



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.103 (2022)

第103回 2022年度春季

低温工学・超電導学会

講演概要集

2022年
6月20, 21, 22 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

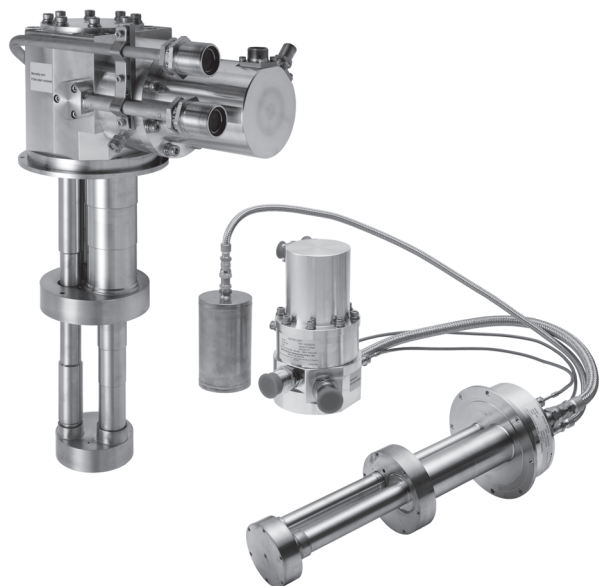
協賛 応用物理学会、日本物理学会、日本機械学会、
日本冷凍空調学会、電気学会、日本表面真空学会

103回

充実の「極低温冷凍機」のラインアップで、お客様の価値創出に貢献する「冷却ソリューション」をグローバルに提供します。

PULSE TUBE CRYOCOOLER NEW MODEL

従来のパルスチューブ冷凍機に更にパワーアップした機種が加わりました！



		RP-082B2	RP-182B2S
2段冷却能力		1.0W	1.5W
1段冷却能力(50/60Hz)		40W @45K	36W @48K
最低到達温度 ※1)		<3.0K for reference only	<2.8K for reference only
圧縮機仕様	冷却方法	Water	Water
	電気特性	3Phase 200V, 50/60Hz 3Phase 380-415V, 50Hz 480V, 60Hz	3Phase 200V, 50Hz 200,230V, 60Hz 3Phase 380,400,415V, 50Hz 460,480V, 60Hz

※F-70(水冷)との組み合わせ仕様

※圧縮機はF-100を使用

※圧縮機は高圧ガス対応品です

※1) 最低到達温度は参考値です(環境温度により異なります)。

※2) 28℃を超える場合、冷凍能力が最大で10%低下する可能性があります。

※3) 仕様は予告なく変更することがあります。

4KGMCRYOCOOLER NEW MODEL

従来の4KGM冷凍機に更にパワーアップした機種が加わりました！



		RDE-412D4	RDE-418D4
2段冷却能力		1.25W	1.8/2.0W
1段冷却能力(50/60Hz)		53W/60W @43K	42W/50W @50K
最低到達温度 ※1)		<3.5K for reference only	<3.5K for reference only
圧縮機仕様	冷却方法	Air/Water	Air/Water
	電気特性	3Phase 200V, 50/60Hz 3Phase 380,400,415V, 50Hz 480V, 60Hz	3Phase 200V, 50/60Hz 3Phase 380,400,415V, 50Hz 480V, 60Hz

※F-50(水冷)との組み合わせです

※1) 最低到達温度は参考値です(環境温度により異なります)。

※2) 28℃を超える場合、冷凍能力が最大で10%低下する可能性があります。

※3) 仕様は予告なく変更することがあります。

2022 年度春季低温工学・超電導学会

2022 年 6 月 20 日（月）～ 6 月 22 日（水）

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： 正会員 * 10,000 円，賛助会員等 ** 12,000 円，学生 4,000 円，非会員（一般）20,000 円，
非会員（学生）5,000 円

（講演概要集のみ：正会員 5,000 円，賛助会員等 ** 5,000 円，学生 2,500 円，非会員（一般）7,000 円）

* 65 歳以上で所定の手続きを終えた正会員は参加費 5,000 円

** 賛助会員，事業会員および協賛等団体に属する個人参加者。所属団体を証する会員証等の提示が必要

懇親会： 6 月 21 日（火） 18:30 - 20:30

キリンシティタワーホール船堀

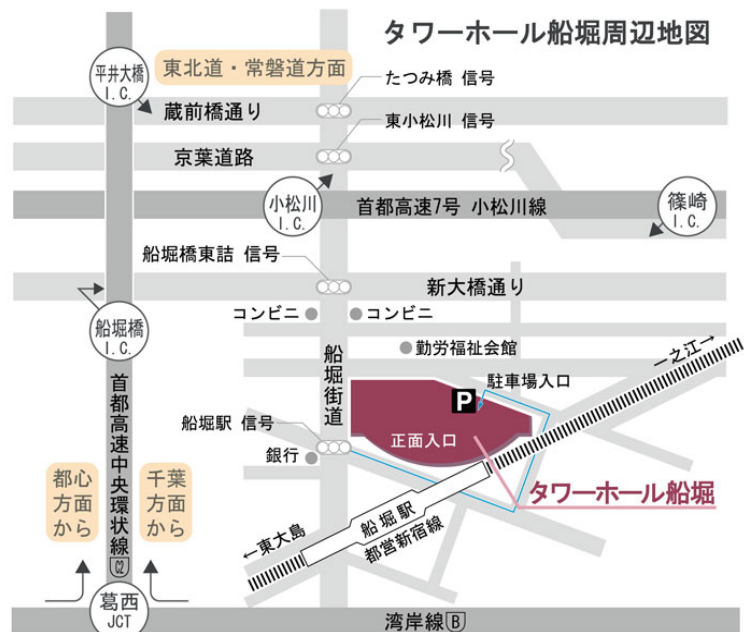
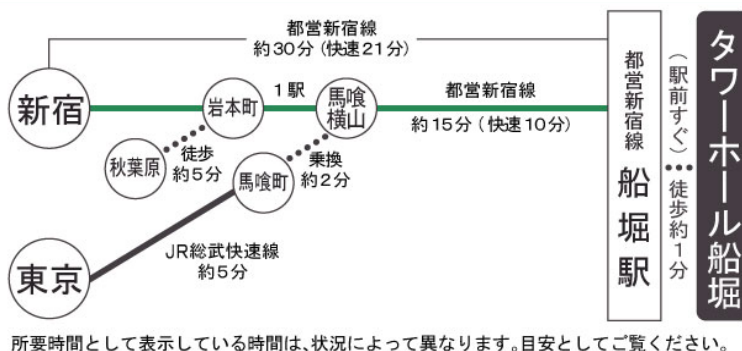
参加費：6,000 円

主 催： 公益社団法人 低温工学・超電導学会

電話：03-3818-4539 Fax：03-3818-4573

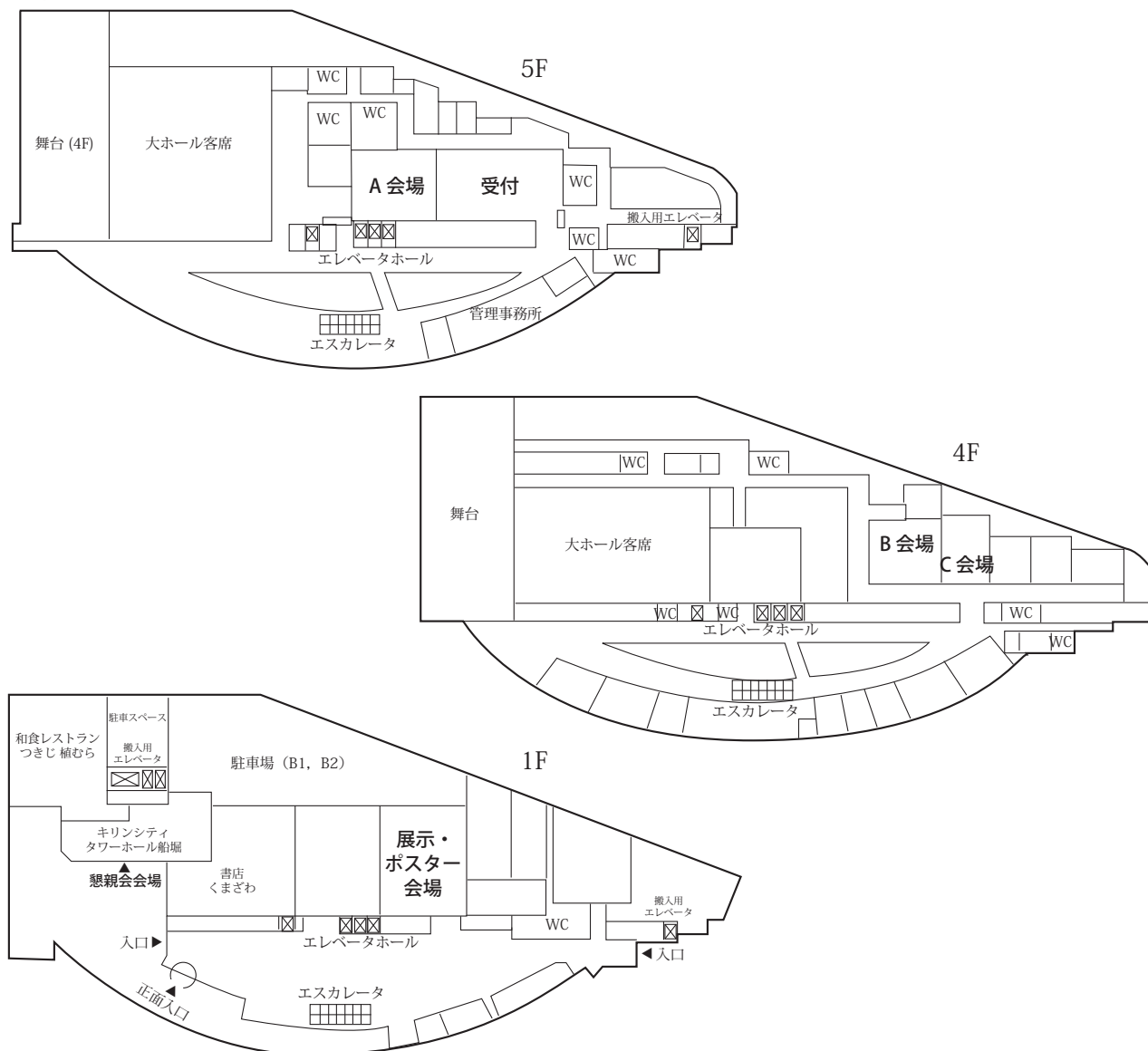
協 賛： 応用物理学会，電気学会，日本物理学会，日本機械学会，日本表面真空学会，日本冷凍空調学会

交通案内：都営地下鉄新宿線船堀駅下車徒歩 1 分



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

会場配置図：タワーホール船堀



講演の形式：詳細は低温工学・超電導学会のホームページをご覧ください。

<https://www.csj.or.jp/conference/2022s/>

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。今回発表をオンラインで配信するのに伴い、現地での発表におきましては、会場に備えつけのPCを使用していただきます。PCを持ち込んでの発表はできませんので注意してください。また口頭発表者の方にも、WEB会場にご自身の講演ブースが用意されます。適宜発表資料をアップロードいただき、研究交流にご活用ください。「人の見える化」推進のため、ご自身のポートレートアップにご協力をお願いします。

※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：ポスター発表は現地およびオンライン上で行われますが、いずれの場合も発表資料をあらかじめWEB会場のご自身の講演ブースにご自身でアップロードしておいてください。掲示板・オンライン会議アプリを通して質疑応答可能です。現地発表者の方もWEB会場でのご質問に適宜ご対応ください（オンタイムでなくて構いません）。「人の見える化」推進のため、ご自身のポートレートアップにご協力をお願いします。

ポスター手短紹介：ポスターセッションの前に「ポスター手短紹介」が行われます。オンラインでは、現地で紹介される方は声のみ、オンラインのみの発表の方に対しては、あらかじめご提出いただいた1分以内の紹介動画を配信いたします。

2022 年度春季低温工学・超電導学会 セッションテーブル

	A 会場	B 会場	C 会場
6 月 20 日 (月)	受付 9:30 ～		
	10:30 - 11:45 REBCO 線材作製・評価 p. 1	10:30 - 12:00 超電導応用 (1) p. 12	10:45 - 11:45 計測・低温流体 p. 26
	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) 循環冷却 p. 36, HTS 電流輸送特性 p. 37, 安定性・保護 (1) p. 41, HTS 交流特性 p. 47		
	15:15 - 16:45 SCSC ケーブル p. 6	15:15 - 16:45 REBCO 薄膜・バルク作製 p. 18	15:15 - 16:15 冷却・冷凍 p. 29
		17:00 - 17:30 Nb ₃ Sn 反応基礎 p. 24	16:30 - 17:15 超電導・低抵抗接続 (1) p. 33
6 月 21 日 (火)	9:15 - 10:15 HTS 臨界電流特性 p. 50	9:30 - 10:30 MgB ₂ p. 61	9:30 - 10:30 医療用加速器 p. 71
	10:30 - 12:15 送電ケーブル p. 54	10:45 - 12:15 バルク着磁・応用 p. 65	11:00 - 12:15 磁気分離 (1) p. 75
	昼食		
	ポスター手短紹介 13:15 - 13:30 (A 会場)		
	ポスターセッション II 13:30 - 14:45 (Poster 会場) 超電導・低抵抗接続 (2) p. 80, 超電導応用 (2) p. 83, 加速器 / 核融合 (1) p. 89, 磁気分離 (2) p. 92		
	論文賞受賞記念講演 p. 94 15:00 - 16:00 (A 会場)		
	特別セッション 16:15 - 17:00 (A 会場) フェロー塾「ピンチを乗り越えエンジニア」		
	社員総会 17:15 - 18:15 (A 会場)		
6 月 22 日 (水)	懇親会 (キリンシティタワーホール船堀) 18:30 - 20:30		
	9:15 - 10:30 安定性・保護 (2) p. 96	9:30 - 10:30 ピンニング p. 106	9:15 - 10:30 核融合 (2) p. 113
	10:45 - 12:00 HTS コイル・解析 p. 101	10:45 - 11:30 臨界電流測定 p. 110	10:45 - 11:45 加速器 p. 118
	昼食		
6 月 22 日 (水)	13:00 - 17:00 (公社) 低温工学・超電導学会主催 一般公開シンポジウム 「カーボンニュートラル社会創出に向けて ー低温工学・超電導技術の役割を語るー」		

※プログラムの詳細は <https://csj.or.jp/conference/2022s/> をご覧ください。

※各会場とも換気のため常時窓・扉を開放しています。

2022 年度春季低温工学・超電導学会 研究発表会 運営委員会

研究発表会実行委員会

委員長	谷貝 剛	上智大学
委 員	高尾 智明	上智大学
	中村 一也	上智大学

プログラム編成委員会（企画委員会）

委員長	伴野 信哉	学会運営担当 / 物質・材料研究機構
副委員長	井上 昌陸	プログラム編成担当 / 福岡工業大学
委 員	岩井 貞憲	東芝エネルギーシステムズ
	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
	日高 睦夫	産業技術総合研究所
	宮城 大輔	千葉大学
	村上 陽之	量子科学技術研究開発機構
	横山 和哉	足利大学

オブザーバー（前委員長）

古瀬 充穂	産業技術総合研究所
-------	-----------

6月20日(月)
受付開始 9:30～

※一般講演の発表時間はすべて10分、質疑応答5分です。
プログラム番号の例
1A-a05: 1日目A会場の午前5番目
1B-p05: 1日目B会場の午後5番目
※タイトル、著者、所属は講演申し込み時のものです。

6月20日(月) A会場 10:30-16:45

REBCO 線材作製・評価 10:30-11:45 座長: 寺西 亮

- 1A-a01 新構造 REBCO 線材の導電性中間層に求められる抵抗率の検討----- 1
土井 俊哉, 村本 周平, 内田 翔, 川山 巖 (京大)
- 1A-a02 $\text{Sr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_3$ を導電性中間層に用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 短尺線材----- 2
内田 翔, 松村 実典, 青木 星也, 川山 巖, 土井 俊哉 (京大)
- 1A-a03 超伝導-金属 2 層構造を用いた表面バリアの制御による $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の超伝導整流特性の向上----- 3
山本 健太郎 (名大); 土屋 雄司 (東北大); 鶴田 彰宏 (産総研); 吉田 隆 (名大)
- 1A-a04 機械学習超解像による Hall 素子配列で取得した REBCO 高温超伝導コート線材の
磁気観察像の高解像度化----- 4
高明陽, 木須 隆暢, SOMJAIJAROEN Natthawiro, 呉 澤宇, 東川 甲平 (九大)
- 1A-a05 磁気顕微鏡観察への物体検出の導入による長尺 REBCO 線材内の局所 I_c 不均一性の評価----- 5
SOMJAIJAROEN Natthawiro, 木須 隆暢, 今村 和孝, 呉 澤宇, 東川 甲平 (九大)

昼食 12:00-13:00

ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00-13:45 (A会場)

SCSC ケーブル 15:15-16:45 座長: 東川 甲平

- 1A-p01 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2022 年春) (1):
二層スパイラル銅複合多芯薄膜線材の磁化損失測定----- 6
重政 茉於, 曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p02 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2022 年春) (2):
GFRP インサートデュワーを用いた超伝導線の磁化損失測定----- 7
祖父江 卓哉 (京大), 藤田 寛和, 曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p03 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2022 年春) (3):
スパイラル導体における銅コアへの分流がクエンチ・保護特性に与える影響----- 8
許 光煌, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p04 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2022 年春) (4):
SCSC ケーブルにおける磁化損失のケーブル形状依存性----- 9
曾我部 友輔, 八鳥 孝志, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p05 SCSC ケーブルの研究開発の進捗 (2022 年春) (5):
層間偏流を考慮したスパイラル導体の全損失解析手法----- 10
曾我部 友輔, 播磨屋 稔, 李 陽, 雨宮 尚之 (京大)
- 1A-p06 SCSC ケーブルで構成されるスキニング電磁石の概念設計----- 11
李 陽, 曾我部 友輔 (京大); 岩田 佳之 (放医研); 雨宮 尚之 (京大)

6月20日(月) B会場 10:30-17:30

超電導応用 (1) 10:30-12:00 座長: 野村 新一

- 1B-a01 高周波用超伝導線材を用いた高 Q 値コイルによる高効率ワイヤレス電力伝送システム----- 12

關谷 尚人, 作間 啓太 (山梨大)

1B-a02	超電導体内の電界の時間変化を用いたリザバーコンピューティングに関する研究 -----	13
	有田 拳, 上田 天馬, 小田部 莊司, 宇佐美 雄生, 田中 啓文 (九工大); 松野 哲也 (有明高専)	
1B-a03	非円形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電力伝送特性 -----	14
	井上 良太, 井上 雄太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大)	
1B-a04	アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発 (4) - 定格出力での加熱試験概要 -----	15
	伊東 徹也, 河島 裕, 緒方 康博, 正 孝幸 (テラル); 福井 聡, 小川 純 (新潟大); 古瀬 充穂 (産総研); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力); 森下 勇樹, 長岡 孝, 府山 伸行, 縄稚 典生 (広島総技研)	
1B-a05	レーストラックコイルを用いた磁気浮上システムにおけるコイル直線部長さと浮上特性 -----	16
	中村 幸太, 園田 翔梧, 高尾 智明, 中村 一也 (上智大); 塚本 修巳 (横浜国大)	
1B-a06	超電導フライホイール用 SMB の開発 - 回転安定性向上策の検討 - -----	17
	宮崎 佳樹, 山下 知久, 小方 正文, 富田 優 (鉄道総研)	

昼食 12:00 - 13:00

REBCO 薄膜・バルク作製 15:15 - 16:45 座長: 船木 修平

1B-p01	極細多芯化を目指した REBCO 薄膜線材の開発 -----	18
	松本 明善, 立木 実, 大井 修一 (NIMS); 寺西 亮 (九大)	
1B-p02	Zr をパターニングした基板上への MOD-YBCO 薄膜の結晶配向制御 -----	19
	藤本 大貴, 寺西 亮 (九大); 大井 修一, 松本 明善 (NIMS)	
1B-p03	低 R_s ・高 J_c -REBa ₂ Cu ₃ O _y 薄膜を用いた高耐電力送信フィルタの設計 -----	20
	作間 啓太 (山梨大); 伊藤 慶信, 村上 純, 齊藤 敦 (山形大); 關谷 尚人 (山梨大)	
1B-p04	YBa ₂ Cu ₃ O _y を用いた磁場シールド材の作製 -----	21
	田丸 隼也, 寺西 亮 (九大); 井上 昌睦 (福岡工大); 岩熊 成卓 (九大)	
1B-p05	一方向溶融成長 (SDMG) 法による複雑形状 REBCO 溶融凝固バルクの直接育成 -----	22
	元木 貴則, 三輪 将也, 仙波 実怜 (青学大); 中村 新一 (TEP); 下山 淳一 (青学大)	
1B-p06	低包晶温度 REBCO 層を介した REBCO バルク間超伝導接合の試み -----	23
	三輪 将也, 元木 貴則, 仙波 実怜, 下山 淳一 (青学大)	

休憩 16:45 - 17:00

Nb₃Sn 反応基礎 17:00 - 17:30 座長: 斉藤 一功

1B-p07	高い一軸圧力下で放電プラズマ焼結した Nb ₃ Sn 超伝導バルク体の緻密化と磁束ピン止め特性 -----	24
	小山田 拓真, 内藤 智之 (岩手大)	
1B-p08	内部スズ法 Nb ₃ Sn 線材の層形成・超伝導特性に与える Ti 添加場所の影響 -----	25
	伴野 信哉 (NIMS); 森田 太郎, 谷貝 剛 (上智大)	

6月20日(月) C会場 10:45 - 17:15

計測・低温流体 10:45 - 11:45 座長: 槇田 康博

1C-a01	極低温真空条件下における接触熱抵抗測定と評価 -----	26
	上野 航生, 高橋 政彦, 高木 紀和, 栗山 透 (東芝エネルギーシステムズ)	
1C-a02	(取り消し)	
1C-a03	液体水素浸漬冷却 BSCCO 超電導コイルの過電流通電試験 -----	27
	大矢 輝, 白井 康之, 川崎 理香子, 松本 郁哉, 前田 佑一郎, 松本 岳, 塩津 正博 (京大); 今川 信作, 岩本 晃史, 濱口 真司 (NIFS); 津田 理, 長崎 陽 (東北大); 谷貝 剛 (上智大); 小林 弘明 (JAXA); 大屋 正義 (関西学院大)	

1C-a04	横振動下における極低温液体の流体シミュレーション-----	28
	池北 智亮, <u>武田 実</u> , 前川 一真 (神戸大)	

昼食 12:00 - 13:00

冷却・冷凍 15:15 - 16:15 座長：三戸 利行

1C-p01	磁気遮蔽方式による磁気冷凍の可能性に関する研究 ー 磁気冷凍の各種パラメータの冷却性能への影響 ー -----	29
	<u>平野 直樹</u> , 小野寺 優太 (NIFS); 高澤 拓海, 野口 正純, 岡村 哲至 (東工大)	
1C-p02	ディスプレイサパルス管冷凍機のハイブリッドモデル-----	30
	<u>朱 紹偉</u> , 郭 志敏 (同済大)	
1C-p03	パルスチューブ冷凍機の熱交換器に関する検討 -----	31
	<u>保川 幸雄</u> , 松本 伸, 溝口 義則, 柴田 将史 (富士電機); 上田 祐樹 (東京農工大)	
1C-p04	2 kW クラスの圧縮機で駆動する 4K-GM 冷凍機の可能性 -----	32
	<u>増山 新二</u> (大島商船高専); 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)	

