気浮上工具の基本的な電磁界解析として、シミュレーションソフトJMAG-Designer 23.1で有限要素法(FEM)を用いて磁気浮上工具の解析を行った。

GdBa₂Cu₃O_{7-δ}超伝導線材のサイズは長さ72mm、幅12mm、厚さ2μmで、1層に6枚使用し、積層する際は超伝導線材の下に100μm間隔で上の層と同様な層を作成する。

Fig. 1は(a)がハルバッハ配列、(b)がリング状片側4極磁石であり、それぞれの磁束線と磁石の配列を表したものである。ハルバッハ配列を用いたモデルをハルバッハモデル、リング状片側4極磁石を用いたモデルをリングモデルと称する。また、永久磁石の寸法について、ハルバッハモデルでは長さ70mm、幅8mm、厚さ8mmのものを5つ使用し、リングモデルでは内径20mm、外径51mm、厚さ10mmのリング状片側4極ネオジム磁石を使用した。どちらの永久磁石も磁石表面での磁場を450mTとし、永久磁石を超伝導線材1層目の上部10mmにて着磁を行い、永久磁石を超伝導線材方向に10mmから1mmまで移動させ、発生する超伝導線材から永久磁石への反発力を1mmごとに計算した。



(a) Halbach Model

(b) Ring Model

Fig. 1 Magnetic flux line distribution diagrams for the two models.

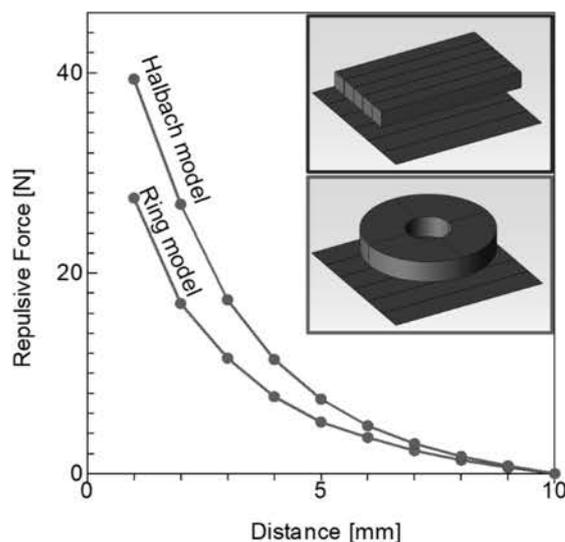


Fig. 2 Comparison of repulsive force from 10mm to 1mm magnetization distance in two models.

3. 結果および考察

超伝導線材層が10層におけるハルバッハモデルとリングモデルのFEMによる反発力の計算結果をFig. 2に示す。グラフより、全体的にリングモデルよりもハルバッハモデルの方が、より大きな反発力を得られていることがわかる。これは磁束密度の空間変化 $\frac{dB}{dz}$ がハルバッハモデルのほうが大きいため、反発力が大きくなったと考えられる。

また、ハルバッハモデルにおいて12本の超伝導線材を使用し配置の変更のみで反発力の比較を行ったところ、1層あたり4本の3層のモデルのほうが1層あたり6本の2層のモデルより大きな反発力を得ることができた。

4. 結言

本研究では、永久磁石と超伝導線材から構成される磁気浮上工具で、より大きな反発力を得ることを目的として、リングモデルとハルバッハモデルにおいてFEMを用いた電磁界解析によって反発力の比較を行った。結果より、リングモデルよりもハルバッハモデルの方がより大きな反発力を得られることが分かった。

また、使用する超伝導線材の本数が同じであっても、配置箇所の変更によって得られる反発力が変化するということが分かった。

今後の課題としてはより小さい磁石で同等な反発力を得られるモデルの考案や、最適な超伝導線材の配置、永久磁石を超伝導線材から遠ざけるように動かした場合での引力の計算を行う。

参考文献

1. Y. Kinoshita, et al.: J. Phys. Conf. Ser. 1590(2020) 012023

極低温下における半導体素子の導通特性

Conduction Characteristics of Semiconductor Devices at Cryogenic Temperatures

増田 光希, 許 航, 野村 新一 (明治大); 力石 浩孝 (NIFS)

MASUDA Mitsuki, XU Hang, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); CHIKARAISHI Hiroataka (NIFS)

E-mail: ce251078@meiji.ac.jp

1. はじめに

核融合などに使用される超電導コイルの電源には高磁場形成のため数十 kA 程度の非常に大きな電流容量が要求される。そのため、電力変換器に使用されている半導体素子部分の発熱も非常に大きなものとなり、冷却スペースを含めた電源設備全体は超電導コイル本体よりも大容積化するという問題点がある。したがって本研究では、電力変換器を超電導コイルとともに冷却することを想定し、極低温下において低損失ひいては小容積となる半導体電力変換器の開発を目的とする。MOSFET は低温下でオン電圧降下が低下することが先行研究 [1] により確認されているが、本研究では超電導コイル励磁用電源としての運用を想定しているため、使用される半導体素子には逆阻止能力が求められる。そのため、本実験では Si-MOSFET に加え逆阻止能力を有する Si-PN 接合ダイオード (PND)、Si-ショットキーバリアダイオード (SBD)、Si-IGBT の極低温下における導通特性を報告する。なお著者は逆阻止能力を有する IGBT (RB-IGBT) は低温下でオン電圧降下が非常に大きいため適さないことを確認している [2]。

2. 実験方法

低温測定においてチップの発熱による電流電圧特性の変化を抑制するため、立ち上がり、立ち下がり 0.5 秒の三角波電流を 1 秒間 1 cycle 通電し、オン電圧降下を測定する手法を用いて測定を行った。また低温では赤外線放射温度計が使用できないため、 $\phi 0.1$ mm の K 型熱電対をパッケージ部分にカプトンテープで固定し接触させることで温度を測定した。

3. 各半導体の極低温における導通特性

PND, SBD, MOSFET, IGBT について、室温 (R.T.), 200 K, 液体窒素 (LN_2) 中における電流電圧特性を Fig. 1, 2, 3, 4 に示す。MOSFET は室温から液体窒素温度にかけての温度範囲でオン抵抗の低減が確認された。これは素子が冷却されることで格子振動が抑制されたからであると考えられる。PND, SBD では接合電位の上昇により立ち上がり電圧が上昇したが、SBD は低温にかけて立ち上がり後の傾きが大きくなり、格子振動の抑制による導電率の上昇が見られ、理想ダイオードのような特性を示す。IGBT は室温から 200 K にかけて立ち上がり電圧の上昇、導電率の上昇が見られたが液体窒素温度になると導電率が急激に低下した。これは半導体内のキャリアが凍結したことによるものであると考えられる。

4. まとめ

本研究では半導体素子の極低温下における導通特性について測定を行った。先行研究と同様に MOSFET においてはオン電圧降下の低減が確認された。PN 接合やショットキー接合の存在する半導体素子はその接合電位が上昇することによる立ち上がり電圧の上昇が見られたが、同時に導電率も上昇した。特に SBD は低温下においてオン電圧降下が約 0.7 V で一定となるため所定の電流容量に対し並列数を変化させても損失は変化しない。測定結果から低温下で逆阻止能力を持たせる場合は PN 接合ではなくショットキー接合が適していると考えられ、MOSFET に SBD を直列接続することで逆阻止能力を持たせるとともに、MOSFET の導電率の上昇と SBD の立ち上がり電圧の上昇のバランスにより常温、低温動作のどちらが適しているのかが決まる。

測定にはディスクリット型半導体を用いたため半導体素子内のボンディングワイヤなど半導体チップ以外の部分の導電率の変化が測定に影響を及ぼしている可能性もあり、検討が必要である。今後は冷凍機冷却を用いた液体窒素温度以下の温度領域での導通特性を測定するとともに SiC, GaN などのワイドバンドギャップ半導体についても同様に測定を行う。

参考文献

1. 伊瀬 敏史, *et al.*: 電力用半導体素子と MOSFET 電力変換装置の極低温動作特性, パワー・エレクトロニクス研究会論文誌, 27 巻, 2 号 (1990) pp.125-133
2. 増田 光希, *et al.*: 逆阻止型 IGBT の極低温冷却下の導通損失評価, 令和 7 年 電気学会全国大会概要集, 7-043

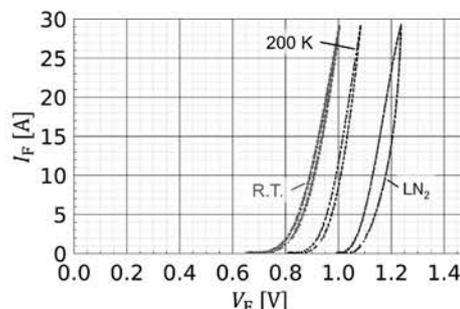


Fig. 1 I-V characteristics of PND (S30V60T) with triangular wave current at various temperatures ($I_{Fmax} = 30$ A $V_{RRM} = 600$ V) .

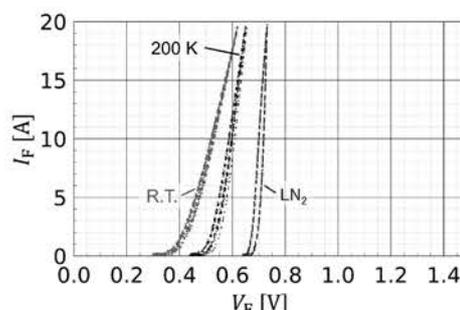


Fig. 2 I-V characteristics of SBD (SG20JC6M) with triangular wave current at various temperatures ($I_{Fmax} = 20$ A $V_{RRM} = 60$ V) .

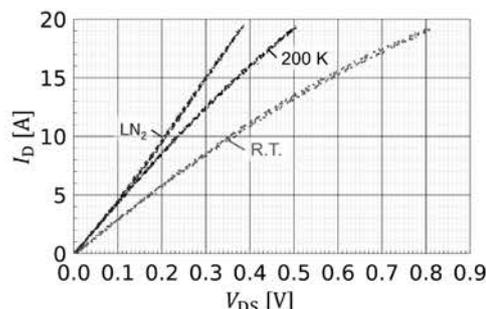


Fig. 3 I-V characteristics of MOSFET (IRL2703PbF) with triangular wave current at various temperatures ($I_{Dmax} = 24$ A $V_{(BR)DSS} = 30$ V $V_{GS} = 5$ V) .

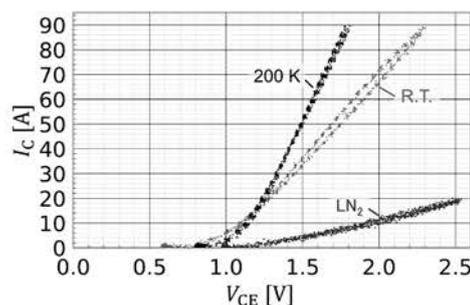


Fig. 4 I-V characteristics of IGBT (IGW50N60H3) with triangular wave current at various temperatures ($I_{Cmax} = 100$ A $V_{(BR)CES} = 600$ V $V_{GE} = 20$ V) .

円形流路断面を持つ電磁力型海水・油分離装置の構造と分離実験 Structure of Lorentz-force-type seawater-oil separator with circular channel cross-section and its evaluation

白石 浩貴, アモリン ケンジ, 青山 陽志, 秋田 有輝, 浅野 晃平, 岩本 雄二, 赤澤 輝彦 (神戸大)
SHIRAISHI Koki, AMORIM Kenji, AOYAMA Yoji, AKITA Yuji, ASANO Kohei, IWAMOTO Yuji
AKAZAWA Teruhiko (Kobe Univ.)
E-mail: 242w519w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

電磁力型海水・油分離装置では海水が流れる流路に電磁場を印加する。このとき、電解液である海水と不動体である油に作用する電磁力の違いを利用し、海水と油を分離する。先行研究では、電磁場が海水に作用する分離空間の流路断面形状が矩形となる分離器が用いられていた。本研究では、分離空間の流路断面形状が円形となる分離装置を考案し、その分離性能を実験的に評価した。

2. 分離の原理と構造

Fig.1 に流路断面が矩形である従来型の分離器の分離空間の流路断面を示す。磁場 H は一樣に断面手前から後方に印加される。また、対向する電極板により海水には磁場と垂直な方向に通電が行われる。分離空間の海水にはローレンツ体積力 F_L が作用し、油には海水から分離力 F_S が作用する。分離空間後方に仕切板を設置し流路を左右に2分割することで、油が濃縮した流れと海水が浄化された流れに分けることができる。Fig.2 は円形流路断面をもつ分離器の分離空間での流路断面である。 H は一樣に断面手前から後方に印加される。流路の中心軸を中心とする円弧状の電流を海水に通電するために電極板を絶縁体でできた扇形柱の半径平面に取り付ける。また、電極間の短絡を防ぐために流路の中心軸に沿って中心軸を同じくする絶縁円柱棒を設置している。これにより海水には中心軸から放射状に F_L が作用し、油はその逆方向に F_S を受ける。分離空間後方に流路円筒と中心軸を同じくする仕切り円形パイプを設置すると、油が濃縮した仕切りパイプ内側流れと、仕切りパイプ外側を通る浄化した海水流れに分離することができる。本研究で作製した分離器は直径 36mm の円形流路断面を持ち、電極の短絡を防ぐ絶縁円柱棒の直径は 5mm、電極を支持する絶縁扇形柱の中心角は 45° となっている。電極板の流路方向の長さは 200mm である。分離空間の後方には内径 21.2mm、外径 25.2mm の仕切りパイプを設置した。

3. 実験方法

平均流速 $u = 0.1\text{m/s}$ で分離器に海水を流し、電極間電流 I を 1A に固定した。また、 H が正のとき分離空間の海水に中心軸から外向きの F_L が作用するように磁場印加の向きを決めた。このとき仕切りパイプ内側海水排出量 Q_{in} と外側排水量 Q_{out} を磁場ごとに計測した。排出海水流量の偏り R_w を式(1)を用いて評価した。

$$R_w = \frac{Q_{in}}{Q_{in} + Q_{out}} \quad (1)$$

本研究では分離対象物としてトビウオの卵（直径約 2mm）を用い仕切りパイプ内側から排出される個数 N_{in} と外側から排出される個数 N_{out} を計測した。分離率 S を式(2)を用いて評価した。

$$S = \frac{N_{in}}{N_{in} + N_{out}} \quad (2)$$

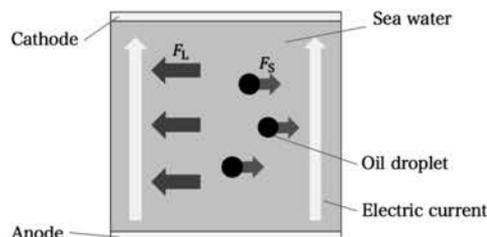


Fig.1 Cross-sectional view of a rectangular channel separator.

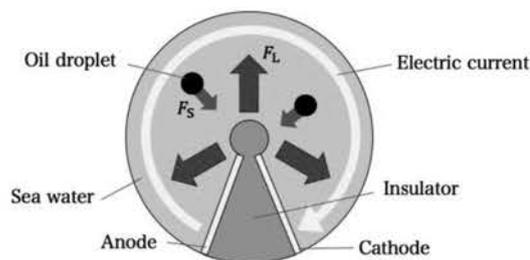


Fig.2 Cross-sectional view of a circular channel separator.

4. 実験結果

Fig.3 に R_w および S の H 依存性を示す。 H が大きくなるにつれて R_w は単調に減少する。このことは分離空間に発生する F_L が H 増大とともに大きくなり、分離空間出口での流路断面内側と外側の圧力差が増大するため、仕切りパイプ外側を流れる海水流量が増すためと考えられる。一方、 S は、 H が正の領域で、 H の増大とともに急速に増加し、2T 以上でほぼ全ての卵が内側流路から排出されることが分かった。円形流路断面をもつ分離器でも海水から不純物の分離が可能であることが実験的に示された。ただし、 H が負の領域の S の H 依存性からは、外側流路に卵を濃縮することは、内側に濃縮するよりも不利であることを示唆している。従来型の矩形流路断面をもつ分離器では2つの出口のどちらにも卵を濃縮しても差が生じなかったことと大きな特性の違いが生じており、この原因について明らかにする必要があると考えている。

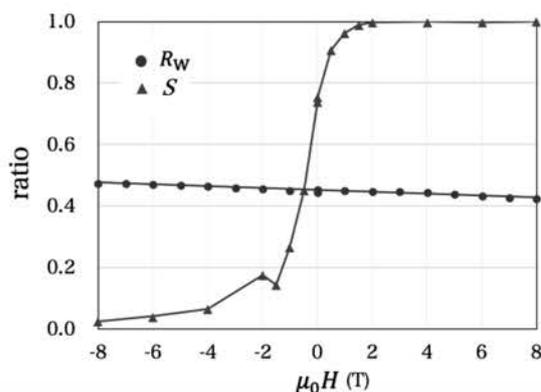


Fig.3 H dependencies of R_w and S .

高温超電導応用分野における有限要素電磁界解析の適用性について

Applicability of the Finite Element Analysis to High-Temperature Superconducting Applications

渡辺 陽平, 片桐 弘雄, 佐野 広征, たに 浩司, 山田 隆 (JSOL)

YOHEI Watanabe, HIROKATSU Katagiri, HIROYUKI Sano, KOJI Tani, TAKASHI Yamada (JSOL)

E-mail: yohei.watanabe@jmag-international.com

1. はじめに

高温超電導応用分野において有限要素電磁界解析は設計手法の一つとして期待されているものの、その適用が困難と考えられてきた。その理由は、高温超電導分野の設計課題である熱的・機械的な安定性評価にはテープ状の超電導線材のモデル化が必要となり計算負荷が増大することや、熱・構造・運動との連成解析への対応が必要になるためである。

一方、有限要素電磁界解析はモータや変圧器の設計現場では実用化されており、詳細な損失解析を目的として数百万以上の大規模計算が行われている。それに対して並列計算の技術開発も進み、高い並列化効率が実現されている。また運動・熱・構造連成解析も設計に活用されている。

本報告では、高温超電導アプリケーションとして無絶縁 REBCO コイルを取り上げ、有限要素電磁界解析の解析結果と計算コストについて報告する。

2. 有限要素法による超電導電磁界解析

超電導体を含む電磁界解析として以下の基礎方程式を解く。

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

ここで \mathbf{A} は磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ は電気スカラーポテンシャル、 ν は磁気抵抗率、 σ は電気伝導率、 \mathbf{J}_s は強制電流密度をあらわす。超電導体の電気伝導率 σ は N 値モデルでモデル化する。電気伝導率は電界、磁束密度に依存し式 (1) は非線形となるため Newton Raphson 法を用いて計算する。

3. 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの臨界電流特性解析

高温超電導応用分野における有限要素電磁界解析の性能評価のために無絶縁 REBCO パンケーキの臨界電流の解析を行った。文献 [1] で示されているパンケーキコイルをモデル化し、示されている実測データとの比較をおこなった。表 1 に REBCO パンケーキコイルの仕様を示す。

解析モデルの妥当性を確認するために超電導状態での解析を行った。図 1 に超電導状態での電流・電圧特性を示す。低電流域では超電導状態で電圧が上昇せず、高電流域で臨界電流に近づくにつれ抵抗があがる傾向が再現できている。

次に局所的常電導転移モデルの解析を行った。局所的常電導転移モデルとして REBCO テープの 1 要素の電気伝導率を銅にして解析を行った。超電導状態の解析では周方向均一の仮定が適用できモデル規模を削減することができるが、局所的常電導転移の場合は仮定を設けることができずモデル規模が大きくなる。そこで並列計算を行い計算時間の短縮をはかった。

図 2 に電流・電圧特性を示す。絶縁コイルでは電圧が上昇してしまうのに対して無絶縁で電流が迂回して線形的な電圧増加が起きていないことが確認できる。図 3 に Cu 層断面、図 4 に REBCO 径方向の電流密度分布を示す。常電導転移しているターンの隣接ターンに Cu 層を通して電流が迂回していることが確認できる。

本モデルの規模は 2.8M 要素、40 ステップとなる。表 2 に並列数と計算時間を示した。

4. まとめ

超電導応用分野における有限要素電磁界解析の性能を評価するために無絶縁 REBCO パンケーキコイルの臨界電流特性解析を行った。結果として実測臨界電流を再現し、局所的常電導転移解析の 2.8M 要素モデルに対して 24 並列であっても 10 時間程度で計算できることを確認した。

Table 1. Specification of REBCO pancake coil

REBCO thickness	20 μm
REBCO width	6.00 mm
Index-n value	17.86
Critical current	76.89 A
Critical current density	6.407e8 A/m ²

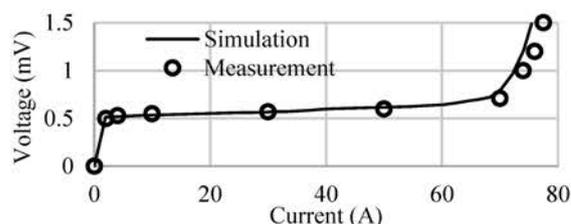


Fig. 1. REBCO double pancake current-voltage curve

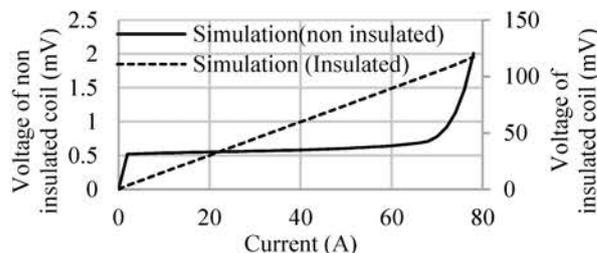


Fig. 2. Current and voltage characteristics of non-insulated coils during local normal conduction.

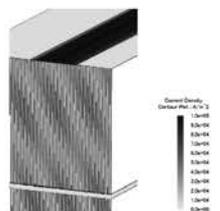


Fig. 3. Current distribution of Cu layer

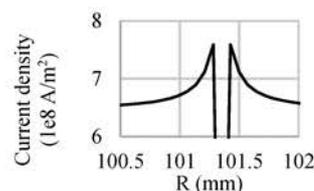


Fig. 4. Current distribution of REBCO (radial direction)

Table 2. Number of cores and calculation time

Number of cores	Calculation time(hour)
24	9.88
64	3.46
128	2.72

参考文献

- J. Lee, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 33 (2023) p.1-4

YbBCO 中間層による REBCO 線材間超伝導接合の作製

Fabrication of superconducting joints connecting REBCO tapes using YbBCO intermediate layer

加藤 志織, 千野 好輝, 佐野 優太, 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)

KATO Shiori, CHINO Yoshiki, SANO Yuta, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

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

E-mail : c5624046@aoyama.jp

1. 緒言

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE: 希土類元素) 超伝導体は、90 K 級の高い T_c と磁場中における高い J_c を持ち、そのテープ線材である Coated Conductor は強磁場発生用のコイルや超伝導ケーブルなど様々な用途での応用が進められている。永久電流運転が可能な NMR や MRI 用の超伝導磁石システムの開発には、REBCO 線材間の汎用性の高い超伝導接合技術の確立が不可欠である。intermediate Grown Superconducting (iGS) 法^[1] は初の実用的な REBCO 線材間接合技術であり、GdBCO 線材間の高 J_c 接合が報告されている。しかし、接合中間層のエピタキシャル成長には約 800°C に昇温する必要があり、様々な製法、構成の市販 REBCO 線材間の超伝導接合が可能な汎用技術とするには接合中間層形成温度の低下が好ましい。YbBCO は REBCO のなかでも比較的包晶温度が低いことが知られている。よってエピタキシャル薄膜の成長温度の低下が予想され、YbBCO を接合中間層に用いることにより金属基板上のバッファ層表面の酸化物と REBCO 層の反応を抑えた条件下での良好な超伝導接合形成が期待できる。以上の背景のもと、本研究では YbBCO 薄膜を接合中間層とした低温焼成による YBCO 線材間接合の作製を試みている。

2. 実験方法

2 本の Faraday Factory Japan 社製 YBCO 線材の銀保護層を除去した部分に Yb : Ba : Cu = 1 : 2 : 3 の仕込組成で調製したフッ素を含まない有機酸塩溶液をスピコート法により塗布後、仮焼により有機酸塩を分解した。続いて、炭酸バリウム由来の炭素除去のため酸素気流中 700°C, 3 h で前熱処理を行った。その後、両線材の YbBCO 膜が向かい合うように重ね、銀箔に封入後、治具で固定し、本焼成、酸素アニールを行い接合試料を作製した。得られた試料に対して XRD による結晶性評価、SEM による微細組織観察を行い、接合部をまたぐ通電特性は交流四端子法による抵抗率測定、直流四端子法による I - V 測定により調べた。

3. 結果と考察

YBCO 線材上に作製した YbBCO 薄膜の表面 XRD パターンを Fig. 1 に示す。いずれの試料においても鋭い 00 l ピークが見られ、比較的低温の焼成で高い結晶性を有する YbBCO 薄膜が生成することを確認した。貼り合わせた線材を治具で固定し $P_{O_2} = 10$ Pa (O₂/Ar), 740°C, 1 h の条件で本焼成した接合試料の接合部をまたぐ電気抵抗の温度依存性を Fig. 2 示す。転移はやや鈍いものの装置の 80 K 以下で測定限界である 10^{-7} Ω 台の低い抵抗を示した。

講演では、焼成条件が異なる接合試料の電気抵抗の温度依存性、および溶液の調製方法を変えスピコート法ではなく溶液を塗布、乾燥させて中間層を作製した接合試料の通電特性を調べた結果についても報告する。

参考文献

[1] K. Ohki et al., *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 115017

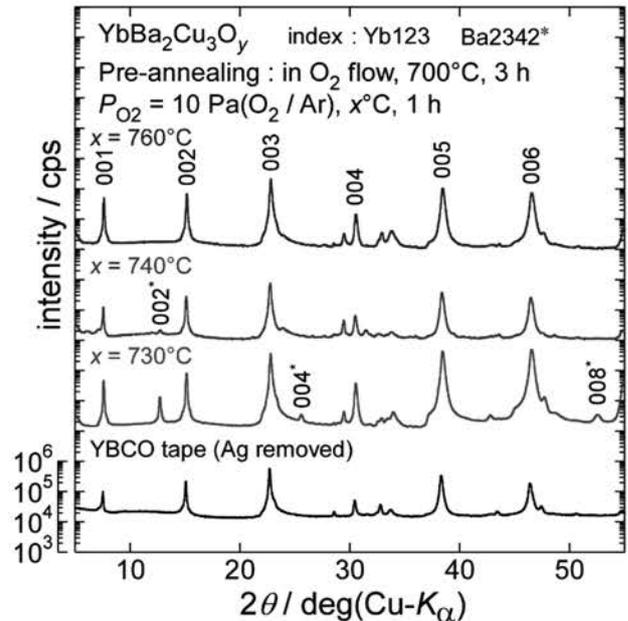


Fig. 1 Surface XRD patterns of FF-MOD processed YbBCO thin films on YBCO tapes sintered under various temperatures.

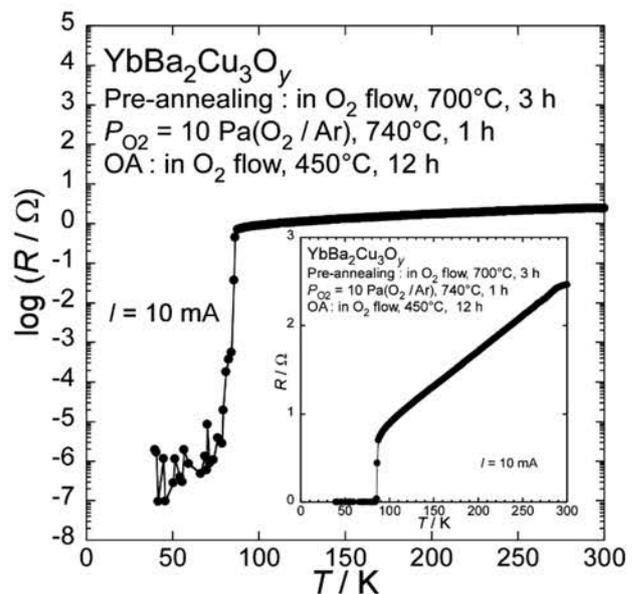


Fig. 2 Temperature dependence of the joint resistivity between YBCO tapes via YbBCO intermediate layer.

EuBCO 線材の超電導接続技術と接続抵抗評価

(1) 超電導粉末を用いた接続構造の作製・評価

Superconducting joint and joint resistance evaluation for EuBCO tapes

(1) Fabrication and evaluation of joint structures using superconducting powder

江口 朋子, アルベサル 恵子 (東芝); 武田 泰明, 西島 元 (NIMS)

EGUCHI Tomoko, ALBESSARD Keiko (Toshiba Corporation); TAKEDA Yasuaki, NISHIJIMA Gen (NIMS)

E-mail: tomoko.eguchi@toshiba.co.jp

1. はじめに

REBCO 線材は磁場中での臨界電流密度が高く、高磁場マグネットへの適用と実用化が期待されている。特に MRI や NMR 向けのマグネットでは、高い磁場安定性を得るために永久電流運転が必要であり、REBCO 線材の接続抵抗を $1 \times 10^{-12} \Omega$ 以下とし、超電導接続することが求められる。これまで住友電工と古河電工は、各自社製 REBCO 線材上に線材と同組成の接続層を液相法にて形成し、超電導接続を実現している [1,2]。さらに接続構造を組み込んだ超電導コイルにおいて、永久電流運転が可能であることを実証している [3,4]。

我々はこれまでに、フジクラ製 GdBCO 線材を用いた固定治具なしのコンパクトな接続構造にて、77 K で数十 A の臨界電流値 I_c が得られることを報告している [5]。本報告では、今般コイル開発に多く使用されている人工ピン入り EuBCO 線材を用い、固相と液相を併用した独自の接続構造を形成した。さらに超電導接続実証を目的とし、NIMS の接合抵抗評価装置にて電流減衰測定をおこない、四端子法では測定できない超低抵抗特性を評価した。

2. 実験方法

長さ 1 m のフジクラ製 EuBCO 線材(銅安定化層なし、FESC-S04)を 1 ターンのループ状とし、銀保護層を剥離した端部を後述のブリッジで接続した。ブリッジには EuBCO 線材(FESC-S12)を用い、銀保護層を剥離して露出した超電導層の表面に、接続層として TEP 社製 EuBCO 粉末と高純度化学社製 MOD 溶液(Eu:Ba:Cu = 1:2:3)とを混合したスラリーを塗布、仮焼した。仮焼済ブリッジとループの両端部を対向させ加圧治具に挟み、800℃以上で本焼後、酸素アニールをおこなった。接合抵抗評価装置にて、加圧治具をはずしたループ接続試料(Fig. 1)に誘導した電流の時間変化(減衰)を測定し、自己インダクタンスを $0.47 \mu\text{H}$ として接続抵抗を算出した。詳細な測定方法は 2A-a03 にて報告する。また接続断面を SEM にて観察した。

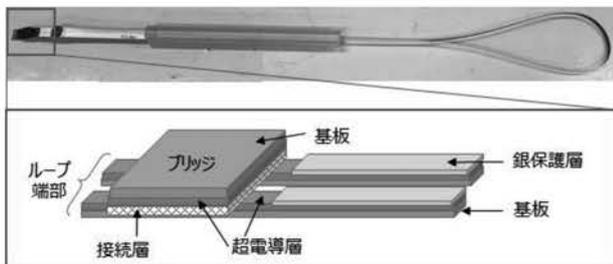


Fig. 1 Structure of a loop joint sample

3. 実験結果・考察

接続層に用いている EuBCO 粉末は、結晶性が高く超電導性に優れるものの焼結には 900℃以上の温度を必要とする。そこで本接続層は MOD 溶液を併用し、800℃前後で生成する MOD 由来の EuBCO 微粒子を介し、EuBCO 粉末同士、EuBCO 粉末と超電導線材の界面を接合し、固定治具なしで、

4 K まで冷却しても熱収縮による剥離がなく通電可能な接続強度を得た。ループ接続部分の断面 SEM 観察像を Fig. 2 に示す。接続層は多孔質構造で、効率的に酸素アニールをおこなうことができる。またスラリー塗布量を制御することで、接続層厚さを制御することも可能である。

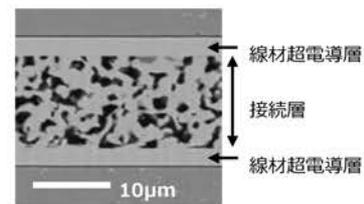


Fig. 2 A SEM image of cross section of a joint layer

ループ接続試料の 77 K 自己磁場での電流減衰測定結果を Fig. 3 に示す。誘導コイル電流 ICC を 0.07 A とした場合、ループ接続試料には約 12 A の電流が誘導され、3500-4000 s でのフィッティングから、接続抵抗 R_j は $2.3 \times 10^{-12} \Omega$ と算出された。また ICC 0.05 A で電流約 11 A の場合は、2000-4000 s でのフィッティングから R_j は $1.3 \times 10^{-14} \Omega$ と、非常に低い接続抵抗が得られた。さらに焼成条件を変えた試料では 4 K 自己磁場 80A 以上で $R_j \sim 10^{-15} \Omega$ となり、4 K から 77 K において、人工ピン入り EuBCO 線材で超電導接続を実証した。また短尺線材の接続試料では、77K で 40 A 以上の I_c (四端子測定、 $1 \mu\text{V}$ 基準) が得られており、今後さらなる I_c の向上に取り組む。

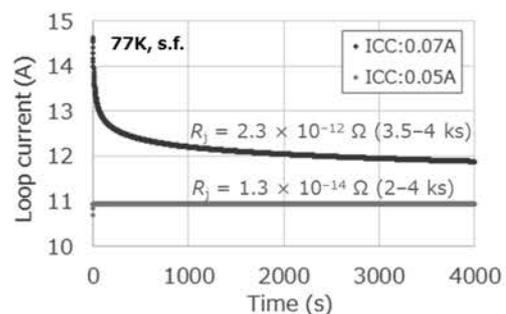


Fig. 3 Current decay measurement using a closed-loop sample

参考文献

1. K. Ohki, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 30 (2017) 115017
2. S. Mukoyama, et al.: J.Phys. Conf. Ser. Vol. 1054 (2018) 012038
3. Y. Yanagisawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 34 (2021) 115006
4. K. Takahashi, et al.: 低温工学 Vol.55 No.4 (2020) p.268
5. T. Eguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.131

EuBCO 線材の超電導接続技術と接続抵抗評価

(2) 閉ループ試料を使った電流減衰測定

Superconducting joint and joint resistance evaluation for EuBCO tapes

(2) Current decay measurements using closed-loop samples

武田 泰明 (NIMS); 江口 朋子, アルベサル 恵子 (東芝); 西島 元 (NIMS)

TAKEDA Yasuaki (NIMS); EGUCHI Tomoko, ALBESSARD Keiko (Toshiba Corporation); NISHIJIMA Gen (NIMS)

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

1. はじめに

永久電流運転のREBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE = rare earth) 超電導マグネットの実現にむけた超電導接続の研究開発が進んでいる[1]。我々は、超電導マグネットに実装しやすいコンパクト構造の超電導接続を目指して、フジクラ製 EuBCO 人工ピン入り線材間の接続技術の開発に取り組んでいる。本技術ではREBCO粉末とMOD溶液を混合したスラリーを使って線材間に接続層を作製する。これまでに、液体窒素浸漬下77 Kで31 A (1 μV 基準) の臨界電流 (I_c) を示す超電導接続を達成した[2]。この通電測定から77 Kでの低抵抗は実証されたものの、永久電流運転に必要な $10^{-12} \Omega$ 以下の抵抗は実証されていない。そこで本報告では、東芝で作製された超電導接続をもつ1ターンの閉ループ試料を使って電流減衰測定を行い、接続抵抗 (R_j) や接続臨界電流 (I_{cj}) を評価した結果について報告する。

2. 実験方法

1本のフジクラ製 EuBCO 人工ピン入り線材 (4 mm 幅, Cu 保護層なし) の両端を超電導接続した1ターンの閉ループ試料を使った。ループ直径は100 mm、自己インダクタンス (L) は $0.47 \mu\text{H}$ であった。NIMSの R_j 評価装置[3]により、4 Kおよび77 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。3500–4000 sにおける $I_{loop}-t$ を $I_{loop}(t) = I_{loop}(0)\exp(-R_j t/L)$ にフィッティングして R_j を評価した。また、 $I_{loop}-t$ から接続部電圧 $V_j = -L(\Delta I_{loop}/\Delta t)$ を $0.5\text{--}2 \times 10^{-8} \text{ V}$ の範囲で計算し、電圧基準 $V_c = 10^{-8} \text{ V}$ の I_{cj} を評価した[4]。使用した3試料の4 K 自己磁場での I_{cj} と R_j を Table 1 に示す。外部磁場は接続部のみに印加した。

3. 結果と考察

3試料の4 K 自己磁場における電流減衰測定結果を Fig. 1 に示す。銅コイルの電流値 (ICC: injection coil current) によって誘導される I_{loop} を制御した。いずれの試料でも電流の減衰が小さく、Table 1 に示す通り R_j が低いことが確かめられ、超電導接続が形成されていることがわかった。同じ条件で作製された#1と#2は同程度の I_{cj} と R_j を示し、再現性に優れることがわかった。作製条件を改善した#3はより高い I_{cj} を示した。

電流減衰測定を繰り返して調べた、#1と#3の4 Kにおける I_{cj} の磁場依存性を Fig. 2 に示す。磁場を0, 0.02, 0.05, 0.1 Tと増加させ、その後同様に減少させた。#1, #3ともに I_{cj} のヒステリシスが観測された。接続層が多結晶であることに由来して粒間の弱結合が顕著であることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は、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。

Table 1 I_{cj} and R_j at 4 K and self-field for three samples used in this study. R_j was obtained by fitting $I_{loop}-t$ at 3500–4000 s.

Sample	I_{cj} (A) @4 K, s.f.	R_j (Ω) @4 K, s.f.
#1	63	1.7×10^{-13} (62 A)
#2	65	1.8×10^{-13} (64 A)
#3	97	1.7×10^{-12} (92 A) 8.9×10^{-15} (81 A)

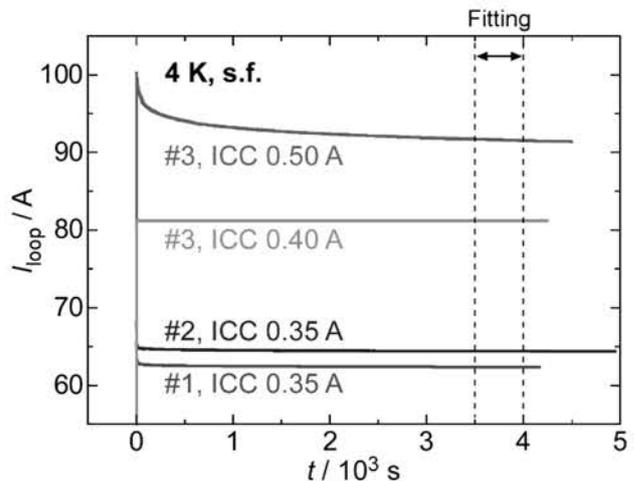


Fig. 1 Time dependence of loop current ($I_{loop}-t$) for three samples at 4 K and self-field. Data points at 3500–4000 s are used for fitting to obtain R_j . (ICC: injection coil current)

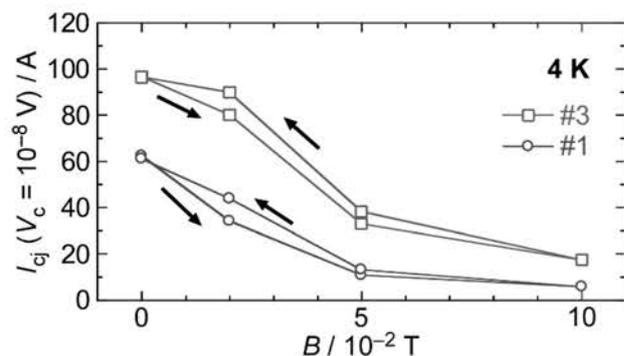


Fig. 2 Magnetic field dependence of I_{cj} for #1 and #3 at 4 K. Magnetic field was increased from 0 to 0.1 T and then decreased. I_{cj} in magnetic fields showed the hysteresis.

参考文献

- [1] Y. Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 043002.
- [2] T. Eguchi *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **106** (2023) 131.
- [3] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30** (2020) 9000204.
- [4] Y. Takeda *et al.*, *SuST* **36** (2023) 125010.

量産評価用ジョイントテスト装置の開発(Ⅲ) ～ループインダクタンスの算定・検証方法～

Development of joint test equipment for mass production evaluation Ⅲ -Calculation and verification method of a loop inductance -

横山 彰一(JASTEC)
YOKOYAMA Shoichi (JASTEC)
E-mail: syokoyam@jeol.co.jp

1. はじめに

NMR マグネットには 0.01ppm/h 以下の極めて高安定な磁場が求められており、この永久電流を実現するために各種の超電導線間は $1 \times 10^{-12} \Omega$ /箇所以下の超電導ジョイントを行っている。これまで量産機向けに超電導接続技術を確立するためのジョイントテスト装置を開発した(1,2)。このジョイントテスト装置では、超電導ジョイントを含めたループの電流減衰から接続抵抗を短時間で評価するが、その際にループインダクタンスの値が重要である。本報告では、これまでジョイントテストを実施したいくつかの試料のループインダクタンスについて算定と実測からの導出方法について述べる。

2. 量産評価用ジョイントテスト

NMR や MRI マグネットにはコイル線間の超電導ジョイントが多くある。これらの接続技術を確立するために作業者へのトレーニングや検定を実施している。NMR マグネットの使用線種は各線径に加え NbTi 線、Nb3Sn 線と現在 JST-MIRAI プロジェクトで開発中の REBCO 線、それぞれの各線間接続に多くの組み合わせがあることから、ジョイントテストを短時間で評価する必要がある。開発した量産評価用のジョイントテスト装置では低温超電導(LTS)線用で最大 8 個のジョイントを同時にかつ 2 回/週のインターバルで試験が可能である。また、REBCO 線間ジョイントテスト用ホルダも開発した(2)。さらに、REBCO-NbTi ジョイントのテストも可能である。

3. ジョイントテスト試料のループインダクタンス算定・検証

ジョイントテスト試料の構成は Fig.1 の回路図のようにジョイントを含んだメインのループと超電導線の一部を加熱することでスイッチングする永久電流スイッチ (PCS) でループを構成しており、PCS 部の両端にはんだ接続している電流導入端子を介して電流を印加した後に PCS を閉じて永久電流 I の変化 $\Delta I / \Delta t$ を測定し、(3.1)式よりジョイント抵抗 R_j を求める

$$R_j = \delta \cdot L \quad \delta = \Delta I / (I \cdot \Delta t) \quad (3.1)$$

R_j の導出にループインダクタンス L の値が必要になる。

L の算定は、円形 1 ターンコイル部と PCS 部の平行線部に分けて計算を行った。円形コイル部の直径 90mm、PCS 部の線長 54mm、間隔 20mm の場合、ループインダクタンス L は $0.39 \mu\text{H}$ と算定した。この値を検証するため、Fig.2 で示す通電手順のように、(A)の PCS が開で試料に通電した状態での蓄積エネルギー Q と(C)の PCS が閉で永久電流(PC)モードの Q から L_{pcs} の値と通電直後の電流 I_s と PC モードの電流 I_{pc} の比から L を求めることができる。Fig.3 の通電試験例から $I_{pc}/I_s=0.93$ となり、算定した $L_{pcs}=0.045 \mu\text{H}$ より、 $L=0.34 \mu\text{H}$ と見積もられ上記の算定値とほぼ同値が得られた。

この通電時 I_{pc}/I_s 比と L_{pcs} を用いて複雑なジョイント試料のループインダクタンス L を導出することができる。

謝辞

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

参考文献

1. Shoichi Yokoyama, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p. 129
2. Shoichi Yokoyama, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 107 (2024) p. 15

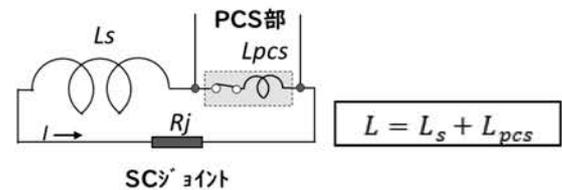


Fig.1 Electrical circuit diagram of joint test specimen.

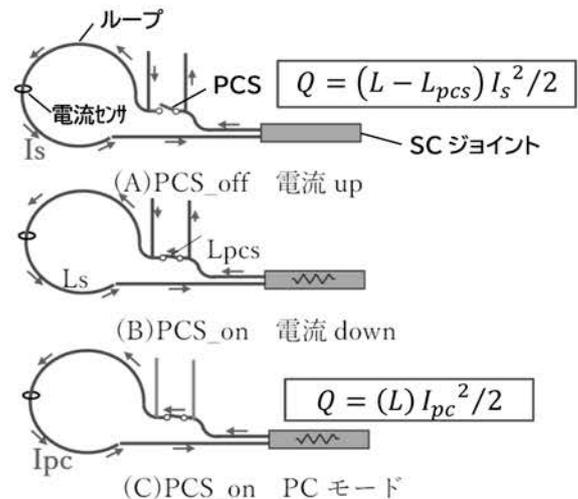


Fig.2 Procedure for energizing the loop of the joint test specimen.

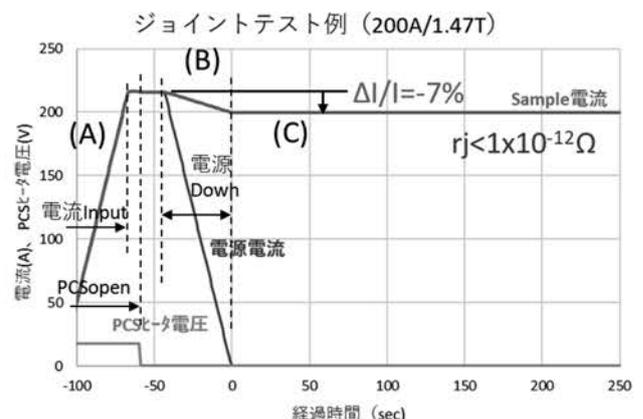


Fig.3 A joint test result of a NbTi-joint sample.

REBCO 線材の半田フリー音波接合における接合抵抗率のモデリングと推定に関する検討

Modeling and Estimation of Joint Resistivity in Solder-Free Sonic-Welding of REBCO Coated Conductors

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

REBCO 線材の実用化には、低抵抗で作業性と再現性に優れるロバスタな接合技術の確立は必要不可欠である。短時間で低い接合抵抗率を実現する接合技術として音波接合が注目されている。しかし、音波接合におけるプロセスパラメータは多様であり、条件の最適化は容易ではない。すなわち、接合時に素線を劣化させることなく所望の接合抵抗率を得る条件の同定には、一般には試行錯誤に基づく多くの時間的コストと労力を必要とする。我々は半田フリーな音波接合におけるプロセスパラメータと、REBCO 線材の金属安定化層間の接合特性を定量的に記述する解析モデルを提案し、実験値をよく再現できることを報告した[1], [2]。本研究では、提案した解析モデルを用いた特性推定精度とモデリング時の必要データ数について検討した。

2. 実験方法

本研究では、PLD法で成膜されたCu層を有する3mm幅REBCO線材を用いた。荷重を1750N、印加周波数を15kHzで一定として、入力パワーおよびパワーを時間積分して得られる投入エネルギーを変化させてCu-Cu接合試料を作製した。接合試料の接合抵抗 R_j および臨界電流 I_c は4端子法により評価し、接合抵抗率 ρ_j は R_j と接合面積(幅 w ×接合長 L)を乗じることで算出した。

3. 実験結果・考察

Fig. 1にCu-Cu接合における接合特性の既知データ(塗りつぶしプロット)および既知データに対してFittingした解析モデル(実線)を示す。ここで、解析モデルは式(1)に示すものであり、Fig. 1に示す実線は $\rho_0=10$ (given), $\alpha=0.0679$, $\beta=2.96E+6$, $\gamma=1.63$ で特徴づけられるモデル曲線である。このとき、 ρ_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率($0 < \alpha \ll 1$)、 β, γ はパワー依存性を記述するパラメータである。

$$\rho_j(E, P) = \frac{\rho_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha - \exp\left[-\frac{E}{U(P)}\right]}, \quad U(P) = \beta P^{-\gamma} \quad (1)$$

まず、我々はこのモデルを用いて、所望の接合抵抗率を実現する条件選択を行った。目標値として $12 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ に設定し、これを達成する接合条件をモデル曲線から逆算し、 $(E, P) = (1200 \text{ J/cm}^2, 168 \text{ W}), (1000 \text{ J/cm}^2, 186 \text{ W})$ の2条件について試料($L=10 \text{ mm}$)を作製した。これらの試料の測定結果をFig. 1に白抜きプロットで示す。各条件で2つずつ試料を作製したが、いずれの条件でも破線で示す目標値である $12 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ 程度の接合抵抗率が得られており、外挿的特性推定を高い精度で実現できた。

次に、モデル曲線を得るために必要なデータ数について検討した。Fig. 1に示した $P=89 \text{ W}$ および 200 W における $100 \sim 600 \text{ J/cm}^2$ の各4点(計8点)を用いてFittingした結果、モデルパラメータとして $\rho_0=10$ (given), $\alpha=0.0696$, $\beta=5.53E+5$, $\gamma=1.33$ が得られた。このとき、他の実験値との比較はFig. 2のようになっており、パラメータ推定に用いていない121, 161 W

および 600 J/cm^2 以上の外挿領域を良く記述できた。この結果、非常に少ないデータ数で幅広い領域のモデリングを達成した。

謝辞: 本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】【JPMJMS24A2】ならびにJSPS科研費JP24H00320の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] S. Sera et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, no. 5, Aug. 2025, Art. no. 6603505.
- [2] S. Sera et al., *Abstracts of CSSJ Conf.*, vol. 108 (2024), 3C-p07.

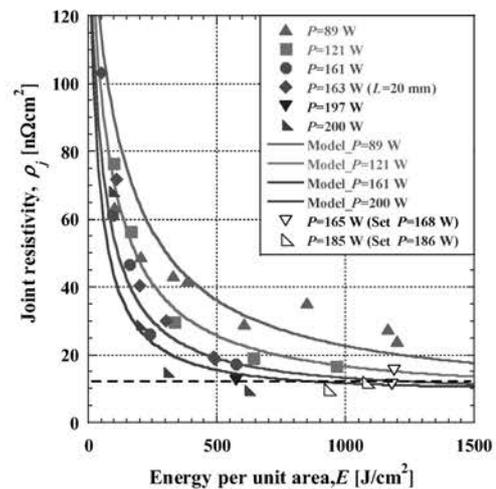


Fig. 1 Comparison of the prediction curve using the analytical model and the measured results (open symbols). The measured results, ranging from 9.8 to $15.4 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$, were obtained compared to the target value of $12 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$.

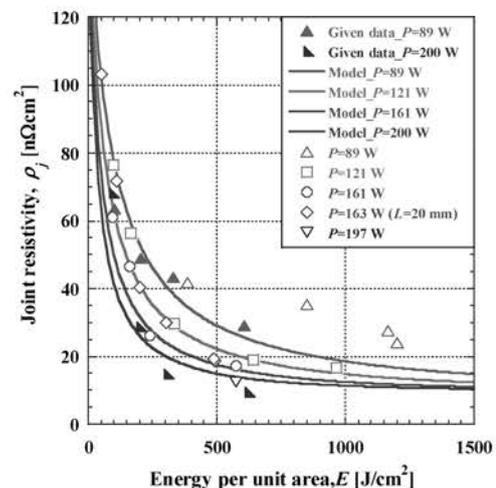


Fig. 2 Model curves were obtained from data between 100 and 600 J/cm^2 at $89, 200 \text{ W}$ (closed symbols). The model curves reproduce the experimental data (open symbols) well, including data that was not used in the modeling.

REBCO テープ線材のインジウム箔を用いたラップジョイントにおける接合抵抗の 接合前プロセスおよび保管温度に対する依存性評価

Evaluation of dependence of joint resistance of REBCO-tape lap-joint with Indium-foil on
pre-jointing process and storage temperature

田村 怜於, 伊藤 悟, 橋爪 秀利(東北大); 柳 長門 (NIFS)

TAMURA Reo, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi(Tohoku Univ.); YANAGI Nagato (NIFS)

E-mail: tamura.reo.r6@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

導体接続巻線方式を採用した分割型高温超伝導マグネット[1]の開発が進められており、REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) 線材同士をインジウム箔を介して圧着する機械的ラップジョイント法が、有力な接合手法として提案されている。この接合手法では、REBCO 線材の表面 (Cu 層) およびインジウム箔に対して、希塩酸やフラックスを用いた酸洗いを施した後にエタノール洗浄を行い、迅速に圧着することで、界面における金属間化合物 CuIn_2 の形成を促し、常温または低温熱処理 (~100 °C) での固相拡散接合を実現している。このような前処理により、接合直後のサンプルでは一貫して低い接合抵抗が得られることが報告されており、実用応用に向けた技術的基盤が整いつつある。接合性能の評価においては、接合抵抗 (Ω) と接合面積 (m^2) の積で定義される接合抵抗率 ($\Omega \cdot \text{m}^2$) が用いられ、接合抵抗率が十分に低く、かつ長期にわたって安定していることが求められる。しかしながら、これまでの研究[2]は、主に接合直後の短期的な特性評価にとどまっており、長期的な接合抵抗率の変化や安定性に関する定量的検討は十分に行われていない。

そこで本研究は、接合抵抗の長期的安定性に関する初期的な検討として、接合前処理の有無および接合後の保管温度の違いが接合抵抗率に及ぼす影響を実験的に評価した。

2. 試料作製方法と実験方法

接合試料は、REBCO 線材 (SCS4050-AP, SuperPower) 同士をインジウム箔 (100 μm) を介して重ね、常温環境下で 100 MPa の圧力を 1 分間加えて圧着することで作製した。作製条件に応じて、「洗浄あり群」と「洗浄なし群」の 2 群を用意した。各条件において 2 サンプルずつ作製した。「洗浄あり群」では、REBCO 線材表面を #1500 のサンドペーパーで研磨した後、エタノールによる洗浄を行った。さらに、REBCO 側にはフラックス (SUSSOL-F)、インジウム箔には 9% 希塩酸を用いた酸洗いをそれぞれ施した後、両材料に対してエタノールによる仕上げ洗浄を実施した。一方、「洗浄なし群」では、研磨および酸洗いは実施したが、それに続くエタノール洗浄を省略し、そのまま圧着を行った。上述の処理の後、すべてのサンプルに対して液体窒素中 (77 K・自己磁場下) で Fig. 1 に示す四端子法による通電試験を実施し、初期の接合抵抗率を測定した。さらに、各サンプルを常温 (300 K) および液体窒素中 (77 K) に分けて最大 120 日間保存し、保存期間中にも定期的に通電試験を実施して、接合抵抗率の経時変化を評価した。

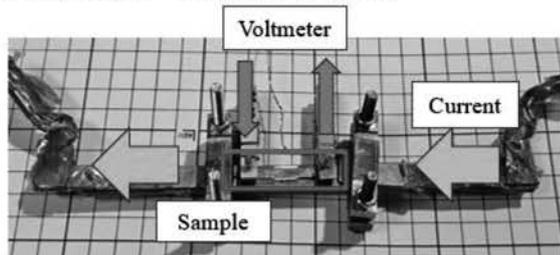


Fig. 1 Sample mounting for four-probe method

3. 実験結果・考察

Fig. 2 に各サンプルの規格化接合抵抗率 (作製直後を 1 とし、接合抵抗率の経時変化を相対的に示したもの) の経時変化を示す。初期の接合抵抗率には洗浄の有無による明確な差はなかった。短期間 (~7 日) では、いずれの条件でも接合抵抗率は安定しており、顕著な上昇は観察されなかった。しかし、20 日を超えた頃から 300 K 保管群で接合抵抗率が上昇する傾向が見られた。ただし、120 日経過後も接合抵抗率は飽和傾向で、洗浄の有無による明確な差はなかった。一方、77 K 保管群では、洗浄の有無にかかわらず、120 日経過後も接合抵抗率に明確な上昇は見られなかった。

以上より、保管温度が接合抵抗率の長期変化に大きく影響することが示唆された。特に 300 K での長期保管では接合界面の変化により抵抗率が上昇したと考えられる。一方、77 K の低温環境では界面の安定性が維持され、抵抗率の上昇が抑制されたと推察できる。ただし、20~30 日付近で一部試料に見られた局所的な抵抗率の上昇は明確な傾向とは言えず、更なる検討が必要である。

今後は、300 K 保管下での抵抗率上昇の原因を明らかにすることが重要である。その要因として、接合界面での金属間化合物の形成が考えられ、SEM-EDS を用いた断面観察および元素分析による評価が求められる。また、接合時に加えた圧力が時間の経過とともに緩和され、界面の密着性低下により抵抗率が上昇する可能性も否定できず、今後の検討が必要である。

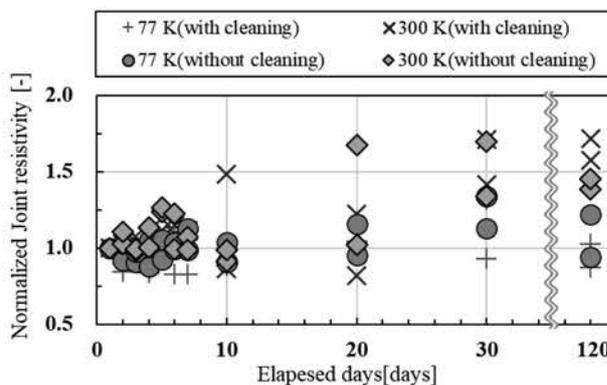


Fig. 2 Normalized joint resistivity of REBCO lap joints as a function of elapsed time after sample fabrication.

謝辞

本研究の一部は、核融合科学研究所2024年度一般共同研究(NIFS24KIEA055)およびJSPS科研費(25K00980)の支援を受けて実施されたものです。

参考文献

- N. Yanagi et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55 (2015) Art. no. 053021
- S. Ito et al.: Nuclear Fusion, Vol. 61 (2021) Art. no. 115002

HTS コイルにおけるオーバーシュート法の 遮蔽電流磁場変動抑制効果に関する簡易解析

Simplified Analysis of the Effect of Overshooting Method on the Suppression of Shielding Current Field Fluctuation in HTS Coil

秦 優作, 後藤 大人, 長崎 陽, 津田 理(東北大)

HATA Yusaku, GOTO Hiroto, NAGASAKI Yo, TSUDA Maokoto (Tohoku Univ.)

E-mail: hata.yusaku.s8@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在、液体ヘリウムレスの高温超電導(HTS)MRI が期待されている。しかし、HTS コイルでは、HTS 線材内部で通電時に生じる遮蔽電流が、磁場安定性を阻害し、実用化を妨げている。このため、高解像度なイメージングには遮蔽電流磁場の変動抑制が重要となる。先行研究では、この磁場変動抑制手法の 1 つであるオーバーシュート法(OS 法)を用いた場合について実験し、有効性を確認している[1]。しかし、先行研究では、小型コイルを用いた場合について検討しており、実規模コイルでの OS 法の磁場変動抑制効果は不明である。そこで、本研究では、任意のコイル形状においても磁場変動抑制手法の効果を検証できる簡易的解析手法の確立を目的に検討を行った。

2. 解析手法

本研究では、Table 1 に示す諸元と Fig. 1 に示す構成を有する積層型 HTS マグネットを解析対象とした。同マグネットは 5 種類 10 個のダブルパンケーキコイルで構成され、コイル通電時の中心磁場と Fig. 1 中 #1-2 の上部コイルの抵抗値を評価した。運転電流は 130A (ホールド時) とし、0.5%、1%、1.5%、2% のオーバーシュート電流を印加した場合について検討した。解析では、等価回路法を用い、超電導層における抵抗特性を磁束クリープ・フローモデルで近似した。等価回路法 [3] における回路方程式を(1) 式に示す。

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + \sum_{m=1}^N M_{sn-sm} \frac{dI_{sm}}{dt} + R_n I_{sn} + M_{op-sn} \frac{dI_{op}}{dt} = 0 \quad (1)$$

ここで、 L_s は遮蔽電流の自己インダクタンス、 I_{sn} 、 I_{sm} はそれぞれ n 番目、 m 番目の遮蔽電流 ($n \neq m$)、 R_n は超電導層における抵抗、 M_{sn-sm} は遮蔽電流間の相互インダクタンス、 M_{op-s} は通電電流-遮蔽電流間の相互インダクタンス、 I_{op} は通電電流、 t は時間を表している。(1)式より遮蔽電流を計算した後、遮蔽電流が線材断面の端部領域に流れると仮定して、ビオ・サバルの法則を用いて遮蔽電流によるコイル中心磁場を計算した。

3. 解析結果と考察

Fig. 2 に、Fig. 1 中 #1-2 の上部コイルにおける抵抗値の解析結果を、Fig. 3 に HTS マグネット中心における遮蔽電流磁場の解析結果を示す。Fig. 2 より、オーバーシュート量の増加に伴い抵抗値が減少する傾向が確認された。また、Fig. 3 に示す遮蔽電流磁場の変動率についても、わずかながら減少する結果が得られた。しかし、実験結果と比較すると、磁場変動率の減少幅は小さく、OS 法の定性的効果を表すことができたものの、定量的には十分に再現するには至らなかった。この差異は、解析における抵抗値の減少量が実験に比べて小さいことが一因として考えられる。今後は、磁束クリープ・フロ

ーモデルにおけるパラメータの影響について検討し、解析精度の向上を目指す予定である。

Table.1 Specifications of the HTS magnet

Critical Current [A]	606(@10K)
Inner diameter [mm]	130
Number of turns	62, 68, 85, 165, 165
Height [mm]	10.2

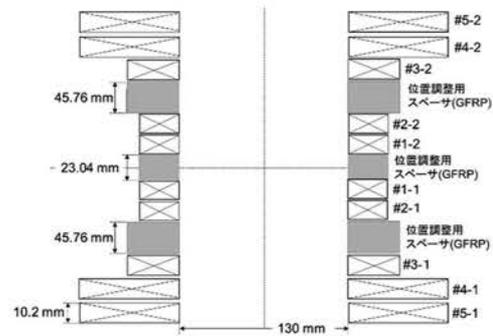


Fig.1 HTS magnet configuration

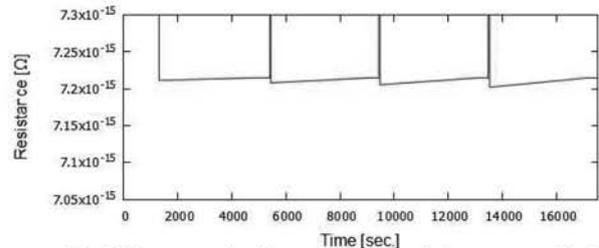


Fig.2 Superconducting resistance of the upper coil of #1-2Coil in Fig.1

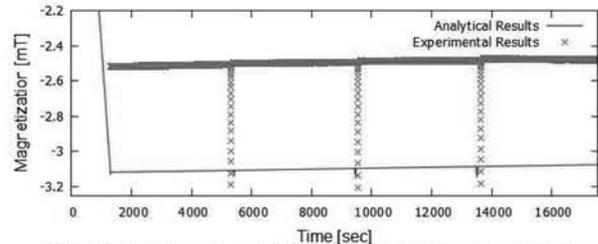


Fig.3 Analysis and experimental results of the shielding current magnetic field

参考文献

1. M. Kanamaru, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.92
2. T. Matsushita, et al.: Physica C, 256, 321-325(1996)
3. So. Noguchi, et al.: 低温工学, 54 巻 2 号(2019)

RE 系線材による非含浸パンケーキコイルの伝熱特性評価試験

Evaluation of superconducting and thermal characteristics of dry-wound REBCO pancake coils

小柳 圭, 大谷 安見, 真島 周也, 宇都 達郎, 志鷹 哲哉, 稲富 誉也,

戸坂 泰造, 伊藤 智庸(東芝エネルギーシステムズ); 下山 禎朗, 内田 健哉(東芝)

KOYANAGI Kei, OTANI Yasumi, MAJIMA Amane, UTO Tatsuro, SHITAKA Tetsuya, INATOMI Takinari,

TOSAKA Taizo, ITO Toshinobu (TOSHIBA Energy Systems & Solutions Corporation);

SHIMOYAMA Sadao, UCHIDA Kenya (TOSHIBA Corporation)

E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

1. はじめに

RE 系パンケーキコイルの径方向に応力が加わることによる超電導特性劣化の対策として、ターン間に樹脂を浸透させずにコイル端面で線材を保持する非含浸の巻線方法を開発している。本方式は特性劣化防止の効果に加え、線材に未硬化の樹脂を塗布しながら巻く塗込み含浸方式と比べて巻線作業の効率化、コイル寸法管理の精度向上も期待できる。一方で、巻線部が含浸樹脂で充填されていないため、伝導冷却したコイルの励磁時、遮断時の発熱が十分に拡散せずに熱暴走に至るリスクが懸念される。検証として、非含浸方式で試作したコイルを伝導冷却して伝熱特性を評価し、ヒートサイクルや電磁力に対する耐性を確認した。

2. コイルの試作

伝熱特性評価試験の供試体として、幅 3mm の IBAD-PLD 線材を使用して同じ諸元のパンケーキコイル 2 個を巻線し、積層接続したコイルを試作した。コイルの諸元を Table I に、断面構成の概略を Fig.1 に示す。線材のターン間に絶縁材を共巻きしながらドライ巻線した後、コイル端面に GFRP の薄板を熱可塑性樹脂で固着させ一体化させた非含浸構造としている。熱可塑性樹脂はコイルのターン間には浸透させていないので、液体窒素中で一度通電試験をしたコイルの端面の GFRP 板を剥がして巻き戻し、再度巻線できることも確認した。積層したコイル同士の接着面と積層コイル上下面とは、伝熱用のアルミ板を貼り付けており、伝導冷却装置に組み込んだ後、コイル接着面のアルミ板は冷凍機の 2 段ステージ部に接続し、コイル上下面のアルミ板端部にはフィルムヒータを取付けた。コイル端面の接着層を介した伝熱特性を評価するため、コイル表面には複数個の温度センサを配置した。

3. 試験方法

コイルを真空容器内に保持して冷凍機で伝導冷却し、2 段ステージ部に接続した伝熱用アルミ板端部の温度を温調器で温度 10 K~40 K に維持してからフィルムヒータに段階的に通電して熱負荷を与えて、加熱量と生じた温度差から熱抵抗を算出することで、コイルの伝熱特性を評価した。コイル端面の接着部分に加わる負荷を把握するため、試作したコイルの巻線部分をモデル化した構造解析を実施して冷却および励磁の過程で熱可塑性樹脂部分に加わる応力を計算したところ、冷却過程において樹脂の破断強度レベルの応力が生じる結果が得られたことから、室温と極低温とのヒートサイクルによる熱抵抗の増加の有無を確認することとした。

4. 試験結果

コイルを温度 10K まで伝導冷却して伝熱特性を評価した後、一旦 290K まで昇温して再度冷却し、伝熱特性を評価した。温度を 10 K~40 K におけるヒートサイクル前後での熱抵抗の評価結果を Fig.2 に示す。各温度でのプロットはほぼ重なっており、ヒートサイクルによって熱抵抗が変化していないことが確認された。また、同じ寸法諸元で試作した塗込み含浸方式のコイルも伝導冷却して伝熱特性を評価し、非含浸方式

の特性と比較したが、塗込み含浸コイルに対する非含浸コイルの熱抵抗の増分は 1 割程度であり、含浸構成と比べて遜色のない伝熱特性を有することが確認できた。

5. まとめ

非含浸方式のコイルに室温-極低温のヒートサイクルを経験させてその前後で伝熱特性を比較した結果、熱可塑性樹脂により接着した界面の割れなどに伴う熱抵抗増加は観察されず、伝熱特性を維持できることを確認した。伝熱特性への電磁力の影響、コイルおよび巻き戻した線材の超電導特性の評価結果などについても本会にて報告する。

TABLE I SPECIFICATIONS OF REBCO COIL.

Parameter	Quantity
Coil inner diameter	100 mm
Coil outer diameter	175 mm
Number of pancake coils	2
Coil height	8.4 mm
REBCO tape width	3.1 mm
REBCO tape thickness	0.15 mm
Number of turns	444
Total length of REBCO tapes	192 m
Inductance	8.9 mH

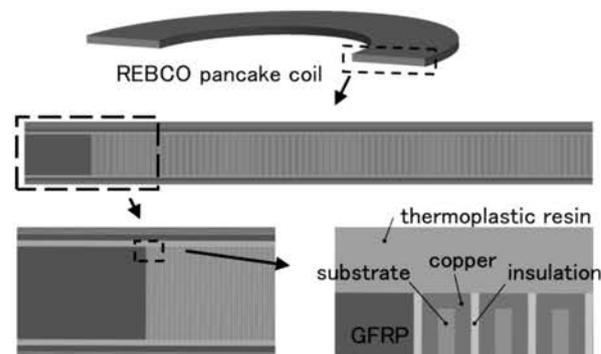


Fig.1 Schematic view of the dry-wound REBCO coil.

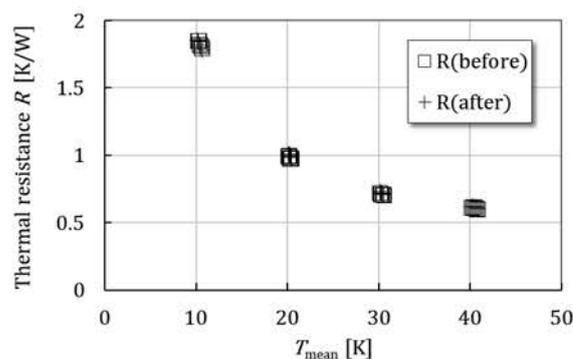


Fig.2 Thermal resistance of the coil evaluated from temperature measurements before and after heat cycle.

REBCO 3ターンコイルの液体水素/窒素中の熱暴走におけるカプトン絶縁の影響

Effect of Kapton insulation on thermal runaway of REBCO 3 turn coils cooled with liquid hydrogen/nitrogen

今川信作, 濱口真司(NIFS); 大屋正義(関西学院大); 白井康之(京都大); 岩本晃史(大阪大); 小林弘明(JAXA)

IMAGAWA Shinsaku, HAMAGUCHI Shinji (NIFS); OHYA Masayoshi (Kwansei Gakuin Univ.);
SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); IWAMOTO Akifumi (Osaka Univ.); KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)
E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

1. はじめに

液体水素で直接冷却することにより局所的な劣化が許容され、また、クエンチ保護が可能な高温超伝導コイルの開発を目指している。中央の 0.1 m の範囲を劣化させた 1.5 m の REBCO テープ線材に銅テープを添わせて GFRP 巻枠の溝に 3 回巻線し、溝の隙間を絶縁紙と樹脂で埋めた試験体 (Figs. 1, 2 参照) を用いて、液体窒素および液体水素中において熱暴走実験を行った。冷却面はコイルの片側面のみである。線材に 12.5 μm 厚さのカプトンテープを半掛け巻きした試験体においては、限界熱流束よりも低い発熱密度で熱暴走を開始した [1]。カプトン絶縁内の温度上昇の影響を調べるため、冷却面のカプトンを除去した試験体を準備し、熱暴走実験を実施した。

2. 液体窒素中の熱暴走

REBCO 線材を巻枠から慎重に取り出し、半掛け巻きのカプトンテープを除去し、冷却面を裸に変更した試験体 (S1R3) を製作した。列間の絶縁は Kapton 粘着テープ 2 枚に変更した。液体窒素中の熱暴走が、150 A を超えても生じなかったため、3 ターンコイルの冷却面の半分に 5 mm 間隔で厚さ 1 mm ほどのエポキシ樹脂を塗布した (S1R4)。その結果、150 A、80 mV を超えたところで常伝導伝播を伴って熱暴走が生じた (Fig. 3 参照)。冷却面にカプトン絶縁がある場合は、65 A、10 mV 程度から常伝導伝播が始まったことから、電流値は 2 倍以上、電圧は 8 倍程度に高くなった。S1R4 コイルは、限界熱流束に近いところで (核沸騰から膜沸騰への遷移を伴って) 劣化部において熱暴走が始まり、常伝導伝播を伴ったと考えられる。

3. 液体水素中の熱暴走

実験結果を Fig. 4 に示す。S1R4 コイルは、外部磁場無しでは電源上限の 400 A まで熱暴走に至らなかった。20 K、2.1 T では 5 回の熱暴走実験を行った。熱暴走開始は、実験順に 308 A、316 A、306 A、307 A、326 A となり、25 K、27 K での実験のために加圧した後に再び大気圧まで減圧した条件で最も高くなった。また、加圧して飽和温度を高くすると、臨界電流が低下するにも拘わらず、熱暴走開始電流が高くなった。加圧により限界熱流束が高くなったことが主要因と考えられるが、25 K (0.35 MPa) よりも 27 K (0.54 MPa) の方が 20% 以上も高くなったことは文献 [2] と異なるため、詳しく調べる必要がある。

加圧後に再び 20 K に戻した場合の熱暴走開始電流が高くなることについても再現性実験が必要である。解析との比較により、20 K の場合は限界熱流束よりも有意に低い発熱密度で熱暴走に至ったと判断される。熱暴走前に温度振動が大きくなる現象が観測されており、気泡の蓄積等によって冷却が悪化したと推測される。圧力が高くなると、温度振動が小さくなる傾向にあり、気泡の大きさや動きが関わっていると推測される。

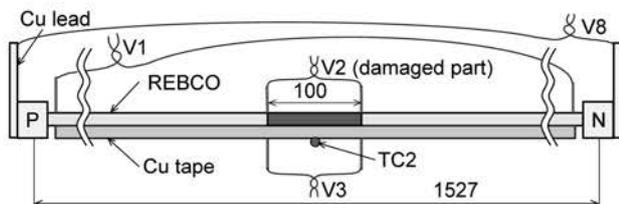


Fig. 1. Sensors of a sample S1R4 (REBCO and Cu tape). TC2 is a type T thermocouple which is attached to Cu tape with solder.