休憩 16:15 - 16:30

超電導・低抵抗接続 (1) 16:30 - 17:15 座長：筑本 知子

1C-p05	高温超伝導ケーブルに適用するインジウム圧接の接合性能の接合条件依存性評価 -----	33
	<u>伊藤 悟</u> , 阿竹 洋輔 (東北大); 山本 春海, 恩地 太紀, 富田 優 (鉄道総研)	
1C-p06	1.3 GHz NMR 磁石への実装に向けた 高強度 Bi2223 線材間超伝導接合技術の開発-----	34
	<u>中井 優亨</u> , 稲葉 勇人, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); <u>武田 泰明</u> (NIMS); 末富 佑, 朴 任中, 柳澤 吉紀 (理研); 中島 隆芳, 山出 哲 (住友電工); 濱田 衛, 斉藤 一功 (JASTEC)	
1C-p07	高強度 Bi2223 線材間超伝導接合における 中間厚膜層の金属組成制御 -----	35
	<u>稲葉 勇人</u> (青学大); <u>武田 泰明</u> (NIMS); <u>中井 優亨</u> (青学大); 中島 隆芳, 山出 哲 (住友電工); 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)	

ポスター手短紹介 / 展示案内 13:00 - 13:45 (A 会場)

6月20日(月) ポスターセッションI Poster 会場 13:45 - 15:00

循環冷却 13:45 - 15:00 座長：仲井 浩孝

1P-p01	磁気冷凍を適用した循環冷却システムにおける循環方法の検討-----	36
	<u>野口 正純</u> , 岡村 哲至, 高澤 拓海 (東工大); <u>平野 直樹</u> (NIFS)	
1P-p02	(取り消し)	

HTS 電流輸送特性 13:45 - 15:00 座長：柁川一弘

1P-p03	ホール素子を用いた超伝導ケーブルコア周囲の磁場分布測定-----	37
	<u>大倉 大佑</u> , 筑本 知子, 山口 作太郎 (中部大)	
1P-p04	機械加工された REBCO 線材の面内臨界電流密度分布と微細構造観察-----	38
	<u>酒井 秀哉</u> (福岡工大); 山田 稜 (中部大); ZHAO Yue, ZHU Jiamin (Shanghai Superconductor Technology); 井上 昌睦 (福岡工大)	
1P-p05	REBCO 線材の高電界下における電流輸送特性評価 (3)-----	39
	<u>田中 祥貴</u> (福岡工大); 岩熊 成卓 (九大); 井上 昌睦 (福岡工大)	
1P-p06	銅安定化材を半田接合した REBCO 線材の電流輸送特性の有限要素解析-----	40
	<u>高橋 正希</u> , 田中 祥貴 (福岡工大); 岩熊 成卓 (九大); 井上 昌睦 (福岡工大)	

安定性・保護 (1) 13:45 - 15:00 座長：藤田 真司

1P-p07	径方向分割型解析手法を用いた無絶縁 REBCO コイル内 遮蔽電流磁場解析プログラムの妥当性評価-----	41
	太田 海斗, 小久保 早希, 白井 航大, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北大)	
1P-p08	無絶縁積層 REBCO コイルにおける遮蔽電流磁場低減のための通電波形-----	42
	内山 誠士郎, 小久保 早希, 糸日谷 浩平, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北大)	
1P-p09	層間接触不良領域 を有する REBCO パンケーキコイルの熱的安定性評価-----	43
	天野 一樹, 長淵 大河, 結城 拓真, 濱田 一希, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)	
1P-p10	劣化のある無絶縁 REBCO コイルの健全性の監視法に関する基礎的検討-----	44
	寺内 和, 結城 拓真, 長淵 大河, 濱田 一希, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)	
1P-p11	Multi-Stacked 無絶縁 REBCO パンケーキコイルシステムにおける局所的劣化発生時の 継続運転の可能性-----	45
	中村 太郎, 長淵 大河, 結城 拓真, 濱田 一希, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大)	
1P-p12	液体水素浸漬冷却高温超電導コイルの通電試験に向けたスプリット型 REBCO 外部磁場コイルの試作・検証-----	46
	山川 友翔, 村田 将一郎, 生田 勝利, 大屋 正義 (関西学院大); 今川 信作, 岩本 晃史 (NIFS); 白井 康之 (京大)	

HTS 交流特性 13:45 - 15:00 座長：寺尾 悠

1P-p13	ピックアップコイル法による短尺直線状 HTS 線材の交流損失測定システムの測定感度の改善-----	47
	永山 悟志, 植田 航太, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)	
1P-p14	パワーエレクトロニクス機器での使用を想定した条件下での HTS サンプルコイルの 交流損失測定結果の検討-----	48
	野木 大祐, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)	
1P-p15	REBCO 超伝導ダイオードを用いた超短波交流信号の整流特性-----	49
	土屋 雄司 (東北大); 水野 彰人 (名大); 鶴田 彰宏 (産総研); 尾崎 壽紀 (関西学院大); 吉田 隆 (名大)	

6月21日 (火) A会場 9:15 - 18:15

HTS 臨界電流特性 9:15 - 10:15 座長：松本 明善

2A-a01	長尺 Bi2223 線材の金属組成制御と臨界電流特性-----	50
	宮本 能伸, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 武田 宗一郎, 中島 隆芳, 山出 哲 (住友電工)	
2A-a02	$\text{Bi}_{2.2}\text{Sr}_{1.8}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶における臨界電流密度のドーピング依存性-----	51
	加藤 準一郎, 三野 裕太郎, SUGALI Pavan Kumar Naik (東京理科大); 中川 駿吾, 柏木 隆成 (筑波大); 石田 茂之, 永崎 洋 (産総研); 西尾 太郎 (東京理科大)	
2A-a03	Pre-tension を変えた高強度 Bi2223 線材における臨界電流 - 一軸ひずみ特性 -----	52
	岡田 達典, 小林 大地, 淡路 智 (東北大); 加藤 武志 (住友電工)	
2A-a04	臨界電流の曲げ歪依存性測定方法の改善について -----	53
	長村 光造 (応用科学研); 町屋 修太郎, 山根 昇悟 (大同大)	

休憩 10:15 - 10:30

送電ケーブル 10:30 - 12:15 座長：大屋 正義

2A-a05	人工ピン入り RE 系超伝導線材を用いた二層直流超伝導ケーブルの通電特性-----	54
	山口 稔平, 濱本 拓郎, 木内 勝 (九工大); 吉田 隆 (名大)	
2A-a06	再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性 (3) -----	55
	東川 甲平, 佐藤 暢星, 井手 暁仁, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)	
2A-a07	Bi2223 を用いた曲げ部とねじり部のある航空機用積層導体の臨界電流測定 -----	56

	神田 昌枝, 喜多井 勘太郎, 川合 修平, 山口 作太郎 (中部大)	
2A-a08	HTS テープ線材の短絡電流試験 – 2-----	57
	山口 作太郎, 江口 実穂, 神田 昌枝, IVANOV Yury (中部大); 二ノ宮 晃 (明治大)	
2A-a09	500 m 高温超伝導直流送電ケーブルの通電試験及び電流分布-----	58
	筑本 知子, 渡邊 裕文, IVANOV Yury, 日野 友明, 奥野 清, 井上 徳之 (中部大)	
2A-a10	500 m 高温超伝導直流送電ケーブルの冷却循環試験-----	59
	渡邊 裕文, 筑本 知子, IVANOV Yury, 日野 友明, 奥野 清, 井上 徳之 (中部大)	
2A-a11	三相同軸高温超電導ケーブルにおける内相が作る磁界が外相で生じる交流損失に及ぼす影響-----	60
	佐藤 亮太, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔 (千葉大); 長崎 陽, 津田 理 (東北大)	

昼食 12:15 - 13:15

ポスター手短紹介 13:15 - 13:30 (A 会場)

6月21日 (火) B 会場 9:30 - 12:15

MgB₂ 9:30 - 10:30 座長: 小田部 荘司

2B-a01	変動磁場用 MgB ₂ 線材の基礎検討 – 臨界電流密度と履歴損失 – -----	61
	田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司 (日立)	
2B-a02	IMD 法による 100 m 級銅安定化 7 芯 MgB ₂ 線材の開発ならびにこれを用いたソレノイドコイルの試作-----	62
	熊倉 浩明, 松本 明善, 西島 元 (NIMS); 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)	
2B-a03	MgB ₂ 薄膜の特性向上に必要な後アニール時間の検討-----	63
	山崎 輝, 田代 達哉, 川山 巖, 土井 俊哉 (京大)	
2B-a04	X 線 CT で撮影した MgB ₂ 多芯線材の画像処理法の検討-----	64
	尾崎 優一, 森脇 怜也, 福原 大貴, 井上 昌睦 (福岡工大)	

休憩 10:30 - 10:45

バルク着磁・応用 10:45 - 12:15 座長: 元木 貴則

2B-a05	Er-Ba-Cu-O 超伝導接合材を用いた接合 Gd-Ba-Cu-O バルクに対するパルス着磁法の捕捉磁場特性の評価-----	65
	竹村 賢人, 須藤 正照 (芝浦工大); DORGET Remi (Lorraine 大); DADIEL Longji, 坂藤 正樹 (芝浦工大); 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄, 村上 雅人, 坂井 直道 (芝浦工大)	
2B-a06	Spark Plasma Sintering 法で緻密化した前駆体から作製した GdBCO バルクの捕捉磁場特性 -----	66
	箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)	
2B-a07	REBCO バルク体のパルス着磁特性に関する数値解析-----	67
	横山 和哉, ASAAD Mahmoud, YU Cong (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)	
2B-a08	無酸素銅板 / MgB ₂ 超伝導バルク積層のパルス着磁における無酸素銅の効果Ⅲ: シミュレーション解析による実験結果の再現-----	68
	吉田 智貴, 内藤 智之 (岩手大)	
2B-a09	MVT 法 MgB ₂ 超伝導バルクの捕捉磁場特性モデリング -----	69
	池田 直生, 田中 里佳, 白旗 知暉, 山本 明保 (東京農工大)	
2B-a10	バルク MgB ₂ アレイを用いた周期交替磁場の生成 -----	70
	紀井 俊輝 (京大); 富田 優, 赤坂 友幸 (鉄道総研)	

6月21日 (火) C 会場 9:30 - 12:15

医療用加速器 9:30 - 10:30 座長: 鈴木 研人

2C-a01	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (その 1): 全体概要-----	71
	石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力);	

	福田 光宏 (阪大); 鷺尾 方一 (早大); 東 達也 (量研機構)	
2C-a02	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (その 2): 小型実証 REBCO コイルシステムの設計・製作 -----	72
	石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力); 福田 光宏 (阪大); 鷺尾 方一 (早大); 東 達也 (量研機構)	
2C-a03	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (その 3): 実規模コイルシステムの設計 -----	73
	野口 聡 (北大); 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力); 福田 光弘 (阪大); 鷺尾 方一 (早大); 東 達也 (放医研)	
2C-a04	「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (その 4): 実規模コイルシステムにおける遮蔽電流と電磁応力評価 -----	74
	植田 浩史, 仲井 悠貴, 井上 良太, 金 錫範 (岡山大); 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力); 福田 光宏 (阪大); 鷺尾 方一 (早大); 東 達也 (放医研)	

休憩 10:30 - 11:00

磁気分離 (1) 11:00 - 12:15 座長: 秋山 庸子

2C-a05	磁化メタン発酵法を活用した水処理プロセスの余剰汚泥抑制の可能性 -----	75
	酒井 保藏, 荷方 稔之 (宇都宮大); SAHA Mihir Lal (Dhaka 大)	
2C-a06	電磁力を利用した海水からのマイクロプラスチック分離の研究 -----	76
	西嶋 茂宏, 三島 史人, 野村 直希 (福井工大)	
2C-a07	発電プラント配管中のクラッド除去のための高勾配磁気分離装置に関する検討 -----	77
	三島 史人, 長濱 葵, 野村 直希, 西嶋 茂宏 (福井工大)	
2C-a08	常磁性体分離のための淘汰管を用いた磁気分離装置の高度化 -----	78
	長濱 葵, 野村 直希, 西嶋 茂宏, 三島 史人 (福井工大)	
2C-a09	ローレンツ力を利用した海水・油分離装置中の不導体に作用する力 -----	79
	赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹 (神戸大)	

ポスター手短紹介 13:15 - 13:30 (A 会場)

6月21日 (火) ポスターセッション II Poster 会場 13:30 - 14:45

超電導・低抵抗接続 (2) 13:30 - 14:45 座長: 恩知 太紀

2P-p01	Bi2223 線材と Nb-Ti 線材の Bi-Pb はんだ接合の低抵抗化 -----	80
	井上 和朗, 松本 凌, 小林 賢介, 内田 公, 西島 元, 竹屋 浩幸, 北口 仁, 高野 義彦 (NIMS)	
2P-p02	REBCO 線材内部層間抵抗の臨界温度までの温度依存性評価 -----	81
	阿竹 洋輔, 伊藤 悟, 高橋 弘紀, 橋爪 秀利 (東北大)	
2P-p03	送電ケーブル応用を目指した REBCO 線材の低抵抗接続法の基礎検討 (2) -----	82
	加藤 誠士郎, 筑本 知子 (中部大)	

超電導応用 (2) 13:30 - 14:45 座長: 福井 聡

2P-p04	液体水素冷却超電導発電機向け REBCO 集合導体の開発 (1) REBCO 線材スパイラル試験 -----	83
	生田 勝利, 大屋 正義 (関西学院大); 三浦 英明, 服部 泰佑, 殿岡 俊 (三菱電機)	
2P-p05	全超電導回転機におけるエアギャップ中の希薄ガスをを用いた回転子冷却構造の基礎検討 -----	84
	赤坂 和紀, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大); 岡井 敬一, 田口 秀之 (JAXA)	
2P-p06	H- ϕ 法と A-V 法を組み合わせた有限要素法解析による超電導磁気軸受シミュレーション -----	85
	奥村 皇月, 尾上 雄海, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大); 桜井 雄基 (岡山大); 松村 知岳, 片山 伸彦 (東大)	
2P-p07	SMES 応用を想定した無絶縁 2 枚バンドルコイルにおける局所劣化発生時の挙動と貯蔵効率への影響 -----	86

小笠原 友樹, 宮本 祐, 石山 敦士 (早大)

- 2P-p08 磁気誘導型ドラッグデリバリーシステム用磁場発生源上空の磁束密度勾配の向上 ----- 87
野島 渉平, 長崎 陽, 津田 理 (東北大)
- 2P-p09 超電導デモ用半超電導モーターカーの作製 ----- 88
井浦 康伸, 尾崎 優一, 川崎 玄貴, 高橋 正希, 立石 航也, 中本 隼太郎, 平原 永将, 森 竜之佑,
井上 昌睦 (福岡工大)

加速器 / 核融合 (1) 13:30 - 14:45 座長: 菅野 未知央

- 2P-p10 縮小版 FAIR 導体の開発と通電特性の評価 ----- 89
小野寺 優太, 平野 直樹, 馬場 智澄, 三戸 利行 (NIFS), 川並 良造 (川並鉄工)
- 2P-p11 重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの電磁構造解析 ----- 90
尾花 哲浩 (NIFS)
- 2P-p12 次世代医療用高温超伝導サイクロトロンにおける遮蔽電流磁場の影響評価 ----- 91
熊谷 壘, 糸日谷 浩平, 小久保 早希, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北大);
福田 光宏 (阪大)

磁気分離 (2) 13:30 - 14:45 座長: 横山 和哉

- 2P-p13 磁化メタン発酵法を活用した生物学的水処理法のカーボンニュートラル化への可能性 ----- 92
猪瀬 絢加, 齊藤 翼, 酒井 保蔵, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大)
- 2P-p14 現状の磁化活性汚泥法の適応条件と高負荷対応への改善策 ----- 93
日野口 椋大, 小笹 峻諒, 野村 侑樹, 酒井 保蔵, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大)

休憩 14:45 - 15:00

論文賞受賞記念講演 15:00 - 16:00 座長: 三戸 利行 (A 会場)

- 2S-p01 大型ヘリカル装置ヘリカルコイルにおける常伝導伝播 ----- 94
今川 信作, 尾花 哲浩, 濱口 真司, 柳 長門, 三戸 利行 (NIFS)

休憩 16:00 - 16:15

特別セッション 16:15 - 17:00 (A 会場)

フェロー塾「ピンチを乗り切れエンジニア」(基盤強化委員会)

社員総会 17:15 - 18:15 (A 会場)

懇親会 (キリンシティタワーホール船堀) 18:30 - 20:30

6月22日(水) A 会場 9:15 - 17:00

安定性・保護 (2) 9:15 - 10:30 座長: 曾我部 友輔

- 3A-a01 導体バンドル枚数の違いによる無絶縁 REBCO パンケーキコイルの電流分布および安定性の調査 ----- 96
小高一真, 野口 聡 (北大)
- 3A-a02 交流通電による無絶縁 REBCO コイルのターン間接触抵抗測定時の電流現象解析 ----- 97
間藤 昂允 (北大); 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大); 野口 聡 (北大)
- 3A-a03 LFAC 法を用いた NI REBCO コイルにおける接触抵抗の測定精度に関する検討 ----- 98
井上 良太, 宮本 康平, 小林 大剛, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大); 野口 聡 (北大)
- 3A-a04 不均一な接触抵抗率が局所劣化のある無絶縁コイルの熱的挙動に与える影響 ----- 99
仲田 悠馬, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔 (千葉大); 長崎 陽, 津田 理 (東北大)

3A-a05	Bi2223 コイルの液体窒素中の熱暴走についての数値解析 -----	100
	<u>今川 信作</u> (NIFS)；白井 康之 (京大)；岩本 晃史，濱口 真司 (NIFS)；川崎 理香子，大矢 輝， 松本 都哉，前田 佑一郎，松本 岳 (京大)；大屋 正義 (関西学院大)；津田 理，長崎 陽 (東北大)； 谷貝 剛 (上智大)；小林 弘明 (JAXA)；塩津 正博 (京大)	

休憩 10:30 - 10:45

HTS コイル・解析 10:45 - 12:00 座長：柳澤 吉紀

3A-a06	銅分層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の動的抵抗測定 -----	101
	<u>曾我部 友輔</u> ，陳 妙鑫，雨宮 尚之 (京大)	
3A-a07	超高磁場発生用 REBCO 内挿コイルの電圧挙動に関する検討 -----	102
	<u>野口 聡</u> ，間藤 昂允 (北大)；HAHN Seungyoung (Seoul 大)	
3A-a08	T-A 法を用いた 2T 伝導冷却型高温超電導 MRI マグネットにおける遮蔽電流磁場解析 -----	103
	<u>松本 雅大</u> ，小林 宏泰，早乙女 英夫，宮城 大輔 (千葉大)；長崎 陽，津田 理 (東北大)	
3A-a09	超良好均一度 (± 0.1 ppm) を目指すシミング計算の MRI 磁石を用いた試験と改良 -----	104
	<u>阿部 充志</u> ，佐々木 憲一，荻津 透，齊藤 直人，三部 勉，下村 浩一郎 (KEK)；飯沼 裕美 (茨城大)； 多田 紘規 (名大)；小山 駿，田中 陶冶 (東大)	
3A-a10	液体水素間接冷却 MgB_2 コイルの通電特性試験 -----	105
	<u>谷貝 剛</u> ，猪俣 涼，恩地 太紀 (上智大)；横田 康博，新富 孝和 (KEK)；平野 直樹 (NIFS)； 駒込 敏弘 (前川)；濱島 高太郎 (東北大)	

昼食 12:00 - 13:00

(公社) 低温工学・超電導学会主催 一般公開シンポジウム 13:00 - 17:00 (A 会場)

「カーボンニュートラル社会創出に向けてー低温工学・超電導技術の役割を語るー」

6 月 22 日 (水) B 会場 9:30 - 11:30

ピンニング 9:30 - 10:30 座長：土屋 雄司

3B-a01	CuO 二重鎖銅酸化物超伝導体における磁束ピンニング -----	106
	<u>下山 淳一</u> ，齋藤 晶文，元木 貴則 (青学大)；椋田 秀和 (阪大)；佐々木 進 (新潟大)	
3B-a02	フッ素フリー MOD 法を用いた人工ピン導入 REBCO 線材の開発 -----	107
	<u>吉原 健彦</u> ，本田 元気，永石 竜起，小林 慎一 (住友電工)；蟹江 澄志，岡田 達典，淡路 智 (東北大)	
3B-a03	FF-MOD 法 Y123 薄膜における様々な不純物金属添加効果 -----	108
	<u>小澤 美弥子</u> ，元木 貴則，大崎 瑛介，下山 淳一 (青学大)	
3B-a04	低エネルギー Au イオン照射を用いた VLS-YBa ₂ Cu ₃ O _y 厚膜の磁場中超伝導特性 -----	109
	伊東 智寛 (名大)；尾崎 壽紀 (関西学院大)；一瀬 中 (電中研)；土屋 雄司 (東北大)；岡崎 宏之， 越川 博，山本 春也，八巻 徹也 (量研機構)； <u>吉田 隆</u> (名大)	

休憩 10:30 - 10:45

臨界電流測定 10:45 - 11:30 座長：田中 秀樹

3B-a05	パルス電流を用いた高温超伝導線材における強磁場中臨界電流の測定 -----	110
	<u>土屋 雄司</u> (東北大)；水野 謙一郎 (MTL)；坂井 厳，吉田 隆 (名大)；小濱 芳允 (東大)； 淡路 智 (東北大)	
3B-a06	フィードバック回路を用いたパルス電流による高温超伝導線材の臨界電流測定 -----	111
	坂井 厳 (名大)；土屋 雄司 (東北大)；小濱 芳允 (東大)；吉田 隆 (名大)	
3B-a07	磁化のダイナミック測定による希土類系高温超伝導コート線材の $E-J$ 特性評価：	

磁気顕微鏡法とピックアップコイル法の比較-----	112
呉 澤宇, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)	

6月22日(水) C会場 9:15 - 11:45

核融合(2) 9:15 - 10:30 座長: 谷貝 剛

3C-a01	LHD ポロイダルコイルの長期信頼性 - 24 年間の圧力損失の変化 -----	113
高畑 一也, 森内 貞智, 大場 恒揮, 鷹見 重幸, 今川 信作 (NIFS)		
3C-a02	LHD ヘリカル導体の過渡安定性解析 -----	114
大屋 正義 (関西学院大); 今川 信作 (NIFS)		
3C-a03	改良型 WISE 導体の電流導入部の開発 -----	115
成嶋 吉朗, 柳 長門, 宮澤 順一 (NIFS)		
3C-a04	JT-60SA CS における電源電圧による過渡応答に影響を受けた電圧分布の評価 -----	116
園田 翔梧, 中村 一也, 結縄 ことみ (上智大); 村上 陽之, 濱田 一弥, 畠山 昭一, 高橋 幸司 (量研機構)		
3C-a05	ITER TF コイルターミナル接合部電位分布の劣化分布依存性 -----	117
泊瀬川 晋, 梶谷 秀樹, 宇野 康弘, 川崎 勉, 中本 美緒, 中平 昌隆 (量研機構)		