冷却面の半分を裸面とする方が熱暴走開始電流は 1.5 倍程度に高くなったが、熱暴走開始時の線材温度が低いままであるため、熱暴走開始電圧は同程度であった。電圧法によるクエンチ検出の観点では好ましくない結果である。

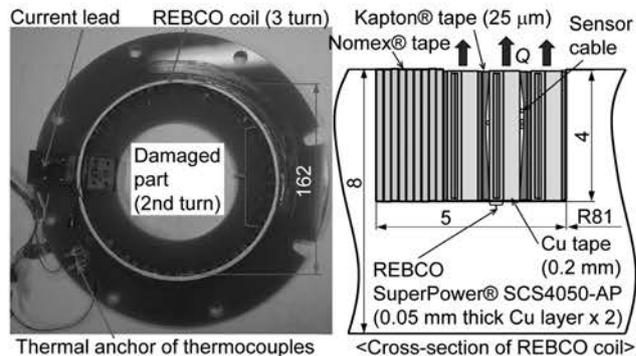


Fig. 2. Photo (left) and a sketch of the cross-section (right) of S1R4 coil.

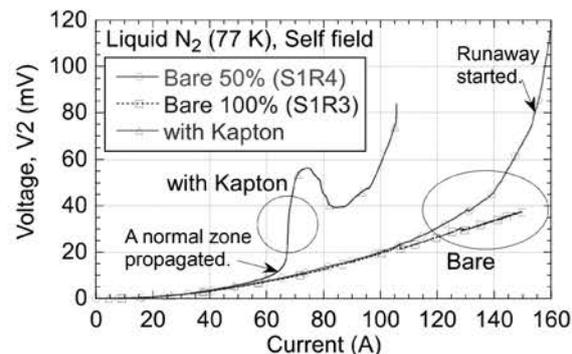


Fig. 3. Thermal runaway of S1 with and without Kapton insulation at the wetted surface in liquid nitrogen.

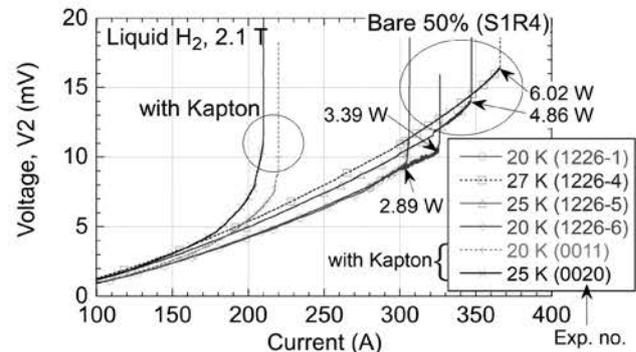


Fig. 4. Thermal runaway of S1 with and without Kapton insulation at the wetted surface in liquid hydrogen.

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

参考文献

- [1] S. Imagawa, et al., *IEEE Trans Appl Supercond*, Vol. 35, No. 5 (Aug. 2025) art. no 4601605.
- [2] Y. Shirai, et al., *Cryogenics*, Vol. 50 (2010) pp. 410-416.

Nb₃Al 極細線材を用いた REBCO 線材のクエンチ検出手法の基礎研究

Fundamental research on quench detection method for a REBCO tape using a Nb₃Al ultrafine wire

伊藤 悟, 千蔵 陽大(東北大); 西島 元, 菊池 章弘(NIMS); 橋爪 秀利(東北大)

ITO Satoshi, CHIKURA Haruto, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.); NISHIJIMA Gen, KIKUCHI Akihiro (NIMS)
E-mail: satoshi.ito.e3@tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO コイルのクエンチ検出手法として、低温超伝導線材をクエンチ検出センサとして使用する方法を提案しており、原理検証として、これまで NbTi センサを用いて、液体ヘリウム浸漬冷却体系、最大 9 T の磁場下で、絶縁・MI・NI の各種 REBCO コイルのクエンチ検出実験および数値解析に取り組んできた[1]。本研究では、より高磁場に本手法を適用するために、Nb₃Al 極細線材[2]をクエンチ検出センサとして、局所劣化部を持つ REBCO 線材に適用し、液体ヘリウム浸漬冷却体系かつ最大 14 T の磁場下においてクエンチ検出特性を評価した結果を報告する。

2. 実験方法

実験サンプルとして幅 4 mm の銅安定化層付き REBCO 線材 (SuperPower 社製, SCS4050-AP) を用いた。クエンチを誘発させるため、REBCO 線材には直径 1.2 mm のステンレス針金をプレス機で押し付けて局所劣化部 (臨界電流 I_c 低下部) を導入した。これに対し、まず、プレス機荷重と REBCO 線材の臨界電流 I_c および I_c 以上の電流印加時の抵抗値を 77 K、自己磁場で評価した。続いて、この過程を経て準備した REBCO 線材をいくつか選択し、これに Fig. 1 のように Nb₃Al センサ (外径 0.05 mm の極細 Nb₃Al ファイラメント[2]) を適用し、REBCO 線材のクエンチ検出実験を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の超伝導マグネット 15T-SM を用いて実施した。Nb₃Al センサの I_c の磁場依存性はあらかじめ評価しており、本実験では、センサの負荷電流を制御することでセンサ分流開始温度 T_{CS} を設定した (センサが T_{CS} に達するとセンサ側で電圧が上昇し、REBCO 線材のクエンチの予兆を検出できる原理である)。

3. 結果と考察

Fig. 2 に REBCO 線材の局所劣化部導入時の荷重と規格化 I_c (局所劣化部を導入する前の臨界電流 I_{c0} で規格化した I_c) および抵抗の関係性を示す。100 kgf 以上の荷重を与えると局所的に $I_c = 0$ A を実現することができ、これ以降の荷重が大きいほど抵抗が大きくなるが示された。Fig. 3 にクエンチ検出実験の例を示す。REBCO 線材の電流を上げていく過程で、Nb₃Al センサの電圧が上昇している、すなわち REBCO 線材のクエンチ (の予兆) の検出ができていくことがわかる。Fig. 4 に Nb₃Al センサの T_{CS} を 10 K で固定した際のクエンチ検出時の REBCO 線材の電流値を示す。 T_{CS} が同じ場合、同じタイミングでクエンチ検出されると予想していたが、REBCO 線材の銅安定化層の磁気抵抗の影響を踏まえると、一定の発熱量に至ったところでクエンチ検出していると考えられる。実験条件によっては、クエンチ検出時のセンサ電圧の上昇値が小さい場合もあり、結果を詳細に分析したうえで、センサ構造の改善をしていく予定である。

参考文献

1. S. Hasegawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 34 (2024) Art. no. 3801110
2. A. Kikuchi et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 31, (2021) Art. no. 6000105

謝辞 本研究の一部は、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の共同利用研究 (202312-HMKGE-0201) にて実施されたものです。

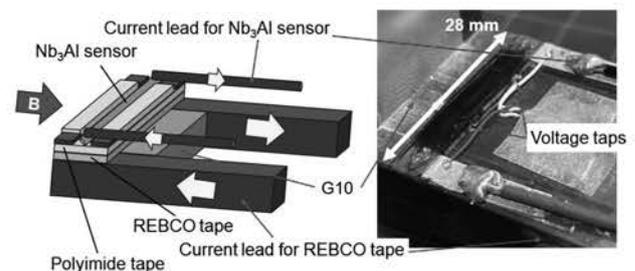


Fig. 1 Test section for quench detection experiments.

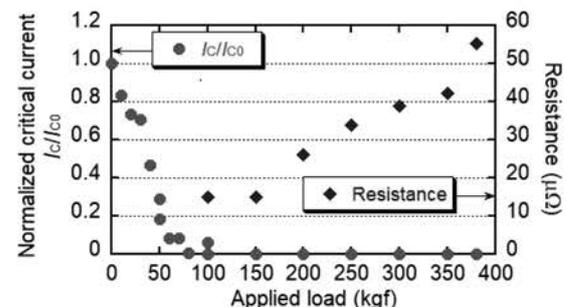


Fig. 2 Normalized critical current and resistance of REBCO tapes as a function of applied load.

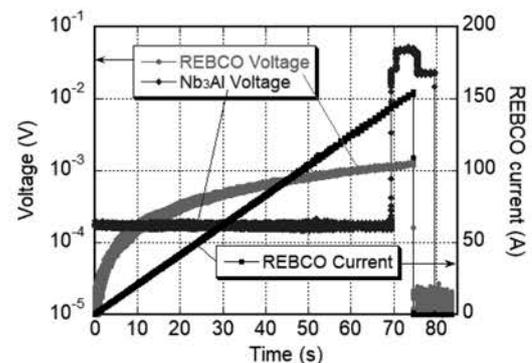


Fig. 3 Example of quench detection experiments. (Magnetic field: 10 T, T_{CS} of Nb₃Al sensor: 6 K, Applied load on the REBCO tape: 380 kgf.)

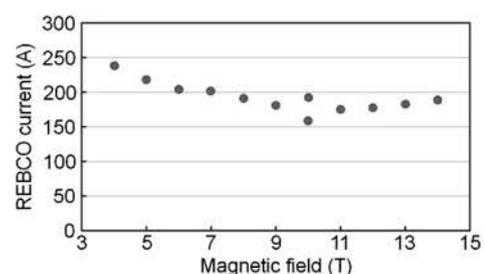


Fig. 4 REBCO current at quench detection as a function of magnetic field. (T_{CS} of Nb₃Al sensor: 10 K, Applied load on the REBCO tape: 380 kgf.)

パルス通電法を用いた REBCO 線材の中低温域における電気機械特性評価

Electro-Mechanical Characterization of REBCO Tapes in Low and Medium Temperature Range Using Pulse Current Method

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、20 K 程度以下の中低温域で、30 T 以上の強磁場発生等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、設計には電気機械特性(応力 σ -ひずみ ε -臨界電流 I_c 特性)の評価が重要である。これまでに、液体窒素や液体ヘリウムによる浸漬冷却を用いた 77 K および 4.2 K での電気機械特性の評価が進んでいる。[1]。一方で、10-77 K の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く、中温度域における評価は未だ十分ではない。

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 μ 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じ仕様である[3] [4]。この REBCO 線材における 4.2-77 K で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、ニッケミ社製スーパーキャパシタユニットを用いたパルス電源(電圧 10 V、電流 1,000 A)を用い、電界基準 1 μ V/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の電気機械特性と機械特性を測定した。得られた応力 σ -ひずみ ε 曲線(S-S 曲線)から、 $\varepsilon = 0 - 0.3\%$ の間の実効的ヤング率 $E_{0.3\%}$ を算出した。一旦負荷をかけた後に除荷したときの I_c が初期値から 2%劣化したときの ε を不可逆ひずみ ε_{irr} とした。降伏応力 σ_y および降伏ひずみ ε_y は S-S 曲線の直線的弾性領域の最大値、つまり、 ε が 0 から 0.3 % の間の外挿直線から外れる点として定義した。

3. 実験結果および考察

図 1 に、フジクラ社製の REBCO 線材(FESC-SCH04(40)、幅 4 mm、Cu 安定化層 40 μ m)の 4.2-300 K における $E_{0.3\%}$ の温度依存性を示す。REBCO 線材の実効的ヤング率 $E_{0.3\%}$ は、温度の低下に伴い単調に増加し、その温度依存性は放物線状であった。また、 $E_{0.3\%}$ は室温と比べて 4.2 K で約 9%増加した。全ての温度における S-S 曲線では、 $\varepsilon \approx 0.5\%$ まで直線的な振る舞いを示し、それ以上の ε では傾きが低下し、塑性変形した。また、 σ_y は、温度の低下に伴い増加し、室温、150 K、77 K、4.2 K でそれぞれ 510 GPa、580 GPa、690 GPa、838 GPa であった。一方で、降伏ひずみ ε_y は、室温、150 K、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考察する。本研究で用いた REBCO 線材は、Cu 安定化層が 50%以上、Hastelloy 基板が 40%を占める。先行研究[5]では、室温と比べて 4.2 K でのヤング率は、Cu および Hastelloy において、7%および 4%増加した。本研究で得られた室温と 4.2K の $E_{0.3\%}$ は約 9%だったことから、低温での $E_{0.3\%}$ の増大には Cu の影響が大きい可能性がある。

図 2 に、パルス通電法を用いた 50 K における電気機械特性(I_c - ε および σ - ε)を示す。ここで、 I_c は応力を除荷した時の値を示した。 I_c は、 $\varepsilon = 0.4\%$ 以上で急激に減少し、 $\varepsilon = 0.7\%$ で 0 A まで不可逆に減少し、 ε_{irr} は、0.45%、 σ_{irr} は、627 MPa であった。S-S 曲線は約 0.6%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、77 K 以下の I_c が kA レベルの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 安定化層や Hastelloy 基板の降伏や、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。

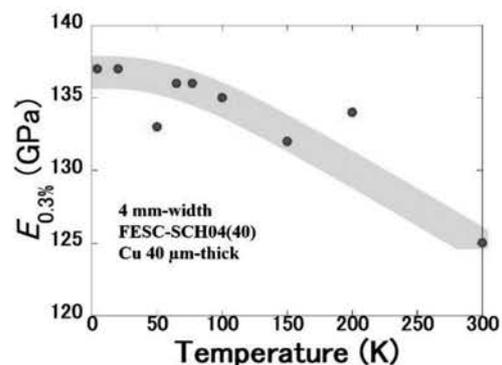


Fig. 1 Temperature dependence of effective Young's modulus $E_{0.3\%}$ in REBCO.

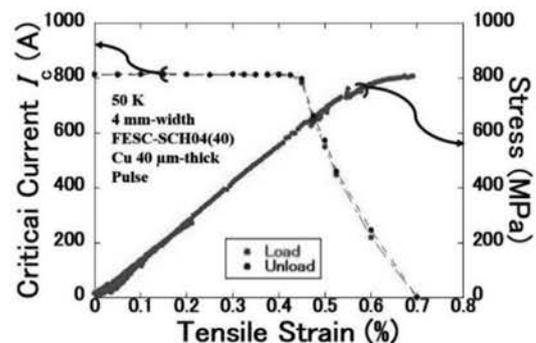


Fig. 2 Electro-mechanical properties (I_c - ε , stress-strain) in REBCO at 50 K measured with pulsed current method.

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. **35**, 9000805 (2025).
- [3] A. Badel *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 4301205 (2024).
- [4] S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **35**, 4300406 (2025).
- [5] 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 塑性変形の効果 (2)

Torsion dependence of critical current under tensile load for REBCO tape

Influence of plastic deformation (2)

長村 光造 (応用科学研), 町屋 修太郎 (大同大)

Kozo Osamura (RIAS), and Shutaro Machiya (Daido Univ)

kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに：脆い超電導酸化物 REBCO を含む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・歪依存性の向上が強く求められる。前回報告(1)では臨界電流のねじり・引張変形依存性の調査のために新しく組み立てた治具の構造とそれにより得た実験結果について報告した。本実験方法の特徴はテープの軸方向に引張応力を印加した状態でテープ試料を任意の角度に回転させたときの臨界電流の変化を測定することができることである。今回は引張応力を増加させ、試料が塑性変形状態になった時ねじりによる臨界電流の変化がどのようなになるかを調べた結果を報告する。

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。本実験で用いた治具、方法については前回報告の通りである。テープの掴み治具間の距離を L (cm)とし、テープをもとの位置(1)から 180 度回転させ(2)、さらにもとの角度(3)まで戻す。この操作を引張荷重を増加させながら繰り返し行った。なお距離 L については 5~10 cm の間で 1 cm 毎に実験を行った。

3. 実験結果と考察：Fig.1 右図に示すように各位置で臨界電流を測定した。(1)から(2)で 180 度回転し、(2)から(3)で 180 度から 0 度までもとに戻した。なおここでは試料の長さを 8 および 5 cm とした場合の結果であり、単位長さ当たりの回転角は $\omega=22.5, 36$ deg/cm に相当する。

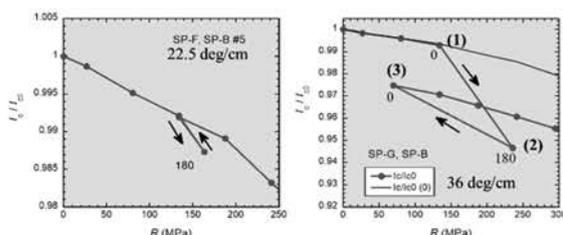


Fig.1 Critical current as a function of applied stress. The distance, L (cm) is 8 (left) and 5 (right)

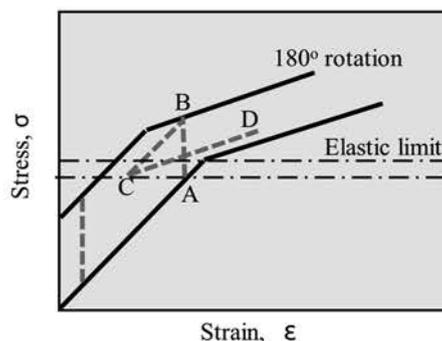


Fig.2 Change of stress – strain state when the tape is rotated from 0 to 180 degree..

まずテープ試料のおかれた応力状態について考察する。Fig.2 に示すように歪が小さい状態ではほぼ弾性状態で応力-歪は直線的に変化する。弾性限を越えると弾塑性状態となり歪曲線の勾配は小さくなる。Fig.1 右図の条件では(1)⇒(2)は A ⇒ B 対応し弾塑性状態となり、(2)⇒(3)では弾性的に歪は減少し C の状態となる。さらに(3)より応力が大きくなると C ⇒ D のように弾塑性的に変化するようになると思われる。なおねじりは試料に 3 次元的な変形を与えるため弾塑性域が試料の形状にも依存し、均質な変形状態を実現しないため数値解析の補完が助けとなる。

Fig.1 左図の条件は弾性域にあり 180 度の回転操作をしても臨界電流の値は元に戻る。一方右図では 180 度回転した条件では塑性変形が加わるため臨界電流は減少する。治具間距離を様々に変化させながら同様実験を行い引張荷重と回転角の関係を明らかにした。

参考文献

- 1) 長村 光造, Cheggour Najib, 町屋 修太郎, “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”, 第 108 回 2024 年度秋季低温工学・超電導学会 3C-p03

謝辞：試料をご提供いただきました SuperPower に感謝いたします。

REBCO 薄膜のナノインデントによる硬さ評価方法の検討(その2)

Consideration of evaluation condition for hardness test of REBCO films
in Nanoindentation method (2)

浦中 智貴(九大);立木 実, 松本 明善(NIMS);山田 穰(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: teranishi.ryo.438@m.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) 薄膜線材は、高磁場中でも高い臨界電流密度を有することから超伝導コイルに有用であり[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に期待されている。ここで、高磁場中では大きな電磁力が掛ることによるREBCO層でのクラック発生が問題視されており[2]、高強度化が課題の一つとなっている。我々は高強度化に向けたREBCO層の機械的特性の評価に注目しており、特にナノインデントを用いた硬さ試験の検討を行っている。ナノインデントは、圧子の押し込みによって荷重と変位を連続的に測定することで微小領域の硬さを評価できることが知られており[3]、これまで、REBCO薄膜の硬さ試験の測定条件について圧子押し込み時の最大荷重が測定値に及ぼす影響を調査してきた[4]。

本研究では、ナノインデントを用いた硬さ試験をREBCO線材に適用するために適切な評価方法を明らかにすることを目的として、膜厚が異なるREBCO層に対して硬さ試験を行い、測定時の最大荷重の条件を調査した。

2. 実験方法

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SiTiO₃(STO)を用いた。成膜条件を制御しながら、膜厚が異なる2つの試料を準備した(300 nmおよび900 nm設定)。ナノインデントによる硬さ試験は、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て硬さ評価した[5]。なお、押し込みにはバーコピッチ圧子を使用し、各最大荷重の条件において測定点を10点設定して最大値と最小値を除いた平均値を用いて硬さを算出した。

3. 結果と考察

Fig.1は、STO基板のみの試料および膜厚の異なる2つのGdBCO薄膜における硬さ(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、測定値に最大荷重依存性があることが示された。単結晶材料においては、押し込みが小さいときに周辺からの拘束効果を受けることで変形が表面に広がり、結果として硬さが高く計測されることが報告されており[6]、十分に大きな最大荷重を与えた際に硬さが一定に近づいた値を硬さの値とみなすことができる。

次にGdBCO薄膜の測定結果では、最大荷重が大きい場合はSTO基板のみの値と重なることが分かり、これらの測定条件では基板の硬さが評価されているものと判断された。GdBCO(300 nm)では最大荷重200 mN未満で、またGdBCO(900 nm)では最大荷重300 mN未満でそれぞれ基板のみの測定値から乖離していった。このことから、測定値に基板の硬さが含まれずにGdBCO薄膜の硬さを評価できているものと判断された。より最大荷重が小さい領域に注目すると、GdBCO(300 nm)の最大荷重5 mN未満、GdBCO(900 nm)の最大荷

重20 mN未満の測定点では、STO基板のみの結果とは異なり、最大荷重が小さくなくても硬さの値が大きくなる挙動が観察された。これは、表面が平坦なSTO基板と比較して、表面に凹凸があるGdBCO薄膜では特に押し込みが小さいときに表面形態の影響が測定値に大きく影響してしまうことが理由として考えられる。

4. まとめ

本研究では、膜厚が異なるREBCO層に対して硬さ試験を行い、測定時の最大荷重の条件を調査した。その結果、最大荷重が大きいときは基板の硬さの影響を受け、最大荷重が小さくなるとその影響が少なくなることが分かった。また最大荷重が小さすぎると表面形態の影響を受け易いことも示された。以上のことから、適切な硬さ評価のためには、REBCO層の膜厚に応じて基板の硬さや表面形態の影響を受けない最大荷重を選択して測定する必要があることが明らかになった。

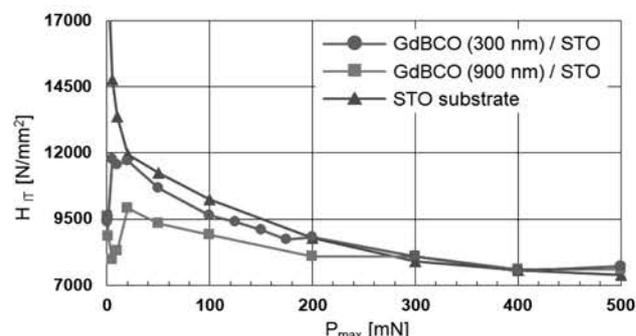


Fig.1 Relationship between mean value of hardness (H_{IT}) and maximum load (P_{max})

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・ティール・エス (2020) 214
- [4] 浦中智貴ら, 第108回2024年度秋季低温工学・超伝導学会
- [5] W.C. Oliver and G.M. Pharr, J. Mater. Res., 7 (1992) 1564-1583
- [6] 吉野利男, 日本機械学会論文集, 32(241), 1966, 1311-1320

REBCO 切断面の断面観察

Cross-sectional observation of REBCO Tapes Cut Surface

町屋 修太郎 (大同大学); 長村 光造 (応用科学研), Yifei ZHANG (SuperPower)
 Machiya Shutaro (Daido univ.); Osamura Kozo (RIAS), Yifei ZHANG (SuperPower)
 E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

1. はじめに

REBCO は、商業的には幅 12 mm で製作され、3 分割されることで 4 mm 幅で売られているのはよく知られた事実である。各社の切断のノウハウは持っているが、バッファ層を含めたコーティング層はほぼぜい性的なふるまいを示すため、切断時に導入された微小な欠陥によって強度が決定される場合があると考えられる。具体的には、切断によりバッファ層あるいは REBCO 層にぜい性破壊に起因する欠陥が導入される可能性が高い。欠陥による破壊じん性の低下を抑えるために、メーカーでは欠陥部分をカバーできる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った。これら界面の損傷状態の観察をおこなったので報告したい。

2. 試料および実験方法

SuperPower 社の線材を図 1 のようにはさみによるせん断による切断をおこなった。一般にせん断を用いた破壊をおこなった場合、刃先の破壊形態はねじりと同様となり、力に対して 45 度傾いた面に最大主応力面が発生することから、その応力場から図 2 ようになることがある。つまり 45 度傾いた面に破断面が発生することが予見される。切断面の界面の SEM 撮影およびその破断面に対する EDX による組成分析をおこなった。

3. 結果および考察

実際の線材の断面の破断面界面部分の SEM 撮影画像を図 3 に示す。図の(a)部分では、界面のコーティング層途中ではく離している様子が確認できた。(b)部分では、はく離界面の開口部が確認できたため、楕円部分を拡大したものを図 4 に示す。図中の(a)では、予見していたような 45 度方向のクラックが確認されたが、切断での応力によるものなのか、関連したはく離の時に発生したものなのかは、はっきりしない。

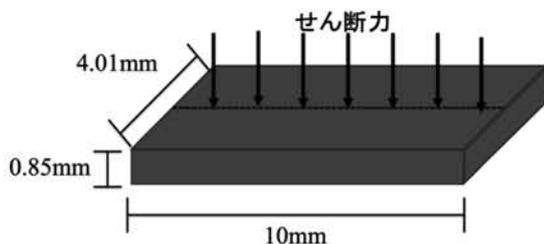


Fig. 1 Slitting shearing of REBCO

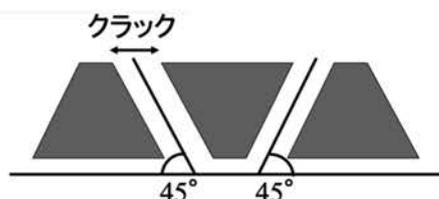


Fig. 2 Cutting edge of shear fracture

どこの面ではく離しているかを確認するため、図中の(b)楕円部分に対して EDX による成分分析をおこなったところ、薄い部分なので透過 X 線の影響が大きく確定はできないが、バッファ層である可能性が高い。

5. まとめ

SuperPower の線材では、メカニカルカットの線材では、予想通りせん断による 45 度の破断面が確認できた。コイル応用のように単軸引張のような荷重形態では、この 45 度は主応力による破断面とは最も角度があり、強度的にはメリットがある。しかしながら、ねじりなどの引張以外の力が作用すると、主応力軸は傾くため、荷重形態で強度が変化する可能性がある。

一方でレーザー切断では、急加熱、急冷却が起こることから、特定の方にクラックが発生することはなくよりランダム性が強くなると予想される。セラミックのような脆性材料の強度を考えた時、破壊力学的には主方向に対して 90 度の最も大きな裂が強度を決定すると考えられおり、クラックの形状と大きさが実際の強度に影響すると考えられ、今後各社の観察を行っていきたい。

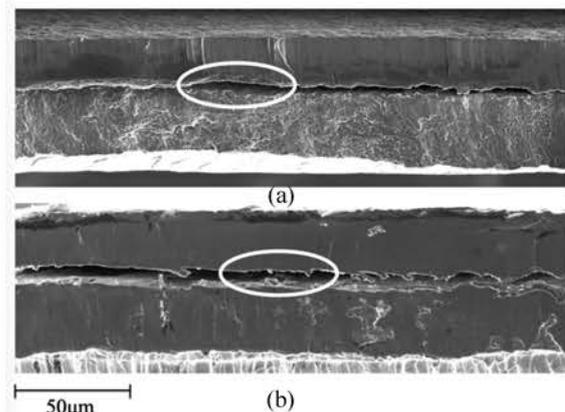


Fig. 3 SEM image of cross section after cutting

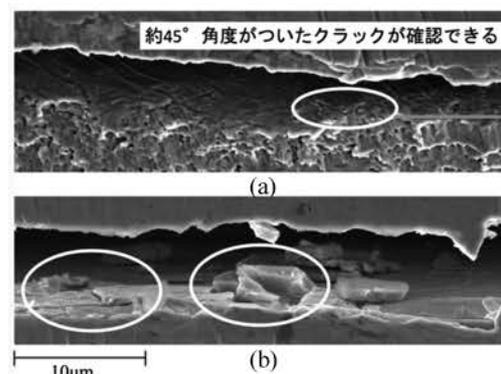


Fig. 4 SEM image of cross section after cutting (high magnification image)

パルス電流測定による 高性能ステンレス鋼/銀シース Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ テープの輸送特性 Transport Properties of High-Performance Stainless Steel/Ag-Sheathed Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ Tapes Measured by Pulsed Current

羅 珺怡, 久米 俊輔, 土屋 雄司, 淡路 智(東北大); 韓 萌, 馬 衍偉 (IEECAS)
LUO Junyi, KUME Shunsuke, TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); HAN Meng, MA Yanwei (IEECAS)
E-mail: luo.junyi.d7@tohoku.ac.jp

1. Introduction

As a kind of high-temperature superconductors (HTSs), iron-based superconductors (IBSs) have great potential for practical use. Among them, the iron-based pnictide, AE_{1-x}K_xFe₂As₂ (AE122, AE: alkaline earth, commonly Ba or Sr) is very promising for high-field applications with the form of superconducting tape or wire. They have high upper critical magnetic field $B_{c2}^{//ab}(0\text{ K})$ over 80 T, low B_{c2} anisotropy is below 2, and moderate critical temperature T_c approximately 38 K [1]. The critical current density (J_c) of IBS tapes has achieved a significant milestone, surpassing $2.5 \times 10^5\text{ A/cm}^2$ (two times of the practical level 10^5 A/cm^2) at 4.2 K and 10 T, by Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ (Ba122) tapes with stainless steel/silver (SS/Ag) composite sheaths [2]. This remarkable progress was enabled by severe plastic deformation, which introduces high-density dislocations and enhances grain coupling.

To analyze the high J_c mechanism of SS/Ag-sheathed Ba122 tapes, systematic measurements of transport J_c are necessary. Due to the relatively high critical current I_c even over 20 K, it is difficult to obtain the detailed transport data over 4.2 K. In this study, we investigated the transport properties of SS/Ag-sheathed Ba122 tapes using the standard four-probe method, with a pulsed current measurement system [3] for the first time. The magnetic field dependence of J_c (J_c - B) was measured up to 24 T at 0° ($B \perp$ tape) and various temperatures.

2. Results and discussions

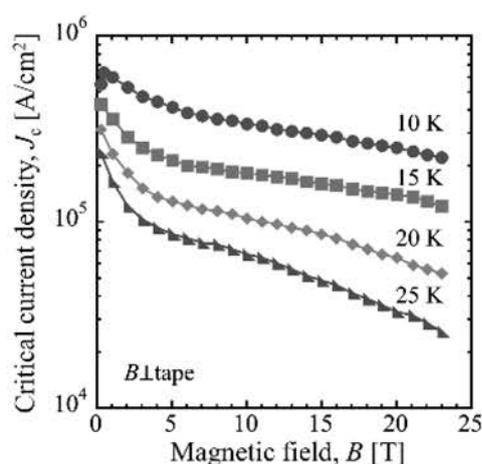


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c at 10 K, 15 K, 20 K and 25 K.

The magnetic field dependence of J_c (J_c - B) was measured from 10 K to 25 K, and the results are given in Fig. 1. The experimental results reveal robust flux pinning with weak magnetic and temperature dependence. At various

temperature, J_c reduces gently with increasing high magnetic field. At 20 K and 11 T, J_c still remains above 10^5 A/cm^2 , demonstrating the potential of SS/Ag-sheathed Ba122 tapes for advanced applications in high-field environments.

Actually, we measured J_c - B both with increasing and decreasing magnetic field to examine the magnetic hysteresis like our previous measurements for Ba122 tapes with other sheaths. Fig. 1 shows the results at decreasing magnetic field. The previous samples usually exhibit evident hysteresis, the difference between J_c values measured at increasing and decreasing magnetic field, and the hysteresis disappears at high-field approximately $8 \sim 10\text{ T}$ [4]. Interestingly, things are completely different for SS/Ag sheathed Ba122 samples. The hysteresis vanishes as low as only 2 T, and the J_c difference is so small, even easy to be neglected before its disappearance. As having been explained by J. E. Evetts *et al.* [5], the origin of hysteresis is the existence of weak links at the grain boundaries. Therefore, the better the grain coupling, the smaller the hysteresis. The reduced hysteresis of SS/Ag sheathed Ba122 tapes comparing to other sheathed ones indicates the improved grain coupling, which weakens the weak-link behavior. It is the key of J_c improvement for Ba122 tapes considering the J_c leap of SS/Ag sheathed ones.

3. Summary

With the help of pulse current measurement system, we were able to measure the transport J_c of high-performance SS/Ag sheathed Ba122 tapes at various magnetic fields and temperatures. The results show strong magnetic field tolerance and stable performance. Unlike other sheath types, SS/Ag-sheathed Ba122 tapes show minimal magnetic hysteresis, indicating better grain coupling and fewer weak links—key to their superior J_c .

References

1. C. Yao et al.: Recent breakthrough development in iron-based superconducting wires for practical applications, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 32 (2019) no. 023002
2. C. H. Dong et al.: Towards high-field applications: high-performance, low-cost iron-based superconductors, *Natl. Sci. Rev.*, Vol. 11 (2024) no.11
3. Y. Tsuchiya et al.: Critical Current Measurements of HTS Tapes Using Pulsed Current in High Fields at Low Temperatures, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 33 (2023) no. 8001105
4. J. Y. Luo et al.: Flux Pinning Properties of 7-Filament Cu/Ag-Sheathed Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ Tapes at 4.2 K, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 33 (2023) no. 8200405
5. J. E. Evetts et al.: Relation of critical current irreversibility to trapped flux and microstructure in polycrystalline YBa₂Cu₃O₇, *Cryogenics*, Vol. 28 (1988) p.641-649

REBCO 薄膜線材の磁束ピンニングの TDGL 解析 – ピン体積分率の効果

TDGL analysis of flux pinning in REBCO thin film tapes – Effect of pinning volume fraction

松本 要 (名大、九工大); 堀出 朋哉 (名大); 吉田 隆 (名大)

MATSUMOTO Kaname (Nagoya Univ., Kyutech); HORIDE Tomoya (Nagoya Univ.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

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

1. はじめに

REBCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) 超伝導薄膜線材は低温・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、薄膜中に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向上するが、薄膜中に存在する多数の酸素欠損や転位などのランダムピンの存在も大きく関わっている。しかし実験的に様々な APC やランダムピンの分布を実現し、 J_c 特性の最適化を行うことは容易なことではない。一方、我々は TDGL シミュレーションによる J_c 予測が実験結果と定量的にも良く一致することを報告してきた。ナノロッド導入による 4.2 K における巨視的ピン止め力 $F_p (= J_c \times B)$ の最大値は 1.5~1.8 TN/m³ と報告されており、ナノロッドと酸素欠損を用いた TDGL シミュレーションによればこの結果を定量的に再現できる。この時のナノロッド導入量は 4 vol.% 程度である。しかし実験において 4 vol.% を超える導入を行うと格子歪増大によって急激な超伝導特性の劣化が起こり、^{1), 2)} 真のナノロッドによる性能を探ることができていない。そこで本研究では、この TDGL 予測手法を用いて実験的には難しい高濃度側のナノロッド体積分率やランダムピンの影響を調べ、強いピン止め力を有するピン止め最適分布を探ることを目指した。これは将来における REBCO 薄膜線材の特性改善における重要な指針になりうると考えている。

2. 実験方法および解析法

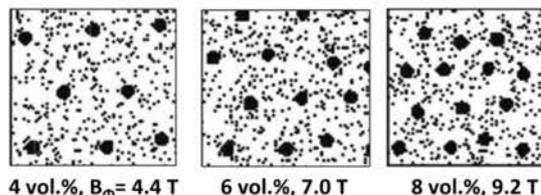
本研究では次の TDGL 方程式 (large λ limit) を用いた。³⁾

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

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、ナノロッドと酸素欠損ランダムピンを計算メッシュ上 (400×100 グリッド) に配置した。ナノロッドは直径 (4.5 nm, 6 nm) や濃度 (4, 6, 8 vol.%) として導入した。酸素欠損濃度は $7-\delta = 6.93$ を想定して 1 水準で計算を行った。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 とし、磁場 B は薄膜面に垂直 (B/c) に印加し $B = 0 \sim 0.25$ の範囲で、また電流 J は $J = 0 \sim 0.12$ の範

囲で与えた。TDGL 方程式は無次元化されており 0 K におけるコヒーレンス長 1.5 nm, GL パラメータ = 100 と仮定すると計算で与えた磁場と電流の最大値は 4.2 K において 37 T と 78 MA/cm² に対応する。

(1) Nanorod diameter = 4.5 nm



(2) Nanorod diameter = 6.0 nm

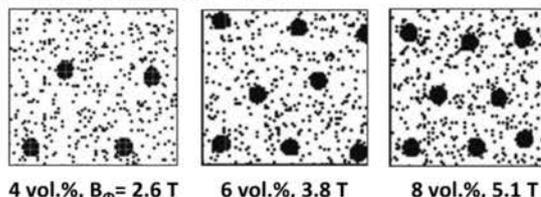


Fig.1 Nanorods and oxygen vacancy distributions in REBCO thin films used in TDGL simulations. These pictures are enlarged portions of a 400×100 calculation grid. The nanorod diameters are assumed to be 4.5 nm and 6.0 nm, and the concentrations are assumed to be 4, 6, and 8 vol.%. The figure shows the matching fields B_Φ . The oxygen vacancies are assumed to be $7-\delta = 6.93$.

3. 結果と考察

Fig.1に示したナノロッドと酸素欠損によるピン止め分布の条件においてTDGLシミュレーションを実行した結果によれば、 F_p 最大値はナノロッド径4.5 nm, 体積分率6 vol.%において約 3.8 TN/m³に達し、8 vol.%では3.7 TN/m³であった。ナノロッド径6 nmにおいては6 vol.%で3.0 TN/m³, 8 vol.%で2.6 TN/m³であった。このように6 vol.%近傍で F_p 値は最大値を示す傾向にある。しかし F_p - B 曲線はそれぞれのマッチング磁場 B_Φ 近傍で強いピークを示しており、ピン止めのマッチング効果が表れている可能性がある。詳細については当日議論したい。

参考文献

1. P. Mele, K. Matsumoto, et al. *Superconductor Science and Technology* 21 (2008) 125017.
2. K. Matsumoto, et al. *Superconductor Science and Technology* 30 (2017) 104006.
3. I. A. Sadovskyy, et al. *Journal of Computational Physics* 294 (2015) 639.

酸化物原料を用いた FF-MOD 法共添加 Y123 薄膜の厚膜化

Increase in thickness of co-doped Y123 films by FF-MOD method starting from oxides

相楽和豊、畠直輝、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, HATA Naoki, MOTOKI Takatori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

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

E-mail: c5624050@aoyama.jp

1. はじめに

RE123 薄膜の作製方法の一つであるフッ素フリー有機酸塩塗布熱分解(FF-MOD)法は、RE123 結晶の成長が非常に速く [1]、常圧下の簡便な焼成装置のみで作製できるため、本質的には量産性が高く、最も工業化に適した手法である。しかし、有効なピンニングセンターが少なく、他の成膜方法で得られる RE123 薄膜に比べて磁場中の J_c が低いことが課題である。我々のこれまでの研究により、Y123 薄膜に Cl と不純物金属 $M(M = \text{Zr, Sn, Hf})$ を共添加することにより Y123 結晶中に生成する非超伝導の $\text{BaMO}_3(\text{BMO})$ 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たが M の添加量の増加とともに結晶性が低下するという問題があった [2]。しかし、最近、我々が開発した RE123 酸化物を原料として調製した MOD 溶液を用いた場合には、 M の添加による結晶性の低下が抑制されることが明らかになった [3]。そこで本研究では、不純物金属添加した RE123 薄膜の厚膜化による実用的な臨界電流特性の実現を目指した。

2. 実験方法

Y123 粉末を直接プロピオン酸に溶解し、乾固後に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。 $M(\text{Zr, Hf})$ 添加には EMOD 塗布型材料を用い、Y211 添加には Y211 粉末をプロピオン酸に溶解し、蒸発、乾固、粉碎により得られた粉末を EtOH, BuOH, 水の混合溶媒に溶かし、これらを Y123(Cl) 溶液に混合した。得られた原料溶液を IBAD 基板の上にスピ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 による相同定と結晶性の評価、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 $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$, 760°C , 1 h で作製した (Cl, Zr) 共添加 Y123 薄膜 (Cl, Zr2-3: 仮焼膜の 2, 3 層目に Zr を Y に対して 0 - 10 mol% 添加) の XRD パターンを示す。いずれの試料でも Y123 の鋭い 00 l ピークが見られ、 c 軸配向した Y123 薄膜が生成したことが確認できた。Fig. 2 に Fig. 1 に示した試料の 40 K, 77 K における J_c の磁場依存性を示す。Zr 3 mol% 添加試料が最も高い $J_c(40 \text{ K}, \sim 4 \text{ T}) \sim 1.7 \text{ MA cm}^{-2}$ を記録した。Fig. 3 に (Cl, Y211) 共添加 Y123 薄膜 (Y211 を Y に対して 0 - 100 mol% 添加) の J_c の磁場依存性を示す。Y211 添加による J_c の向上はみられなかった。講演では、(Cl, M) 共添加 Y123 薄膜の厚膜化の試みと、Ba を補填した $M(M = \text{Zr, Hf})$ 添加試料および熱処理パターンを変えた Y211 添加 Y123 薄膜の臨界電流特性についても報告する。

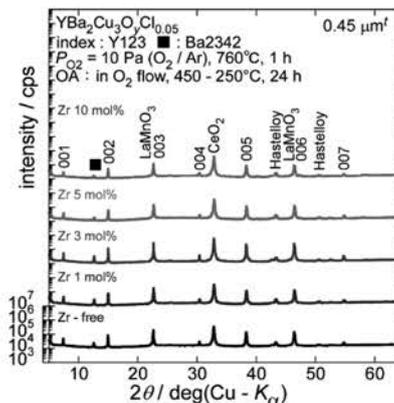


Fig. 1. XRD patterns of (Cl, Zr) co-doped Y123 thin films.

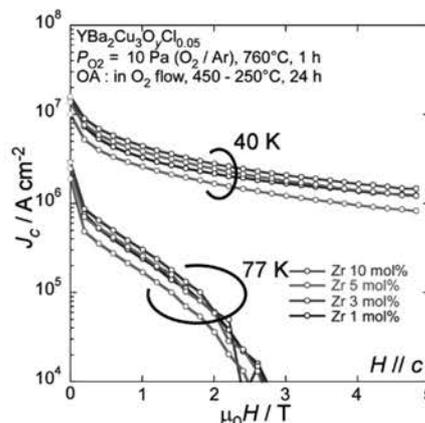


Fig. 2. $J_c - H$ curves of (Cl, Zr) co-doped Y123 thin films at 40 and 77 K.

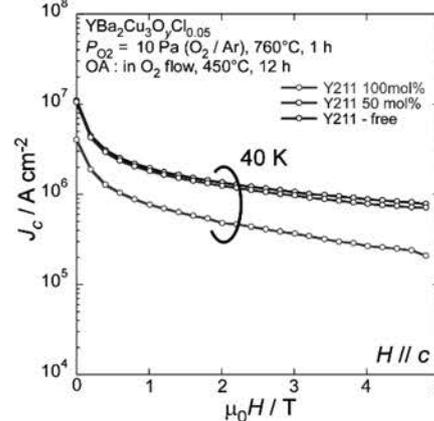


Fig. 3. $J_c - H$ curves of (Cl, Y211) co-doped Y123 thin films at 40 K.

参考文献

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

FF-MOD 法 Gd123 超伝導薄膜の新奇 Gd214 人工ピン導入による高 J_c 化

High J_c for FF-MOD Gd123 superconducting thin films by introduction of new Gd214 APC

石井 涼太, 垂水 聖也, 堀内 柚冶, 三浦 大介(都立大)
 ISHII Ryota, TARUMIZU Seiya, HORIUCHI Yuzuya, MIURA Osuke(TMU)
 E-mail: ishii-ryota@ed.tmu.ac.jp

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($RE123$, $RE = Gd, Sm$ 等)は高温高磁場で高い臨界電流密度(J_c)を有することから、次世代 MRI や電動航空機用モータへの応用が期待されている。この $RE123$ 線材のさらなる J_c 向上には、 $BaMO_3$ (BMO , $M = Zr, Hf$ 等)常伝導析出物を人工ピン止め点(APC)として導入することが有効であり、広く研究されている[1]。しかし、導入量増加に伴う BMO 粗大化が母材結晶性を悪化させ、さらなる J_c 向上を妨げている。

そこで、本研究では BMO に代わる新たな APC として、母材との格子ミスマッチが少ない Gd_2CuO_{4-x} ($Gd214$)に着目した。 $Gd214$ は、 T_c が 18.5 K の超伝導体である。この超伝導体は、 $T_c < T$ のときは BMO と同様に常伝導ピンとして作用する。一方、 $T_c > T$ のときは超伝導ピンとして強力に作用する可能性がある。我々は $LaAlO_3$ 単結晶基板上に $Gd214$ を 1-12vol% まで導入した $Gd123$ 超伝導薄膜を作製し、その結晶性と超伝導特性を評価した。

2. 実験方法

$RE123$ 薄膜の作製には FF-MOD 法を用いた。塗布溶液は Gd: Ba: Cu = 1: 2: 3 の化学量論比で混合した。また、Gd: Cu = 2: 1 の化学量論比で任意の導入量を塗布溶液に追加し、 $Gd214$ の APC 導入を図った。その後、スピコートを用いて 3500 rpm で 30 秒間回転させ均一に塗布し、120 °C で 30 分間乾燥させ、600 °C で 30 分間仮焼した。これを 3 回繰り返し、前駆体を作製した。次に前駆体を N_2 雰囲気中にて 880 °C で 30 分間焼成して結晶成長させた。最後に O_2 雰囲気中、350 °C で 6 時間の酸素アニーリングを行い、酸素ドーブ、結晶を安定化させた。最終的な膜厚は 300 nm であった。

結晶性の評価は XRD、結晶内部の観察は STEM を用いた。 T_c 及び J_c の測定には SQUID を使用した磁気特性測定装置を用いた。磁化の温度依存性は ZFC-FC 測定により算出した。0 T から 7.0 T の J_c は磁化の磁場依存性を測定し、得られた $M-H$ 曲線の磁化の幅から Bean model を用いて推定した[2]。

3. 結果と考察

Fig. 1 に $Gd214$ を導入した $Gd123$ 薄膜と無添加の $Gd123$ および $Gd214$ の XRD パターンを示す。すべての膜で鋭い (00)ピークを確認した。 $Gd123$ の(00)ピークは、 $Gd214$ を導入するほど低角度へシフトし、 c 軸長が増加したことも確認した。

Fig. 2 に $Gd214$ を 1vol% 添加した $Gd123$ 薄膜の TEM 像を示す。原子サイズの影響で Gd 原子と Ba 原子のみ写っており、Cu 原子や O 原子は写っていない。元素分析により黄色い枠で示した結晶が母材の $Gd123$ であることを確認した。また、赤色の枠で示した結晶は格子定数と原子配列から $Gd214$ であると考えられる。この結晶は ab 軸方向に 15-20unit 並んでおり、 c 軸が母材結晶に挟まれる形で導入されていることを複数の場所で確認した。このことから、この結晶は母材の ab 軸に対して水平なプレート状に導入されていると考えられる。

Fig. 3 に 4.2 K, 40 K, 77.3 K における $Gd214$ 添加 $Gd123$ 膜、無添加の $Gd123$ および $Gd214$ 膜の J_c -B 特性を示す。APC 添加膜はすべての磁場と温度で無添加膜を上回る特性を示した。最も良い特性を示したのは $Gd214$ を 2vol% 添加した膜で、従来の BMO 添加膜を上回る性能を示した。発表では、その他の超伝導特性の詳細についても報告する。

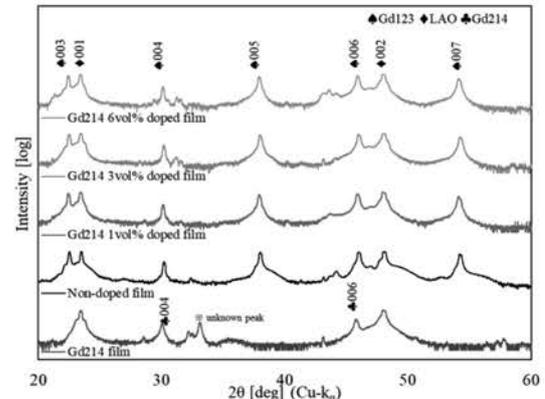


Fig.1 XRD patterns for Non-doped Gd123 and Gd214 film and Gd214 doped Gd123 films.

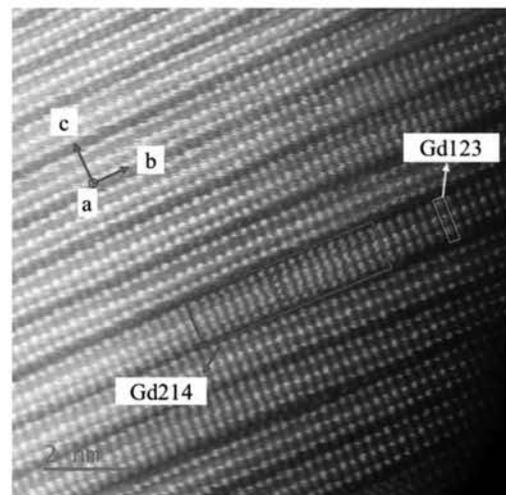


Fig.2 TEM image of 1vol% Gd214 doped Gd123 thin film.

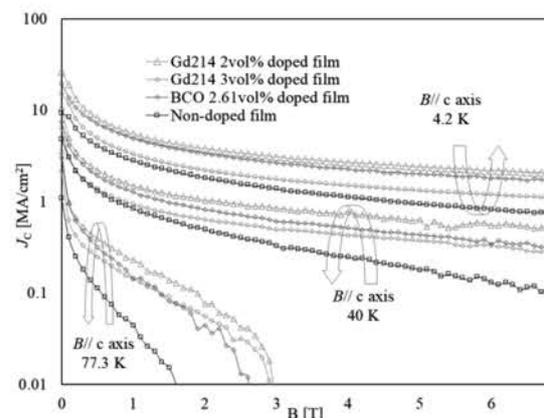


Fig.3 J_c -B properties for Non-doped and APC doped Gd123 thin films.

参考文献

1. T. Motoki, et al.: Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 015006
2. C. P. Bean, Rev. Mod. Phys. 36 (1964) 31.

Ca 組成が $(Y_{1-x}Ca_x)Ba_2Cu_3O_y$ 線材の超伝導特性に及ぼす影響

The influence of Ca content on the superconducting properties for $(Y_{1-x}Ca_x)Ba_2Cu_3O_y$ CCs

中島 恒成, 藤本 竜那, 大木元 勇貴(成蹊大); 三浦 正志(成蹊大, JST-FOREST)

NAKAJIMA Kosei, FUJIMOTO Ryona, OGIMOTO Yuki(Seikei Univ.); MIURA Masashi (Seikei Univ., JST-FOREST)

E-mail: dm246312@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物超伝導体である $REBa_2Cu_3O_y$ (REBCO) 線材は高い臨界温度(T_c)と臨界電流密度(J_c)を有することから、マグネット応用などに期待されている。しかし、応用に向けては更なる磁場中 J_c 特性の向上が必要とされる。これまで我々は、Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法を用いて $(Y_{0.77}Gd_{0.23})Ba_2Cu_3O_y$ ((Y,Gd)BCO)線材に対して、「磁束ピン止め点導入技術」と「キャリア密度制御による対破壊電流密度($J_d \propto 1/\lambda_{ab}^2 \zeta_{ab}$)向上」を融合させることで、磁場中 J_c 特性を飛躍的に向上させてきた[1,2]。特に REBCO 材料においては、ホール濃度を制御することが J_d 及び J_c を向上させるために重要である。ホール濃度を増加させる方法の一つとして、Y サイトに Ca を一部置換する方法がある[3]。

本研究では、TFA-MOD 法を用いて $(Y_{1-x}Ca_x)Ba_2Cu_3O_y$ ((Y,Ca)BCO)線材を作製し、更なるホール濃度が(Y,Ca)BCO 線材の超伝導特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

本研究では、TFA-MOD 法を用いて、Ca 組成の異なる $(Y,Ca)BCO$ ($x = 0.025, 0.05$)線材を金属基板上に作製した。各線材のホール濃度は、Ca 組成及び酸素アニール条件を変化させて制御した。作製した(Y,Ca)BCO 線材の超伝導特性は、四端子法を用いて測定した。

3. 実験結果

Table 1 に本研究で作製した(Y,Ca)BCO 線材の諸特性を示す。 $p = 0.174$ の(Y,Ca)BCO 線材において、最も高い T_c 及び 77 K における自己磁場 J_c ($J_c^{s.f.}$)を得た。**Fig 1** に、(Y,Ca)BCO 線材の T_c および $J_c^{s.f.}$ (77 K)の p 依存性を示す。比較のために TFA-MOD 法 REBCO 薄膜の特性を示す。**Fig 1** (a)より $p = 0.16$ (最適ドーピング)に比べてオーバードープである(Y,Ca)BCO 線材は低い T_c を示すことが分かる。一方、**Fig 1** (b)より REBCO 薄膜および(Y,Ca)BCO 線材ともに $p=0.175$ 付近にて高い $J_c^{s.f.}$ (77 K)を示した。

当日は、より詳細な実験結果をもとに更なるホール濃度が(Y,Ca)BCO 線材の超伝導特性に及ぼす影響について報告する。

Table 1 Superconducting properties for (Y,Ca)BCO CCs with different p .

Materials	p	T_c^{zero} [K]	$J_c^{s.f.}$ (77 K) [MA/cm ²]
$(Y_{0.975}Ca_{0.025})BCO$	0.174	88.7	2.53
	0.181	88.4	2.38
	0.193	97.0	1.63
$(Y_{0.95}Ca_{0.05})BCO$	0.201	84.9	0.57

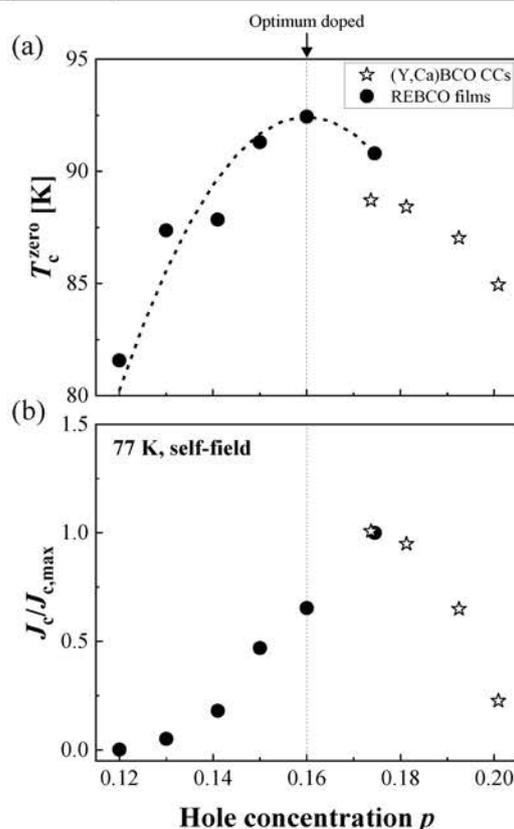


Fig.1 Hole concentration p dependence of (a) T_c^{zero} and (b) $J_c^{s.f.}$ at 77 K for (Y,Ca)BCO CCs.

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 (FOREST) JPMJFR202G の助成を受け実施したものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 (23H01453 及び 23K26147) の助成を受け実施したものである。

参考文献

- [1] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.
- [2] M. Miura *et al.*, *Nature Materials* (2024) **23** 1370-1378.
- [3] Kucera J. T. *et al.*, *Phys. Rev. B*, **51** (1995) 8582.

Gurevich-Cooley による粒界ピンニングモデルの一軸異方的超伝導への拡張 –Ba122 線材における I_c の磁場ヒステリシスの理解に向けて–

An Extension of Gurevich-Cooley's Grain-Boundary Pinning Model to Uniaxial Superconductors –Toward Understanding Magnetic-Field Hysteresis of I_c in Ba122 Tapes–

岡田 達典 (九工大院工)

OKADA Tatsunori (Dept. of Mater. Sci. & Eng., Kyutech)

E-mail: okada.tatsunori588@mail.kyutech.jp

1. はじめに

$Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ (“Ba122”) テープ線材は、高い上部臨界磁場 $B_{c2}^{\parallel c}(0\text{ K}) \simeq 90\text{ T}$ と小さな有効質量異方性 $\gamma = \sqrt{m_c^*/m_{ab}^*} \simeq 3$ を有する。PIT 法での低コスト製造が可能で強磁場応用の有力線材の一つであるが、臨界電流密度の印加磁場依存性 $J_c(H)$ に顕著なヒステリシスが観られる [1-4]。 $J_c(H)$ ヒステリシスは超伝導マグネットに好ましくなく、その理解と抑制が重要である。

粒界のある超伝導体における磁場ヒステリシスは、強い粒内ピン止めが粒界に成す有効磁場 [5] でよく理解できるが、Ba122 線材では増磁過程の臨界電流密度 $J_c(H_{inc})$ が増大する磁場領域がある。非単調な $J_c(H_{inc})$ は、粒界ピン-粒内ピンの相互作用 (Gurevich-Cooley (G-C) モデル [6]) の描像と似ているが、Ba122 線材では $H \parallel c$ と $H \parallel ab$ とで挙動が異なる。G-C モデルには異方性は考えられていないため、本研究では Ba122 の有効質量異方性を取り入れるべく、G-C による議論 [6] を一軸異方的超伝導の場合へと拡張し、 $H \parallel c$ と $H \parallel ab$ の挙動の違いを探った。

2. Gurevich-Cooley モデルの概要

粒界 (面ピンとみなす) を跨ぐ局所 J_c が比較的高い場合、粒界に侵入した渦糸は Josephson 渦糸と Abrikosov 渦糸 (A 渦糸) の中間的な Abrikosov-Josephson 渦糸 (A-J 渦糸) となる。G-C モデルでは A-J 渦糸-粒界、A-J 渦糸-粒内 A 渦糸の相互作用が考察され、以下の 3 磁場領域に大別される。

(1) 極低磁場: A-J 渦糸-粒界の要素的ピン止めに律速

粒界による A-J 渦糸の Josephson 接合エネルギー F_J と超伝導秩序変数の位相変調に起因する磁気エネルギー F_M から、A-J 渦糸の要素的ピン止め力 $f_p \sim (F_J + F_M)/\xi_{ab}$ が算出でき、 $J_c(H) \propto 1/\sqrt{H}$ の急減少をもたらす。

(2) 低磁場: A-J 渦糸-A 渦糸間の磁気反発が支配

粒内に強くピン止めされる A 渦糸が増加する。この A 渦糸との磁気相互作用によって A-J 渦糸の運動が抑制され、(1) に代わって $J_c(H) \propto \sqrt{H}$ 的な J_c 増大が生じる。

(3) 高磁場: A 渦糸-粒内ピンの要素的ピン止めに律速

粒内 A 渦糸のピン止め自体が弱まり、(2) の J_c 増大も減退する。粒内ピン止めが主であり、ヒステリシスは消失する。

3. 一軸異方性の導入の概要

詳細は割愛するが、 $H \parallel c$ から $H \parallel ab$ へ変えた場合、

(i) 有効質量異方性が、コヒーレンス長の変化 ($\xi_{ab} \rightarrow \xi_c$) や磁場侵入長の変化 ($\lambda_{ab} \rightarrow \lambda_c$) を介して、凝縮エネルギー相互作用や磁気エネルギー相互作用に反映

(ii) A-J 渦糸をピン止めする粒界面が変わるため、想定すべき

幾何サイズや粒界を跨ぐ方向の局所 J_c が変化

などが生じる。これらを G-C モデルの表式 ($H \parallel c$ に相当) に取り込み、 $H \parallel ab$ に対する表式を導出した。

4. 結果と考察・課題

Fig. 1 に $J_c(H_{inc})$, $J_c(H_{dec})$ の実験値 [2] と、本研究での計算結果 (物性値は測定量を使用、未定パラメータは調整) を比較した。同じパラメータで $J_c(H_{inc} \parallel c)$, $J_c(H_{dec} \parallel c)$, $J_c(H_{inc} \parallel ab)$, $J_c(H_{dec} \parallel ab)$ を大まかに再現できている。このことから、Ba122 線材の $J_c(H)$ ヒステリシス挙動は、粒界有効磁場モデル [5] に A-J 渦糸-粒界-粒内 A 渦糸の相互作用 [6] の寄与を取り込み、更に有効質量異方性を反映することで、 $J_c(H \parallel c)$ と $J_c(H \parallel ab)$ の異なる挙動を包括的に説明できる可能性が示唆された。

定量性の確認と他の温度・角度条件への拡張が課題である。

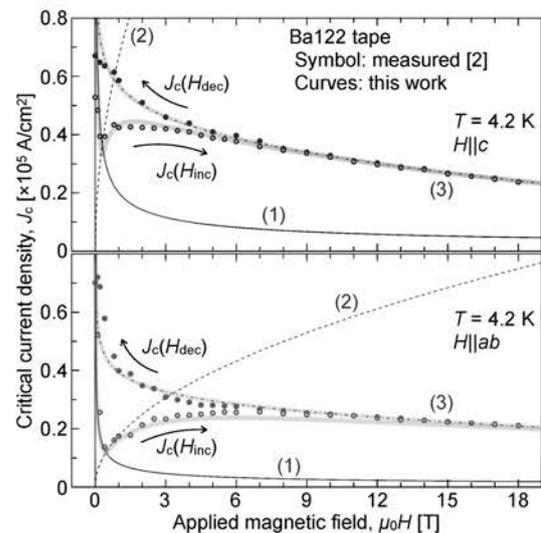


Fig.1 Measured (symbols [2]) and calculated (curves) J_c of Ba122 tape as a function of applied magnetic field along $H \parallel c$ and $H \parallel ab$. Solid, dashed, and dot-dashed curves are expected behaviors in (1), (2), and (3) mentioned in main text.

参考文献

1. M. Bonura *et al.*, Supercond. Sci. Technol., Vol. **33** (2020) p.095008.
2. J. Luo, T. Okada, S. Awaji, C. Liu, Y. Ma, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. **33** (2023) p.8200405.
3. N.M. Strickland *et al.*, Supercond. Sci. Technol., Vol. **37** (2024) p.075017.
4. J. Luo, T. Okada, S. Awaji, C. Liu, Y. Ma, J. Appl. Phys., (2025) *in press*.
5. J.E. Evetts and B.A. Glowacki, Cryogenics, Vol. **28** (1988) p.641.
6. A. Gurevich and L.D. Cooley, Phys. Rev. B, Vol. **50** (1994) p.13563.

量子コンピュータ用大型希釈冷凍機の開発

Development of large dilution refrigerators for quantum computers

野末竜弘、木村豊、斎藤政通、大塚洋一(アルバック・クライオ(株)); 西尾樹、藤原裕也((株)アルバック)
 NOZUE Tatsuihiro, KIMURA Yutaka, SAITOH Masamichi, OOTUKA Youiti (ULVAC CRYOGENICS Inc.); NISHIO Tatsuki,
 FUJIWARA Yuya (ULVAC)
 E-mail: tatsuihiro_nozue@ulvac.com

1. はじめに

量子コンピュータは、その並列計算能力により、従来のコンピュータでは困難であった複雑な問題を解決できる可能性を秘めており、様々な分野での応用が期待されている。量子コンピュータ市場は、政府主導の研究開発投資の活発化と、企業による量子コンピューティングへの関心の高まりを背景に、著しい成長を遂げており、我が国の市場規模は 2023 年には約 8 億 8,540 万米ドル評価され、今後の技術革新と実用化の進展に伴い、2032 年には 126 億 2,070 万米ドルに達すると予測されている。この市場成長は、創薬、材料科学、金融工学、人工知能といった多様な分野における量子コンピュータの応用に対する期待感の表れである。

超伝導量子コンピュータの量子ビットは、コヒーレンス時間を維持するために極めて低い動作温度を必要とする。その動作温度は 20 mK 以下の超低温領域であり、このような極低温環境を実現するために希釈冷凍機が用いられる。希釈冷凍機は ^3He と ^4He の混合液体が、0.87 K 以下で ^3He 希薄相(D 相)と ^3He 濃厚相(C 相)に相分離することを利用して、低エントロピーの C 相から高エントロピーの D 相への ^3He の移動により冷却を得る。希釈冷凍機の冷却能力は、この ^3He の移動量(循環量)と、混合室(Mixing Chamber, MC)へ入ってくる ^3He の温度に依存する。量子コンピュータ応用では、大きな冷却能力が求められるため、 ^3He 循環量は 1000 $\mu\text{mol/s}$ 以上の大きさとなる。またこの応用分野では、冷媒液体が不要ないわゆるドライ型であること、低振動なパルスチューブ冷凍機を使用することが求められる。

量子コンピュータの動作中には配線を通して流入する熱と、低温部に置かれるアッテナータ、アイソレータ、パラメトリックアンプ等の発熱があり、希釈冷凍機の冷却能力はシステムの安定性を維持する上で重要なファクターである。やや古い論文であるが ETH の 2019 年の研究では、50 量子ビットの量子コンピュータでは MC プレートに 5.6 μW 、Cold プレートに 66 μW 、Still プレートに 400 μW の熱負荷があるとされ、20 mK において 19 μW の冷凍能力を有する希釈冷凍機が 150 量子ビットの動作を可能にすると報告されている[1]。この報告から 1000 量子ビットの場合、MC プレートに約 90 μW の熱負荷がかかると推測される。量子コンピュータの多量子ビット化は急速に進んでおり、実際 IBM は 2023 年 12 月に 1121 量子ビット搭載の「Condor」を発表した。今後さらに高い冷却能力を持つ希釈冷凍機が求められ、その開発が喫緊の課題となっている。さらに、量子コンピュータの複雑化に伴い、希釈冷凍機的设计には、冷却空間の拡大や、多数の量子ビットを制御するための低温配線の効率的な管理が求められる。

現在の量子コンピュータ向け希釈冷凍機は、経済安全保障にも関わる基幹部品であるが、欧米企業が主導的な地位を確立し、世界中の主要な研究機関や企業で広く採用されている。このような市場環境の中、我々は、国産初となる量子コンピュータ向けの大型希釈冷凍機 UDR-1000 を開発した。本発表では、この UDR-1000 について紹介する。

2. アルバック・クライオ製量子コンピュータ向け大型希釈冷凍機の開発

希釈冷凍機 UDR-1000 は、MC プレート下に直径 500 mm、高さ 510 mm の量子ビットの設置空間を持ち、室温トッププレートから最低温 MC プレートまで信号線を通すための 85 mm 角のサイドローディングポートを 6 箇所備えており、複雑な配線要件に対応可能な設計となっている。本装置は、アルバック製の高性能 1.35 W パルスチューブ冷凍機を 2 台搭載し、アルバックグループで完結した装置であることが特徴である。

ターボ分子ポンプ 3 台で最大 2000 $\mu\text{mol/s}$ の ^3He 循環能力を有する。到達最低温度は 13.1 mK、冷却性能は、20m K において 13.6 μW 、100m K において 780 μW を実現している。本装置は、2024 年 3 月に大阪大学へ設置された。

3. まとめ

量子コンピュータ市場の急速な拡大は、高性能な極低温技術への需要を増大させている。アルバック・クライオは国産初の量子コンピュータ向け希釈冷凍機 UDR-1000 を開発した。国産技術による高性能希釈冷凍機の開発と導入は、これまで海外製品に依存してきた日本の量子コンピュータ研究開発基盤の強化に大きく貢献するものと考えられる。

装置の詳細な特徴については、会場において報告する。

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】【JPMJMS2067-10】の支援を受けたものです。



Fig.1 Dilution refrigerator, UDR-1000

参考文献

1. S. Krinner, et al.: EPJ Quantum Technol., Vol. 6 (2019) p.2

短絡電流試験時の歪みゲージ測定

Strain gauge measurement of short-circuit current experiments

神田 昌枝, 山本 実奈, 仁田野 陽菜, IVANOV Yury, 渡邊 裕文, 山口作太郎(中部大学)

KANDA Masae, YAMAMOTO Mina, NITANO Hina, IVANOV Yury,
WATABAE Hirofumi, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

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

1. はじめに

現在、本研究グループでは、二種類の超伝導テープ線材(住友電工製 Bi2223, 各社の RE123)の短絡電流試験を継続^{1, 2)}している。短絡電流を流すと短時間で超伝導テープ線材の温度が上昇し、RE123 線材では臨界電流の 15 倍程度を流すと焼損破壊した。破壊する場所はほぼ決まっており、銅電極取付部付近が多く、温度上昇による線材膨張によって歪が大きくなる部分に破壊は集中していた。実際にビデオカメラで観測すると、銅電極取付部付近で超伝導テープ線材は大きく変形した。つまり、このような歪が発生しなければ、超伝導テープ線材は大きな短絡電流に耐えることができることを示唆している。そこで本研究では、短絡電流による温度上昇、膨張と歪測定を行うことにした。具体的には、超伝導テープ線材にシリコン p 型半導体歪ゲージと金属箔歪ゲージを貼付け、オシロスコープで観測³⁾を行った。なお Bi2223 超伝導テープでは臨界電流の 20 倍以上の短絡電流でも焼損はしなかった。

2. 歪ゲージによる測定システム

歪ゲージ測定は通常、データロガーを用いて測定を行っており、短時間観測はこれまで行われていない。本研究ではシリコン半導体歪ゲージを用いて直接オシロスコープでの観測を行った。これは従来から用いられてきたブリッジ回路による差分回路ではなく、新型アナログ差分回路³⁾を使い、高感度でアンプ不要で直接オシロスコープに接続し、測定を行った。更に、この回路の特長は歪測定を行うと同時に歪ゲージ抵抗測定を四端子法で行えることである。図 1 に新型アナログ差分回路による歪測定回路³⁾を示す。

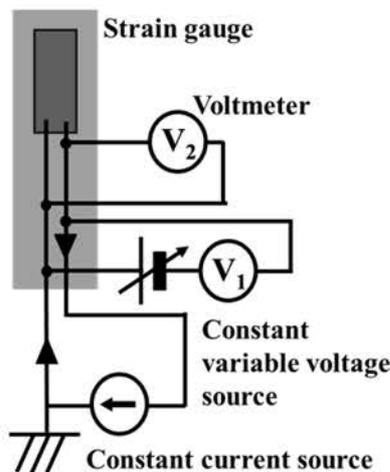


Fig. 1 New analogy difference circuit for the strain gauge; the resistance and strain measurement system³⁾

V_1 で歪測定を行い、 V_2 で歪ゲージの抵抗値を測定する。シリコン半導体歪ゲージは低温では温度に敏感であり、この性質を利用して温度計測にも利用することを想定している。ま

た、金属箔歪ゲージも同じ新型アナログ差分回路を組み込んで、半導体歪ゲージの校正に利用する予定である。更に、パルス通電試験の前に線材に静的な歪みを与え、静的校正実験を予定している。

3. 予備実験の結果

以上の準備後にテスト実験を行った。図 2 に実験結果をオシロスコープの画面コピーで示す。RE123 超伝導テープ線材の片方を銅ブロックで止めて、もう一方端を外力で揺すった時の信号波形である。時間軸と縦軸の値は図の通りであり、サンプリング時間は 200 マイクロ秒、縦軸は DC mode で測定している。歪ゲージ抵抗値は 120 Ω ほどであり、電圧としては 1.2 V を出力する。一方、歪ゲージ出力は差分が取られているため、低い電圧となり、オシロスコープの感度を上げた。

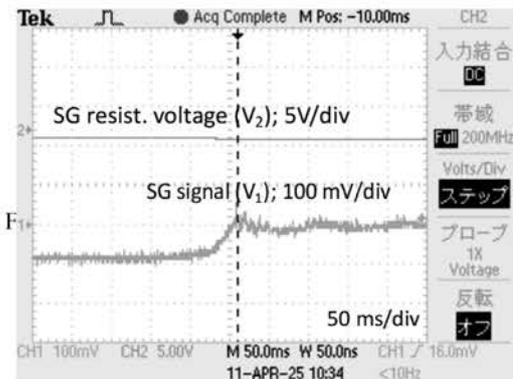


Fig. 2 Oscilloscope waveforms of the SG signal (V_1) and the SG resistance voltage (V_2) of the test experiment

現在、各種校正実験及び超伝導テープ線材での短絡電流試験などの準備を行っている。なお利用した 2 つの歪ゲージは共和電業製であり、シリコン半導体 p 型歪ゲージを利用している。そして、校正実験を通じてゲージ率の温度依存性を実験的に求めているが、ブリッジ回路を利用した結果とは部分的に一致しないようであり、これについての原因も述べる予定である。

参考文献

- 仁田野 他, 「パルス電流通電時の HTS テープ線材の抵抗時間変化と臨界電流について」電気学会全国大会, 302C-2, 5-110, March, 2025
- S. Yamaguchi et al., "A Short-Circuit Experiment of High-Temperature Superconductor Tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 5, 2024, Art. no. 8000805
- 山本 他, 「半導体歪ゲージによる低温域での高感度・高精度測定」電気学会全国大会, 412C-2, 1-043, March, 2025

超伝導体内部に侵入した水素が引き起こす量子現象

Quantum phenomena induced by hydrogen entering a superconductor

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

1. はじめに

水素は質量が最も小さいためヘリウムと並んで強い量子性を示す。例えば金属内に侵入した水素は、離散的エネルギー準位の形成やトンネル拡散などの量子的振る舞いを示すことが常伝導状態では確認されている。我々は超伝導体中の水素のトンネル効果に注目し研究を行っている。母金属が超伝導転移するとフェルミ面に超伝導ギャップが出現するため、水素が周囲の電子系より受ける相互作用は大きく低減する [1,2]。これにより超伝導体中の水素が示す量子的振る舞いも、常伝導状態から大きく変化すると予想される。例えばトンネル拡散については常伝導状態に比べ指数関数的に増大すると理論的には指摘されている [1,2]。しかし、超伝導転移した金属内の水素の量子的振る舞いについての実験的研究はほとんどない。そこで、我々はこれを明らかにするため、超伝導ジョセフソン接合に水素を吸着あるいは吸蔵させ、そのジョセフソン電流の変化より水素の量子的振る舞いを調べてきた。その結果、ジョセフソン電流は水素の存在で大きく変化することがわかり、これは水素の量子性に起因すると考えられる [3,4]。さらに高濃度に水素を吸蔵した PdHx 超伝導では水素(プロトン)のトンネルにより抵抗が発生することを報告している [5]。

そこで本研究では理論で指摘されるように、超伝導転移により金属内水素のトンネル拡散が劇的に増大するのかわ明らかなることを目的に、下記に説明する振動ワイヤ法(VW法)や水晶振動子法を用いて水素吸蔵超伝導金属の特性変化を調べたので、その結果について報告する。

2. 実験方法および実験装置

まず本実験で利用した VW 法について説明する。図 1 に示すように試料ワイヤを磁場 H 中に置く。ワイヤに流す交流電流の周波数とワイヤの固有振動数が一致した時、共振が発生して誘導起電力が極大となる [6]。つまり、交流電流の周波数を変化させながらワイヤの両端にかかる電圧を測定するとワイヤの共振が観測できる。ワイヤ内で水素がトンネル拡散する場合、周囲の格子や電子系と相互作用することにより内部摩擦が発生するため、摩擦係数 γ は大きくなると予想される [7]。したがって常伝導状態から超伝導状態に転移することで、理論的に指摘されるように水素トンネルが増大すればワイヤ内の γ 値は大きくなるはずなので、共振の線幅は広がると予想される。そこで水素の有無による共振曲線の変化を追跡する。

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

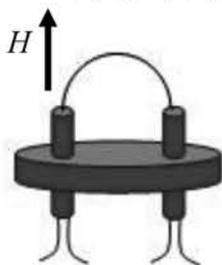


図 1: VW 装置模式図

3. 実験結果

図 2 に(a)Pure Nb ワイヤと、(b)高温であらかじめ水素を吸蔵させた NbH_{0.02} ワイヤによる測定で得られた共振周波数及び内部摩擦 $1/Q$ の温度変化である。それぞれ、超伝導転移によるワイヤ内への磁束侵入によって共振特性が大きく変化する。 Q^{-1} の値を比較すると、磁束液体—グラス相転移温度は水素を吸蔵させている試料の方が低温側へシフトしていることが分かる。また、超伝導転移後の両試料における Q^{-1} 値を比較すると、NbH_{0.02} ワイヤの方が小さくなっている。これは NbH_{0.02} ワイヤの方が超伝導状態での内部摩擦が大きいことを示唆している。本講演ではこの詳細について報告する。

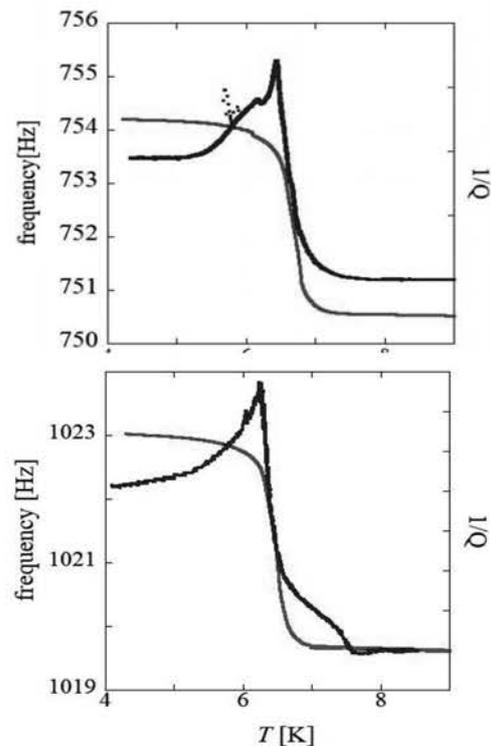


図 2. Nb(上)と NbH_{0.02}(下)ワイヤにおける共振周波数と Q^{-1} 値の温度変化

参考文献

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

高純度銅線を用いた低温・低発熱ステッピングモーターの 11K 以下における発熱特性

Characteristics of a Cryogenic Low-Heat-Dissipation Stepping Motor Using High-Purity Copper Windings Operating Below 11 K

秋澤 涼介, 相澤 耕佑(東大); Ghigna Tommaso(高工研); Hoang Thuong(ミネソタ大); 飯田 光人(たすく);
草間 光治(エイ・イー・エス); 前田 明日香, 松村 知岳, 中川 潤(カブリIPMU); 中嶋 秀樹(多摩川精機);
大崎 博之, 奥村 皐月(東大); 桜井 雄基(諏訪理科大); 高久 諒太(岡山大); 寺尾 悠(京大);

AKIZAWA Ryosuke, AIZAWA Kosuke (UTokyo); GHIGNA Tommaso (KEK); HOANG Thuong (Univ. of Minnesota, Twin Cities);
HIDA Teruhito (Tasuku inc.); KUSAMA Mitsuharu (AES); MAEDA Asuka, MATSUMURA Tomotake, NAKAGAWA Jun (Kavli
IPMU); NAKAJIMA Hideki (TSC); OHSAKI Hiroyuki, OKUMURA Satsuki (UTokyo); SAKURAI Yuki (Suwa Univ. of Sci.);
TAKAKU Ryota (Okayama Univ.); TERAU Yutaka (Kyoto Univ.)

E-mail: ryosuke.akizawa@ipmu.jp

1. 概要

ステッピングモーターはシンプルな回路で正確な位置決めが可能のため、宇宙機上の機械機構にも利用される。しかし、従来の民生品は機上の冷凍環境で運用する際に、軸受にグリスや浸透潤滑を施せず、また冷凍能力に対して発熱が大きい課題があった。そこで真空低温環境において低発熱 (<10 mW)かつ十分なトルク(>57 mN m)で動作するモーターとして、高純度銅線コイルとガラスエポキシシャーシおよび無潤滑軸受を組み合わせたステッピングモーター¹を作成し、発熱評価試験を行ってきた[1][2]。本研究では 11 K 以下の冷却下でモーターを回転させた際に生じる発熱を実験的に見積もり、回転周波数および励磁電流の変化によって発熱要因を分解した。結果として金属軸受における軸受摩擦損もしくは回転子永久磁石がつくるヒステリシス損が支配的であることを明らかにした。

2. 実験方法

Fig. 1 左図に実験装置の概観を示した。モーターはアルミ製治具に固定し、ステンレス製中空円筒で支持して冷凍機のコールドプレートに固定した銅板に取り付けた。系全体は 4K-GM 冷凍機で冷却した。モーターを励磁電流 375 mA~1170 mA、回転速度 0.75 rpm~4.5 rpm の範囲で連続運転させたときの温度変化を、電磁鋼板に取り付けた校正済みダイオード温度計で計測した。Fig. 1 右図の赤線に示すように測定値から発熱による温度上昇を集中熱容量モデルを仮定し関数フィットで推定した。この温度上昇 ΔT を、予備実験で得た校正曲線により発熱に換算した。同様の測定を励磁電流と周波数を変化させながら繰り返した。また、Fig.2 のように平衡温度に達した後、励磁をとめ、直流電流による四端子測定で相抵抗を測定し、銅損を独立に見積もった。

3. 実験結果と考察

Fig. 3 に励磁電流 1170 mA における発熱の回転周波数依存性を示した。ステッピングモーターの発熱は、軸受摩擦損、銅損、ヒステリシス損、渦電流損の 4 つに分解でき、各要因は異なる周波数依存性を示す[2]。Fig. 3 から回転周波数の一次の成分であるヒステリシス損または摩擦損²が支配的であることが得られた。また同図に回転周波数を 1.50 rpm または 2.25 rpm に固定した場合での発熱の電流依存性も示した。ただし温度上昇による高純度銅線の抵抗値変化[3]による銅損の影響を差し引いた値を示した。測定値の不確かさ 1σ の範囲内で電流依存性がないことから、主要な発熱要因は軸受に

おける軸受摩擦損または回転子永久磁石によるヒステリシス損であると考えられる。さらなる低発熱化には軸受摩擦損の低減が効果的で、固体潤滑の適用、セラミック軸受への換装、軸方向予圧の調整などが有効であることが示唆される。

4. 結論

本研究では、冷却環境下において低発熱で動作するステッピングモーターの 11 K 以下での発熱特性を調べ、周波数および電流依存性から発熱要因を分解した。その結果、2.25 rpm 以下の低速域では高純度銅線コイルと絶縁体シャーシによって 10 mW 以下を達成できることを実験的に示した。また軸受摩擦損または回転子永久磁石によるヒステリシス損が支配的であることを明らかにし、さらなる低発熱化には摩擦損の低減が有効だと示唆する結果を得た。

参考文献

1. T. Iida, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 105 (2023) p.77
2. T. Iida, et al.: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1301 012006 (2024)
3. C.A. Thompson, W.M. Manganaro and F.R. Fickett Cryogenic properties of copper (1990)
<https://www.copper.org/resources/properties/cryogenic/>

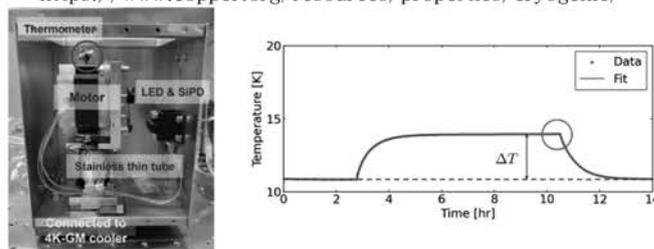


Fig. 1 Cross-section of the cryostat setup (left) and temperature profile during motor operation at 0.75 rpm with an excitation current of 1170 mA (right).

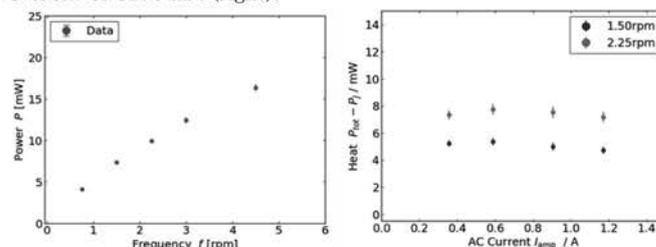


Fig. 2 Frequency dependence of heat dissipation at a constant excitation current of 1170 mA (left) and current dependence of heat dissipation at fixed frequencies of 1.50 and 2.25 rpm (right).

¹ 多摩川精機 2 相モーター TS3690N1E を元にした。

² 粘性摩擦項は低速域のため十分に小さいと仮定した。

液体窒素温度における磁気シールド用軟磁性材料の磁気特性評価

Evaluation of magnetic properties of soft magnetic materials for magnetic shielding at liquid nitrogen temperature

白石 智也, 川原 健太郎, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大)

SHIRAIISHI Tomoya, KAWAHARA Kentaro, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama University)

E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

1.はじめに

地球温暖化対策として電気自動車(EV)が注目されているものの、充電時間の長さが問題となっている。そこで我々はEVの急速充電化を目指して、地上側に超電導コイルを用いた非接触給電システムを提案している[1]。本提案システムを高効率で運用するためには、コイル背面に磁気シールド用として軟磁性材料を配置する必要がある。特に、地上側超電導コイルでは、軟磁性材料を含めて冷却する可能性があるため、極低温下において高透磁率かつ低損失な軟磁性材料を選定する必要がある。その一方で、極低温下での軟磁性材料の磁気特性は十分に明らかにされていない。そこで本研究では、小型の単板磁気試験器を用いて、液体窒素温度でのナノ結晶軟磁性材料やアモルファス合金、パーマロイ、電磁鋼板、フェライトの磁気特性を評価した。

2.実験条件

本研究では小型単板磁気試験器(SST: Single Sheet Tester)を用いて測定を行った。小型 SST の外観および構造を Fig.1 に示す。単板磁気試験器は、軟磁性材料に磁場を印加するための励磁コイル、軟磁性材料内部の磁界および磁束密度を測定するための H コイルおよび B コイルで構成される。本実験では小型 SST を用いて、ナノ結晶軟磁性材料やアモルファス合金、パーマロイ、電磁鋼板、Mn-Zn フェライトの磁気特性を常温(RT: Room Temperature)および液体窒素温度(77 K)において測定した。なお、測定周波数は 50 Hz である。ここで、高磁場領域における磁気特性を正確に測定するため、B コイルの誘導電圧が正弦波となるように励磁電流波形を制御した。

3.結果および考察

Fig.2 に、RT および 77 K におけるナノ結晶軟磁性材料の磁気特性測定結果の比較を示す。ここで、Fig.2(a)はナノ結晶軟磁性材料の最大磁束密度 B_m に対する比透磁率 μ_r を示し、Fig.2(b)はナノ結晶軟磁性材料の最大磁束密度 B_m に対する鉄損 W を示している。Fig.2(a)より、77 K におけるナノ結晶軟磁性材料の飽和磁束密度は、常温に比べ増加した。また、Fig.2(a)より、比透磁率のピーク値が 0.5 T において約 15% 低下したのに対し、Fig.2(b)より、鉄損は温度による変化がほとんど見られなかった。

Fig.3 に、RT および 77 K におけるナノ結晶軟磁性材料、アモルファス合金、パーマロイ、電磁鋼板、Mn-Zn フェライトの鉄損の比較結果を示す。Fig.3 より、77 K における各軟磁性材料の鉄損は、Mn-Zn フェライト、電磁鋼板、パーマロイ、アモルファス合金、ナノ結晶軟磁性材料の順に低減した。ここで、一般的な非接触給電システムにおいて磁気シールドとして用いられる Mn-Zn フェライトは、77 K において鉄損が常温と比べて 10 倍以上に増加するため、低温環境下には適していないと考えられる。一方で、77 K におけるナノ結晶軟磁性材料、アモルファス合金、パーマロイの鉄損は、常温における Mn-Zn フェライトの鉄損に比べて低減することがわかった。特に、ナノ結晶軟磁性材料は常温、77 K のいずれにおいても最

も低損失であることが明らかとなった。これは、ナノ結晶軟磁性材料の微細構造により、保持力が極めて小さくなっているためと考えられる[2]。なお、提案する非接触給電システムの運用周波数は 10 kHz 程度であるため、今後はナノ結晶軟磁性材料の高周波領域での磁気特性評価を行う。

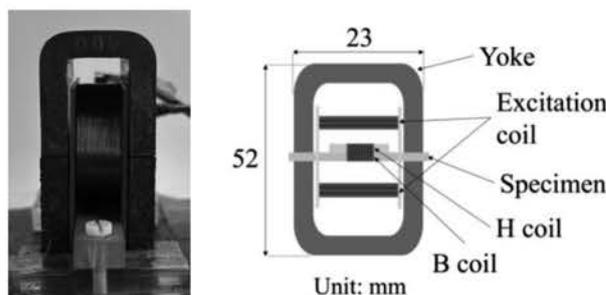


Fig.1 Photograph and cross-sectional schematic view of the compact single sheet tester.

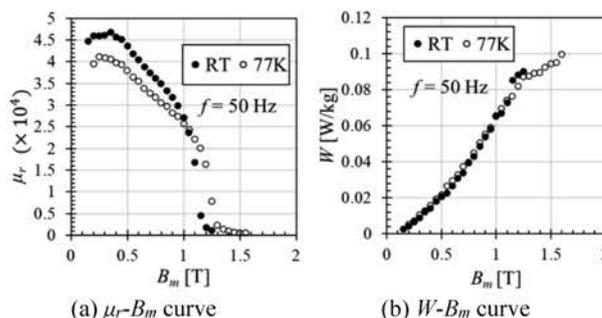


Fig.2 Magnetic properties of the nanocrystalline soft magnetic material at RT and 77 K.

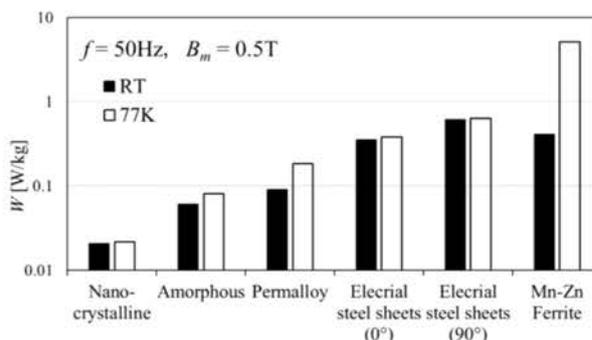


Fig.3 Comparison of iron loss of soft magnetic materials at RT and 77 K.

参考文献

- R. Inoue, *et al.*: Electric power transmission characteristics of WPT system using HTS and copper coils coupled with magnetic material, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, no. 5 (2025)
- M. Konuma: *Magnetic Materials*, Engineering books, p.99-100 (1996)

液体窒素中における樹脂コーティング伝熱面のライデンフロスト温度 Effect of resin coating on the Leidenfrost temperature of heat transfer surfaces in liquid nitrogen

高畑一也 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya (NIFS)

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

1. はじめに

液体窒素などの極低温冷媒を使って金属を急冷するとき、伝熱面に低熱伝導率の樹脂をコーティングすると、冷却時間が短くなる「断熱層のパラドックス」と呼ばれる現象がある。この現象の原理は、断熱層内に発生する温度勾配により、伝熱面（絶縁層表面）温度が金属表面より低くなることで、早期に遷移沸騰域に転移するためと説明されている。しかしながら、100 μm 厚の PTFE コーティングについて、膜沸騰域での金属面と伝熱面の温度差をフーリエの法則で計算すると、10 K を超えることはなく、実際の早期転移を説明することができない。本研究では、Kikuchi ら[1]によって提案された間欠的に液体が固体伝熱面に接触する現象（intermittent liquid-solid contact, ILSC）を考慮した解析と実験結果を比較した。

2. 実験方法

30 mm×30 mm×2 mm の銅板をユニレート®製のブロック（70 mm×70 mm×20 mm）に貼り付け、銅板の片面だけが上向き伝熱面となるようにした。温度は裏面に半田付けした熱電対で測定した。液体窒素の浴槽に伝熱面を上にして落下させ、その後の温度変化を測定した。

その後、伝熱面に、常温乾燥型フッ素樹脂（ニューTPE コート FC-102、ファインケミカルジャパン）を厚さ 3 μm から 43 μm の範囲で塗布し、急冷実験を 5 回ずつ繰り返した。

3. 実験結果と考察

図 1 に典型的な冷却曲線を示す。裸面サンプルに対し、コーティングサンプルは、ライデンフロスト点（遷移沸騰に転移する点）が高熱側シフトしている。43 μm 厚では、約 80 K シフトした。ライデンフロスト点通過後は、遷移沸騰、核沸騰の高い熱流束によって、急速に温度が下がった。

ILSC とは、図 2 に示すように、膜沸騰状態で気泡が離脱したとき、瞬間的に液体が伝熱面に接触する現象である。間欠的であると同時に、局所的（全表面の 1% 程度）であるために表面の平均的な温度は変化しないが、液体が接触した局所表面では、パルス的に温度が低下する。

Kikuchi ら[1]の仮説は、このパルスの表面温度減少が裸面におけるライデンフロスト温度 T_{MHF} を下回ると、膜沸騰が不安定になり、全体が遷移沸騰に遷移するというものである。Nguyen ら[2]は、Kikuchi らの解析をさらに単純化した。つまり、樹脂コーティングした伝熱面のライデンフロスト温度 T_{lei} は次式で求めることができる。

$$T_{lei} = T_{MHF} + q_e(1/h_{contact} + \delta/k) \quad (1)$$

ここで、 q_e は液体が接触したときの最大熱流束、 $h_{contact}$ は樹脂・金属界面の接触熱伝達係数、 δ は膜厚、 k はコーティング材の熱伝達率である。

図 3 に、ライデンフロスト温度と限界熱流束点温度の膜厚依存性を示した。赤の実線は式(1)を用いたライデンフロスト温度の計算値である。 q_e と $h_{contact}$ は、文献[1]で評価された 250 kW/m² と 10 kW/m²K を使用した。

実験値と計算値がよい一致を示すことから、ILSC 関与の可能性は高いと考えられる。

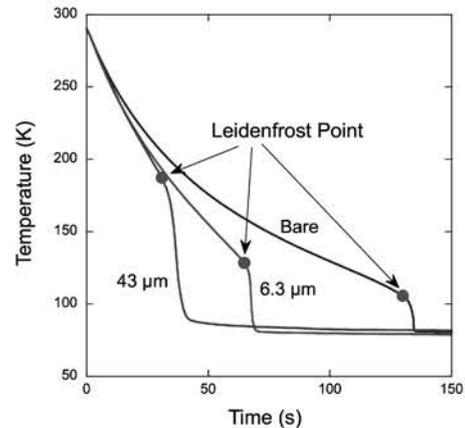


Fig. 1 Typical cooling curves and Leidenfrost points for bare and resin-coated copper plates

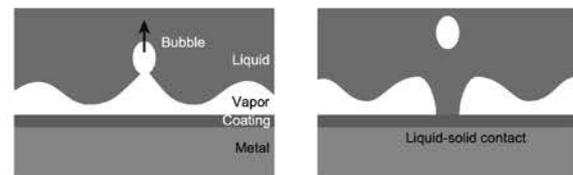


Fig. 2 Intermittent liquid-solid contact model [1]

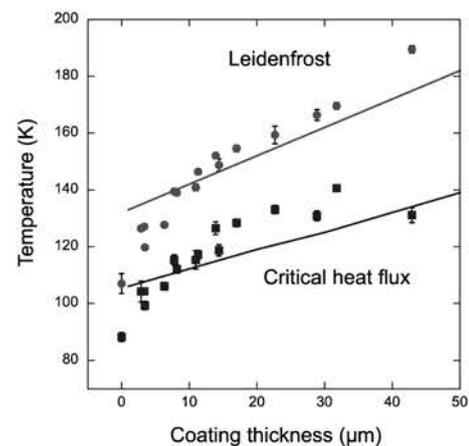


Fig. 3 Effect of coating thickness on Leidenfrost and critical heat flux temperatures

参考文献

1. Y. Kikuchi, et al.: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28 (1985) pp. 1105-1114
2. Le-Duy Nguyen, et al.: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 194 (2022) 123030

液体窒素沸騰冷却における T 型特殊フィンの構造検討

Investigation of structure of T-shaped fin for immersion boiling cooling with liquid nitrogen

結城 光平, 松尾 奏朗, 結城 和久 (山口東理大)
 Kohei Yuki, Fumiaki Matsuo, Kazuhisa Yuki (SOCU)
 E-mail: kohei.yuki@rs.socu.ac.jp

1. はじめに

極低温機器の配管の予冷や生体細胞の凍結, 超伝導限流器などの超伝導応用機器には液体窒素沸騰冷却が利用される. 例えば, 抵抗型超伝導限流器では短絡電流 (数十 kA) が発生した際, 超伝導線材が常伝導転移し電気抵抗が増大することを利用して短絡電流を抑制するが, 限流動作後 0.3 s 以内に 200 K 以上冷却し超伝導状態に復帰させることが要求される. 先行研究[1][2]により, 高温面 (沸騰面) にフィンや金属多孔質体を接合し, 膜沸騰を抑制することが急冷時の除熱性能の向上に効果的であることが示された. そこで著者らは Fig. 1 (A) に示すような液体保持/供給効果を有する T 型フィンを提案し[3], 液体保持部となる T 型フィンの空隙部高さ h を小さくすることで蒸気の排出周期が早まり, 冷却時間が短縮することを明らかにした. 一方, 加熱部がある温度以上になると冷却時にフィン全体が蒸気膜で覆われ, 冷却時間が増加する現象が確認された. そこで本研究では, 空隙部深さ g に着目し高温領域と低温領域の各温度領域において冷却性能を向上可能なフィン形状を検討する.

2. 実験方法

伝熱試験部の構成図を Fig. 1 (A) に示す. 加熱体は幅 4 mm, 厚さ 0.3 mm の SUS304 製の平板であり, フィン装荷区間 (約 50 mm) の電圧を測定する. T 型フィンの空隙部高さ h は先行研究で最も冷却性能が高かった 0.5 mm とする. T 型フィンはスキージ法により加熱平板上に塗布された厚さ 55 μm のエポキシ系接着剤を介し接合される. 液体窒素に浸漬した試験体を 45 A の電流により通電加熱した後の試験体の最高温度と冷却時間 (加熱終了後から再度 77 K に冷却されるまでの時間) を取得する. ここで, 試験体の最高温度は通電時間により制御し, 試験体の温度は SUS304 の電気抵抗の温度依存性より計算する. 本実験では T 型フィンの空隙部深さ g の冷却性能への影響を評価する. また, 液体保持・供給効果の向上に向け Fig. 1 (B) に示すような二段フィンを考案しその性能を合わせて評価する.

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に各空隙部深さにおける最大温度と冷却時間の関係を示す. 最高温度が 300 K 以上の高温領域の場合, 空隙部深さ g を大きくすることで冷却時間が短縮する傾向が見られる. これは g を大きくすることで T 型フィンの空隙部に蒸気膜が侵入しにくくなり, より多くの液体が保持可能であったためであると考えられる. しかしながら, g が 2.0 mm の場合にも最高温度が 400 K 程度で冷却性能が急増しており, 上述のようにフィン表面で膜沸騰が発生し, 冷却液の保持効果が消失したと考えられる.

一方, 二段フィンを利用した場合, 380 K 以降で冷却時間の増加傾向が見られるものの, その傾きは一段フィンに比べ小さいことから急激な冷却性能の低下を抑制可能であることが示された. これは, 1 段目フィンで膜沸騰が発生した場合においても, 2 段目フィンが冷却液保持/供給効果を担っていたためであると考えられる.

次に Fig. 3 に最高温度が 300 K 以下の領域の拡大図を示す. 最高温度が 300 K 以下の場合, 空隙部深さが小さいほど冷却

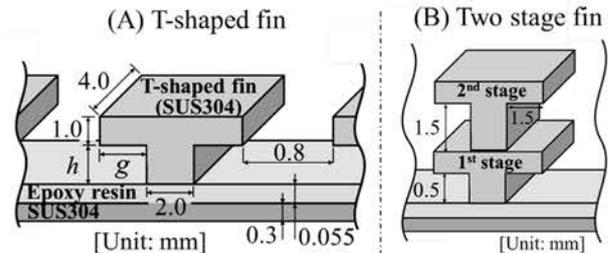


Fig. 1 Sample conceptual diagram

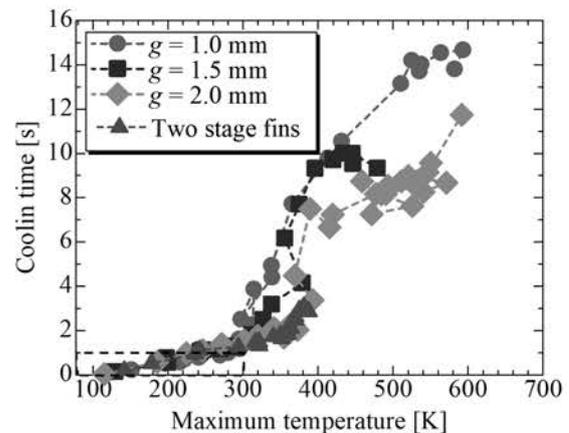


Fig. 2 Relationship between maximum temperature and cooling time

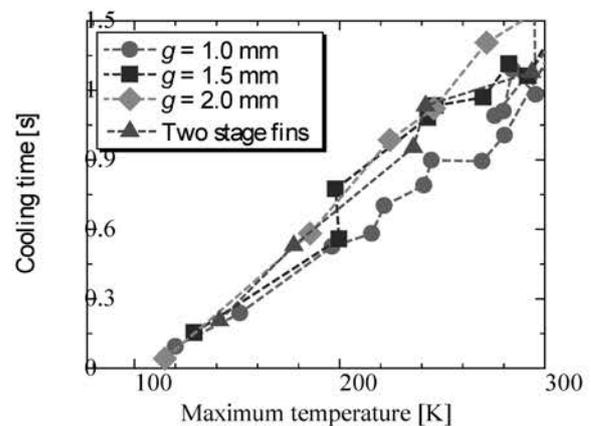


Fig. 3 Relationship between maximum temperature and cooling time below 300 K

時間が短縮されている. これは, 上述の高温領域に対し蒸気量が減少するため空隙部深さが小さくても冷却液を保持可能であり, かつフィンの熱容量が小さくなるため急速な冷却が可能であったと考えられる. 以上の結果より, 対象とする温度領域によって最適な空隙部深さが決定されることが示された.

参考文献

1. K. Yuki, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) 034002.
2. Y. Shirai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26 (2016) pp. 1-4.
3. F. Matsuo, et al.: Abstract of CCSJ Conference., vol. 107 (2024) pp. 29.

蒸発水素ガスにおけるパラ-オルト変換反応速度に及ぼす貯蔵圧力と温度の影響

Influence of storage pressure and temperature on para-ortho conversion rate of gas evaporated from liquid hydrogen

岡島 大地, 前川 一真, 藤川 静一, 武田 実 (神戸大)

OKAJIMA Daichi, MAEKAWA Kazuma, FUJIKAWA Shizuichi, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.)

E-mail: 230w602w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会実現に向けて液体水素の利用が注目されている。その際、2種類の水素分子、オルト水素とパラ水素の温度に依存した平衡濃度への変換反応に留意しなければならない。オルト-パラ変換については詳しく研究されている一方、パラ-オルト変換については、その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かった。これまで我々は、液体水素の効率的な利用に向けて、蒸発水素ガス中パラ濃度の、触媒を用いない自然な経時変化に及ぼす貯蔵圧力の影響を実験的に調べてきた^[1]。今回は、貯蔵温度の影響を調べる実験も行い、これらの実験結果からパラ-オルト自己変換反応の反応速度定数に注目して分析した。

2. 実験装置と実験方法

304L ステンレス鋼製ポンベ(内容積 2250mL)にバルブとブルドン管式圧力計を取り付け、採取ポンベとして用いた。これを液体水素タンクのベントラインに接続し、ポンベ内を真空引きしてから蒸発水素ガスを採取した。この時、最終的にタンクの内圧以上の圧力を得るために、採取ポンベを液体窒素で冷却し、水素ガスを凝縮させながら行った。過去の研究^[1]では貯蔵圧力のみ注目し、室温で貯蔵していた。しかし、室温の変動が変換速度に与える影響が大きいことが示唆された。そこで今回、貯蔵温度を一定にする実験として、採取ポンベをレマコム株式会社製冷蔵ストッカー内で貯蔵した。貯蔵圧力は過去の研究^[1]と同様に0.3, 0.6, 0.9 MPaGの3つを設けた。ただし、ストッカー内温度が想定より低く、目標圧力を下回ったポンベがいくつかあったため、分析時に考慮した。

サンプルガスのパラ水素濃度測定には、株式会社ジェイ・サイエンス・ラボ製分析計 DS-502 を利用した。

3. 実験結果と考察

パラ水素濃度測定結果を Fig. 1 に示す。冷蔵ストッカー内温度(約 258K)に対するパラ水素平衡濃度は 25.2%であり、過去の室温条件(平衡濃度 25.0%)での実験と比べ初期濃度 99.8%との差に大きな違いはないと考えられる。経過時間 100 日付近の 0.3 MPaG の測定結果について今回と過去の測定値を比較すると、大きなばらつきがみられた。このことから、過去の室温条件下で行った実験では、室温の変動による反応速度への影響が大きかったことが分かった。

次に、測定結果をもとに反応速度定数を求めた。なお、採取ポンベ壁面の触媒作用は、今回の研究では全体の変換反応に及ぼす影響は小さいとして無視した^[2]。貯蔵温度一定条件の測定結果を主に用いて分析した。過去のオルト-パラ自己変換反応の研究^[3]で示されている反応速度式(1)は、以下の通りである。

$$-\frac{dx_p}{dt} = k'x_px_o - kx_o^2 \quad (1)$$

ただし x_p :パラ水素濃度($0.25 < x_p < 0.998$)、 x_o :オルト水素濃度($0.002 < x_o < 0.75$)、 t :経過時間、 k' :パラ-オルト変換反応速度定数、 k :オルト-パラ変換反応速度定数である。この式は、自己変換反応がオルト水素を触媒とする 2 次反応であることから立式されている。しかし、今回の実験データを用いるとうまく直線化できず、 k' を求められなかった。これは、パラ水

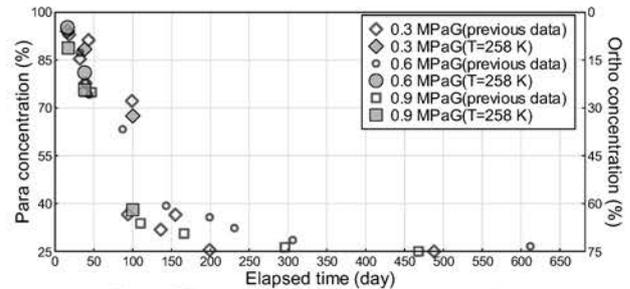


Fig. 1 Time change of para concentration.

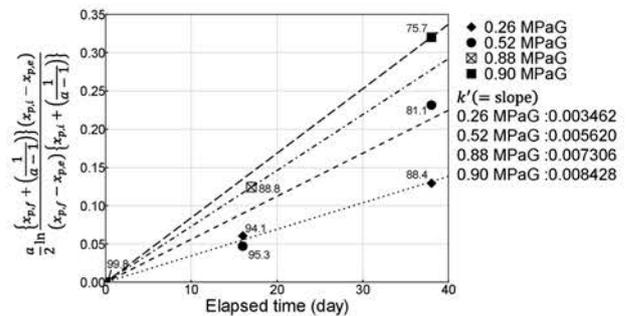


Fig. 2 Linearization to obtain para-ortho conversion constant ($x_p > x_o$).

素濃度がオルト水素濃度 비해過剰となる初期の経過時間の場合、反応速度が実際より小さく計算されてしまうためであると考えられる。そこで、この初期の経過時間においてはパラ水素が自己触媒として作用すると考え、反応速度式(2)

$$-\frac{dx_p}{dt} = k'x_p^2 - kx_o^2 \quad (2)$$

とすることで、Fig. 2 のように直線化することができ、 k' を求めることができた。なお、Fig. 2 について、縦軸の α はパラ水素平衡濃度に対するオルト水素平衡濃度の比である。また、図中の数値はパラ水素濃度の測定値を示す。貯蔵温度を一定にした場合でも、過去の研究^[1]と同じように、貯蔵圧力が大きくなるにつれて反応速度が大きくなることが示された。データ数を増やすことで、最終的に貯蔵時の圧力と温度から反応速度定数を求める式を見出すことができると考えられる。

また、貯蔵温度と反応速度定数の関係を調べるために、貯蔵温度一定条件の実験と、室温条件の実験で反応速度定数を求めて比較した。ただし、室温の変動については測定していなかったため、実験を行った神戸大学深江キャンパスに近い神戸地方気象台の気温データを用い、予備的な考察に留めた。この結果についても、当日詳しく報告する。

参考文献

1. D. Okajima, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 108 (2024) p.84.
2. T. Sugimoto and K. Fukutani: The Nihon Butsuri Gakkaishi (Butsuri), Vol. 71 (2016) pp.668-678 [in Japanese].
3. Milenko Y., Sibileva R., Strzhemechny M.: Natural Ortho-Para Conversion Rate in Liquid and Gaseous Hydrogen, J Low Temp Phys, Vol. 107 (1997) pp.77-92.

液体水素タンクにおける真空断熱層劣化時の模擬実験

Simulation Experiment on the Degradation of Vacuum Insulation Layers in Liquid Hydrogen Tanks

高田 卓, 濱口 真司, 鷹見 重幸(NIFS); 野澤 正和(タイ高専); 小林 弘明(JAXA)
 TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, TAKAMI Shigeyuki (NIFS); NOZAWA Masakazu(Akita tech);
 KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)

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

1. はじめに

低温冷媒の保持・輸送には真空層に多層断熱(MLI)を用いた断熱機構を使用することが多く、真空断熱層は O-ring を用いたシールオフバルブによって封じられている。しかし多くの場合 O-ring はゴム製であり、経年劣化が生じる。実際に、筆者らの所属先の装置においても特に屋外のシールオフバルブが劣化することに起因して、真空断熱層が度々悪化してしまう。しかしながら、こうした経年劣化は寿命予測が難しく現状は真空度が悪化した後に対応するような状況がしばしば訪れる。

また一方で、液体水素のような低温環境下では空気の漏れ込みがあったとしても、空気成分のほぼ全ては固化し、真空度は相当程度保たれると推察される。クライオポンプ研究を参照して数 L/cm²s (標準状態) の排気速度を期待すれば[1]、大きな空気混入が起きたとしても、真空度は保たれる。一方で、吸着層が厚くなり排気速度が下がるような場面では、それまでに吸着していた固化した空気成分が連鎖的に蒸発し一気に真空度が悪化するような破局的なシナリオも想定可能である。液体水素を用いた模擬実験によってこうした外部からの空気混入に対してどのように真空劣化が進行するかについて研究を進めた。

2. 実験装置

図 1 のように中央に室温に温調された管を配した真空チャンバーをガラスデュワーに溜めた液体水素に沈め、外部から室温の空気を僅かずつ混入させる実験を行った。液体水素タンクを想定すると、真空を挟んで液体水素と室温部の内外が反転しているような恰好をしている。液体水素は真空槽の中位まで溜めて実験をした。

最初に、バイパスバルブを介してスクロールポンプによって真空チャンバーを数 Pa オーダーまで真空引きした後、液体水素を注入し、冷却によって 1×10^1 Pa 未満の真空断熱を実現した後、 $1 \sim 7 \times 10^1$ Pa の空気を封入した 8 L のバッファータンクからリークをさせた。コンダクタンスの小さいバルブを 2 個直列に介することで 10^{-4} Pa・m³/s オーダーの低リークを実現している。混入される空気は合成空気 (O₂:N₂=22:78) を使用しており、バッファータンクの圧力変化から混入空気量を計算している。

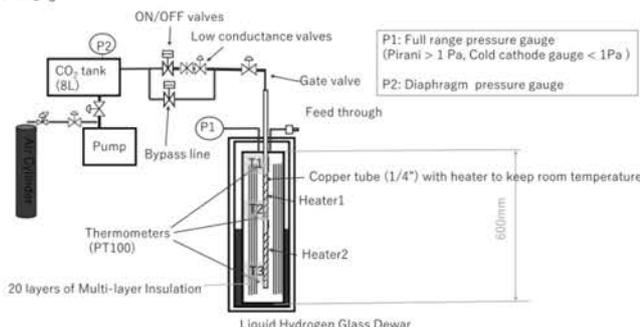


図 1 実験セットアップの模式図

3. 実験結果と考察

図 2 に典型的な液体水素に沈めた真空槽の空気混入した際の真空度劣化をプロットした。左縦軸に真空度、右縦軸にその時のリークレートを 8L のバッファータンクの圧力・温度変化から計算したものを載せている。まず分かることは、 10^{-3} Pa・m³/s オーダーという一般的な気密検査の 4~6 桁上のリーク量に対しても非常にゆっくりとした圧力上昇しか見せず、1 Pa 未満という断熱がそれなりに機能する圧力 (本実験においてはクヌッセン数が 1 程度) を長時間維持する。真空槽の体積と冷却面の面積が時定数を決めると考えれば、大型のタンクでは数日、トランスファーチューブでは数時間で断熱真空の機能が失われることを示唆している。

また、この結果は本実験でのリークレート 1×10^{-3} Pa・m³/s が約 3×10^{-8} L/cm²・s の排気速度に対応するため、無酸素銅表面を用いたクライオポンプ研究と比較すると桁違いに小さい[1]。この桁違いのクライオポンプ効果の小ささについては、表面状態が鍵を握っていると想像されるものの要因を現状では明らかには出来ていない。なお、本実験ではトランスファーチューブ等で良く使用されるグレードである SUS304 の BA 管を使用している。

また、液体水素を使用できる機会が限られているため、飽和蒸気圧・キャプチャー係数の観点から液体窒素中で CO₂ を混入させる比較実験も加えて行った。液体窒素下ではおおよそ 10^{-1} Pa・m³/s 未満のリークレートでは定常状態に達し、それ以上では数時間のうちに数 10 Pa を超えるようになってしまう。室温に温調した管で使用したヒータパワー計測からは圧力が一定以上になると断熱が悪化し、その結果熱流入増によって凝縮速度が下がるという連鎖で圧力上昇が止まらなくなるというフィードバック機構の存在が推察された。

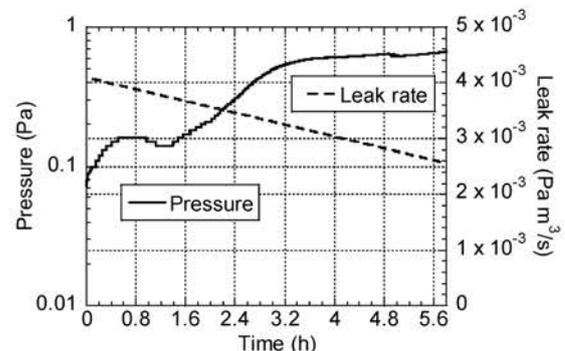


図 2. 液体水素に沈めた真空槽の合成空気混入中の圧力上昇の一例

参考文献

1. 秋山 好胤、「クライオポンプの現状」低温工学 vol 2 pp.9-17

謝辞

本研究は JAXA 能代ロケット試験場のスタッフの方々の協力の元を実施された。ここに感謝する。

多層断熱材の巻き方の違いによる熱侵入量測定 Heat leak measurement of MLI with different winding methods

渡邊 裕文, 小林 裕彬, 加藤 向志, 大塚 真琴, 神田 昌枝, 山口 作太郎 (中部大)
WATANABE Hirofumi, KOBAYASHI Hiroaki, KATO Koshi, OTSUKA Makoto,
KANDA Masae, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)
E-mail: h.watanabe@fsc.chubu.ac.jp

1. はじめに

超伝導送電用の断熱配管の断熱には多層断熱材 (Multilayer insulation, MLI) を用いた真空断熱が用いられる。MLI の断熱性能はその施工方法に依存し[1]、超伝導送電用断熱配管の断熱性能を高めるためには施工の容易さを含めた MLI の最適な施工方法を求める必要がある。本研究で対象とする施工方法は図 1 に示す(a)一枚の MLI を液体窒素タンクに連続的にスイスロール状に巻き付ける方法と、(b)MLI を一層ずつ巻き付け、フィルムの継ぎ目が液体窒素タンクに対して 180 度ずつ反対になるように巻き付ける方法である。(a)は高温側から低温側まで連続的に巻き付けられており、フィルムを通しての伝導伝熱で熱侵入量が増加することが予想される。しかしながら、施工に関しては簡便であり熱侵入量の増加が小さければ有利である。(b)は各層別れており、巻き付け端部も離れているため、そこからの熱侵入も少なく、熱侵入量が少ないと考えられる施工方法である。これらの施工方法に対して縦型と横型のガードタンク付きボイル・オフ・カロリメータを用いて熱侵入量測定を行い断熱性能を評価した。

2. 実験方法

実験に用いた縦型と横型カロリメータは真空容器となる外管の中に液体窒素タンクが設置される。液体窒素タンクは上中下の 3 段式であり、中タンクは測定用のタンク、上下のタンクは中タンクへの軸方向からの熱侵入を防ぐガードタンクである。液体窒素タンクには試験を行う MLI が施工され、中タンクからの蒸発窒素ガス流量から MLI を通過した熱侵入量が求められる。熱侵入量は外管温度に依存するため、外管はヒータにより温度制御が行われる。

今回用いた MLI は栃木カネカ製 KFHN-9B05 である。縦型カロリメータを用いた測定では施工方法による影響を確認するため(a)、(b)について液体窒素タンクの周長 280 mm(外径 89.1 mm)に対して一層毎に 10 mm ずつ周長を長くして 7 層巻き付けた。また、(b)については巻き付け端部の重ね合せを 10 mm と 40 mm とし、測定を行った。横型カロリメータを用いた測定では、巻き付け強さが熱侵入量に与える影響を確認するため(a)について巻き付け周長を変化させ、液体窒素タンクの周長 280 mm に対して一層毎に 0.5, 1, 2, 3, 10 mm ずつ周長を長くして 7 層巻き付けた。

3. 測定結果

縦型カロリメータを用いた実験結果を図 2 に示す。横軸は外管温度であり、左側の縦軸が液体窒素タンク 1 m 当たりの熱侵入量、右側の縦軸が内管表面 1 m² 辺りの熱侵入量を表す。四角が(a)、丸が(b)であり、(b)については重ね合わせ長さ 10 mm と 40 mm の結果を示している。結果は外管温度 25°C から 50°C の範囲で 0.3 W/m(1.1 W/m²) から 0.4 W/m(1.4 W/m²) の熱侵入量であり、外管温度が増加するほど増加した。10 mm と 40 mm の結果

を比較すると熱侵入量はほぼ等しく、この範囲では重ね合わせ部分の長さが熱侵入量へ与える影響は小さいことがわかる。また、(a)と(b)の結果もほぼ等しく、今回の巻き方では(a)の伝導伝熱の影響は小さいことがわかる。

横型カロリメータの実験結果を図 3 に示す。巻き付け周長が短くなるほど熱侵入量が増加し、特に、2 mm から 0.5 mm の狭い範囲で急激に増加した。それに対し 3 mm と 10 mm の結果はほぼ一致しており、3 mm 以上ではほぼ熱侵入量は変化しないことがわかる。

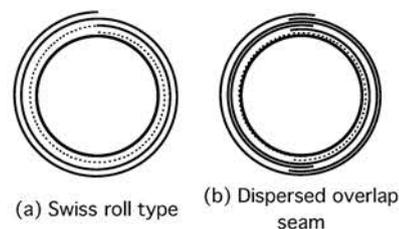


Fig. 1 Winding methods of MLI

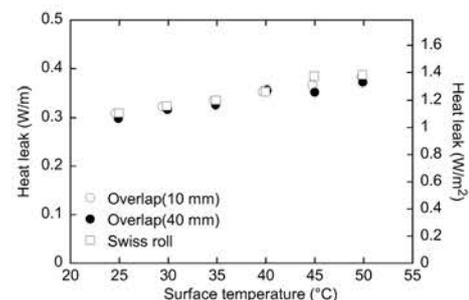


Fig. 2 Heat leak of three different winding methods measured with a vertical calorimeter.

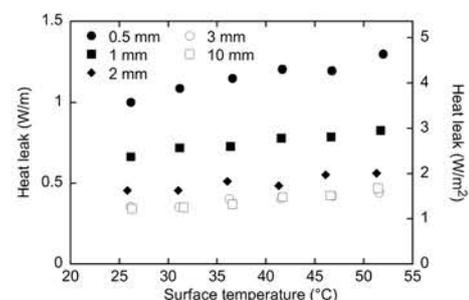


Fig. 3 Heat leak of different circumference of MLI measured with a horizontal calorimeter.

参考文献

1. H. Watanabe, et al.: J. Phys: Conf. Series, Vol. 1590 (2020) 012059.

高温超電導コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの 商用周波数運用時における電力伝送特性

Power Transmission Characteristics in Commercial Frequency of Wireless Power Transfer System for Railway Vehicles Using High Temperature Superconducting Coil

長崎 陽, 一條 裕貴, 津田 理(東北大)

YOH Nagasaki, YUKI Ichijo, MAKOTO Tsuda (Tohoku Univ.)

E-mail: yoh.nagasaki.b2@tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, パンタグラフなどによる物理的な接点を介さずに車載バッテリーに電力を伝送することが可能な, 鉄道車両用非接触給電システムの導入が検討されている[1-9]。これまでに, 非接触給電システムに一般的に用いられる銅コイルに代わり, 高温超電導 (HTS) コイルを用いることで, 給電・集電コイルの低損失化, 動作周波数の低周波化(1 kHz 程度), 車体やレールで発生する渦電流損失低減が可能であり, システム効率改善が可能であることが示されている[10]。しかしながら, 通電電流の増加に伴い交流損失が増加するため, 商用周波数領域への低周波化には至っておらず, 商用周波数からの周波数変換は必要となる。鉄道用非接触給電システムでは, 駅停車中の短時間にバッテリーを急速充電する必要があり, 数百 kW 級の大電力伝送が求められる。一般的なインバータの効率が 95 %程度であることを考慮すると, 数百 kW の送電時には kW オーダーの損失が発生するため, 電力変換時における損失がシステム全体の効率を低下させることが懸念される。

本研究では, HTS コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの動作周波数を商用電源周波数まで低周波化させることによって, システム全体の高効率化が可能であるかについて検討を行った。動作周波数を商用電源周波数まで低周波化させ, 周波数変換を不要とすることが出来れば, 電力変換損失を大幅に低減することが可能となり, 鉄道用非接触給電システムの効率改善, さらに電源設備の簡素化が期待できる。本発表では, 商用周波数のような低周波領域において高効率電力伝送を可能にするコイル構造を提案し, HTS コイルを用いた際の商用電源周波数における電力伝送特性について, 実験および解析的に検討を行った結果について報告する。

2. 非接触給電システムの低周波化

非接触給電システムをより低周波で動作させた場合, 同じ電力を送るために必要な電流は著しく増加する。その一方で, HTS コイルの交流損失は通電電流の増加と共に増加する。HTS コイルを用いた鉄道用非接触給電システムのさらなる低周波化を実現するためには, 低周波化に伴う通電電流の増加を抑制する必要がある。電流増加の抑制方法として, コイル間の結合係数や自己インダクタンスを増加させることが挙げられる。これらを増加させるための一般的な手法として, フェライト等の磁性コアの適用が考えられる[11]。しかしながら, 先行研究[10]で提案されている円形スパイラル形状の HTS コイルに磁性コアを適用した場合 (Fig. 1(a)), 結合係数は 1.3 倍程度, 自己インダクタンスは 2-3 倍程度の増加に留まり, 大幅な 1 次側電流の抑制は難しい。コイルに磁性コアを適用した場合のインダクタンスの増加率はコア形状に依存する。そこで本研究では, 動作周波数の低周波化に適したコイル形状として, 長円形断面の薄型磁性コアを有するソレノイド形状の HTS コイル (Fig. 1(b)) について検討し, 従来の円形スパイラル形状の HTS コイルの特性と比較した。

Fig. 1(b) に示すソレノイドコイルのコイル特性 (結合係数, 自己インダクタンス) を有限要素法解析により算出し, 円形スパイラル形状の HTS コイルと比較した。比較のためにコイルの

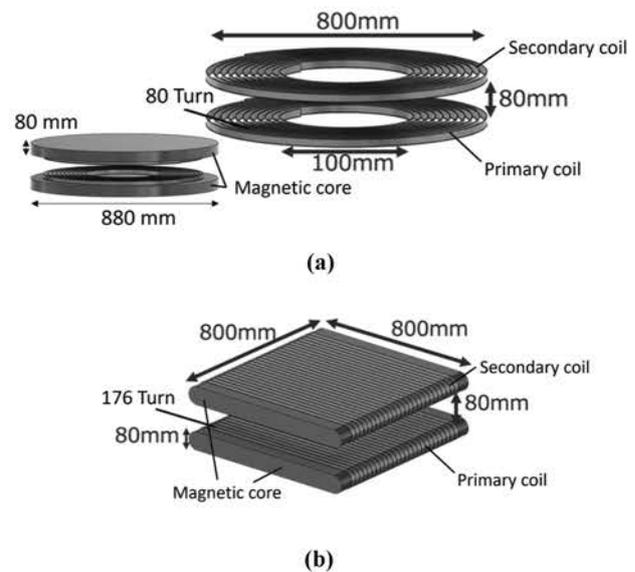


Fig. 1 Schematic diagram of (a) spiral coil and (b) proposed solenoidal coil for the wireless power transmission system for railway vehicles.

設置面積 (0.8 m × 0.8 m), コイル間ギャップ (80 mm), 使用する HTS 線材を同条件 (REBCO 線材) とした。それぞれのコイルにおける自己インダクタンスと結合係数の計算結果より, 同じ接地面積という条件下において, 磁性コアを適用したソレノイドコイルは, スパイラルコイルに比べ自己インダクタンス L が約 30 倍大きくなることがわかった。自己インダクタンスの増加は低周波化に伴う通電電流増加抑制に効果的であるため, 提案するソレノイドコイルは非接触給電システムの低周波化に有効であることが示唆される。

3. 等価回路解析による電力伝送特性の検討

車体への設置上限からコアの長さを 1000 mm, レールへの設置上限からコアの厚さは 130 mm として, 等価回路解析を行い, 提案する長円形断面の磁性コアを有するソレノイドコイルを用いた場合の電力伝送特性を計算した。本検討では, 先行研究[10]に準じて非電化区間を走行する蓄電池電車を取り上げ, 2 両編成の車両 (1 両あたり重さ 40 t) が, 最高時速 100 km/h で駅間距離 5 km を走行する場合を想定して検討を行った。コイルは 1 次側と 2 次側でそれぞれ 8 つを並列接続するものとし, 受電電力は 400 kW (コイル 1 つ当たり 50 kW) とした。走行中, 輻射熱等のコイルへの熱侵入は 300 W で一定とした。また, 磁性コアと HTS 線材の間に 5 mm の空隙を設けることで磁性コアを冷却系から分離することを模擬した。コイル間の電力伝送効率 η_c は式(1), 冷凍機動力 P_{cy} を考慮したコイル間の伝送効率 η_e は式(2), 送電側電力変換損失 (周波数変換回路および変圧器による損失) P_{conv1} , 受電側整流損失 P_{conv2} , その他の配線や機器による損失 P_o を考慮した総合効率 η_{total} を式(3)として定義した。なお, 冷凍機動力は COP=0.08 として, 送電側受電側の電力変換の効率は 95 % として計算した。 P_{RL}

Table 1 Analysis results of Power transmission characteristics of the circular spiral coil and thin solenoidal coil.

	Circular spiral coil	Thin solenoidal coil
Receiving power P_{RL}	50 kW	
Resonance Frequency	920 Hz	50 Hz
Self-inductance	2.3 mH	103.4 mH
Current	81.0 A	49.6 A
AC loss	72.4 W	26.2 W
Iron loss	0 W	56.5 W
Coil total loss	72.4 W	82.7 W
Transmission efficiency between coils	99.7 %	99.7 %
Transmission efficiency between coils with cryocooler	96.4 %	98.4 %
Total transmission efficiency	78.8 %	88.0 %

は受電電力, P_{L1} は1次側コイルにおける損失, P_{L2} は2次側コイルにおける損失を表す。

$$\eta_t = \frac{P_{RL}}{P_{L1} + P_{L2} + P_{RL}} = \frac{I_{RL}^2 R_L}{I_{in}^2 r_{L1} + I_{RL}^2 r_{L2} + I_{RL}^2 R_L} \quad (1)$$

$$\eta_c = \frac{P_{RL}}{P_{L1} + P_{L2} + P_{cy} + P_{RL}} \quad (2)$$

$$\eta_{total} = \frac{P_{RL}}{P_{L1} + P_{L2} + P_{cy} + P_{conv1} + P_{conv2} + P_o + P_{RL}} \quad (3)$$

コイル1つ当たり (50 kW 受電) における電力伝送特性の計算結果を Table 1 に示す。冷凍機で取り除く必要のある HTS コイル内損失 (交流損失) がスパイラルコイルに比べて大幅に低減し, 冷凍機動力を含めたコイル間効率は 96.4 % から 98.4 % に向上している。さらに, 動作周波数を 50 Hz としたことで送電側の周波数変換が不要になり, 総合効率は 78.8 % から 88.0 % に向上することがわかる。以上の結果から, 提案する磁性コアを有するソレノイドコイルを適用すれば, 従来のコイルと同程度のサイズのコイルによって, 鉄道用非接触給電システムの商用周波数運転と高効率化を実現できることがわかる。

4. 電力伝送実験

長円形断面の磁性コアを有するソレノイドコイルのスケールダウンモデル (Fig. 2) を用いて, 商用電源周波数における電力伝送実験を実施し, 電力伝送特性を測定した。なお, 共振周波数は 50 Hz とし, 受電電力は 400 W, 負荷は最適負荷とした。非接触給電システムの諸元および電力伝送特性の測定結果を Table 2 に示す。また, 解析結果も同表に示す。事前に実施した損失測定実験により, 加工および 77 K への冷却によって磁性コアが特性劣化していることがわかっている。そのため, 解析値よりも鉄損が大きいことが影響して, コイル間の伝送効率の測定値は 94.5 % と解析値よりも低くなった。しかしながら, 一般的な銅コイルや先行研究の HTS コイルでは実現困難な商用周波数 (50 Hz) での高効率な非接触給電を実現することができた。

5. まとめ

本研究では, 鉄道用非接触給電システムにおける商用電源周波数運用 (50 Hz 化) によって高効率の電力伝送を実現することを目的に, HTS コイルを用いた際の商用電源周波数における電力伝送特性について, 実験および解析的に検討を行った。その結果, 長円形断面の磁性コアを有するソレノイド形 HTS コイルを採用して周波数変換を無くすことにより, 従来のスパイラル形 HTS コイルを用いる場合よりも総合効率

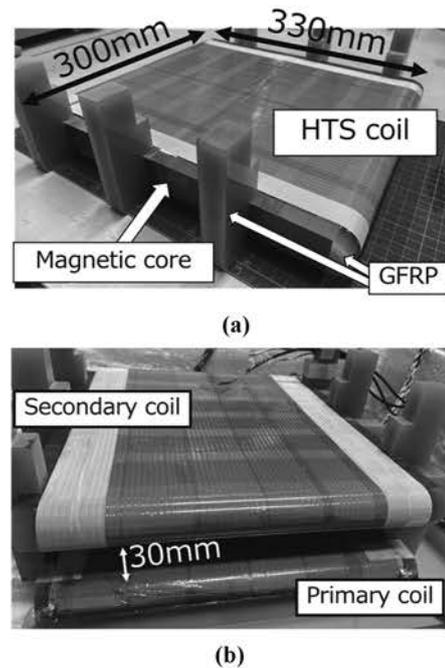


Fig. 2 Photograph of the scale-down model solenoidal coils: (a) primary coil, (b) primary coil and secondary coil.

Table 2 Power transmission characteristics of the scale-down model solenoidal coil.

	Experiment		Analysis	
	Primary	Secondary	Primary	Secondary
Receiving power P_{RL}	400 W			
Resonance Frequency	50 Hz			
Self-inductance	3.63 mH	3.62 mH	3.62 mH	
Capacitor	3.11 mF	3.11 mF	3.11 mF	
Coupling coefficient	0.566		0.570	
Load resistor R_L	0.595 Ω		0.595 Ω	
Current	26.5 A	25.9 A	25.8 A	25.1 A
Coil total loss	10.8 W	11.0 W	1.88 W	1.75 W
Transmission efficiency between coils	94.5 %		99.1 %	

を約 10 % 改善できることを示した。また, スケールダウンモデルコイルを用いて, 50 Hz における電力伝送特性を測定した。その結果, 提案コイルを用いることで従来よりも高効率に商用周波数における電力伝送が可能であることを実証した。

参考文献

1. 柏木隆行, 他: 鉄道総研報告, 26 (2012) pp. 41-46
2. K. Ukita, et al.: Proc. IEEE PELS Workshop Emerging Technol.: Wireless Power, (2015) pp. 1-6
3. 柏木隆行, 他: 鉄道総研報告, 29 (2015) pp. 35-40
4. 浮田啓悟, 他: 電学論 D, 137 (2017) pp. 518-525
5. 近藤圭一郎: 日本 AEM 学会誌, 24 (2016) pp. 311-316
6. 下出大輔, 他: 電学論 D, 137 (2017) pp. 60-68
7. 下出大輔, 他: 電学論 D, 137 (2017) pp. 159-167
8. J. H. Kim, et al.: IEEE Trans. Ind. Electron. 62 (2015) pp. 6242-6250
9. 浮田啓悟, 他: 日本 AEM 学会誌, 28 (2020) pp. 276-281
10. 井上良太, 他: 低温工学, 55 (2020) pp.62-69
11. 下出大輔, 他: 電学論 D, 133 (2017) pp. 378-385

高温超電導マグネットを用いた アルミ押出成形用 400 kW 級直流誘導加熱装置の開発

Development of 400 kW-class DC Induction Heating Device Using HTS Magnet for Aluminum Extrusion Process

伊東 徹也(テラル, 新潟大); 福井 聡, 小川 純(新潟大); 河島 裕, 緒方 康博(テラル);
古瀬 充徳(産総研); 渡部 智則(中部電力)
ITO Tetsuya (TERAL Inc., Niigata University); FUKUI Satoshi, OGAWA Jun (Niigata University);
KAWASHIMA Hiroshi, OGATA Yasuhiro (TERAL Inc.); FURUSE Mitsuo (AIST);
WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: ito00@teral.co.jp

1. はじめに

アルミニウム(以下, アルミ)は, 軽量で加工が容易でありサイクルしやすい特徴から, アルミ製品は多くの分野で使用されており, 今後も需要が増えていくことが予想されている。アルミ製品の加工法には, 鋳造, ダイキャスト, 押出, 鍛造などがあるが, これらの加工工程にはいずれもアルミ材料の加熱工程が含まれている。アルミ押出加工工程では, 電気加熱の一種である高周波誘導加熱(商用周波数を含む)が多く用いられている。しかし, アルミは非磁性かつ低抵抗であるため, 高周波誘導加熱では効率よく加熱することができない。アルミ押出用材料のアルミビレットの加熱では, 高周波誘導加熱の加熱効率は 50 %程度である[1]。アルミビレット加熱において, 高周波誘導加熱では, 磁場及び周波数の増加には制約があり, 効率・加熱パワー・加熱速度の向上には限界がある。そのため, 押出工程で使用されている高周波誘導加熱装置は, 押出サイクルに合わせるために加熱コイルを 2 個並列で使用したり, 長い加熱コイルの中に複数のアルミビレットを同時に投入して加熱したりすることで対応しているのが現状である。よって, 高周波誘導加熱に代わる高効率で高速加熱が可能な加熱方法の開発が期待されている。

高温超電導(HTS)コイルにより発生させた直流強磁場内でアルミビレットを強制回転させることで加熱する直流誘導加熱は, 高周波誘導加熱の課題を解決する方法の 1 つとして注目され, 2000 年代より活発に研究開発が行われ, 2010 年頃には欧州で商用機も開発された[2]-[4]。直近では, 韓国や中国の研究グループが研究開発を進め, 中国では製品化されている[5]-[7]。

我々のグループも 2019 年度よりサポイン事業(戦略的基盤技術高度化支援事業)の支援を受け, HTS マグネットを用いたアルミビレット用直流誘導加熱装置の研究開発を行っている。これまでに, HTS マグネット, アルミビレットの把持・回転機構及び加熱制御機構について研究開発を行い, その結果に基づき商用機として実用を前提とした 400 kW 級の加熱実証装置を製作し, 投入加熱パワー 400 kW におけるアルミビレットの加熱を実証した[8]。実用化に向けた最終段階の検証として, この実証装置により, 連続 2 時間, 合計 90 本のアルミビレット連続繰り返し加熱を実施し, 高温超電導(HTS)マグネットの健全性を評価したので, その結果について報告する。

2. 高温超電導マグネットを用いた 400 kW 級アルミビレット直流誘導加熱実証装置

Fig. 1 に本研究で開発した実証装置の外観を示す。また, Fig. 2 に, HTS マグネットの構造及び励磁回路の模式図を示す。HTS マグネットは, 1 対の HTS コイルを対向配置した構造である。HTS コイルは, 伝導冷却による中間温度領域でも磁場特性に優れる REBCO 線材と SUS テープを無絶縁で共巻した構造である。各 HTS コイルは L 型クライオスタット内に配置

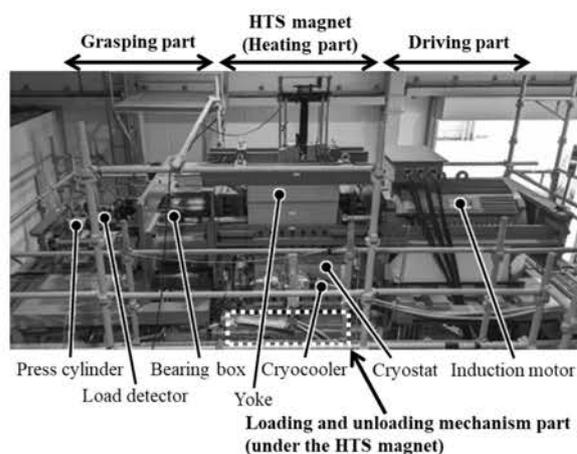


Fig. 1 Photograph of the demonstration device.

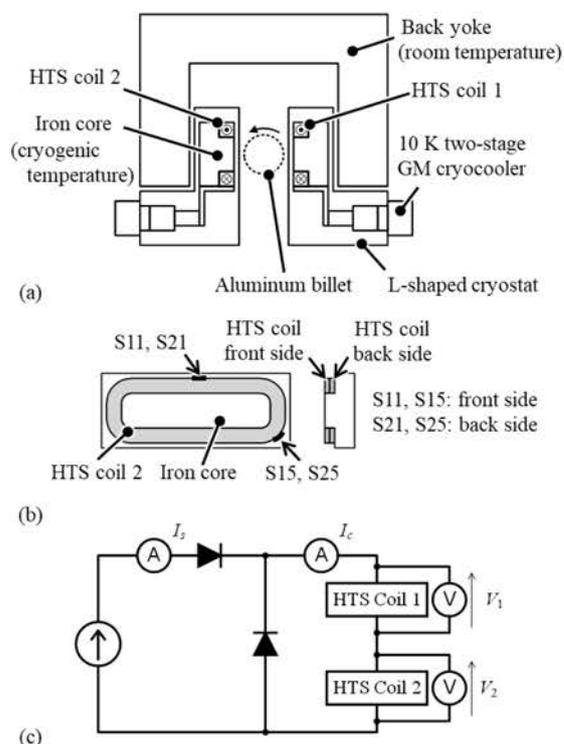


Fig. 2 Schematic illustration of HTS magnet used in demonstration device: (a) Structure of cross section, (b) Arrangement of strain gauge around HTS coil and (c) Excitation circuit.

され、GM 冷凍機により伝導冷却される。加熱領域(アルミビレットを配置する領域)に磁束を有効に生成するため、HTS コイルを加熱領域にできるだけ近接して配置し、また起磁力の有効利用と漏れ磁場抑制のために鉄心を使用した。2つのHTS コイルは直列に接続され、同じ定電流源で励磁される。

2. アルミビレット加熱が HTS コイルに与える影響

本加熱装置では、HTS マグネットで生成した静磁場内でアルミビレットを強制回転させることで、アルミビレット内部に誘導電流(渦電流)を発生させ、そのジュール損によりアルミビレットを加熱する。アルミビレットの内部に流れる電流は、アルミビレットに鎖交する磁束の変化を妨げるように流れるため、この電流により、HTS コイルを鎖交する磁場にも変化が生じる。アルミビレット内部電流の変化は、主にアルミビレットの回転速度の変化により生じ、これによりHTSコイルの鎖交磁束が変化するため、HTSコイルに電圧が誘導される。このHTSコイルは無絶縁コイルのため、HTSコイルに電圧が生じるとターン間に電流が流れ、その損失が HTS コイルの温度に影響を与える。また、励磁回路に還流回路を設けていることから、HTS コイルの鎖交磁束変化に伴いHTSコイル電流も影響を受ける。

直径 155 mm、長さ 500 mm のアルミビレットを 1 回加熱したときの、運転速度、HTS コイル両端電圧、HTS コイル電流、HTS コイル温度を Fig. 3 に示す。

3. 連続繰り返し加熱試験結果

直径 155 mm、長さ 500 mm のアルミビレットを、約 88 秒サイクルで 2 時間以上連続して繰り返し加熱する、連続繰り返し加熱試験を実施した。加熱試験中の主電動機入力を Fig. 4 に、HTS コイル温度を Fig. 5 に、HTS コイル外周部に取り付けられた歪ゲージの測定値を Fig. 6 に示す。連続 90 本の繰り返し加熱では、HTS コイルの温度および歪の変化は飽和には至らなかったが、飽和傾向を示した。

4. まとめ

アルミビレットの加熱運転の際、アルミビレット内部の渦電流により HTS コイル鎖交磁束が変化し、HTS コイルに電圧が誘導され、HTS コイルの電流も影響を受ける。このことが HTS コイルの健全性に影響を与えないことを、連続繰り返し加熱試験で評価した。

連続繰り返し加熱試験中に、投入パワーの減少は認められなかった。加熱試験中の HTS コイルの温度上昇は凡そ 5 K

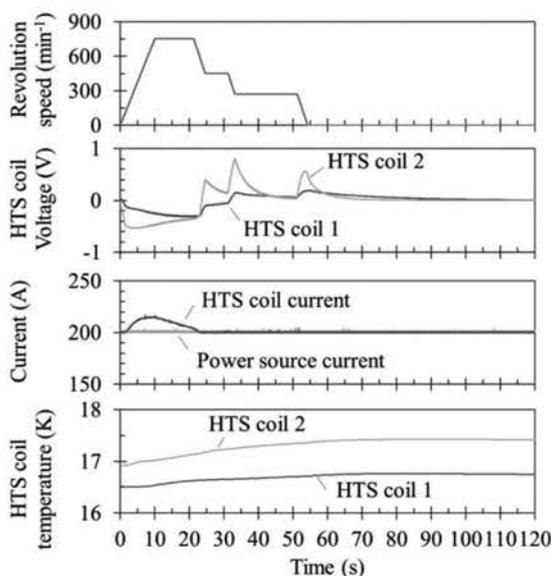


Fig. 3 Terminal voltage, current, temperature of HTS coils and revolution speed measured in one-shot heating test.

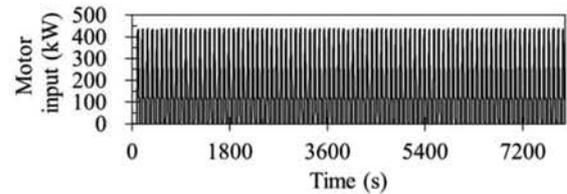


Fig. 4 Input power of drive motor in continuous repetitive heating test.

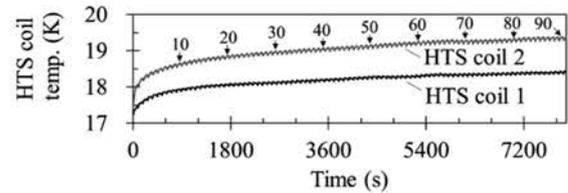


Fig. 5 Temperature of HTS coils measured in continuous repetitive heating test.

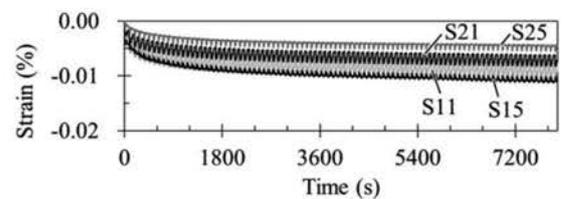


Fig. 6 Measured strain in winding of HTS coil in continuous repetitive heating test.