休憩 10:30 - 10:45

加速器 10:45 - 11:45 座長: 泊瀬川 晋

3C-a06	LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (16) - 7 m 長実証機磁石の製造 -----	118
菅野 未知央, 中本 建志, 鈴木 研人, 池本 由希子, 岡田 尚起, 荻津 透, 川又 弘志, 寺島 昭男 (KEK); 木村 誠宏 (東大); 堀越 篤, 千葉 知雄, 瀧本 良寛 (日立); MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)		
3C-a07	LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (17) - 7 m 長実証機磁石励磁試験結果 -----	119
鈴木 研人, 菅野 未知央, 中本 建志, 池本 由希子, 岡田 尚起, 岡田 竜太郎, 荻津 透, 川又 弘史, 田中 賢一, 高橋 直人, 寺島 昭男 (KEK); 木村 誠宏 (東大)		
3C-a08	加速器用 HTS マグネットの開発 (9-1) - スキュー 6 極 REBCO マグネットの製作 - -----	120
藤田 真司, 武藤 翔吾, 土屋 光揮 (フジクラ); 王 旭東, 寺島 昭男, 土屋 清澄 (KEK)		
3C-a09	加速器用 HTS マグネットの開発 (9-2) - He フリー伝導冷却システムの開発 - -----	121
川井 正徳, 王 旭東, 土屋 清澄, 大内 徳人, 宗 占国, 青木 和之 (KEK)		

新構造 REBCO 線材の導電性中間層に求められる抵抗率の検討

Estimation of required resistivity of conductive buffer layer for REBCO wire with new structure

土井 俊哉、村本 周平、内田 翔、川山 巖、(京大)

DOI Toshiya, MURAMOTO Shuhei, UCHIDA Tsubasa, KAWAYAMA Iwao (Kyoto Univ)

E-mail: doi@device.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は $\{100\}<001>$ 集合組織 Cu テープ上に導電性中間層を介して REBCO 層を形成した新規構造の HTS 線材の研究を進めている。この線材構造では、RBCO 層の一部で超伝導状態が破れた際、RBCO 層を流れる電流は導電性中間層を通過して安定化層と基材を兼ねた Cu テープに回避することが可能であるため、RBCO 層の上に Ag 層および Cu 層を形成する必要がないことから、低コスト化が期待できる。また、集合導体化した時に导体中に絶縁層が存在しないなどの利点もある。これまでに、導電性中間層として $\text{SrTi}_{0.95}\text{Nb}_{0.05}\text{O}_3$ (Nb-STO) を用いた YBCO/ $\text{SrTi}_{0.95}\text{Nb}_{0.05}\text{O}_3$ /Ni/Cu/SUS 短尺試料を作製し、 2.6 MA/cm^2 (77 K、自己磁場)の臨界電流密度 (J_c) が得られた事を報告した[1]。また、臨界電流密度 (J_c) を超えた場合、一部の電流が安定化層である Cu に回避する事を示した[2]。

しかし、REBCO 層の一部が常伝導状態に転移した際の REBCO 層から Cu テープへの電流回避挙動(復帰挙動)は、導電性中間層の抵抗値に大きく依存すると考えられるが、その詳細は明らかでない。そこで本研究では、有限要素法を用いて導電性中間層の抵抗値が線材内の電流回避挙動に与える影響を調べた。

2. 計算方法

線材内部の電流分布の計算はフォトン (株) の解析ソフト「PHOTO-VOLT」を使用して、2 次元有限要素法により行った。線材温度は 77 K で一定であると仮定した。YBCO 層の厚さは $3 \mu\text{m}$ 、 J_c は 1.6 MA/cm^2 、 n 値は 11.8、常伝導部分の抵抗率は $0.1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ とし、通電電流は J_c の $1/2$ とした。導電性中間層の厚さは $1 \mu\text{m}$ 、Cu テープの厚さは $30 \mu\text{m}$ とした。導電性中間層の抵抗率 ρ_b を $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で、常伝導領域の長さ $2L_{ns}$ を 20、200、2000 μm と変化させて、YBCO 層から Cu テープへの電流回避挙動 (復帰挙動) を調べた。

3. 結果と考察

図1に、 L_{ns} を10 μm とし、 ρ_b を $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で変化させて計算した結果を示す。横軸は YBCO 層中の常伝導部分の中央からの距離、縦軸は線材全体を流れる電流に対する YBCO 層中を流れる電流の割合である。上側の図は横軸をリニアスケールで表示したもの、下側の図は常伝導部分と超伝導部分近傍を拡大図するために横軸を log スケールで表示したものである。 ρ_b が $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ の場合、電流は 1 mm 以内の短い距離で復帰 (回避) しており、抵抗率が大きくなるにしたがってその距離が長くなる事が分かる。 ρ_b が $1.0 \times$

$10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合、電流のほぼ全てが復帰 (回避) するためには 50 mm の距離が必要であることが分かる。また、 ρ_b が小さい場合には常伝導部分を流れる電流はほぼ 0 であるが、 ρ_b が大きくなるにしたがって常伝導部分を流れる電流が大きくなり、 ρ_b が $1.0 \times 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合は 20 % の電流が Cu テープに回避せずに常伝導部分を流れていることが分かる。

当日は、常伝導部分の長さを変化させて計算した結果、線材の温度上昇についても議論する予定である。

4. 謝辞

本研究の一部は、JST-ALCA、JPMJAL1109 および科研費 (21H01369) の支援を受けたものである。

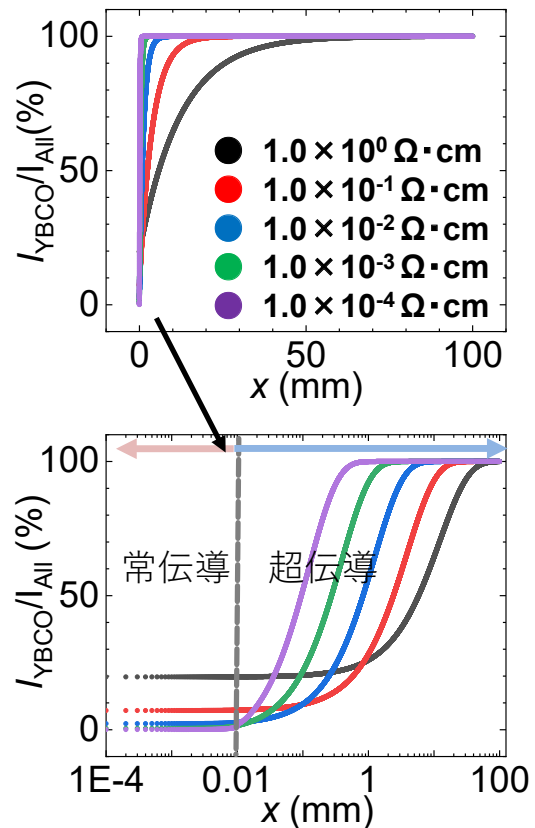


Fig.1 Relationship between the distance from the normal state region and the current ratio flowing in the YBCO layer.

参考文献

- [1] T. Doi et al., Master. Trans. **58** (2017) 1493.
- [2] T. Doi et al., APEX **12** (2019) 023010.

$\text{Sr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_3$ を導電性中間層に用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 短尺線材 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting wire with conductive $\text{Sr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_3$ buffer layer

内田 翔, 松村 実典, 青木 星也, 川山 巖, 土井 俊哉 (京大)

UCHIDA Tsubasa, MATSUMURA Minori, AOKI Seiya, KAWAYAMA Iwao, DOI Toshiya (Kyoto Univ.)

E-mail: uchida.tsubasa.62x@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (REBCO)線材として, $\{100\}\langle 001\rangle$ 集合組織を有する Cu テープ上に導電性中間層, REBCO 層を順にエピタキシャル成長させる構造を検討している。この新規構造では, REBCO 層において局部的に超伝導が破れて常伝導が生じた際に, REBCO 層を流れる電流は導電性中間層を通して Cu 層へ回避する。安定化層形成のために高価な Ag を使用する必要が無く, 線材コストを低下させることができると考えている。

我々はこれまでに, 導電性中間層 $\text{Sr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{TiO}_3$ (La-STO) の上に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜を成膜した短尺試料を作製し, 臨界電流密度 J_c が 0.82 MA/cm^2 (77 K, 自己磁場中), 中間層の 1 cm^2 あたりの積層方向の抵抗 (R_{vert}) が $1.3 \times 10^{-5} \Omega$ となったことを報告している[1]。しかし超伝導線材の実用化のためには長尺の線材を作製する必要がある。本研究では, La-STO 層を, reel-to-reel システムを装備した連続 PLD 成膜装置によって作製した。その後試料テープを 1 cm 長に切り出して, 基板を静止させた状態で YBCO 層の作製を行った。そして YBCO 層の J_c と La-STO 層の R_{vert} を測定した。

2. 実験方法

La-STO 層は KrF エキシマレーザを光源とするパルスレーザー蒸着法 (PLD 法) により作製した。基板テープには, $\{100\}\langle 001\rangle$ 圧延再結晶集合組織を有する Cu テープの裏面に SUS316 を貼った後, その周り全体に Ni めっきを施した基材を用いた。成膜温度は 540°C とし, $2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ の $\text{Ar}+3\%\text{H}_2$ 雰囲気中で, 基板テープを 16.0 cm/h で移動させながら成膜した。膜厚は約 80 nm とした。La-STO 成膜後は作製した試料テープを 770°C , 常圧の $\text{Ar}+3\%\text{H}_2$ 雰囲気中に 60 分間保持した (水素アニール)。その後試料テープを長さ 1 cm , 幅 0.3 cm の試料 (La-STO/テープ) に切り出した。

続いて YBCO 層は PLD 法により作製した。 1 cm 長に切り出した La-STO/テープを静止させた状態で, 成膜温度は 760°C , 770°C とし, 圧力 35 Pa の O_2 雰囲気中で, YBCO を約 300 nm 堆積した。YBCO 成膜後は 400°C で O_2 気流中に 16 時間保持した (酸素アニール)。

La-STO 層の R_{vert} を測定する際は, YBCO 層の表面に Ag を薄く蒸着してから, 図 1 に示すような形状にパターニングを行った。そして電流を Ni 層から La-STO 層, YBCO 層, Ag 層のように, YBCO/La-STO/テープの積層方向に流しながら, La-STO 層の上下の電位差を測定した。

3. 結果と考察

図 2 に, YBCO 層を 760°C で成膜してパターニングを行わなかった試料を, 液体窒素中に浸して 77 K , 自己磁場中で, 試料の長手方向に電流を流して測定した I - V 曲線を示す。 J_c の値は 0.33 MA/cm^2 であった。

図 3 に, YBCO 層を 770°C で成膜してパターニングを行った試料を, 液体窒素中に浸して 77 K , 自己磁場中で, La-STO 層の積層方向に電流を流して測定した I - V 曲線を示す。 I の増加に対して V_2 が直線的に増加することが確認できる。La-STO 層の積層方向の抵抗 $R = V_2/I$ は, I - V 曲線の傾きから $R = 5.6 \times 10^{-4} \Omega$ であり, これを抵抗率に直すと $\rho = 12$

$\Omega \cdot \text{cm}$ であった。La-STO 層の 1 cm^2 あたりの積層方向の抵抗は $R_{\text{vert}} = 9.6 \times 10^{-5} \Omega$ となる。

今後, La-STO 層, YBCO 層の成膜条件の検討を進めることで, J_c および R_{vert} の改善を図る予定である。

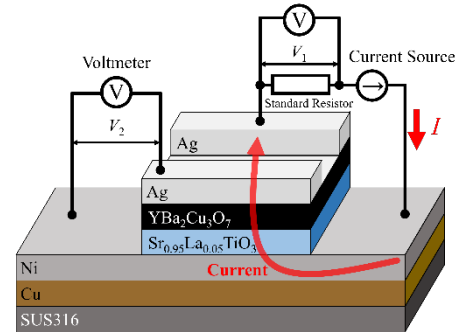


Fig.1 The configuration of the patterned YBCO/La-STO/tape.

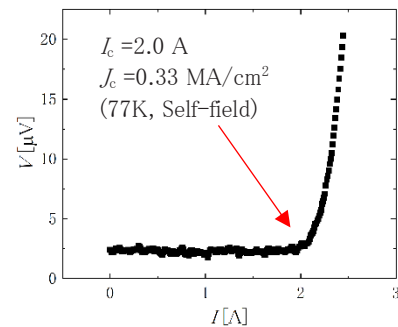


Fig.2 I - V characteristics of the YBCO/La-STO/tape measured at 77 K by applying electrical current parallel to the longitudinal direction of the sample.

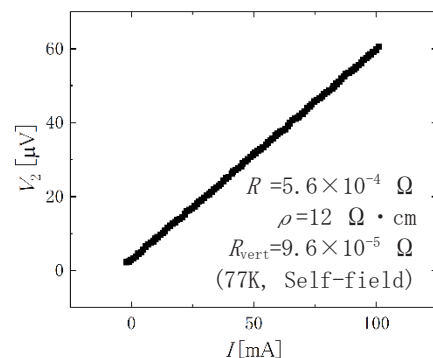


Fig.3 I - V characteristics of patterned YBCO/La-STO/tape measured at 77 K by applying electrical current vertical to the tape surface.

参考文献

1. T. Doi, et al.: Abstracts of ISS2021, (2021)
(URL: <https://www.isupercon.jp/iss2021/program-site/program2021/abstract/wb/wb1-4.html>)

超伝導-金属 2 層構造を用いた表面バリアの制御による REBa₂Cu₃O_y 薄膜の超伝導整流特性の向上

Superconducting rectification characteristics of REBa₂Cu₃O_y thin films by controlling the surface barrier using superconductor and metal layered structure

山本健太郎(名大), 土屋雄司(東北大), 鶴田彰宏(産総研), 吉田隆(名大)
YAMAMOTO Kentaro (Nagoya Univ.), TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.), TSURUTA Akihiro (AIST),
YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: yamamoto.kentaro.w6@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1.はじめに

超伝導応用では、電流リード線を介した熱侵入の低減が必要である。そこで我々は、低温下で大電流を整流する素子として超伝導ダイオードを用いたワイヤレス給電による冷却コスト削減について提案している。超伝導ダイオードは電流方向によって異なる臨界電流 I_c を示す整流素子である[1]。Fig.1 に SuperOx 社線材(ST-4-50)における整流特性の一例を示す。内挿図は超伝導体に流れる電流と磁場の関係である。 I_c のうち、面内磁束が薄膜底面から表面に動く方向の I_c を I_c^{up} 、逆方向の I_c を I_c^{down} とした。我々の研究グループでは、IBAD 基板上 YBa₂Cu₃O_y(YBCO)薄膜が面内磁場中($B//ab$)で I_c 非対称性を示し、その I_c 非対称性が、薄膜表面の凹凸や薄膜底面における格子不整合度に相関することを報告してきた[2]。これらの結果は、磁束に対する表面と底面における表面バリアの差に起因すると考えられている。

本研究では、 I_c 非対称性の向上を目的として、REBa₂Cu₃O_y(REBCO)薄膜表面における近接効果に着目し、超伝導薄膜表面に Ag 層の成膜を行い、超伝導-金属 2 層構造を作製した。2 層構造の界面にて近接効果が起こり、表面バリアに変化が起きると考えた。

2.実験方法

Fujikura 社線材(FESC-S04)、SuperOx 社線材(ST-4-50)を 4 mm×15 mm 程度に切断し、Ag 層を過酸化水素水-アンモニア水混合水溶液により除去した。両線材ともに、GdBa₂Cu₃O_y 超伝導層上に、Ag 保護層があり、Cu 安定化層がない製品を使用した。次に、レーザーエッチングを用いて、それぞれの薄膜を幅 100 μm、長さ 1 mm のブリッジ形状に加工し、直流四端子法によって電界 1 μV/cm に対する I_c 非対称性の磁場依存性を測定した。測定は 65 K、70 K 及び 77 K、0–5 T の面内磁場下で行った。その後、表面 Ag 除去線材にマグネトロンスパッタ法を用い、1 μm までの Ag 層の成膜を行い、超伝導-Ag の 2 層薄膜を作製した。その後、同様に I_c 非対称性の磁場依存性を測定した。ここで、臨界電流非対称性を $Asym.[\%]=100 \times 2(I_c^{down} - I_c^{up}) / (I_c^{down} + I_c^{up})$ と定義した。温度一定、磁場を変化させた際の $Asym.$ の最大値を $Asym.^{max}$ と定義した。

3.実験結果及び考察

Fig.2 に、SuperOx 社線材から Ag 層の除去後(▲)および除去後に膜厚 1 μm の Ag 層を再び成膜した後(●)の試料における 77 K での臨界電流非対称性の磁場依存性を示す。Ag 除去後の $Asym.^{MAX}$ は、0.7 T において 7.3%、Ag 層成膜後の $Asym.^{MAX}$ は 0.26 T において 12.1%であった。以上の結果から、REBCO 膜上に Ag 層を成膜することにより、 $Asym.$ が向上することが示された。超伝導薄膜表面に Ag 薄膜を作製し、超伝導-金属 2 層構造ができたことにより近接効果が起きた。染み出し距離が薄膜表面の凹凸よりも大きいため、超伝導部分の凹凸がなくなり、表面が平滑になることで薄膜表面の表面バリアが向上したと考え

られる。

当日は、Fujikura 社(FESC-S04、SuperOx 社(ST-4-50)線材の Ag 薄膜作製前後での測定結果、表面バリアの解析、近接効果と $Asym.$ の関係性及び測定結果に対する考察について報告する予定である。

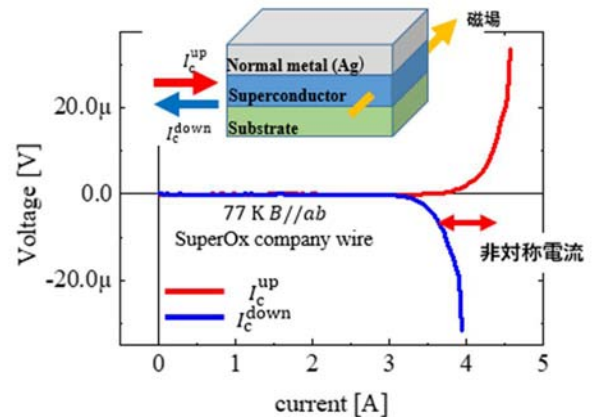


Fig. 1 The rectification characteristics in the REBCO tape from SuperOx(2G HTS). The inset shows the diagram for the current and the magnetic field.

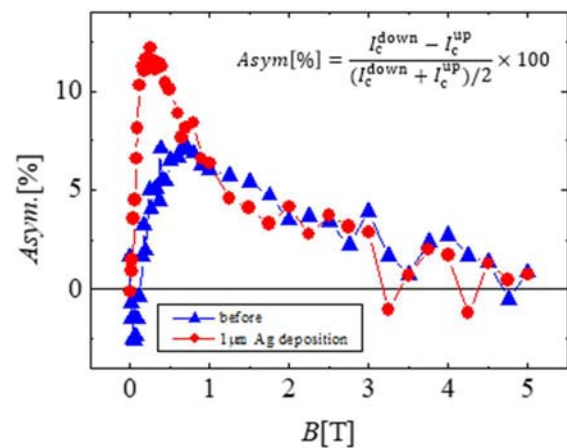


Fig. 2 Field dependences of the critical current asymmetry $Asym.$ at 77 K in the REBCO tape from SuperOx with after removing (▲) and after deposition (●) of the Ag layer.

4.謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(研究課題 20K15217, 22H01522)、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)の助成事業(JPNP20004)の結果得られたものです。また、本研究では国立研究開発法人産業技術総合研究所武藤富江様より Ag 除去のご協力を得た。

5.参考文献

- [1] X. G. Jiang *et al.*: Phys. Rev. B **49**, 9244 (1994).
- [2] A. Mizuno *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **32**, 6601005 (2022).

機械学習超解像による Hall 素子配列で取得した REBCO 高温超伝導コート線材の磁気観察像の高解像度化

Resolution enhancement of magnetic images of REBCO coated conductors acquired by a Hall probe array by using machine-learning super-resolution

高 明陽, 木須 隆暢, S. Natthawiro, 呉 澤宇, 東川 甲平 (九州大学)
GAO Mingyang, KISS Takanobu, S. Natthawiro, WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei
(Kyushu University)
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線の磁気計測は、線材内の局所欠陥の検出などにおいて重要であり、特に、Hall 素子配列を用いた測定 (TapeStar™) は、実用線材の出荷前の試験として現在広く用いられている。しかしながら、Hall 素子センサの数の制限のため、線材幅方向の空間分解能が低く、線材幅方向に局在する微小欠陥の検出やその位置、形状について十分な情報を得られない問題がある。一方、微小ホール素子を高速に走査しながら磁気像を得るリール式走査型 Hall 素子磁気顕微鏡 (RTR-SHPM) では、線材幅方向にも高解像度の磁気像の取得が可能であり高品質の磁気像の取得が可能である。ただし、装置構成がより複雑となる事と測定速度が Hall 素子配列法に比べて遅いという問題点がある。本研究では、同一の 100 m 級 REBCO 線材に対して Hall 素子配列を用いた測定と高精細の RTR-SHPM 測定とを実施することで教師データを取得し、畳み込みニューラルネットワークを用いた深層学習によって超解像モデルの学習を行い、得られたネットワークを用いて、Hall 素子配列によって得られる低解像度の入力磁気像より高解像度の磁気像の生成について検討した。

2. 超解像出力のための深層学習ネットワーク

本研究では、SRCNN[1], EDSR[2]に基づいて、残差学習を適用した畳み込みニューラルネットワークを構成し、低解像度 (LR) の入力画像から高解像度の画像出力を実現する。本研究で提案する機械学習のモデルを Fig. 1 に示す。残差ブロック (RRDB) を積み上げて、深いニューラルネットワークの層を実現している。RTR-SHPM で得た高解像度の実測結果を Ground Truth として、低解像度入力より得られる出力像の差異より、誤差関数を定義し、学習によって誤差を低減するように畳み込み層のパラメータを決定した。ここで、誤差関数には出力画像と Ground Truth 画像の Pixel ごとの intensity の差の平均値である L1 損失と、高次元のニューラルネット層における特徴マップのユークリッド距離で定義するコンテンツ損失[3]とを、線形和で組み合わせて用いた。また、ネットワークの学習には 500 組の入出力画像を用いた。

3. 超解像出力結果および考察

Fig. 2 に超解像出力結果を示す。左に入力として用いた TapeStar™ の実測結果を、中央に超解像度出力画像を、右に同じ箇所の RTR-SHPM の測定結果 (Ground Truth) を示す。上図は健全部位、下図は線材端部を示す。超解像によって TapeStar™ による測定像の解像度が大幅に向上している事が分かる。

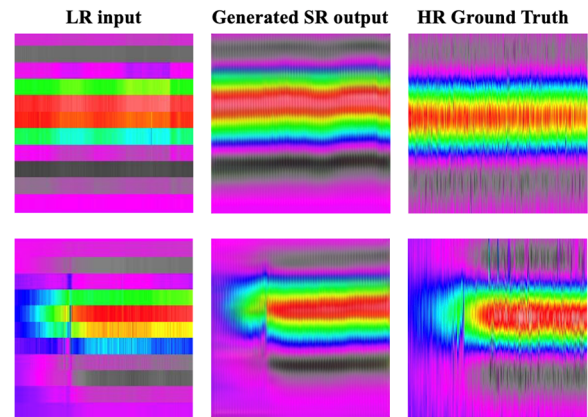


Fig. 2 Super-resolution results for normal region (upper) and end region (lower). From left to right, TapeStar™ image, generated super-resolution image and RTR-SHPM image at the same position. The sample was a 4-mm wide 100-m long REBCO coated conductor.

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

参考文献

- [1] Dong C, Loy C C, He K, et al 2015 *TPAMI* **38**(2) 295-307.
- [2] Lim B, Son S, Kim H, et al 2017 *CVPR workshops* 136-144.
- [3] Johnson J, Alahi A, Fei-Fei L 2016 *ECCV* 694-711.