以内と推定され、HTS コイルの通電電流に影響を与えない範囲であった。連続繰り返し加熱試験中に HTS コイル外周部の歪が変化したが、変化量は HTS 線材に不可逆な変化が生じるとされている 0.5% にくらべ 1 桁以上低い値であった。

以上より、装置の加熱運転により、HTS マグネットの健全性が損なわれないことが確認された。

謝辞

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

参考文献

1. 池田泰幸: 工業加熱 43 (2006) 44-48
2. N. Magnusson and M. Runde: J. Phys.: Conf. Ser. 43 (2006) 1019-1022
3. M. Fabbri, et al.: IEEE Trans. Magn. 45 (2009) 192-200
4. M. Runde, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 1379-1383
5. J. Choi, et al.: J. Supercond. Nov. Magn. 28 (2015) 657-661
6. J. Choi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 29 (2019) 3700105
7. S. Dai, et al.: IEEE Access 9 (2021) 3301-3314
8. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.15

第3元素添加 Nb₃Sn 線材の Sn 拡散と微細組織

Sn diffusion behavior and microstructure in Nb₃Sn wires with third elemental addition

伴野信哉 (NIMS)
BANNO Nobuya, (NIMS)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

本稿は、解説論文賞受賞記念講演にかかわる当該論文の概説である[1]。

Nb₃Sn 超電導体は 1954 年に Bell 研の Matthias のグループによって発見され[2]、高磁場 NMR 装置や核融合炉、高エネルギー粒子加速器、実験室用汎用高磁場マグネット用途にいまなお主要な高磁場超電導材料として広く利用されている。Nb₃Sn 超電導体は Strukturbericht の分類方針で A15 型化合物体に属しており、各格子面内に配置された 2 個の Nb 原子が XYZ 軸方向に連なる結晶構造を有する。この Nb チェーン構造により結晶自体は異方性のない超電導特性を示す。V₃Si をはじめとし、その後実用化研究が盛んになった V₃Ga や Nb₃Al もこれに属する。

Nb₃Sn 超電導体のコヒーレンス長はおよそ 3 nm 程度であり、Nb₃Sn の結晶粒界厚さが 2 nm 程度であるため、高温酸化物超電導体と違って粒界の弱結合の問題がなく、粒界が有効な磁束ピン止めセンターとして作用する。したがって Nb₃Sn 超電導線材の超電導性能向上に関連する従来研究の多くは、Nb₃Sn 結晶粒・結晶層自身（結晶規則度、格子定数、組成勾配など）の改質および粒界密度の増加（結晶粒微細化による磁束ピン止めセンターの増大）に帰着される。近年ではこれに加えて、人工ピンとしてのナノ異相析出も高性能化の重要な制御因子として注目されている。元素添加は、こうした組織制御の効果的な手法の一つとして用いられる。さらに元素添加は、特性改善だけでなく線材に何かの機能（例えばフィラメント界面の高抵抗化やマトリクスの固溶強化）を付与する際にも用いられる。固相拡散をベースとした Nb₃Sn 生成反応は非常に複雑であるが、化学ポテンシャルの概念は反応の道筋を知るのに有用である。

近年、実用化されている Nb₃Sn 線材のほとんどがブロンズ法（もしくはその概念を利用した製法）をベースとし

て製造されている。ブロンズ法とは、Cu に Sn や Ga を固溶させた合金と Nb や V の遷移元素を相互拡散させることで、反応界面において Nb₃Sn や V₃Ga 層の成長を促進させる製造手法である[3]、[4]、[5]、[6]。Nb/Sn 拡散反応を眺めた場合、すでに Cu が添加されていると見ることもできるが、ここではブロンズ法をベースとした上で、さらに追加の元素添加をする場合を第 3 元素添加と呼ぶことにする。

2. 少量 Cu 添加による反応挙動の変化

第 3 元素添加の効果を理解するにあたって、そもそも Cu の添加によって反応挙動がどのように変化するかを知っておくことは重要である。

Nb/Sn 拡散反応における少量 Cu 添加効果をまず実験的に示す。議論を単純化するために、平板状の拡散対試料を作製する。まず純 Sn および誘導加熱炉で溶製した Sn-10at%Cu を芯状（外径 2.8 mm）に加工し、外側に Cu 管（外径/内径=8 mm/6 mm）が配置された Nb 管（外径/内径=5.8 mm/3 mm）に挿入して伸線加工により単芯材を作製する。これを圧延して、0.2 mm 厚のテープ線材とし、続けて硝酸により Cu 外皮を化学エッチングすることで、両面が Nb/Sn 拡散対構造となる試料とする。次にこの試料に 650°C×100 h（昇温速度 650°C/4 h）の熱処理を施し、所定の温度・時間で引き上げ、水に浸して急冷する。反応界面を走査電子顕微鏡（SEM）観察、エネルギー分散型 X 線分光（EDS）分析することで生成相を同定する。熱処理時、各試料はアルゴンガスとともにガラス管に封入されている。

Fig. 1 に両試料における生成相の変化の様子を比較する。Cu 無添加の試料では、600°C 回りになると Nb の Sn への溶出が起り、界面に薄い NbSn₂ 相が現れる。650°C で保持する過程では、Sn が Nb へ拡散して界面の NbSn₂ 相が

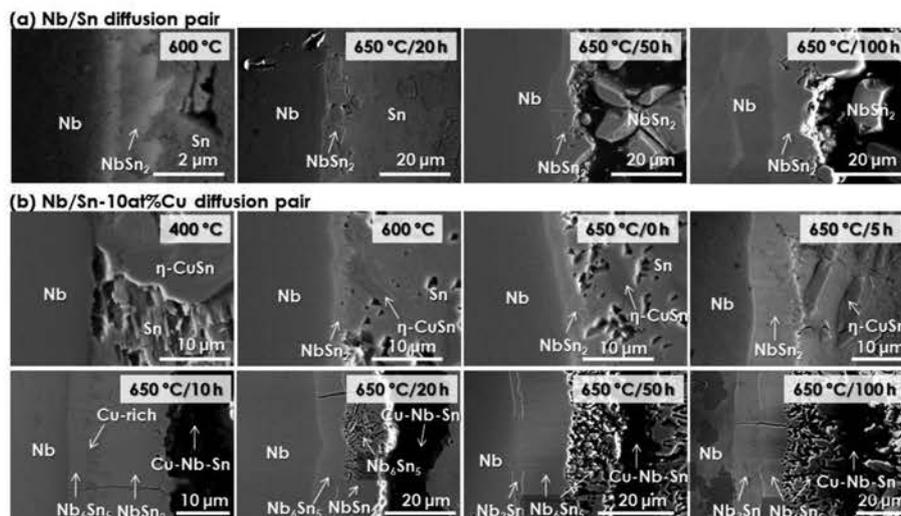


Fig. 1 Phase formation at the reaction interface between (a) Nb/Sn and (b) Nb/Sn-10at%Cu diffusion pairs (SEM images). The yellow dotted lines are auxiliary lines for clarity of phase boundaries.

成長する。50 h 後で Sn 側にも NbSn₂ 相が確認されるが、これは NbSn₂ 相が Sn 側内部にも成長しているためである。さらに 100 h 経過した後も NbSn₂ 相の成長が続くのみで、Nb₆Sn₅ 相や Nb₃Sn 相の生成は見られない。

一方、Sn に 10at% の Cu を添加した場合には、溶解生成時に Sn-10Cu 内にできた島状の η-CuSn (Cu₆Sn₅) 相が昇温中に成長する。600°C 付近になると、Nb の溶出とともに Nb/Sn-Cu 界面に NbSn₂ 相が生成し、650°C で保持する初期段階で、NbSn₂ 相が成長し始める。そして 10h を過ぎる頃には Sn が NbSn₂ 中を拡散し Nb/NbSn₂ 界面において Nb₆Sn₅ 相が生成し始める。Nb 側に形成された Nb₆Sn₅ 相は非常に密である。650°C/10h の SEM 像を見ると、Nb₆Sn₅ 相と NbSn₂ 相との間に濃いコントラストが見られており、EDS 分析によれば、高濃度の Cu が検出される。これはつまり、NbSn₂ 相・Nb₆Sn₅ 相の成長に伴い、Cu も反応最前線へと拡散していくことを示唆している。Lefranc らは、Cu が NbSn₂ 相・Nb₆Sn₅ 相を不安定化させることを明らかにしており [7]、Cu は Nb/NbSn₂→Nb₆Sn₅ などの反応促進にも影響を与えていることが示唆される。

さらに 650°C/20 h となると、Nb₆Sn₅ 相がさらに成長していく。一方 NbSn₂ 相では、Sn-Cu 側の Sn が枯渇するのに加えて、NbSn₂ 相中の Sn が Nb₆Sn₅ 相へと拡散するのに伴い、NbSn₂ 相中の Sn 濃度が低下して Nb₆Sn₅ 相へと相変態していく様子も見られる。650°C/50 h では、NbSn₂ 相はすべて Nb₆Sn₅ 相へと相変態し、Nb と Nb₆Sn₅ 界面では、薄く Nb₃Sn 相が生成し始める。さらに 650°C/100 h までくると、Nb₃Sn 相が大きく成長していることがわかる。Nb₆Sn₅ 相は依然として厚く残存したままである。

このように、Sn 芯に少量の Cu を添加するだけで生成化合物が劇的に変化し、650°C 程度の熱処理でも厚い Nb₃Sn 層が生成されることがわかる。

3. Sn 化学ポテンシャルによる解釈

一つの系の中で、構成元素に濃度勾配がある場合、元素の拡散流れは濃度の高い方から低い方へと向かう。これはフィックの第一法則と呼ばれ、化合物を生成しない二成分系では必ず成立する。この場合、濃度は拡散現象を記述する上で重要な変数の一つであるが、ブロンズ法のように Cu 中の Sn 濃度が 9% 程度の状態から、Nb 母相側により Sn 濃度の高い Nb₃Sn 相が生成される反応では、Sn 濃度だけでは現象をうまく捉えることができない。こうした現象を正しく捉えるためには、化学ポテンシャルを考慮する必要がある。

化学ポテンシャルは、簡単には、ある化学種（単体または化合物）が混合物中に存在するとき、その化学種 1 モル当りの Gibbs エネルギーと定義される。その化学種は、化学ポテンシャルの高い方から低い方へと拡散する。したがってもとの系と生成系の 1 モル当りの Gibbs エネルギーの大きさを比較すれば、その反応の強さ・方向性がわかるため、化学ポテンシャル勾配は拡散の駆動力としての意味を持つ。

Fig. 2 は、650°C 付近における生成化合物中の Sn 化学ポテンシャルを模式的に示したものである。ブロンズ法と比べて PIT や RRP 法は Cu 中の Sn 化学ポテンシャルが高いため、Fig. 1 のように直接 Nb₃Sn は生成されず、いったん NbSn₂ や Nb₆Sn₅ が生成される。

3. 第 3 元素添加効果

第 3 元素添加として、注目を集めている手法は Nb への Zr 添加による内部酸化 [8]、および Nb への Hf 添加 [9] の 2 つであり、いずれの手法も Nb₃Sn 結晶層微細化のプレー

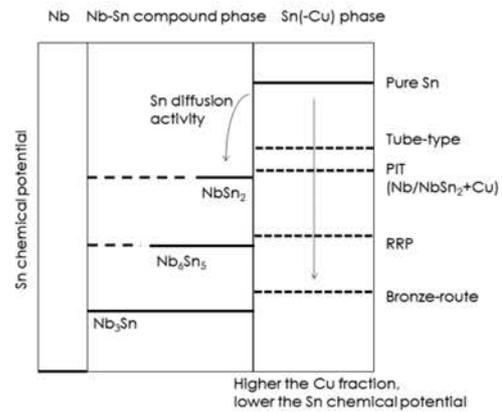


Fig. 2 Schematic illustration of Sn chemical potential in Nb-Sn compound phase and Sn-Cu phase at approximately 650°C.

クスルーとして期待されている。

内部酸化手法は、Nb に添加する元素の高い酸素親和性を利用した手法で、添加元素のナノ酸化相を Nb₃Sn 層内に析出させる。典型的なサイズは 1~10 nm [10] で Nb₃Sn 超電導体のコヒーレンス長に近く有効なポイントピンニングとして働く。ナノ酸化粒子は、粒界だけでなく粒内にも存在する。

Nb への Hf 添加による微細化は、Nb 母相の内部ひずみエネルギーの増加を利用した手法である [9]。Nb へ Hf を添加すると、Nb 母相の再結晶温度が上がる。すると、前駆体の伸線過程で Nb 母相に蓄積された転位等の結晶欠陥が高密度で残存することになり、Nb₃Sn 核生成を促進する効果が期待される。ただし、Hf もまた酸素親和性が高いため、最初の論文で確認された微細化効果もまた Hf の内部酸化による効果であった可能性も指摘されている [11]。一方で、母相の微細組織の影響は、メッキ法で作製された試料を用いた別の実験で確認されている [12]。

そのほかの元素添加効果として、Cu 母材への Zn 添加が検討されている。Zn は Nb₃Sn 相に固溶せず、母材に残留するという興味深い特徴があり、これを母材の固溶強化に利用することで、追加で補強材を付与することなく線材を高強度化することができる。

参考文献

- [1] N. BANNO, *TEION KOGAKU*, v. 58, pp. 95-107, 2023.
- [2] B. T. Matthias et al., *Physical Review*, v. 95, pp. 1435-1435, 1954.
- [3] K. Tachikawa and Y. Tanaka, *Jpn J Appl Phys*, v. 6, p. 782, 1967.
- [4] E. Nembach and K. Tachikawa, *Journal of the Less Common Metals*, v. 19, pp. 359-367, 1969.
- [5] A. R. Kaufmann and J. J. Pickett, *J Appl Phys*, v. 42, 1971.
- [6] M. Suenaga, in *Superconductor materials science: metallurgy, fabrication, and applications*, Springer New York, NY, 1981, pp. 201-274.
- [7] G. Lefranc and A. Müller, *Journal of the Less Common Metals*, v. 45, pp. 339-342, 1976.
- [8] X. Xu et al., *Appl Phys Lett*, v. 104, 082602, 2014.
- [9] S. Balachandran et al., *Supercond Sci Technol*, v. 32, 044006, 2019.
- [10] X. Xu et al., *Scripta Materialia*, v. 186, pp. 317-320, 2020.
- [11] C. Tarantini et al., *Sci Rep*, v. 11, 17845, 2021.
- [12] N. Banno et al. *Scr Mater*, v. 199, 113822, 2021.

スマート絶縁コイルに向けた $(\text{Pr}_{0.8}\text{Sm}_{0.2})_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{CoO}_3$ 金属-絶縁体転移物質 スラリーの作製

Fabrication of Metal-Insulator Material in $(\text{Pr}_{0.8}\text{Sm}_{0.2})_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{CoO}_3$ for Smart Insulation Material

櫻井 響介, 土屋 雄司, 淡路 智 (東北大); 田橋 正浩, 後藤 英雄 (中部大)

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

TAHASHI Masahiro, GOTO Hideo (Chubu Univ.)

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-絶縁体相転移材料を用いる。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 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-絶縁体相転移材料として、ペロブスカイト型コバルト酸化物 $(\text{Pr}_{0.8}\text{Sm}_{0.2})_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{CoO}_3$ (PSCCO)バルク焼結体に着目した[3]。前回の低温工学・超電導学会では、PSCCO バルク焼結体を乳棒と乳鉢で粉砕し、有機溶媒と混合したスラリーをコーティングした REBCO 線材のテープ間コンタクト抵抗の温度依存性を報告した[4]。このテープ間コンタクト抵抗 R_{ct} は、10 K から 270 K の間で $\sim 1.0 \times 10^6 \mu\Omega\text{cm}^2$ から $\sim 1.0 \times 10^4 \mu\Omega\text{cm}^2$ に減少することを報告した。本研究では、粉砕方法の改善によるテープ間コンタクト抵抗の制御を目的とし、遊星式のボールミルによる粉砕によって接触抵抗の調整を行った。

2. 実験方法

ゾルゲル法を用いて金属-絶縁体転移温度が 74 K となる PSCCO 多結晶バルク体を作製した[5]。遊星式のボールミルを使用してバルク体を 1 時間粉砕した。粉砕した PSCCO 粉末と溶媒 N-メチル-2-ピロリドン(NMP)とをオートミキサーで 1 分間攪拌し、スラリーを作製した。スラリー中の PSCCO の体積分率は、50vol.%とした。このスラリーを、線幅 4 mm の REBCO 線材(フジクラ社製、Cu めっき)の長手方向 20 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、 R_{ct} 測定時の模式図を示す。Cu 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 PSCCO コーティングしていない REBCO 線材を置き、さらに Cu の板を約 40 MPa の圧力を印加して固定した。REBCO 線材間の電気抵抗の温度依存性を 10 K-270 K の昇温過程で測定した。測定時に、電流 1 μA -10 mA を印加し、直流四端子法で測定した。 R_{ct} を、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

Fig. 2 に、遊星式ボールミルで粉砕を行ったスラリーを塗布した REBCO テープにおける R_{ct} の温度依存性を示す。比較として、先行研究[4]で報告した、乳棒と乳鉢で粉砕したスラリーを塗布した REBCO テープにおける R_{ct} の温

度依存性を示す。 R_{ct} は、10 K から 270 K にかけて単調に減少し、その値は $2.0 \times 10^8 \mu\Omega\text{cm}^2$ から $6.8 \times 10^4 \mu\Omega\text{cm}^2$ に減少した。遊星式ボールミルと、乳棒と乳鉢で粉砕したスラリーとを比較すると、270 K における R_{ct} が、 1.6×10^4 から $6.8 \times 10^4 \mu\Omega\text{cm}^2$ に低減した。当日は、バインダーとして PVDF を添加したスラリーにおける R_{ct} の温度依存性の測定結果についても報告する予定である。

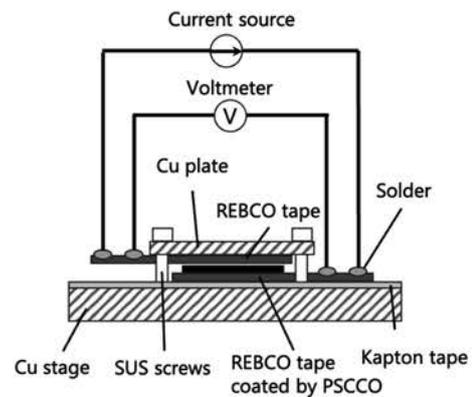


Fig.1 Schematic diagram of the sample set up.

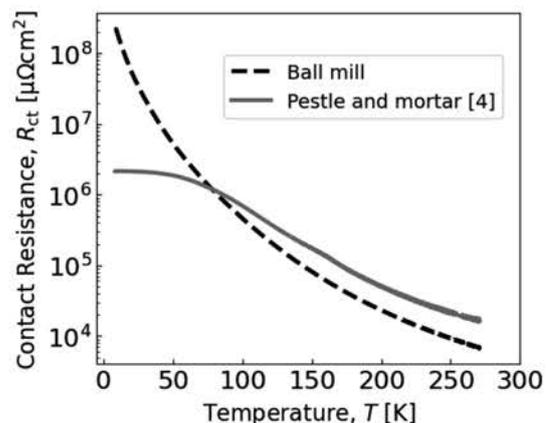


Fig. 2 Temperature dependence of R_{ct} for REBCO tapes coated with PSCCO slurry ground using a planetary ball mill.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP24KJ0385 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Hahn *et al.*, IEEE TAS **21**, 1592 (2011).
- [2] H.-W. Kim *et al.*, IEEE TAS **27**, 461704 (2017).
- [3] K. Sakurai *et al.*, IEEE TAS **35**, 4701505 (2025).
- [4] K. Sakurai *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, **107**, p.46 (2024).
- [5] M. Tahashi *et al.*, JJAP **61**, 018003 (2022).

抵抗制御界面を実装した no-insulation(NI)コイルの熱伝導特性

Thermal conductive properties of no-insulation (NI) coils implemented with resistance-controlled (RC) interfaces

西 翔音, 田中 湧也, 川畑 瑞穂, 中村 一也, 高尾 智明(上智大);

小林 賢介, 朴 任中, 山崎 俊夫, 柳澤 吉紀(理研)

IMANISHI Syouon, TANAKA Yuya, KAWAHATA Mizuho, NAKAMURA Kazuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

KOBAYASHI Kensuke, Piao Renzhong, YAMAZAKI Toshio, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN)

E-mail: s-imanishi-5m3@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導 REBCO コイルは、500 A/mm²を超える高臨界電流密度で運転できる可能性がある。このためには、熱的安定性とクエンチ保護性を向上させる必要がある。この観点から、intra-Layer No-Insulation (LNI) 法を含む No-Insulation (NI) 系統の手法は有望な手法である[1,2]。我々はこれまでに、NI 系統コイルの巻線内のバイパス抵抗を制御するために、ステンレス鋼 (stainless-steel: SS) で編まれたメッシュを用いた抵抗制御(Resistance-Controlled: RC)界面[3]を提案し、その電気的特性について実証してきた[4]。本報では、SS メッシュ RC 界面を備えた NI シングルパンケーキコイルの伝導冷却試験により、その熱伝導特性を評価した。

2. 実験方法

Fig. 1 にシングルパンケーキコイルを用いた熱伝導特性測定の様式図を示す。内径 50 mm、40 ターンのコイルを作製し、パルスチューブ冷凍機(住友重機械工業, RP-062B)の2ndステージに取り付けた。また、セルノックス温度センサをコイル巻棒(T_0)、5-6th ターン間(T_1)、35-36th ターン間(T_2)に取り付けた。温度コントローラ(Lake Shore Cryotronics Inc)を用いて、 T_0 を一定に制御しつつ、コイル外周部ヒータから定常入熱を加え、コイル径方向の定常温度勾配の測定を $T_0 = 4\text{--}70\text{ K}$ の範囲で行った。実験で得られたヒータ入熱量 Q 、コイル径方向のターン間温度差 $\Delta T (=T_2 - T_1)$ 、REBCO 線材および SS メッシュ RC 界面層の熱伝導率、ターン間接触面積 A_{CT} から熱伝達係数 h を以下の式で定義した。

$$h [\text{W/m}^2\text{K}] = \frac{Q [\text{W}]}{A_{CT} [\text{m}^2] \cdot \Delta T [\text{K}]} \quad (1)$$

無絶縁 REBCO 線材のターン間に SS メッシュ RC 界面を備えたコイルIと、無絶縁 REBCO 線材のみのコイルIIを作製した。コイル I では、無絶縁 REBCO 線材と SS メッシュ RC 界面層の境界の h が定義できる。この界面はエポキシ樹脂(CTD-521)により接着されている。コイル II では、無絶縁 REBCO 線材同士のドライ接触界面における h を定義できる。

3. 実験結果

Fig. 2 に、 $T_0 = 21\text{ K}$ 、入熱量 $Q = 1.1 \times 10^{-1}\text{ W}$ における温度変化の例を示す。 T_1 と T_2 はヒータからの入熱によって徐々に上昇し、それぞれ 30.3 K、33.3 K で飽和した。Fig. 3 に2つの熱的境界における熱伝達係数 h の温度依存性を示す。コイル I (■: 無絶縁 REBCO 線材と SS メッシュ RC 界面層の境界) の h は、コイル II (●: 無絶縁 REBCO 線材同士の接触界面) と類似の温度依存性を示し、その値は 1.5-2 倍程度であった。RC 界面は、熱的に付加的な存在であるが、無絶縁 REBCO 線材表面と SS メッシュ表面とが、エポキシにより接着されているため、このような良好な熱通過特性が得られるものと考えられる。

4. まとめ

高電流密度の REBCO コイルの実現に向けた要素研究として、SS メッシュ RC 界面の熱伝導特性の評価を行った。SS メッシュ RC 界面を有するコイルIIは、REBCO 線材間のドライ接触を持つコイルIと比較して、同等以上の熱伝達係数 h を示すことが分かった。当日の発表では、RC 界面層自体の熱伝導率を含め、熱伝導特性の全体像を発表する。

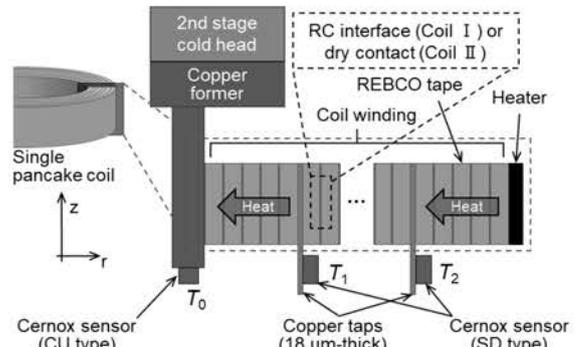


Fig. 1 Schematic diagram of measurement of thermal conduction characteristics using a single pancake coil

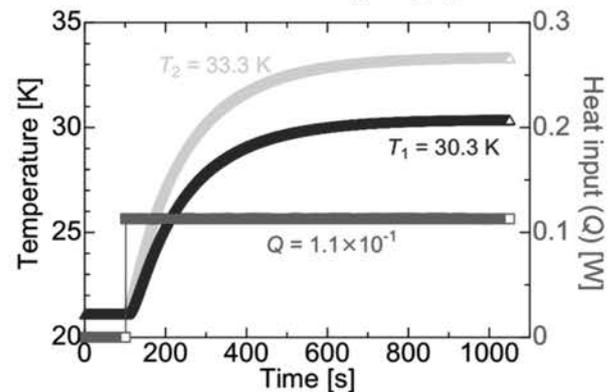


Fig. 2 A temperature measurement for Coil I at $T_0 = 21\text{ K}$ and heat input $Q = 1.1 \times 10^{-1}\text{ W}$

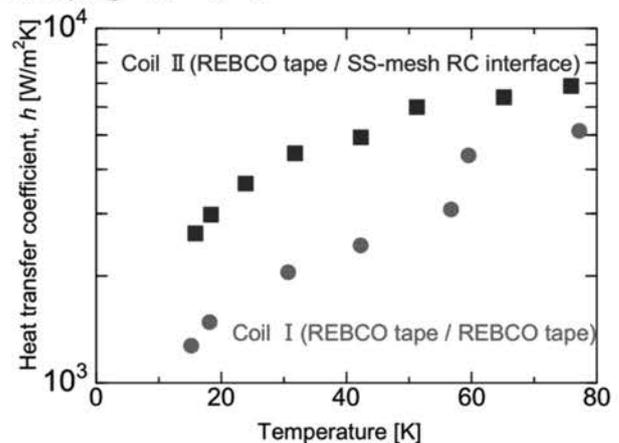


Fig. 3 Temperature dependence of the heat transfer coefficient at two thermal interfaces

本研究は理研-JEOL 連携開発プロジェクトの支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Y.Suetomi et al, SuST, 32 045003 (2019)
- [2] S.Hahn et al, IEEE TAS, 21 3 (2011)
- [3] Y.Tanaka et al, IEEE TAS, 35 5 (2025)
- [4] M.Kawahata et al, IEEE TAS, 35 5 (2025)

異なる抵抗率の導電性樹脂で含浸した高温超電導コイルの伝導冷却試験

Conduction Cooling Tests of High-Temperature Superconducting Coils Impregnated with Electrically Conductive Resins of Different Resistivities

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⁽¹⁾。前回報告⁽²⁾では、導電性樹脂フィラー総量に対する導電性フィラーの体積比率をパラメータとして、導電性樹脂の室温での抵抗率を $10^{-5} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ オーダーの範囲で幅広く制御できた。また、本樹脂にて含浸した REBCO コイルを液体窒素中で通電評価した結果、ターン間抵抗を $10^1 \sim 10^3 \mu\Omega/\text{turn}$ の3桁オーダーの範囲で制御することに成功した。今回、ターン間抵抗がオーダーで異なる導電性樹脂含浸 REBCO コイルを伝導冷却にて通電評価した結果を報告する。

2. 導電性樹脂含浸 REBCO コイルの試作・評価

試作したコイル諸元を Table 1 にまとめた。室温での抵抗率が $6.8 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ とオーダーで異なる導電性樹脂で含浸した REBCO コイルを試作した。液体窒素中での通電試験の結果、コイル n 値は 22~25 で劣化がなく、コイル I_c はいずれも 88 A であることを確認した。また、電源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見積もった平均ターン間抵抗は $59 \sim 3.3 \times 10^3 \mu\Omega/\text{turn}$ であった。

3. 伝導冷却試験

試作したコイルの上下面に高純度 Al 板を接着し、伝導冷却試験装置に組み込み、ヒータによりコイル温度を 30~60 K に制御した。電源遮断試験および熱暴走試験を実施し、通電電流、コイル電圧磁場および温度の過渡変化を評価した。Fig. 1 に、通電電流 50 A で電源遮断したときの運転温度に対するコイルのターン間抵抗を示した。なお、比較のため液体窒素中での電源遮断試験の結果を併せて示した。コイルのターン間抵抗はそのオーダーによらず温度に対しほぼ一定であった。熱暴走試験では、フラックスフロー抵抗が発生している状態から徐々に電流を増加させ、コイル両端電圧の急上昇をクエンチ検出器 (動作電圧 0.1 V、検出時間 0.1 s) で検知し、電源を遮断した。Fig. 2 に、コイル#2 の 60 K での熱暴走試験の結果を示す。229 A 通電時にコイル電圧が徐々に上昇して 0.1 V を超え、クエンチ検出器が動作し電源を遮断した。電源遮断時のコイル電圧は最大で 7.1 V であり、遮断後に導電性樹脂および外部抵抗でエネルギーを消費して、約 1 sec かけて

参考文献

- (1) H. Miyazaki, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. No. 4602805.
 (2) I. Abe, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, vol. 108 (2024), p. 3

消磁した。また、熱暴走試験後に再度通電試験を実施し、コイル I_c およびコイル n 値の低下がないことを確認した。

4. まとめ

抵抗率の異なる導電性樹脂にて含浸した REBCO コイルを伝導冷却にて通電評価し、遮断試験および熱暴走試験にて保護動作を検証した。今後は、保護動作時の挙動を分析し、本保護方式の有効範囲および保護条件を調査する。

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 at 77 K (A)	88	88	88
n-value at 77 K	22	25	24
Resistivity of conductive resin at RT ($\Omega \cdot \text{m}$)	6.8×10^{-5}	3.9×10^{-3}	4.2×10^{-2}
Average resistance between turns at 77 K ($\mu\Omega/\text{turn}$)	5.9×10^1	3.4×10^2	3.3×10^3

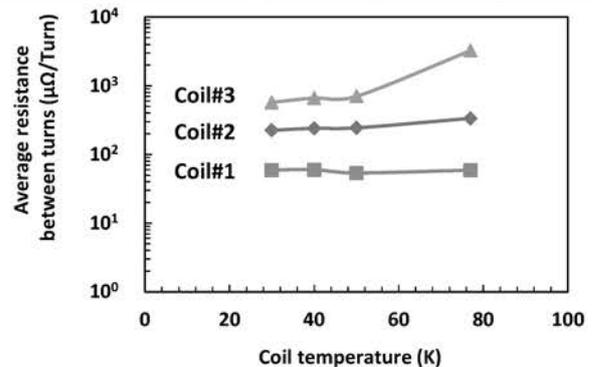


Fig. 1 Average resistance between turns depending on coil temperature.

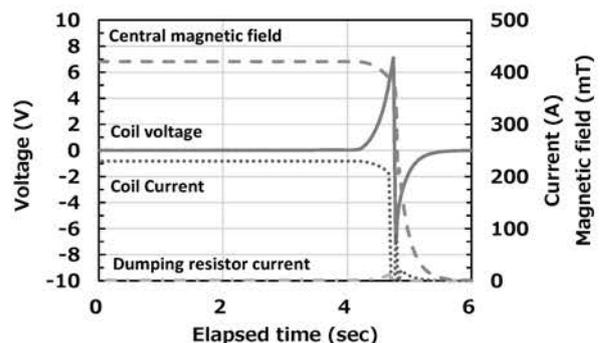


Fig. 2 Thermal runaway test of the coil #2 at 60 K.

ダミーコイルを用いた遮蔽電流低減手法に関する検討

Investigation into Screening Current Reduction with Dummy Coil

間藤 昂允; 野口 聡(北大)

MATO Takanobu; NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

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

1. はじめに

超電導線材特性やマグネット化技術が向上したことにより、2017年に米国国立高磁場研究所において、無絶縁 REBCO (rare-earth barium copper oxide) マグネットを使用して世界最高磁場である 45.5 T の生成に成功した[1]。このような高磁場生成実験がコイル開発を加速させるとともに、高磁場における課題を顕在化してきた。その一つが遮蔽電流である。遮蔽電流は REBCO 線材幅広面に鎖交する磁場を打ち消すように生じ、REBCO 線材幅方向に不均一に分布する。遮蔽電流は不均一な電磁力分布や磁場均一度の低下をもたらすため、高磁場応用では無視できない。遮蔽電流の低減が求められる。そこで、本研究では、非導通で配置されるコイル(以降、ダミーコイルと呼ぶ)を利用することで、遮蔽電流を低減できるか遮蔽電流シミュレーションを用いて検討する。

2. 検証モデル

45.5 T 生成実験を模擬したマグネットを解析対象とする。31.1 T を生成する外挿コイル内部に、12 積層シングルパンケーキ(SP: single pancake)コイルからなる内挿コイルが配置されており、この内挿コイルを部分要素等価回路法(PEEC: partial element equivalent circuit) [2]によって解析する。表 1 にコイル諸元と運転条件を示す。臨界電流密度の計算では文献[3]の磁場角度依存性を考慮した。励磁パターンについては図 1 に示されるように、外挿コイルの励磁後、内挿コイルの通電電流を 1 A/s の速度で 300 A まで掃引する。

今回はダミーコイル(DC: dummy coil)の配置を変更し、3通りを解析・比較する。図 2 に配置を示す。Case 1 はダミーコイルがない場合である。Case 2 は導通コイル(SP1-12)と同じ巻き数のダミーコイルを上下に配置するモデルである。最後に、Case 3 はコイル内周側に 100 μm の隙間をあけて 10 巻のダミーコイルを配置したモデルである。

2. 解析結果

内挿コイルの励磁後、200 s 時点での電流分布を図 3 に示す。ダミーコイルがない場合(Case 1)、径方向磁場を打ち消すように遮蔽電流が生じている様子が確認できる。

一方、ダミーコイルを上部に配置した Case 2 を見ると、遮蔽電流を低減できておらず、むしろ遮蔽電流の侵入長が長くなっている。DC1 下部に誘導された遮蔽電流が、SP1 の径方向磁場を増加させ、SP1 の臨界電流を低下させたためである。

内周にダミーコイルを配置した Case 3 では、若干の遮蔽電流低減が見られる。SP に誘導されるはずであった遮蔽電流がダミーコイルに誘導されていると考えられる。しかし、DC1 を見ると遮蔽電流が REBCO テープ内部まで侵入しており、これ以

上の遮蔽電流低減効果は期待できない。コイル内径の制約上、十分な巻き数を確保できず、遮蔽電流低減効果は小さい。

以上より、非導通で配置されるダミーコイルによる遮蔽電流低減効果は限定的であるとわかった。詳細については発表当日に報告する。

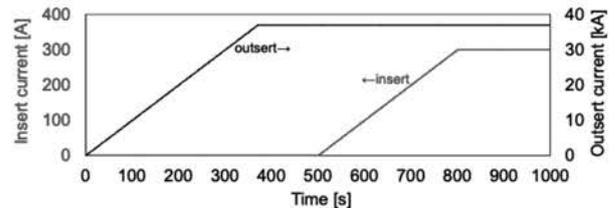


Fig. 1. Operating current profile of insert and outsert coils.

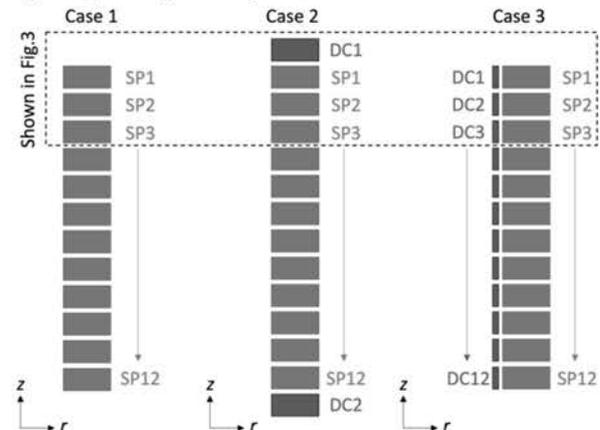


Fig. 2. Insert coil arrangement: (left) without dummy coils, (middle) with dummy coils at top and bottom, (right) with dummy coil inside SPs. The SPs are energized while the DCs are not.

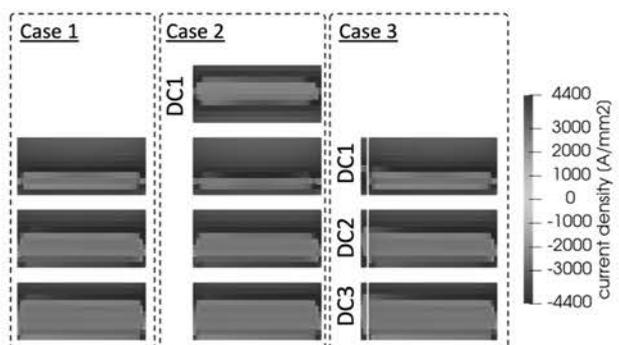


Fig. 3. Current density of insert coils at 1000 s.

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] T. Mato and S. Noguchi, "Effect Comparison of Different Conductor Widths in Magnetic Dam for Protection of NI REBCO Pancake Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, 2024, 4701705. 4701705.
- [3] H. Ueda et al., "Numerical Simulation on Magnetic Field Generated by Screening Current in 10-T-Class REBCO Coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, 2016, Art. no. 4701205.

TABLE I
COIL SPECIFICATIONS AND OPERATING CONDITIONS

Parameters	Value
Coil inner diameter [mm]	14
Coil outer diameter [mm]	31.6
Coil height [mm]	59
Number of turns per pancake	200
Winding method	no-insulation
Number of single pancakes	12
Contact resistivity [$\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$]	70
Operating temperature [K]	4.2

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2025 年春)(1):

概要

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (1):
overview

雨宮 尚之, 曾我部 友輔(京大); 高山 茂貴, 野中 利昭(東芝エネルギーシステムズ); 福井 聡(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

線材の局所的欠陥・常伝導転移に対するロバスト性を維持しながらの低交流損失性, 良好な巻線性, 大電流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, その進捗概要を説明する。

2. ケーブル作製技術の向上とケーブル作製の実績

ケーブルの作製速度(単位時間あたりの作製量)を向上させるために, ケーブリング装置のソフトウェア・ハードウェアの改良を進めた。ケーブリング装置の製造能力としては, 必要な線材を調達できれば, 1 kA 級ケーブル換算で, 最大 4 km/年程度のケーブル製造が可能である。現在, 標準的に用いている直径 3 mm の黄銅コアを用いたケーブルの作製実績を Table 1 にまとめた。このほか, 撚り線コア, 直径 2.5 mm の黄銅コアを用いた実績があり, また, アルミニウムコアを用いたケーブルの作製も検討している。SCSC ケーブルを作製するためのマルチフィラメント線については, 2 mm 幅, 基板厚さ 30 μm , 10 フィラメントのものを標準仕様とし, この 1 年間で 1.5 km を京都大学にて調達している。

3. 交流損失

短尺 SCSC ケーブルの交流損失の磁界振幅・周波数依存性, 温度依存性を把握できれば, 磁界解析によって得たコイルに巻いたときの SCSC ケーブルの経験磁界分布と合わせて, 任意の磁界振幅・周波数, 任意の温度のもとでのコイルの交流損失を予想できると考え, 短尺 SCSC ケーブルの交流損失の実験的評価を進めている。

ヒステリシス損失に関しては, 77 K で取得した多様な SCSC ケーブルの交流損失測定値を分析し, 緩やかな電界-電流密度特性を考慮したヒステリシス損失実験則の導出を進めている(3A-p05)。異なる温度でも, その温度での電界-電流密度特性がわかれば, 実験則を適用可能であると考えている。

結合損失については, 横断抵抗を支配する銅めっき層の電気抵抗が温度によって変化すること踏まえ, 4.2 - 77 K で, 多層 SCSC ケーブルの結合損失を実測し, 温度に依存した結合時定数と結合損失の形状因子を求めている(3A-p06)。これらの値をもとに, 磁界振幅についての考察を経て, 多様な条件下での結合損失を計算する方法を構築していく。

これらの結果をもとに, 最終的には, 複雑な数値計算に依らずに, コイルの交流損失を見積もる手法を構築する。

4. スパイラル導体の層間電流分布

SCSC ケーブルを含めたスパイラル導体においては, 線材間の定常的・過渡的電流分布が通電特性に影響を与えるはずであるが, これを明確に測定した例はない。各層でスパイラルの向きが異なる 2 層導体を対象として, 直径 5 mm のコアの中に設けたホールセンサにより測定した軸方向磁界から層間電流分布を求める技術を確立した。ホールセンサをケーブル長手方向 5 か所に設け, 5 か所の電流分布を同時に測定することに成功した(3A-p09)。この技術は, 端末抵抗の不均一に起因する不均一な電流分布, 線材に局所的欠陥があった

際の接触抵抗を介しての電流迂回などについて調べる上で, 有用である。

5. コイル化にむけた短尺ケーブルの機械特性評価

SCSC ケーブルを用いてコイルを作製する場合, 巻き線過程において張力や横方向圧縮力が加わる。これらの許容限界を調べるという観点で, 室温における引張応力や圧縮応力が通電特性に与える影響を, 応力印加前後の臨界電流を液体窒素中で測定することにより評価している(3A-p04)。

6. 応用に向けた検討と展開

低交流損失, 大電流量, 優れた巻線性という SCSC ケーブルの利点は回転機の電機子巻線における活用が期待される。そこで, SCSC ケーブルによる電機子巻線を用いた MW 級の同期電動機の電磁設計を複数種類検討し, それらの特徴を比較している(3A-p08)。

また, SCSC ケーブルで加速器用マグネットのコイルを巻いた場合, 幅 4 mm のテープ線単線で巻いた場合や, 幅 2 mm のテープ線を素線とした CORC®型ケーブルで巻いた場合に比べて, 遮蔽電流磁界による誤差磁界の低減が期待できる。そこで, SCSC ケーブルで構成されるマグネットの磁場精度評価を行うための数値電磁界解析手法についての検討を進めている(3A-p07)ほか, SCSC ケーブル, 比較用のモノフィラメント線で巻いたケーブル, 巻き線工程慣熟用のダミーケーブルをローレンス・バークレー国立研究所に提供し, コイル作製に向けた準備を進めている。

7. 局所的欠陥耐性を高めた SCSC-IFB ケーブル

マルチフィラメント線においてフィラメント幅を細くしていくと局所的欠陥によるフィラメント電流ブロックの可能性が高まる。そのような場合に電流を迂回させるためにフィラメント間に超伝導ブリッジを設けた線で構成した SCSC-IFB ケーブルという新概念のケーブルを提案し, 超伝導ブリッジによる通電特性改善効果を素線レベルの実験で確かめたほか, 単層 SCSC-IFB ケーブルの結合時定数を測定し, 超伝導ブリッジを設けてもフィラメント間の結合を十分防止できることを確かめた(3A-p02)。また, SCSC-IFB ケーブルの磁化損失特性について, 数値電磁界解析による評価も進めている(3A-p03)。

詳細な研究成果は, 本発表に続く連報にて報告する。

謝辞

本研究は, JST ALCA-Next JPMJAN24G1(連報(4)~(9))ならびに JSPS 科研費 JP24H00316(連報(2), (3))の支援を受けたものである。

Table 1 Summary of cable fabrication as of April 14, 2025.

	For Toshiba	For KU	To outside	Total
SCC cable*	101 m	49 m	16.8 m	166.8 m
SCSC cable	23.4 m	52.4 m	8 m	83.8 m
Total	124.4 m	101.4 m	24.8 m	250.6 m

* Spiral Copper-plated Coated-conductor cable

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2025 年春)(2): 新概念 SCSC-IFB ケーブルと初期実験結果 Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (2): a new concept of SCSC-IFB cable and its initial experimental results

雨宮 尚之, 上垣 終季, 曾我部 友輔(京大)

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

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

1. はじめに

マルチフィラメント薄膜高温超伝導線においてフィラメント幅を細くしていくと局所的欠陥によるフィラメント電流ブロックの可能性が高まる。そのような場合に電流を迂回させるためにフィラメント間に超伝導ブリッジを設けた線で構成した SCSC-IFB ケーブル (Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor-with-Inter-Filament-Bridges cable) という新概念のケーブルを提案する。さらに、超伝導ブリッジによる電界-電流特性の改善効果を示す素線レベルでの初期実験結果、フィラメント間ブリッジを設けてもフィラメント間の結合を十分解けることを示す単層 SCSC-IFB ケーブルの結合時定数評価の初期実験結果について報告する。

2. SCSC-IFB ケーブルの概念

Fig. 1(a)に示すようなフィラメント間が絶縁されたマルチフィラメント線では、あるフィラメントの長手方向のどこか一か所に局所的欠陥が存在すると、そのフィラメントは、もはや電流を輸送できなくなる。従来型 SCSC ケーブルでは、フィラメント間を電気的に接続する銅めっきにより局所的欠陥を迂回するような電流分流を可能にしていたが、銅を介した電流分流が、低電界域の通電特性を損なうという欠点 (n 値低下) があった。SCSC-IFB ケーブルは、Fig. 1(b)のように銅めっき以外にフィラメント間をつなぐ超伝導ブリッジを設けることにより超伝導的な電流分流を可能にしたマルチフィラメント線を用いた改良型の SCSC ケーブルである。

3. 素線の電界-電流特性の測定

幅 2 mm, フィラメント数 10, 銅めっき層厚さ(片側) 10 μm のマルチフィラメント線について、超伝導ブリッジのないもの、幅 1 mm の超伝導ブリッジを 10 mm 間隔で設けたものの 2 種類をそれぞれ 3 本ずつ用意し、その通電特性を測定した。電界-電流特性の図を Fig. 2 に、100 $\mu\text{V/m}$ で定義した臨界電流と 10 - 100 $\mu\text{V/m}$ の電界範囲で定義した n 値を Table 1 に示す。3 本の試料間でばらつきはあるが、超伝導ブリッジにより、10 - 100 $\mu\text{V/m}$ の電界範囲で定義した n 値は向上している。

4. 結合時定数の測定

3. で通電特性を測定した、それぞれ 3 本のマルチフィラメント線を直径 3 mm の GFRP コアの周りにピッチ 9.48 mm で巻いた単層 SCSC ケーブルを液体窒素で冷却し、これに、振幅 0.15 mT, 周波数 1 - 20 kHz の正弦波交流磁界を印加し、磁化損失を測定した。一周あたりの磁化損失を周波数に対してプロットしたグラフのピークから求めた結合時定数を Table 2 に示す。超伝導ブリッジがない場合の 14 μs より大きくなってはいるものの、超伝導ブリッジを設けても結合時定数は 19 μs に留まっていることがわかる。

5. まとめ

局所的欠陥に対するロバスト性を高めるために、フィラメント間で超伝導的な分流を可能にする超伝導ブリッジを設けたマルチフィラメント線から構成される SCSC-IFB ケーブルを提案した。超伝導ブリッジの導入により低電界域での通電損失が改善されることを素線の通電実験から確認した。超伝導ブリッジの導入により結合時定数は増加したが、運転周波数にもよ

るが許容できる水準であると考えられる。特に、運転周波数が比較的低い一方、低電界域での通電特性が重要な場合、あるいは、フィラメント幅をさらに低減し局所的欠陥による電流ブロックがより顕在化するような場合には、SCSC-IFB ケーブルは有力な選択肢となり得ると考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP24H00316 の助成を受けたものである。

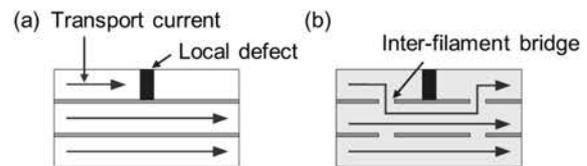


Fig. 1 Two types of striated coated conductor: (a) without inter-filament bridges as well as copper-plating; (b) with inter-filament bridges.

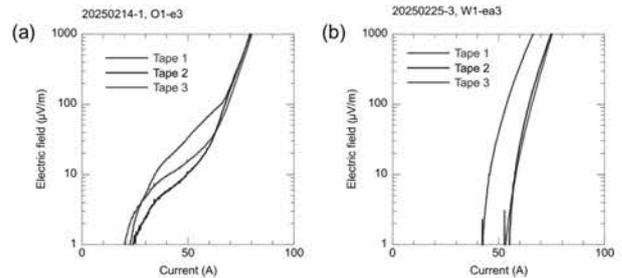


Fig. 2 Electric field vs. current characteristics: (a) copper-plated 10-filament coated conductor without inter-filament bridges; (b) copper-plated 10-filament coated conductor with inter-filament bridges whose separation is 10 mm.

Table 1 Critical currents and n values (3 samples for each)

	Critical current	n value
a) Without inter-filament bridges	68.9 A	6.3
	67.4 A	10.2
	65.5 A	3.8
b) With inter-filament bridges whose separation is 10 mm	65.8 A	17.8
	64.3 A	19.3
	53.8 A	13.2

Table 2 Coupling time constants at 77 K, determined from frequency dependence of magnetization losses measured at 0.15 mT (peak) in 1 - 20 kHz.

	Coupling time constant
a) SCSC cable consisting of 10-filament coated conductors without inter-filament bridges	14 μs
b) SCSC-IFB cable consisting of 10-filament coated conductors with inter-filament bridges whose separation is 10 mm	19 μs

SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (3): SCSC-IFB ケーブルの磁化損失解析

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (3): magnetization loss analyses of SCSC-IFB cables

曾我部 友輔, 宮腰 真卓人, 雨宮 尚之 (京大)
SOGABE Yusuke, MIYAKOSHI Masato, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)
E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyotou.ac.jp

1. はじめに

我々は、SCSC ケーブルを構成する銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のフィラメント間を超伝導ブリッジで接続する SCSC-IFB ケーブル (Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor-with-Inter-Filament-Bridges cable) に関する検討を始めている。研究開発の初期段階として、SCSC-IFB ケーブルに外部磁界を印加した場合の磁化損失特性を数値電磁界解析によって評価した。

2. 解析手法・解析対象の諸元

SCSC-IFB ケーブルの磁化損失解析においては、電流ベクトルポテンシャルを未知変数とする T 法と、超伝導線厚さ方向の電磁界分布を無視する薄板近似を組み合わせた有限要素法を用いた[1]。SCSC-IFB ケーブルを構成する超伝導ブリッジを含む銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のモデル化にあたっては、超伝導ブリッジが存在しないフィラメント間のストリエーション部を、超伝導層と同じ厚さの常伝導部とした。

解析対象の SCSC-IFB ケーブルの外観を Fig. 1 に、諸元を Table 1 に示す。ここでは 1 本の薄膜高温超伝導線をスパイラル状にしたケーブルについて結果を示す。解析対象とする SCSC-IFB ケーブルでは、超伝導ブリッジは線材長手方向の同じ位置に整列して配置されている。また、超伝導ブリッジ間隔 d_b (超伝導ブリッジの中心同士の超伝導テープ方向間隔) についてはパラメータとした。また、超伝導ブリッジを含まないマルチフィラメント線およびモノフィラメント線についても解析を行った。これらの解析においては、外部磁界 200 mT、磁界周波数 10 Hz または 50 Hz とした。

3. 解析結果

超伝導ブリッジ間隔 d_b を変更した場合の磁化損失を Fig. 2 に示す。原理上、半ピッチに対応する長さの超伝導線中に超伝導ブリッジが 2 個以上存在しなければ、フィラメント間が結合することはない。今回の試料においては、半ピッチに対応する超伝導線の長さは約 6.7 mm であり、これよりも十分超伝導ブリッジの間隔が広い場合、磁化損失が小さくなっていることがわかる。また、ヒステリシス損失と磁化損失を、モノフィラメント線またはマルチフィラメント線で構成されたスパイラル導体、ブリッジ間隔 3.7 mm もしくは 14.4 mm の SCSC-IFB ケーブルについて比較した結果を Fig. 3 に示す。ブリッジ間隔によって SCSC-IFB ケーブルの損失特性が大きく影響を受けることが解析によって確認された。

参考文献

1. T. Mifune, et al.: SUST, Vol. 32 (2019) 094002

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP24H00316 の支援を受けたものである。



Fig. 1 Analyzed SCSC-IFB cable. Black parts are superconducting, and white parts are normal-conducting.

Table 1 Specifications of analyzed cables

Cable specifications			
Cable length	130 mm	Core diameter	3 mm
Winding angle	45°	Number of pitches	~14
Tape specifications (for all tapes)			
Width of tape	2 mm	Tape length	183 mm
Thickness of superconductor layer	2 μm	Tape length in a half-pitch	~6.7 mm
Thickness of copper layer	10 μm (per side)		
Tape specifications (only for multifilament and IFB tapes)			
Number of filaments	10	Conductivity of striation parts	9.5×10^{-8} S/m
Width of filaments	0.155 mm	Width of superconducting bridges	1.13 mm

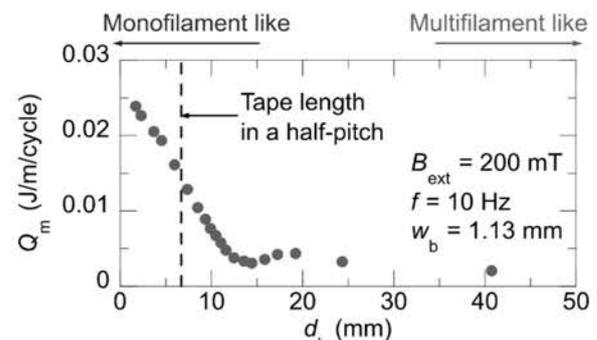


Fig. 2 Magnetization loss Q_m vs. distance between superconducting bridges d_b .

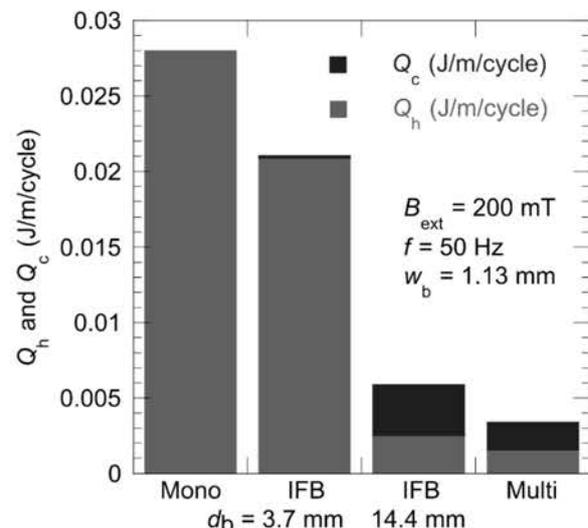


Fig. 3 Comparison of hysteresis losses Q_h and coupling losses Q_c in analyzed coated conductors.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2025 年春)(4): コイル化にむけた要素試験用短尺ケーブルの機械特性評価

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (4): evaluation of mechanical properties simulating winding processes in short samples

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(東芝エネルギーシステムズ);
菅野 未知央(KEK); 福井 聡(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);
SUGANO Michinaka (KEK); 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

SCSC ケーブルはマルチフィラメント化した 2 mm 幅の REBCO 線を $\Phi 3$ mm の真鍮コアの周囲にスパイラル状に巻き付けた構成を基本としている。本ケーブルを巻線コイルを作製するには、ケーブルの軸方向に引張応力、径方向に圧縮応力が作用する。このとき REBCO 線には長手方向の引張応力や厚さ方向の圧縮応力、ねじりによるせん断応力などが複合的に作用するため、超電導特性の低下が懸念される。そのため、これら応力が超電導特性に与える影響を評価することを目的に、短尺サンプルを試作し、室温で巻線時と同等の引張力、圧縮力を負荷し、液体窒素中で通電試験を実施した。本発表ではその結果について報告する。

2. 引張・圧縮試験

Fig.1 に示す構成の長さ 210 mm の短尺サンプル A, B を試作した。ケーブルには幅 2 mm のモノフィラメント線を 4 層、1 層当たり 3 本の計 12 本巻き付けたものを使用しており、ケーブルの両端に電流導入用のターミナルとして長さ 40 mm、外径 8 mm、内径 6 mm の銅パイプを In-3%Ag はんだで接続している。この短尺サンプルに Table 1 に示すパラメータで芯線引張、ターミナル引張、ケーブル圧縮試験を順に行い、その前後で I - V 測定を実施した。

芯線引張試験では、ターミナル外側の芯線に治具を取り付け、引張力を負荷した。また、ターミナル引張試験では、ケーブル両端のターミナル外周部に治具を取り付け、引張力を負荷した。圧縮試験では、ケーブル両端は固定せず、Fig.1 に示すケーブル中央部 50 mm の領域に SUS 製の治具で 1 軸の圧縮力を負荷した。

3. 通電試験

サンプル B の芯線引張、ターミナル引張、圧縮試験前後の I - V 測定結果から求めた E - I 特性を Fig.2 に示す。この結果から、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ を電界基準として臨界電流(I_c)を評価した。Table 2 に各引張圧縮試験前後の I_c と n 値を示す。サンプル A, B ともに芯線引張後に I_c が低下しており、ターミナル引張試験、圧縮試験では I_c が変化しないことを確認した。

4. まとめ

ケーブルの引張、圧縮試験を実施し、その前後での I - V 測定により、SCSC ケーブルの巻線が超電導特性に与える影響を評価した。その結果、現状の構成では 150 N で I_c が低下することが明らかになった。当日の講演では、150 N 以下の引張力で同様の試験を実施し、 I_c の引張力依存性を評価した結果と、引張力に対する耐性を向上させたターミナル構成についても報告する。

謝辞

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

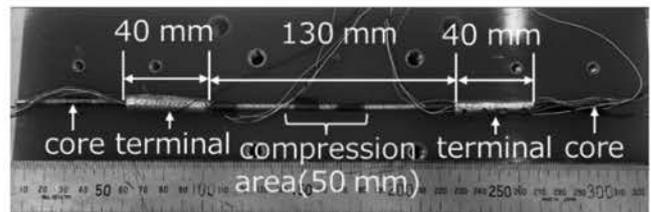


Fig. 1 Photograph of a Short Sample (Sample B)

Table 1 Parameters of Tensile and Compression Tests

	Tensile test of core	Tensile test of terminal	Compression test
Sample A	150 N	150 N	150 N
Sample B	300 N	300 N	300 N

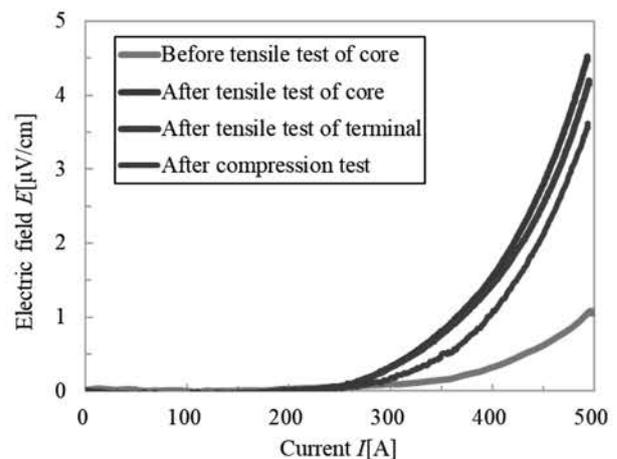


Fig. 2 Comparison of Measured E - I Characteristics (Sample B)

Table 2 I_c and n -Values Before and After Each Tensile and Compression Test

	Sample A		Sample B	
	I_c	n -value	I_c	n -value
Before tensile test of core	567 A	9.2	445 A	5.0
After tensile test of core	483 A	11.3	340 A	5.7
After tensile test of terminal	479 A	11.2	343 A	5.5
After compression test	479 A	12.4	343 A	5.7

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2025 年春)(5): 臨界状態モデルと異なる電圧—電流特性を踏まえた SCSC ケーブルにおけるヒステリシス損失の実験則

Progress of R&D of SCSC cable in Spring 2025 (5): empirical law of hysteresis loss in SCSC cables considering its V-I characteristics different from critical state model

重政 茉於, 曾我部 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た導体である。SCSC ケーブルでは, 結合電流をスパイラル半ピッチに閉じ込めることで, 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。これまでの発表では, 線材が臨界状態モデルに従った電圧—電流特性を持つと仮定した上で議論をしてきた。一方, 実際の線材は, 臨界状態モデルと異なる電圧—電流特性を持つ。本発表では, 磁化損失のうちヒステリシス損失に関して, 実際の線材が持つ電圧—電流特性を踏まえた新たな計算手法を提案する。

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, 超伝導フィラメント厚さ t_{sc} は 1 μm , フィラメント数 n_f は 1~10, 銅層厚さ t_{cu} は 5~40 μm , 層数 n_l は 1~8, 1 層あたりの線材の本数 n_l/n_l は 1~3 である。

3. Brandt の理論に基づくヒステリシス損失理論式

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 $Q_{BI,t}$, $n_f Q_{BI,f}$ は以下の式で示される[2]。

$$Q_{BI,t} = \frac{(\mu_0 H_m)^2 \pi w_t^2}{\mu_0} \cdot \frac{g(H_m/H_c)}{(H_m/H_c)}, n_f Q_{BI,f} = \frac{Q_{BI,t}}{n_f} \quad (1)$$

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

J_c は線材の臨界電流であり, J_c は臨界電流密度である。

4. 超伝導フィラメント内部の電流密度の導出

Fig. 2 に, ある一つの SCSC ケーブルに用いられた, 線材幅 $w_t = 2$ mm, フィラメント幅 $w_f = 155$ μm のマルチフィラメント線の, 四端子法によって測定された電界—電流密度(E - J) 特性を実線で示す。また Fig. 2 には, 臨界状態モデルに従う場合の E - J 特性と, 後述する式(3)で記述される n 値モデルで近似した E - J 特性を, それぞれ破線と一点鎖線で示している。

$$E = E_0 (J/J_c)^n, E_0 = 100 \mu\text{V/m} \quad (3)$$

式(3)において, 臨界電流密度 J_c は電界 100 $\mu\text{V/m}$ に達したときの電流密度である。Fig. 2 の例では, $J_c = 2.167 \times 10^{10}$ A/m^2 , $n = 7.3$ である。

従来では, 定義電界 100 $\mu\text{V/m}$ の臨界電流密度 J_c を式(2)に代入してヒステリシス損失理論値を計算したが, 特に n が低い線材を用いた SCSC ケーブルにおいては実験値と理論値が一致しない場合があった。その原因の一つとして, フィラメントが臨界状態モデルと異なる E - J 特性を持つため, 内部で生じる電流密度が J_c と異なる点が考えられる。

フィラメント内部における電流密度を計算するために, フィラメントの断面を一次元近似したモデルを用いて, 式(3)に基づ

く電磁界解析を行った。Fig. 3 は, 無限長かつ直線状の幅 $w_f = 155$ μm の単一フィラメントに, 振幅 $\mu_0 H_m = 100$ mT, 周波数 $f = 65.44$ Hz の交流磁界 $B = \mu_0 H_m \cos(2\pi f t)$ を幅広面に対して垂直に印加したときの, 電流密度がピークに達する時刻 $t = 2/f$ における, フィラメント内部の電流密度の線材幅方向分布を示したものである。式(3)中の J_c および n はそれぞれ Fig. 2 と同じく $J_c = 2.167 \times 10^{10}$ A/m^2 , $n = 7.3$ とした。フィラメント内部の電流密度の絶対値の平均は 3.02×10^{10} A/m^2 であり, J_c を上回る値となった。本発表では, 様々な J_c および n の値を持つ線材に対して, 磁界振幅および周波数を変えながら同様な計算を行い, 得られた電流密度を式(2)の J_c に代入してヒステリシス損失理論値を計算し, 実験値と比較する。

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)

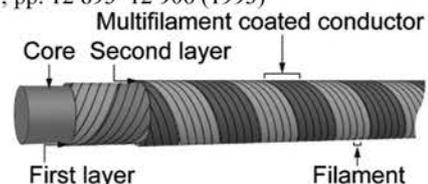


Fig. 1 Schematic view of the SCSC cable [1].

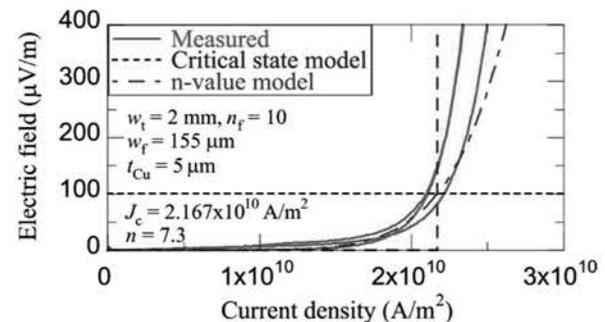


Fig. 2 Example of E - J characteristic of multifilament coated conductors used in SCSC cable.

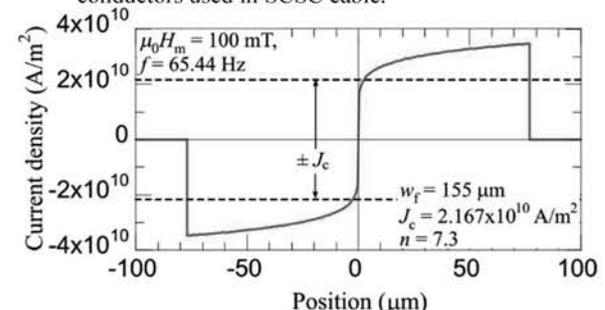


Fig. 3 Current density in the single filament exposed in ac magnetic field calculated via 1D FEM analysis.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (6): 多層 SCSC ケーブルにおける結合損失特性の温度依存性

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (6):
temperature dependences of coupling loss characteristics of multilayer SCSC cables

上垣 終季, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京都大学)

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

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

1. はじめに

SCSC ケーブルは銅を複合した多芯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構造をしている。多芯化とスパイラル構造によって低交流損失を実現する高温超伝導集合導体として期待されている。本発表では、多層 SCSC ケーブルの結合損失特性の層数依存性、温度依存性について測定した結果について報告する。

2. 試料諸元および測定方法

Table 1 に使用した薄膜高温超伝導線の諸元を示す。SuperPower Inc.社製の 2 mm 幅薄膜高温超伝導線を使用した。超伝導層は 10 フィラメントに分割され、超伝導層の上には 10 μm の銅メッキが施されている。Table 2 にケーブルの諸元を示し、Fig. 1 にケーブル構造の概念図を示す。直径 3 mm の GFRP コアに 1 層あたり 3 本の超伝導線を巻き付け、1 層/2 層/4 層/8 層の試料をそれぞれ用意した。奇数層は S 方向、偶数層は Z 方向となるように互い違いに巻き付けた。各層に対して隣り合うテープ間の距離が 0.25 mm となるように各層の巻き付け角度を調整し、京都大学に設置されている長尺ケーブルリング装置を用いて作製した。

ヒステリシス損失が無視でき、結合損失が支配的となるように 0.15 mT の低磁界振幅中で磁化損失をピックアップコイル法[1]によって測定した。磁化損失を最大 20 kHz までの広い周波数範囲で測定し、式(1)に示す結合損失の理論式にフィッティングすることで結合損失の特性を支配する結合時定数と形状因子を得た。

$$Q_c = A'_c \frac{\mu_{\text{eff}} H_m^2}{2} \cdot \frac{2\pi f \tau_c}{1 + (2\pi f \tau_c)^2} \quad (1)$$

ここで、 H_m , f は外部磁界の振幅と周波数、 μ_{eff} は等価透磁率、 τ_c は結合時定数、 A'_c は形状因子である。結合時定数は結合電流の減衰時定数であり、外部磁界の変化に対して十分大きいことが望ましい。試料の等価透磁率の値が不明であるため、真空の透磁率と等しいと仮定している。この測定を液体ヘリウムに浸漬冷却した状態から、蒸発による自然昇温の過程で繰り返し測定することで、多層 SCSC ケーブルの結合損失特性の温度依存性を得た。

3. 測定結果

Fig. 2 に 1 層および 4 層試料の磁化損失を 4.2 K, 77 K において測定した結果を示す。測定した磁化損失は結合損失に支配され、デバイ型の曲線を示している。温度が上昇すると、いずれの試料も形状因子の大きさはほとんど変化していない。一方で、結合時定数は短くなる。これは温度上昇によって銅メッキ層の導電率が低下し、フィラメント間の等価導電率が低下したためであると考えられる。層数が増えると形状因子が大きくなる。これは層数が増えることで、ケーブルの径などの構造が変化したことに起因すると考えられる。また、結合時定数もわずかに長くなっている。これは異なる層を流れる結合電流ループ間の相互インダクタンスによる影響であると考えられる。測定結果より、多層 SCSC ケーブルは任意の運転温度で、数 100 Hz までの実用的な運転周波数での磁界変化と比べて、十分に短い結合時定数を持つことが分かった。しかし、真空の透磁率として仮定した等価透磁率は磁

界振幅によって変化する可能性がある。そのため、運転条件での結合損失特性を評価するためには等価透磁率の補正が必要である。

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

- Z. Jiang and N. Amemiya, *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 17, 2004

Table 1 Specifications of coated conductors

Tape manufacturer	SuperPower Inc.
Tape type	SCS2030AP
Tape width w_t	2 mm
Number of filaments n_f	10
Copper layer thickness t_{Cu}	10 $\mu\text{m} \times 2$ (20 μm)
Critical current I_c	69 A

#1 Measured at Kyoto University.

Table 2 Specifications of SCSC cables

Core diameter	3 mm
Core material	GFRP
Number of layers	1 / 2 / 4 / 8
Number of tapes per layer	3
Sample length	120 mm

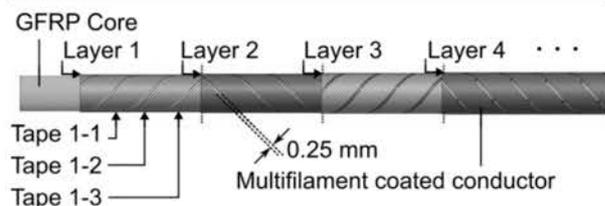


Fig. 1 Schematic view of SCSC cable.

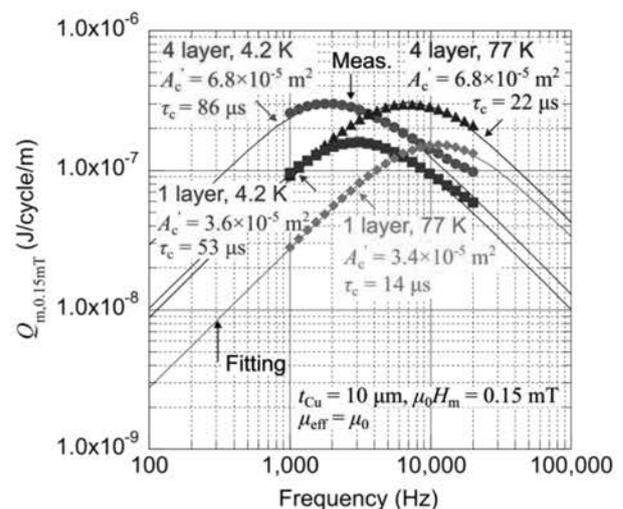


Fig. 2 Measured magnetization loss of SCSC cable plotted against frequency.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2025 年春)(7): SCSC ケーブルで構成されるマグネットの磁界精度評価手法に関する検討

Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (7): electromagnetic field analysis model for evaluation of magnetic field accuracy in magnets composed of SCSC cables

曾我部 友輔, 林 遼一, 雨宮 尚之(京大)
SOGABE Yusuke, HAYASHI Ryoichi, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)
E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyotou.ac.jp

1. はじめに

SCSC ケーブルは、導体の磁化が小さくなる点から、加速器用マグネットなどのマグネット応用が期待されている。その場合にマグネットの発生磁界精度の数値電磁界解析による評価が必要となるが、SCSC ケーブルで構成されるマグネットのマルチスケールな構造に起因し、そのようなマグネット全体の数値電磁界解析は困難であると考えられる。今回は特に、SCSC ケーブルで構成されるマグネットの磁界精度評価を行うための数値電磁界解析手法について、隣接するケーブル間の相互作用を簡略化する手法の妥当性について検討した。

2. 磁界精度評価手法の簡略化

著者らが過去にスパイラル導体で構成されるマグネットを対象として検討した簡略化手法[1]では、ある一つのターン、すなわち一本の導体に着目したとき、その導体の周囲のスパイラル導体を流れる遮蔽電流計算を簡略化し、周囲のスパイラル導体を構成する超伝導線には通電電流が一樣に流れているとして、対象の遮蔽電流計算を行っていた。これによって、計算量を大幅に削減可能であり、さらに交流損失評価においては十分な精度が得られることが確認されている。

今回の検討では、同様の手法をSCSCケーブルで構成されるマグネットに適用して遮蔽電流磁界を計算した場合に、マグネット設計上許容できないモデル化誤差が発生しないかを確認した。また、妥当性の確認のため、同じモデルを対象として、簡略化を行わない数値電磁界解析を合わせて行った。

3. 検討対象の形状と数値電磁界解析手法

今回は、環状のSCSCケーブルを1ターンとし、それを積層して構成したマグネットを対象とした。このマグネット形状は、一般的なソレノイドコイルや、加速器用マグネットとして検討されているCanted cosine-theta マグネットを模擬したものである。また、計算コストの観点から、環状のSCSCケーブル全体を対象とするのではなく、その一部のみを対象として検討を行った。講演概要においては、コイル軸方向にのみ積層された場合について結果を示す。解析対象とするSCSCケーブルおよびコイルの諸元をTable 1に示す。本解析では、外部磁界をコイル積層軸方向に印加している。

有限要素法による数値電磁界解析においては、電流ベクトルポテンシャルを未知数とする T 法と、超伝導層に流れる電流のみを考慮する薄板近似を組み合わせて使用した[2]。

4. 解析結果

以下では、簡略化を行っていない解析モデルを Model A、簡略化を行った解析モデルを Model B と呼ぶ。Model A、B で計算された幅方向電流密度分布を Fig. 1 に示す。ここで発生した差は、Model B においては隣接するSCSCケーブルの遮蔽効果が考慮されず、超伝導線の経験磁界が変化しているためであると考えられる。一方、Model A、B で計算されたコイル軸方向磁界成分の径方向分布の差を Fig. 2 に示す。遮蔽電流磁界のモデル化誤差が外部磁界である 3 T に対して 10^{-5} 以下に収まっている領域、すなわち加速器マグネットの解析に必要と考えられる精度が確保できている領域は、コイル中心から 14 mm であった。今後は、この領域を大きくするように解析手法を改良することが必要になると考えられる。

参考文献

1. Y. Sogabe, et al.: IEEE-TAS, Vol. 30 (2020) 4004005
2. T. Mifune, et al.: SUST, Vol. 32 (2019) 094002

謝辞

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

Table 1 Specifications of analyzed cables and coils

No. of layer	3	Core diameter	5 mm
No. of tape / layer	2	Bending radius of cables	50 mm
Tape width	2 mm	No. of analyzed cables	3
No. of filaments	4	External magnetic field	3 T
Thickness of superconductor layer	1.75 μm	Cable current	100 A
Spiral pitch	5.6 mm	Frequency	100 Hz

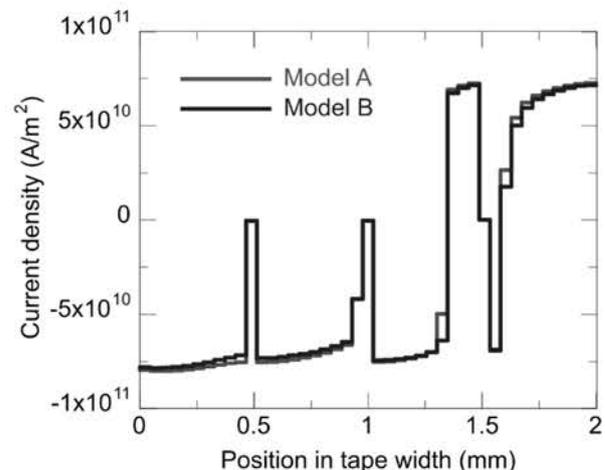


Fig. 1 Current density distribution in the width direction of a coated conductor at a position where the coated conductor is perpendicular to the external magnetic field.

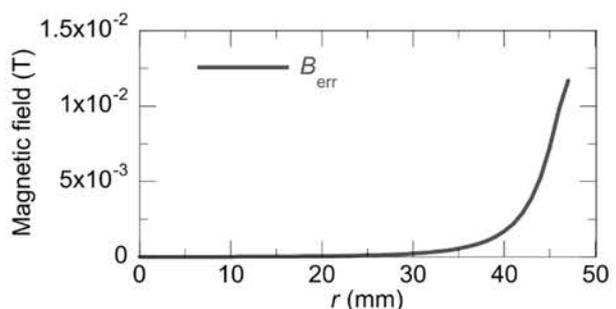


Fig. 2 Difference of magnetic flux density distribution in coil radial direction calculated by models A and B

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2025 年春)(8): SCSC ケーブルによる電機子巻線に適用した同期電動機の電磁設計の比較 Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (8): comparison of electromagnetic designs of synchronous motors using SCSC cables for armature windings

福井 聡, 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

SCSC ケーブルの持つ低損失性や巻線容易性などの利点を活かすことにより、大起磁力の界磁を用いずとも、高出力の回転機の実現が期待できる。前報⁽¹⁾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、2 極ハルバツ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わせた MW 級の同期電動機の電磁設計について検討した。引き続き本報では、SCSC ケーブルを電機子巻線に適用した 4 極ハルバツハ界磁機と全高温超伝導(HTS)機の電磁設計を行い、比較検討した。

2. 電磁設計の概要

前報⁽¹⁾に引き続き、航空機応用を想定した 3 MW / 5000 min⁻¹ 機について以下の 2 種類の設計を検討する。

- 4 極ハルバツハ界磁機 : 界磁には、外部に 4 極磁場は形成できるハルバツハ配置の永久磁石を用いる。永久磁石の外側にバックヨークを設け、それらの間に 0.6 T 程度の磁場が発生できる寸法とする。電機子コイルは鞍型コイルによる集中巻とし、5000 min⁻¹、定格負荷での線間電圧が 1000 V_{rms} 程度になるようにターン数を決定する。
- 全高温超伝導機 : 界磁巻線は、HTS スパイラルケーブル

Table 1 Specifications of 4-pole halbach PM filed type motor.

Basic parameters	
Rated power [MW]	3 MW
Rated voltage (line-to-line)	1010 V _{rms}
Rated current	1750 A _{rms}
Rated revolution	5000 min ⁻¹
Rated frequency	166.7 Hz
Rated torque	5730 Nm
Rated load angle	$\pi / 2 \times 0.6$ rad
Pole number	4
Operating temperature	20 K
Magnetic filed in air gap	0.6 T
Outer diameter	370 mm
Effective length	475 mm
Field magnet : 24 PM halbach array	
Permanent magnet	Nd-Fe-B
Residual magnetic field	1.4 T
Outer / inner diameter	250 mm / 150 mm
Axial length	475 mm
Weight	117 kg
Armature winding : Concentrated winding (6 saddle coils)	
Conductor	4-layer SCSC cable
Diameter (with insulation)	5.12 mm
Width of REBCO tape	2 mm
Number of REBCO tape	15
Rated tape current density	82.5 A _p /mm
Rated conductor current density	120 A _p /mm ²
Max. magnetic field	0.85 T
Winding cross section	364.4 mm ²
No. of turns	10
Conductor space factor	0.565
Rated winding current density	67.9 A _p /mm ²
Outer / inner diameter	302 mm / 278 mm
Weight	~ 35 kg
Back yoke	
Material	35H360
Outer / inner diameter	370 mm / 330 mm
Weight	82 kg

による鞍型コイルを用いた単純な 4 極巻線である。比較のために、4 極ハルバツハ界磁機と空隙磁場が同程度になるようにし、電機子巻線も同様の諸元で構成する。現実的設計を得るために極端な高電流密度は追求しない。

得られた設計諸元を Table 1 及び Table 2 に纏める。特性解析の結果及び諸元の詳細比較と分析等は当日報告する。

謝辞

本研究は、JST 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. S. Fukui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 108 (2024) p.13

Table 2 Specifications of fully HTS type motor.

Basic parameters	
Rated power	3 MW
Rated voltage (line-to-line)	1014 V _{rms}
Rated current	1750 A _{rms}
Rated revolution	5000 min ⁻¹
Rated frequency	166.7 Hz
Rated torque	5730 Nm
Rated load angle	$\pi / 2 \times 0.76$ rad
Pole number	4
Operating temperature	20 K
Magnetic field in air gap	0.6 T
Outer diameter	412 mm
Effective length	300 mm
Field winding : Concentrated winding (4 saddle coils)	
Rated current	3000 A
Conductor	4-layer spiral cable
Diameter (with insulation)	5.12 mm
Width of REBCO tape	2 mm
Number of REBCO tape	15
Rated tape current density	100 A/mm
Rated conductor current density	146 A/mm ²
Max. magnetic field	1.32 T
Winding cross section	1003 mm ²
No. of turns	30
Conductor space factor	0.725
Rated winding current density	89.7 A/mm ²
Outer / inner diameter	282 mm / 250 mm
Axial length	300 mm
Weight	~ 40 kg
Armature winding : Concentrated winding (6 saddle coils)	
Conductor	4-layer SCSC cable
Diameter (with insulation)	5.12 mm
Width of REBCO tape	2 mm
Number of REBCO tape	15
Rated tape current density	82.5 A _p /mm
Rated conductor current density	120 A _p /mm ²
Max. magnetic field	1.08 T
Winding cross section	616 mm ²
No. of turns	16
Conductor space factor	0.535
Rated winding current density	64.3 A _p /mm ²
Outer and inner diameter	332 mm / 316 mm
Weight	~ 37 kg
Back yoke	
Material	35H360
Outer / inner diameter	412 mm / 392 mm
Weight	30 kg

SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2025 年春) (9):
長手方向位置依存性を含めた 2 層スパイラル導体の層間電流分布測定
Progress of R&D of SCSC cable in spring 2025 (9):
measurements of longitudinal-position-dependent layer-current distribution in 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, 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 (SCSC ケーブルなど) においては、層間が電氣的に接触しているため、接触抵抗を介して分流することができる。従って、層間の電流分布は長手方向位置によって変化する可能性がある。しかし、層間の電流分布測定の報告はほとんどないため、今回は長手方向位置依存性を含めた 2 層スパイラル導体の層間電流分布測定を行った。

2. 2 層スパイラル導体の層間分流通過測定方法の構築

2 層スパイラル導体の各層が作る軸方向磁界は円環電流の作る磁界を軸方向に足し合わせたものとして考える。円環電流の作る軸方向磁界は中心から遠ざかるに連れて減衰するため、円環電流から適当な距離だけ離れると円環電流の作る軸方向磁界はほとんど零になる。その距離を l とし、 $x = x_i$ 位置での磁界 $B(x_i)$ はその位置から $\pm l$ の範囲内にある円環電流の作る磁界と見なす。この範囲内にある層電流を一定と仮定すると、 $B(x_i)$ と $I(x_i)$ の関係式は以下の通りになる。

$$B(x_i) = \frac{\mu_0 l}{L_p \sqrt{l^2 + a^2}} I(x_i) \quad (1)$$

L_p はスパイラルピッチ、 a は円環電流の半径である。

2 層スパイラル導体において 1 層目と 2 層目の巻き方向は逆のため、 $x = x_i$ の合成磁界 $B_{HS}(x_i)$ は以下の通りになる。

$$B_{HS}(x_i) = \frac{\mu_0 l}{L_{p1} \sqrt{l^2 + a^2}} I_{L1}(x_i) - \frac{\mu_0 l}{L_{p2} \sqrt{l^2 + a^2}} I_{L2}(x_i) \quad (2)$$

L_{p1} と L_{p2} は 1 層目と 2 層目それぞれのスパイラルピッチ、 $I_{L1}(x_i)$ と $I_{L2}(x_i)$ は 1 層目と 2 層目の電流それぞれ作る磁界である。さらに、 $I_{L1}(x_i)$ と $I_{L2}(x_i)$ の和が通電電流 I_t のため:

$$I_t = I_{L1}(x_i) - I_{L2}(x_i) \quad (3)$$

$B_{HS}(x_i)$ と I_t を測定すれば、式 2 と 3 より、各層の層電流が計算できる。

3. 層間電流分布測定試験

今回は測定法の検証を目的として、Fig. 1 に示した通り、あえて層間の接触抵抗に電流を流すような通電方式で測定試験を行った。各層にそれぞれ 1 本超伝導線を巻き付け、2 層目 (外側) の超伝導線は電極のプラス側と接続し、1 層目 (内側) の超伝導線は電極のマイナス側と接続した。実験試料の諸元を Table I に示す。2 本の超伝導線が重なっている範囲内で 5 か所にホールセンサをコアの中に埋め込み、スパイラル導体に 10 A 通電し、層間電流分布の測定を行った。このような方法で通電すると、長手方向の各断面における層間電流分布は必ず断面の位置によって変化していくはずである。測定結果を Fig. 2 に示す。結果のまとめは下記の通りになる。

- 電流分布は長手方向にほぼ一定の割合で変化した。
- ⇒ 通電電流が I_c より低いため、同一超伝導線においては同電位のはずであり、すなわち長手方向の位置によらず線材間の電位差も同じはずである。隣接する Point 間の電流値の差が Point 間の接触抵抗に流れた電流値であるため、今回の試料において各 Point 間の接触抵抗に流れた電流値と電位差が同じであり、長手方向における層間接触抵抗分布は均一であることが分かった。
- この測定法はスパイラル導体における各層電流を小数第二位までの精度を持っている。

謝辞

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

Table I Specifications of the experimental sample

Coated conductors	
Width	4 mm
Copper layer thickness	5 $\mu\text{m} \times 2$ (10 μm)
Substrate thickness	40 μm
Hollow core	
Material	Copper (surface insulated)
Outer / inner diameter	5 mm / 4 mm
Composition of the two-layer cable	
1st layer	Coated conductor $\times 1$, SUS tape $\times 1$
2nd layer	Coated conductor $\times 1$, SUS tape $\times 1$

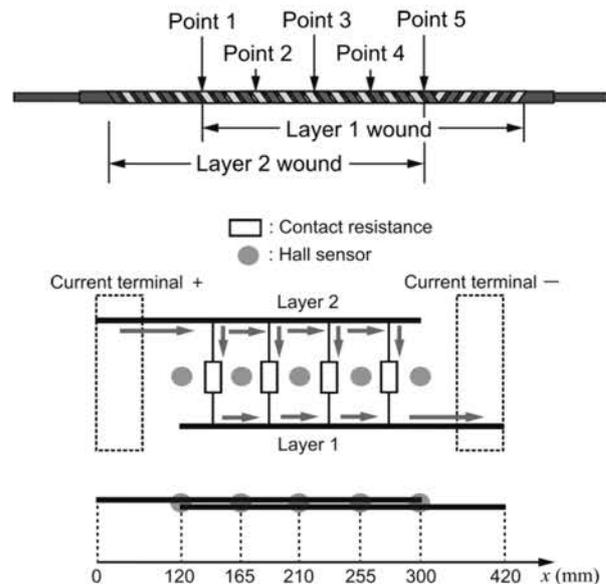


Fig. 1 Specifications and current injection / extraction method of the sample.

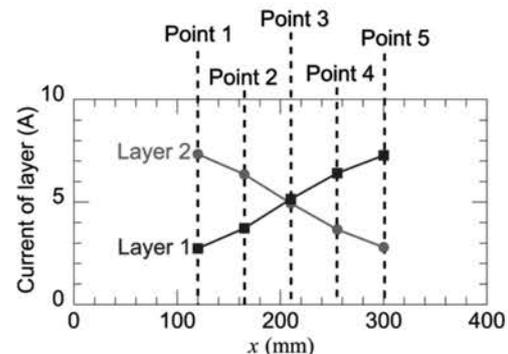


Fig. 2 Measurement results of current distributions in each point when $I_t = 10$ A.

SmBCOシードプレートを用いたSDMG法による Ag添加GdBCOバルクの育成と超伝導特性

Crystal growth and superconducting properties of Ag-doped GdBCO bulk by SDMG method using SmBCO seed plate

芦生 龍太郎, 箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)
ASHIOI Ryutarō, HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)
E-mail: g0325003@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

我々は前回, TSMG法でSmBCOバルクの作製が可能であることを報告した。SmBCOバルクを作製する目的の一つに, SmBCOは高包晶温度 ($T_p = 1055^\circ\text{C}$) を有しているため, SDMG法[1]のシードプレートとして適していることがある。これまで, 比較的包晶温度の高いREBCOバルク(Ag添加GdBCOバルク ($T_p = 1000^\circ\text{C}$) など) は, 溶融条件の自由度が高いTSMG法で作製されてきた。しかし, 今回SmBCOシードプレートを用いることで, 最高溶融温度 T_{\max} を上げることができ, そのようなREBCOバルクもSDMG法で育成可能になると期待される。

そこで本研究では, SmBCOシードプレートを用いてAg添加GdBCOバルクを育成し, SmBCOシードプレートの結晶性やSm/Ba置換がAg添加GdBCOバルクの超伝導特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

原料粉末には TEP 製の $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7(\text{Gd123})$ と $\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5(\text{Gd211})$ を使用し, 100wt%GdBCO [$\text{Gd123} : \text{Gd211} = 3:1$ (モル比)] + 0.5wt% CeO_2 + 1wt% BaO_2 + 10wt% Ag_2O となるように秤量・混合を行って前駆体粉末とした。添加物である CeO_2 には Sm211 (磁束ピン止め点) の微細分散効果, BaO_2 には Gd/Ba の固溶置換を抑制する効果, Ag_2O にはバルクの機械強度向上の効果がある。混合粉末 20g を 50 MPa で1軸プレスし, $\Phi 20\text{mm} \times t 15\text{mm}$ の圧粉体に成型した後, TSMG法で作製したSmBCOバルクをシードプレートに用いて, SDMG法により結晶成長を行った。このとき, 前駆体からシードプレートへのAgの拡散を防止するため, Fig.1のようにAgなしGdBCOをBufferペレットとして用いた。得られたバルクは T_c 制御のため酸素雰囲気下で $400^\circ\text{C} - 150\text{h}$ の酸素富化処理を行った。

作製したAg添加GdBCO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。

3. 結果と考察

Fig.2に結晶成長後のAg添加GdBCOバルクの外観写真を示す。最高溶融温度は $T_{\max} = 1045^\circ\text{C} - 4\text{h}$, 冷却速度は $0.5^\circ\text{C}/\text{h}$ とし, $1010^\circ\text{C} \rightarrow 980^\circ\text{C}$ を徐冷することで育成を行った。写真より, バルク上部にGd211のプッシングが確認され, c軸方向に成長していることがわかる。またBufferペレットの効果によって, Agの拡散が抑えられ, シードが溶融していないことが確認された。

Fig.3にTSMG法およびSDMG法で作製したAg添加GdBCOバルクの捕捉磁場の温度依存性を示す。捕捉磁場がゼロとなる温度で定義した両者の T_c に大きな違いは見られないことがわかる。しかし, 低温での捕捉磁場はSDMGバルクに比べ, TSMGバルクの方が高かった。これは, SmBCOシードプレートの結晶性やSm/Ba置換の影響によって J_c が大きく低下した可能性が考えられる。

講演ではAg添加GdBCOバルクの超伝導特性 (J_c) などと併せて報告をする予定である。

4. 参考文献

1. T. Motoki *et al.*, Appl. Phys. Express **13** (2020) 093002

5. 謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP21H01788, JP23K21075 の助成を受けたものである。

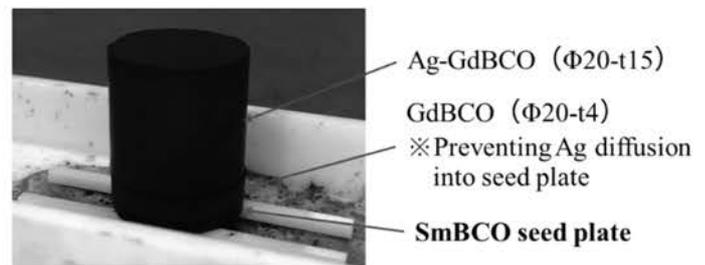


Fig.1 Appearance of the setting of precursors for the crystal growth of the Ag-GdBCO bulk using a SmBCO seed plate.

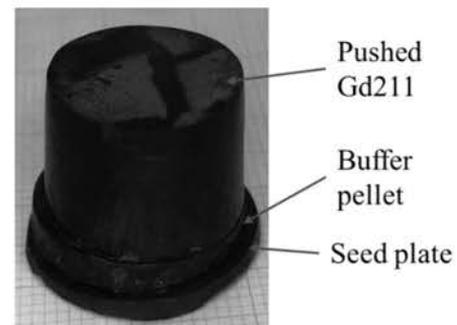


Fig.2 Appearance of Ag-GdBCO bulk after crystal growth.

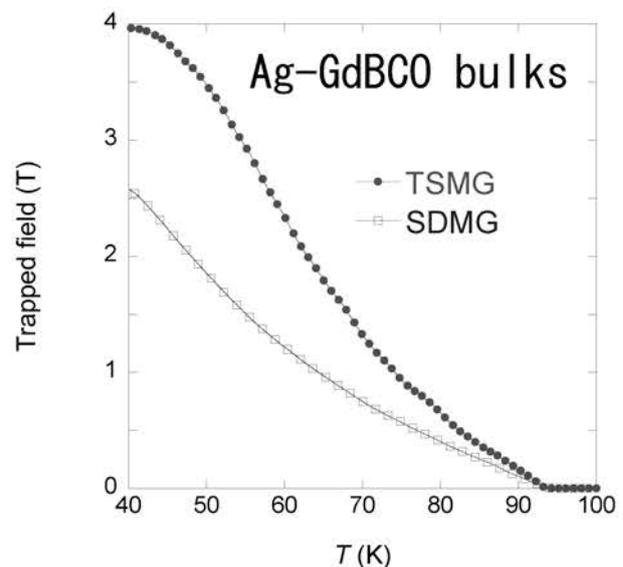


Fig.3 Temperature dependence of trapped fields for the Ag-GdBCO bulks by the TSMG and SDMG methods.

SDMG 法による希薄不純物ドーパ REBCO バルクの育成と捕捉磁場特性 Preparation of SDMG-processed REBCO bulks with dilute impurity doping and their field-trapping properties

國本 慧太、元木 貴則、遠藤 淳、朝古 諒、松永 直也、下山 淳一 (青学大)

KUNIMOTO Keita, MOTOKI Takanori, ENDO Jun, ASAKO Ryo,
MATSUNAGA Naoya, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail : c5624048@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO)は、90 K を超える高い臨界温度 T_c を有し、液体窒素温度 77 K においても高い臨界電流密度 J_c を示すことから、強力超伝導磁石などへの応用が期待されている。REBCO 溶融凝固バルクの一般的な作製手法として、NdBCO 単結晶などの種結晶を前駆体ペレット上面に置き、部分溶融状態まで加熱した後に包晶温度以下まで徐冷する Top-Seeded Melt Growth (TSMG)法が挙げられる。一方、我々は育成する REBCO バルクより包晶温度の高い既製の REBCO 溶融凝固バルクを板状に切り出して大型の seed plate とし、包晶温度の差を利用して単一方向に結晶成長させる Single-Direction Melt Growth (SDMG)法を開発してきた^[1]。結晶成長が単一方向のみに進行するため、均質なバルクが得られやすいことがこの育成法の特徴である。TSMG 法で作製された YBCO 溶融凝固バルクにおいては、希薄不純物ドーピングが J_c の向上に有効であることが報告されている^[2,3]。SDMG 法 REBCO バルクにおいても、希薄不純物ドーピングにより捕捉磁場特性のさらなる改善が期待できる。本研究では SDMG 法 YBCO バルクにおける Zn, Ga の希薄ドーピング効果を調べた。

2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO 溶融凝固バルクから、seed plate を切り出し、その上に直径 20 mm の金型を用いて成型した Y211 を 30 mol%含む YBCO 焼結体ペレットを乗せ溶融後に徐冷することで、ノドープおよび Ga, Zn ドープ YBCO 溶融凝固バルクを作製した。Ga は Cu-O 鎖、Zn は CuO₂ 面の Cu サイトをそれぞれ置換することを期待してドーピングしている。作製した YBCO 溶融凝固バルクに対し、還元ポストアニール、長時間の酸素アニールを行った後、捕捉磁場特性を評価した。捕捉磁場は磁場中冷却により液体窒素浸漬下でバルク表面の 2 次元分布を測定した。さらに、クライオスタート一体型の超伝導マグネット内で最大 6 T の外部磁場印加後に 20 K までバルクを冷却し外部磁場を徐々に減磁しゼロとした後、20–100 K のバルク表面中心直上の捕捉磁場の温度依存性を評価した。

3. 結果と考察

ノドープの YBCO バルク、Zn, Ga を 1 mol%ドーピングした YBCO バルクの直径はいずれも約 17 mm で、全て同心円状の表面捕捉磁場分布を示した。Fig. 1 に 77 K, 1.5 T で着磁した際の Ga 1 mol%ドーピング YBCO バルクの捕捉磁場分布を示す。希薄不純物ドーピングを行っても SDMG 法バルクの特徴である高い円形度が保たれていることがわかる。Fig. 2 に 20 K, 6 T で着磁したノドープおよび Zn, Ga 1 mol%ドーピング YBCO バルクの捕捉磁場特性の温度依存性を示す。捕捉磁場の温度による変化率の解析よりフル着磁状態となる条件を推定し、2 次元関数での近似により外挿した低温側の捕捉磁場を点線で示している。ノドープバルクと比較して、Ga, Zn ドープ試料ではどちらも 1 K 程度 T_c が低下しているものの、80 K 以下ではノドープ試料を上回る捕捉磁場が実測されたことから、SDMG 法バルクにおいても、希薄不純物ドーピングが有効であることが明らかになった。当日は、これらのバルクより切り出した小片試料

の超伝導特性についても報告する予定である。

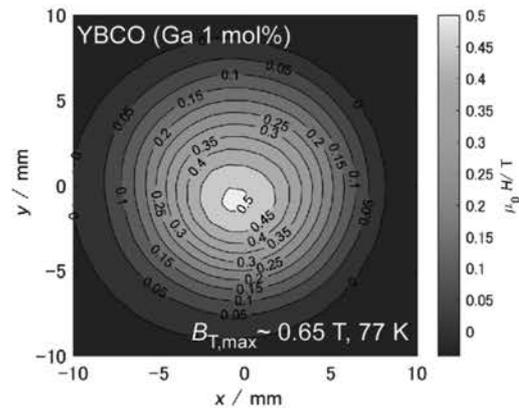


Fig. 1. Contour map of trapped field at 77 K of a Ga 1 mol% doped YBCO bulk grown by SDMG method.

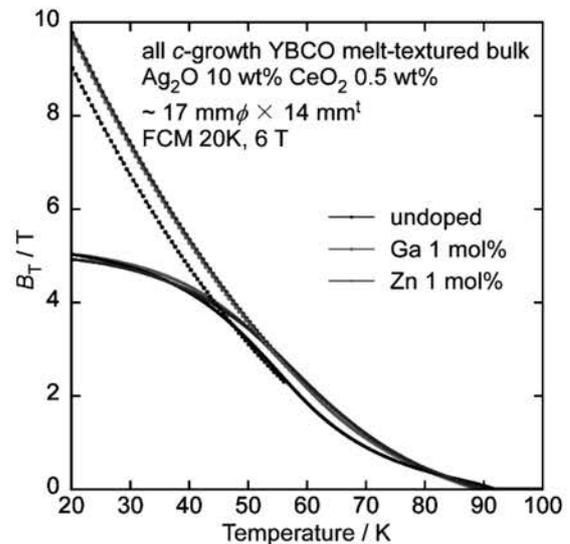


Fig. 2. Temperature dependence of trapped field at just above the center of the surface of undoped and impurity doped YBCO bulks. The dotted lines represent estimated trapped field assuming the fully magnetized state.

参考文献

- [1] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13** (2020) 093002
- [2] Y. Ishii *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 202514
- [3] G. Fuchs *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 2107.

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。

一方向溶融成長法によるAg添加YBCO超伝導バルク作製における バッファペレットの効果

Effect of a buffer pellet on the fabrication of Ag-added YBCO superconductor bulks
by single direction melt growth method

箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)

HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: s3123003@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 超伝導バルクはコンパクトな強磁場発生源であり、卓上型 NMR 装置などへの応用が期待されている。最近、REBCO バルクをシードプレートとして使用した SDMG (Single Direction Melt Growth) 法が注目されている[1]。SDMG 法は結晶成長方向が 1 方向のみであるためバルク作製時間がバルク直径に依存しないというメリットがある。しかし、SDMG 法は最高溶融温度 T_{max} を高くできないという問題がある。 T_{max} は REBCO シードの包晶温度 T_p に依存する。SDMG 法で使用できるシードが EuBCO か GdBCO である現状においては最も高い T_p の NdBCO シードが使用できる TSMG 法ほど T_{max} を高くできない。 T_{max} が低い場合、育成対象の RE123 が溶融できずに結晶成長時の不均質核生成の核となり、マルチグレインになってしまう[2]。一方、TSMG 法では Ag の有無による RE123 の T_p 変化効果を利用したシードとバッファペレットの組み合わせにより T_{max} を向上できることが知られている[3]。そこで本研究では、 T_{max} の向上が期待される Ag なし GdBCO シードプレートとバッファペレットの組み合わせにより、SDMG 法による Ag 添加 YBCO バルクの作製を試みた。

2. 実験方法

原料粉末は豊島製作所製の $YBa_2Cu_3O_y$ (Y123)と Y_2BaCuO_5 (Y211)を使用し、Y123:Y211=3:1 (モル比)となるように混合し、Y123/Y211 混合粉末に 0.5wt%の CeO_2 と 10wt%の Ag_2O を添加した。 CeO_2 は主要なピン止め点である Y211 の微細分散効果、 Ag_2O には機械強度向上と RE123 の包晶温度 T_p の低下効果がある。得られた粉末は一軸プレスによりペレット化した。その後、Fig.1-(a)のように TSMG 法で作製した Ag なし GdBCO シードプレート上に Ag なし YBCO バッファペレットと Ag 添加 YBCO ペレットを配置して SDMG 法により結晶成長を行った。比較のためバッファペレット配置していないバルクも作製した (Fig.1-(b))。得られたバルクは T_c 制御のため酸素雰囲気下で 400°C -150h の酸素富化処理を行った。

3. 結果と考察

バッファペレットを配置していない場合、 $T_{max}=990^\circ\text{C}$ -2h, 1000°C -2hでは Ag なし GdBCO シードプレートは溶融しなかったが、未溶融 Y123 由来の不均質核生成が発生したマルチグレインであった。Y123 溶融不十分問題を解決するため $T_{max}=1010^\circ\text{C}$ -2hに上げたが、Ag なし GdBCO シードプレートが溶融してしまった。加えて未溶融 Y123 由来の不均質核生成が発生したマルチグレインであった。Ag なし GdBCO の T_p は約 1030°C であるため、 $T_{max}=1010^\circ\text{C}$ では溶融しないはずであるが、Ag 添加 YBCO 融液中の Ag が Ag なし GdBCO シードプレートに拡散して T_p が低下してシードプレートが溶融してしまった。

バッファペレットを配置して SDMG 法により結晶成長した Ag 添加 YBCO バルクの外観を Fig.2 に示す。バッファペレットを配置した場合、 $T_{max}=1020^\circ\text{C}$ -2hにおいても Ag なし GdBCO シードプレートの結晶成長痕である GSB (Grain Sector Boundary) が確認され、シードプレートが溶融していないことが確認された。

これは Ag なし YBCO バッファペレットが Ag の拡散障壁となり、Ag なし GdBCO シードプレートが直接 Ag に暴露されなかったためである。また、 $T_{max}=1030^\circ\text{C}$ -2hでは矢印部分でシードプレートの溶融が確認されたが、Ag 添加 YBCO は完全に溶融して Ag なし GdBCO シードプレート以外からの不均質核生成は発生しなかった。以上のことから、SDMG 法においても Ag なしシードプレートとバッファペレットの組み合わせによる T_{max} 向上は有効であり、従来法に比べて 20°C 向上させることに成功した。

講演ではバッファペレットの厚みが結晶成長に与える影響や得られた Ag 添加 YBCO バルクの超伝導特性について報告する。

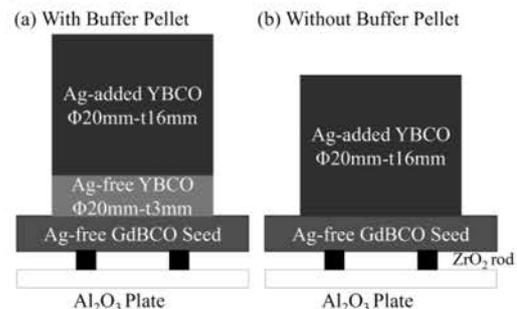


Fig.1 Schematic illustration of precursor pellets and seed plate in the SDMG process.

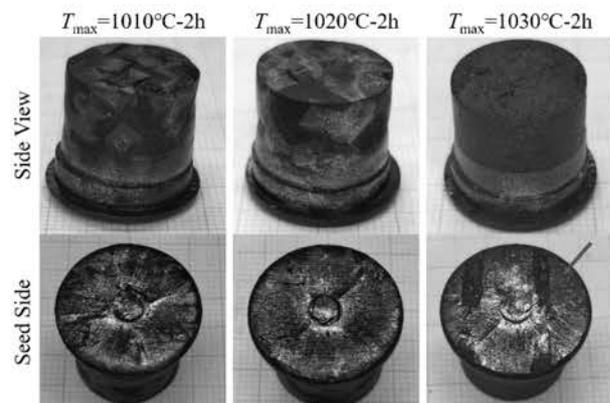


Fig.2 Appearance of Ag-added YBCO bulks fabricated by SDMG method using Ag-free GdBCO seed plate at each maximum melting temperature T_{max} . The arrow indicates that the Ag-free GdBCO seed plate is melted.

謝辞

本研究はJSPS科研費JP21H01788, JP23K21075の助成を受けたものです。

参考文献

1. T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **13** (2020) 093002
2. H. Hinai *et al.*, *Physica C*, **357-360** (2001) 706-708
3. S. Nariki *et al.*, *Physica C*, **392-396** (2003) 468-472

サイズや希土類の異なる SDMG 法 REBCO バルクの中低温捕捉磁場特性

Trapped field properties of SDMG-Processed REBCO bulks with different sizes and rare earth elements at mid-to-low temperatures

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, ASAKO 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、特に中低温での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) 法に代表される種結晶を起点とした 3 次元な結晶成長により育成される。一方、これまで我々は、鉛直一方向のみに結晶成長が進行し、全体が単一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの育成が可能なる Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた^[1]。本手法は、希土類の異なる REBCO の包晶温度の差を利用しており、既製の REBCO バルクを種基板としてその上に種基板よりも包晶温度の低いバルクの育成が可能である。今回、サイズや希土類の異なる SDMG 法 REBCO バルクの中低温捕捉磁場特性を評価したので、TSMG 法バルクと比較して報告する。

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種基板とし、その上に様々な直径のディスク形状に成型した REBCO ペレットを、緻密化のための前熱処理を行った後に設置し、種基板の包晶温度以下で結晶成長させることで全体が *c*-growth 領域のみからなるバルクを育成した。なお、REBCO 前駆体には、RE123+RE211 混合粉に 10 wt% の Ag₂O および 0.5 wt% の CeO₂ をそれぞれ混合した TEP 社の製品を用いている。種基板から切り離れたバルクに対して、弱い還元アニールと長時間の酸素アニールを行った。得られたバルクは最大 7T の超伝導マグネット内のクライオスタットで磁場中冷却により着磁し、着磁後徐々に升温することで 20–100 K における捕捉磁場特性を評価した。捕捉磁場は、種基板側のバルク表面中心で計測した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に 20 K, 6T の磁場中冷却で着磁した直径約 30 mm の DyBCO バルクの中低温捕捉磁場特性を示す。捕捉磁場の温度微分の傾きからフル着磁状態となる温度領域 (この場合 64.0 K 以上) を見積もり、2 次関数でフィッティングすることで低温での捕捉磁場を推定している。様々なサイズの YBCO および DyBCO バルクの捕捉磁場の温度依存性を Fig. 2 に示す。代表的な TSMG 法バルクの捕捉磁場特性も合わせて示している^[2,3]。直径約 17 mm の SDMG 法 YBCO バルクは小型ながら、直径 26 mm の TSMG 法 YBCO バルクと同等の捕捉磁場特性を示した。60 K 以上では DyBCO は非常に高い特性を示している一方で、低温では YBCO の方が捕捉磁場の伸びがより顕著である。当日は、さらに大型化したバルクの結果についても報告する予定である。

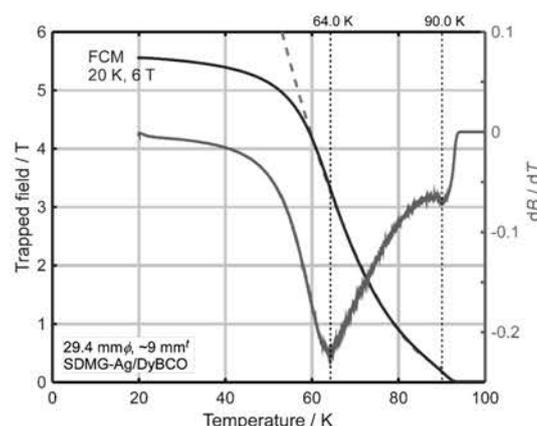


Fig. 1. Temperature dependence of the trapped field (left axis) and the temperature derivative of the magnetic field, dB/dT , (right axis) for the SDMG DyBCO bulk. The dashed line indicates the estimated trapped field in the fully magnetized state at low temperatures.

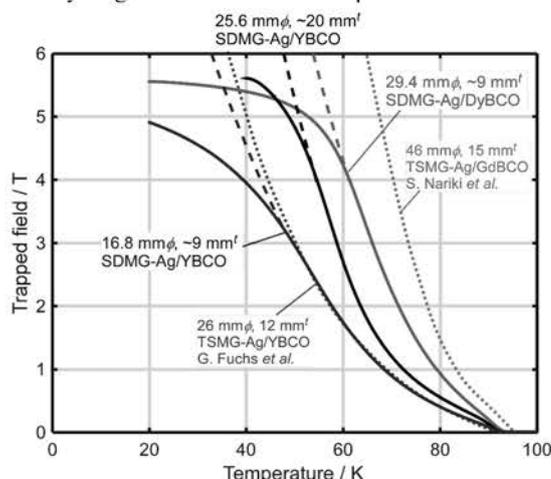


Fig. 2. Temperature dependences of the trapped fields for SDMG-processed YBCO and DyBCO bulks with various sizes, with those of representative TSMG bulks shown as dotted lines.

[1] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003.

[2] G. Fuchs *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 2107.

[3] S. Nariki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 034002.

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(JPNP14004)の結果得られたものである。

SDMG 法によるマルチシードを用いた 大型 REBCO バルクの育成と捕捉磁場特性

Field trapping properties of Large-Scale REBCO bulks by Multi-Seeded SDMG method

遠藤 淳, 元木 貴則, 國本 慧太, 朝古 諒, 松永 直也, 下山 淳一 (青学大)
ENDO Jun, MOTOKI Takanori, KUNIMOTO Keita, ASAKO Ryo,
MATSUNAGA Naoya, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail: c5624043@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE: 希土類元素)は液体窒素温度 77 K を超える高い T_c を有し、高磁場下においても高い J_c を示す。REBCO 溶融凝固バルクは内部を周回する永久電流により永久磁石を超える高磁場の捕捉が可能であり、強力超伝導磁石として、モーターや卓上 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 を用いた溶融凝固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]。この手法では作製するバルクのサイズが種基板の大きさに制限されるが、方位をそろえた複数枚の種基板を並べれば大型バルクの育成が可能になる。我々はこれまでに 2 枚の種基板を用いたバイクリスタル SDMG 法 YBCO 溶融凝固バルクにおいて、77 K、低磁場下で捕捉磁場分布がシングルピークとなる面内ミスフィット許容角は最大 $\sim 8^\circ$ 程度であることを報告してきた。本研究では正方形に切り出した 4 枚の種基板を並べ、その上に REBCO 溶融凝固バルク作製を試みた。

2. 実験方法

TEP 社製 YBCO 混合粉末を 100 MPa の一軸プレスにより一辺が 50 mm ϕ 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 に示すように並べた 4 枚の EuBCO 種基板上に YBCO 前駆体ペレットを置き、約 150 h の徐冷過程を含む溶融凝固を行った。得られた溶融凝固バルクを種基板から切り出した後、Y/Ba 固溶を低減するため適当な還元雰囲気中でポストアニールを行い、最後に O₂ 気流中、400°C での長時間の酸素アニールによりキャリアドープ状態を制御した。作製した試料の種基板側表面に対する XRD による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

4 枚の種基板上に作製した YBCO 溶融凝固バルクの大きさは径 42mm ϕ 、厚さ10mm となり、上面まで均一な結晶成長を確認した。Fig. 3 に YBCO 溶融凝固バルクの 77 K における捕捉磁場分布を示す。一部の界面で結晶粒界を跨ぐ電流密度の低下が認められた。XRD によるミスフィット角の評価を行った結果、この粒界では c 軸方位のずれが寄与していることがわかった。このことから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結晶方位を面内だけでなく c 軸成分も精密にそろえる必要がある。講演では異なる組み合わせの種基板を用いて作製した YBCO 溶融凝固バルクのミスフィット角と捕捉磁場特性についても議論する。

参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, *J. Magn. Reson.* **259** (2015) 68.
[2] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13** (2020) 093002
[3] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003

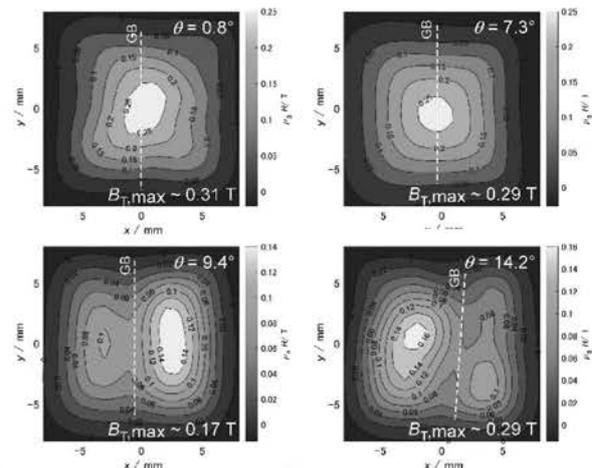


Fig. 1. Trapped field distributions at 77 K of YBCO melt-textured bulk prepared on two seed plates with various misfit angles.

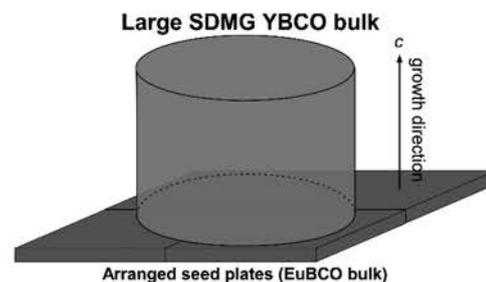


Fig. 2. Schematic illustration of the SDMG-processed cylindrical YBCO bulk grown on four EuBCO seed plates.

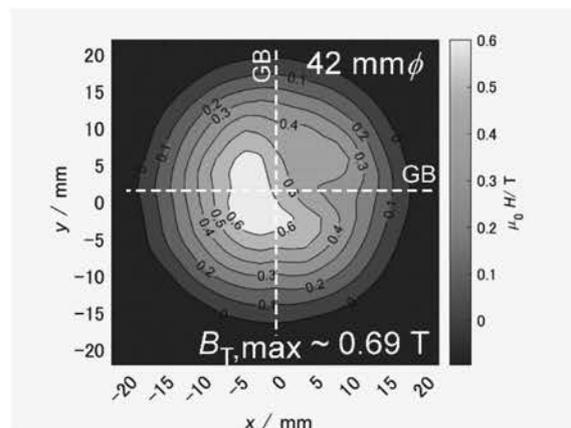


Fig. 3. Trapped field distributions at 77 K of YBCO melt-textured bulk prepared on four EuBCO seed plates.

FF - MOD 法による中軽希土類元素を含む REBCO 薄膜の作製

Fabrication of REBCO thin films containing medium and light rare earth elements
by FF MOD method

畠 直輝, 相楽 和豊, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

HATA Naoki, SAGARA kazutoyo, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5625076@aoyama.jp

1. はじめに

RE123 薄膜作製方法の一つであるフッ素フリー有機金属塗布熱分解(FF-MOD)法は、RE123 相の生成が非常に速く、簡便な常圧下での焼成装置のみで作製することができるため、本来、最も量産化に適した手法である^[1]が、結晶性が高い、つまり有効なピン止め中心となる欠陥密度が低く、磁場中の J_c が低いことが課題である。イオン半径が比較的大きい Nd, Sm, Eu などの中軽希土類を用いた RE123 は、 T_c が約 94 K と高く、より高温、高磁場応用に適した薄膜線材として期待されている。しかし、これらの RE は Ba サイトに部分置換しやすく、置換が微量の場合には、置換部位近傍が点欠陥的なピン止め中心となり臨界電流特性を改善するが、置換量が大きくなると超伝導特性が大きく劣化する。しかし、RE123 薄膜の作製では還元雰囲気下で結晶成長を行うため、RE に中軽希土類元素を用いても RE/Ba 固溶が抑制でき臨界電流特性の向上が期待できる。以上の背景のもと、本研究では RE123(RE = Nd, Sm, Eu)薄膜、および Y の一部を Nd や La に置換した Y123 薄膜を作製しそれらの物性を調べた。

2. 実験方法

RE123 の FF-MOD 原料溶液はあらかじめ固相反応法によって合成した RE123 粉末を直接プロピオン酸に溶解し乾固させ、乾固物を有機溶媒に溶解することにより調製した。この溶液を 2 軸配向した酸化物表面を有する IBAD 基板または SrTiO₃(100)単結晶基板上にスピコートより塗布、乾燥後、仮焼した。この塗布と仮焼を 3 回繰り返した後、様々な温度、酸素分圧下で本焼成を行い、最後に酸素アニールにより酸素量を制御することで RE123 薄膜を作製した。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 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 に様々な条件で本焼成を行った試料の XRD パターンを示す。いずれの試料においても鋭い 00l ピークが見られ、c 軸配向した RE123 薄膜(RE = Nd, Sm, Eu, Y_{0.9}Nd_{0.1})が生成した。Fig. 2 に Eu123 薄膜の磁化率の温度依存性を示す。酸素アニールを低温まで長時間かけて行うことにより T_c が上昇し超伝導転移がより鋭くなったことがわかる。Fig 3 に IBAD 基板上にまず Y123 薄膜(~150 nm)を成膜し、その上に作製した RE123 薄膜(RE = Nd, Sm, Eu, Y_{0.9}Nd_{0.1})の XRD パターンを示す。焼成条件は $P_{O_2} = 3$ Pa, 800°C, 1 h である。いずれの試料においても鋭い 00l ピークが見られ、c 軸配向した RE123 薄膜が生成した。講演では、これらの試料の磁化率の温度依存性、 J_c の磁場依存性と微細組織についても報告する。

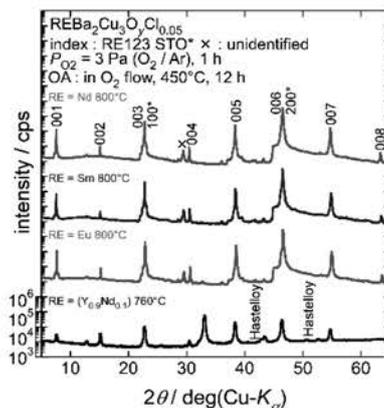


Fig. 1. XRD patterns of RE123 thin films (RE = Nd, Sm, Eu, Y_{0.9}Nd_{0.1}) grown on STO or IBAD substrates.

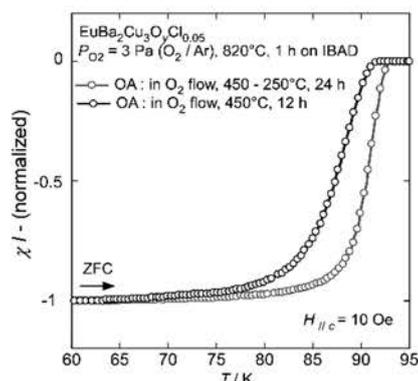


Fig. 2. ZFC magnetization curves of Eu123 thin films

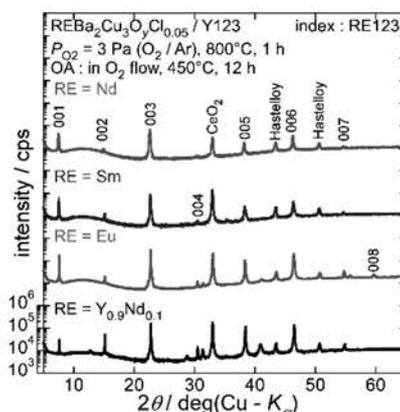


Fig. 3. XRD patterns of RE123 thin films on Y123 thin films.

参考文献

- [1] Y. Ishiwata et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804

Sr 組成が TFA-MOD 法 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の超伝導特性に及ぼす影響

The influence of Sr content on the superconducting properties for TFA-MOD $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ films

梶 竜誠, 海谷 真大, 大木元 勇貴 (成蹊大学); 三浦 正志 (成蹊大学, JST-FOREST)

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

E-mail : dm256306@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

超伝導材料の幅広い応用のためには、臨界温度(T_c)及び臨界電流密度(J_c)のさらなる向上が必要となる。特に、高い T_c 及び J_c を有する銅酸化物超伝導体 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) は、超伝導マグネット機器応用に向けて注目され、盛んに研究が行われている。近年、我々は REBCO 薄膜、 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ (Ba122:P) 薄膜及び $\text{SmFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{H}_x)$ (Sm1111) 薄膜において、①キャリア密度などのチューニングパラメータ制御による熱力学的アプローチと、②磁束ピン止め点導入の融合する新材料設計指針をもとに各種薄膜を作製した。その結果、 $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$ (Fe11) 薄膜、Ba122:P 薄膜、Sm1111 薄膜および REBCO 薄膜いずれにおいても、磁場中 J_c 特性を飛躍的に向上させることに成功した[1,2]。

本研究では、Fe11、Ba122:P、Sm1111 および REBCO とは結晶構造、磁場侵入長、コヒーレンス長、 T_c 及び異方性の異なる $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) に注目し、チューニングパラメータとして Sr 組成を変化が LSCO 薄膜の超伝導特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition(TFA-MOD)法を用いて、Sr 組成の異なる LSCO ($x = 0.05 \sim 0.20$) 薄膜を LaAlO_3 (LAO) 単結晶基板上に作製した。作製した LSCO 薄膜の結晶性を X 線回折法、超伝導特性を四端子法により評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 (a) に Sr 組成の異なる LSCO 薄膜の T_c を示す。図に示すように、LSCO 薄膜は、LSCO パルクと同程度の T_c を示した。一方、**Fig. 1 (b)** に示すように、4.2 K における自己磁場 $J_c(J_c^{\text{self}})$ は、Sr 組成の増加に伴い高い値を示し、 $x = 0.20$ において最も高い値を示した。

当日は、詳細な実験結果をもとに Sr 組成が LSCO 薄膜の超伝導特性に及ぼす影響などについて詳細に報告する。

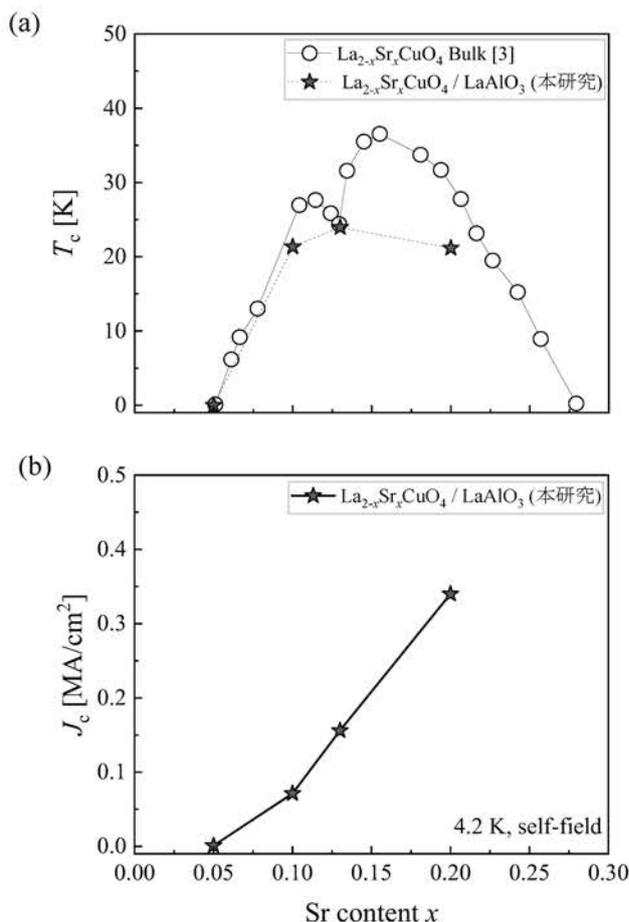


Fig. 1 Sr content dependence of (a) T_c and (b) J_c^{self} (4.2 K) for TFA-MOD $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ films.

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 (FOREST) JPMJFR202G の助成を受け実施したものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 (23H01453 及び 23K26147) の助成を受け実施したものである。

参考文献

- [1] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.
- [2] M. Miura *et al.*, *Nature Materials* **23** (2024) 1370-1378.
- [3] H. Takagi *et al.*, *Phys. Rev. B* **40** (1989) 2254.

Zr をパターニングした基板上でマルチフィラメント化した YBCO 膜の Zr 直上における通電特性

Current-voltage characteristics of multifilamented YBCO films on Zr patterned substrates

藤本大貴 (九大), 松本明善, 大井修一, 立木 実 (NIMS), 寺西 亮 (九大)
 FUJIMOTO Hiroki (Kyushu Univ.); MATSUMOTO Akiyoshi, OOI Shuichi, TACHIKI Minoru (NIMS);
 TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.)
 E-mail: fujimoto.hiroki.779@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) 線材の交流損失低減に有効な超伝導層のマルチフィラメント化の方法として、基板に Zr などの物質を堆積し成膜することによる超伝導層の結晶配列化に注目している[1-4]。この方法は堆積した物質と YBCO を意図的に反応させ非超伝導層を作製する結晶配列化を狙いとしている。これまで Zr を細線状にパターニングした SrTiO_3 (STO)基板上に成膜すると、STO 直上では 3 軸配向した YBCO 膜が、Zr 上では膜状の YBCO と粒子状の CuO が生成することを報告している[5]。

本報告では、Zr 上と STO 直上の YBCO 膜の微細組織の違いに注目し、Zr 上の YBCO 膜における電流特性について STO 直上と比較し、微細組織との関係性について考察することを目的とした。

2. 実験方法

基板には $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ の STO を用い、フォトリソグラフィにて $5\text{ }\mu\text{m}$ 幅 Zr をそれぞれ基板中央から端部方向へ $100, 200, 500\text{ }\mu\text{m}$ の間隔で細線状にパターニングしたものと Zr をパターニングしていないものを用意した。これらの基板に TFA-MOD 法にて膜厚約 600 nm の YBCO を成膜した。次に、得られた試料について温度 77 K 、自己磁場中の条件下で四端子法による電流測定を行い、Zr 直上の膜における電流特性について評価を行なった。また(走査)透過型電子顕微鏡((S)TEM)を用いて得られた試料の微細組織観察を行なった。

3. 結果と考察

Fig. 1(a)と(b)はそれぞれ Zr 直上及び STO 直上における YBCO 膜の I-V グラフを示す。Fig. 1(a)の結果から、I-V グラフは非線形でありゼロ抵抗を持つことが確認され、Zr 直上の YBCO 膜における J_c は $1.9 \times 10^3\text{ A/cm}^2$ 、 n 値は 2.1 と確認された。また Fig. 1(b)から J_c は $8.0 \times 10^4\text{ A/cm}^2$ 、 n 値は 6.3 と確認された。Zr 上の YBCO 膜では STO 直上と比較して J_c は 20%に、 n 値は 4 桁減少したことから、品質が低下することが分かった。また Fig.2 に示す断面組織観察から Zr 上では粒子状の CuO や膜状の YBCO が断続的に形成されたことが分かっている。また、Zr 直上で生成した YBCO の膜厚は 260 nm 、STO 直上は 606 nm であり、Zr 直上では STO 直上の約 43%に減少することが分かっている[5]。この結果から、 J_c の減少が膜厚の減少の約 2 倍大きいことが分かる。さらに Zr 上の YBCO は Fig.2(b)に示す①~③の 3 種類に分類され、模式図に示すように②は①、③と異なり結晶の c 軸配向及び面内配向が乱れていたことから、Zr 上の YBCO はランダム配向することが分かっている[6]。以上の結果から電流特性と微細組織には相関があり、電流が流れ難かったのは Zr 上の YBCO 膜の減少と、ランダム配向による品質の低下に起因すると分かった。また Zr 直上で YBCO が生成して

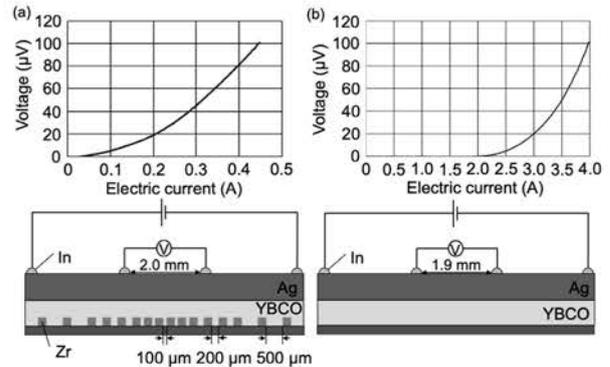


Fig. 1 I-V graph of YBCO with Zr (a) and without (b).

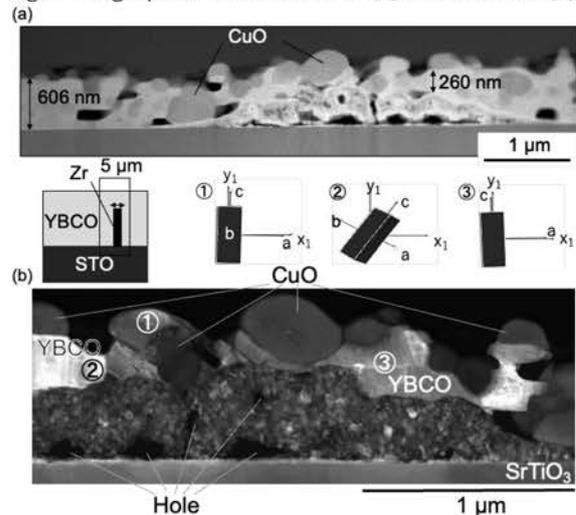


Fig. 2 Cross-sectional image of film on Zr by STEM (a) and Image Quality map and crystal orientation image of YBCO in the cross-sectional direction by TEM (b)

も STO 直上と比較すると流れる電流を減少させることができると明らかになった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K18831 および 22H02019、ならびに(国研)物質・材料研究機構の Joint Research Hub Program の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] 雨宮 尚之, 低温工学, 45, 8 (2010) 376386.
- [2] F. Grilli et al., Supercond. Sci. Technol., 29 (2016) 083002.
- [3] A. Matsumoto et al., IEEE TAS., 33, 5 (2023) 7500404.
- [4] H. Fujimoto et al., IEEE TAS., 34, 3 (2024) 7500604.
- [5] 藤本 大貴ら, 第 105 回低温工学・超伝導学会研究発表会
- [6] 藤本 大貴ら, 第 106 回低温工学・超伝導学会研究発表会.

密閉カプセル内における気相 Mg を用いた MgB_2 バルク体の作製と捕捉磁場特性

Preparation and trapped field properties of MgB_2 bulks using gas-phase Mg by capsule method

覚前 陽太, 内藤 智之 (岩手大学)

KAKUMAE Yota, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: g0325051@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 は高い臨界温度をもち、弱結合を示さないことから多結晶で応用可能であり、軽量かつレアアースフリーな材料であるという利点から発見以来大きな注目を集めてきた。 MgB_2 バルク材料の応用研究はまだ開発途上にあるが、主な課題は磁場中における低い臨界電流密度の改善と粒間結合性の向上である。臨界電流密度の向上には高充填化が有効であることから、圧力下焼結や常圧下では浸透法によって MgB_2 バルクが作製される[1]。一方、粒間結合性に対してはバルク内に残留する MgO が問題となる。本研究で用いる Mg 気相輸送法^[2]は蒸気圧の差により Mg と MgO を分離して Mg のみを反応に使えるため充填率が高く、かつ不純物の少ない MgB_2 試料を作製することができる。しかし、その作製工程は複雑であり、かつ多量の Mg を用いる必要がある[3]。本研究では SUS 製のカプセル容器を用いることで簡便な Mg 気相輸送法による MgB_2 バルクの作製技術を確立すること及びを得られた MgB_2 バルクの磁石特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

原料粉にはアモルファス B 粉末(純度 99%, 粒径 $46\mu m$), Mg 粉末(純度 99.5%, 粒径 $180\mu m$)および、in-situ 法で作製した MgB_2 粉末を用いた。まず Mg と B を mol 比 1.2:2 で秤量した。気体 Mg の B 前駆体への供給量が不足するのを防ぐため Mg を過剰とした。また、前駆体の機械的強度の向上と MgB_2 生成時のバルクの膨張の緩和のために premix 法を採用した。premix の割合は当研究室の先行研究の浸透法で効果が認められた最小の値である 30wt%で秤量した。Fig.1にカプセルと圧粉配置の概略図を示す。まず一方の SUS カプセルに B+ MgB_2 混合粉を圧粉し、もう一方の SUS カプセルに Mg 粉末を入れた。次に両者をリング状のガスケットを挟んで配置し、Ar 雰囲気グローブボックス内で SUS ボルトを用いて固定した。これを、電気炉を用いて 800°C, 850°C, 900°C の3種類の温度で 70 時間熱処理を行った。

作製した試料は X 線回折装置で XRD パターンを測定し、バルクの相形成を評価した。その後、磁場中冷却着磁法 (FCM)を用いて得られた MgB_2 バルクを着磁し、捕捉磁場の温度依存性をバルク表面中央に配置したホールセンサを用いて測定した。また、電気抵抗率を、直流 4 端子法を用いて測定し粒間結合性を算出した。

3. 結果と考察

premix 無しで作製したバルクは熱処理中に崩れてしまった。一方で premix 法を用いた MgB_2 バルクは、800°C および 850°C 試料で 5.8 mm, 900°C 試料で 3mm と比較的厚いバルクを作製できた。試料の充填率は 800°C 試料で 80.5%、850°C 試料で 79.8%と比較的高密度の試料を作製することができた。900°C 試料の充填率は 76.1%と若干低めであった。X 線回折パターン(ここでは示さない)から、すべての試料は MgB_2 が主相であったが、900°C で熱処理を行った試料では MgB_4 への分解が確認された。

Fig.2 に 800°C と 850°C 試料の捕捉磁場の温度依存性を示す。800°C 試料は 10 K で 2.61 T, 20 K で 1.90 T の磁場を捕

捉した。850°C 試料は 10 K で 2.56 T, 20 K で 1.84 T の磁場を捕捉した。両者の違いは熱処理温度による粒径の違いによると思われる。講演では現在進めている EBSD による粒径の解析などと併せて議論する予定である。

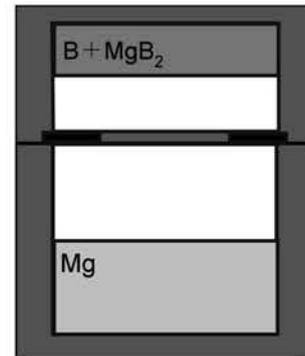


Fig.1 Schematic image of a homemade SUS container and the arrangement of the precursor powders pressed.

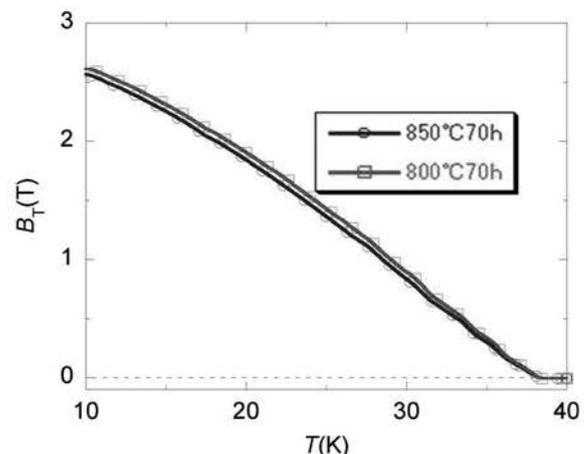


Fig.2 Temperature dependence of trapped magnetic field for the MgB_2 bulks prepared by Gas-Mg infiltration and reaction method at the indicated temperatures.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H01788, JP23K21075 の助成を受けたものです。

参考文献

1. 内藤智之, 藤代博之: 56 巻 (2021) 309 頁
2. 佐野川 悠, 山本 明保: 日本金属学会誌 第 83 巻 (2019) 341 頁
3. S. Wang, H. Suo, Z. Zhang, L. Ma, L. Wang, J. Liu, Q. Wang: Journal of the European Ceramic Society. Vol. 44 (2024) 6239

超音波照射またはボールミリングによって微細化した B粉末を用いたMgB₂バルク体の作製と捕捉磁場特性

Preparation and magnetic field trapping properties of bulk MgB₂ using B powder refined by ultrasonic irradiation or ball milling

柚澤 友介, 内藤 智之 (岩手大)

SOMAZAWA Yusuke, NAITO Tomoyuki (Iwate univ.)

E-mail: g0325109@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂は臨界温度が39 Kと比較的高く、液体水素温度(20 K)においても実用可能な臨界電流密度 J_c を流すことができる。そして、捕捉磁場が均一であることからNMRの磁極への応用も期待されている。一方で、磁場中での J_c が低いという課題がある。MgB₂の J_c を高めるためには、ピン止め点である結晶粒界を増加させる必要がある。これまで、我々は原料 B 粉末の微細化をボールミリングで行ってきたが、ボールミルメディアからのコンタミネーションによる転移温度 T_c の低下など負の影響も与えることが分かっている[1]。一方で、コンタミネーションの影響が少ない効果的な微細化処理として超音波照射がある[2]。この方法は金属プローブから発生する超音波により、溶媒中の乱流を引きおこし、そのエネルギーで粒子を微細化する方法である。本研究ではボールミリングおよび超音波照射で微細化処理を施した原料 B 粉末を用いて MgB₂ バルク体を浸透法で作製し、その捕捉磁場特性から各方法の有効性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

B 粉末をエタノール溶媒中で5分、30分間超音波照射した。この時、超音波の周波数は20kHz、出力は150Wであった。ボールミリング(メディアはSUS440C)はAr雰囲気中において回転数400rpmで1h行った。MgとBをモル比1.1:2で秤量し、直径20mm、厚さ10mmのペレットにプレス成型した。その後ペレットの上部に、Mg粉末を配置した後、Ar雰囲気中でSUSカプセルに封入し、750°C-9hの条件で焼結した。なお、比較対象として、微細化処理していないB粉末を用いたMgB₂も作製した。試料の特性評価は、粉末X線回折(XRD)による構成相分析、走査型顕微鏡(SEM)による粒径観察、電子線後方散乱回折(EBSD)による微細組織観察、捕捉磁場は15K、印加磁場4Tのもとで磁場中冷却着磁(FCM)で行った。

3. 実験結果

Fig.1に未処理および各微細化処理後のB粉末を用いて作製した各MgB₂バルクの電子線後方散乱回折(EBSD)法から得られた逆極点図(Inverse Pole Figure)を示す。ボールミルバルクと超音波5分バルクでMgB₂結晶粒が微細になっていた。ボールミルバルクでは回折が確認できない黒い領域が確認されたが、これは空隙もしくは結晶が50nm以下(EBSD法の測定限界)の極度に小さい領域である。

Fig.2に各MgB₂バルクの捕捉磁場の温度依存性を示す。 T_c は全てのバルクで約38.5Kであった。20Kでの捕捉磁場値はB未処理バルクで1.57T、ボールミルで2.12T、超音波5分で1.62T、超音波30分で1.93Tであった。超音波5分バルクではB未処理バルクと同程度の捕捉磁場であったが、超音波30分バルクではボールミルバルクに近い20Kで約2T級の捕捉磁場を示した。

講演では超音波照射条件の最適化の結果やMgB₂バルク体のより詳細な微細組織の観察結果と併せて報告する予定である。

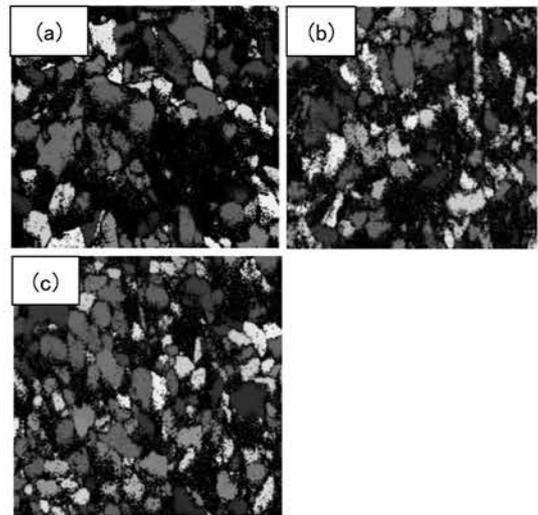


Fig.1 IPF maps of MgB₂ bulks made from the B powder refined by (a) pristine, (b) ball-milling, and (c) ultrasonic radiation.

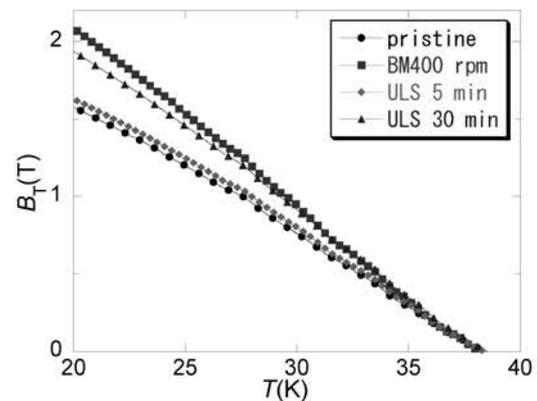


Fig.2 Temperature dependence of the trapped magnetic fields the MgB₂ bulks made from the pristine and refined B powders.