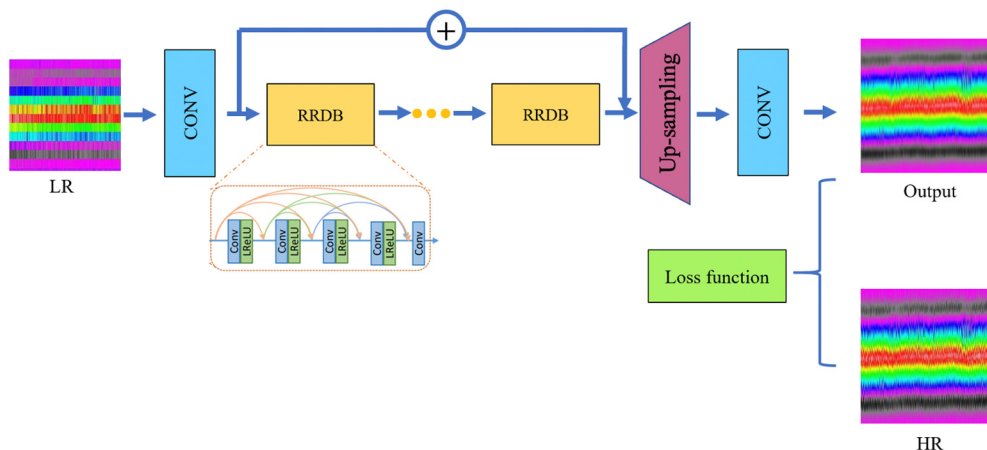


Fig. 1 The proposed super-resolution model.

磁気顕微鏡観察への物体検出の導入による長尺 REBCO 線材内の 局所 I_c 不均一性の評価

Characterization of local I_c inhomogeneity in long REBCO coated conductor by introducing object detection to magnetic microscopy

Somjaijaroen Natthawirod, 木須隆暢、今村和孝、呉 澤宇、東川甲平
Somjaijaroen Natthawirod, Takanobu Kiss, Kazutaka Imamura, Zeuy Wu, Kohei Higashikawa
(Kyushu University)

E-mail: n.somjaijaroen@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. Introduction

The importance of spatial uniformity of local I_c in long length high-temperature superconducting wires has been increasingly recognized in recent years from the viewpoint of reliability and stability of the applied equipment as a required specification [1]. By introducing machine-learning based image classification into reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy (RTR-SHPM), we demonstrated that we can classify magnetic images automatically into defect region including local obstacles and normal region with high reliability and reproducibility from thousands of images taken from long length REBCO coated conductors [2]. In this study, we further extend this approach by introducing object detection in order to detect local I_c -lowering regions. This method enables us to obtain not only the position of the obstacles but also the size and its influence on the positional local critical current over the defect region even under the influence of intrinsic fluctuation of I_c in the normal region, which are difficult to detect by the conventional local I_c criterion. By applying this new technique, we have also succeeded in obtaining statistical properties of local defects, which have not been clarified so far.

2. Experimental and analytical methods

The object detection model was developed by adopting convolutional neural network. We trained the model by using 19 magnetization current images at obstacles by labeling them obtained from the RTR-SHPM in a 200m long CC. At the end of the training process, the model had good detection with an IoU score of 0.76, which was a highly reasonable value for detecting the objects.

3. Results and Discussion

Fig. 1 (a) shows a typical image of a localized drop in the magnetization current detected as a defect by the object detection using bounding box prediction. The rectangular box indicated the inhomogeneity caused by local obstacles as an extrinsic effect. By integrating the local sheet current density across the width, we can obtain I_c as a function of longitudinal coordinate as shown in Fig. 1 (b). It should be noted that the critical current at the position of the obstacles is still reasonably high value of 272 A. Namely, this type of local inhomogeneity is hardly possible to detect only from the local I_c criterion because the fluctuation of I_c is caused by both extrinsic defects and intrinsic distribution in the matrix itself. Hence, deep learning-based object detection is a promising technique

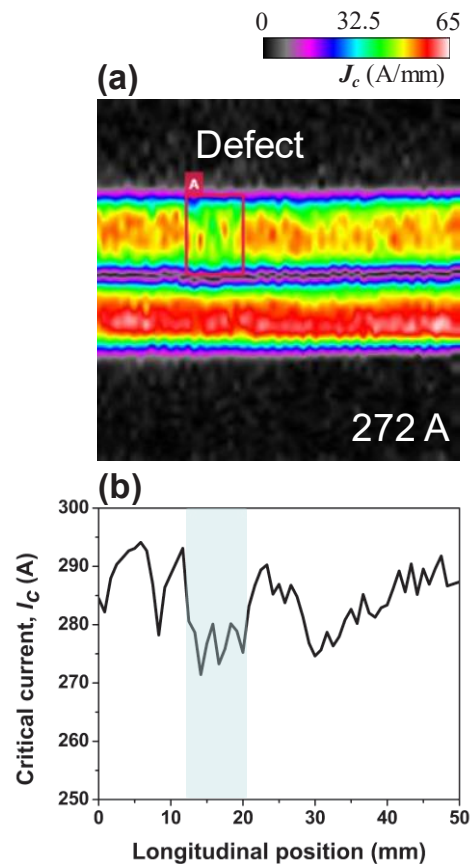


Fig. 1. Result of defect detection result and corresponding I_c long the longitudinal position. (a) J_c mapping image recognized the defect at local I_c of 272 A. The size of J_c mapping image is 50 mm in length and 10 mm in width, respectively, so the image is shrunk in the longitudinal direction. (b) local I_c as a function of longitudinal position in the same image.

to recognize the defect easily and extract the more related information that is helpful for guiding the process development of the long REBCO coated conductors.

Acknowledgements: This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP19H05617.

References

- [1] K. Higashikawa, *et al.*, "Scanning Hall-probe microscopy for site-specific observation of microstructure in superconducting wires and tapes for the clarification of their performance bottlenecks," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 6, 2020, Art. no. 064005.
- [2] N. Somjaijaroen, *et al.*, "Automatic Detection of Local Obstacles in a Long Length RE-123 Coated Conductor by Deep Learning Based Image Classification in Reel-to-Reel Magnetic Microscopy," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Sept. 2022, Art. no. 6601504.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年春)(1): 二層スパイラル銅複合多芯薄膜線材の磁化損失測定

Progress of R&D of SCSC cable in Spring 2022 (1): Measurements of double-layer spiral copper-plated multifilament coated conductors

重政 菜於, 曾我部 友輔, 高橋 明, 雨宮 尚之(京大)

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

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

1. はじめに

我々は SCSC ケーブルと名付けられた、低交流損失でかつロバスト性に優れた高温超伝導ケーブルの開発を行っている。SCSC ケーブルでは、Fig. 1(a)に示すように、銅複合多芯薄膜線材をコアの周りにスパイラル状に巻き付けることで、結合電流をスパイラル半ピッチに閉じ込めて結合時定数を小さくして、フィラメントの結合を抑制している。SCSC ケーブルにおいて層数の増加が磁化損失特性に与える影響を調べるために、Fig. 1(a)および(b)にそれぞれ示すような、単層および二層のスパイラル銅複合多芯線材の磁化損失を測定した。

2. 試料と実験方法

長さ 174 mm の銅複合多芯線材を、GFRP コアの周りに単層および二層のスパイラル状に巻き付け、それらの磁化損失を測定した。コアの直径は $D_c = 3$ mm、線材幅は $w_t = 4$ mm、フィラメント幅は $w_f = 0.8$ mm、フィラメント数は $n_f = 5$ 、銅層厚さは $t_{Cu} = 40, 20$ μm 、そして層数は $n_L = 1, 2$ である。試料は液体窒素で浸漬冷却し、横方向の交流磁界を印加し、線材一本あたり、単位長さあたりの、磁界変化の一周期あたりの磁化損失 Q_m (J/m)を測定した。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 と Fig. 3 には、銅層厚さ $t_{Cu} = 40$ μm の、それぞれ単層と二層の試料について、複数の周波数における磁化損失測定値 Q_m を磁界振幅に対してプロットした。これらの図には、以下に示すような Brandt の理論に基づく磁界変化一周期あたりの、試料と同じ線材幅の単芯線、同じフィラメント幅の多芯線に対する磁化損失 $Q_{BL,t}$ 、 $n_f Q_{BL,f}$ も併せて示してある。

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

$$n_f Q_{BL,f} = \frac{Q_{BL,t}}{n_f} \quad (2)$$

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

$$H_c = \frac{I_c}{\pi w_t} \quad (4)$$

$\mu_0 H_m$ は磁界振幅、 I_c は線材の臨界電流である。単層と多層のいずれの試料においても、112.5 Hz 以下の周波数においてフィラメントがほとんど結合しておらず、磁界振幅が大きい領域において、磁化損失測定値 Q_m は $2/\pi \times n_f Q_{BL,f}$ とほぼ一致している。

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

$$Q_m = Q_h + Q_c = Q_h + kf \quad (5)$$

f は周波数であり、 Q_h はヒステリシス損失に、 Q_c は結合損失に相当する。Fig. 4 には、Fig. 3 に示したものと同一二層の試料の Q_m を周波数に対してプロットし、さらに、それらを式(5)にフィッティングして得た曲線を示した。

謝辞

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

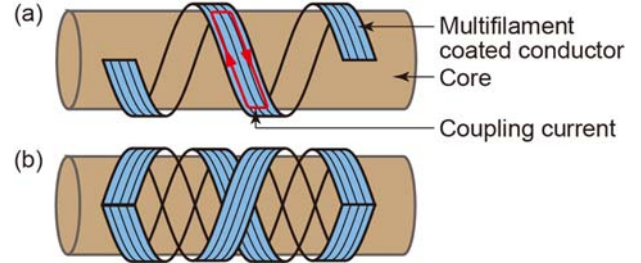


Fig. 1 (a)Single-layer spiral coated conductor and the coupling current, and (b)double-layer spiral coated conductor.

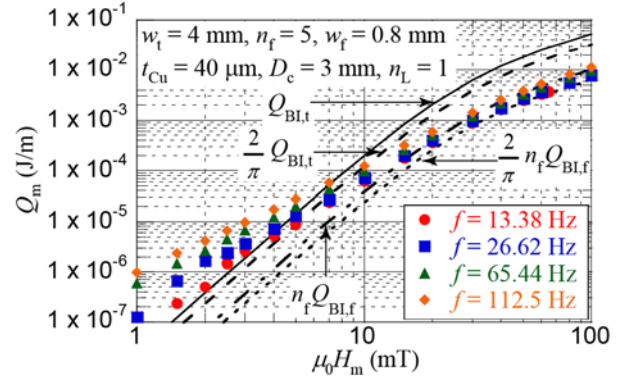


Fig. 2 Magnetization loss per tape of single-layer spiral coated conductor vs. magnetic field amplitude.

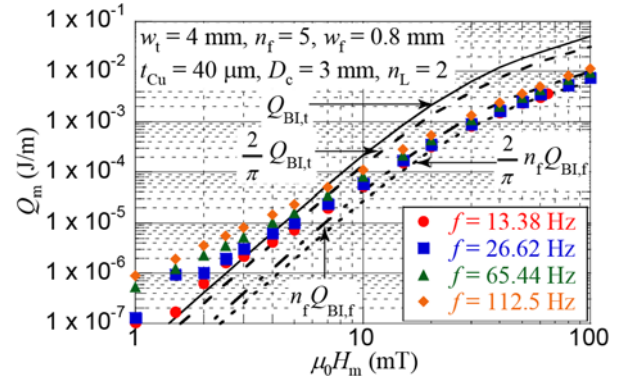


Fig. 3 Magnetization loss per tape of double-layer spiral coated conductor vs. magnetic field amplitude.

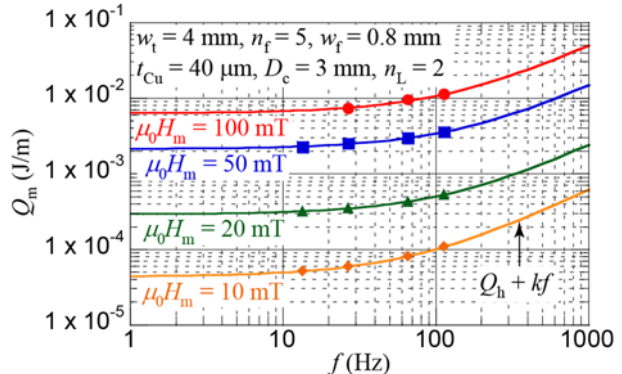


Fig. 4 Magnetization loss per tape of double-layer spiral coated conductor vs. frequency.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年春)(2): GFRP インサートデュワーを用いた超伝導線の磁化損失測定 Progress of R&D of SCSC cable in Spring 2022 (2): Magnetization loss measurement of superconductors using GFRP insert dewar

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

SOBUE Takuya, FUJITA Hirokazu, SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

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

1. はじめに

これまで我々の研究室では、超伝導線の磁化損失を Fig. 1(a)に示すように磁界印加用マグネット、ピックアップコイル、試料を液体窒素で冷却した状態で測定していた。この場合、液体ヘリウム等のより沸点の低い冷媒を用いて試料を冷却することは困難であった。そこで Fig. 1(b)に示すように GFRP 製のインサートデュワーを用いて、試料のみを冷却する装置を構築した。インサートデュワーは、アルミ蒸着フィルムを用いた MLI(Multi-layer insulation)により断熱されている。磁界を印加するとアルミ蒸着フィルムで渦電流が発生し、測定結果に影響を与えることが懸念される。

2. 実験方法

試料に横方向交流磁界を印加し、ピックアップコイルで磁化損失を計測した。ピックアップコイルの諸元を Table 1 に示す。測定は 77 K で行った。磁化損失 Q_m は試料が十分に長い場合、

$$Q_m = \frac{ChH_{rms}V_{rms}}{Nfl} \quad (1)$$

で与えられる。 C はピックアップコイルの断面形状で決まる係数、 h , l , N はそれぞれピックアップコイルの高さ、長さ、巻き数、 H_{rms} , f はそれぞれ外部磁界の振幅の実効値と周波数である。 V_{rms} はピックアップコイルの出力電圧のうち外部磁界と同相な成分の実効値である。磁界振幅を 0.15 mT として磁化損失の周波数依存性を測定した。

3. 実験結果

Fig 2 に直径 0.1 mm の銅線の渦電流損失を Fig. 1(b)で測定した結果を示す。理論値と概ね一致する結果が得られた。Fig 3 にマルチフィラメント超伝導線の磁化損失を Fig. 1(a), (b)で測定した結果を示す。線材の諸元を Table 2 に示す。小振幅磁界下では、デバイ型曲線を示す結合損失が支配的である。高周波側では比較的誤差が大きい、ピーク付近ではほとんど一致した。アルミ蒸着フィルムで発生する渦電流が測定に与える影響はほとんどないことが分かった。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 Grant 番号 JPMJI19E1 の支援を受けたものである。

Table 1. Specifications of pick-up coil

	(a)	(b)
Height (h)	38.9 mm	69.3 mm
Width (w)	39.7 mm	69.2 mm
Length of one turn (l)	46.73 mm	79.72 mm
Number of turn (N)	132	132
Calibration factor (C)	2.026	2

Table 2. Specifications of sample

Conductor width	4 mm
Conductor length	50 mm
Number of filament	5
Copper thickness	20 μ m per side

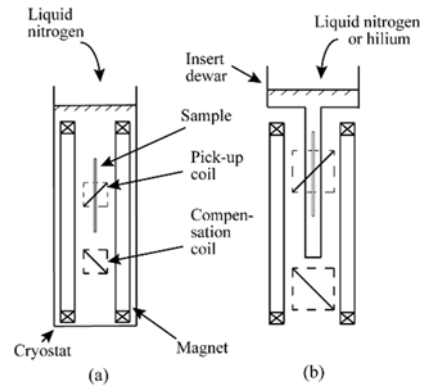


Fig. 1 Schematic view of measurement systems.

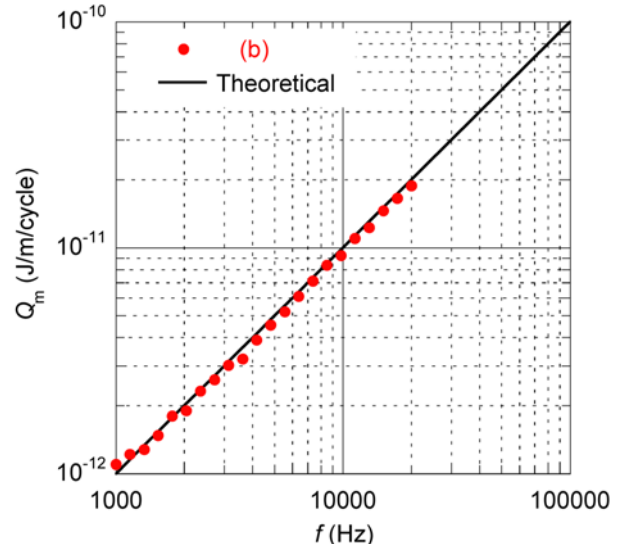


Fig. 2 Eddy current loss of copper wire vs. frequency.

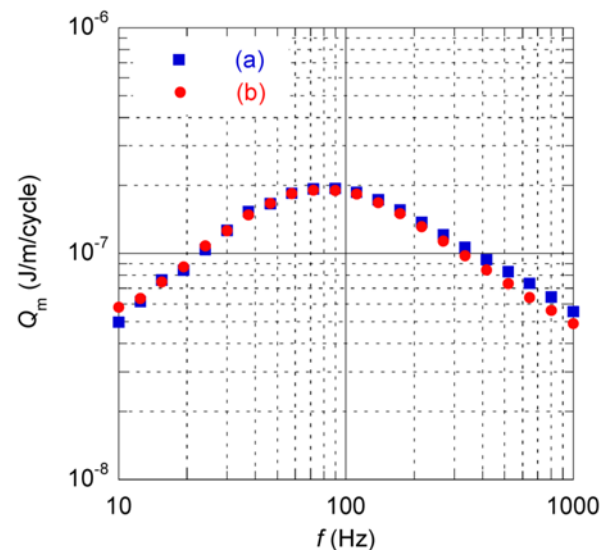


Fig. 3 Magnetization loss of the same superconductor measured by measurement systems (a) and (b).

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年春)(3):

スパイラル導体における銅コアへの分流がクエンチ・保護特性に与える影響

Progress of R&D of SCSC cable in Spring 2022 (3): Effect of current-sharing of metal core on quench behavior and protection of spiral coated conductors

許 光輝, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)

XU Guangwei, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

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

1. Introduction

When quench or thermal runaway occurs in a spiral coated conductor, the current sharing by the metal core is expected to reduce Joule heating in the coated conductor to prevent it from burning out. In our experiments, we attached the voltage taps on both the coated conductor and the core to measure the voltages along the coated conductor, those along the core, and those between the coated conductor and the core (shown as Fig. 1). The hotspot temperature and the current shared by the core were calculated by using measured voltages.

2. Experimental method and samples

The coated conductor used in this study was the copper-plated (thickness of the plated copper: 20 μm) coated conductor SC2030 manufactured by SuperPower Inc. The width of the coated conductor was 2 mm. The core of the spiral coated conductor used in the experiment was a copper tube, whose outer diameter was 3 mm and thickness was 0.5 mm. The total length of the spiral coated conductor was 230 mm, and the length of the effective section (the section between two current terminals) was 100 mm.

We prepared two short samples with two different insulation conditions (shown as Fig. 2): sample A was the spiral coated conductor without any insulation on the core, the current could be shared anywhere; sample B was the sample in which the core was completely insulated from both coated conductor and current terminals. Each sample was conduction-cooled at 55 K as the typical value. The normal zone was generated by a small resistive heater attached at the center of each spiral coated conductor.

3. Experimental results and discussion

The hotspot temperature and the current shared by the core were calculated by using measured voltages. Considering that the temperature between the tape and the core was unknown after activating the heater, we defined a coefficient α :

$$\alpha = \frac{T_{\text{core}} - T_{\text{op}}}{T_{\text{tape}} - T_{\text{op}}} \quad (1)$$

where T_{core} is the core temperature, T_{tape} is the tape temperature, and T_{op} is the initial temperature (55 K).

We conducted the calculation by using $\alpha=0.5$ and $\alpha=1$. Fig. 3 shows that α almost has no effect on the calculation result of hotspot temperatures. We also calculated the current using these two models, the results also show that the currents are almost independent with α , so next we only show the result of $\alpha=0.5$ as the example. In addition, comparing between T_A and T_B in Fig. 3, the hotspot temperature of sample B rose quickly rather than that of sample A. This result shows that the current sharing can suppress the hotspot temperature and protect the tape from burning out.

Fig. 4 shows that large current was shared to the core in section 3-4, while almost no current was shared to the core in section 5-6. This result indicates that the current was mainly shared through the contact resistance in section 2-5 within about 50 mm of the sample.

Acknowledgments

This work was supported in part by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1 and in part by Japan-U.S. Science and Technology Cooperation Program in High Energy Physics.

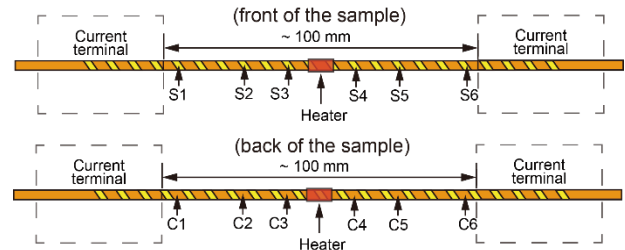


Fig. 1 Positions of voltage taps set on the sample.

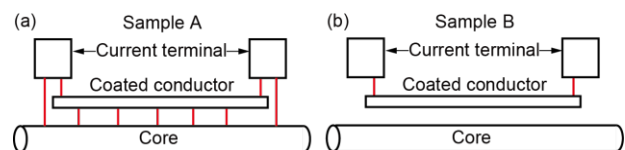


Fig. 2 Two different samples with two different insulation conditions.

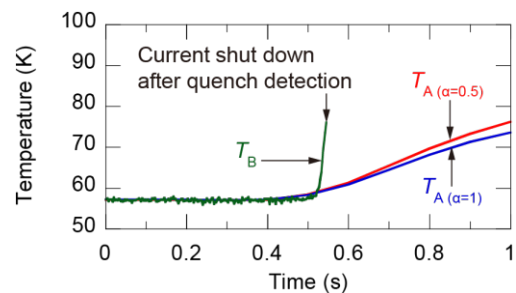
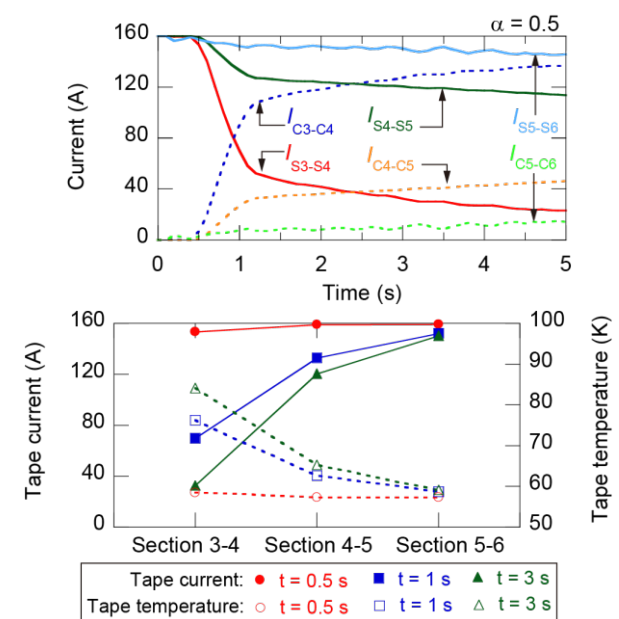


Fig. 3 Comparison of tape hotspot temperatures of sample A and sample B.