謝辞

本研究はJSPS科研費JP21H01788, JP23K21075の助成を受けたものです。

参考文献

1. T. Naito, Y. Endo and H. Fujishiro, Supercond. Sci. Technol. **30** (2017) 095007 (8 pages)
2. S. S. Arvapalli *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **33** (2020) 115009

トポタクティック反応を用いた SmFeAsO 多結晶バルクに対する水素ドーピングの検討

Investigation of Hydrogen Doping Methods for SmFeAsO Polycrystalline Bulks using Topotactic Reaction

霜山 郁弥, 石渡 翔大, 山本 明保 (東京農工大学); 生田 博志 (名古屋大学)
 SHIMOYAMA Fumiya, ISHIWATA Shota, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT); IKUTA Hiroshi (Nagoya Univ.)
 E-mail: s248291u@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

REFeAsO(RE1111)は鉄系高温超伝導体の中でも高い臨界温度を示し、水素ドーピング系では 100 T を超える上部臨界磁場と比較的低い異方性が報告されている[1,2]。近年、トポタクティック反応を用いて水素をドーピングする研究が RE1111 薄膜において盛んに行われている[3,4]。トポタクティック反応は金属水素化物と RE1111 をともに熱処理することで、RE1111 結晶の基本骨格を保ったまま酸素と水素の元素置換を引き起こす反応である。本研究では、報告例のない RE1111 多結晶バルクへのトポタクティック反応による水素ドーピングを試みた。

2. 実験方法

SmFeAsO の化学組成となるように秤量した原料粉末に対して遊星式ボールミルによる高エネルギー混合を行い、混合粉末を作製した[5]。混合粉末をペレット成型した後に石英管へ真空封入し、電気炉を用いて熱処理することで Sm1111 母相多結晶を得た。作製した Sm1111 母相多結晶の粉末と CaH₂粉末を乳鉢混合または高エネルギー混合を行うことで前駆体粉末を作製し、放電プラズマ焼結 (SPS: Spark Plasma Sintering) によって熱処理を行った。作製した試料に対して XRD、リートベルト解析による格子定数の導出、四端子法による電気抵抗率測定を行った。

3. 結果・考察

Fig.1 に作製した各試料の XRD パターンを示す。(a)は本研究で作製した Sm1111 母相多結晶である。Sm1111 主相の合成に成功し、不純物としては微量の Sm₂O₃と FeAs が確認された。格子定数はそれぞれ $a = 3.937 \text{ \AA}$, $c = 8.520 \text{ \AA}$ であり、先行研究の格子定数 ($a = 3.943 \text{ \AA}$, $c = 8.492 \text{ \AA}$)[6]と概ね一致していた。(b)と(c)はそれぞれ乳鉢混合または高エネルギー混合によって水素ドーピングを検討した試料である。いずれも Sm1111 が主相であり、不純物についても(a)の Sm1111 母相多結晶と比較して大きな変化は確認されなかった。一方で、(c)高エネルギー混合によって水素ドーピングを検討した試料においてはピークがブロードになる現象が確認された。また、(b)と(c)のいずれの場合も Ca を含んだ不純物は確認されなかった。

Fig.2 に水素ドーピング Sm1111 単結晶の格子定数[7]と本研究で合成した各試料の格子定数をプロットしたデータを示す。乳鉢混合によって水素ドーピングを検討した試料は先行研究と同様の推移を示したが、格子定数の変化が非常に小さく、効果的に水素をドーピングすることができていないと考えられる。高エネルギー混合によって水素ドーピングを検討した試料では先行研究と全く異なる格子定数の変化が見られ、 a 軸長の減少に伴い c 軸長が増加する傾向が確認された。122 系では結晶構造に対する積層欠陥の導入によって同様の傾向を示すことが報告されている[5]。ここから、高エネルギー混合によって H ドーピングを検討した試料における特徴的な格子定数の挙動の原因として、Sm サイトに対する Ca ドーピングもしくは積層欠陥の導入が候補として挙げられる。講演では各試料の抵抗率測定の結果と水素ドーピング効果を報告予定である。

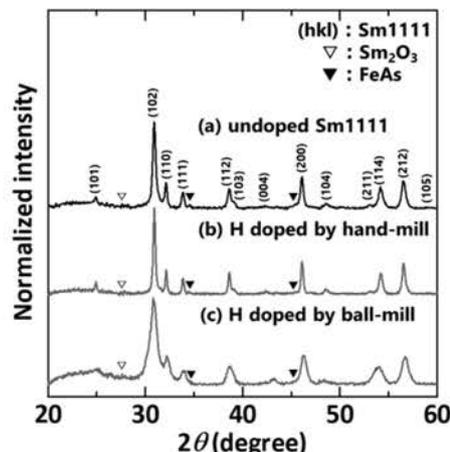


Fig.1 XRD pattern (a) undoped Sm1111 (b) SmFeAs(O,H) by hand-mill (c) SmFeAs(O,H) by ball-mill

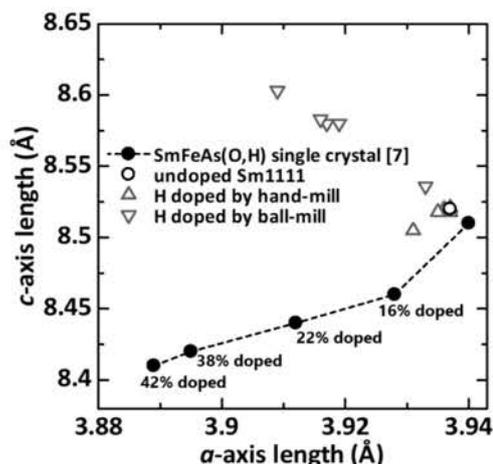


Fig.2 comparison of the lattice parameters

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K21734 の助成を受けたものです。

参考文献

1. Y. Kamihara, et al.: Journal of American Chemical Society, Vol. 11 (2008) p.3296
2. K. Hanzawa, et al.: Physical Review Materials, Vol. 6 (2023) p.L111801
3. J. Matsumoto, et al.: Physical Review Materials, Vol. 3 (2019) p.103401
4. K. Kondo, et al.: Superconductor Science and Technology, Vol. 33 (2020) p. 09LT01
5. S. Tokuta, et al.: APL Materials, Vol. 7 (2019) p.111107
6. N. D. Zhigadlo, et al.: Physical Review B, Vol. 82 (2010) p.064517
7. S. Iimura, et al.: Journal of Asian Ceramic Societies, Vol. 5 (2017) p.357

高混合エネルギーを用いた放電プラズマ焼結 K ドープ Ba122 バルクの作製

Fabrication of K-doped Ba122 bulks by spark plasma sintering using high energy milling

水登 伊知郎, 石渡 翔大, 霜山 郁弥, AYUKARYANA Nur Rahmawati, 清水 和花, 山本 明保(東京農工大)
MIZUTO Ichiro, ISHIWATA Shota, SHIMOYAMA Fumiya, AYUKARYANA Nur Rahmawati, SHIMIZU Nodoka,
YAMAMOTO Akiyasu(TUAT)

1. はじめに

BaFe₂As₂(Ba122)は鉄系高温超伝導体の一種であり、元素置換などにより超伝導が発現する[1]。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($T_c=38$ K[2])と上部臨界磁場($H_{c2}>75$ T[3])を持ち、強力磁石等への応用が期待されている。Ba122 の H_{c2} は高エネルギー混合による積層欠陥によって向上することが知られている[4]。また、我々は放電プラズマ焼結法(SPS)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、 1×10^5 A/cm²を上回る臨界電流密度(J_c)を得ている[5,6]。本研究では、高磁場下において高い J_c を持つバルクの作製に向けた指針を得るために、従来よりも高いエネルギーで混合を行った前駆体粉末を用いて SPS 法により K ドープ Ba122 バルクを作製し、高混合エネルギーがもたらす結晶構造や J_c への影響を評価した。

2. 実験方法

Ar 雰囲気グローブボックス内で仕込組成 Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ となるように単体金属を秤量し、遊星型ボールミル混合の混合条件(E_{BM})を変化させて前駆体粉末を作製した[5]。作製した前駆体粉末を SPS 型に充填し、50 MPa の一軸圧力下において +50°C/min の速度で 700°C まで昇温し、5 min 維持した後室温まで炉冷することで、直径 10 mm、厚み約 1.3 mm の多結晶バルク試料を作製した。異なる混合エネルギーで作製したバルクに対し、XRD 解析によりピーク半値幅(FWHM)と格子定数を、磁化測定により J_c を評価した。

3. 結果・考察

Fig.1(a)に Ba122(103)面に対する Fe(110)面のピーク強度比を、Fig.1(b)に Ba122 のメインピークである(103)面の半値幅(FWHM)を示す。Fig.1 (a)より、 E_{BM} の増加にともない Fe メインピークである(110)面が相対的に減少し、メカノケミカル反応による Ba122 の合成が 200 MJ/kg 程度で十分に進行したことが示唆された。Fig.1 (b)より、 E_{BM} の増加にともなって、Ba122 の(103)面の FWHM が増大する傾向にあることが観察された。この傾向は Co ドープ Ba122 の先行研究[4]とも一致し、K ドープ Ba122 の場合でも粒径の微細化や欠陥の導入が高エネルギー混合によって引き起こされていることが示唆された。

Fig.2 に Ba122 バルク($E_{BM} = 70, 140, 300$ MJ/kg)の J_c の外部磁場依存性を示す。 $E_{BM} = 70, 140, 300$ MJ/kg の試料で、自己磁場下ではそれぞれ 6.95×10^4 A/cm²、 5.25×10^4 A/cm²、 1.08×10^5 A/cm² の J_c が得られた。磁場中の 3 T においては、それぞれ 6.00×10^3 A/cm²、 7.16×10^3 A/cm²、 1.19×10^4 A/cm² であり、 E_{BM} の増加と共に J_c が向上する傾向が観察された。また $E_{BM} = 70, 140$ MJ/kg の試料において 0.1 T で J_c の逆転が確認され、比較的高い混合エネルギーである $E_{BM} = 140, 300$ MJ/kg の試料において磁場中での J_c の減衰が他試料と比較して小さかった。

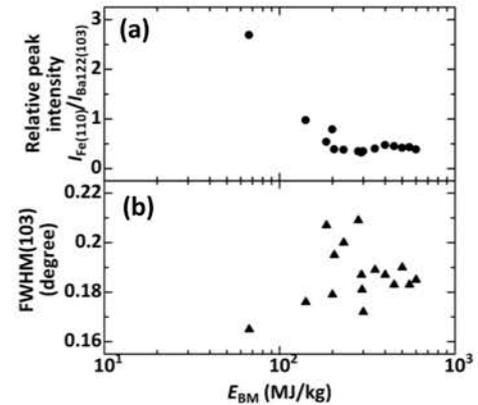


Fig.1 Milling energy dependences of the (a) relative peak intensity of Fe (110) to Ba122 (103), (b) FWHM of Ba122 main peak (103)

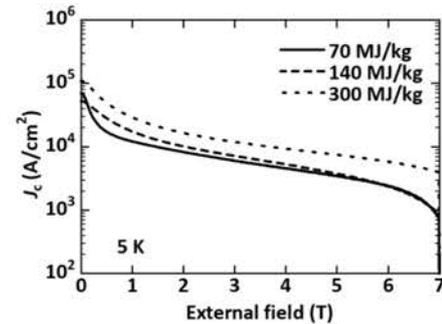


Fig.2 External field dependence of the critical current density

4. まとめ

本研究では、従来よりも高いエネルギーで混合を行った前駆体粉末を用いて SPS 焼結バルクを作製し、混合エネルギー条件が試料の結晶構造や J_c に及ぼす影響を評価した。高混合エネルギーの試料では不純物の Fe ピーク強度比が減少し、Ba122 のメカノケミカル合成が促進されたことが示唆された。また、 $E_{BM} = 300$ MJ/kg において磁場中における J_c の向上がみられた。

参考文献

1. H. Hosono, et al.: Mat. Today, Vol. 21 (2018) p.278
2. M. Rotter, et al.: Phys. Rev. Lett., Vol. 101 (2008) p.107006
3. N. Ni, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 78 (2008) p.014507
4. S. Tokuta et al.: APL Mater., Vol. 7 (2019) p.111107
5. S. Tokuta, et al.: iScience, Vol. 25 (2022) p.103992
6. A. Yamamoto, et al.: NPG Asia Mater., Vol. 16 (2024) p.29

パルス着磁した超電導バルク磁石による単極 NMR 磁極とその磁場分布

Unipolar NMR magnet by pulse-field magnetization of superconducting bulk magnet and the magnetic field distribution

岡 徹雄(芝浦工大); 渡邊飛龍, 高橋雅人(理研); 坂井 直道(芝浦工大); 横山 和哉(足利大)
 OKA Tetsuo (SIT); WATANABE Hiryu, TAKAHASHI Masato (RIKEN); SAKAI Naomichi (SIT);
 YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.);
 E-mail: okat@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

NMR は物質の原子状態を調べる上で最も精緻な分析の一つである。この分野では高磁場高性能な機器とは別に、TD (Time-Domain)-NMR に代表される簡易型の磁極がすでに広く市場投入されている。おもに永久磁石の磁場空間を用いる装置は、簡便な設置や容易な維持管理が特長である。この簡易型磁極の磁場を強化すれば、信号検出の感度や積算時間が大きく改善されることから、磁場の強化は重要な開発課題である[1]。高温超電導バルク(以下バルク磁石)の捕捉磁場は永久磁石のそれに優ることから、筆者らはバルク磁石による単極NMR磁極の実現を目指している。

2. 実験方法

NMR 磁極となる実験装置を Fig. 1 に示す。縦置き真空容器表面(φ89)からの磁場を使う単極型のNMR磁石である。磁極内に搭載するバルク磁石は T_c が 90 K の Gd123 系と呼ばれる円柱状(φ60×t20, 日本製鉄)である。これをGM冷凍機(アイシン製 GD101)の冷凍部に直接固定して真空容器上端の内部に位置している。バルク磁石はパルス励磁されるが、磁束の運動が発熱をもたらすため、印加磁場を順次下げて励磁する方法(IMRA 法)を採用した[2]。液体窒素冷却されたパルスコイルと 40 mF の電源を用い、最大 4 T から 3.4 T まで順次減衰して連続 6 回の磁場を印加した。

3. 実験結果

上記の方法によって励磁された単一磁極の表面での磁場分布を Fig. 2 に示す。磁極表面での磁場は最大 2T を示した。その分布は釣り鐘型の理想的な形状を示すが、中央部に凹みが見られ、印加磁場がバルク磁石の磁場捕捉能力に対して不十分であることを示した。同時に Fig. 2 に磁場分布の断面を示す。方向によって偏りが見られるが、中央部に 1.85 T の凹みがある。磁極表面から z 方向に距離をとれば、この凹みは次第に平坦となり、均一な磁場平面を得られると期待できる。Fig. 3 に示すように、表面で 2 T の磁場は 4 mm 離れると 1.5 T に減衰するが、最大値と中央値の点は $z=3-4$ で一致して平坦な磁場分布となる。実際に $z=3$ の平面に 6 mm の区間で 834ppm 以下、10 mm 区間で 2,839ppm 以下の平坦な領域が得られた。

4. 結論

単一磁極の中央部にパルス励磁で意図的な凹型の磁場分布を形成し、表面からの距離に応じて均一磁場の領域を作ることができた。このことは、検出コイルや評価試料の形状によっては NMR として利用できることを示す。

参考文献

1. M. Takahashi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 32, 6, 4602404, DOI: 10.1109/TASC.2022.3161247
2. T. Oka, Physica C 463-465 (2007) pp. 7-13, DOI: 10.1016/j.physc.2007.03.432.

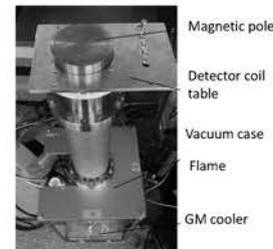


Fig. 1 Experimental setup of single-side NMR magnet

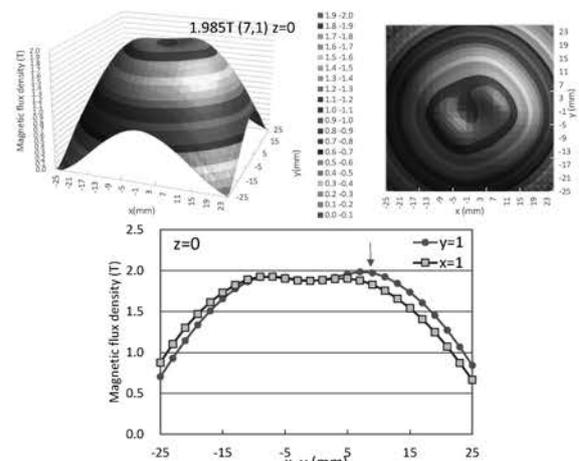


Fig. 2 Trapped field distribution and uniaxial field distribution

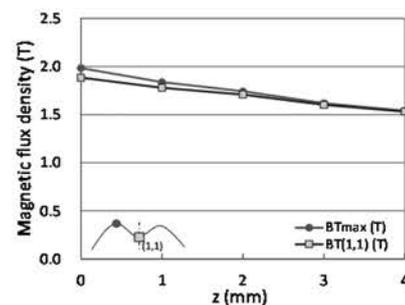


Fig. 3 z -axis dependence of trapped field at the center

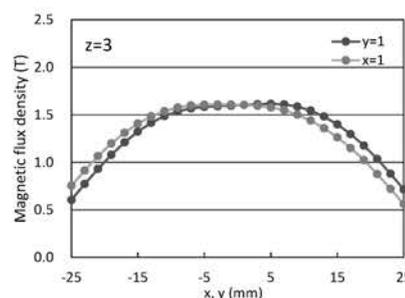


Fig. 4 Magnetic field distribution at $z=3$ from pole surface

プレ着磁の過程を加えた新たなパルス磁化法の提案

Proposal for a new pulsed-field magnetization with the addition of first applying a very small magnetic field

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

超伝導バルク磁石(以下、バルク磁石と略す)は、小型・軽量の装置で、従来の永久磁石や電磁石よりも強い磁場を容易に発生することができる。そのため、大型風力発電用の発電機や航空機用のモータなどへの応用が検討されている。バルク磁石の着磁方法のうちパルス磁化法(以下、PFMと略す)は汎用の銅コイルやコンデンサ電源を用いて短時間で作業できるため、産業応用には有効な手法である。一方で、通常のPFMでは試料の性能の50%程度しか磁束を捕捉できないため、IMRA法やMPSC法、MMPSC法、ロングパルス法、パルス波形制御法などが提案されている。本研究は、効率的な着磁方法として、プレ着磁の過程を加えた新たな着磁法(FAVS法:pulsed-field magnetization with the addition of First Applying a Very Small magnetic field)を提案し、その有効性をパルス着磁実験により検証する。

2. 提案手法(FAVS法)の原理

PFMでバルク体を着磁する場合、超伝導状態の試料に磁場を印加するため、磁束が侵入する際にピン止め損失及び粘性損失により発熱し、それに伴い超伝導特性が低下して、結果的に捕捉磁場が減少してしまう。そのため、いかに発熱を抑制しつつ、磁束を侵入・捕捉させるかが重要なポイントとなる。Fig. 1に提案手法の原理図を示す。本手法は、バルク体の超伝導特性の不均一性を活かして、初めに弱い磁場を印加することで、特性の低い部分をわずかに発熱させて、意図的に J_c を低下させる。その部分は、他の部分に比べて磁気シールドが低下することから磁束のパスとなる。2回目の磁場印加では、そこから磁束を効率的に侵入させることができるため、発熱が抑制されて、高い J_c を維持したまま磁束を捕捉することが期待できる。

3. 実験方法

$\phi 60 \times 20$ のGdBCOバルク体を超伝導バルク磁石装置のサンプルステージに取り付け、真空断熱した後、2段GM冷凍機で冷却する。温調器を用いて、試料の温度を20又は30 Kに調整する。バルク磁石装置の磁極に着磁コイルを取り付け、コンデンサ電源を用いて1回目に0.8~3.1 Tの小さい磁場を印加し、2回目に目的の大きさである5.0及び5.4 Tの磁場を印加した。いずれもパルスの立上り時間は10 msであり、1回目と2回目の間隔は約2分である。

実験は、着磁中の試料表面中央における磁束密度及び温度の時間変化を測定する。着磁後、磁極表面における磁束密度分布を測定するとともに、その実測値を用いて総磁束量を算出する。

4. 結果及び考察

Fig. 2に、2回目に5.0 Tの磁場を印加した時の総磁束量の印加磁場依存性の比較を示す。比較のためにシングルパルスの時の結果も示した。提案手法において、1回目の印加磁場が小さいとシングルパルスより高い捕捉磁場を達成している。ただし、1回目の印加磁場が大きくなると、総磁束量が減少することが分かった。これは、1回目の磁場印加で発熱が大きくなりすぎ、試料全体の J_c が低下してしまったためであると考えられる。なお、2回目の印加磁場が5.4 Tの場合も同様の結果が得られている。

5. まとめ

本研究は超伝導バルク磁石のパルス着磁において、着磁効率を改善させるために、新たな着磁方法としてプレ着磁の過程を加えたFAVS法を提案し、その有効性を検証した。温度や印加磁場の大きさを変えてパルス着磁実験を行い、磁束密度分布や総磁束量を評価した結果、1回目の印加磁場が小さい場合に、シングルパルスの場合よりも総磁束量が大きくなることを確認した。これらの結果より提案手法の有効性が確認できた。今後、試料各部の磁束密度や温度の測定を行い、詳細な検証を行う予定である。

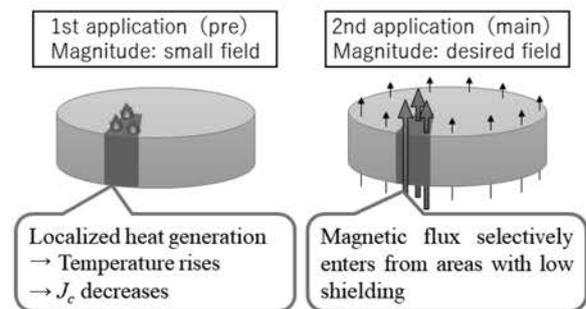


Fig. 1. Principle of the new FAVS method

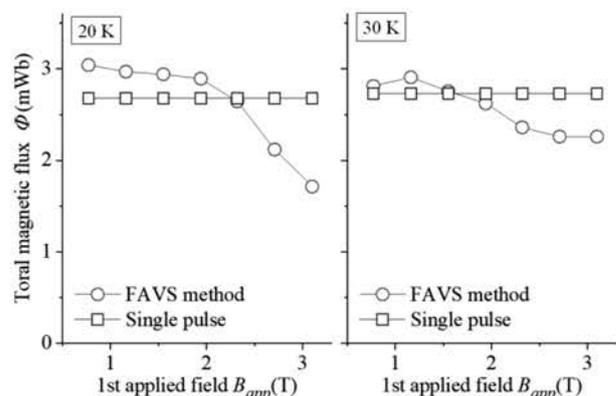


Fig. 2. Comparison of applied field dependence of total magnetic flux at 20 and 30 K

1D-CAE を用いたガス冷却超電導磁石の熱設計

Thermal design of a gas cooled superconducting magnet using the 1D-CAE method

高木 紀和, 高橋 政彦, 栗山 透, 土橋 隆博, 武輪 裕之(東芝エネルギーシステムズ), 高橋 弘紀, 淡路 智(東北大)

TAKAGI Norikazu, TAKAHASHI Masahiko, KURIYAMA Toru, TSUCHIHASHI Takahiro, TAKEWA Hiroyuki (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation), TAKAHASHI Kohki, AWAJI Satoshi (Tohoku University)

E-mail: norikazu1.takagi@toshiba.co.jp

1. 背景

伝導冷却超電導磁石の冷却設計のため、モデリング言語 Modelica を用いた 1D-CAE による熱計算モデルを開発してきた[1]。Modelica は要素間の物理的な関係式の記述のみで入出力の定義が不要なため、構成要素の組み換えが容易である。本解析手法を、ガス冷却方式に展開する。モデルの妥当性検証のため、東北大向け高磁場超電導磁石の冷却システムの解析結果と実測を比較した。

2. 解析方法

今回対象としたガス冷却システムでは、冷凍機の冷熱をガス循環により冷却ステージに輸送し、冷却ステージに取り付けた被冷却体を熱伝導で冷却する。ガス冷却に関わる対向流熱交換器について、ガスは理想気体と仮定し、温度効率 η 、流路 1 と 2 の流量 \dot{m} 、流路 1 の入口と出口のガス温度 $T_{1,in}$ と $T_{1,out}$ 、流路 2 の入口と出口のガス温度 $T_{2,in}$ と $T_{2,out}$ の間の熱バランスを式(1)に示し、要素モデル図を Fig.1(a)に示す。本モデルは真空容器への流入ガスの予熱交換器に適用される。また、冷却ステージのガス固体間熱交換器について、流量 \dot{m} 、重量 M 、比熱 C_s 、ガス比熱 C_p 、熱負荷 Q 、冷却ステージ温度 T_{stage} 、入口と出口のガス温度 T_{in} と T_{out} の間の熱バランスを式(2)に示し、要素モデル図を Fig.1(b)に示す。冷却ステージは均一温度と仮定し、理想的な熱交換器を仮定して出口ガス温度 $T_{gas,out}$ と冷却ステージ温度 T_{stage} は等しいとする。伝導冷却に関わる熱抵抗や冷凍機の冷凍能力は要素試験の実測データを基にモデル化する。このモデルは冷凍機ヘッドおよびコイル冷却ステージの熱交換器に適用される。

$$T_{gas,out} - T_{gas,in} = \frac{M \frac{dC_s(T_{stage})}{dt} + Q}{\dot{m}C_p} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{(T_{1,in} - T_{1,out})}{(T_{1,in} - T_{2,in})} = \frac{(T_{2,out} - T_{2,in})}{(T_{1,in} - T_{2,in})} \quad (2)$$

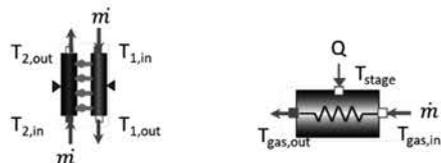


Fig.1 Component modules of heat exchangers.

3. 解析条件

モデルの妥当性検証のため、東北大向け 25T 無冷媒超電導磁石の冷却システム[2]を解析対象とした。ガス冷却システムを Fig. 2 に示す。超電導磁石は発生磁場 14T の LTS コイルと 11T の HTS コイルから構成される。それぞれのコイルと熱シールドが 3 つの異なる温度レベルに対応する 3 種類の冷凍機によって冷却されたヘリウムガスにより冷却される。LTS コイルは GM/JT 冷凍機で 4.2K に冷却され、HTS コイルは 2 段 GM 冷凍機で約 10K に冷却される。熱シールドと電流リードの熱アンカー部は単段 GM 冷凍機で約 50K に冷却される。初期冷却時間短縮のため、初期冷却中には LTS ループに設けた JT 回路の 2 つのバイパスバルブ V1 と V2 の開閉により流路を 2 通りに切り替える。最初のモード1では V

1 を開き冷却ガスは単段 GM 冷凍機で冷却される。次のモード2では、V1 を閉じて V2 を開き冷却ガスは GM/JT 予冷用 GM 冷凍機の 2 段により冷却される。最後のモード3では、V1 と V2 を閉じて冷却ガスは JT 回路を流れる。初期冷却中のヘリウムガスの流量は一定と仮定してモード1とモード2の熱解析を実施し、初期冷却時間を解析と実測で比較した。

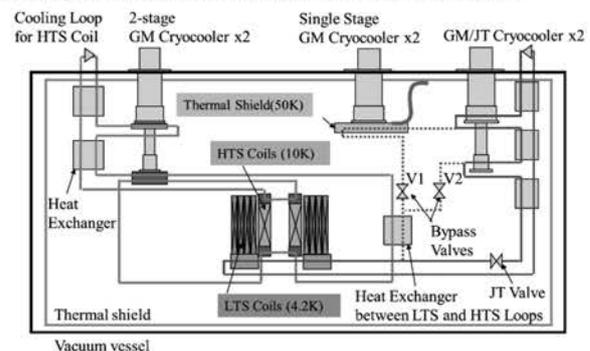


Fig.2 Diagram of cooling system of 25T cryogen free superconductive magnet [2].

5. 解析結果

初期冷却に関し、モード1と2の冷却方式を 1D-CAE モデルに取り込み、解析を実施した。LTS コイル初期冷却時の温度履歴の実測値と解析結果を Fig.3 に示す。LTS コイル温度の室温から 20K までの初期冷却時間は解析では 140h で実測の 145h に対して誤差 3% で一致した。モード3の実測の冷却時間は 4h でその割合は小さかった。

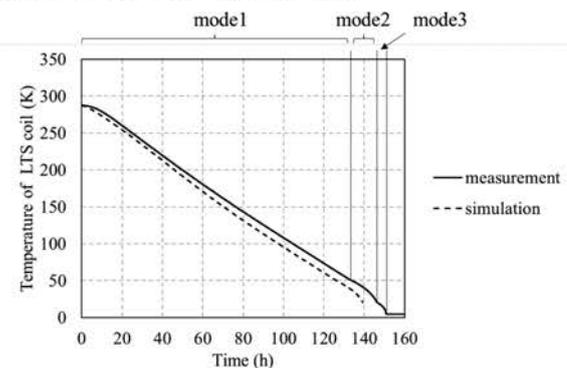


Fig.3 Temperature trend of LTS coil during cooldown.

6. まとめ

1D-CAE を用いたガス冷却システムの熱解析モデルを開発し、実測との比較から解析の妥当性を検証した。今後、本解析手法を超電導機器のガス冷却システムに展開していく。

参考文献

1. K. Ueno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 101 (2023) p.31.
2. M. Takahashi et al., IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 27 (2017), no. 4, 4603805.
本稿に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

月震観測モジュールの熱設計と熱解析(その1)

Thermal design and simulation on lunar seismometer module #1

飯田 光人 (株式会社たすく); 新谷 昌人 (東京大学); 川村 太一 (パリ地球物理学研究所);
 小野寺 圭祐 (岡山大学); 田中 智 (宇宙航空研究開発機構)
 IIDA Teruhito (Task Inc.); ARAYA Akito (The Univ. of Tokyo); KAWAMURA Taichi (IPGP);
 Onodera Keisuke (Okayama University); Tanaka Satoshi (JAXA/ISAS)
 E-mail: t.iida@task-inc.tech

1. はじめに

月面に地震計を設置し、地震(月震)を観測する JAXA のプロジェクトが検討されている。通常の宇宙機の熱設計と異なり、月面上に設置される観測機器の熱設計では、月面も熱モデルに取り込む必要がある。今回は簡易的に平坦な月面モデルを設定し、月面での 1 昼夜における月震観測モジュールの熱解析結果を行い、熱的成立条件(必要なヒーター電力等)を確認した。

2. 月震観測モジュール

月震観測モジュールとは、(地球上の地震ではないので)月震を観測するセンサーを複数搭載した観測装置である。この装置により、月の地中内部で生じる微弱な地震を観測することができる。また、複数のモジュールをある距離をおいて点在させれば、地中内部の構造や内部の物質を同定することも可能になる。今回のモジュールには、機械式と光学式の 2 種類の月震計を搭載することになる。また、モジュール自体、独立で運用可能であり、内部には、モジュールのシステム管理を行うコンピュータ、データハンドリングユニット、バッテリーと電力コントロールユニット(外部からの電力供給が可)、温度コントロールユニット等が搭載される。さらに付属ユニットとして、地球と直接通信可能な通信ユニットも近傍に設置される。Fig.1 にモジュールの熱解析モデルを示す。サイズは、直径 500mm、高さ約 350mm の円筒形状である。

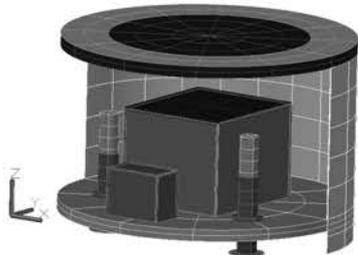


Fig.1 Thermal model of lunar seismometer module

3. 月面環境の特徴

月面の環境は地球の環境に比べ、次の点で大きく異なっている:

- ・月面上での 1 日は(地球時間換算で)約 29.5 日である。
- ・大気がなく、昼夜の温度差が非常に大きい。例えば、赤道上では、昼間の最高温度は 400K、夜間は 100K 程度である。
- ・月面は、特に平地部はレゴリスという砂で覆われている。その見かけの熱伝導率は非常に低く、常温で 0.01W/m/K 程度である。
- ・レゴリスの可視光の吸収率は 90%を超え、赤外の放射率も、90%を超える。したがって、昼間温まり易く、夜間冷え易い。

Fig.2 に NASA の月周回衛星ルナー・リコネサンス・オービターに搭載された機器 DIVINER で計測された、緯度に対する月面地表温度を示す[1](横軸の時間は月面の 1 昼夜を 24 時間とした表示)。極域では、温度が非常に低く、真昼でも最高温度はおよそ 175K 程度である。

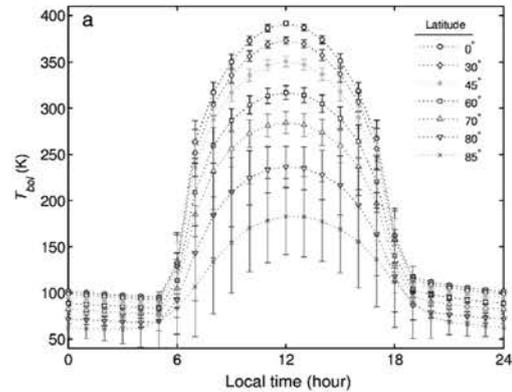


Fig.2 Zonal mean bolometric temperatures for latitude bands

4. 熱設計と解析結果(温度分布)

モジュールの熱設計として、太陽光や、熱拡散率が非常に小さく、時間的に変化する月面のレゴリスの影響を考慮した。排熱の大きな機器はモジュールの天井下面に配置し、天井上面のラジエーターから積極的に排熱する。一方、発熱が小さく温度変動に敏感な機器は、下部のテーブル部に配置した。さらに、夜間の極低温環境に備えるため、モジュール下部の月表面レゴリスに、内部で発生した熱の一部を回収、備蓄するため、天井とテーブルをアルミ製の円筒で熱結合させ、3本の脚を介して、レゴリスへの適度な熱の流れが生じるようにした。また、どの方位に太陽があっても、MLIの内側にあるこの円筒の側面の温度分布は小さくなるはずである。

Fig.3 に、モジュールが南緯 85° に設置された場合の熱解析結果を示す(月面時刻は日出から 8 日目)。結果、バッテリー温度変化は、昼夜を通して+9.6~29.2°Cであった。

また、このモデルを使用し、月着陸船上に搭載されている時の簡易計算を行った結果、バッテリーを保存温度に保つために必要なヒーター電力は、20W が必要であることが確認できた(最大供給電力は 25W)。

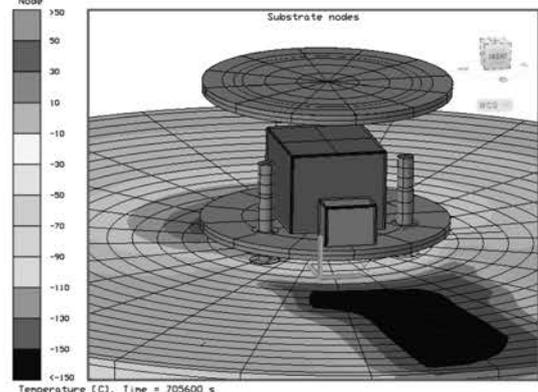


Fig.3 Thermal analysis results

5. 参考文献

1. J.-P. Williams, et al.: Icarus, 283 (2017) p.300

レーザー核融合実験用液体重水素ターゲット冷却装置の開発

Cooling system of a liquid deuterium target for laser fusion experiments

岩本 晃史, 唐木 優河, 藤岡 慎介 (阪大レーザー研)
 IWAMOTO Akifumi, KARAKI Yuga, FUJIOKA Shinsuke (ILE, UOsaka)
 E-mail: iwamoto.akifumi.ile@osaka-u.ac.jp

1. はじめに

レーザー核融合実験用の液体重水素ターゲット装置の開発を行っている。阪大レーザー研では高速点火方式レーザー核融合の研究を推進しており、加熱用レーザーをガイドするコーンが取り付けられた球形のプラスチックシェル中に液体重水素を満たしたターゲットを使用する。ターゲットは真空中においてレーザー照射されるため、ターゲット冷却方法の確立とそれを実現する装置の開発が必要である。装置を製作し、ターゲットの冷却試験を行ったので報告する。

2. レーザー核融合の現状

2022年12月5日、米国ローレンスリバモア国立研究所の国立点火施設において、世界初の制御核融合による点火が実証された。核融合出力は3.15 MJで燃料に照射されたレーザーエネルギーは2.05 MJであった。それ以降、核融合点火は何度も再現されており、これまでの最大核融合出力は3.88 MJ (レーザーエネルギー2.05 MJ)である。[1] 国内では、阪大レーザー研において、米国とは異なる高効率化が見込める方式: 高速点火方式について研究を実施している。

3. 高速点火方式レーザー核融合実験用ターゲット

直径200ミクロンのプラスチックシェルに重水素供給用のガラスチューブと加熱用レーザーをガイドする金製コーンが取り付けられている。それぞれは紫外線硬化樹脂により接着されている。Fig.1はそのターゲットの写真。真空中においてプラスチックシェル内に重水素を液化するためシェル近傍に熱伝導冷却用の銅線が取り付けられている。

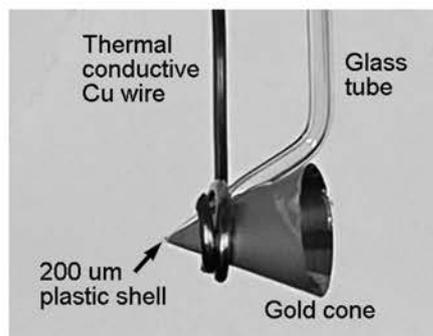


Fig. 1 Target for fast ignition laser experiment.

4. ターゲット交換型冷却装置

高速点火方式によるレーザー核融合実験は阪大レーザー研にあるkJ級高出力レーザーの激光12号及び加熱用レーザーのLFEXを使用して実施される。レーザー実験は1ショット/3時間の頻度で実施される。ターゲット冷却装置は直径1.8mの実験用球形チャンバーの上部から取り付けられ、ターゲットは球形チャンバーの中心に配置する。ガスボンベから供給される重水素ガスは1/8ステンレスパイプを通じてガラスチューブにつながりターゲットのプラスチックシェル内に供給される。液体重水素の使用とレーザー実験の頻度から考えてターゲット冷却装置に必要な性能は次の点である。

- ・予備試験用軽水素を液化可能な20K以下
- ・装置の冷却状態を保ったままターゲットの交換が可能

- ・照射レーザーの光路を妨げない形状
- ・レーザー照射位置調整などのためのxyzステージ

Fig.2に製作した装置の3D図を示す。装置の冷却にはGM冷凍機(住友重機械工業製、冷凍能力1.5W at 4.2 K)を使用している。装置はターゲットスティックと冷却装置本体から構成されている。先端にターゲットを取り付けたターゲットスティックを引き抜くことで本体の冷却を継続しながらターゲット交換を可能にしている。

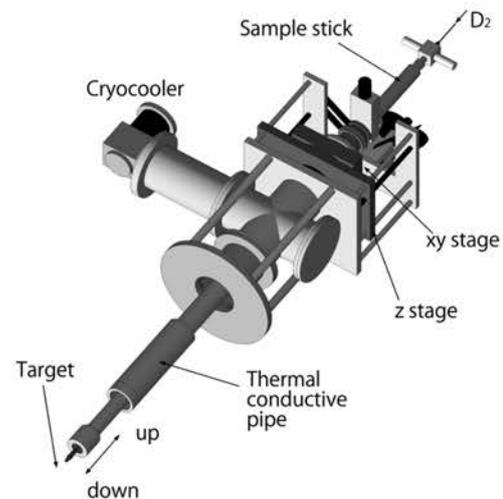


Fig. 2 Target cooling system for laser fusion experiments.

5. 冷却試験

Fig.3に装置の冷却試験結果を示す。約5時間で重水素の液化温度に到達することが分かった。

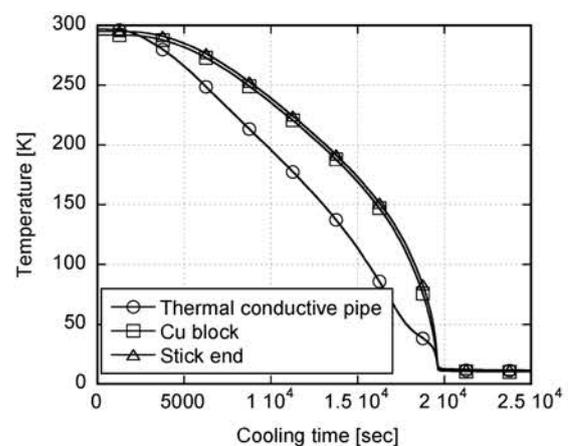


Fig. 3 Cool down curve.

謝辞: 本研究はJSPS科研費 22H00118の助成を受けたものです。

参考文献

1. https://lasers.llnl.gov/sites/lasers/files/2024-06/age_of_ignition_book_1.pdf

核融合ポロイダルコイルの液体水素冷却の予備的研究

Preliminary study regarding liquid hydrogen cooling of a poloidal coil

星野 昌幸(前川製作所); 仲村 直子, 平野 直樹(核融合科学研究所)
 HOSHINO Masayuki (Mayekawa); NAKAMURA Naoko, HIRANO Naoki (NIFS)
 E-mail: nakamura.naoko@nifs.ac.jp

1. はじめに

本研究では、磁場閉じ込め方式の核融合向け高温超伝導コイルを冷却の視点で検討し、高温超伝導コイルの設計に寄与することを目的としている。核融合に高温超伝導コイルを採用する場合、液体ヘリウム以外の冷媒の使用が可能となり、高温超伝導コイルの冷却に適した冷媒やシステムを改めて検討することが出来る。先ず初めに高温超伝導コイルの冷媒を検討するため、数値計算による予備的研究を実施した。

2. 解析モデルおよび条件 [1]

高温超伝導コイルは核融合科学研究所が保有する大型ヘリカル装置(LHD)のポロイダルコイルを対象とした。

強制冷却方式の初期冷却の様相は過渡現象で冷媒を比較すると、冷媒の特性を比較的分かりやすく確認することが出来るため、ヘリウムガスと水素ガスをそれぞれ強制的にポロイダルコイルに流した時の初期冷却の様子を確認した。

解析ソフトには AspenTech 社の Aspen HYSYS Ver.12.1(物性値 REFPROP Ver.10.0.0.02)を使用した。Aspen HYSYS は、プラント設計に使用するプロセスシミュレータであるが、ケーブル・イン・コンジット導体(以下、CICC)やPCスリーブの流体と固体との熱伝達も計算可能なため、2つの冷媒を比較するための検討と割り切って使用した。

計算時間を短縮するため、LHDの3対のポロイダルコイルの中で径の小さなIVコイルに限定し、さらにパンケーキコイル16個の中の1個に絞って計算した。パンケーキコイルは、CICCが15ターン巻かれており、冷媒は内側渡り部から入り、CICC内を通過して外側の導体接続部から出る。

冷媒は、パンケーキコイルと並行してPCスリーブ内に設置された冷却配管にも流れる。PCスリーブはパンケーキコイルと熱的に繋がっており、初期冷却の検討において無視出来ないため、PCスリーブも含めたパンケーキコイルをモデル化した。

解析モデルの概要は以下の通りである。さらに、本モデルの概略図を Fig.1 に示す。

- CICCを Aspen HYSYS のパイプ要素で模擬した。
- CICC の等価直径をパイプ内径、コンジットと超伝導ストランドをパイプ金属部とし、金属部の物性値はコンジットと超伝導ストランドの断面積比を用いて算出した。
- CICC 周囲の絶縁材は、ターン間の絶縁材を均等に分割して絶縁材同士の熱伝達を考慮、さらに絶縁材と CICC のパイプ金属部との熱伝達も考慮した。
- PC スリーブはステンレスのブロックとして 15 の要素に分割、各ステンレスブロックの温度を PC スリーブ冷却配管の外周温度とした。
- 積層された 16 個のパンケーキコイルは、上側 8 個のパンケーキコイルが PC スリーブ上面と、下側 8 個のパンケーキコイルは PC スリーブ下面とそれぞれ熱的に接触していることとした。これにより、パンケーキコイル 8 個が PC スリーブの半面とそれぞれ熱交換することになるため、パンケーキコイル 1 個に PC スリーブから伝わる熱は、PC スリーブ半面から伝わる全熱量の 1/8 とした。
- パンケーキコイルおよび PC スリーブ冷却配管の入口温度、入口・出口圧力のそれぞれに LHD 初期冷却時の運転データ(2022年8月31日-9月12日)を設定した。PC スリーブ冷

却配管の出口に設置した仮想バルブの開度も実際の LHD 運転時のバルブ開度に合わせて調整した。

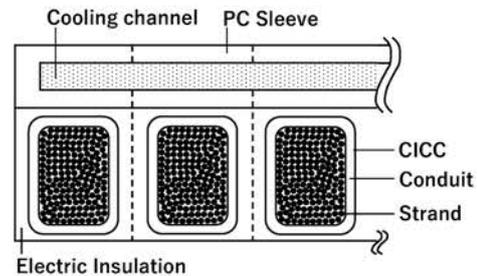


Fig.1 Outline Drawing of Model

3. 解析結果

初めに、解析結果(冷媒はヘリウムガス)とLHD運転データとの比較を行った。PCスリーブの解析結果は運転データと上手く整合していたが、ポロイダルコイルの解析結果にはズレがあり、ポロイダルコイルとPCスリーブとの熱伝達等に課題のあることが分かった。

冷媒にヘリウムガスまたは水素ガスを用いた際の解析結果を Fig.2 に示す。なお、Fig.2 の解析ではポロイダルコイルとPCスリーブとの熱伝達は考慮していない。水素ガスはヘリウムガスに比べて粘性係数が小さく比熱が大きいため超伝導ストランドの詰まった CICC 内を流れやすく、CICC の最終ターンまで早く冷却することが出来ることから、導体設計の自由度の増す可能性が示唆された。

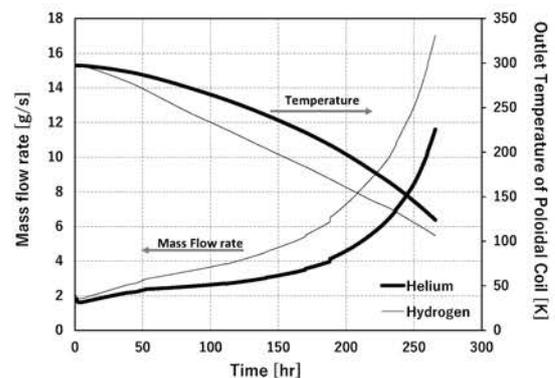


Fig.2 Analysis Results

4. おわりに

磁場閉じ込め核融合に高温超伝導コイルを用いた際の冷却視点での検討として、プロセスシミュレータによる LHD ポロイダルコイルの初期冷却の数値解析を行った。ヘリウムガスと水素ガスでの冷却状態の違いを確認する当初の目的は達成したが、より高い精度でポロイダルコイルの解析を行う場合には、流体-固体間の熱伝導モデル等を改良する必要がある。

参考文献

1. Toshiyuki Mito: Cryogenic System for the Large Helical Device-Cryogenic System-, J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 32, No.11 (1997) p.608-616

液体水素充填ステーションのゼロボイルオフの研究

Zero-Boil-Off system of liquid hydrogen refueling station

WANG Chenguang, 李 遠鑑, ZHANG Shurui, ZHANG Cunman, XUE Mingzhe, 朱 紹偉 (同濟大学)

WANG Chenguang, LI Yuanjian, ZHANG Shurui, ZHANG Cunman,

XUE Mingzhe, ZHU Shaowei (Tongji University)

E-mail: sw_zhu@163.com

1 INTRODUCTION

In liquid hydrogen (LH₂) refueling stations, unavoidable heat leakage induces hydrogen evaporation, leading to boil-off losses. To address this issue, a zero-boil-off (ZBO) system has been designed. A thermodynamic analysis of LH₂ pumps and storage tanks and proposes strategies for reducing heat leakage was presented to minimize the condensation thermal load on refrigerators. Furthermore, it conducts a systematic investigation of the heat transfer characteristics and liquid film distribution patterns during filmwise hydrogen condensation on refrigerator cold heads under various operating conditions. How condensed liquid hydrogen return to the storage tank without tumbling was also investigated.

2 THE ZBO SYSTEM

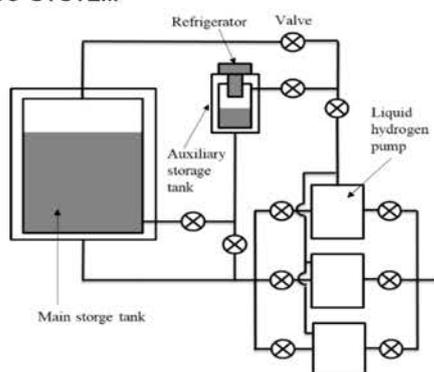


Fig 1 Schematic diagram of ZBO system with auxiliary tank

The ZBO system generally consists of a liquid hydrogen storage tank, a refrigerator, liquid hydrogen pumps, pipelines, valves, and other components. In conventional designs, the refrigerator is typically installed inside the storage tank to recondense evaporated hydrogen directly, with the condensate dripping onto the gas-liquid interface. However, this process can trigger tumbling phenomena, leading to rapid vapor generation, a sharp pressure rise, and potential safety risks. Maintenance of the in-tank refrigerator is also difficult.

To address these issues, an auxiliary liquid hydrogen tank is introduced as shown in Figure 1. In this configuration, evaporated hydrogen is directed into the auxiliary tank, where it is recondensed by a refrigerator. The liquid is temporarily stored and then returned to the main tank through a low-disturbance inlet, minimizing the risk of additional tumbling. The auxiliary tank also helps stabilize the pressure in the main tank, offering clear advantages over traditional ZBO systems.

3 STORAGE TANK

Based on the design of a 30 m³ vertical cylindrical liquid hydrogen storage tank, a two-dimensional CFD model was established and simulated using ANSYS FLUENT. The initial filling rate of liquid hydrogen in the tank is 50%, and the initial state of fluid is set to 0.33MPa and 25K. In the CFD model, hydrogen is the working fluid which is assumed to be an ideal gas. Assuming that the liquid and gas are in phase equilibrium, the temperature at the interface is equal to the saturation temperature corresponding to the tank pressure.

Multiple operating conditions of the liquid hydrogen storage tank are evaluated, including: (1) without active cooling, (2)

cooled by a liquid nitrogen radiation shield, (3) directly cooled by a refrigerator, and (4) cooled via an auxiliary tank with circulation.

Figure 2 illustrates the gas flow velocity distribution and gas-liquid distribution in the storage tank without active cooling. Evaporation of liquid hydrogen occurs preferentially near the tank wall, leading to a local decrease in density. The resulting low-density vapor rises and flows toward the gas-liquid interface, where it converges at the center of the tank, inducing interfacial instability and tumbling.

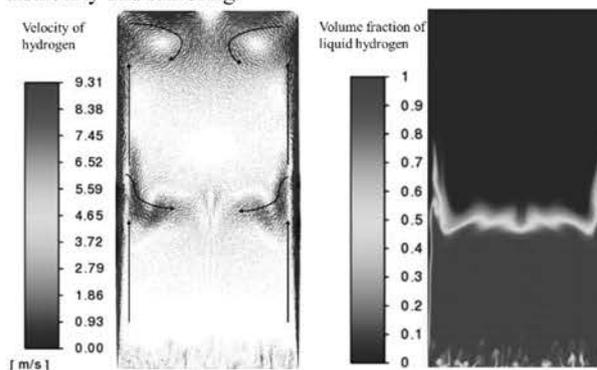


Fig 2 The phenomenon of liquid hydrogen tumbling

4 LIQUID HYDROGEN PUMP

An external liquid hydrogen pump is employed in the system. The pump is filled with liquid hydrogen, while its outer shell is exposed to ambient temperature, resulting in non-negligible heat leakage. Theoretical analysis estimates a static heat leakage of 34.96 W due to radiation and conduction, corresponding to a hydrogen evaporation rate of approximately 0.3 kg/h. A 3D heat conduction model of the pump was established to verify the accuracy of the theoretical calculations. Structural optimization strategies are proposed to reduce static heat leakage, including increasing the length of the piston and cylinder, and modifying the support structure of the pump chamber, provided that mechanical constraints allow.

5 RECONDENSATION SYSTEM

A high-capacity 100W@25 K GM-type pulse tube refrigerator is under development. Heat transfer fins were designed at the cold heat exchanger of the refrigerator to enhance the contact area with evaporated hydrogen gas. Initial dimensions design of the heat exchanger was conducted through iterative calculations. Subsequently, CFD numerical simulations were conducted to investigate the effect of temperature differences induced by liquid film thickness on heat transfer performance.

6 CONCLUSION

The ZBO system with an auxiliary storage tank is introduced and analyzed. It demonstrates improved pressure control of the main tank, while the risk of liquid hydrogen tumbling is reduced by introducing the backflow from the side of the tank.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is supported by the National Key Research and Development Program of China under the contract No. 2022YFB4002802.

JTバルブレス 4K JT 冷凍機の実験的検討

Experimental investigation of the JT valveless 4K JT refrigerator

李遠鑑, 朱紹偉 (同濟大学)
 Li Yuanjian, Zhu Shaowei (Tongji University)
 E-mail: sw_zhu@163.com

1. INTRODUCTION

Compared to 4K GM refrigerators, 4K Joule-Thomson (JT) refrigerators demonstrate significantly higher efficiency, which is preferred in various application. However, 4K JT refrigerators still face inherent reliability issues due to the risk of flow blockages caused by solidified impurities in low temperature. In a JT valveless 4K JT refrigerator, pressure drop occurs in the high pressure channel of the last stage counterflow heat exchanger, rather than JT valve, by utilizing the unique thermodynamic properties of helium near its critical point^[1]. To confirm this phenomenon, a JT valveless 4K JT refrigerator is made and tested.

2. STRUCTURE

As shown in Figure 1, the JT valveless 4K JT refrigerator includes a GM refrigerator as the precooling refrigerator, a helium tank as the gas source, the first stage counterflow heat exchanger(CHEX1), the first stage precooling heat exchanger (PHEX1), the second stage counterflow heat exchanger (CHEX2), the second stage precooling heat exchanger (PHEX2), and the last stage counterflow heat exchanger(CHEX3). The high pressure channel of the last stage counterflow heat exchanger consists of four capillary tubes to make enough pressure drop and reduce the risk of flow blockages.

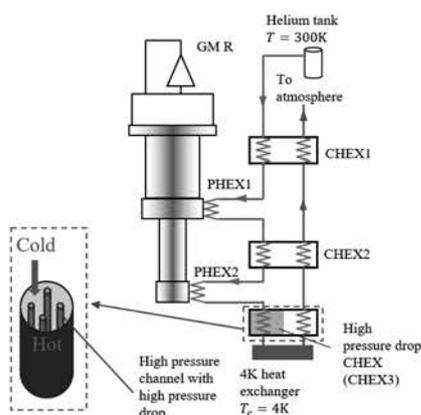


Figure 1. Schematic of JT valveless 4K JT refrigerator and the last stage counterflow heat exchanger

3. SIMULATION

The one-dimension simulation of the last stage counterflow heat exchanger is conducted by MATLAB with the helium properties provided by REFPROP. The result shows the effect of high pressure, precooling temperature and capillary inner diameters on the cooling capacity. When the cooling temperature is set to 4.4 K, and the inner diameter of the capillary tube is 0.2 mm, the cooling capacity increases with rising high-side pressure and decreasing pre-cooling temperature. A maximum cooling capacity of 0.66 W is obtained with a 0.2 mm capillary. Considering both cooling performance and system constraints, a capillary inner diameter of 0.2 mm was selected for subsequent experiments.

4. EXPERIMENTAL SETUP

The diameters of counterflow heat exchangers and the photo of the JT valveless 4K JT refrigerator were shown in Table 1 and Figure 2, respectively. All the heat exchangers are tube-in-tube type made of copper, except the inner tubes of CHEX3(High

pressure drop heat exchanger), which is made of stainless steel.

Table 1. Diameters of heat exchangers

Heat exchangers	Inner tube	Outer tube
CHEX1	2mm/3mm	5mm/6mm
CHEX2	2mm/3mm	5mm/6mm
CHEX3(High pressure drop heat exchanger)	0.2mm/0.4mm	1.5mm/2.5mm

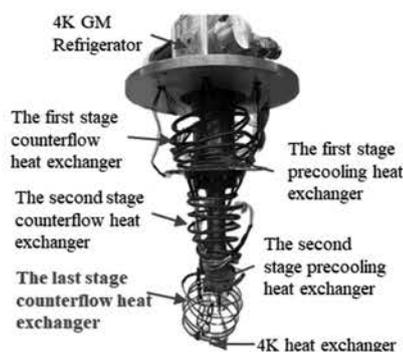


Figure 2. Photo of JT valveless 4K JT refrigerator

5. RESULTS

Figure 3 shows the effect of high pressure, precooling temperature and cooling capacity on the refrigeration temperature. The influence of high pressure and precooling temperature on the refrigeration temperature is not obvious. However, as the cooling capacity increases, the refrigeration temperature rises. A maximum cooling capacity of 0.28 W@4.9 K at 8K of precooling temperature and 1.4MPa of high pressure was achieved. When the cooling capacity exceeded 0.28W, the system experienced abrupt instability, which is consistent with conventional 4K JT refrigerators with JT valves.

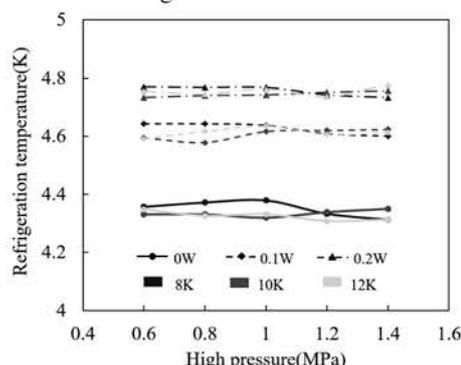


Figure 3. Change of refrigeration temperature with high pressure, precooling temperature and cooling capacity

6. CONCLUSIONS

A JT valveless 4K JT refrigerator is experimentally investigated, verifying its feasibility. It is confirmed that the JT valve of 4K JT refrigerators can be eliminated.

REFERENCE

- [1] Zhu S.: JT valve less JT refrigerator, 第 96 回 2018 年度春季低温工学超電導学会. 2018: 102.

パルスチューブ冷凍機シミュレーションと冷媒測定による精度考察

Study of the accuracy of PTR simulation results by measuring the refrigerant gas

西尾 樹, 藤原 裕也, 森平 淳志(株式会社 アルバック)
 Nishio Tatsuki, Fujiwara Yuya, Morihira Atsushi (Ulvac, Inc.)
 E-mail: tatsuki_nishio@ulvac.com

1. はじめに

製品開発効率の向上を目的に、小型冷凍機でもシミュレーションを用いた開発事例が増えている。株式会社アルバックでもパルスチューブ冷凍機の開発で、数値解析技術を強化してきた。その取り組みの一つとして小型冷凍機シミュレーターとして実績がある Gedeon Associates 社の Sage を用いて、開発機のシミュレーションを実施するとともに、その確かさを検証した。検証手法として、これまで困難とされてきた往復流・極低温環境(4K 以下)における冷媒の圧力・温度・流量の測定を実現するシステムを開発した。これにより PV 仕事などを可視化した。これら冷媒測定から、シミュレーターの確かさを検証・考察した結果を報告する。

2. シミュレーションと冷媒測定概要

■シミュレーション概要

今回 Sage を用いて、開発機 2 機種を対象に圧縮機・バルブユニット・冷凍機本体をモデル化したシミュレーションを実施した。1 段ステージ温度 45 K 時の基準冷凍能力を満たすことを制約条件に流量を調整し、2 段冷凍能力@4.2 K の最大値を求めた。また Sage は複数のパラメーターに補正係数もつが、今回はこれらをデフォルト値のまま計算を実施した。

■冷媒測定概要

試験装置を Fig. 1 に示す。開発した小型機のパルス管、ステージ等にポートを設け、圧力計、温度計、流量計を接続した。圧力計はダイヤフラム式圧力計を用いた。事前校正で温度係数を求め、極低温環境でも使用を可能とした。温度計はベアチップタイプの測温抵抗体を使用した。これは低熱容量・高応答性であり、ガス中に浮かせることでガス温度の測定を可能とした。これら圧力計・温度計は流量測定の際に密度を求めるためにも使用する。流量計には梁型の流量計を開発し、使用した。これは動圧を受けた梁のひずみから流量を換算する流量計で、安価、高応答性で往復流・極低温環境で使用できることが特徴である。産業技術総合研究所の定積槽システムにて常温の校正を、自社にて低温校正を行った。本システムにより 1 段ステージ温度 45 K、2 段ステージ温度 4.2 K 以下で、極低温冷媒の圧力、温度、流量の測定を実現した。また流量から体積変化を求めることで、PV 線図を作成することが可能となった。

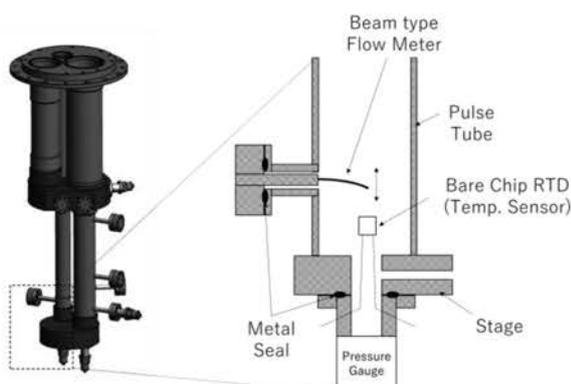


Fig. 1 冷媒測定システム

3. 実験とシミュレーション結果の比較

Table 1 に冷凍能力の実測値と解析値の比較を示す。1 段冷凍能力・2 段冷凍能力ともに両者の差異は 5% 以下となった。2 機種において良い精度で計算ができたことで、パルスチューブ冷凍機シミュレーターとしての活用が期待できる。加えて、冷媒測定システムを使用して 1 段ステージ温度 45 K、2 段ステージ温度 4.2 K とした際の冷媒圧力、温度、流量を比較した。ここでは 2 段冷凍能力の大部分を決める 2 段低温部の PV 仕事を Fig. 2 に示す。今回の開発機で採用した 4 バルブ方式では、測定値は一般的な 2 段低温部に見られる右肩下がりの楕円状の PV サイクルと傾向が一致し[1]、他に圧力、ガス温度の波形を比較しても、傾向を捉えている様子がみられた。Sage では冷凍能力だけでなく、パルスチューブ冷凍機内部で生じている現象も再現できているといえ、これが高い精度で計算できる要因と考えられる。

Table 1 冷凍能力(Cooling Power: C. P.)比較

	小型機			大型機		
	実験[W]	解析[W]	差異[%]	実験[W]	解析[W]	差異[%]
1st C.P. @ 45K	37	37.1	-0.3	32	33.0	-3.1
2nd C.P. @ 4.2K	1.44	1.37	4.9	2.00	1.95	2.5

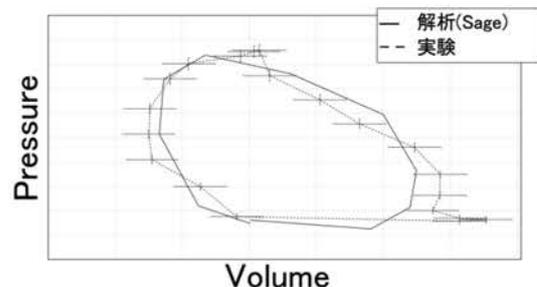


Fig. 2 2 段 PV 仕事比較

4. まとめ

今回パルスチューブ冷凍機開発の取り組みとして、数値解析と冷媒測定技術を紹介するとともに、これらを用いて小型冷凍機シミュレーター Sage の計算精度の考察を実施した。冷凍能力としては実験と解析で 5% 以下の差異と良好な結果であり、PV 線図、冷媒の温度、圧力、流量についても傾向をよくとらえた結果が得られた。Sage ではパルスチューブ冷凍機内部で生じている現象を再現できていると、これが高い精度で計算できる理由と考えられる。今後は冷媒測定の精度をさらに高め、冷凍能力・損失の定量分析を実施する。計算と実測の差異の要因を解明しシミュレーションモデルにフィードバックすることで、小型冷凍機シミュレーターとして更なる精度向上を目指す。

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) の支援を受けて実施したものである。

参考文献

1. Y. Matsubara.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn), Vol. 42 No. 6 (2007)

共用イナータンスチューブパルス管冷凍機の調相バッファの実験研究

Experimental investigation of the phase shifting buffer in the shared inductance stage tube pulse tube refrigerator

ZHANG Shurui, WANG Chenguang, 朱 紹偉 (同济大学)
 ZHANG Shurui, WANG Chenguang, ZHU Shaowei (Tongji University)
 E-mail: sw_zhu@163.com

1. INTRODUCTION

The development of more reliable and efficient Stirling-type pulse tube cryocoolers (SPTCs) is essential for space exploration missions. Shared inductance tube SPTCs have demonstrated promising efficiency at low temperature, benefiting from their phase redistribution function and superior phase-shifting capability for the low-temperature stage. In this study, preliminary experiments were conducted on a shared inductance tube SPTC to validate the effect of the phase-shifting buffer on redistributing the phase shifting capability between the two stages. Two identical linear compressors were used instead of a step piston compressor to drive the cold heads. The results demonstrate that the phase-shifting buffer has a significant impact on the cryocooler's performance and serves as an effective method for phase shifting.

2. EXPERIMENTAL SETUP

Figure 1 illustrates the structure of the shared inductance tube pulse tube refrigerator. The two compressor motors are connected in series to ensure identical current, and the displacement and phase of the pistons are approximately considered the same. Phase shifting buffers are connected between the compressors and the refrigerator, functioning to redistribute the phase adjustment capacity between the two cooling stages.

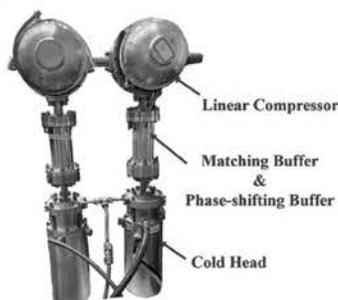


Fig.1 Shared inductance tube pulse tube refrigerator

3. EXPERIMENTAL RESULTS

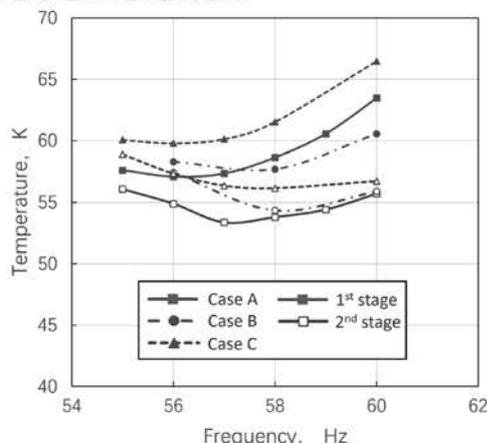


Fig.2 No load cooling temperature

In the experimental setup, the compressor was not optimally matched with the cryocooler, resulting in insufficient acoustic power delivery to the cold heads. To improve the power transfer from the compressor to the cryocooler, additional matching buffers were introduced at the interface.

There are three experimental conditions: no additional phase shifting buffer (Case A), phase shifting buffer added to the first stage (Case B), and phase shifting buffer added to the second stage (Case C). The phase-shifting buffer is integrated into the matching buffer, combining the two volumes into a single unit.

Figure 2 depicts the no-load cooling temperature of the shared inductance tube pulse tube refrigerator under varying operating frequencies and different phase shifting buffer volumes, while Figure 3 presents the cooling power. The inductance tube configured at a length of 2.15 m and an inner diameter of 6 mm.

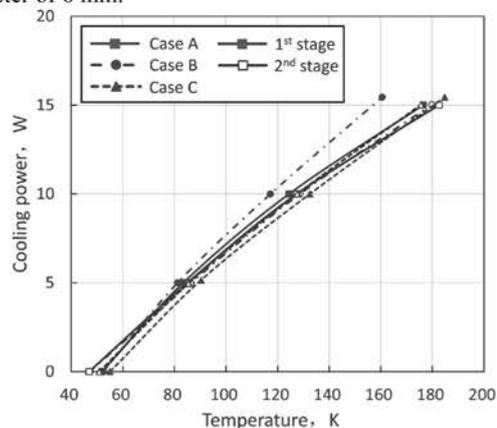


Fig.3 Cooling power

Adjusting the phase shifting buffer volume allows for aligning the optimal operating frequencies of the two stages. When the phase shifting buffer volume is zero, the first and second stages exhibit optimal operating frequencies of 56 Hz and 57 Hz, respectively. According to theoretical analysis^[1], increasing the phase shifting buffer volume at the first stage is expected to simultaneously optimize the phase shifting performance of both stages. Experimental results confirm that when a larger phase shifting buffer is implemented at the first stage, both stages exhibit an optimal operating frequency of 58 Hz. Furthermore, the cooling efficiency of the first stage is enhanced under this configuration.

Under this configuration, the cryocooler operates in an under-phase-shifted condition. Although the phase shifting buffer enables redistribution of the phase shifting capability between the two stages, it does not increase or decrease the overall phase shifting capacity of the pulse tube refrigerator.

4. CONCLUSIONS

Experimental results show that the phase shifting buffer affects both the no load temperature and the cooling efficiency of the shared inductance tube pulse tube refrigerator.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is supported by the National Key Research and Development Program of China under the contract No. 2022YFB4002802.

REFERENCE

- S. Zhu.: Abstract of 107th conference of cryogenics and superconductivity Society of Japan, 2024, p.42.
- S. Zhang, et al.: the 29th International Cryogenic Engineering Conference, 2024.

ErCo₂ 系磁性体材料用いた能動的蓄冷式磁気冷凍機の運転温度特性

Operating temperature characteristics of an active magnetic regenerative refrigerator using ErCo₂-Based Magnetic Materials

小林 大輝, 白井 毅, 石田 政義 (筑波大学); 夏目 恭平, 神谷 宏治 (NIMS)
 KOBAYASHI Daiki, SHIRAI Tsuyoshi, ISHIDA Masayoshi (ITF); NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji (NIMS)
 E-mail: s2420866@u.tsukuba.ac.jp

1. 概要

NIMS では、高い液化効率が期待される磁気冷凍による水素液化に着目し、研究を行っている[1]。我々が開発している能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMR: Active Magnetic Regenerative refrigeration) は、磁性体を超電導コイル内に出し入れすることで磁気熱量効果を得る。本講演では、新たに開発された磁性体[2]を AMR に適用し、磁性体温度を実験変数として運転温度幅の変化を報告する。

2. 実験装置

磁気冷凍は、磁性体の磁気熱量効果を利用した冷凍方式である。磁性体に磁場をかける(励磁)と、磁気モーメントが整列してエントロピーが減少し、放熱が生じる。逆に磁場を取り去る(消磁)と、磁気モーメントが無秩序となり、エントロピーが増加して吸熱が生じる。AMR は、磁性体の粒への励磁・消磁の繰り返しに同期して、粒間に熱交換ガス流を往復させることで蓄冷効果を生み出し、運転温度幅を広げる方式である。Fig.1 に AMR 実験装置の模式図を示す。AMR 実験装置は、クライオスタット、アクチュエータ、GM 冷凍機、超伝導コイル、磁性体容器、水素液化槽、熱交換器で構成されている。AMR サイクルに必要な磁場変化は、アクチュエータで磁性体を超電導コイル内外に出し入れすることによって発生させる。また磁性体は液化槽を挟んで二つ設けられ、液化槽の温度安定性の確保することや、磁気応力を相殺し、アクチュエータの負荷低減に寄与する。

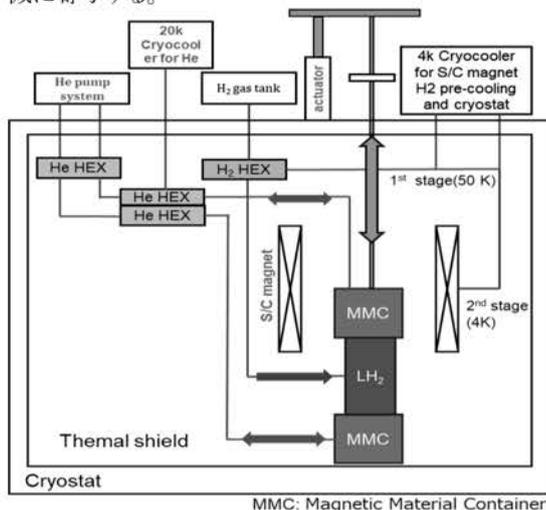


Fig.1 Schematic of AMR

4K Cryocooler の1st stage でサーマルシールド及び水素の予冷を行い、2nd stage で超伝導コイルの冷却を行う。20K Cryocooler は熱交換用 He ガスの冷却を行う。磁性体は励磁・消磁に伴い温度が上下する。励磁された磁性体には排熱する方向に熱交換ガスが流れ、消磁された磁性体には被冷却物(水素)に向かう方向に熱交換ガスが流れる。このサイクルを繰り返すことにより磁性材料内に温度差が生じ、低温側を冷熱として利用し、高温側の温度が排熱温度となる。

3. 実験方法

He ガス用熱交換器にヒーターを取り付け、ヒーターの入熱量を変化させることで He ガスの温度を調整し、磁性体の温度を変化させた。磁性体温度は運転開始前の磁性体を動かしていない時点での定常状態の温度と定義した。運転温度幅は、運転開始時間 から 500 秒後~550 秒後における冷却端温度と排熱端温度の差を運転温度幅として評価を行った。実験条件は、磁場が 3 T、熱交換ガスの流量は 3.6 g/s、ヒーターの入熱量を 0 W、4.0 W、15.6 W、24.5 W、35.4 W、47.6 W、61.6 W と変化させた。

4. 結果

Fig.2 に磁性体温度と運転温度幅の関係図を示す。磁性体温度が 13.8 K から磁性材料の転移温度である 20 K 近傍に近づくにつれて、運転温度幅は 6.5 K から 17.7 K まで増加した。しかし、磁性体温度が 21.5 K~28.2 K の範囲では、運転温度幅 18 K 程度から変化がほぼないことがわかった。当日の発表では、結果考察を含めたより詳細な内容を報告する。

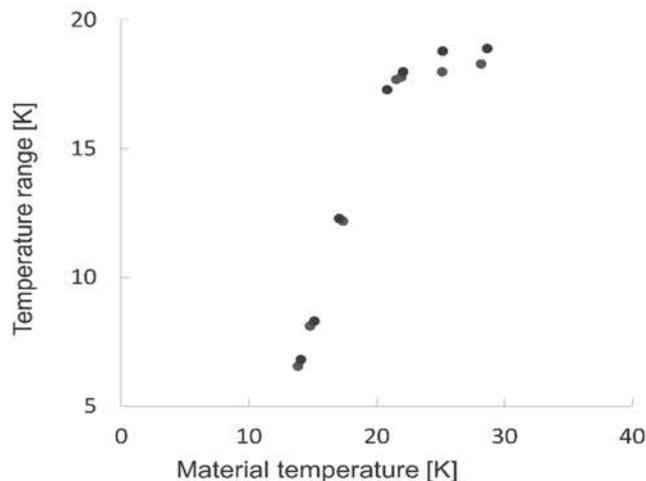


Fig.2 Relationship between magnetic temperature and operating temperature range

5. まとめと今後の方針

新規磁性体サンプルを AMR に適用した際の運転温度特性について評価を行った。今後は冷凍能力等の測定を行い、冷凍機システム効率化に向けた運転条件の検討を行いたい。

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

6. 参考文献

1. Koji Kamiya, et al.: Appl. Phys. Express 053001 (2022) p.15
2. X. Tang, et al.: nature communications, (2022), p. 1-8.

静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの予備検討(3) Pre-study on Excitation System for Static Magnetic Refrigerator (3)

脇 耕一郎, 恩地 太紀, 浮田 啓悟, 坂本 泰明, 富田 優(鉄道総研); 平野 直樹, 小野寺 優太(核融合研)
WAKI Koichiro, ONJI Taiki, UKITA Keigo, SAKAMOTO Yasuaki, TOMITA Masaru (RTRI);
HIRANO Naoki, ONODERA Yuta (NIFS)
E-mail: waki.koichiro.08@rtri.or.jp

1. はじめに

液体水素の長期間の貯蔵を果すため、20K 付近の温度域を高効率に冷却する技術が期待されている。この候補に、超電導コイルを用いた磁気冷凍技術がある[1]。この内、静止型磁気冷凍は、磁性材料への磁場変化(励・消磁)の繰返しを、超電導コイルの電流変化の繰返しで行う[2]。前々講演では、この電流変化の繰返しを、常温域コンデンサと組合せた共振によって得るように提案し、共振回路の交流抵抗を確認した[3]。前講演では、交流抵抗などに伴う損失すなわち電流の減衰を相互誘導によって補填することとした[4]。本講演では電源接続による補填を前提とし、磁気冷凍における熱交換過程を確保するために、共振中に最大電流または零電流の状態を一時保持するように検討した。

2. 電流状態の一時保持が可能な共振回路

提案する回路の構成を図 1 に示す。前々講演の共振回路(周波数 16Hz)の内、保護抵抗器を短絡線に置換した(太線で表記)。また、超電導コイルの供試体を変えずに共振周波数を低くするため、常温域コンデンサの供試体をフィルム型(容量 25mF)から電気二重層型(容量 300F)へ変更した。

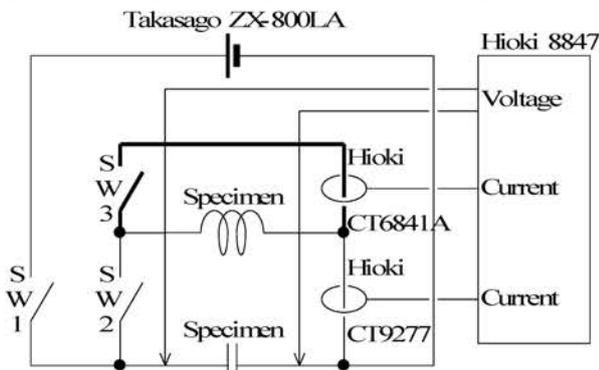


Fig.1 Composition of resonance circuit with state hold function

3. スイッチ操作による電流状態の一時保持

図 1 の回路におけるスイッチ操作の内容と目的を表 1 に示す。操作 0 によって常温域コンデンサに初期電圧を印加した後、操作 1 によって共振させた実験結果を図 2 に示す。常温域コンデンサの供試体の内部抵抗(図 1 では省略)などが大きい為、電流の減衰と位相ずれがある。操作 0~1 に続く操作 2 によって切替した結果を図 3 に示す。常温域コンデンサの供試体が無くて減衰の時定数 8s に延びた。操作 0~2 に続く操作 3 によって再び切替した結果を図 4 に示す。減衰などはあるが、共振中に最大電流の状態を一時保持することができた。

Table 1 Content and purpose of switch operation

Operation	Content	Purpose
0(1/2)	SW1:ON	Charging initially
0(2/2)	SW1:OFF	
1	SW2:ON	Starting resonance
2	SW3:ON*SW2:OFF	Exchanging currents
3	SW2:ON*SW3:OFF	Re-exchanging currents

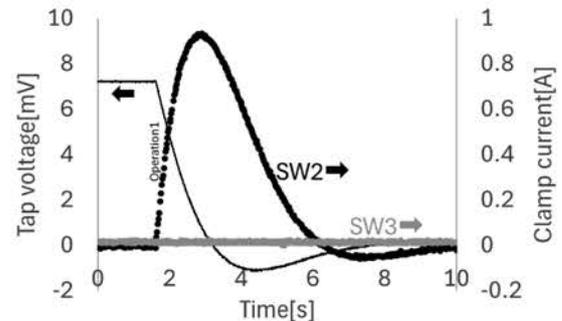


Fig.2 Experimental result up to operation 1

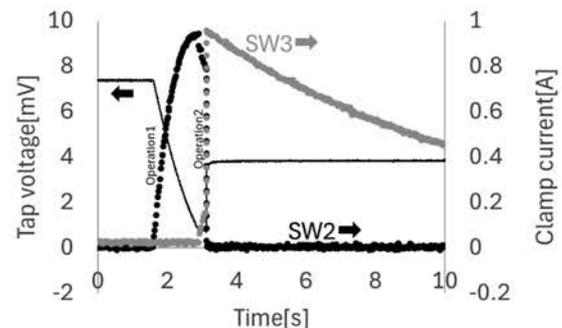


Fig.3 Experimental result up to operation 2

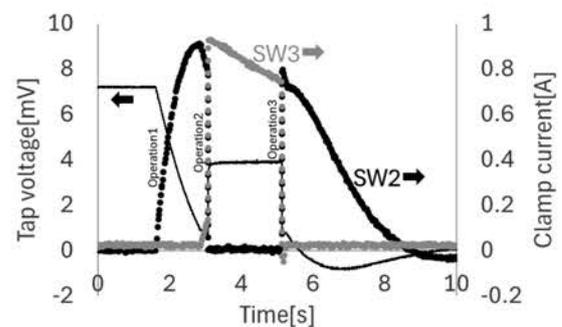


Fig.4 Experimental result up to operation 3

4. おわりに

前講演に引き続いて静止型磁気冷凍向け励・消磁システムの基本動作を確認することができた。今後は、インダクタンスの大きな超電導コイルと内部抵抗の小さな常温域コンデンサにより、電流の減衰を抑えつつ、残る損失を電源接続で補填し、電流変化の持続的な繰返しを検証していく。

参考文献

1. K. Kamiya, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 58 No. 2 (2023) 63-68
2. N. Hirano, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 No. 6 (2022) 0500105
3. K. Waki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p.48
4. K. Waki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 107 (2024) p.41

B 過剰前駆体を用いた拡散法による C ドープ MgB₂ バルクの作製

Synthesis of C-doped MgB₂ bulks by diffusion method using B-rich precursors

野尻 将太, 那須川 雄大, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー(株))
 NOJIRI Shota, NASUKAWA Yudai, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
 AKIIKE Ryo, MESUDA Masami (Tosoh Corporation)
 E-mail: c5625074@aoyama.jp

1. 緒言

MgB₂ は 2001 年に青山学院大学秋光純教授らのグループによって発見された超伝導体である。金属系超伝導体の中では最も高い臨界温度 $T_c \sim 39$ K を有し、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 での応用が期待されている。しかし、磁場印加とともに臨界電流密度 J_c が急激に低下することから、超伝導磁石などより広範な磁場発生応用に対しては磁場中 J_c の改善が MgB₂ 材料の最大の課題となっている。磁場中 J_c の改善指針として、ピンニングセンターとなる粒界の高密度化や、MgB₂ バルクへの炭素添加が有効であることが知られている。B サイトの炭素置換は T_c の低下を伴うものの不純物効果により粒界のコヒーレンス長が短縮し粒界のピン止め力が向上することから高磁場下での J_c が改善する。よって適量の炭素置換によって 10~20 K、磁場中での実用的な $J_c (> 10^5 \text{ A cm}^{-2})$ を維持する磁場領域の拡大が期待できる。MgB₂ バルクの高密度化も J_c の向上に有効であり、我々は B 過剰組成の前駆体粉末(粒径が小さい MgB₂ と B の混合物)に Mg を拡散させる部分拡散法により、緻密かつ粒界密度が高い MgB₂ バルクが得られ、主に低磁場中で 10^6 A cm^{-2} (20 K) を超える高い J_c を示すことを報告してきた。以上の背景のもと、本研究では、高密度な部分拡散 *ex-situ* 法 MgB₂ バルクに対する C ドープによる磁場中 J_c の改善を目指し、C をドープした B 過剰組成前駆体粉末を用い、様々な焼成条件で MgB₂ バルクを作製し物性を評価した。

2. 実験方法

B 過剰組成前駆体粉末はフルウチ社製の B 粉末を用い拡散法により作製した。Fig. 1 に拡散法で作製した B 過剰前駆体粉末の粉末 XRD パターンを示す。700°C, 48 h の低温長時間焼成過程の追加により、不純物 MgO が少ない粉末が得られた。MgB₂ バルクは、B 過剰前駆体粉末を SUS 管に充填し、両端に配した Mg を前駆体部に拡散させる部分拡散法で作製した。

3. 結果と考察

Fig. 2 に作製した MgB₂ バルクの J_c の磁場依存性を示す。B に対して C を 2% ドープした B 過剰組成前駆体粉末から作製した試料が、15 K、高磁場下で高い J_c を示した。また、700°C, 24 h の低温長時間焼成過程を追加し作製した C ドープ MgB₂ バルクにおいて低磁場では低温焼成過程を追加していない試料と同等の J_c を示しながらも、磁場中でより高い J_c を示した。これは低温焼成過程の追加に期待した MgO の低減効果では説明できない現象であり、微細組織の変化などを調べている。講演では C ドープ MgB₂ バルクの焼成条件の検討や、B 原料の変更によりさらなる磁場中 J_c の向上を試みた結果を報告する。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, *Nature* **410** (2001) 63-64.
 [2] 関口直希 青山学院大学 大学院理工学研究科 2023 年度修士論文

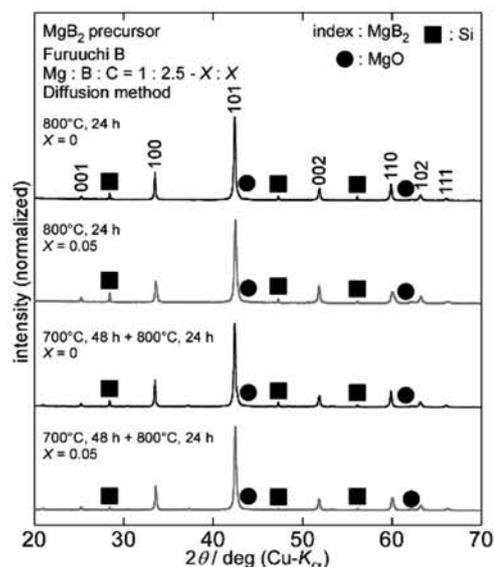


Fig. 1 Powder XRD patterns of the undoped and C-doped precursor with and without preheating process.

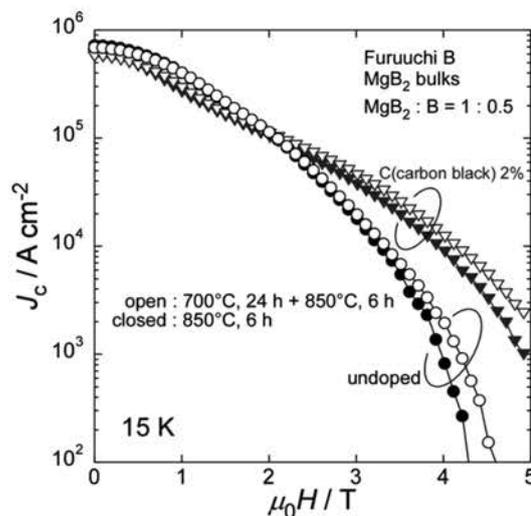


Fig. 2 J_c - H characteristics of undoped and C-doped MgB₂ bulks prepared by the diffusion method at 15 K.

Premix-PICT 拡散法 MgB₂ バルクにおける TiB₂ 添加効果

Effects of TiB₂ addition for bulks prepared by Premix-PICT diffusion method

那須川雄大, 野尻将太, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 秋池 良, 召田 雅実 (東ソー(株))
 NASUKAWA Yudai, NOZIRI Syota, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

AKIIKE Ryo, MESUDA Masami (Tosoh Corporation)

E-mail: c5625072@aoyama.jp

1. 結言

MgB₂は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度 $T_c \sim 39$ K を有し、化学的に安定で合成が容易、かつ原料が比較的安価であることから、液体ヘリウムフリーの冷凍機冷却による 10-20 K での応用が期待されている。しかし、MgB₂は磁場の増大とともに臨界電流密度 J_c が急激に低下するという課題があり、これを改善することで医療用高分解能 MRI などより広範な応用が可能になる。多結晶 MgB₂ 材料の磁場中 J_c の改善には MgB₂ の主なピンニングセンターである粒界の高密度化が有効であり、具体的には緻密かつ粒径の小さい MgB₂ 結晶からなる組織の形成が望ましい。MgB₂ 結晶の成長抑制による粒界密度の向上には、微細な原料 B 粉末の使用^[1]や、Ti、Zr、Hf などの金属添加^[2]が有効であることが報告されている。以上の背景のもと、本研究では、開発中の B 原料を用い、高臨界電流特性を有する MgB₂ バルクの作製を目指している。MgB₂ バルクの作製では Premix 拡散法により高密度化を図り、大きさの異なる 2 種類の原料 B 粉末を用い、さらに TiB₂ の添加により MgB₂ 結晶の成長抑制を狙った。また、低温前熱処理過程を追加することによる共存 MgO の低減による J_c の改善を試みた。

2. 実験方法

MgB₂ バルクは MgB₂ 粉末と B 粉末(フルウチ化学社製、粒径 $\sim 1 \mu\text{m}$ もしくは開発中の粒径 $\sim 0.1 \mu\text{m}$)の混合粉末に外部から Mg 粉末を拡散させる Premix-PICT 拡散法により作製した。拡散前の前駆体は B : MgB₂ : TiB₂ = 2 : 1 : X のモル比となるように秤量、混合し、SUS316 管に所定量の粗い Mg 粒とともに封入、 ~ 2 GPa の中間一軸プレスを施した後、石英管封管内で焼成した。構成相の同定は粉末 X 線回折、微細組織は SEM 観察、超伝導特性評価は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。 J_c は磁化ヒステリシス幅から拡張 Bean モデルを用いて算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に粒径 $\sim 1 \mu\text{m}$ のフルウチ化学社製 B 粉末を原料とし、700°C、48 h の前熱処理の後、850°C で 9 h 焼成することにより得られた TiB₂ 添加 MgB₂ バルクの 15 K における J_c の磁場依存性を示す。TiB₂ 無添加試料と比べ TiB₂ を数%ドープした試料は全磁場下で高い J_c を示した。Fig. 2 に粒径 $\sim 0.1 \mu\text{m}$ の微細な B を用い、熱処理条件を変えて作製した $X = 0$, 0.036 の試料の 15 K におけるピン力密度(F_p)の磁場依存性を示す。低温前熱処理後に 850°C で 9 h 焼成した $X = 0.036$ の試料は最も高い F_p を示した一方、850°C で 12 h 焼成した試料では TiB₂ 添加により F_p が低下した。講演では TiB₂ 添加試料

に対する焼成条件のさらなる最適化の試みについて、微細組織の変化と併せて報告する。

参考文献

- [1] Y. Katsura *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **43** (2006) 119-122.
 [2] D. Goto *et al.*, *Physica C* 392-396 (2003) 272-275.

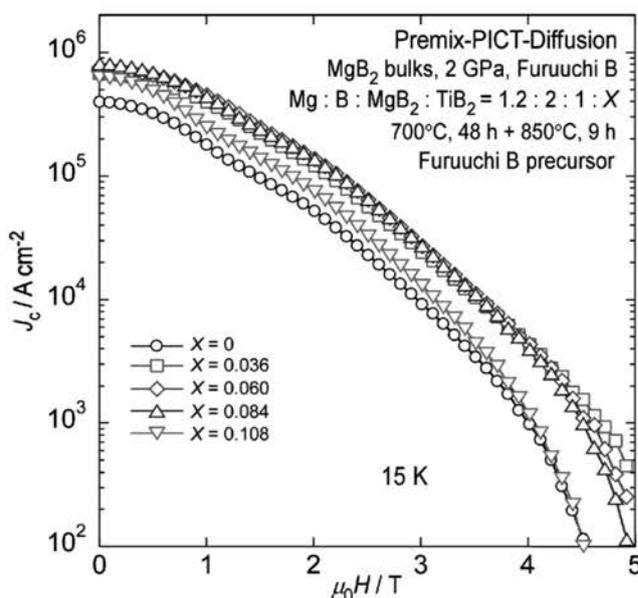


Fig. 1 J_c - H curves at 15 K of MgB₂ bulks with various TiB₂ doping levels

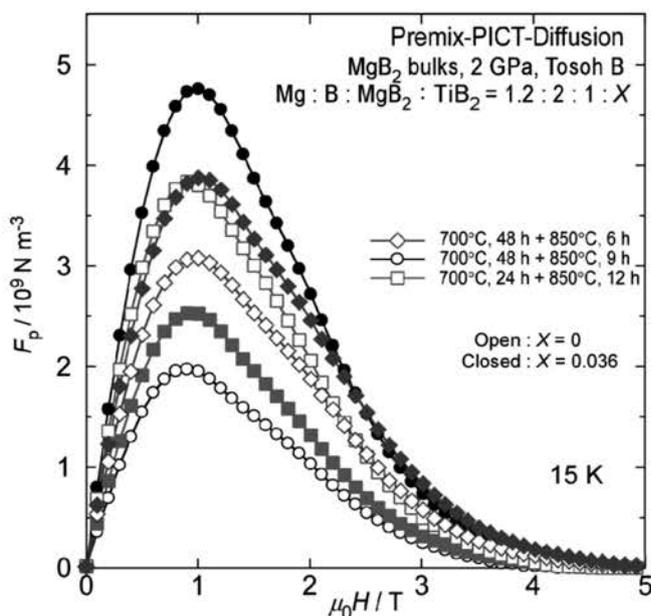


Fig. 2 Dependence of pinning force density on external field of undoped and TiB₂-doped MgB₂ bulks at 15 K.

MgB₂ 線材において鉄シースの結晶粒径が応力ひずみ曲線に与える影響

Effect of the grain size of the iron sheath on the stress-strain curve in MgB₂ wire.

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立),
菅野 未知央, (KEK), 西島 元, 松本 明善(NIMS)

TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi),
SUGANO Michinaka (KEK), NISHIJIMA Gen, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂ 線材の応用を広げていくうえで熱処理後の室温におけるひずみ耐性の把握・改善が重要である。前回の報告で、室温での MgB₂ 線材の不可逆ひずみが、熱処理温度から室温への冷却に伴い MgB₂ フィラメントに加わる残留圧縮熱ひずみでおおよそ推定できることを示した[1]。一方で、MgB₂ 線材の応力ひずみ曲線では実測と推定との乖離があった。特に鉄シースの降伏点における乖離が大きく、MgB₂ 線材のひずみ耐性の予測精度向上には、鉄シース降伏応力の結晶粒径依存性を考慮する必要があると考えている。本報告では、熱処理時間が異なる MgB₂ 線材を対象とし、応力ひずみ曲線および鉄シースの結晶粒径に関する検討結果を報告する。

2. 応力ひずみ曲線の熱処理時間での比較

Fig.1 に 600°C×12 時間, 48 時間または 96 時間で熱処理した MgB₂ 線材の応力ひずみ曲線を示す[2]。実線が実測線, 破線が推定線であり, ひずみ速度は 1-2 (10⁻⁶ sec⁻¹) である。推定方法は参考文献[2]に詳しい。鉄の降伏点が明確な 12 時間熱処理の結果に着目すると, 実測のほうが高い応力・ひずみで鉄が降伏している。

本 MgB₂ 線材の構成金属である鉄, 銅, モネルに対し, 熱処理温度 600°C は焼鈍温度として有効なため, 熱処理時間の最も短い 12 時間でも線材の内部応力は十分に緩和されると考えられる。よって 600°C から室温へ冷却した後の MgB₂ 線材において, 各構成金属および MgB₂ フィラメントの残留ひずみには, 熱処理時間の長短は影響しない。つまり Fig.1 に示した鉄の降伏ひずみにおける実測と推定との差の要因は, 実測に用いた MgB₂ 線材中の鉄シースと, この鉄シースの特性推定のために別途応力ひずみ曲線を評価した鉄線とで, 降伏ひずみが異なるためと考えている。ここで Fig.2 に鉄線で測定した応力ひずみ曲線を示す[2]。ひずみ速度は Fig.1 と同一である。これらの鉄線は 96% の減面加工の後に 600°C で熱処理したものであり, 熱処理時間を 12 時間から 96 時間へと長くするほど, 降伏点が低下したことが確認できる。熱処理の長時間化により, 鉄の再結晶化が進んだためと考えられる。

3. 鉄の結晶粒径と降伏点

Fig.3 に示す鉄の下降伏応力の粒径依存性は, 参考文献[3]から, 評価温度 290 K, ひずみ速度 10⁻⁶ sec⁻¹ の値を再描画したものである。粒径が小さいほど降伏応力が高く, このグラフから Fig.2 に示した鉄線中の粒径は 10~12 μm と推測される。

Fig.4 に 600°C×12 時間で熱処理した(a)MgB₂ 線材と(b)鉄線の光学顕微鏡による断面写真を示す[2]。これらは化学エッチングにより鉄の粒界を強調したものである。粒界が一部不鮮明であるが, 応力ひずみ曲線の推定に用いた(b)鉄線の粒径よりも(a)MgB₂ 線材の粒径が小さく, 降伏応力・ひずみが比較的高いことが推測される。(a)MgB₂ 線材では粒径 10 μm 未満のものも多数存在し, Fig. 3 から, 鉄シースの降伏応力が 300 MPa を超えると推測される。詳細検討結果などは当日報告する。

参考文献

1. H. Tanaka, et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.107 (2024) p.89
2. H. Tanaka, et al. : SuST. 38 (2024) 015019
3. S. Sakui, et al. : Tetsu-to-Hagane 58 (1972) 1438-55

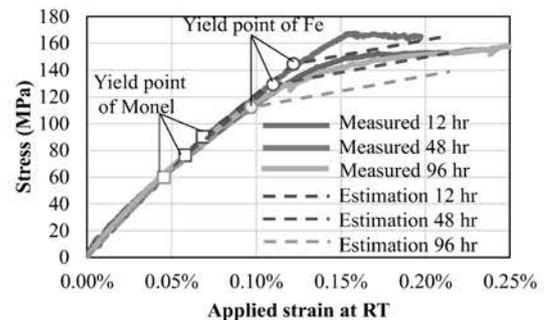


Fig.1 Comparison of measured and estimated stress-strain curves of MgB₂ wires sintered by 600°C[2].

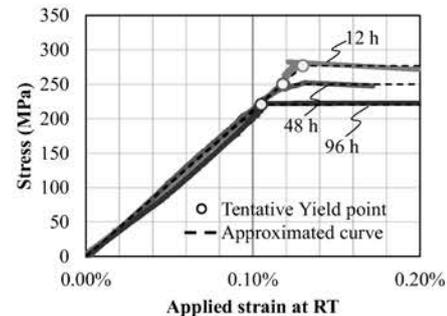


Fig.2 Stress-strain curves of Fe wires sintered by 600°C[2].

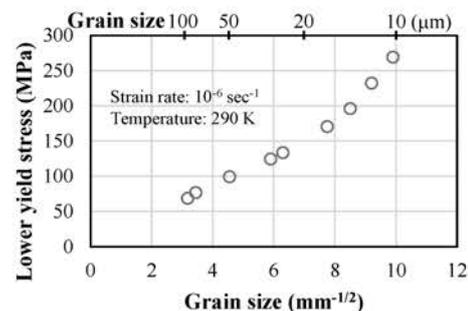


Fig.3 Grain size dependency on lower yield strain of Fe[3].

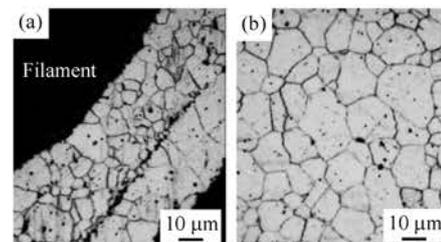


Fig.4 Optical microscopic images of (a) MgB₂ wire and (b) Fe wire sintered by 600°C for 12 h[2].

MgB₂線材を用いた液体水素用液面センサーの高性能化に関する研究

Study on high performance of liquid hydrogen level sensor using MgB₂ wires

中川 陽介, 武田 実, 前川 一真 (神戸大), 福本 祥一, 高田 芳宏 (山本電機製作所)

NAKAGAWA Yosuke, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.), FUKUMOTO Shoichi, TAKADA Yoshihiro (Yamamoto Electric Works Co., Ltd)

E-mail: 247w525w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

化石燃料に替わるクリーンエネルギーとして、近年水素が注目されている。水素は、燃焼時に二酸化炭素を排出しないため、地球温暖化対策として重要な役割を果たすことができる。水素を貯蔵・輸送する際には、体積の小さい液体水素がキャリアーとして運用されるが、液体水素用に開発された高精度な液面センサーは少ない。そこで我々は、より高精度な液面センサーとして超伝導MgB₂線材を用いた液体水素用液面センサーの研究開発を行っている[1]。センサーの高性能化を目指し、MgB₂線材の詳細な超伝導特性を調べるため、引張応力や添加物の有無がその特性に与える影響を調べた。得られた結果について、報告する。

2. 引張応力が超伝導特性に与える影響

低温環境下では、線材に引張応力が働く場合がある。しかし、MgB₂線材の超伝導特性と引張応力の関係については、十分に解明されていない。そこで、常温下でMgB₂線材に引張応力を加えた後、超伝導特性を調べ、超伝導特性と引張応力の関係を調べた。実験結果をTable.1、Fig.1、Fig.2に示す。使用したMgB₂線材には、粒径325meshのマグネシウム粉末(Oakwood Chemical製)を用いた。Fig.1は粒径40 μ mのホウ素粉末(Nilaco製)を、Fig.2は粒径0.3 μ mのホウ素粉末(Pavezyum製)を使用した結果である。両図から、引張応力が大きくなるほど超伝導転移温度(T_c)は低下し、超伝導転移温度幅(ΔT_c)は増加する傾向があると分かった。またFig.1において、13N以上加えた場合では抵抗値が0にならず、常伝導時の抵抗値が上昇するという結果が得られた。一方でFig.2では、15N加えた場合でも抵抗値が0まで低下した。

Table.1 Superconducting properties of samples.

Stress	Boron Nilaco(40 μ m)		Pavezyum(0.3 μ m)	
	T_c [K]	ΔT_c [K]	T_c [K]	ΔT_c [K]
10N	31.97	2.71	37.84	0.91
11N	31.63	2.76	35.62	2.06
12N	31.57	2.78	35.18	1.95
13N	31.43	4.37	35.82	1.62
14N	31.53	3.40		
15N	31.15	3.75	35.27	3.12

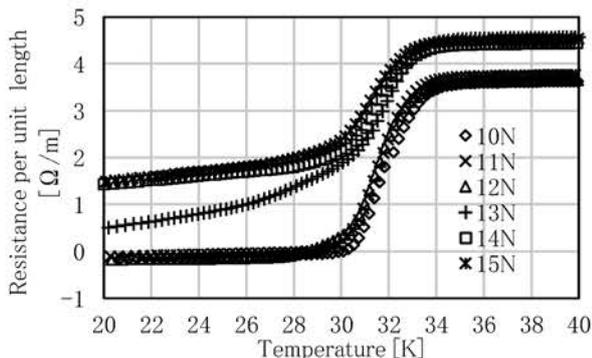


Fig.1 Superconducting properties of MgB₂ wire (Nilaco) under tensile stress.

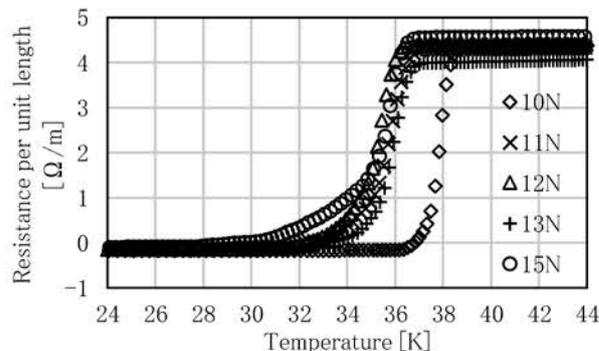


Fig.2 Superconducting properties of MgB₂ wire (Pavezyum) under tensile stress.

3. 添加物の有無による超伝導特性の違い

先行研究ではMgB₂線材の T_c を液体水素の沸点に近づけるために、異なる粒径のホウ素と、添加物としてSiCをモル比10%で添加して線材を作製した。その超伝導特性を調べた結果、ホウ素の粒径が大きいほど T_c が低下することが分かった。そこで、その要因を明らかにするため、SiCを加えずMgB₂線材を作製し、超伝導特性の比較を行った。この線材にはマグネシウムは粒径325meshを使い、ホウ素は粒径10 μ mの粉末を使用した。結果をFig.3に示す。SiCを添加していない線材は添加した線材と比べ、 T_c が上昇し、常伝導時の抵抗値が低下することが分かった。

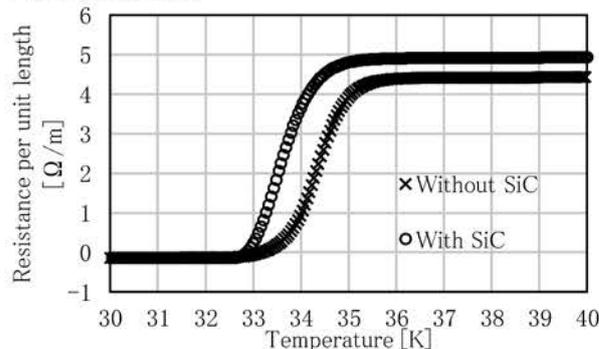


Fig.3 Comparison between superconducting properties of MgB₂ wire with SiC and that of MgB₂ wire without SiC.

4. まとめと今後の課題

本研究により、引張応力や添加物の有無がMgB₂線材の超伝導特性に影響を与えることが明らかとなった。今後は、異なる粒径のホウ素粉末を用いたMgB₂線材についても引張試験を行い、引張応力と超伝導特性の関係をさらに詳細に検討する必要がある。また、線材の断面観察および成分分析を通じて、添加物が内部構造や超伝導特性に及ぼす影響を明らかにすることを課題とする。

参考文献

1.T. Oshima, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 106 (2023) p88.

希土類系超電導線材を複数枚積層した超電導複合導体の電流輸送特性評価

Analysis and Measurement of Current Transport Characteristics for Compositated REBCO Superconducting Conductors

宇都宮 銀汰, 阿部 信吾, 高橋 正希, 田代 理一郎, 井上 昌睦(福岡工大)

UTSUNOMIYA Ginta, ABE Singo, TAKAHASHI Masaki, TASHIRO Riichiro, INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)

E-mail: mem24102@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

超電導線材と銅やアルミニウムなどの低抵抗材料から成る超電導複合導体は、超電導回転機や高磁場マグネットなどの大電流機器用に開発されている。希土類系超電導線材を複数枚積層した複合導体では、導体内に絶縁中間層が存在するため超電導層への電流流入は複雑な経路を辿ることとなる。

本研究では、2枚または4枚の希土類系超電導線材を積層した複合導体の電流の流れと電圧発生との関係を明らかにすることを目的として実験及び有限要素解析を行ったので、その結果について報告を行う。

2. 実験方法

本研究では、Super Power社の厚み $1\mu\text{m}$ のREBCO膜を有する幅 2mm ×長さ 50mm の超電導線材を用いて複合導体を作製し、通電測定を行った。まず、線材2枚から成る複合導体を2種類作製した。1つは、REBCO線材の超電導層を2枚とも電流端子側に向けた複合導体(単純複合導体)、もう1つは超電導層側を向かい合わせで貼り合わせたFace-to-Face Double Stacked (FFDS) 導体である。いずれも線材2枚を貼り合わせた後、上面に銅板を半田付けた構造となっている。Fig. 1(a)に単純複合構造及びFig. 1(b)にFFDS構造の概要図をそれぞれ示す。その後、FFDS構造2組を積層した複合導体についても通電測定を行った。電圧端子は銅板上に取り付けた。線材素線の臨界電流(I_c)は 81A である。

3. 結果及び考察

単純複合導体とFFDS複合導体の I - E 特性をFig. 2に示す。○で示す単純複合導体構造では線材1枚目の I_c である 81A を超えた 100A 付近から電圧上昇が発生し始めている。また、 10^{-2}V/m 付近でキック特性を示しながら線材2枚分に相当する I - E 特性に移移する様子が確認された。キック特性については一層目と二層目の線材間の電気抵抗によるものと考えられる。一方、□で示すFFDS導体構造では線材2枚分に相当する I_c 以上で電圧が上昇し始め、高電界側で単純複合導体構造と一致している様子が確認された。同構造ではキック特性は確認されなかった。これは一層目と二層目の線材間に絶縁中間層が存在しないためであると考えられる。また、2枚分に相当する I_c 以下では、比較的大きな線形抵抗が確認された。これは、電流端子から流入させた電流が一層目の超電導層に流れ込むまでに長い距離を必要としているためであると考えられる。

FFDS構造2組を積層した複合導体の I - E 特性をFig. 3に示す。低電流側で比較的大きな線形抵抗を示した後、 220A を超えたあたりから電界が急激に増加し、最終的に4枚の I_c に相当する特性へと収束する様子が確認できる。これは1組目から2組目のFFDS複合導体に流入する際に比較的大きな距離を必要としているためであると考えられる。

発表当日は有限要素法による電流分布解析結果を含めた詳細についても報告する。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業研究機構(NEDO)の業務委託、並びにJSPS科研費JP22H02019, JPH22H02021, 23K23289の支援により得られたものである。

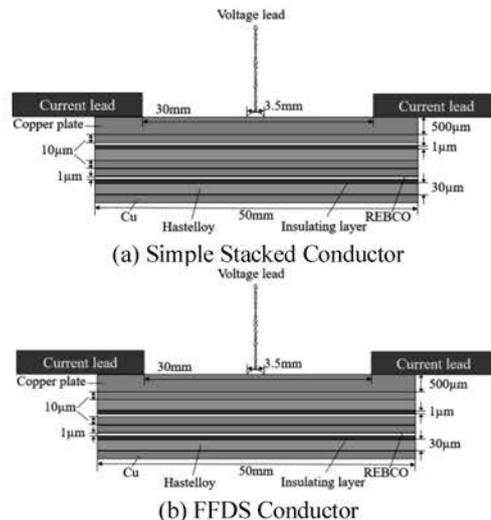


Fig. 1 Schematic of a measurement sample

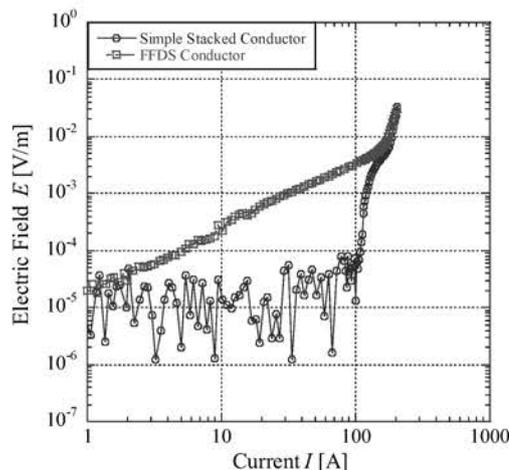


Fig. 2 I - E characteristics of the Simple Stacked Conductor and the FFDS Conductor

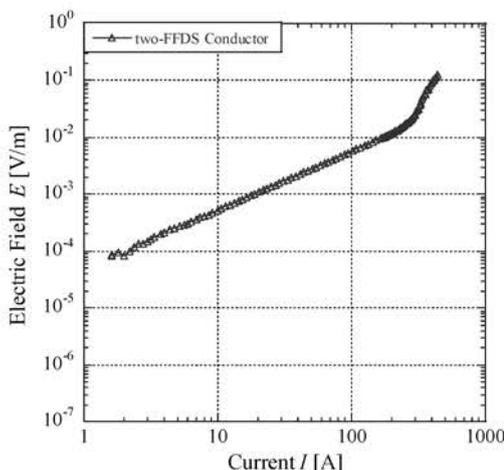


Fig. 3 I - E characteristics of the two-FFDS Conductor

超電導複合導体の広範な電界範囲にわたる通電測定と臨界電流の統計分布解析

Measurement of Current Transport Characteristics and Statistical Distribution Analysis of Critical Current for Superconducting Composite Conductors

山口 優斗, 宇都宮 銀汰, 田代 理一郎(福岡工大); 中村 武恒(京大); 井上 昌睦(福岡工大)

YAMAGUCHI Yuto, UTSUNOMIYA Ginta, TASHIRO Riichiro(Fukuoka Inst. Tech.); NAKAMURA Taketsune(Kyoto Univ.);

INOUE Masayoshi(Fukuoka Inst. Tech.)

E-mail: mem25114@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

高温超電導線材を複数枚積層させた複合導体の電流電圧 (I - V) 特性は、電流端子からの距離や線材間の接続状態の影響を受けるため、見かけ上の臨界電流 (I_c) が変化し、導体本来の I_c を過小評価する可能性がある。本研究では、電界基準の 3 桁上の高電界領域までの I - V 測定を行う実験を 49 本の導体に対して実施し、 I_c の電界基準依存性や統計分布解析を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験方法

今回使用した線材は $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Bi2223) 超電導線材で、半田付けにより 6 枚積層させて導体を作製した。導体の外形は幅約 3 mm、厚さ約 2 mm である。

77 K、自己磁場中での Bi2223 線材 1 枚の I_c は 60~70 A^[1] であるため、6 枚積層させた導体の I_c は 360~420 A と想定される。 10^{-4} V/m の電界基準より 2 桁以上高い電界までの測定を行うために、最大 660 A 印加できる測定システムを構築した。電圧測定用の銅線は端子間距離 10 mm で銀ペーストを用いて導体に取り付け、電流端子となる銅ブロックは導体の両端を挟むかたちで固定した。

直流 4 端子法によるパルス通電を行うことによって、ノイズ低減を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に Bi 複合導体の I - V 測定の結果を示す。縦軸は電界 E に換算している。最大 652 A まで印加し、 10^{-4} V/m の電界基準から 3 桁以上にわたる広い電界領域で測定を行った。導体によってはキンク特性が見られるが、これは線材間または電流端子と導体間の接続状態や電流端子からの距離を反映した振舞いであり、高電界側で線材 6 枚分に相当する I - V 特性に概ね収束していることから、線材そのものの特性ではないと考えられる。

Fig. 1 の I - E 特性について、 10^{-4} V/m で定めた臨界電流値の統計分布を Fig. 2(a) に示す。統計分布から 300 A 未満の I_c を示す導体があることがわかるが、Fig. 1 でキンクを示した導体の I_c だと確認できる。そこで、2 桁高い 10^{-2} V/m を基準としたときの臨界電流値の統計分布を作成した。その結果を Fig. 2(b) に示す。(a) と比較すると分布がシャープになっており、低い I_c を示していた導体の本数は減っている。(b) において、360 A 未満の I_c を示す導体の I - V 特性を確認したところ、数本分にしか電流が流れていない振舞いであったことから、線材の劣化や折損が生じていることが考えられる。

次にガウス分布による解析を行った。(a) 図では 390 A を、(b) 図では 540 A を中心にそれぞれ ± 90 A をデータ範囲として解析した結果を図中に実線で示した。標準偏差/平均値はそれぞれ 0.099, 0.064 であり、キンク特性を含む (a) の方が見かけ上分布が広がることが確認された。以上より、導体の I_c を評価する際には、ある程度広い電界範囲にわたる測定を行わなければ、導体本来の I_c を過小評価することになる可能性があると考えられる。

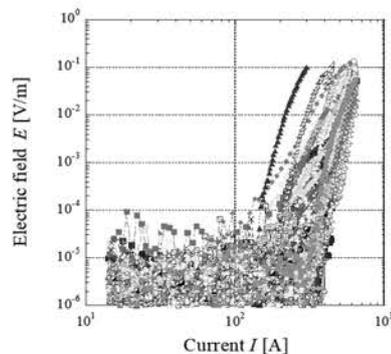
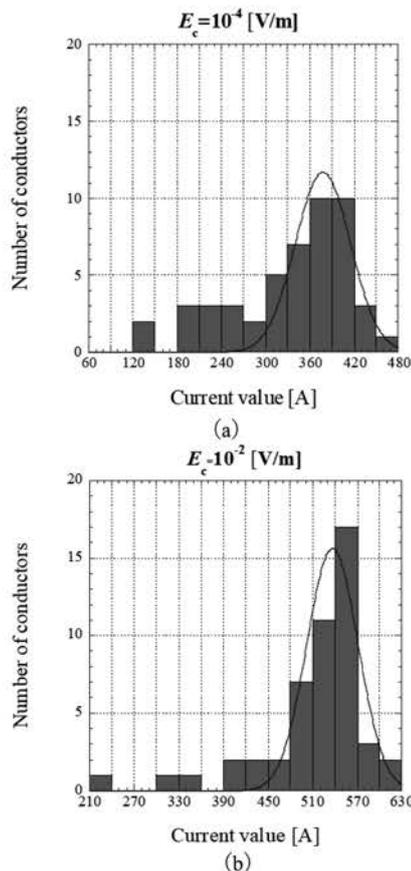
Fig. 1 I - E characteristic for 49 composite conductors

Fig. 2 Statistical distribution and gaussian distribution of critical current values

謝辞

本研究の成果の一部は、JSPS 科研費 JP22H02021, JP22H02019, 23K23289 の支援により得られたものである。

参考文献

1. G. Hasebe, *J. Japan. Inst. Met. Mater* Vol. 80 (2016) 397

TFA-MOD 法により作製した人工ピンニングセンター導入型 希土類系高温超電導線材の磁場中臨界電流特性

In-field Critical Current Characteristics of REBCO Coated Conductor with Artificial Pinning Centers Fabricated by TFA-MOD Method

高城 凜, 隠崎 遼河, 関戸 真矢, 田代 理一郎(福岡工大); 小山田 拓真, 佐藤 迪夫, 塩原 敬(SWCC);
土屋 雄司, 淡路 智(東北大); 井上 昌睦(福岡工大)

TAKAJO Rin, KAKUREZAKI Ryoga, SEKITO Shinya, TASHIRO Riichiro (Fukuoka Inst. Tech.);
OYAMADA Takuma, SATO Michio, SHIOHARA Kei (SWCC);

TSUCHIYA Yuji, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
E-mail: mem25108@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

トリフルオロ酢酸塩を用いた MOD (TFA-MOD) 法での $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE は希土類元素, REBCO) 線材の作製においては, 出発原料の Ba 組成比を Ba-poor とする手法が一般的である。Ba/RE=1.5 が主流となっているが, 空隙が減少する一方で, 表面に析出物が形成されてしまうことが課題となっている。そこで, Ba を少し増やし Ba/RE=1.8 にすることや, Ba/RE=1.5 と 1.8 の層を組み合わせることが検討されている。今回その組成比や組み合わせが異なる 3 種類の人工ピンニングセンター (APC) 導入型 REBCO 線材を作製し, その磁場中の臨界電流 (I_c) 特性を調べたので, その結果を報告する。

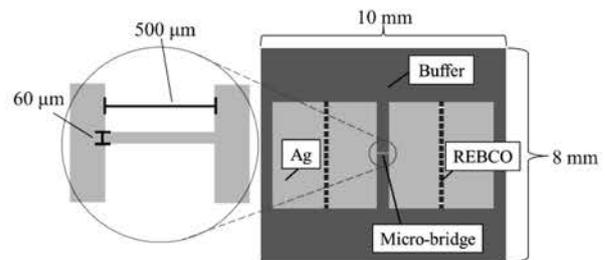


Fig. 1 Schematic diagram of the micro-bridge

2. 実験方法

本研究に使用した 3 種類の試料は, TFA-MOD 法により作製した。塗布と仮焼成を 24 回繰り返す中で, 出発原料の組成比やその組み合わせを変えている。出発原料の組み合わせと成膜後の膜厚は, Sample1 は全ての層が Ba/RE=1.5 で 1.6 μm, Sample2 は全ての層が Ba/RE=1.8 で 1.3 μm, Sample3 は初めの 6 層目のみ Ba/RE=1.5 で, 残りの 18 層に Ba/RE=1.8 を用いて 1.3 μm となった。いずれも APC として 10 mol% の BaZrO₃ を添加している。

I_c 特性の測定にあたり, 8 mm 幅の REBCO 線材を 10 mm 長に切り出し, 幅 60 μm × 長さ 500 μm のマイクロブリッジをフォトリソグラフィー及びウェットエッチングにより形成した。その概要図を Fig. 1 に示す。マイクロブリッジ加工を行った 3 つの試料に対し, 東北大学の 15 T-無冷媒型超電導マグネット (15 T-CSM) 及び He ガスフロー型クライオスタットを用いて I_c の温度・磁場・磁場印加角度依存性の測定を実施した。

3. 結果及び考察

Fig. 2 に 77 K, 3 T での I_c の磁場印加角度依存性を示す。ここで, $\theta=0^\circ$ は膜面に垂直な磁場, $\theta=90^\circ$ は膜面に平行な磁場に相当している。APC 未導入の線材 [1] と比較すると, APC を導入した 3 つの試料全てにおいて I_c 特性が向上したことが分かる。また, Sample1, 2, 3 を比較すると, 広い磁場印加角度の範囲に亘って Ba/RE=1.8 の出発原料を用いた Sample2, 3 の特性が Sample1 よりも高くなっていた。

Fig. 3 に垂直磁場中の, I_c の温度・磁場依存性を示す。同図より, 各温度の広い磁場範囲に亘って Sample2, 3 の I_c が Sample1 よりも高くなっていることが確認された。一方, 77 K, 自己磁場での I_c 値で規格化を行うと, 概ね一致していた。以上のことは, 各試料のマトリクスの特長そのものは同程度であるものの, Ba/RE=1.8 としたことにより, 不純物が減り, 有効断面積が増えていることを示唆している。

参考文献

1. K. Kimura, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25** (2015)

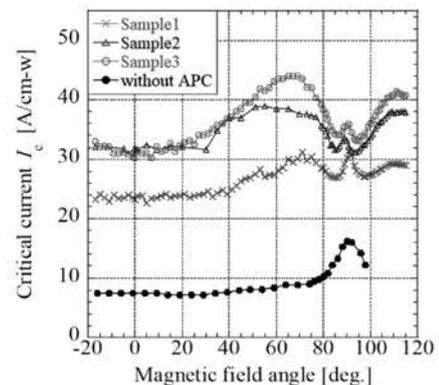


Fig. 2 Magnetic field angle dependence of critical current at 77 K, 3 T

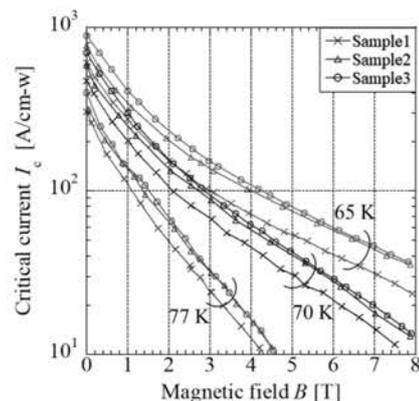


Fig. 3 Magnetic field dependence of critical current at 65 K, 70 K, and 77 K

謝辞

本研究の一部は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業研究機構 (NEDO) の業務委託, 並びに JSPS 科研費 JP22H02019, JPH22H02021, 23K23289 の支援により得られたものである。

高温超電導複合導体の電流導入部の電圧発生に関する有限要素解析

Finite Element Analysis of Voltage Generation near Current Lead in High Temperature Superconducting Composite Conductors

田代 理一郎, 安部 信吾, 宇都宮 銀汰, 高橋 正希, 井上 昌睦(福岡工大)

TASHIRO Riichiro, ABE Shingo, UTSUNOMIYA Ginta, TAKAHASHI Masaki, INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)

E-mail: mem25109@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

現在, 超電導回転機や核融合炉用高磁場マグネットなどの大電流機器応用に向け, REB_{a2}Cu₃O_y (REBCO) 線材と低抵抗材料 (Cu, Al 等) から成る高温超電導複合導体に大きな期待が寄せられている[1]。しかしこれらの複合導体では, 導体接合部等の電流導入部における局所的な発熱が課題のひとつとなっている。そこで本研究では, REBCO 線材と銅板を接合した導体モデルを作成し, 線材に接合している銅板部分へ分流している電流が原因で発生する電圧や発熱について明らかにすることを目的に有限要素解析を行ったので, その結果について報告を行う。

2. 解析方法

有限要素モデルの作成及び有限要素解析には, JSOL 社製の電磁解析ソフトウェア JMAG を使用した。

本研究では, REBCO 線材は Hastelloy 基板, 絶縁層, 超電導層, 銅安定化材から成るものを想定した。この REBCO 線材 1 枚と厚さ 100 μm の銅板を, 超電導層と銅板が向かい合うように接合してひとつの導体とした。線材と銅板の接合には, 半田や界面の抵抗を考慮した接合抵抗を用いている。また, 導体の両端から 10 mm までの位置には厚さ 1 mm の電流端子 (銅) を接合している。REBCO 線材は, 長さ 50 mm, 幅 2 mm, 厚さ 42 μm であり, 超電導層の厚さは 1 μm としている。導体モデルの概形を Fig. 1 に示す。電流端子から電流を 20 A ステップで 200 A まで通電したときの電流分布解析を行った。超電導の I - V 特性は n 値モデルにて近似した。 n 値と J_c はそれぞれ, 28 と 4.05×10^{10} A/m² と設定している。これより想定される I_c 値は 81 A となる。

3. 解析結果及び考察

得られた解析結果をもとに作成した電流電界 (I - E) 特性を Fig. 2 に示す。電圧の取得箇所は, Fig. 1 に示した E1-E5 の位置に対応しており, 全て線材に接合した銅板部分の電圧を取得している。E1-E5 はそれぞれ銅板端部から 0.75 mm, 4.75 mm, 9.75 mm, 13.75 mm, 24.75 mm の位置であり, 電圧端子間距離を 1 mm として計算している。 I_c 値 (81 A) 以下の低電界領域では, E1-E5 それぞれで線形の電気抵抗が観察された。発生電圧は, 導体中央に向かうにつれて次第に低下していき, E4 での発生電圧が E5 とほぼ一致していることから, 本モデルでは電流が完全に超電導層に流れ込むまでに約 14 mm 程の距離を要していることが分かる。

I_c 値近傍である 80 A 通電時の銅板における発熱量の長手分布を Fig. 3 に示す。図上部には電流端子と銅板の位置を表す簡易的な図を示している。Fig. 3 を見ると, 銅板部分の発熱量は, 電流端子端部から指数関数的に減少していることが分かる。これは, 電流が指数関数的に超電導層へと流れ込む様子を表している。電流密度分布及び電圧分布の詳細については, 当日報告する。

謝辞

本研究の一部は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業研究機構 (NEDO) の業務委託, 並びに JSPS 科研費 JP22H02019, JP22H02021, 23K23289 の支援により得られたものである。

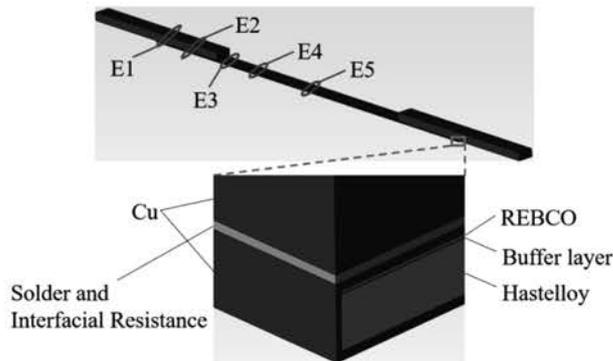


Fig. 1 Schematic diagram of the finite element model

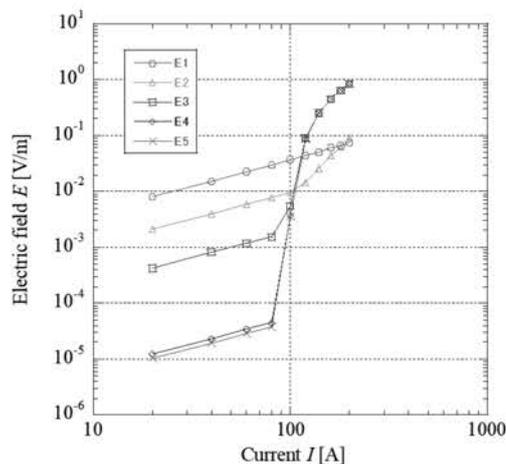


Fig. 2 Current-electric field characteristics

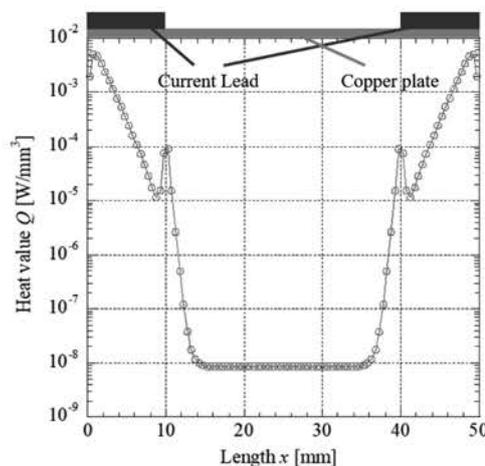


Fig. 3 Longitudinal distribution of heat generation in the copper plate as 80 A current is applied

参考文献

- [1] N. Yanagi, *et al.*, J. Plasma Fusion Res. Vol.100, No.11 (2024) p. 467

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の検討

Investigation of methods to improve the sensitivity of AC loss measurement systems using a pick-up coil method

新藤 大靖, 川畑 秋馬(鹿児島大)
SHINDO Hiroyasu, KAWABATA Shuma
E-mail: k4683662@kadai.jp

1. はじめに

本研究は、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。その結果、外部磁界印加用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で改善を図ることで、キャンセル残りを低減できることを実験的に示してきた[1, 2]。本発表では、補正コイルは使用せずに、外部磁界印加マグネット内の磁場分布の対称性の乱れの主要因であるマグネット構成コイル配置位置の設計値からのずれの影響をコイル間にスペーサを挿入することで低減し、磁場分布の対称性の改善を図った。さらに、それにより、どの程度キャンセル残りの低減を図れるかについての検討も行った。

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断面図を示す。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。これに対し、複数の補正コイルを用いてマグネット内の磁場分布の対称性の乱れの改善を図ることで、Fig. 2 に示すようにキャンセル残りを低減できる結果が得られている[1]。しかしながら、補正コイルによる対称性の改善には限界があったため、本発表では、スペーサを用いて磁場分布の対称性の改善度を調べた。

3. マグネット内の磁場分布対称性の改善の評価

Fig. 3 はマグネット構成コイルの配置図を示したものである。Fig. 3(a)はコイル配置の実測値であるが、3 対のコイル配置が対称となっていない。これに対し、Fig. 3(b)はスペーサを挿入することにより 3 対のコイル配置を対称となるようにしたものであるが、コイルの巻き乱れの影響等により、完全には対称な磁場分布とはならなかった。そこで、Fig. 3(c)はさらなる対称性が得られるようにスペーサの配置位置及び厚さの最適化を図ったものである。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。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K07435 の助成を受けたものである。

参考文献

1. N. Chikamori, et al. :Abstracts of CSJ conference, Vol.106 (2023) p.103.
2. M. Sato, et al. :Abstracts of CSJ conference, Vol.108 (2024) p.54.

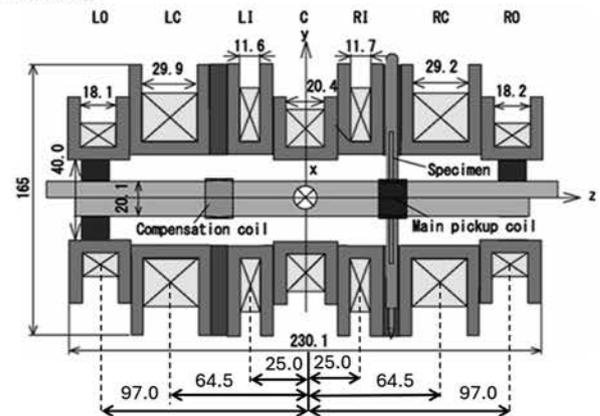


Fig. 1 Cross-sectional view of the magnet for applying external field.

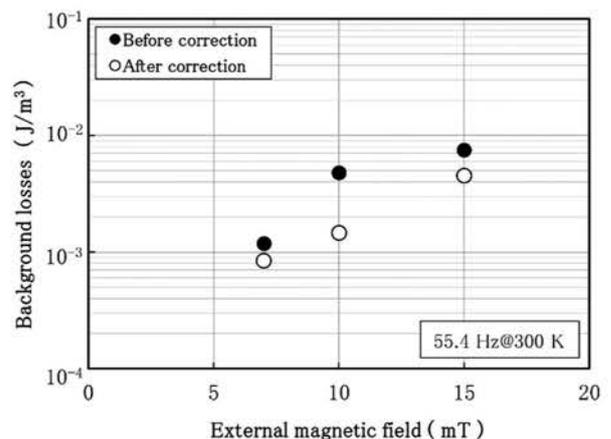


Fig. 2 Background losses before and after correction of the magnetic field distributions.

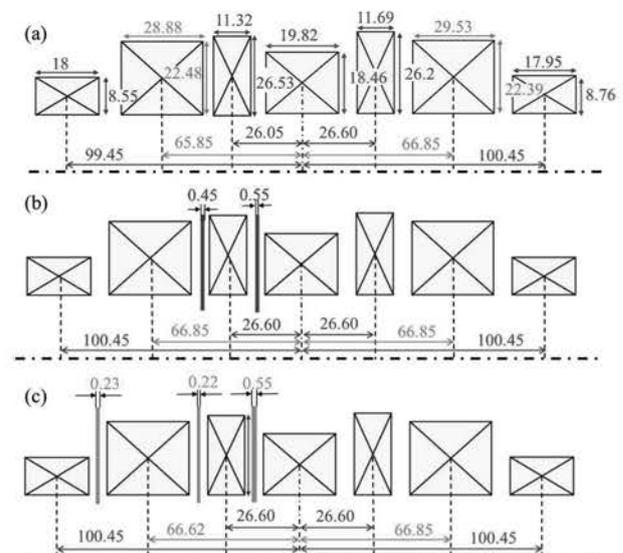


Fig. 3. Diagram of the magnet configuration coils.

非正弦波・高周波電流通電時の Bi-2223 サンプルコイルの 交流磁化曲線の測定と交流損失特性の評価

Measurement of AC magnetization curves and evaluation of AC loss characteristics of a Bi-2223 sample coil under non-sinusoidal and high frequency current flow

濱田 大夢, 岩村 周, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HAMADA Taimu, IWAMURA Shu, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k3341858@kadai.jp

1. はじめに

超伝導技術の適用領域拡大の観点から、産業応用分野への高温超伝導 (HTS) 技術の適用可能性についての検討は重要である。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使用条件では非正弦波電流で高周波成分が含まれており、この成分により HTS コイルの交流損失は増加することが予想される。我々はこれまで Bi-2223 サンプルコイルを用いて、高周波成分による交流損失増加特性について検討してきた[1]。前回の発表では、指令電流に高周波成分を重畳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の測定を行い、その結果をもとにサンプルコイルの高周波成分によるヒステリシス損失の増加特性について検討した[2]。この際、サンプルコイルの磁化信号電圧に磁束クリープによる影響と考えられる電圧変化が観測されたため、本発表では、この影響について詳細に調べ、この影響も考慮して、サンプルコイルの高周波成分によるヒステリシス損失の増加特性についての検討を行った。

2. 高周波成分による交流損失増加分についての検討

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。指令電流に高周波成分を重畳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. 1 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信号電圧のみを抽出し、磁化曲線を測定した。

蒸発法でのサンプルコイルの交流損失測定結果は、100 Hz の基本波電流に対して 5 kHz~20 kHz 程度の高周波成分を重畳した電流波形を通電したときのものであるが[1]、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。そこで本測定では、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畳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。そして、その結果をもとに、蒸発法での測定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。ところが、その際、サンプルコイルの磁化信号電圧に磁束クリープによる影響と考えられる電圧変化が観測されたため、この影響について、まず詳細に調べた。

3. サンプルコイルの磁化信号電圧と磁束クリープの影響

Fig. 2 は、フラットトップ電流値までの立ち上げ時間の異なる台形波電流をサンプルコイルに通電した際の、サンプルコイルの磁化信号電圧の時間変化を示したものである。Fig. 2(a)は通電電流波形、Fig. 2(b)はサンプルコイルの磁化信号電圧の時間変化、Fig. 2(c)はサンプルコイルの磁化信号電圧をそれぞれの最大電圧値で規格化したものである。ここで、台形波電流のフラットトップ部分では、サンプルコイルの磁化信

号電圧は零となるべきであるが、Fig. 2(b), (c)に示すように、コイル電圧が徐々に減衰する現象が見られた。この現象の要因は、磁束クリープによるものと考えられるが、立ち上がり区間においてもコイル電圧への影響が考えられるため、現在検討中である。ヒステリシス損失増加分特性についての検討も含め、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
2. H. Taimu, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 108 (2024) p. 57.

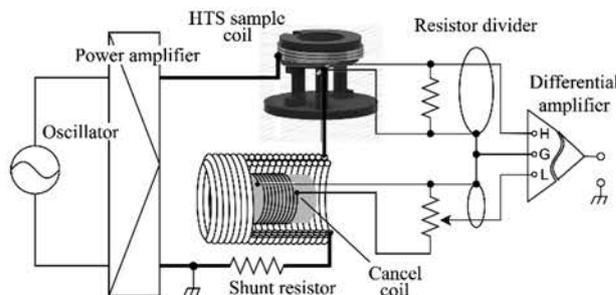


Fig. 1 Measurement circuit for AC magnetization curves.

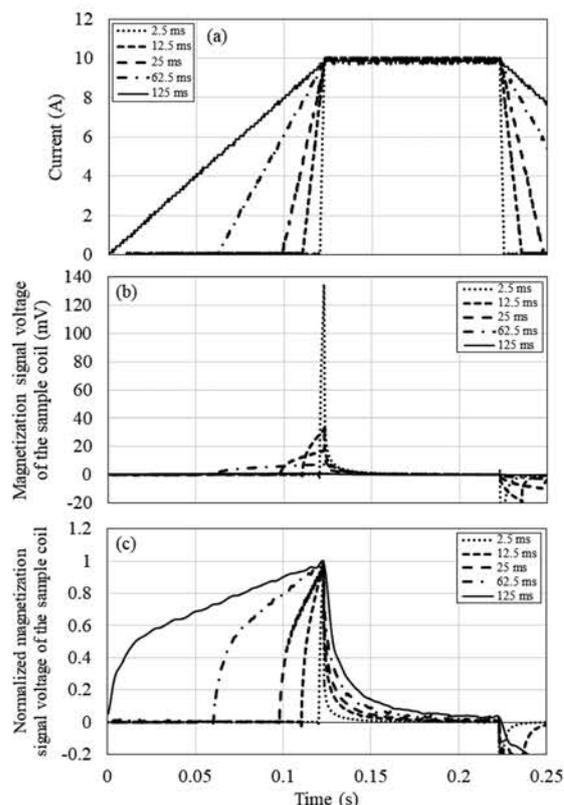


Fig. 2 Time variation of the magnetization signal voltage of the sample coil when the trapezoidal wave is energized.

深層学習を用いた超伝導材料微細構造のセマンティックセグメンテーションの検討

Semantic Segmentation of Microstructures in Superconducting Materials Deep Learning

伊藤 海音(東京農工大学); 嶋田 雄介(九州大学); 安東 昂亮, 西谷 慶輝, 石渡 翔大, 徳田 進之介, 山本 明保(東京農工大学)

ITO Mio (TUAT); SHIMADA Yusuke (Kyusyu Univ.); Ando Kosuke, NISHIYA Yoshiki, ISHIWATA Shota, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)

E-mail: s244862y@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

超伝導材料の研究において、材料微細構造のサイバー空間への展開は臨界電流性能の機序理解等へ貢献が期待される。サイバー空間での材料微細構造モデル構築には、材料微細構造画像の各画素(ピクセル)にラベルを割り当て、特定のクラスやカテゴリに分類する必要がある。この処理をセマンティックセグメンテーション(Semantic Segmentation)と呼ぶ。この処理を正確に行うためには、これまでは画像の画素 1 つ 1 つを見て解析する必要があり、膨大な時間がかかっていた。一方で、大津法[1]や Sauvola 法[2]に代表される閾値法を用いた処理では大幅な時間短縮が可能なもの、撮像時に生じるアーティファクトや微細構造の影響を受けることがあり、精度に課題があった(Fig. 1)。

我々は深層学習を用いたセマンティックセグメンテーションに着目し、電子顕微鏡により撮影した鉄系高温超伝導材料 Ba122 の微細構造画像に応用することで、複雑なセラミクス材料の微細構造としては世界最高レベルの精度でのモデル化に成功している[3]。しかしながら、同一材料でも材料の作製方法により微細構造は大きく異なる(Fig. 2)。常圧合成法で作製された Ba122 の微細構造画像を用いて学習した深層学習モデルは、SPS 法で作製された Ba122 微細構造画像に対してのロバスト性が高くない問題点があることがわかった。とくに、まれに生じるクラックに対しての適応度が低いことが分かった。そこで本研究では、データセット中にデータ数が少ないが材料特性に大きな影響を与え得る特徴としてクラックに着目し、本対象のセマンティックセグメンテーションが可能な深層学習モデルの構築を目的とした。深層学習の過程でクラックがどのように捉えられるかを確認するため、まず画像内のクラックの有無を判定する深層学習識別モデルの作成を行った。

2. 実験方法

SPS 法で作製された Ba122 の SEM 像(二次電子像[4])を FIB-SEM を用いて取得した。まず、5 枚の SEM 像内のランダムな位置を切り取ることで計 1000 枚に増幅させた。それぞれの画像内にクラックがある場合を 1、無い場合を 0 としてラベリングを行った。クラック識別では深層学習アルゴリズムの一種である CNN(Convolutional Neural Network)を用いてこれらの画像データを学習させた。学習の結果は Accuracy を用いて評価し、またその判断基準を可視化するために Grad-CAM を用いた。Grad-CAM[5]とは、CNN のような深層学習モデルの注目領域を可視化するための手法である。次に、セグメンテーションの準備として SEM 像の各画素に対して超伝導相を 1、非超伝導相 0 として手動でクラスティングを行った。深層学習アルゴリズムの一種である完全畳み込みニューラルネットワークを用い、セグメンテーションモデルの訓練とテストを行った。セグメンテーションの精度は IoU を用いて評価した。

3. 結果・考察

CNN によるクラック有無の識別精度は Accuracy = 0.97 となった。SEM 像と Grad-CAM 像のペア例を Fig. 3 に示す。CNN モデルが識別において注目している領域がヒートマップで示されている。Fig. 3 より、クラックが含まれない場合は超伝

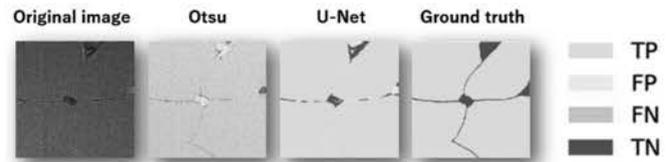


Fig.1 Differences in output for each algorithm

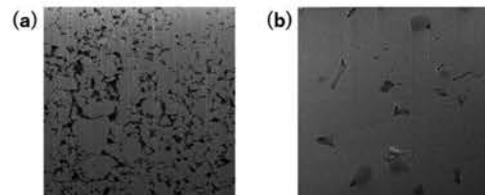


Fig.2 SEM images of Ba122 prepared by (a) atmospheric pressure synthesis method and (b) SPS method

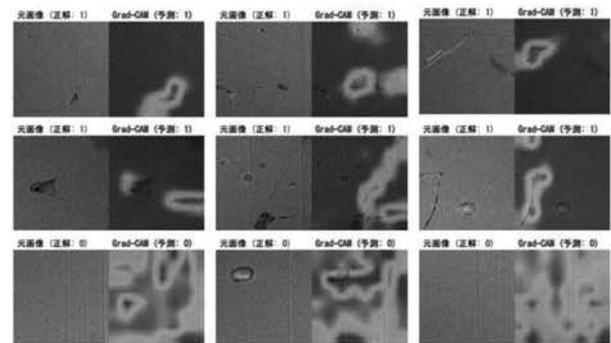


Fig.3 Original images and heat maps for crack identification.

導相全体に、含まれる場合はクラック部分を選択的に注目し、判定している傾向がみられた。

4. まとめ

本研究では、鉄系高温超伝導材料 Ba122 の微細構造解析において、画像増幅手法と深層学習を活用しクラック識別を高精度(Accuracy = 0.97)で実現した。Grad-CAM により CNN モデルがクラックを認識し、それをもとに判定している傾向がみられた。今後はこれらの結果をもとにセマンティックセグメンテーションモデルの作成を進めていく。

参考文献

1. N. Otsu: IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Vol. 9, (1979) p.62-66
2. J. Sauvola & M. Pietikainen: Pattern Recognit. Vol. 33 (2000) p.225-2363.
3. Y. Hirabayashi *et al.*: npj Computational Materials, Vol. 10 (2024) Article number 46
4. Y. Shimada *et al.*: J. Alloys Compd., Vol. 923 (2022) Article number 166358
5. R. R. Selvaraju *et al.*: In IEEE on ICCV, Vol.128 (2017) p.618-626

BSCCO 超電導線材のフィラメントの破壊起動の観察

Observation of filament fracture behavior in BSCCO superconducting wire

白木原 蒼 (大同大学 院), 町屋 修太郎 (大同大学)
 SHIRAKIHARA Sou(Daido univ.), MACHIYA Shutaro (Daido univ.)
 E-mail: dmm2517@stumail.daido-it.ac.jp

1. はじめに

超電導線材 BSCCO は近年さまざまな用途で使用されている。しかし超電導線材が発見された当初からこの材料の脆さが露呈していた。そこからさまざまな強度強化などの改良が施され今日に至る。だが BSCCO はフィラメントの強度が低いと言われているが、実際に破断した様子を記録したものが無い。

そこで本実験では BSCCO に引張負荷をかけて実際にクラックが発生する過程や結果を撮影し、破壊挙動を観察する。そして画像解析を行い、より詳細な破壊挙動を明らかにしたい。

2. 実験方法

本実験では BSCCO 線材に引張負荷をかけると圧縮側で座屈が発生し負荷をかけることができない。そのため等間隔でカットした BSCCO 片 (試験片とする) を真鍮梁に接着し、梁に引張負荷をかけることで試験片に引張負荷をかけることにした。また BSCCO 線材は表面が Ag シースで覆われているためフィラメントを直視できないため表面のシースをはがした試験片を使用している。

実験では試験片と接着した梁 (試料と呼ぶ) を万力で 4 点曲げを用いて引張負荷をかけていくと同時に撮影を行う。本実験ではひずみ 0%~0.50% の範囲で実験を行っていく。実験1ではひずみ 0.02% 刻みで引張をかけていき画像撮影し角画像を比較し目視でクラックの発生を確認していく。

図1に実験で使用する万力を上から見た図を示す。

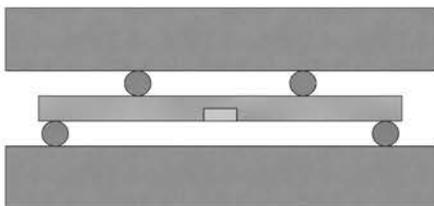


Fig. 1 Experimental equipment overview

ひずみ解析では撮影した画像を画像解析ソフトウェアを用いてさらに小さな亀裂やフィラメント表層の変化などを目視よりもさらに詳細に観察した。

3. 実験結果

図2に初期状態の表層、図3にひずみ 0.50% 時の表層を示す。

負荷実験の結果画像左下に注目するとひずみ 0.50% の時、フィラメントの繊維方向に直行するように縦に白い線が発生していることが確認でき、これはクラックが発生していることを指している。その他のクラックの発生が見られないことか



Fig. 2 Initial surface



Fig. 3 Strain 0.50%

ら、クラックが発生した後、フィラメント全体に応力緩和が発生し、他のクラックの発生を抑制していることも確認できた。

次にひずみ解析の結果、クラックの発生するひずみの値がより詳細に確認できた。図4から図7に解析結果を示す。

解析では実験で得られたひずみ 0.40%~0.50% までの画像を使用しクラック発生時のひずみの値を調べた結果、図4の時点ですでにクラック発生の原因と思われる応力集中が発生していることが確認できる。また、ひずみ 0.48% の時がクラックが拡大し、目視できるほどの大きなクラックになっていることの見取れる。

4. まとめおよび考察

本実験の結果、ひずみ 0.42% の時にすでにクラック発生の原因とみられる小さな発生源が確認できた。また、ひずみ 0.48% の時には目視でも確認できるほどのクラックに拡大していることも分かった。

本実験では試験片に引張をかける際に座屈対策として梁ごと曲げる方法を使用したが、試料によって接着に少し差が出てしまったことで、試料の結果に大きく差が出てしまった。それにより、クラックが発生するひずみ値が正確に読み取れなかった。だが、BSCCO は層状構造をしているため、場所によって強度が一定ではないため、クラック発生時の値も多少変化してしまったのではないかと考えられる。

今後は BSCCO 試験片単体での引張負荷をかけることができるような実験装置の改良と、試行回数をさらに増やして精度の高い数値が出るようにする必要がある。これを行い、データが取れると引張負荷に対する材料強度への進展になるのではないかと考えている。また、クラックが発生することによっての臨界電流値の変化をデータ・グラフ化することによって BSCCO の用途がさらに幅広くくなっていくのではないかと考えている。



Fig. 4 X-axis strain 0.42%

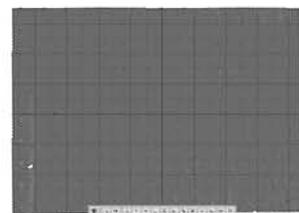


Fig. 5 X-axis strain 0.44%



Fig. 6 X-axis strain 0.46%

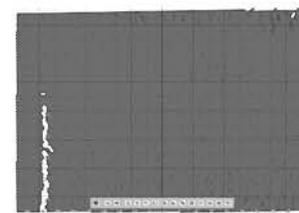


Fig. 7 X-axis strain 0.48%

薄板組立型熱スイッチの内部フィンの高密度化の研究

High density fin structure of plate assembly type gas gap thermal switch

前河 大貴, 山本 壮真, 原田 義輝, 下元 一輝, 小田 靖久 (摂南大学)

MAEKAWA Daiki, YAMAMOTO Soma, HARADA Yoshiteru, SHIMOMOTO Kazuki, ODA Yasuhisa (Setsunan university)

E-mail: yasuhisa.oda@mec.setsunan.ac.jp

1. はじめに

ガスギャップ式熱スイッチは内部を真空にすることで熱伝達を制御する機材であり、超電導マグネットや断熱消磁冷凍機などで使用されている[1,2]。ガスギャップ式熱スイッチは、内部にフィン構造を持たせ表面積を拡大することで、効率的な熱伝達を行わせる必要がある。現在使用されているものは、熱伝導率が高い銅母材から、フィン構造を切り出す方式で製作されており、ワイヤー放電加工機のような工作機械で製作されている。しかし、母材からの切り出し加工では、加工時の熱の影響で、フィンが変形してしまう問題があり、フィンの厚さには制約がある。摂南大学では、フィン構造を薄板で組み立てることで実現する方式を検討しており、今回、摂南大学で竹内ら構築した薄板組立型スイッチ[3]の倍程度のフィン数を持つ高密度型の熱スイッチを開発し、常温での実験を通じて、フィン数の増加の性能への寄与などの評価を行った。

2. 熱スイッチの構成

熱スイッチの熱伝達能力は、内部のフィン構造の表面積に影響を受けるため、薄いフィンを多数組み合わせることで、小型の熱スイッチを実現することができる。そのため、薄板の組み立てによる高密度のフィン構造の実現を試みている。今回、大きさの異なる 2 種類の銅板を交互に組み合わせる方式(以下、組立型と呼ぶ)を採用した。Fig.1 に示すようにフィンの凸部を構成する厚さ 0.5mm の銅板と、フィンの凹部を構成する厚さ 1.5mm の銅板を組み合わせ、これを銅のプレート上に金具により固定している。このケースでは、40mm 幅のフィン設置部に、片側にフィンを 20 枚設置することができる。ワイヤー放電加工機による切出加工で製造した熱スイッチ(以下、切出型と呼ぶ)では、ほぼ同サイズのケースで、片側のフィンの枚数が 14 枚であったことから、今回の方式によりフィンの密度を高めることができた。組立型の熱スイッチとしてのスペックは、伝熱面積:0.13 m²、ギャップ幅:0.5 mm である。常温での熱通過率の設計値は 1 W から 250 W 程度の熱通過に対して、ON 時が 2.4 W/K、OFF 時が 1.0 W/K~1.4(W/K)程度となった。

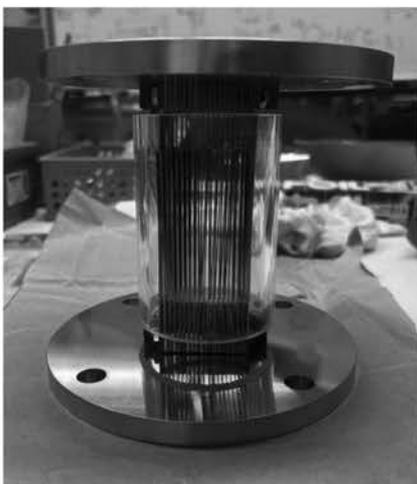


Fig.1 Fin structure of plate assembly type heat switch

3. 常温での動作検証

今回製作した熱スイッチの性能を確認するために、常温での動作検証を行った。熱スイッチは、内部を真空にしたときの伝熱に放射が寄与するため、常温では十分に伝熱を切り離すことができず切替比は小さな値にとどまるが、フィン部による熱伝達性能に比較は可能と考えられる。ヒーター通電の定常状態でのスイッチ両端の温度を計測し、通常時(ON)とターボ分子ポンプにより空気を排気した時(OFF)を比較する。Fig.2 に示すように、ON と OFF 時で高温側の温度が変化する事が確認され、熱通過率に差が生じることが確認できた。Table 1 に、以前に製作した切出型の熱スイッチ(固定プレートは SUS を使用)[3]との熱通過率の比較を示すが、高密度化した本機材の熱通過率は、比較対象とした切出型と同程度の性能が得られる可能性があるといえよう。

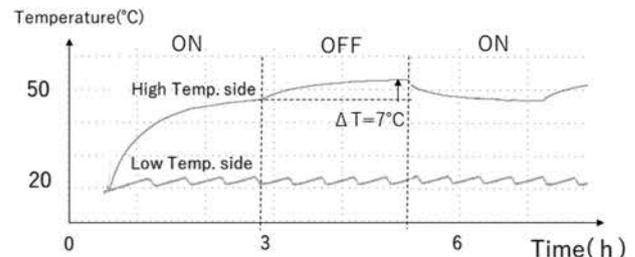


Fig.2 Temperature history of heat switch operation of the assembly type heat switch.(Heat load $Q=15$ W case)

Table 1 Measured heat transfer rate of gas switches.