Fig. 4 Current distribution and hotspot temperature of sample A (using $\alpha=0.5$ model).

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年春)(4): SCSC ケーブルにおける磁化損失のケーブル形状依存性 Progress of R&D of SCSC cable in Spring 2022 (4): Cable geometry dependence of magnetization losses in SCSC cables

曽我部 友輔, 八鳥 孝志, 雨宮 尚之(京都大学)

SOGABE Yusuke, HATTORI Takashi, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

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

1. はじめに

SCSC ケーブルは、低交流損失と高ロバスト性という特徴から、電気機器への応用が期待されている。SCSC ケーブルは、Fig. 1 に示すように円柱状のコアの周囲に銅分層複合マルチフィラメント高温超伝導線を螺旋状に径方向に重ねて巻きつけた形状をもつ。SCSC ケーブルの実験的・解析的評価が進められているが、実用規模の多数の高温超伝導線から構成される SCSC ケーブルの交流損失特性の系統的評価はまだ行われていない。本発表では、これまでに構築した SCSC ケーブル用数値解析技術を用いて、SCSC ケーブルのコア径がその交流損失特性に及ぼす影響の評価結果を報告する。

2. 解析対象

本報告では、コア径の異なる二種類の SCSC ケーブルを対象として解析を行う。解析対象の SCSC ケーブルの諸元を Table 1 に示す。これらの SCSC ケーブルを構成する素線の巻き角度は 45 度から 55 度の間で素線間隔が適当な広さとなるように、各層で異なる値に調節されている。また、超伝導層側を銅コア側に向けて巻き付けている。本報告では、これらの SCSC ケーブルが 45 K に冷却され、2 T の外部磁界が印加されている条件下において素線臨界電流が 130 A であると仮定し、SuperPower 社の一般的な超伝導線の E - J 特性の磁場・角度依存性を想定して解析を行った。

3. 解析手法とモデル

本研究では、電流ベクトルポテンシャル T を未知数とし、薄板近似を適用した解析を行った。薄板近似を適用した場合、数学的には二次元問題となるが、超伝導層は三次元空間内の曲面としてモデル化されることから、SCSC ケーブルの三次元構造を考慮することができる。また、薄板近似を銅分層複合マルチフィラメント線に適用することにより、フィラメント間をまたぐ結合電流の経路が二次元平面内に制約されるが、フィラメント間に存在する常伝導部の導電率を調整することによって実際の銅分層複合マルチフィラメント線の特性を再現可能である[1]。

これらの要素を含んだ解析は自由度二百万を超える極めて大規模なものとなることから、高速及び省消費メモリな計算を実現するために階層型行列法を適用した。加えて、超伝導体と常伝導体が隣接して混在する解析対象であることに起因する収束性の悪化を回避するため、代数マルチグリッド法による前処理を適用した[2]。

4. 解析結果の例

構築した大規模数値電磁界解析技術を適用し、コア径の異なる二つの SCSC ケーブルの交流損失の磁化損失を評価する。解析結果の一例として、2.5 mm コアの SCSC ケーブルの、2 T 印加時の磁化損失の周波数依存性を Fig. 2 に示す。超伝導フィラメントで発生するヒステリシス損失、フィラメント間の常伝導部で発生する結合損失、両者を合計した磁化損失を示している。結合損失は理論通りの Debye 曲線となっており、結合損失がピークを取るよりも高い周波数ではヒステリシス損失が増大していることが確認できる。これは、フィラメント間が結合し、損失が低減されていないことを意味する。

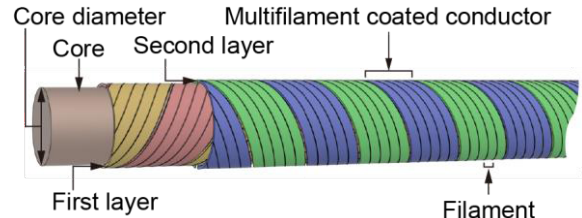


Fig. 1 Schematic view of SCSC cable.

Table 1 Specifications of analyzed SCSC cables.

Cable structure		
Core diameter	2.5 mm	3.5 mm
Number of layers	6	5
Number of tapes	16	19
Cable critical current	2.08 kA	2.47 kA
Outer diameter	3.60 mm	4.41 mm
Length of cable	100 mm	
Tape structure		
Coated conductor width	2 mm	
Filament width	0.36 mm	
Number of filaments	5	
Thickness of copper layer	10 μm	
Thickness of coated conductor	55 μm	
Conductivity of groove	3.0×10 ⁹ S/m	

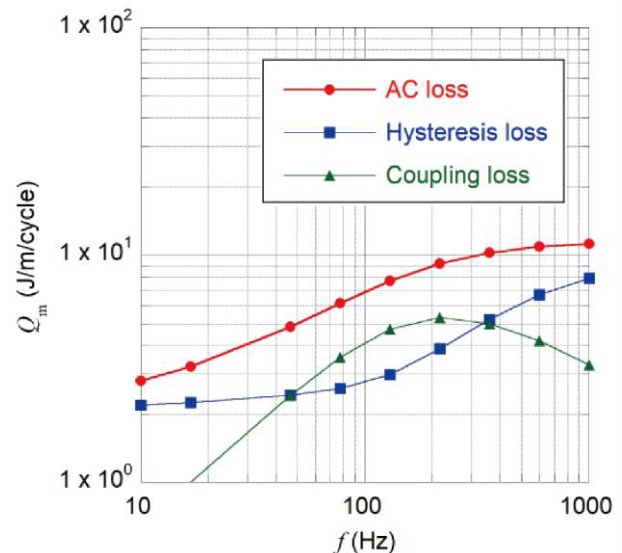


Fig. 2 Frequency dependence of magnetization losses in SCSC cable with 2.5-mm core

謝辞

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

参考文献

- Y. Sogabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.13
- T. Mifune, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 32 (2019) 094002

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年春)(5): 層間偏流を考慮したスパイラル導体の全損失解析手法

Progress of R&D of SCSC cable in Spring 2022 (5): Analysis method of total loss in spiral coated-conductor cable considering current distribution among layers

曽我部 友輔, 播磨屋 稔, 雨宮 尚之(京都大学)

SOGABE Yusuke, HARIMAYA Minoru, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

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

1. はじめに

CORC®導体や SCSC ケーブルといったスパイラル導体は、優れた機械的自由度や高い電流量といった利点をもち、種々のマグネットや電気機器への応用が期待されている。スパイラル導体は電流量を大きくするため、素線を径方向に重ねて巻き付けた多層構造をとる。このとき、各層のインダクタンスが異なるため、特定の層に電流が集中する、層間偏流と呼ばれる現象が発生する。この影響により、スパイラル導体に交流電流を通電した場合の損失は複雑な特性をもつ。本発表では、層間偏流を考慮したスパイラル導体の全損失解析手法を構築したので、これを報告する。

2. 解析手法

スパイラル導体における層間偏流は、各層のインピーダンスの違いに起因する現象であるため、各層を構成する超伝導線を並列回路とみなし、各層の自己インダクタンス L_n 、各層間の相互インダクタンス M_{nm} 、各層の超伝導線の等価抵抗 $R_{n,n}$ 、導体端部の外部回路との接続抵抗 R_t を考慮した電気回路モデルを構築した。三層のスパイラル導体の電気回路モデルの概念図を Fig. 1 に示す。

ここでは、スパイラル導体の各層に流れる電流によって発生する磁界をケーブル軸方向成分と周方向成分に分け、それぞれの鎖交磁束を計算することによって自己インダクタンス及び相互インダクタンスを計算した。また、超伝導線の等価抵抗は、 n 値モデルから計算した。これらは全てケーブルの形状及び電気的特性からのみ決まる。

各パラメータを決定した電気回路モデルに、ケーブルに通電する全電流の時間変化を条件として与え、各時刻における各層の電流を計算する。得られた各層の電流の時間変化を、別途構築した T 法によるスパイラル導体の電磁界解析モデルに境界条件として与えることによって、層間偏流を考慮した全損失解析を実現する。

3. 試解析条件及び結果

ここでは、3 層、各層 2 素線のスパイラル導体を対象として試解析を行った。一般的な CORC®導体を模擬し、奇数層と偶数層の巻き付け方向が逆になるようにした。また、導体長は 25 m、ケーブルの臨界電流は 408 A とし、通電電流の振幅を 200 A、周波数を 65.44 Hz とし、通電電流と同位相の外部磁界を印加した。ここでは、印加する外部磁界の振幅を変化させ、全損失の外部磁界依存性を調べた。

電気回路モデルによって得られた各層の通電電流の時間変化を Fig. 2 に示す。今回仮定した 3 層のスパイラル導体では、2 層目のみ逆方向に巻かれている影響によって 2 層目のインピーダンスが小さくなり、結果として 2 層目に大きな電流が流れる結果となった。今回の条件では導体端部の接続抵抗 (100 nΩ) の影響はほぼなかった。

交流損失の磁界振幅依存性を Fig. 3 に示す。層間偏流を考慮せず、全層に均一に電流が流れていると仮定した場合の解析結果も併せて示す。低磁界領域では通電損失が支配的であるため、2 層目に電流が集中する影響によって、わずかに層間偏流を考慮した場合の方が損失は大きくなった。し

かし、20 mT 以上の磁化損失が支配的な条件では層間偏流の有無によって顕著な差は生じなかった。

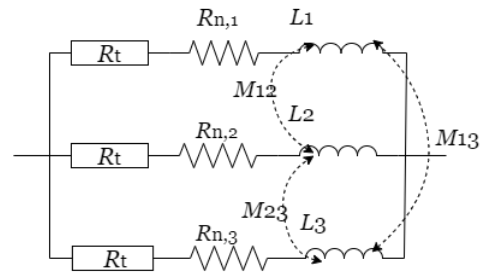


Fig. 1 Circuit model for spiral coated-conductor cable with three layers.

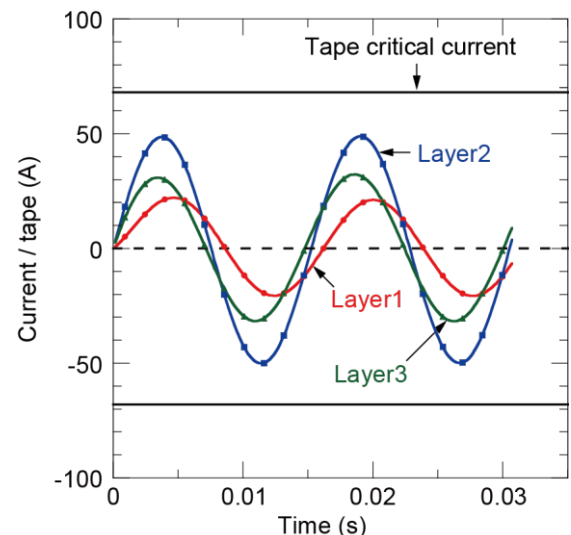


Fig. 2 Current profile in each layer

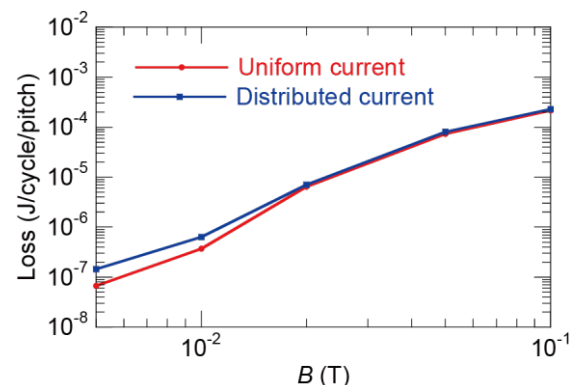


Fig. 3 Total ac losses in the spiral cable calculated with and without current distribution among layers

謝辞

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

SCSC ケーブルで構成されるスキャンング電磁石の概念設計

Conceptual design of scanning magnets using HTS coils wound with spiral copper-plated striated coated-conductor (SCSC) cables for carbon-ion radiotherapy

李 陽, 曾我部 友輔(京大); 岩田 佳之(放医研); 雨宮 尚之(京大)

LI Yang, SOGABE Yusuke (Kyoto University); IWATA Yoshiyuki (NIRS); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: li.yang.8i@kyoto-u.ac.jp

1. Superconducting scanning magnets

Scanning magnets are important components of scanning system for carbon-ion radiotherapy. As shown in Fig. 1, a scanning magnet (SMX) generates time-changing magnetic field to bend carbon-ion beam on x direction. Combined with another scanning magnet (SMY), 2D scanning of the beam at isocenter can be achieved. Fast scanning system developed in Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) uses scanning magnets [1] that operates at high frequency, and scanning system is installed on a rotating gantry [2]. The size of scanning system should be as small as possible to reduce building and operating cost of rotating gantry.

A possible way to reduce the system size is utilizing superconductor scanning magnets. This measure will significantly increase generated magnetic field, which means increased deflection angle of the beam. With same scanning area, increased deflection angle allows shorter distance between scanning magnet and isocenter (smaller scanning system).

2. Beam design and magnet design

We started with beam design of the scanning system. As listed in Table I, length of scanning magnets and its distance with isocenter are adjusted to maintain same scanning area (around 300 mm × 300 mm). The length of scanning system is expected to be reduced by half with adaptation of superconducting scanning magnet.

Also, for the reduction of cable usage, iron yoke is adapted in the designed scanning magnets. Iron yoke is also helpful in generating uniform magnetic field and shielding magnetic fields.

3. Coil design and loss estimation

The superconducting scanning magnet operates at high frequency around hundred hertz, requiring the adaptation of low ac loss cable. Therefore, spiral copper-plated striated coated-conductor (SCSC) cable is chosen as the cable candidate for the superconducting scanning magnet. SCSC cable has better bendability compared to other coated conductor cables such as Roebel cable. And thanks to the striation and spiral geometry, SCSC cable shows small ac losses in high frequency magnetic fields [3]. Parameters of coils in superconductor scanning magnets are listed in Table II. Note that each magnet includes two coils. And each SCSC cable has critical current of 264.8 A.

We conducted ac losses estimation based on the experimental results on SCSC cables [4]. As listed in Table II, ac loss in superconductor coils are considerably large (~1.5 kW) and requires further reduction. It might be achieved by appropriate magnet design that reduces the magnetic field applied on coils, or development of SCSC cables with better loss performance.

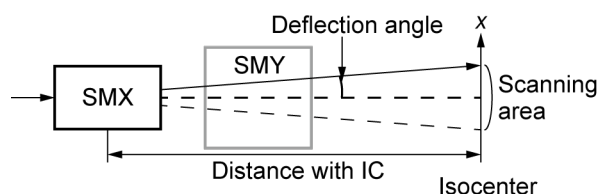


Fig. 1 Conceptual illustration of scanning system

Table I Beam designs of scanning system

	Normal conductor scanning magnet [1]		Superconductor scanning magnet	
	SMX	SMY	SMX	SMY
Max. magnetic field	0.286 T	0.190 T	1.000 T	1.000 T
Length of magnet	0.4 m	0.7 m	0.33 m	0.42 m
Distance with isocenter	8.4 m	7.6 m	2.8 m	2.2 m
Pole width	90 mm	140 mm	110 mm	215 mm
Pole gap	40 mm	82 mm	40 mm	110 mm

Table II Coil designs of superconducting scanning magnet

	SMX	SMY
Turns of each coil	16	16
Perimeter of each coil	1.1 m	1.5 m
Total length of cable	35.8 m	48.3 m
Estimated ac loss in cables at 0.5 T, 200 Hz, 60 K [4]	36.2 W/m	36.2 W/m
Estimated ac losses in coils	1.3 kW	1.8 kW

Acknowledgement

This work is supported by JSPS KAKENHI under Grants JP20H00245.

References

1. T. Furukawa, et al.: Med. Phys., Vol. 37 (2010) p.5672-5682
2. T. Furukawa, et al.: Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B., Vol. 266 (2008) p.2186-2189
3. N. Amemiya, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 35 (2022) 025003
4. M. Shigemasa, et al.: IEEE TAS., Vol. 32 (2022) 8200112

高周波用超伝導線材を用いた高 Q 値コイルによる 高効率ワイヤレス電力伝送システム

High efficiency wireless power transfer system with high quality factor coil using REBCO wire

關谷 尚人, 作間 啓太(山梨大学)

SEKIYA Naoto, SAKUMA Keita (University of Yamanashi)

E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

従来の高温超伝導 (REBCO) 線材 (図 1(a)) は直流では無損失であるが、高周波では表皮効果によって高周波電流が REBCO 線材の表面 (銅やハステロイ) に集中するため、超伝導層に電流がほとんど流れず低損失を実現することができなかった。これに対して、我々は、図 1(b) に示すように 2 枚の REBCO 線材を超伝導層が表面に来るように重ね合わせることで高周波電流を超伝導層に効率よく流す構造 (高周波用超伝導線材) を提案し [1], 高周波用超伝導線材を用いたコイルの Q 値 (約 20,000) が銅コイルの Q 値 (約 1,000) より飛躍的に高くなることを実証した [2]。

本稿では高 Q 値コイルを用いたワイヤレス電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) システムの伝送効率が銅コイルを用いた WPT システムと比較してどの程度向上するか明らかにしたので報告する。

2. ワイヤレス電力伝送システムの設計

図 2 に共振器直結型帯域通過フィルタ理論を用いた WPT システムの等価回路を示す。WPT システムは共振周波数 f_0 、送電 (Tx) 及び受電 (Rx) コイル間の結合係数 k 、入出力と送受電コイルとの結合の強さを示す外部結合 Q_e の 3 つのパラメータで規定できる。本研究では入出力にループコイルを用いて送受電コイルとの外部結合を調整する。

WPT システムの最適化は、初めに、共振周波数 f_0 の送受電コイルを作製し、送受電コイル間距離を変化させ結合係数 k を測定する。次に、ループコイルと送 (受) 電コイル間の距離を変化させながら外部結合 Q_e を測定する。結合係数が決まると最適な外部結合は一意に決まるため、送受電コイル間距離が決まるとそれに対応するループコイルと送 (受) 電コイル間の距離も決まり、良好な帯域通過フィルタ特性が得られる。

3. ワイヤレス電力伝送システムの伝送効率の測定

WPT システムの伝送効率の測定にはネットワークアナライザを用いた。伝送効率は以下の式から求められる。

$$\eta_{\max} = |S_{21}|^2 \times 100 \quad (1)$$

一方、伝送効率の理論計算は結合係数 k と送受電コイルの Q 値の積 (kQ 積) のみに依存し、以下の式となる [3]。

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (2)$$

Q_1 と Q_2 は送受電コイルの Q 値である。

図 3 に送受電コイルに銅を用いた場合と高周波用超伝導線材を用いた場合の送受電コイル間距離に対する伝送効率の測定及び計算結果を示す。伝送効率の測定結果と計算結果はよく一致しており、良好な測定結果が得られた。コイル間距離が 80 cm の時、銅コイルを用いた WPT システムの伝送効率が約 28% に対して、高周波用超伝導線材を用いた WPT システムの伝送効率は約 90% であった。

4. まとめ

高周波用超伝導線材を使った非常に高い Q 値をもつコイルを WPT の送受電コイルに用いることによって、従来技術では実現できない飛躍的に高い伝送効率を実現できることを実証した。

謝辞

本研究はパワーアカデミー特別推進研究の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] N. Sekiya, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) 6602005.
- [2] M. Okeda, et al. Abstracts of CSJ Conference, Vol. 100 (2020) 3A-p03.
- [3] S. Li, et al. IEEE J. Emerging Sel. Top. Power Electron, Vol. 3 (2015) pp. 4-17

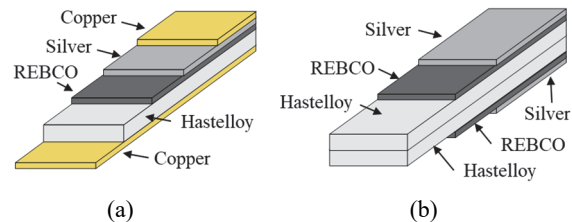


Fig. 1 Configuration of (a) conventional and (b) proposed REBCO wire structure

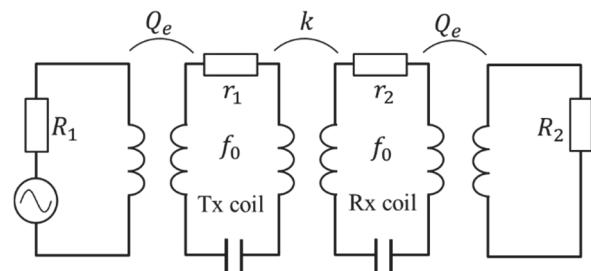


Fig. 2 Equivalent circuit of WPT system.

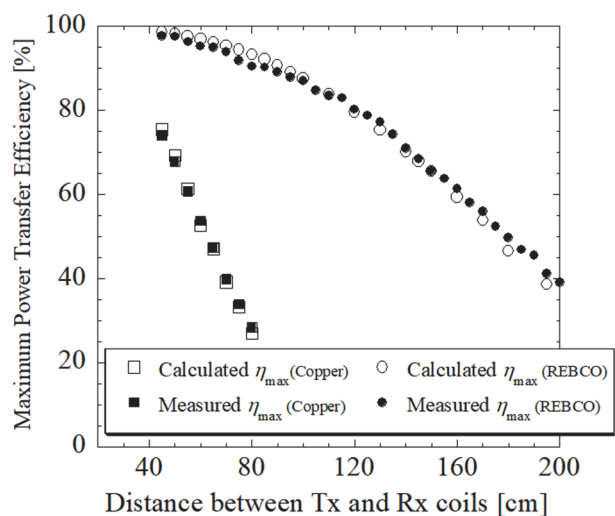


Fig. 3 Measured and calculated $\eta_{\max}$.

超電導体内の電界の時間変化を用いたリザーバーコンピューティングに関する研究

Research on reservoir computing using time-varying electric fields in superconductors

有田 拳, 上田 天馬, 小田部 荘司(九工大情報工); 宇佐美 雄生, 田中啓文(九工大生命体工); 松野 哲也(有明高専)
ARITA Ken, UEDA Tenma, OTABE Edmund Soji, USAMI Yuki, TANAKA Hirofumi (Kyutech); MATSUNO Tetsuya(NIT-Ariake)
E-mail: arita.ken229@mail.kyutech.jp

1. はじめに

近年、非線形な物理現象を利用した物理リザーバーコンピューティングに関する研究が盛んにおこなわれている。しかし、物理リザーバーに利用されていない非線形な物理現象も多数ある。超電導は、流す電流と発生する電界との間に非線形な関係を持つ物理現象である。そこで、超電導現象をシミュレーションにより可視化し、取得した電界をリザーバーとして用い時系列予測に関する様々なタスクを実行することで、超電導現象が物理リザーバーとして有用であるかどうかを調査した。

2. 計算方法

まず、AFI(Affine Integrator)法により TDGL(Time-Dependent Ginzburg-Landau)方程式を解き、2次元超電導現象を可視化した。オーダーパラメータ Ψ に関する初期条件と境界条件を与え、時間刻み幅 τ ごとに座標 (i, j) における Ψ_{ij} を更新し、大きさと位相の情報を持たせてその描画を行った。同時に、超電導体内部の磁束密度、電流密度、電界についても描画を行った。

続いて、超電導体にy軸方向に印加する電流密度 $u(t)$ を正弦波的に変化させながら、可視化した領域からランダムに選択した 50 個の点の電界を計算し、取得した電界値をリザーバーのノードとして用い、正弦波などの簡易波形を教師信号として与え、リザーバーコンピューティングの波形生成タスクを行った。電流密度の時間変化を乱数波に、教師信号を NARMA2(Nonlinear Auto-Regressive Moving Average 2)、非線形メモリタスクの評価関数に変え、NARMA2 タスク、非線形メモリタスクを行った。それぞれの教師信号は、

$$Y_r(t+1) = a_1 Y_r(t) + a_2 Y_r(t) \sum_{i=0}^{m-1} Y_r(t-i) + a_3 u(t-m+1)u(t) + a_4 \quad (1)$$

$$y(t) = \sin(v \times I(t-\tau)) \quad (2)$$

と表される。リザーバーコンピューティングのタスクを行う際の学習方法として、波形生成タスクには線形回帰、NARMA2 タスクと非線形メモリタスクにはリッジ回帰を用いた。時系列予測の精度の評価には R^2 (R Squared)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Y(t_k) - Y_r(t_k))^2}{\sum_{k=1}^n (Y(t_k) - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

を用いた。

3. 結果

超電導現象の可視化シミュレーションに関して、量子化された磁束線が左側の境界から侵入し、右側へ移動していく様子が観察された。また、ピンを導入した際、ピンの中へ侵入した磁束線がその位置でしばらくとどまる様子が観察された。その様子を Fig. 1 に示す。

リザーバーコンピューティングのタスクに関して、波形生成タスクの時系列予測の結果は、正弦波(3 倍波)、三角波、鋸波、矩形波のいずれの波形においても目標の波形に近い予測波形が得られた。特に正弦波の R^2 は1.0であり、かなり精度よく予測できていることがわかった。

NARMA2 タスクでは、目標の波形と予測の波形が一致していないものの、予測波形が目標波形に追従する様子が見られた。 R^2 は0.26であり、精度は良くないが大まかな波形を予

測できているという結果になった。正弦波と NARMA2 の結果を Fig. 2 に示す。

非線形メモリタスクの結果は、 (v, τ) の値が小さいときは目標と予測の波形が一致していたが、 (v, τ) の値を大きくしていくと予測が目標に合わなくなっていく結果となった。 R^2 も (v, τ) の増加とともに減少する結果となった。 τ に関して、 $0 \leq \tau \leq 2$ では精度が良かったが、 $\tau = 3$ から急激に精度が悪くなった。このことから、超電導現象は 2 つ前までの入力情報を記憶できると考えられる。 R^2 の τ 依存性を Fig. 3 に示す。

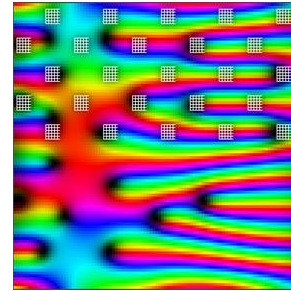


Fig. 1 Magnetic flux lines in the superconductor

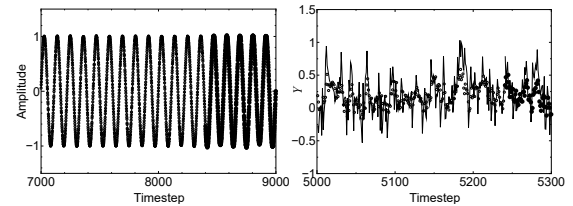


Fig. 2 Results of time series forecast

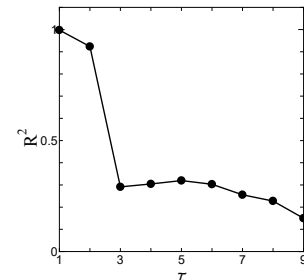


Fig. 3 R^2 - τ dependency

4. 考察まとめ

以上の結果より、超電導現象は精度などの面からまだ改善の余地を残しているが、物理リザーバーとして有用な物理現象であると言える。超電導がリザーバーに必要な非線形とメモリ性を有する要因としてピンニングの影響が考えられる。してがって、ピンの配置の仕方を考えることで、より精度の高い予測が可能になることも予想される。今後は精度改善に向けた研究を行っていく。

参考文献

1. T. Matsuno, E.S. Otabe, Y. Mawatari, J.Phys. Soc. Japan 89 (2020) 054006.
2. 田中剛平, 中根了昌, 廣瀬明. リザーバーコンピューティング-時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア. 森北出版株式会社. 2021 年 3 月

非円形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電力伝送特性

Electric power transmission characteristics in the WPT system for railway vehicle using the non-circular HTS coils

井上 良太, 井上 雄太, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大)
INOUE Ryota, INOUE Yuta, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama Univ.)
E-mail: ryota.inoue@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年, CO₂ 削減の観点から, 急速充電可能な鉄道用非接触給電(WPT)システムが求められている。そこで我々は, 高温超電導(HTS)コイルを用いた鉄道用非接触給電システムについて検討している[1]。その一方で, 車両側の HTS コイルは移動体であるため, コイル間にはレール方向の位置ずれが発生する。そのため, コイル間の位置ずれが発生した場合においても, 送電電力の低下が少なく, 低損失で電力伝送可能なコイル構造を明確にする必要がある。そこで本検討では, 新たに円形コイルと設置面積が同様である正方形コイルに着目し, 非円形 HTS コイル構造が鉄道用非接触給電システムの電力伝送特性に与える影響について検討した。

2. 解析条件

Fig.1およびFig.2に, 本検討で用いた円形コイルおよび正方形コイルの模式図を示す。また, Table 1に, 各コイルの諸元を示す。ここで, Type AおよびType Bは, 円形コイルであり, Type Cは正方形コイルである。また, Type A, Type BおよびType Cのコイル外径は800 mm, コイル内径は100 mmである。なお, Type AおよびType Cは, ターン数が同様であり, Type BおよびType Cは, 自己インダクタンスを揃えたコイルである。ここで, 円形コイルの交流損失は, 薄膜近似を適用した2次元軸対称の有限要素法(2D-TA法)を用いて計算した。また, 正方形コイルの交流損失は, 薄膜近似を適用した3次元有限要素法(3D-TA法)を用いて計算した。

3. 結果および考察

Fig.3に各コイルの交流損失の解析結果を示す。Fig.3より, Type Cの正方形コイルの交流損失は, Type Aの円形コイルの交流損失に比べて, 約1.2倍程度増加した。これは, Type AとType Cのターン間ギャップが同じため, 各ターンで発生する1 mあたりの交流損失がほぼ同様となることから, Type Cの線材使用量がType Aに比べて約1.2倍増加したためと考えられる。一方, Type Bの円形コイルとType Cの正方形コイルの交流損失は, ほぼ同様であった。これは, Type Bの線材使用量はType Cに比べて少ないものの, Type Bのターン間ギャップがType Cに比べて狭くなることから, Type BとType Cの各ターンで発生する1 mあたりの交流損失が上昇したためと考えられる。また, Fig.4およびFig.5に, レール方向のコイル間の位置ずれに対する受電電力および冷凍機動力を含めた電力伝送効率を示す。Fig.4およびFig.5より, Type A, Bの円形コイルおよびType Cの正方形コイルにおける受電電力および電力伝送効率は, レール方向に対するコイル間の位置ずれが大きくなると共に低下するものの, Type Cの正方形コイルは, 円形コイルに比べて, 位置ずれに対する受電電力および電力伝送効率の低下を抑えられることがわかる。これは, 正方形コイルが円形コイルに比べて, 広範囲に磁場を発生させ, レール方向の位置ずれに対する結合係数の低下を抑えられるためと考えられる。以上より, 正方形コイルは円形コイルに比べて, レール方向に対するコイル間の位置ずれに強いコイル構造であることがわかった。また, 正方形コイルと円形コイルのターン数が同じ場合, 非接触給電システムの低周波化に有効であることがわかった。

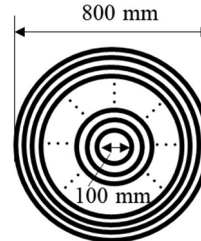


Fig.1 Circular coil

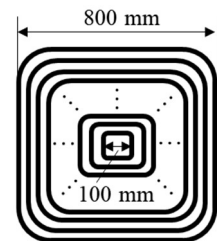


Fig.2 Square coil

Table 1 Specifications of the HTS coils for the WPT system

Coil structure	Type A	Type B	Type C
Number of turns	80	87	80
Self-inductance (mH)	2.3	2.7	2.7
Gap between turns (mm)	4.4	4.1	4.4
Length of HTS wire (m)	113	123	140
Inner diameter (mm)	100	100	100
Outer diameter (mm)	800	800	800
Air gap between coils (mm)	120	120	120
Critical current (A)	240	240	240
Width of HTS wire (mm)	4	4	4

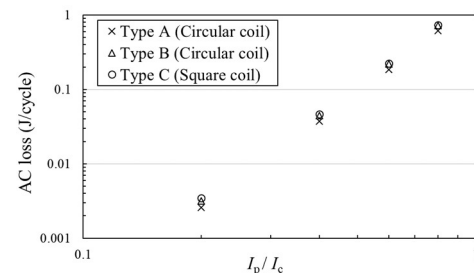


Fig.3 Numerical results of the AC loss per cycle in the HTS coils for the WPT system as a function of transport current.

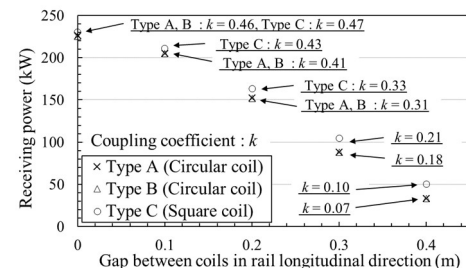


Fig.4 Analytical results of the receiving power of the WPT system as a function of gap between coils in rail longitudinal direction.

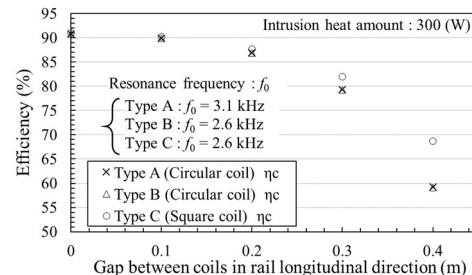


Fig.5 Analytical results of the efficiency of the WPT system as a function of gap between coils in rail longitudinal direction.

参考文献

1. R. Inoue, et al., *J. Cryo. Super. Soc. Jpn.*, Vol. 55, no. 1, (2020) pp. 62-69

アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(4)一定格出力での加熱試験概要

Development of induction heating device for aluminum extrusion molding using HTS magnets (4) – Overview of heating test at rated power

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

1. はじめに

前報[1][2][3]で報告したとおり, 現在我々はアルミ押出加工用のアルミビレット加熱装置を開発している。この装置では, HTS コイルにより生成した直流磁場中でアルミビレットを回転させることで, アルミビレットを加熱する。これまでに, 全体設計, HTS マグネット及び低加熱出力での予備試験結果について報告を行った。その後, 本装置の定格加熱出力である 400 kW 付近での加熱試験を実施したので, その概要を報告する。

2. 400kW 級実証機概要

本加熱装置は, 顧客要求に基づき直径 6 インチ, 長さ 500 mm のアルミビレット(円柱形状のアルミニウム)を約 1 分間で 500 °C に加熱することを目標に設計した。装置の概要図を Fig. 1 に, 実証機の写真を図 2 に示す。装置は駆動部, 加熱部 (HTS マグネット部), 把持機構で構成されている。駆動部には 8 極 400 kW の誘導電動機を採用し, これをインバータにより速度制御することで加熱量を制御する。HTS マグネット部はアルミビレット形状に対応した 2 組のレーストラック状 HTS コイルを対向配置しており, HTS コイル通電電流 200 A のとき加熱領域中心磁場は約 1 T である。把持機構部は, 主に最大荷重 500 kN のプレスシリンダと荷重計で構成し, アルミビレット回転に必要な伝達トルクを確保するとともに, 加熱によるアルミビレットの膨張に対応する。

3. 加熱試験結果

直径 6 インチ, 長さ 500 mm のアルミビレットの加熱試験結果を Fig. 3 に示す。アルミビレットは, 片側端を HTS コイル内側の端に合わせて配置した。HTS コイル電流は 200 A, 最大回転速度 750 min⁻¹ で加熱中の最大加熱出力は約 400 kW (電動機入力より推定), 総加熱時間は約 40 秒, 最高到達温度は約 480 °C であった。

加熱終了時のアルミビレット表面の熱画像を図 4 に示す。この図にて, アルミビレットの右端が HTS コイルの内側端にあり, アルミビレットの左端は HTS コイルの内側端より 100 mm 中央寄りの位置にある。コイル長手方向中央部付近の温度が高く, コイルの端の温度が低い結果となった。

4. 今後の計画

今回の試験では, アルミビレットの表面温度にて加熱状況を確認したが, アルミビレット内部温度の追従状況を確認できていない。今後, アルミビレット内部の温度測定を行い, アルミビレット内部温度の追従状況を把握したうえで, 最適な加熱制御パターンの開発を進める。

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。

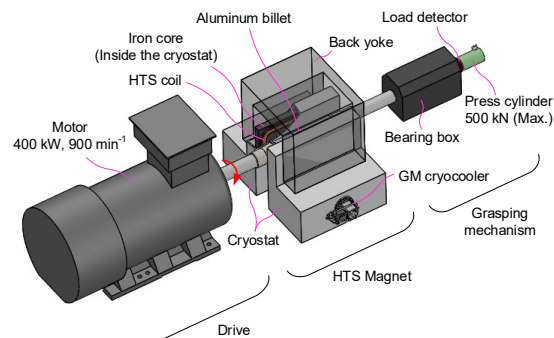


Fig. 1 Schematic diagram of aluminum billet heating device

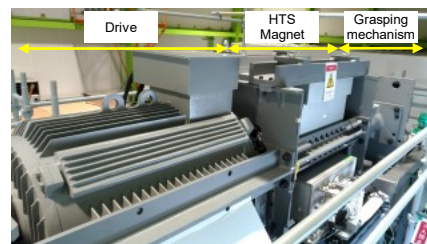


Fig. 2 Demonstrator of aluminum billet heating device

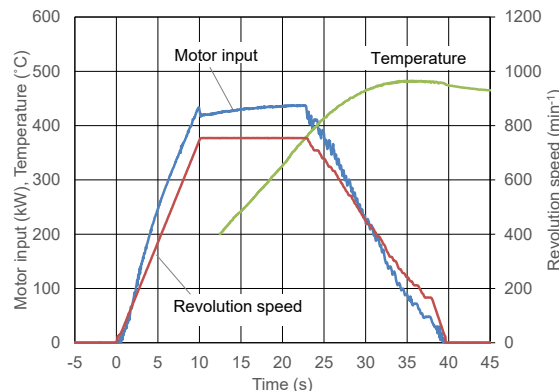


Fig. 3 Heating test at rated power

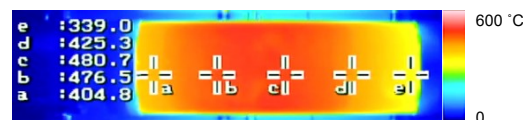


Fig. 4 Temperature distribution on billet surface observed using thermo-viewer

参考文献

1. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.108
2. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.5
3. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2021) p.42

レーストラックコイルを用いた磁気浮上システムにおける コイル直線部長さと浮上特性

Influence of Racetrack Coil's Straight Length on Levitation Properties in Magnetic Levitation System

中村 幸太, 園田 翔梧, 高尾 智明, 中村 一也(上智大学); 塚本 修巳(横浜国立大学)
NAKAMURA Kota, SONODA Shogo, TAKAO Tomoaki, NAKAMURA Kazuya (Sophia University);
TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University)
E-mail: k-nakamura-319@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

我々は, HTS バルクの磁場遮蔽効果を利用した吸引型磁気浮上システムを提案している[1][2]。このシステムは, HTS コイル, HTS バルク, 強磁性体(鉄)レールから構成されている。

先行研究におけるモデルでは, HTS コイルの形状が円形であり, 実用化に向けてモデルのサイズを拡大した際に, 鉄レールから HTS コイルが大きくなり出す。このことから, HTS コイルから発生する磁場を鉄レールに効率良く到達させることができない。そこで, コイルの形状を円形からレーストラック型としたモデルを提案する。

2. 浮上原理と解析モデル

Fig. 1 にモデルの2次元図を示す。鉄レールとHTSバルク間の距離を Gap と定義する。外乱により Gap が小さくなった場合, バルクの磁場遮蔽効果によって, 鉄レールに到達する磁場が減少する。つまり, 鉄レールへの吸引力も減少するので, Gap が再び大きくなる。反対に外乱により Gap が大きくなった場合, バルクから遠ざかるため, 鉄レールに到達する磁場が増加する。よって, 鉄レールへの吸引力も増加するので, Gap が小さくなる。以上が, 我々が新たに提案した磁気吸引型浮上方式の浮上原理である。また, 本研究では, 鉄レールへの吸引力を車体の浮上力として定義する。

Table 1 に材料寸法を示す。レーストラックコイルの直線部の長さを C_s と定義し, C_s による浮上力特性への影響を解析した。 C_s を伸ばすと同時に, HTS バルク及び鉄レールの長手方向の長さも伸ばした。レーストラックコイルの通電電流は 180 A である。解析は有限要素法ベースのシミュレーションソフトウェアである COMSOL Multiphysics® を用いて行った[3]。

3. 解析結果

浮上力解析結果を Fig. 2 に示す。横軸はコイル直線部距離 C_s , 縦軸は Gap を変化させた際の最大浮上力である。 C_s を 0 mm から 1000 mm へ増加させた際, 最大浮上力は 10.0 kg から 19.8 kg まで増加した。これは, コイルの形状を円形からレーストラック型にしたことにより, コイル半円部と直線部の相互作用による磁場と, 直線部で発生する磁場が鉄レールに侵入したからだと考えられる。つまり, 鉄レールに侵入する総磁場量が円形のモデルと比較して増加するからである。よって, コイル直線部が長くなるほど, 鉄レールに侵入する総磁場量が増加するため, 浮上力向上に繋がったと考えられる。

以上より, コイル直線部を長くすることで浮上力が向上した。

4. まとめ

本研究では, HTS コイルの形状を円形からレーストラック型としたモデルを提案し, レーストラックコイル直線部の長さを変化させることに着目した。その結果, 最大浮上力は直線部の長さの増加により, 鉄レールに侵入する総磁場量が増加することによって, 円形のモデルよりも向上した。

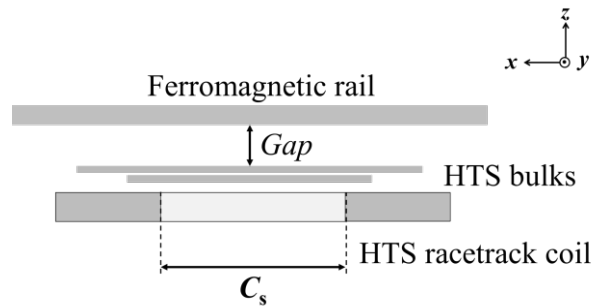


Fig. 1. 2D illustration of racetrack coil model.

Table 1. Specimen dimensions.

Component	Dimension [mm]
Ferromagnetic rail	$x \times y \times z: (350 + C_s) \times 8 \times 16$
HTS bulk (upper)	$x \times y \times z: (90 + C_s) \times 20 \times 2$
HTS bulk (lower)	$x \times y \times z: (60 + C_s) \times 10 \times 2$
HTS racetrack coil	Inner dia.: 60, Outer dia.: 97, height: 9.7, C_s : 0-1000

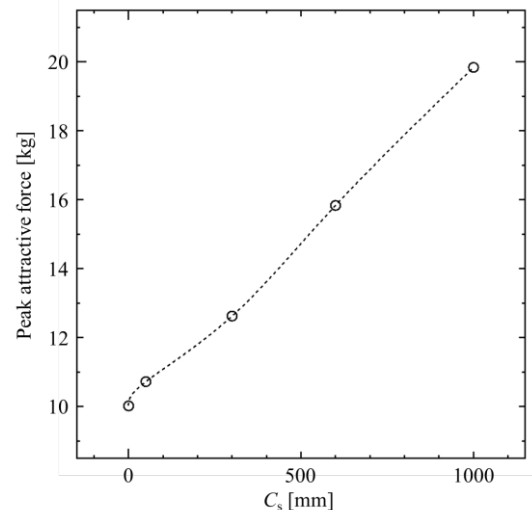


Fig. 2. Influence of coil's straight length on peak attractive force.

参考文献

- Y. Kaneko, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30, no. 5, (2020), Art. no. 3601706.
- T. Kitamura et al. MT-27, TUE-PO1-509-10 (2021).
- KESCO 「COMSOL」, <<https://kesco.co.jp/comsol/>> 2022 年 4 月 29 日アクセス.

超電導フライホイール用 SMB の開発 — 回転安定性向上策の検討 — Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system — Stability of Rotation —

宮崎 佳樹, 山下 知久, 小方 正文, 富田 優(鉄道総研)

MIYAZAKI Yoshiki, YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, TOMITA Masaru (RTRI)
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

フライホイール蓄電装置は回転数を制御することで運動エネルギーを電気エネルギーに変換する蓄電デバイスである。鉄道総研ではこれまでフライホイールの鉄道応用を目指し、150kN を超える浮上力が発生可能な大荷重超電導磁気軸受 (SMB) の開発を進め[1, 2]、回転や振動に対する SMB の動的評価を行うため専用の試験装置を製作した。本報告では動的評価試験装置から得た知見や、課題となった回転不安定性の現象解明とその対策の考え方について報告する。

2. 浮上、回転時の SMB 動的評価

SMB の安定運用にむけ、回転中に発生する振動等の超電導バルク、コイルや構成部材への熱的、機械的影響を評価することは重要である。Fig. 1 に SMB 動的評価試験装置の構成を示す。SMB を回転軸に対して上下対称に配置することで、回転軸に、大きさは等しく逆向きの電磁力(浮上力)を発生させて相殺する構成としている。このようにすることで、フライホイールロータがなくとも、SMB に 15 トン相当の荷重負荷を与えながら回転させることができる。PM モータにより回転軸を回転させ、ラジアル方向の支持は制御型磁気軸受(AMB)が担う。

3. 浮上、回転試験

SMB 動的評価試験装置に取り付けた上下 2 つの超電導コイルの励磁電流を変えながら浮上・回転試験を実施した。Fig.2 に励磁電流と回転数上限の関係を示す。AMB によるラジアル方向の拘束を維持して回転可能な回転数は、電流の 2 乗に比例する浮上力が大きくなるほど低下する結果となった。特に 150A 通電(浮上力 150kN)では、500min⁻¹ で AMB のタッチダウンベアリングに接触していることから、当初想定していたなかったアンバランス力が低速域から生じ、AMB のラジアル拘束力(2000N 程度)を超えたためと考えられた。電磁解析の結果、超電導コイル周辺の銅製伝熱部材のうち、特に超電導バルクに近い部分などに生じる渦電流の作用により、低回転数領域から大きなローレンツ力が作用し、AMB の拘束力を超える可能性があることがわかった(Fig. 3)。

4. 回転不安定要素とその対策

超電導バルクと超電導コイルおよび伝熱板に作用する電磁力としては、超電導コイルと超電導バルクの間の磁気反発力(磁気ばね)と、超電導バルクと伝熱部材の間に働くローレンツ力がある。電磁界解析の結果、銅製伝熱部材に働くローレンツ力は、磁気ばねの 4 倍以上となることがわかった(Fig. 4)。

さらに一連の試験から回転軸の固有振動数特性が AMB の制御に影響を及ぼし制御不安定となる事象があることも判明した。AMB による回転軸の制御が不安定な状態でラジアル方向に大きなローレンツ力が作用することにより、低速から回転不安定性が増大するメカニズムがあることがわかった。

これらの対策として、伝熱部材のうち、渦電流による影響の大きい銅製伝熱部材の電気絶縁化を行った。回転軸の固有振動数については、運用上限周波数に近い固有値の高周波数化を行うことで安定制御が可能であるということを制御シミュレーションにより確認した。詳細については当日報告する予定である。今後は対策を講じた断熱回転軸を組込んだ SMB を被試験体として動的性能評価装置に搭載して対策の効果を検証する予定である。

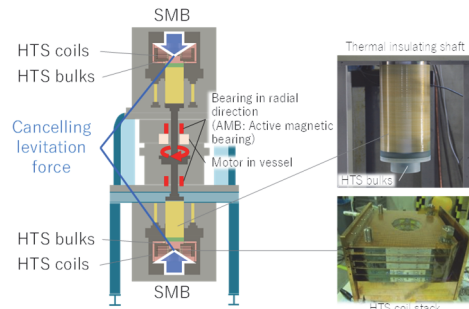


Fig. 1 Flywheel test equipment.