	Cut mode type	Assembly type
ON (With air)	0.657	1.12
OFF(Vacuum)	0.511	0.839
ON/OFF ratio	1.29	1.33

4. まとめ

実験結果より、薄板の組み立てによるフィン構造で、その密度を向上させることができ、切出型と同程度の性能が得られる見通しが得られた。今後、低温条件での実験を通じて、組立型熱スイッチの性能評価を進める計画である。

参考文献

1. 神門剛、伊藤総、濱田衛、林征治、川手剛雄、渋谷和幸、「伝導冷却型超電導マグネットの永久電流スイッチと熱スイッチ」、低温工学 34 巻 5 号 P230 (1999)
2. 沼澤建則、神谷宏治、李晶、中込秀樹、Peter SHIRRON、「連続型断熱消磁冷凍機」、低温工学 50 巻 2 号 96P (2015)
3. 竹内 文哉,市川 慧,小田 靖久,夏目 恭平,内田 公,神谷 宏治,「薄板組立型熱スイッチの試作と性能評価」、第 106 回 低温工学・超電導学会研究発表会、山口 (2023)

バイオマス資源の熱分解ガスの深冷分離による水素の抽出の研究

A study of cryogenic hydrogen separation of pyrolysis biomass gas

渡邊 遼菜, 林 匠, 西田 凌, 日野 広生, 小田 靖久(摂南大学), 仲村 直子(NIFS)

WATANABE Toma, HAYASHI Takumi, NISHIDA Ryo, HINO Kosei, ODA Yasuhisa (Setsunan university); NAKAMURA Naoko (NIFS)

E-mail: yasuhisa.oda@mec.setsunan.ac.jp

1. はじめに

自動車や航空機など、輸送機械の燃料には化石燃料が多用されているが、CO₂ 排出を削減する観点から、代替エネルギーが検討されており、水素は有力な候補となっている。水素は燃料電池や水素エンジンでの使用に伴う CO₂ 排出がないが、その製造プロセスのエネルギー消費にともなう CO₂ 排出が課題となっており、CO₂ 排出がない水素の製造法が求められている。摂南大学では、集光した太陽光を熱源として木材などの植物素材のバイオマス資源を熱分解して水素を発生するシステムの構築を研究している[1]。植物バイオマス資源を高温で熱分解すると、その主成分であるセルロースから水素が分離される[2]。この方式による水素の製造では、熱分解に要するエネルギーに太陽光を使う事から CO₂ を発生させることがないだけでなく、原料となる植物バイオマス資源の生産過程で大気中の CO₂ が吸収されるため、ネットとして CO₂ 排出がマイナスにできる可能性がある。

バイオマス資源の熱分解ガスには水素のほかにも、多種のガス成分が含有されるため、燃料電池などへの利用には水素の分離が不可欠である。そこで、摂南大学では深冷分離による熱分解ガスからの水素抽出を行うべく、液体窒素温度にある予冷・分離回路で熱分解ガスから水素を抽出する試験を行った。本稿では、その初期的な成果について報告を行う。

2. 集光太陽熱によるバイオマス資源の熱分解

バイオマス資源の熱分解の試験について説明する。摂南大学では、Fig.1 に示す有効直径 75cm のパラボラ・ディッシュ型の集光集熱器により太陽を集光し、石英管で構成される加熱部内にバイオマス資源を設置し、集光熱で加熱する。バイオマス資源としては、木材や生育の早いサトウキビなどの熱帯性植物を試験対象としている。加熱部を真空引きし、熱分解による発生ガスはガスバッグで回収するようにしている。集光太陽熱による加熱で、加熱部の設置したバイオマス資源は、400℃以上になり、熱分解ガスが発生している。10g 前後のバイオマス資源から、1~3 L 程度の熱分解ガスが得られ、ガスクロマトグラフ分析で 7~20%の水素が含有されていることを確認できている。



Fig. 1. Photograph of sun focusing system.

3. 熱分解ガスの深冷分離

混合ガスである熱分解ガスから深冷分離法による水素の抽出を試みた。混合ガスの成分は、CO₂、CO、CH₄ など窒素温度で液化する成分が多く、今回は Fig.2 のようなシステムを構成し、内部を真空引きした上で、太陽集光システムから得られたガスを予冷装置とコールドトラップを通過させ、水素を分離する試験を実施した。冷却により気体の体積が小さくなる効果もあり、混合ガス 5.5 L に対して、水素回収用パックに 360 cc の気体が溜まった。元のガスと分離後のガスの成分分析をしたクロマトグラフを Fig.3 に示すが、水素のピークが強くなり、濃度が上昇していることを確認することができた一方で、他のガス成分も残留している。これは、予冷装置における冷却が不十分で、窒素温度付近に沸点があるガス種が残留していると考えられる。

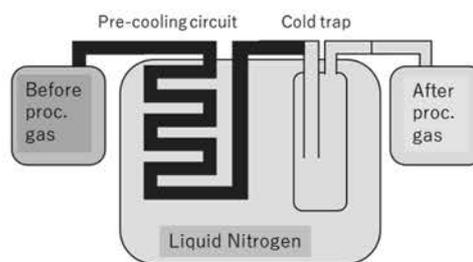


Fig.2 Simplified diagram of cryogenic separation system.

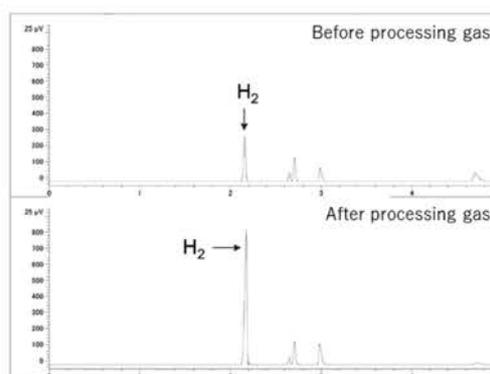


Fig.3 Gas chromatograph of cryogenic separated gas.

4. まとめ

太陽集光熱を利用したバイオマス資源の熱分解で水素を得るシステムの研究の一環として、熱分解ガスから深冷分離により水素を抽出する検討を行い、熱分解ガスの水素濃度が上昇することを確認することができた。

参考文献

1. 浅岡 千紀, 橘 佑太, 水原 陸玖 “集光太陽熱による植物系素材からの水素製造の研究” 摂南大学理工学部機械工学科 卒業論文 (2024).
2. 笹内 謙一 “木質バイオマスのガス化発電” 環境技術 33 巻 7 号, 2024, pp524-529.

高温超伝導 2 極磁石の磁束跳躍がもたらす誤差磁場評価に向けた測定プローブの開発

Design of a new probe for detection of dynamic field error due to “flux jump” in an HTS dipole magnet

鈴木 研人 (KEK)

SUZUKI Kento (KEK)

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) では過去に開発した REBCO テープ線材 (4 mm 幅) を用いた鞍型コイルによる HTS ダイポールマグネット [1] (図 1 参照) の 4 K における磁場測定を目指している。このマグネットの主要諸元は定格電流 120 A、主磁場 1 T、インダクタンス 290 mH である。既に行われた励磁試験では 2 極磁場成分 (B_1) のクリープ現象が見られた他、磁束跳躍と見られる現象が B_1 とコイル電圧測定を通して観測されている [2]。今回目指している磁場測定では、4 K にて最大 90 A 程度の通電 (ポア中心における磁束密度 0.8 T 程度) を行い、磁束跳躍を含む磁場精度のダイナミクス定量的評価を行う予定であり、これに向けた専用の測定装置の開発を進めている。

2 測定原理と装置概要

加速器応用の観点から、磁束跳躍がもたらす影響として磁場精度の悪化が挙げられる。磁石が生み出す磁場成分は極座標の基底ベクトルを用いて：

$$\vec{B} = B_\theta \vec{e}_\theta + B_r \vec{e}_r \quad (1)$$

と表される。それぞれのベクトル成分はフーリエ級数で表現でき、後者の B_r については：

$$B_r(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{ref}}} \right)^{n-1} (B_n \sin n\theta + A_n \cos n\theta), \quad (2)$$

ここで B_n 、 A_n は磁場の多極成分に相当し、それぞれノーマル成分、スキュー成分を表す。また、 R_{ref} は参照半径と呼ばれるもので、本ダイポールマグネットでは 20 mm である。従来の回転コイルを用いた測定では Radial coil を用いる事で B_θ を、Tangential coil を用いることで B_r を求めているが、Sampling speed は回転数で決まり、高々 5-10 Hz が限度である。そのため、kHz オーダーでダイナミクスな磁場精度測定に挑む場合、新たな測定手法が求められる。

Nb_3Sn 製マグネットの磁束跳躍による磁場精度評価を行っている先行研究においては、フレキシブル基板で作成したクエンチアンテナを特定の多極成分に対して感度を持つように配備することで、10 kHz サンプリングによる誤差磁場評価と位置同定を可能としている [3]。一方、今回提案する方法は先行研究のようなパッシブな測定ではなく、ホール素子を用いたアクティブな測定である。図 2 に装置の概要を、図 3 に本装置の 3 次元モデルを示す。設計にあたっては、HTS マグネットの室温ポア ($\phi 57$ mm) を利用し、装置外径 57 mm 以内に収まる事を前提としている。GFRP 製でできた胴体部を多角形上に加工し、 B_r に対して感度を持つよう面上に GaAs 製ホール素子を配置する。また、端部にはベアリングを備えていて、装置全体を磁石の長手軸方向に走査できるようにした。上記の仕様にて、10-100 kHz のサンプリングレートで多極成分の測定とダイナミクス評価、さらには磁束跳躍が発生した位置の特定を試みる。

3 まとめ

HTS ダイポールマグネットの加速器応用に向けた実現性の評価に向けて、磁束跳躍の磁場精度への影響を見積もっている。本講演では測定原理をより詳細に述べると共に、予想される性能仕様と今後の測定に向けた計画について報告する。

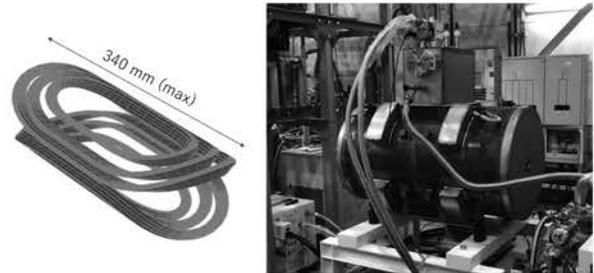


Fig. 1: Left) Saddle-shaped HTS coils made of REBCO tapes. Right) Picture of the HTS dipole magnet.

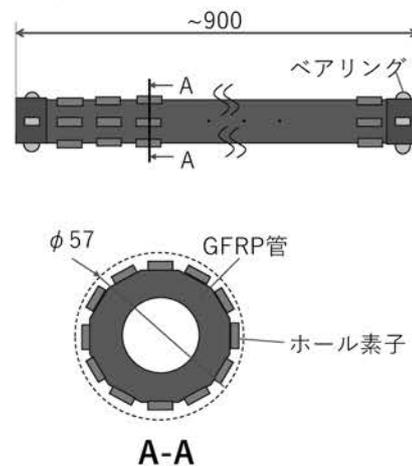


Fig. 2: Simple drawing of the Hall probe module.



Fig. 3: Three dimensional model of the Hall probe module. Hall probes are not shown in this model.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K17151 の助成を受けたものである。

参考文献

1. S. Takayama *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 26 (2016) 4402304.
2. K. Suzuki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 27 (2017) 4600405.
3. P. Rogacki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 35 (2025) 4003305.

REBCO コイルの電流分布挙動における巻線密度の影響

Effect of Winding Densities on Current Behaviors in REBCO Coils

武居 淳一郎, 間藤 昂允, 野口 聡(北大)

TAKEI Junichiro, MATO Takanobu, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

E-mail: takei.jiyunichirou.v2@elms.hokudai.ac.jp

1. はじめに

希土類系銅酸化物超電導体(REBCO, rare-earth barium copper oxide)は、高磁場下でも高い電流密度を維持できるため、NMR や MRI、核融合炉などの高磁場応用に向けたREBCO マグネット開発が盛んに行われている。しかし近年、REBCO マグネットの高磁場化にともない、REBCO 線材の高アスペクト比に起因する遮蔽電流がより深刻な問題を起こすことが示唆されている[1]。遮蔽電流は、REBCO 線材幅広面を貫く磁場変化によって生じ、テープ幅方向に不均一な電流分布をもたらす。磁場均一度の低下、コイルの変形などの問題を引き起こす。遮蔽電流低減に向けた遮蔽電流現象のさらなる理解が必要である。

さらに、補強などの対策から SUS テープを共巻きにする構造など、目的に応じて多様な巻線構造が検討されてきている。サイクロトロンなどでは、大平面空間に大きな等時性磁場を発生させるために、厚さの異なる SUS テープを共巻きする構造も提案されている[2]。

そこで、本研究では、REBCO 線材の巻線密度が電流分布に及ぼす影響について調査する。密巻と粗巻のREBCO パンケーキコイルに対して有限要素法を用いたシミュレーションを行い、コイル励磁後の電流分布を比較・議論した。

2. 巻線密度の異なるパンケーキ・コイル・モデルの比較

REBCO 線材の巻線密度が電流分布に与える影響について、本研究では4つのREBCO シングル・パンケーキ・コイルに対して電流を線形増加させた場合を有限要素解析ソフトウェアでシミュレートした。Table 1 に示すコイル・モデルを用いたシミュレーションを行った結果を以下に示す。有限要素モデルではTable 1 のコイルについて2次元軸対象で定義したものであり、REBCO 線材を薄膜近似することでシミュレーションを行った。電磁場解析には $T-A$ 法を用いた[3]。また超電導体の等価抵抗率 ρ は式(1)に示す n 値モデルから算出した。

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1} \quad (1)$$

なお、式(1)における J は電流密度である。シミュレーションでは各コイルを1A/sで50秒間電流増加させ、その時の電流密度分布を確認した。

本研究では、2種類の巻線密度の異なるパンケーキ・コイルについて比較した。1つ目は、No-insulationを想定したターン間に何も無い密巻である。もう一つは、ターン間にSUSテープ(厚さ0.2mm)を共巻きしたコイルを想定している。近年、補強の観点やターン間接触抵抗向上のために、SUSテープの共巻はよく検討されている構造である。

3. シミュレーション結果の比較

Fig. 1 に密巻コイルにおける電流印加開始後20秒($I_{op} = 20$ A)の電流密度分布を、Fig. 2 に粗巻コイルにおける同時刻の電流密度分布を示す。Figs. 1 と 2 を比較したとき、特に上下端のパンケーキ・コイルに顕著であるが、密巻であるFig. 1 に比べ粗巻であるFig. 2 はより導体の中央まで電流の分布がみられ、より多くの遮蔽電流が誘導されていることが確認できた。

発表当日は、遮蔽電流磁場の影響やBJR応力の大きさなどについても言及する。

TABLE I
SPECIFICATIONS OF REBCO PANCAKE COILS

Parameters	Values
Number of single pancakes	4
Turns per single pancake	50
Gap of pancakes (mm)	2
Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.1
Gap of turns (Densely wound) (mm)	0
Gap of turns (Sparsely wound) (mm)	0.2
Coil inner diameter (mm)	25
E_c (V/m)	10^{-4}
J_c (A/m ²)	1.5×10^8

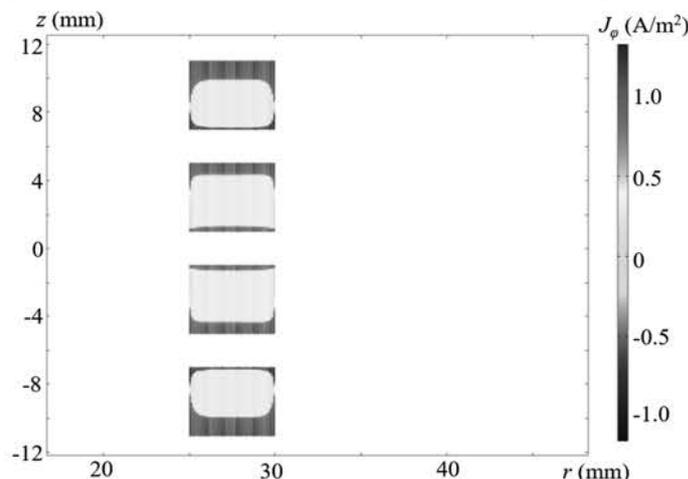


Fig. 1 Current density distribution in densely wound coils

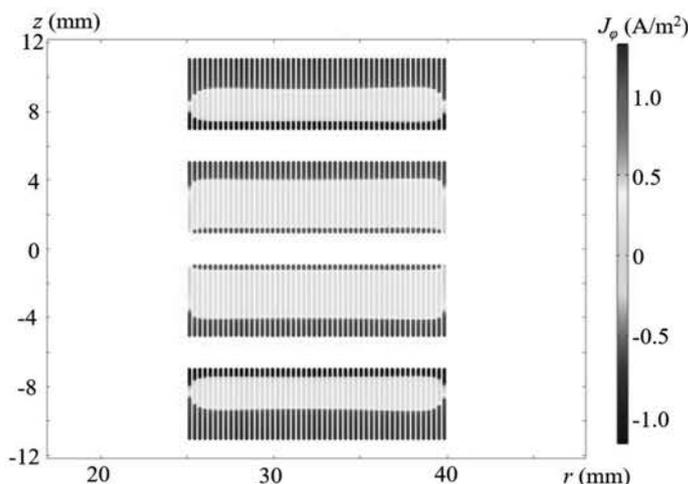


Fig. 2 Current density distribution in sparsely wound coils

参考文献

- [1] H. Maeda, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 24 (2014) 4602412.
- [2] H. Ueda, et al., *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 108 (2025) p. 131.
- [3] F. Liang, et al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 122 (2017) p. 043903.

33T-CSM 用内挿 REBCO コイルにおける遮蔽電流誘起応力・ひずみ数値解析： 端面含浸の効果

A numerical study on Screening current-induced strain/stress in REBCO insert for 33T-CSM: Impact of edge impregnation

野島渉平, 土屋雄司, 長崎陽, 津田理, 淡路智 (東北大); Arnaud Badel (Grenoble Alpes 大); Alexandre Zampa (東京大)
NOJIMA Shohei, TSUHIYA Yuji, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.);
Arnaud BADEL (Univ. of Grenoble Alpes); Alexandre ZAMPA (Univ. of Tokyo)
E-mail: shohei.nojima.q2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、内挿 REBCO コイルを用いた 33 T 無冷媒超伝導マグネット (33T-CSM) の開発を進めている。近年、強磁場 REBCO マグネットの開発において、遮蔽電流誘起応力・ひずみ (SCIS) による線材劣化が重要な課題となっている。先行研究では、全体含浸によるコイル剛性の向上が SCIS の低減に有効であることが示されているが、冷却時の熱収縮に起因する剥離応力による劣化には注意が必要である^{[1][2]}。一方、33T-CSM には、パンケーキコイルの上下面のみを含浸する端面含浸構造が採用されており、冷却時の剥離応力の抑制に加え、均一電流印加時の最大フープ応力の低減にも効果があると報告されている^[3]。しかし、端面含浸が SCIS に与える影響は未解明である。そこで、本研究では、33T-CSM における端面含浸の SCIS への影響を評価することを目的とし、数値解析を行った。SCIS は、コイルの変形と、内部に誘起される遮蔽電流分布が相互に関連する現象である。そのため、本解析では、構造の機械的強度に起因する「機械的影響」と、機械的変形に応じて変化する遮蔽電流の分布や大きさを意味する「電磁的影響」を分離して評価した。以下に、機械的影響に着目した解析手法と結果を示す。

2. 解析方法

SCIS の解析には、2 次元軸対称の有限要素法を用い、電磁界解析 (T-A 法) と構造解析を組み合わせた手法を採用した。図 1 および表 1 に、解析対象としたコイルの構成および構成材料の仕様を示す。解析コストを抑えるため、REBCO パンケーキコイル最上段の外周側 25 ターンのみを対象とし、エポキシによる接着は境界条件で再現した。また、臨界電流密度の磁場依存性には、テープ垂直方向の磁場成分のみを考慮し、Kim モデルを適用した^[4]。本解析では、含浸方法の違いによる SCIS への機械的影響を評価するため、含浸無し (Dry)、全体含浸 (Full)、端面含浸 (Edge) の 3 構造を比較対象とした。比較に際しては、各構造でコイル内部の電流分布を同一とし、フープひずみの分布を評価した。

3. 解析結果および考察

図 2 に、(a)ドライ、(b)全体含浸、(c)端面含浸コイルにおけるフープひずみ分布を示す。先行研究より、0.4%以上の引張フープひずみが REBCO 線に生じると、臨界電流 I_c が不可逆に劣化する^[5]。図 2(a)のドライコイルでは 0.4%以上の引張ひずみ生じており、SCIS の影響が顕著に現れていることがわかる。(b)の全体含浸コイルでは、構造体としての剛性が高く、ひずみが効果的に抑制されている。一方、(c)の端面含浸コイルでは、ドライコイルと比較してひずみの分布が抑制されており、SCIS が低減されていることが確認できる。これは、端面が一体的に変形することで局所的な剛性が向上し、ひずみの発生が抑制されたためと考えられる。以上より、同じ線材電流分布に対して、端面含浸は機械的剛性を向上させ、SCIS の低減に有効であることが明らかとなった。ただし、絶対値に関して含浸コイルにおいては、解析ターン数を増やすことで剛性がさらに高まり、SCIS がより一層低減される可能性がある。

機械的影響の評価では REBCO 線材内の電流分布を同一としていたが、実際にはコイルの変形、特に線材の傾きにより、臨界電流の角度依存性に基づいて、遮蔽電流の分布および大きさが変化する。この電磁気的影響によって、異なる含浸方法では遮蔽電流が異なり、結果として、端面含浸やフル含浸では SCIS がさらに低減されることが確認された。詳細結果は、学会当日に報告する予定である。

Table 1. Specification of the analyzed REBCO coil.

REBCO tape size [mm]	4.1 × 0.15
Hastelloy tape size [mm]	4.1 × 0.10
Polyimide tape size [mm]	4.1 × 0.055
Thickness of GFRP plate [mm]	0.20
Young's modulus of REBCO tape [GPa]	150
Young's modulus of Hastelloy Tape [GPa]	210
Young's modulus of Polyimide Tape [GPa]	1.0
Young's modulus of GFRP plate [GPa]	10
Current to two-REBCO tape bundle [A]	361

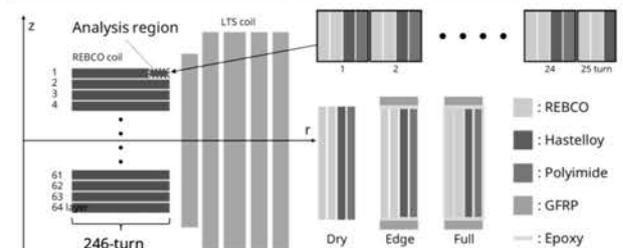


Fig. 1 Schematic illustration of the analyzed REBCO coil.

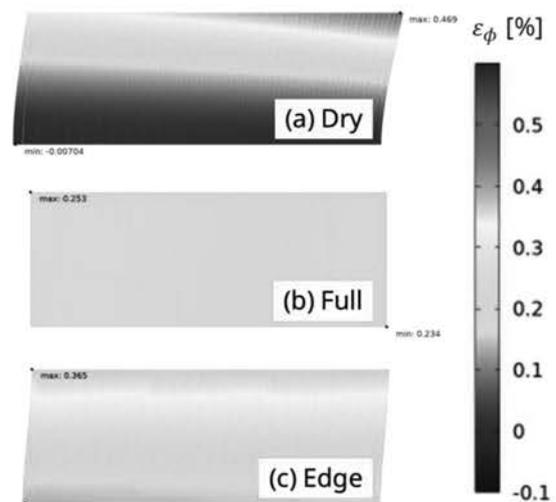


Fig. 2 Mechanical effect: ε_ϕ distribution in (a) dry, (b) full, and (c) edge impregnated REBCO coils.

参考文献

- [1] T. Takematsu *et al.*, Physica C, 470, 17-18 (2010).
- [2] H. Ueda *et al.*, Supercond. Sci. Technol., 34(2), 2021.
- [3] A. Badel *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 33(5), 2023.
- [4] Y. Yan *et al.*, Supercond. Sci. Technol., 34(8), 2021.
- [5] C. Barth *et al.*, Supercond. Sci. Technol., 28(4), 2015.

Trapping Magnetic Field in Tubular Stacked Coated Superconductors

C. Yu, R. Sakagami, I. Veshchunov^A, M. Nakamura^A, T. H. Dao^A, V. Vyatkin^A,
and T. Tamegai

Dept. of Appl. Phys., The Univ. of Tokyo, ^AFaraday Factory Japan LLC

High temperature cuprate superconductors (RE)Ba₂Cu₃O₇ (RE : rare earth elements) with large critical current density (J_c) under high magnetic fields as compared with other superconductors are expected to be promising materials for applications such as superconducting magnets and transmission lines. On the other hand, research has been carried out by several groups on trapping high magnetic field in stacked coated conductors (CCs), and the maximum trapped field record of 17.89 T has been achieved by our group in 2022 [1].

In the present study, in order to make use of the trapped field inside the stacked CCs, we drill a hole in the center of them to give a space for a sample which needs a large, stable, and homogeneous magnetic field. To estimate the value of trapped field at the center and its temporal stability, measurements using Hall probes during field-cooling process starting from 9 T (Fig. 1) and relaxation process (Fig. 2) were performed. Magnetic field very close to 9 T (8.987 T) was successfully trapped at the center of the stacked CCs at 6 K. Very weak relaxation is also realized 1 h after the field-trapping process (0.01% decrease) by decreasing temperature quickly right after the completion of field-trapping. In addition, a home-made probe was used for measuring the z -axis profile of the trapped field. As a result, field homogeneity $\Delta B/B$ as small as 0.05%/mm has been achieved.

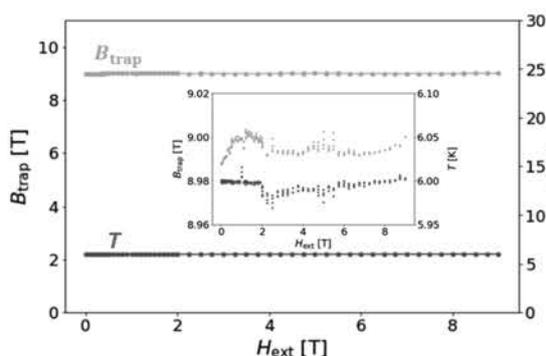


Figure 1 Trapped field and temperature change during the FC process at 6 K. The inset shows the expanded data.

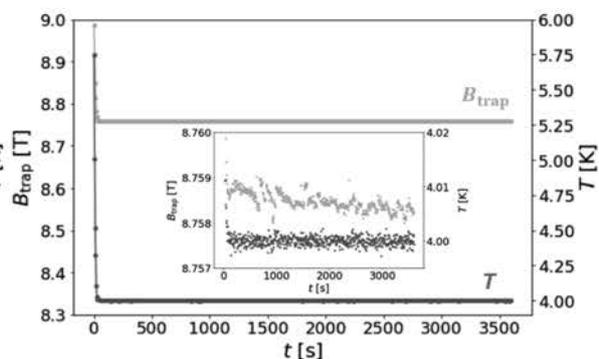


Figure 2 Trapped magnetic field and temperature change during the relaxation process after field trapping at 6 K. Inset shows expanded temporal change after reaching at 4 K.

[1] M. Suyama *et al.*, Supercond. Sci. Technol. Vol. 35 (2022) 02LT01.

幅が広い希土類系酸化物超伝導テープ線材を用いて作製した 無接続コイルの検討

Study of connectionless coils fabricated
using wide rare-earth based oxide superconducting tape

原田 直幸, 片山 哲汰, 高橋 慶, 上山 明日羽, 村上 大夢 (山口大)

HARADA Naoyuki, KATAYAMA Tetsuta, TAKAHASHI Kei, UHEYAMA Asuha, MURAKAMI Hiromu (Yamaguchi Univ.)

E-mail: naoyuki@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

市販の幅が広い希土類系超伝導テープ線材を加工することで2種類のコイルを作製した。1つはテープ線材を円形に加工して中央に穴を開け、小さなコイルとした。もう1つは長いテープ線材の中央に長手方向にスリットを入れ、スリット部分を開くことで1ターンの無接続コイルとした。これらのコイルの捕捉磁場の大きさやその時間変化を測定した。また、捕捉磁場からそれぞれコイルに流れている電流を見積もった。

2. 実験方法

実験には市販の希土類系酸化物超伝導テープ線材 TPL2100[1]を用いた。テープ線材の幅は 12mm, 厚さは 0.22mm, 77K で磁場を印加しないときの臨界電流の仕様値は 360A である。この線材から Fig.1 に示す外径 12mm の円形コイルを作製した。中央部の穴は ϕ 4mm ~ ϕ 8mm で、いずれもテープ線材 1 枚を使用した。また, Fig.2 に示す無接続コイルは, 長さ 180mm のテープ線材に幅 2mm, 長さ 130mm のスリットを入れることで作製した。Fig.2 に示したコイルは 2 枚のテープ線材を重ねたもので, コイル中央部の最も開いた部分の幅は, 30.2mm である。テープ線材の切断, 円形の加工, スリット加工などは, すべてエンドミルを用いた。

実験装置の模式図を Fig.3 に示す。発砲スチロール製の容器の中央にコイルを固定した。室温でネオジム磁石をコイルに近づけた後, 液体窒素でコイルを冷却して永久磁石を取り去った。コイルで発生する磁場をホール素子を用いて測定した。ホール素子には旭化成エレクトロニクス社製の HG-372A を使用した。ネオジム磁石は直径 50mm, 高さ 20mm, 表面の磁束密度 400mT である。



Fig.1 Disk-shaped coil.

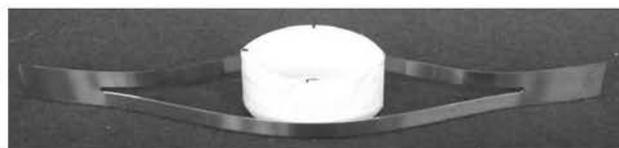


Fig.2 Connectionless coil.

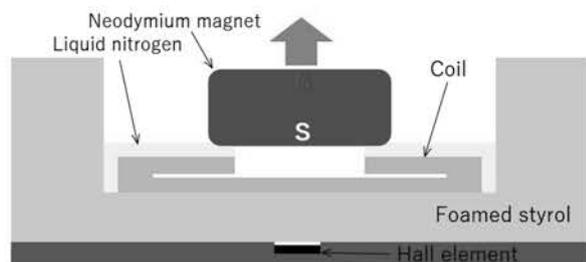


Fig.3 Schematic view of the experimental equipment.

3. 実験結果と検討

中央に穴を開けた円形コイルの場合, ホール素子の位置における磁束密度を Fig.4 に示す。中央部の穴の大きさが小さいほど計算値に比べて実験値は大きくなった。このことから, テープ線材の臨界電流が仕様値よりも大きいことや穴を加工するときに穴の周囲にダメージが入り電流が流れにくくなることが予想される。

次に, スリットを入れて作製した無接続コイルの実験結果を Fig.5 に示す。ホール素子の出力電圧 V_H からオフセット電圧 V_{OFF} を減じた値 ($V_H - V_{OFF}$) の時間変化である。コイル 2 は 2 枚のテープ線材を重ねて作製したコイル, コイル 1B は 1 枚のテープ線材を用いたコイルである。約 300 秒から約 2000 秒までは, ホール素子の温度が低下して出力電圧が変動するため, 3600 秒から 10800 秒の値からそれぞれのコイルに流れる電流を算出した。コイル 1B では 3600 秒において 164.3A, 10800 秒において 161.2A となった。スリットを入れた部分の線材の幅は 5mm であることから, 5mm 幅の臨界電流 150A よりも大きな電流が流れていると考えられる。また, コイル 2 では 3600 秒において 269.9A, 10800 秒において 263.9A となった。テープ線材を 2 枚重ねた場合は, 捕捉する磁場が大きくなり臨界電流が低下するため, コイル 1B の 2 倍の大きさの電流は流れていないと考えられる。

参考文献

1. <https://www.theva.com/products/>

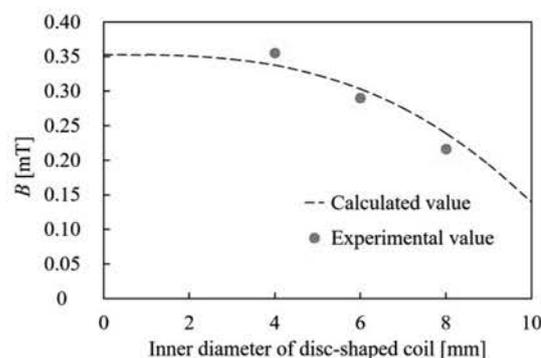


Fig.4 Magnetic flux density at the position of the Hall element.

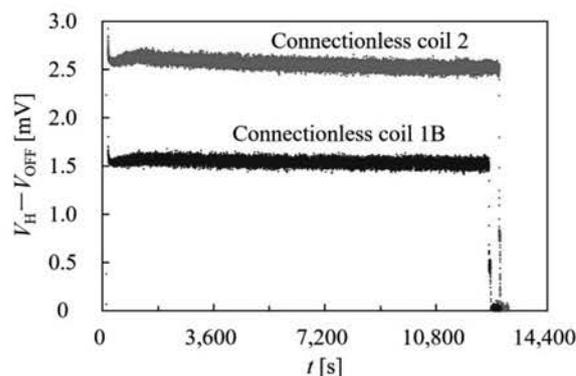


Fig.5 Time change of output voltage of Hall element.

(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		F	
阿部 格 (東芝 ESS)	87, 92	淵野 修一郎 (東大)	28, 29, 42
阿部 充志 (KEK)	3	藤川 静一 (神戸大)	76
安部 信吾 (福岡工大)	126, 129	藤本 大貴 (九大)	105
足立 伸太郎 (京都先端科学大)	33	藤本 竜那 (成蹊大)	67
AHMED Muhammad Afiq (京都先端科学大)	33	藤野 正人 (京大)	92
相澤 耕佑 (東大)	72	藤岡 慎介 (阪大)	114
赤澤 輝彦 (神戸大)	47	藤原 裕也 (アルバック)	69, 118
秋池 良 (東ソー)	122, 123	福田 真菜 (NIMS)	26
秋田 有輝 (神戸大)	47	福井 聡 (新潟大)	81, 89, 92, 96
秋澤 涼介 (東大)	72	福本 祥一 (山本電機製作所)	125
ALBESSARD 恵子 (東芝)	50, 51	福山 風人 (京都先端科学大)	33
ALEXANDRE Zampa (東大)	138	古梶 雅裕 (山口理大)	27
雨宮 尚之 (京大)	89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97	古瀬 充穂 (産総研)	81
AMORIM Kenji (神戸大)	47	G	
安東 昂亮 (東京農工大)	132	GHIGNA Tommaso (KEK)	72
青山 陽志 (神戸大)	47	後藤 英雄 (中部大)	85
新谷 昌人 (東大)	113	後藤 大人 (東北大)	55
ARNAUD Badel (Grenoble Alpes 大)	138	後燈明 拓見 (関西学院大)	32, 40
浅古 諒 (青学大)	99, 101, 102	H	
浅野 晃平 (神戸大)	47	箱石 裕人 (岩手大)	98, 100
芦生 龍太郎 (岩手大)	98	濱田 一弥 (量研機構)	4, 5, 6
淡路 智 (東北大)	16, 34, 59, 63, 85, 112, 128, 138	濱田 大夢 (鹿児島大)	131
AYUKARYANA Nur Rahmawati (東京農工大)	109	濱口 真司 (NIFS)	32, 57, 77
B		濱島 高太郎 (東北大)	8, 21
BADEL Arnaud (Grenoble Alpes 大)	16	韓 萌 (IEECAS)	63
伴野 信哉 (NIMS)	8, 10, 83	原 英和 (古河電工)	89
C		原田 直幸 (山口大)	140
力石 浩孝 (NIFS)	46	原田 義輝 (摂南大)	134
千藏 陽大 (東北大)	58	橋爪 秀利 (東北大)	9, 54, 58
千野 好輝 (青学大)	49	橋爪 健一 (九大)	71
E		畠 直輝 (青学大)	11, 65, 103
江口 朋子 (東芝)	50, 51, 87	秦 優作 (東北大)	55
遠藤 淳 (青学大)	99, 101, 102	早川 正夫 (NIMS)	25, 26
		林 一冴 (中部大)	20
		林 遼一 (京大)	95
		林 匠 (摂南大)	135
		辺見 努 (量研機構)	7
		日比 政昭 (NIMS)	25, 26

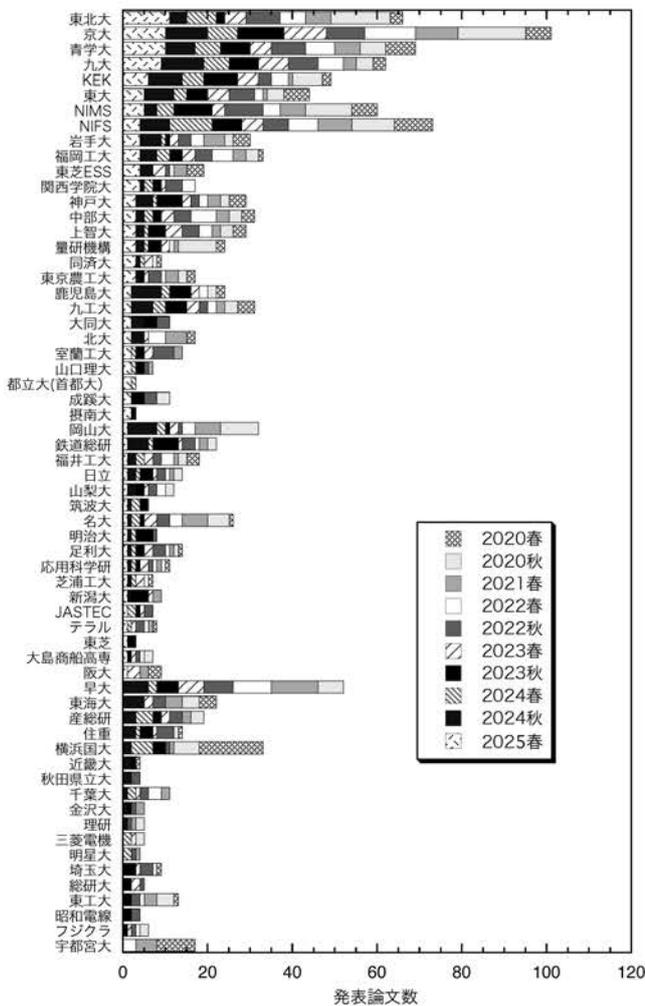
東川 甲平	(九大)	14, 17, 23 , 53	KAHAGALLA Pamoda (京都先端科学大)	33
姫野 雄輝	(九大)	18	海谷 真大	(成蹊大) 104
比村 元彦	(東北大)	9	梶 竜誠	(成蹊大) 104
日野 広生	(摂南大)	135	柁川 一弘	(山口理大) 27
平野 直樹	(NIFS)	21, 115, 121	覚前 陽太	(岩手大) 106
廣瀬 陽代	(産総研)	35	隠崎 遼河	(福岡工大) 128
HOANG Thuong (Minnesota 大)		72	神谷 宏治	(NIMS) 120
本田 元気	(住友電工)	11, 49, 65	金沢 新哲	(室蘭工大) 12, 13
堀出 朋哉	(名大)	64	神田 昌枝	(中部大) 20, 70 , 78
堀井 滋	(京都先端科学大)	33	金子 和宏	(上智大) 8
堀内 柚治	(都立大)	66	金子 卓人	(横浜国大) 15
星野 昌幸	(前川)	115	唐木 優河	(阪大) 114
星野 壮太	(上智大)	8	片桐 弘雄	(JSOL) 48
		I	片山 英樹	(NIMS) 25, 26
一條 裕貴	(東北大)	79	片山 伸彦	(カブリ数物宇宙連携研究機構) 72
飯田 光人	(たすく)	72, 113	片山 哲汰	(山口大) 140
飯沼 裕美	(茨城大)	3	加藤 向志	(中部大) 78
池本 由希子	(KEK)	36	加藤 志織	(青学大) 49
生田 博志	(名大)	108	川畑 秋馬	(鹿児島大) 130, 131
今川 信作	(NIFS)	32, 38, 39, 40, 57	河江 達也	(九大) 71
今西 翔音	(上智大)	86	川越 明史	(鹿児島大) 31, 43
稲垣 祐次	(九大)	71	川原 健太郎	(岡山大) 73
稲富 誉也	(東芝 ESS)	56	川畑 瑞穂	(上智大) 86
井上 昌睦	(福岡工大)	126, 127, 128, 129	川村 太一	(IPGP) 113
井上 良太	(岡山大)	73	川崎 剛輝	(都城高専) 31, 43
井上 智博	(九大)	31	河島 裕	(テラル) 81
井上 智博	(九大)	43	菊池 章弘	(NIMS) 1, 2, 4, 27, 58
石田 政義	(筑波大)	120	金 錫範	(岡山大) 73
石原 昌幸	(九大)	43	木村 史子	(京都先端科学大) 33
石井 涼太	(都立大)	66	木村 優大	(九大) 31, 43
石渡 翔大	(東京農工大)	108, 109	木村 豊	(アルバック・クライオ) 69
磯野 高明	(量研機構)	7	木須 隆暢	(九大) 14, 17, 23, 53
伊藤 海音	(東京農工大)	132	北口 仁	(NIMS) 8
伊藤 悟	(東北大)	9, 54, 58	小林 大輝	(筑波大) 120
伊東 徹也	(テラル)	81	小林 弘明	(JAXA) 32, 57, 77
伊藤 智庸	(東芝 ESS)	56, 87	小林 裕彬	(中部大) 78
IVANOV Yury	(中部大)	20, 70	小林 賢介	(理研) 86
岩熊 成卓	(九大)	18, 31, 35, 43	小林 慎一	(住友電工) 11, 49, 65
岩本 晃史	(阪大)	57, 114	児玉 一宗	(日立) 124
岩本 雄二	(神戸大)	47	小濱 芳允	(東大) 16
岩村 周	(鹿児島大)	131	小池 健生	(九大) 71
和泉 輝郎	(産総研)	35	小松 誠幸	(NIMS) 26
		K	小瀧 博司	(日立) 124
陰山 彰	(室蘭工大)	12	小柳 圭	(東芝 ESS) 56, 87
			久米 俊輔	(東北大) 59, 63
			國本 慧太	(青学大) 99, 101, 102

栗山 透	(東芝 ESS)	112	村上 大夢	(山口大)	140
草間 光治	(AES)	72	室井 孝太	(都立大)	15
L			N		
LEE Sergey	(Faraday Factory Japan)	35	長崎 陽	(東北大)	55, 79 , 138
李 遠鑑	(同済大)	116, 117	内藤 智之	(岩手大)	98, 100, 106, 107
羅 珺怡	(東北大)	63	中田 雅大	(京大)	30
			中川 潤	(カブリ数物宇宙連携研究機構)	72
M			中川 陽介	(神戸大)	125
馬 衍偉	(IEECAS)	63	中島 恒成	(成蹊大)	67
町 敬人	(産総研)	35	中本 建志	(KEK)	36
町屋 修太郎	(大同大)	60, 62 , 133	中村 一也	(上智大)	86
前田 明日香	(カブリ数物宇宙連携研究機構)	72	中村 美幸	(Faraday Factory Japan)	35
前河 大貴	(摂南大)	134	仲村 直子	(NIFS)	115 , 135
前川 一真	(神戸大)	76, 125	中村 武恒	(京大)	27, 30 , 44, 127
真島 周也	(東芝 ESS)	56	中西 優斗	(室蘭工大)	12
槇田 康博	(KEK)	21	大野 直子	(横浜国大)	15
豆塚 佑斗	(山口理大)	27	那須川 雄大	(青学大)	122, 123
間宮 広明	(NIMS)	37	夏目 恭平	(NIMS)	120
増田 光希	(明治大)	46	西島 元	(NIMS)	50, 51, 58, 124
増田 直樹	(西島)	27	西嶋 茂宏	(福井工大)	24
増山 新二	(大島商船高専)	37	西本 守	(東芝 ESS)	87
間藤 昂允	(北大)	88 , 137	西尾 樹	(アルバック)	69, 118
松本 明善	(NIMS)	61, 105, 124	西谷 慶輝	(東京農工大)	132
松本 要	(名大)	64	西山 凌平	(室蘭工大)	13
松村 知岳	(カブリ数物宇宙連携研究機構)	72	仁田野 陽菜	(中部大)	20, 70
松永 直也	(青学大)	99, 101, 102	野口 聡	(北大)	137
松尾 奏朗	(山口理大)	75	野島 渉平	(東北大)	16, 138
召田 雅実	(東ソー)	122, 123	野尻 将太	(青学大)	122
三部 勉	(KEK)	3	野村 直希	(福井工大)	24
三島 史人	(福井工大)	24	野村 新一	(明治大)	46
三品 海京	(山梨大)	22	野中 利昭	(東芝 ESS)	89, 92
三浦 正志	(成蹊大)	67, 104	野澤 正和	(タイ高専)	77
三浦 大介	(都立大)	66	野尻 将太	(青学大)	123
三浦 峻	(九大)	18, 31, 43	野末 竜弘	(アルバック・クライオ)	69
三浦 知仁	(西島)	27	西田 凌	(摂南大)	135
宮腰 真卓人	(京大)	91	O		
宮崎 寛史	(九大)	18, 31, 43	大淵 匠真	(関西学院大)	32, 38 , 39, 40
宮寄 智也	(九大)	23	落合 陽介	(九大)	71
水口 佳一	(都立大)	15	小田 靖久	(摂南大)	134 , 135
水野 謙一郎	(MTL)	16	緒形 俊夫	(NIMS)	26
水登 伊知郎	(東京農工大)	109	緒方 康博	(テラル)	81
森平 淳志	(アルバック)	118	小川 純	(新潟大)	81, 96
元木 貴則	(青学大)	11, 19, 49, 65, 99, 101 , 102, 103, 122, 123	大木元 勇貴	(成蹊大)	67, 104
村上 陽之	(量研機構)	4, 5, 6	荻津 透	(KEK)	3, 36

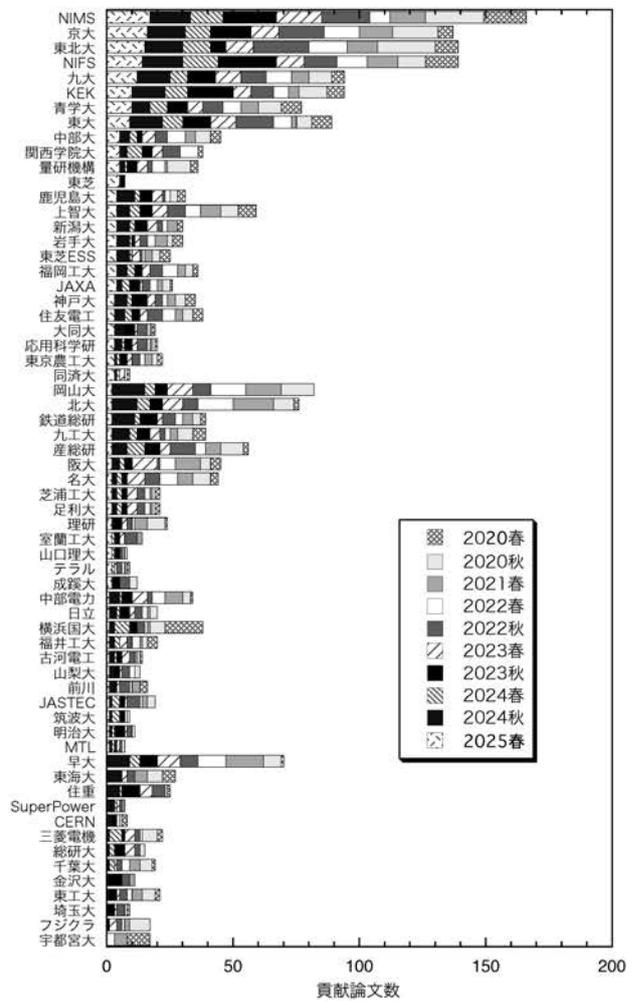
太子周	(九大)	71	津田理	(東北大)	55, 79, 138
高田卓	(NIFS)	77			
高田芳宏	(山本電機製作所)	125			U
高木紀和	(東芝 ESS)	112	内田健哉	(東芝)	56
高橋明	(京大)	92	植田浩史	(岡山大)	73
高橋慶	(山口大)	140	上垣柊季	(京大)	90, 94
高橋弘紀	(東北大)	112	上山明日羽	(山口大)	140
高橋政彦	(東芝 ESS)	112	浮田啓悟	(鉄道総研)	121
高橋正希	(福岡工大)	126, 129	宇野淳也	(量研機構)	5
高橋雅人	(理研)	110	浦中智貴	(九大)	61
高橋直人	(KEK)	36	宇都達郎	(東芝 ESS)	56, 87, 92
高畑一也	(NIFS)	74	宇藤裕康	(量研機構)	8
高城凜	(福岡工大)	128	宇都宮銀汰	(福岡工大)	126, 127, 129
高久諒太	(KEK)	72			W
鷹見重幸	(NIFS)	77			
高尾智明	(上智大)	86	和田健太郎	(NIMS)	25, 26
高山茂貴	(東芝 ESS)	89, 92	脇耕一郎	(鉄道総研)	121
高柳智弘	(原子力機構)	3	WANG Chenguang (同済大)		116, 119
武田実	(神戸大)	76, 125	王旭東	(KEK)	1, 2, 4
武田泰明	(NIMS)	50, 51	渡辺裕文	(中部大)	20, 70, 78
武居淳一郎	(北大)	137	渡邊飛龍	(理研)	110
竹本悠莉	(室蘭工大)	12	渡邊遼菜	(摂南大)	135
竹内正基	(RIMTEC)	4	渡部智則	(中部電力)	81
武輪裕之	(東芝 ESS)	112	渡辺陽平	(JSOL)	48
田村怜於	(東北大)	54	呉澤宇	(九大)	14, 17, 53
田邊豪	(潤工社)	2			X
田中秀樹	(日立)	124			
田中賢一	(KEK)	36	許光煒	(京大)	97
田中智	(JAXA)	113	許航	(明治大)	46
田中湧也	(上智大)	86	XUE Mingzhe (同済大)		116
たに浩司	(JSOL)	48			Y
垂水聖也	(都立大)	66			
田代理一郎	(福岡工大)	126, 127, 128, 129	谷貝剛	(上智大)	8, 10, 21
寺田隼斗	(NIMS)	26	矢口結翔	(東北大)	34
寺田典樹	(NIMS)	37	山田隆	(JSOL)	48
寺西亮	(九大)	61, 105	山田穰	(中部大)	61
寺尾悠	(京大)	28, 29, 41, 42, 72	山口作太郎	(中部大)	20, 70, 78
寺島昭男	(KEK)	1, 2	山口優斗	(福岡工大)	127
徳田進之介	(東京農工大)	132	山本明保	(東京農工大)	108, 109, 132
富田優	(鉄道総研)	121	山本真嘉	(京大)	44
戸坂泰造	(東芝 ESS)	56, 87, 92	山本実奈	(中部大)	70
土橋隆博	(東芝 ESS)	112	山本聡	(量研機構)	5
土屋勝彦	(量研機構)	5	山本颯真	(九工大)	45
土屋清澄	(KEK)	1, 2	山本壮真	(摂南大)	134
土屋雄司	(東北大)	16, 34, 59, 63, 85, 128, 138	山中慎大	(都立大)	15
			山下愛智	(都立大)	15

山崎 俊夫	(理研)	86	由利 哲美	(NIMS)	26
柳 長門	(NIFS)	9, 54	小山 湧也	(京大)	97
柳澤 吉紀	(理研)	86			
横山 和哉	(足利大)	110, 111			Z
横山 彰一	(JASTEC)	52	ZANI Louis	(Fusion for Energy)	6
吉田 隆	(名大)	64	ZHANG Cunman(同済大)		116
吉原 健彦	(住友電工)	11, 49, 65	ZHANG Shurui (同済大)		116, 119
于 澄	(東大)	139	ZHANG Yifei (SuperPower)		62
結城 和久	(山口理大)	75	朱 紹偉	(同済大)	116, 117, 119
結城 光平	(山口理大)	75			

所属別発表論文数の推移



所属別貢献論文数の推移



複 写 さ れ る 方 に

公益社団法人低温工学・超電導学会では、複写複製、転載複製及びAI利用に係る著作権を一般社団法人
学術著作権協会に委託しています。

当該利用をご希望の方は、(社)学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している許諾システム
を通じてご申請下さい。

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ください。

本誌に掲載された講演概要の著作権は低温工学・超電導学会が所有しています。

第109回 2025年度春季

低温工学・超電導学会研究発表会

講演概要集

2025年5月28日 発行

発行／公益社団法人 低温工学・超電導学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-12-8 バレドール本郷 302号

電話 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573

E-mail: cssj@csj.or.jp URL: <https://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／スピード冊子印刷ドットコム

〒815-0031 福岡市南区清水2-15-30

未知の極低温技術への挑戦



*Offering Manufacturing High-end Cryogenic Equipment
on Your Request in addition to Regular Items*



極低温技術を通じて未来社会の創出に貢献します



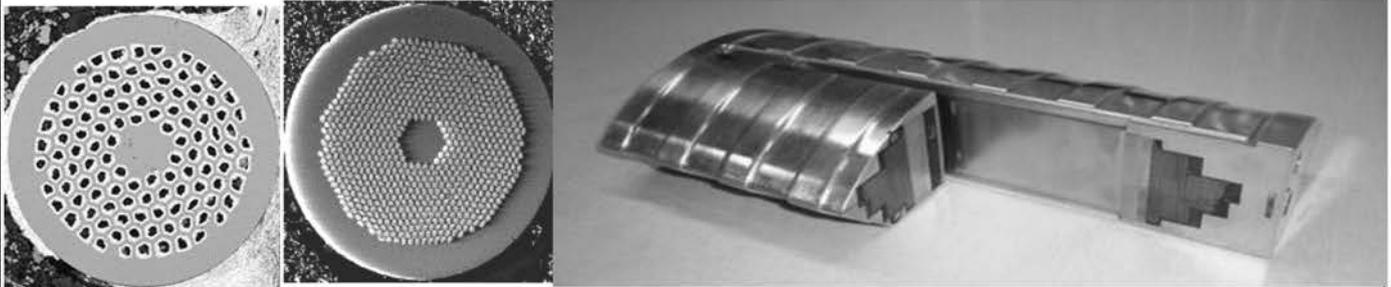
株式会社ジェック東理社

〒350-0833 埼玉県川越市芳野台2丁目8番52号

URL: <https://www.jecctorisha.co.jp> Email: U35915@jecctorisha.co.jp



米国Hyper Tech社は、アプリケーションや研究用途に合わせ様々なMgB2線をご提供いたします。またMgB2 マルチフィラメント線を使用したソレノイドコイルを設計及び製作も可能です。NbTi、Nb3Sn、MgB2、BSCCO、(RE)BCO超電導体を用いた伝導冷却超電導コイルもご提供できます。



DC & AC MgB2 wire

High Jc Nb3Sn wire

MgB2 rotor coil for 2 MW high speed, 15000 rpm motor

スターリング式冷凍機



SUNPOWERはGe検出器・IR検出器・電波望遠鏡・人工衛星・国際宇宙ステーション・レーザーダイオード冷却等の最先端研究分野で活躍しています

CryoTel® DS Mini

Dual-Split Mini Cryocooler



米国 SUNPOWER 社は、フリーピストン スターリング技術の世界的リーダーです。信頼性の高い効率的なスターリングエンジン及び冷凍機を製造しています。サンパワーのエンジニアリングサービスは、フリーピストンスターリングエンジンの試作品の設計、開発及び、製造まで対応します。CryoTel®冷凍機は優れた性能、製造精度、品質を持っています。

	分離型		一体型	
	DS Mini	MT	CT	GT
Nominal Lift @77K	1.8W	5W	11W	16W
Nominal Cooler input power	45W	80W	160W	240W
重量	1.2Kg	2.1kg	3.1kg	
最低到達温度	40K			
平均故障時間 (時間)	120,000(goal)		200,000	



日本代理店
仁木工芸株式会社

URL <http://www.nikiglass.co.jp>

東京支社 〒140-0011 東京都品川区東大井5-26-22
大阪営業所 〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島3-18-21

TEL : 03-4218-4700 FAX : 03-4212-3423
TEL : 06-6390-3220 FAX : 06-6390-3221

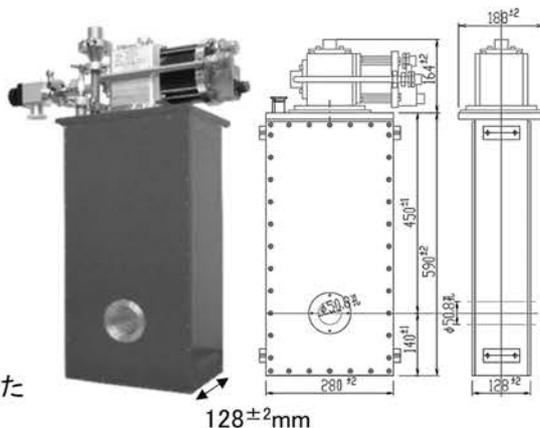
超薄型 無冷媒超電導マグネット

国内初!!

超電導マグネット厚さ $128\pm 2\text{mm}$ 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 $\pm 6\text{T}$
- ▶室温ボア径 $\phi 50.8\text{mm}$
- ▶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

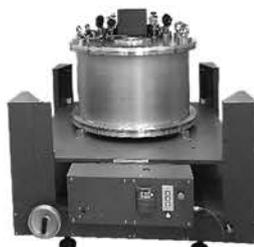


無冷媒超電導マグネットシリーズ

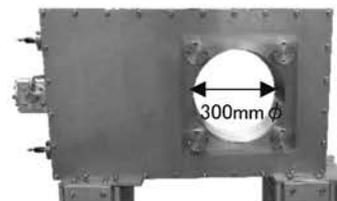
超電導マグネットメーカーとして設計から製作まですべて自社で実施しています
使用用途に応じた超電導マグネットの製造が可能です。ご要望をお聞かせください

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	
10T	70mm	
ヘルムホルツコイル	5T	50mm
	7T	50mm



▲10Tソレノイドコイル
オプション: GP-IB制御装置付き台車



▲5Tソレノイドコイル
室温ボア径 300mm ϕ

無冷媒超電導マグネット式高感度VSMシステム



-システム構成例-

◀ 6Tソレノイドコイル型 超電導マグネット式VSM

超電導マグネットメーカーの強みを活かし
測定可能サンプルサイズを国内外最大の
10mmcubeまで可能としました



▲超電導マグネット部



▲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フループ測定 15分。発生磁界に応じて変化します
測定温度	室温、室温 $\sim 900^\circ\text{C}$ 、液体窒素温度 $\sim 200^\circ\text{C}$
ラインナップ	5T \sim 10T ソレノイドコイル式超電導マグネット型VSM 5T \sim 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
The Gas Professionals

大陽日酸の極低温機器システム

ヘリウム液化装置

Helium Liquefier

Linde社製 高効率新型膨張タービンを搭載

ニーズに応える高性能高信頼性を実現

- コンパクト設計
- ダイナミックガスベアリング式膨張タービン採用
- コンピュータ制御による全自動運転
- 8,000時間以上の連続運転
- 数多くの納入実績
- 万全のメンテナンス体制
- 消費電力が小さく、ランニングコストが低い
- 圧縮機をガス設備とすることが可能

主な仕様

機種		L70	L140	L280
圧力1.0MPaG ^{※1} 未満時の保証液化能力 ^{※2} ()内はLN ₂ 予冷なし	周波数	32~63L/h (14~29L/h)	79~108L/h (34~50L/h)	153~233L/h (76~115L/h)
	周波数	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

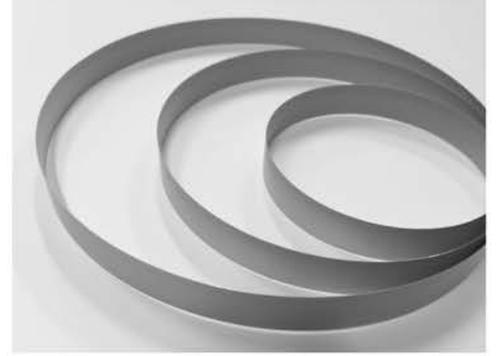
〒210-0861 川崎市川崎区小島町6-2(京浜事業所)

Tel:044-288-6937 Fax:03-6866-0111

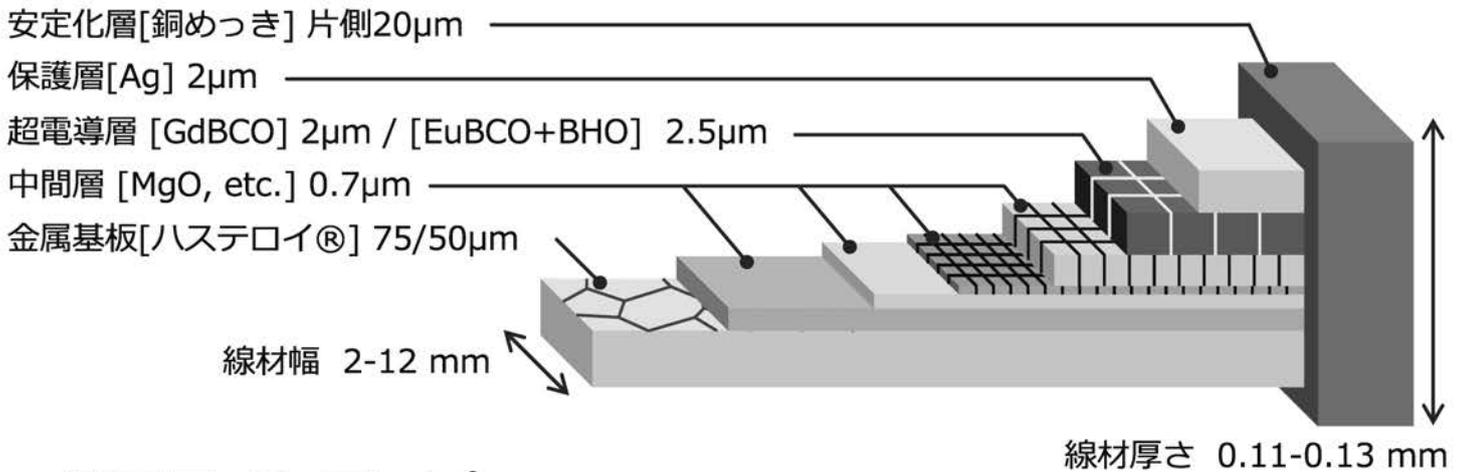
Fujikura レアアース系高温超電導線材

■ 特徴

- マグネット応用に適した高機械強度・高臨界電流特性
- フジクラ独自の主要製造技術 IBAD・PLD法
- 人工ピン導入により低温・高磁場での磁場中臨界電流特性を向上



■ 線材構造



■ 製品ラインアップ

型番	線材幅 [mm]	線材厚さ [mm]	金属基板 [μm]	安定化層 [μm] ^{*4}	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	≥ 80	480	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	≥ 130	640	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH04(05)	4	0.07	50	5	≥ 130	640	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	≥ 450	1,920	人工ピン ^{*2}
FESC-S12 ^{*1}	12	0.06	50	—	≥ 450	—	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。

*4 銅厚さをカスタマイズする対応も可能ですので、ご要望ございましたらご相談下さい。(5μm、10μm、40μm等)

株式会社フジクラ 超電導事業部

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440

TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472

E-mail ask-sc@jp.fujikura.com

HELIALは進化しています。

忘れてませんか？ AIR LIQUIDEを

フランスの物理学者ジョルジュ・クロードが液体空気の製造に成功し、彼と実業家ポール・デロルムによりエア・リキードが設立されたのが1902年。5年後の1907年には早くも日本での酸素製造事業がスタートして、さまざまな極低温の経験と最先端技術ノウハウを集結して高品質と高効率の製品を生み出しています。



HELIAL	SL	ML	LL	XL
Capacity range with LN2	20 L/h to 85 L/h	100 L/h to 175L /h	200 L/h to 400 L/h	500 L/h to 600 L/h
Comp motor rated power	< 90 kW	< 160 kW	< 315 kW	< 500k W

自社（AIR LIQUIDE社）製のタービンを採用しています。
 また、液化効率を引き出すためにエア・リキード社は最先端技術を基に研究開発を重ねています。

ガスから液化・冷凍装置まで

技術の小池

極低温のトータル・システムサプライヤー

Linde 社製

ヘリウム液化・冷凍装置

トータルシステムで 対応します

小池酸素は、1976年にヘリウム液化機を販売して以来、多くの大学・研究機関に種々のヘリウム液化機および関連装置を納入させていただいております。

納入にあたっては、さまざまなニーズに対応できる当社システムエンジニアが、回収・精製・液化のリサイクルシステムの設計・制作・据付けにあたり、トータルに行なっております。



L70、140、280タイプ

●15～280 ℓ/hの標準液化装置

膨張タービンとスクリーコンプレッサーの採用、精製器内蔵などによる高効率、高信頼性のシステム

●標準および特殊仕様の冷凍装置



250L 100L 50L

クライオサーム社製

液体ヘリウム容器

●HELIOS 50A

●STRATOS 100SL-J

●IONOS 250

その他必要に応じて御対応いたします。

□その他 取扱品目

ヘリウムガス精製器、各種クライオスタット、各種真空配管
ヘリウムガス回収用機器（高圧圧縮機、長尺容器、ガスバッグ）

リンデ社ヘリウム液化装置国内販売代理店



小池酸素工業株式会社
KOIKE SAN SO KOGYO CO., LTD.

<http://www.koikeox.co.jp>

ガス部 極限グループ

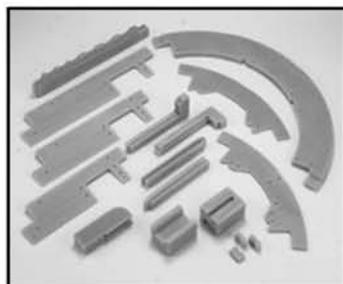
〒136-0072 東京都江東区大島9-1-1

TEL03-5875-5045 FAX03-5875-5496

低温下で使用する樹脂加工品販売

GFRP(G10)・プラスチック材料の加工

75年以上の歴史とその中で培った加工技術、技術提案力と圧倒的な先端機械設備をフル活用し、切削加工によるモノづくりを行っています。小ロットの合成樹脂、プラスチックの精密機械加工、複雑な3次元形状の製品加工にも対応しています。材料選定からお気軽にご相談下さい。



GFRP加工品



GFRP加工品



エンプラ加工品



PEEK加工品



昌立工業株式会社

【本社・工場】

〒664-0837 兵庫県伊丹市北河原5丁目3番12号

TEL:072-771-6132 FAX:072-771-6112 Email:shoritsu@arion.ocn.ne.jp

低温工学・超電導学会 発行誌 広告のご案内

【 低 温 工 学 】

普通) 1色1P ¥65,000 1色1/2P ¥40,000

【 春・秋大会・講演概要集 】

後付) 1色1P ¥65,000 1/2P ¥40,000

※金額は税別です。

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

MEIHOsha
ADVERTISING AGENCY

株式会社 明 報 社

〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル

TEL(03)3546-1337 FAX(03)3546-6306

E-mail:info@meihosha.co.jp HP: www.meihosha.co.jp

薄肉溶接パイプ

- ・薄肉成形ベローズ用パイプ
- ・キャンドモータ用キャン
- ・ロールツーロール用スリーブ
- ・真空断熱容器用筒
- ・パンチングスクリーン円筒溶接



薄肉レアメタル溶接

- ・タンタルるつぼ
- ・ニッケル電鍍スタンパ溶接
- ・チタン製医療器具
- ・クライオスタット銅部品溶接
- ・コバル端子溶接
- ・18Kゴールド触媒部品



精密溶接を極め、より高度な

ご要望にお応えします

溶接加工はもとより治具製作から切断工程、検査までの一貫体制により、高品質を実現するとともに、ご要望に応じた品目・サイズに1個から柔軟に対応します。



耐真空溶接

- ・NW、ICFなど各種真空フランジ組立溶接
- ・MRI、NMRなど極低温装置のトランスファーチューブ溶接組立
- ・VCRなど真空継手溶接
- ・ウエハー搬送ロボット部品
- ・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



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

全自動無冷媒 [開発中]
希釈冷凍機

77K



20K



10K



4K



<10mK

液体窒素ジェネレーター



クライオポンプ



冷凍機を応用したクライオポンプ及び低温機器製品の
設計・製造・販売・サービスまで一貫体制で提供します



ヘリウム再凝縮装置

- 既存のクライオスタットへ直接取り付けることによりヘリウムロスの削減が可能です。
- ヘリウムの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 H:835

NMR装置搭載モデル TRG-305DS



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スファー不要
- ・設置に必要な天井高を大幅に緩和 ※当社従来比



BRUKER製 ASCEND400への取付例

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 H:660

※1) 300Kのヘリウムガスを使用した場合となります。

※2) トランス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

— お問い合わせ —