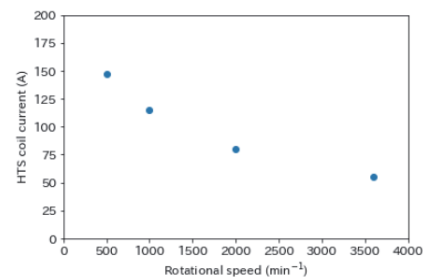


Fig. 2 HTS coil current and rotational speed.

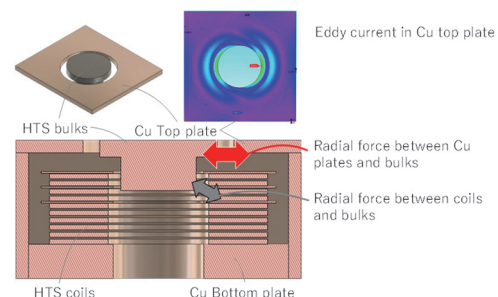


Fig. 3 Electromagnetic force among HTS bulks, coils, and thermal conductive plates in the radial direction.

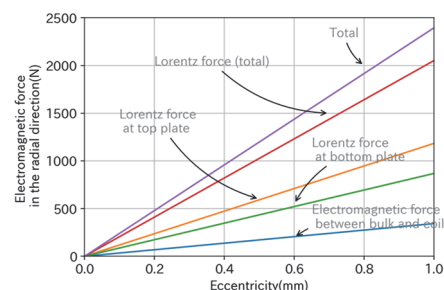


Fig. 4 Detail of electromagnetic force of SMB in the radial direction at 3600 min⁻¹.

参考文献

- [1] T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, **96** (2018) 139
- [2] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, **95** (2017) 168

極細多芯化を目指した REBCO 薄膜線材の開発 Development of REBCO coated conductors for ultra-fine multifilament

松本 明善、立木 実、大井 修一(NIMS)、寺西 亮(九大)

MATSUMOTO Akiyoshi, TACHIKI Minoru, OOI Shuichi (NIMS), TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.)

E-Mail: matsumoto.akiyoshi@nims.go.jp

1. はじめに

REBCO 超伝導体は高い超伝導転移温度 T_c を有しており、送電用超伝導ケーブルや強磁場用超伝導マグネット用線材用材料としてすでに世界各国で実証試験も盛んに行われている材料である。一方で、現在市販されている素線となる超伝導線材はテープ形状をしており、薄い金属板上に何層ものバッファ層を堆積させ、配向度を整えたうえで蒸着等による薄膜成膜手法で作製されている。このような平板上に作製された超伝導体膜は結晶軸がほぼ 3 軸に整った単結晶に近い構造を有し、高い臨界電流密度特性を有している。

テープ形状の薄膜超伝導線材を電力応用に適するためには有力な手法の一つとして細線化が行われている。現在はテープを物理的に切断する手法が有力な解決方法である。しかしながら、この方法ではレーザーや機械的に切断を行うために細線化に限界も生じる。そこで本研究では REBCO 層形成前の基板に構造体を意図的に導入し、バリア層として機能させることで、極細多芯化した REBCO 薄膜線材の創製を目的とする。

2. 実験

Fig.1 に薄膜作製方法の概念図を示した。本研究ではバリア層を形成させるための構造を便宜上バンク構造と呼ぶ。このバンク構造を STO 単結晶基板の上にリソグラフィー技術によって形成させる。本研究ではこのバンク構造の幅がフォトリソグラフィー技術によってどの程度まで目的に沿った形で形成できるかの実証も兼ねるために 5 ~ 20 μm の幅のバンクパターンを利用した。その後、スパッタ法により金属 Zr の蒸着を行った。得られたバンク構造の光学顕微鏡像とレーザー顕微鏡による形状測定結果を Fig.2 に示す。基板上に Zr バンクが形成されていることを確認することが出来た。その後、その基板にパルス・レーザー蒸着法によって YBCO 超伝導膜を堆積させた。得られた超伝導薄膜については組織観察等によって目的とした組織が得られているか確認するとともに超伝導特性については磁気光学像を用いて超伝導相の形成の確認及び非超伝導相による分割の可能性を確認した。

3. 結果および考察

Fig.3 に磁気光学像の結果を示す。試料は Zr のラインパターンをリソグラフィー技術によって作製し、その上に YBCO 膜を堆積させている。白いラインパターンは磁束が侵入した領域で非超伝導相領域であることを示しており、さらにその間に超伝導を示すルーフトップ形状をしていることがわかった。

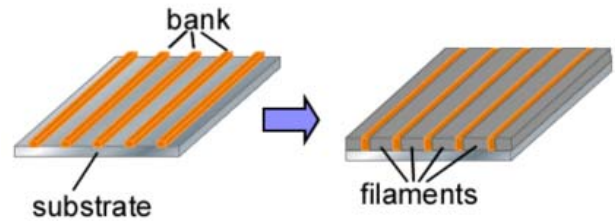


Fig.1 The schematic view for making multifilamentary REBCO superconducting tapes.

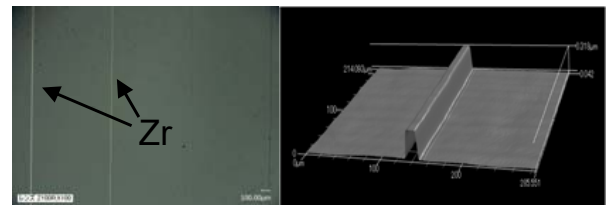


Fig.2 OM image and the shape measurement by laser microscope of Zr patterned film. The height of bank was 318 nm.

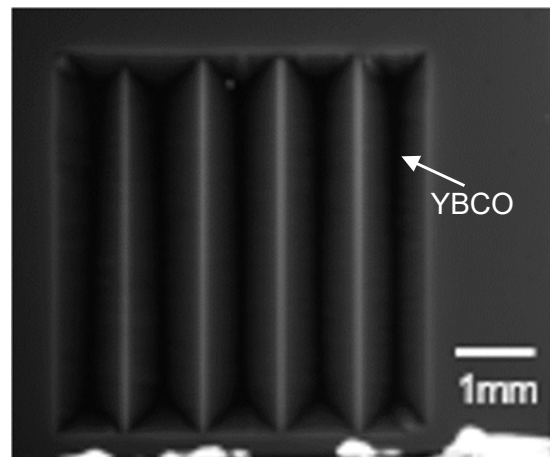


Fig.3 MO image of YBCO patterned film at 60 K and 400 Oe.

一番左のバンクの幅は 2 μm であった。この幅においても非超伝導層による磁束侵入が起こっており、この幅での分割が可能であることを示すことが出来た。

4. 結言

リソグラフィー技術を用いて REBCO 層の成膜前基板にパターンを作製し、成膜を行った。その結果パターンに合わせて超伝導相と非超伝導相を作製することができ、極細多芯化の可能性を示すことが出来た。

Zr をパターンニングした基板上への MOD-YBCO 薄膜の結晶配列制御 Control of crystal array of YBCO film prepared by MOD process using Zr-patterned substrate

藤本大貴, 寺西 亮 (九大), 大井修一, 松本明善 (NIMS)

FUJIMOTO Hiroki, TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.), OOI Shuuichi, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)

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

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_y (YBCO) 線材の交流損失の低減には、YBCO 層内の幅方向の磁束線の移動範囲を狭めることが有効であり、細線化の方法がいくつか報告されている[1-5]。その1つとして、レーザー光を用いてスクライビング加工することにより、精緻な細線が作製されている[4]。その一方で細線化加工の際のオーバーエッチングにより、電流密度が減少してしまうことがある[4]。このことから、加工によるダメージを与えないで細線化することができる方法が期待される。そこで我々は細線化の方法として、予め基板上に YBCO との整合性の低い物質を意図的に細線状にパターンニング(バンク構造化)したのち、YBCO を成膜することで、YBCO 層を配列する部分とそうでない部分に区画化する方法を提案する。本報告では、Zr を細線状にパターンニングした基板上に YBCO を作製し、Zr 上の YBCO 薄膜の結晶配列制御を行うことを目的とした。

2. 実験方法

MOD には Y : Ba : Cu = 1 : 1.5 : 3 のオクタノン溶液を用いた。基板には、SrTiO₃(100)上に Zr を 5~20 μm の幅で細線状にパターンニングしたものを用意した。Fig. 1 のレーザー顕微鏡のパターン観察で得られた基板の情報から、約 15 μm の幅のパターンが確認できる。次にこの基板上に YBCO を成膜した。まず、3000 rpm、2 分間の条件で原料溶液をスピコートして 703 K で仮焼し、この工程を 3 回繰り返した。その後、1053K で 150 分本焼したのち、723 K で 10 時間で酸素アニールした。YBCO の膜厚は約 600 nm である。得られた試料を SEM にて二次電子像観察を行い、YBCO 膜の結晶組織や Zr のパターンニングの有無による YBCO の配列について調査した。

3. 結果と考察

Fig. 2, 3 は YBCO の成膜後に膜の上面から観察した SEM 像である。Fig. 2 (a), (b)はそれぞれ Zr をパターンニングしていない試料における低倍率と高倍率の、また Fig. 3 (a), (b)は Zr をパターンニングした試料における低倍率と高倍率の SEM 像である。Fig. 2(b), Fig. 3(b)はそれぞれ Fig. 2(a), Fig. 3(a)の四角部分の拡大図である。Fig. 2(a), Fig. 3(a)を比較すると、前者は一樣な結晶の拡がり観察されたのに対し、後者では幅 12 μm 程度で観察視野の中央に上下方向の端から端までコントラストの違いが観察された。一方、後者におけるコントラストのない部分は前者と同様に一樣な結晶の拡がり観察された。後者におけるコントラストの強い部分は幅 10 μm の Zr パターン位置に相当し、Zr の幅よりも 20%程度拡がっていることがわかる。これは Zr の側面においても YBCO の整合性が低いために、YBCO の配列を乱していることに起因すると考えられる。

また Fig. 2(b), Fig. 3(b)を比較すると、前者では一樣な結晶構造が観察されたのに対し、後者では Zr がパターンニングされた、観察視野の右側上下方向に結晶構造が乱れ

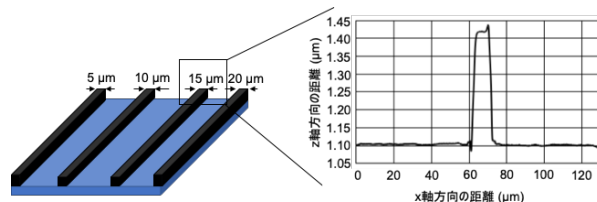


Fig. 1 The information of Zr-patterned substrate

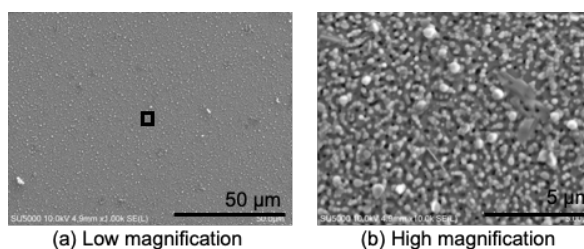


Fig. 2 SEM images of YBCO film on the substrate

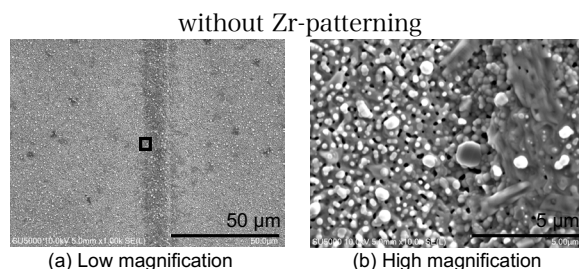


Fig. 3 SEM images of YBCO film on the substrate

without Zr-patterning
ていることが観察された。一方、後者の Zr がパターンニングされていない部分では前者と同様に一樣な結晶構造が観察された。すなわち、Fig. 3(b)では Zr のパターンニングが結晶構造の乱れに寄与していると考えられる。
以上のことから、基板への Zr のパターンニングの導入によって YBCO の結晶配列の制御が可能であるということがわかった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K18831 および 22H0219、ならびに (国研) 物質・材料研究機構の Joint Research Hub Program の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] 雨宮 尚之 低温工学, 45, 8 (2010).
- [2] 町敬人 et al., TEION KOGAKU, 50, 10 (2015) 476482.
- [3] Y. Shiohara et al., Jpn. J. Appl. Phys., 51 (2012) 010007.
- [4] T. Machi et al., Supercond. Sci. Technol., 26 (2013) 105016.
- [5] X. Cai et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 3 (2013) 6603005.

低 R_s ・高 J_c -REBa₂Cu₃O_y 薄膜を用いた高耐電力送信フィルタの設計 Design of High-power transmit HTS filter using low- R_s and high- J_c REBa₂Cu₃O_y thin films.

作問 啓太(山梨大); 伊藤 慶信, 村上 純, 齊藤 敦(山形大); 關谷 尚人(山梨大)

KEITA Sakuma (University of Yamanashi); KEISHIN Ito, JUN Murakami, ATSUSHI Saito (Yamagata University); NAOTO Sekiya (University of Yamanashi)

E-mail: ksakuma@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物高温超伝導体 REBa₂Cu₃O_y (REBCO)を用いたマイクロ波送受信フィルタは常電導体では実現できない低損失および急峻な遮断特性を実現できる。送信フィルタには、高い耐電力値が求められ、耐電力は REBCO 薄膜の臨界電流密度(J_c)によって制限される。加えて、フィルタには低い表面抵抗(R_s)の REBCO 薄膜が要求される。そのため、低い R_s および高い J_c を同時に満たす REBCO 薄膜が必要とされる。しかし、市販されている REBCO 薄膜では低 R_s であるが J_c が低いため、送信フィルタとして使用することは困難である。そのため、REBCO を用いた受信フィルタは実用化されているが、送信フィルタは実用化されていない。我々は Trifluoroacetates Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法を用いることにより、非常に高い J_c を有する REBCO 薄膜($J_c = \sim 9$ MA/cm² at 77 K)の作製に成功した[1, 2]。しかし、TFA-MOD REBCO 薄膜の R_s は測定されておらず、また、送信フィルタに必要な耐電力値を満たすか明確ではなかった。本研究では、TFA-MOD REBCO 薄膜の R_s 測定および送信フィルタの設計を行い、TFA-MOD REBCO 薄膜が低 R_s ・高 J_c を同時に満たすこと、送信フィルタの耐電力値が 100W(5 GHz, 35 K)を超える可能性があることを明らかにしたので報告する。

2. TFA-MOD REBCO 薄膜の作製および評価

R_s の測定およびフィルタなどのマイクロ波機器作製のために、大面積(25mm 角以上)の TFA-MOD REBCO 薄膜が必要である。TFA-MOD を用いて、25mm 角の CeO₂ バッファ R-Al₂O₃ 基板上に REBCO 薄膜の作製を試みた。Fig.1 に 25mm 角の TFA-MOD REBCO 薄膜を示す。スパインコートで溶液を塗布しているため、4 つ角に膜厚が不均一な部分があるが、REBCO が全面にできていることがわかる。Fig.2(a)に 25mm 角 TFA-MOD REBCO 薄膜の超伝導転移温度(T_c)分布を、Fig.2(b)に J_c 分布(77 K)を示す。Fig.2(a)から、 T_c は薄膜全体で均一であると予測される。また、Fig.2(b)から、 J_c は薄膜全体で均一であると予測され、25mm 角の基板上に均一な超伝導特性を有する REBCO 薄膜が作製できたと考えられる。TFA-MOD REBCO 薄膜の R_s を測定し、1.3 mΩ (22 GHz, 15 K)を示した。 R_s については、当日詳細に述べる。

3. 送信フィルタの設計

我々は市販 REBCO 薄膜を用いて 5 GHz 4 段の送信フィルタの作製を行い、耐電力値が 5.3 W(5 GHz, 35 K)であることを明らかにした[3]。この値を元に、TFA-MOD REBCO 薄膜を用いた送信フィルタの耐電力値の計算を行った。Fig.3 に電磁界解析シミュレーションを用いて設計した送信フィルタおよび周波数特性を示す。シミュレーション結果を元に、TFA-MOD REBCO 薄膜を用いた送信フィルタの耐電力値の計算を行い、当日詳細に述べるが耐電力値は 100 W(5 GHz, 35 K)を超える可能性があることがわかった。

4. まとめ

均一な超伝導性を有する 25mm 角 TFA-MOD REBCO 薄膜が得られ、その薄膜を用いた送信フィルタの耐電力値は 100W を超える可能性があることを明らかにした。今後は、実際に送信フィルタを作製し、耐電力値の測定を行う。

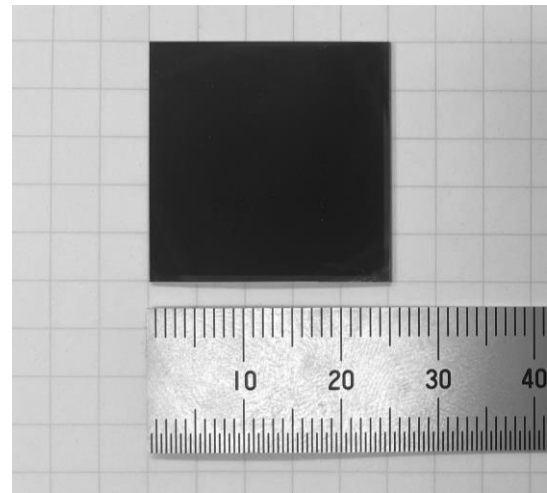


Fig.1 25mm 角の TFA-MOD REBCO 薄膜

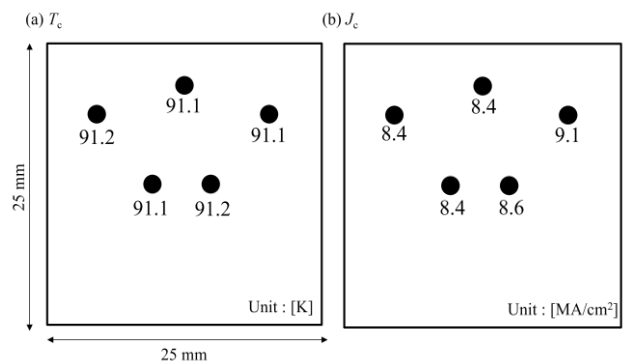


Fig.2 25mm 角 TFA-MOD REBCO 薄膜の(a) T_c 分布および(b) J_c 分布(77 K)。黒丸は測定点を示している。 T_c および J_c は直流四端子法を用いて測定した。

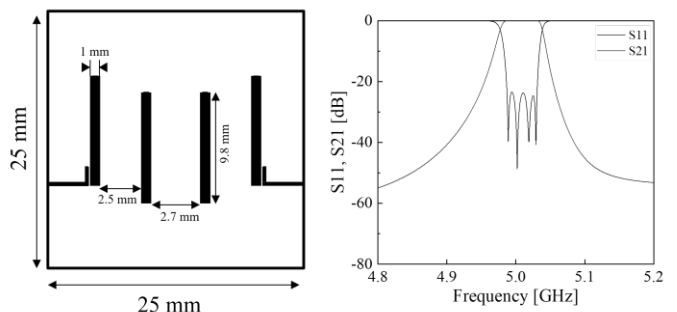


Fig.3 4 段の送信フィルタの形状および電磁界解析から得られた周波数特性

参考文献

1. K. Sakuma et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 58, (2019) 053001
2. K. Sakuma et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, (2018) 033102
3. N. Sekiya, Physica C 530, (2016) 117

YBa₂Cu₃O_yを用いた磁場シールド材の作製

Fabrication of superconducting shield materials for DC magnetic field by YBCO

田丸隼也, 寺西 亮, 岩熊成卓 (九州大), 井上昌睦 (福岡工大)

TAMARU Jun-ya, TERANISHI Ryo, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.), INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. of Tech)

E-mail: teranishi@zaiko.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導体をモーター等の電力機器に応用する際には、発生する磁場を遮蔽する必要がある場合がある。磁場シールド材としては強磁性体を用いるものと超伝導体を用いるものが報告されている[1,2]。超伝導体として、YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) は 90 K を超える超伝導転移温度を有していることから液体窒素冷却すれば、冷却コストの観点で利点がある。YBCO はこれまでバルク体や薄膜線材として作製されてきているが、シールド材として利用するには形状の自由度がより高いことが望まれる。また、航空機での磁場遮蔽を考慮した場合には、軽量であることが強く望まれる。

我々は形状自由度が高く、軽量の樹脂に注目し、これまで YBCO 粉末を加えた樹脂製のシールド材の作製を試みている[3]。しかし、磁束線が粒子間をすり抜けることから磁場の遮蔽率が低く、膜厚方向での粒子の高充填化および増大が課題の一つとなっている。そこで、本研究では基板上に YBCO を薄膜で作製することにより粒子の高充填化および増大による磁場の遮蔽効果を検討した。

2. 実験方法

本研究では、比較のため YBCO 樹脂シート材と金属基板上に作製した YBCO 無配向膜を準備した。前者の作製には YBCO 粉末 (豊島製作所製、平均粒径 3.8 μm) と PET 樹脂を用いた。粉末:液状 PET 樹脂を vol% で 60:40 に混合して攪拌し、アプリケーターを用いて離型フィルム基材上に塗工した後、ホットプレートを用いて 85 °C および 135 °C で 5 分および 10 分熱処理して得た (Resin sheet と表記)。また、YBCO 無配向膜は Y : Ba : Cu = 1 : 1.5 : 3 のモル比のオクタノン溶液を無配向パーマロイ基板上に作製した。溶液を基材上にスピコートして 430°C で仮焼する工程を 3 回および 5 回繰り返し、その後 780°C で本焼し、400°C で酸素アニールした (3 回および 5 回塗布試料をそれぞれ Sample3 および Sample5 と表記)。

得られた試料の生成相の同定には X 線回折装置 (XRD) を、磁場シールド率の測定には、永久磁石を用いて磁場印加を行って漏れ磁場を評価する自作装置をそれぞれ用いた。

3. 結果と考察

Fig.1 に XRD による生成相の同定結果を示す。Sample3 および Sample5 において、いずれも YBCO 相に起因する回折ピークが観察され、基板上に無配向で YBCO が生成しているが示された。また、YBCO 相のピークを用いて積分強度を比較した結果、Sample3 および 5 でそれぞれ 674 および 948 となり、厚膜化した Sample5 は 3 よりも YBCO 粒が多く存在することが確認された。なお、その他の生成相として基板由来の金属の酸化物や Y と Cu の酸化物などの存在も示された。

Fig.2 に磁場シールド率測定の結果を示す。従来の YBCO 樹脂シート材と比較して、パーマロイ基材上に作製した無配向 YBCO 膜試料で高いシールド率が示され、外部磁場が 10 mT で比較すると約 40 倍となった。また、Sample3 と 5 を比較すると、YBCO 粒子数が多い Sample5 のシールド率は Sample3 を下回る結果となった。両試料の XRD 測定結果から酸素欠損量 δ を見積り、それら δ の値から T_c を試算した結果 [4]、Sample3 および 5 でそれぞれ 90 K および 86 K となっ

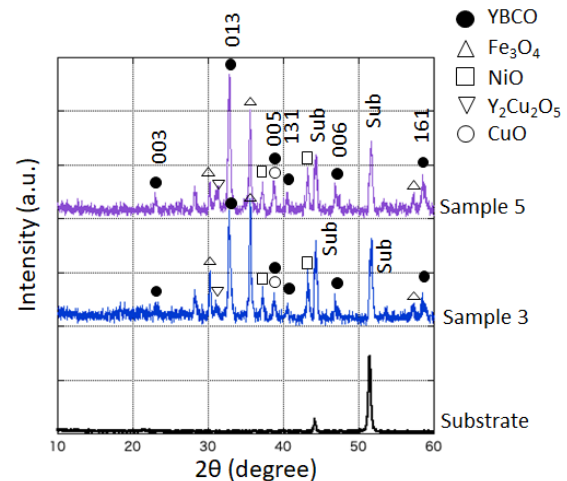


Fig. 1 Results of XRD measurement.

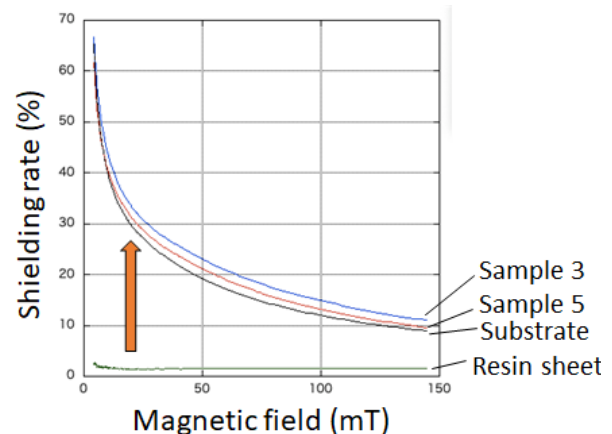


Fig. 2 Results of Shielding rate for the prepared samples at 77 K.

た。このことから、両者のシールド率の違いには T_c の違いが影響しているものと考えられる。

以上より、YBCO 粒子の高充填化および粒子数の増大によって磁場シールド率を向上できることが検証された。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の航空機用先進システム実用化プロジェクトの業務として得られたものである。

参考文献

- [1] 松葉博則, 表面科学, 12 (1991) 31-37.
- [2] 町 敬人ら, 第 98 回 2019 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 76.
- [3] 寺西 亮ら, 第 101 回 2021 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 117.
- [4] J.D. Jorgensen et al., Phys. Rev. B, 41 (1990) 1863-1877.

一方向溶融成長(SDMG)法による複雑形状 REBCO 溶融凝固バルクの直接育成 Direct growth of REBCO melt-textured bulks with complex shapes by the Single-Direction Melt Growth (SDMG) method

元木 貴則, 三輪 将也, 仙波 実怜(青学大), 中村 新一(TEP), 下山淳一(青学大)
MOTOKI Takanori, MIWA Masaya, SEMBA Mirei (Aoyama Gakuin Univ.), NAKAMURA Shin-ichi (TEP),
SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは、強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。溶融凝固バルクは通常、Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法などに代表されるバルク上面に設置した種結晶を起点として徐冷による溶融凝固で育成するため、種結晶から鉛直方向に成長する *c*-growth 領域と動径方向に成長する *a*-growth 領域を含む。バルクの成長方向によって $\text{RE}_2\text{BaCuO}_5$ (RE211) 析出物の体積分率や結晶性に違いが生じ、それを反映して捕捉磁場特性の均一性に影響する。これまで我々は全体が単一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの作製が可能な Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた^[1]。本手法は、希土類元素の異なる REBCO の包晶温度(T_p)の差を利用して、高 T_p の既製の TSMG バルクを板状に切り出して seed plate とし、その上に載せたバルクを鉛直方向に一次的に結晶成長させる手法である。

2. 実験方法

日本製鉄社製 GdBCO もしくは EuBCO 溶融凝固バルクを[001]方位が鉛直方向になるよう切り出した平板を seed plate とし、その上に YBCO および DyBCO 焼結体ペレットを設置し、seed plate の T_p 以下で結晶成長させることでバルク全体が *c*-growth 領域からなる SDMG 法溶融凝固バルクを作製した。なお、REBCO ペレットには、TEP 社製混合粉(RE123:RE211 = 7:3)に T_p を低下させるため 10 wt% の Ag_2O を、RE211 の微細化のため 0.5 wt% の CeO_2 をそれぞれ混合したものを用いている。様々な形状の金型を用いて中空円筒形状を含む複雑形状ペレットを一軸プレス (~100 MPa)により成型し、SDMG 法で溶融凝固バルクを育成した。すべてのバルクについて、seed plate から切り離した後、1% O_2 /Ar フロー中 850–900°C での還元アニールを行い、最後に 425°C で長時間の酸素アニールを行った。捕捉磁場特性は液体窒素浸漬下で 2 T までの磁場中冷却後、ホールプローブにより評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に EuBCO seed plate 上に SDMG 法で育成した DyBCO リングバルクの外観を示す。上面近傍まで溶融凝固バルク特有の光沢が見られ、リングバルク全体に結晶成長している様子が確認される。seed plate 界面側表面の捕捉磁場分布を Fig. 2 に示す。全体に乱れのほとんど見られない均質な組織を反映した磁場分布であり、バルク表面で ~0.4 T、リング内部で ~0.6 T の最大捕捉磁場を示した。電流密度は高さ方向に一定でかつ *ab* 面内のみに流れることを仮定して、Fig. 2 の捕捉磁場分布から Biot-Savart の逆問題を解くことで推定した。推定されるバルク内電流密度分布を Fig. 3 に示す。推定には境界条件を用いていないが、

バルクの形状を反映した一様に同心円状の電流密度分布が推定された。SDMG 法を用いることでリング状のような複雑形状のバルクであっても直接育成が可能であり、さらにバルク全体が *c*-growth 領域のみからなることを反映した同心円状の着磁特性を示すバルクが得られることを実証した。当日は、SDMG バルク/seed 界面の微細組織と高温還元アニール過程の追加による捕捉磁場特性の大幅な改善効果についても報告する予定である。

[1] T. Motoki, Y. Yanai, K. Nunokawa and J. Shimoyama, *Appl. Phys. Express* **13**, 093002 (2020)



Fig. 1. Photograph of a SDMG processed DyBCO ring bulk grown on [001] oriented EuBCO seed plate.

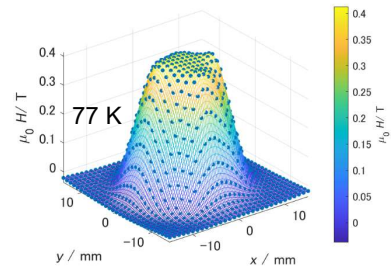


Fig. 2. Trapped field distribution at 77 K above the surface of the seed side of the ring shaped SDMG DyBCO bulk.

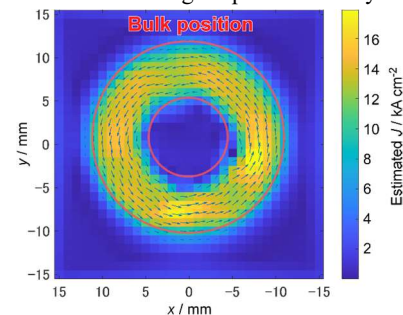


Fig. 3. Estimated current density distribution calculated from trapped field distribution in Fig. 2.

謝辞

本研究は、科研費(19K05006)の助成を受けたものである。

低包晶温度 REBCO 層を介した REBCO バルク間超伝導接合の試み

Attempts on superconducting joints between REBCO bulks
by REBCO layer with low peritectic temperature

三輪 将也、元木 貴則、仙波 実怜、下山 淳一(青学大)

MIWA Masaya, MOTOKI Takanori, SEMBA Mirei, SHIMOYAMA Jun-ichi

E-mail: c5621062@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE123, RE: 希土類元素)は液体窒素温度 77 Kを超える高い T_c を有し、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大きく超える高磁場の捕捉が可能であり、強力超伝導磁石を用いた卓上 NMR などへの応用が期待されている[1]。この REBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性の向上には大型化が有効である。しかし、単一の種結晶による REBCO 溶融凝固バルクの育成ではバルク的大型化に伴い、育成時間が大幅に増大し、均質性や再現性が低下する。そこで、主にマルチシードを用いた大型バルク育成の研究開発が行われているがドメイン間の臨界電流特性の低下が課題となっている。一方、既製の溶融凝固バルクに対する超伝導接合による大型化が考えられ、本研究では、低包晶温度の REBCO を介した超伝導接合に着目した。しかし、これまでに報告されているバルク間超伝導接合は、 c 軸に平行に切り出したバルク間の ab 面方向のみの成長を利用した接合で、接合界面でのクラックの集中や不純物の堆積によってやはり接合部の臨界電流特性低下が課題となっていた。そこで、本研究ではバルク間の強固な超伝導接合形成を目的に、 c 軸に対して傾斜をつけてバルクを切り出し、低包晶温度 REBCO を介して ab 面内と c 軸方向の3次元的な中間層の結晶成長による傾斜接合を試みたので報告する。

2. 実験方法

自作の DyBCO 溶融凝固バルクを c 軸に対して傾斜をつけて切断し、再度接合することを試み、接合中間層には DyBCO より包晶温度の低い YBCO を選択した。Y123:Y₂BaCuO₅ (Y211)=7:3 のモル比の TEP 社製混合粉末に機械的強度向上と包晶温度の低下のために Ag₂O を 5 wt% を、粘度制御のため PVB を添加した EtOH、BuOH 混合溶媒に加え、ボールミル混合を行うことで接合用スラリーを調製した。このスラリーを接合面に塗布し、DyBCO の包晶温度以下での熱処理により超伝導接合形成を試みた。この熱処理後、RE/Ba 固溶抑制のため 1%O₂ 気流中、850°C、24 h で還元アニールのため 1%O₂ 気流中、850°C、24 h で還元アニールを施し、最後に長時間の酸素アニールにより酸素量を制御し、物性を評価した。

3. 結果と考察

接合前の2つに切断した状態の DyBCO 溶融凝固バルク表面の 77 K における捕捉磁場分布を Fig. 1 に示す。切断面間に電流が流れないことを反映した捕捉磁場のピークの分裂が確認できた。次に、Fig. 1 に示したバルクに対して YBCO 層を介して超伝導接合した後の捕捉磁場分布を Fig. 2 に示す。ピークは一つになり、YBCO 層を介して DyBCO 溶融凝固バルク全体に超伝導電流が周回していることがわかった。また、 c 軸方向に対して様々な傾斜角度で切り出して同様な方法で接合したバルクから切り出した接合部を含む小片試料の J_c - H 特性を Fig. 3 に示す。接合界面をまたぐ J_c を評価するため、接合部で切り出して再度磁化測定を行った結果も示している。傾斜角度が大きくなるとともに接合界面における J_c が系統的に向上した。このことから、 ab 面内だけでなく c 軸方向にも3次元的に結晶成長させることが良好な接合界面形成に効果的であることが示された。

参考文献

[1] T. Nakamura *et al.*, *J. Magn. Reson.* **259** (2015) 68.

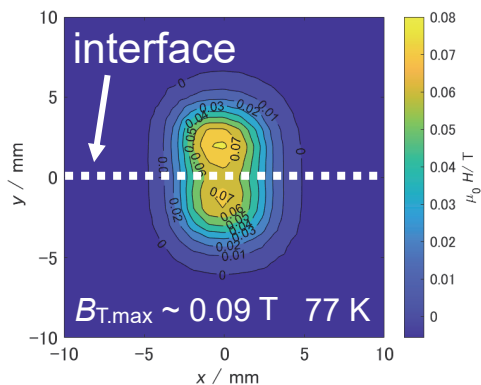


Fig. 1. Trapping field distribution of DyBCO a pair of melt-textured bulks without a joint layer at 77 K.

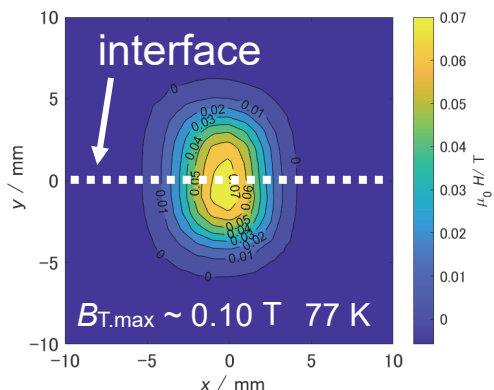


Fig. 2. Trapping field distribution of a DyBCO melt-textured bulk connected by YBCO intermediate layer at 77 K.

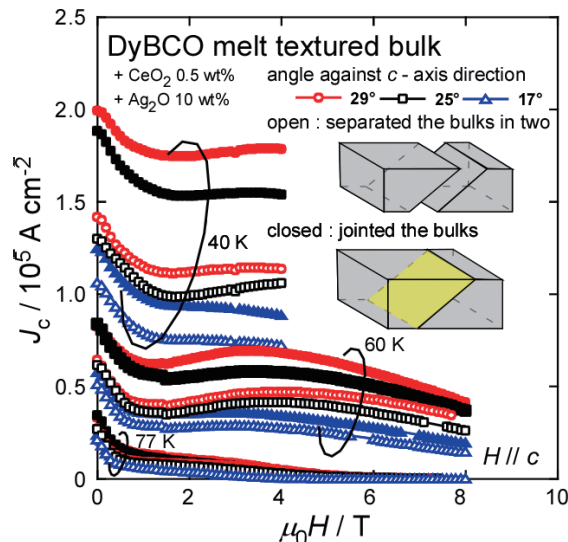


Fig. 3. Magnetic field dependences of J_c for small samples of DyBCO melt-textured bulks jointed at different angles against c -axis direction.

高い一軸圧力下で放電プラズマ焼結した Nb₃Sn 超伝導バルク体の 緻密化と磁束ピン止め特性

Densification and flux pinning characteristics of Nb₃Sn bulk superconductors prepared by SPS method under high uniaxial pressure

小山田拓真, 内藤智之(岩手大)

OYAMADA Takuma NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: g0321028@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 超伝導体の上部臨界磁場 $H_{c2} = 24$ T (4.2 K) [1] は MgB₂ の $H_{c2} = 10 \sim 20$ T (4.2 K) より高く、臨界電流密度 J_c の磁場依存性が比較的小さい。また、異方性がないことから多結晶体で大型の強磁場バルク磁石を作製できると期待される。しかし、Nb₃Sn バルクを *in-situ* 法で作製した場合、充填率は 50 % 以下になり、それに伴い J_c や捕捉磁場が低下する。しかし、SPS (Spark Plasma Sintering) 法による加圧焼結では急昇温、急冷却が可能であるため、粒成長を抑制して高密度化することが出来る。このことから、我々は *ex-situ* SPS 法 (印加圧力 50 MPa) で作製した Nb₃Sn 超伝導バルク体の磁束ピン止め特性について報告してきた。それらバルクの充填率は 80 % 程度でありながら 3 テスラ程度の磁場を捕捉可能である。従って、さらなる充填率向上により捕捉磁場も向上する余地があると言える。このことから、本研究では高密度化を目指して最大印加圧力 100 MPa において Nb₃Sn バルク体を作製し、その磁束ピン止め特性について報告する。

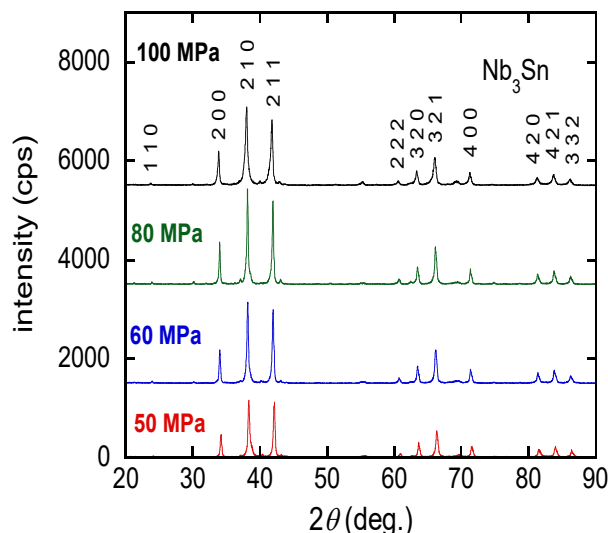


Fig.1 XRD patterns of Nb₃Sn bulks after SPS

2. 実験方法

原料粉末には Nb 粉末 (純度 99.9%, 粒径 43 μm 以下)、Sn 粉末 (純度 99.9%, 粒径 38 μm 以下)、Cu 粉末 (純度 99.9%, 粒径 75 μm)、Cu 粉末 (純度 99.9%, 粒径 46 μm 以下) を用いた。まず Nb と Sn を化学量論比の 3 : 1 で秤量し、Nb₃Sn の生成温度低下の効果をj得るための Cu を 1 wt% 添加した。その後自動乳鉢で 30 分混合し、Ar 雰囲気中で 850℃×24 時間の熱処理を行った。この Nb₃Sn 前駆体を粉砕し 30 分混合した後、SPS 法により Φ10mm の Nb₃Sn バルク体を作製した。SPS 時の保持温度と時間は 900℃×20 分、印加圧力は 50, 60, 80, 100 MPa で作製した。作製した Nb₃Sn バルク体は X 線回折 (XRD) によって結晶相を同定し、磁場中冷却着磁 (FC) 法で着磁を行って捕捉磁場を評価し、SQUID 磁束計によって測定した磁化ヒステリシス曲線から拡張型ビーンモデルを用いて J_c を評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 に SPS 後の各バルクの XRD パターンを示す。どのバルクにおいても主相は Nb₃Sn であり、不純物の生成は見られなかった。このことから、850℃×24 時間の熱処理において、十分に Nb と Sn が反応し、不純物の抑制されと言える。

Fig. 2 に印加圧力と充填率の関係を示す。印加圧力を大きくしたことで充填率も向上したことが分かる。特に、これまでの作製時は印加圧力が 50 MPa で、充填率が約 80 % であったが、100 MPa を印加することで充填率は約 88 % まで向上出来た。しかし、充填率は最大でも 88 % と言うことからさらなる充填率向上の余地があると言える。

また、講演では各 Nb₃Sn バルクの臨界電流密度 J_c や捕捉磁場特性についても報告する予定である。

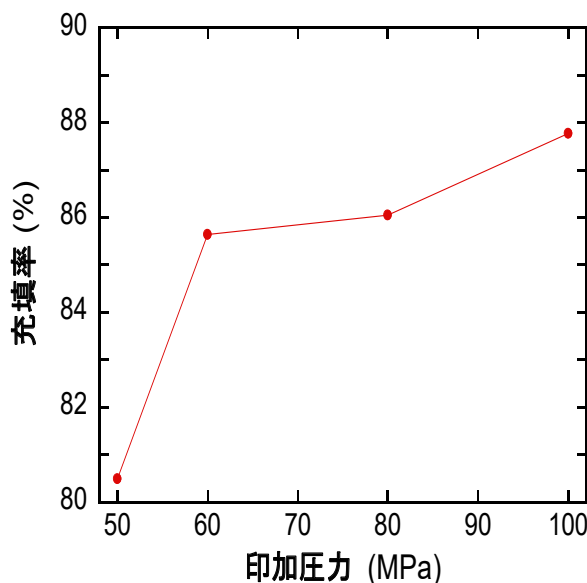


Fig.2 Relationship between applied pressure and filling factor

参考文献

- 1 K. Tachikawa, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 45 No. 3 (2010) 88 - 98

内部スズ法 Nb₃Sn 線材の層形成・超伝導特性に与える Ti 添加場所の影響 Impact of Ti-doping position on Nb₃Sn layer formation and superconducting properties in internal Sn-processed Nb₃Sn superconducting wires

伴野信哉(物材機構), 森田太郎(上智大学, 物材機構), 谷貝 剛(上智大学)

BANNO Nobuya (NIMS), MORITA Taro (Sophia Univ., NIMS), YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

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

1. はじめに

Ti は、Nb₃Sn 線材の B_{c2} および J_c の向上を促す添加元素としてよく知られている。Ti 添加は、製法から見ると前駆体においていくつかの添加場所が考えられ、それによって Nb₃Sn の層形成に違いが現れる。これまでブロンズ法では、Nb 芯への Ti 添加よりも、ブロンズへの添加によって Sn 拡散が促進され、Nb₃Sn 結晶粒の微細化がもたらされる等が報告されてきた。一方で内部スズ法では、複雑な拡散挙動が予想されるにもかかわらず、Ti 添加場所の影響についての詳しい現象説明はほとんど行われていない。本研究では、内部スズ法 Nb₃Sn 線において、Ti 添加場所を Nb 芯、Cu 母材、Sn 芯とした 3 通りの試料を作製し、SEM、EDS 等の微細組織観察を通じて Nb₃Sn 層の生成反応の違いを調べた。その結果、Ti を Cu あるいは Sn に添加すると、反応界面に NbCuSnTi の 4 元化合物が形成され、ブロンズ法とは対照的に、Nb₃Sn 層生成が抑制されることが明らかとなった[1]。

2. 実験方法

Ti 添加場所を Sn 芯、Nb 層、Cu 母材と変えた 3 種の試料を準備した。内部スズ法では、Cu/Sn 相互拡散を行う予備熱処理が必要であり、多芯構造では拡散挙動がより複雑になる。そこで本実験では、拡散挙動をできるだけ簡素化するため、外側が Nb、中間層が Cu、芯が Sn の単芯の拡散対構造とした。最外周には通電試験用に安定化材として Cu を被せた。線径は 0.6mm で、Sn 芯径は 116μm、Sn:Cu 比は約 26at% : 74at% となった。以下に部材の組成と試料名を示す。S16T と C10T の (Cu+Sn+Ti) における Ti 比率はどちらもほぼ等しく約 1at% である。

① Nb/Cu/Sn-1.6wt%Ti: S16T

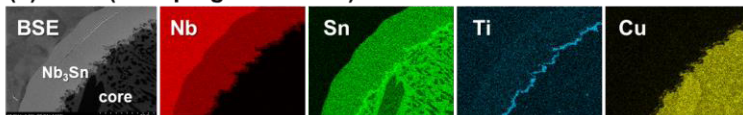
② Nb-0.8wt%Ti/Cu/Sn: N08T

③ Nb/Cu-1wt%Ti/Sn: C10T

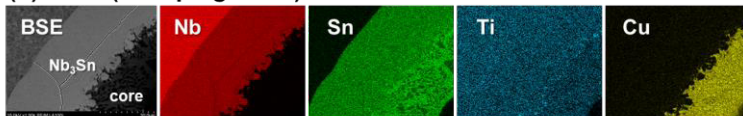
これらの試料を真空中にて 500℃×100h の予備熱処理後、685~700℃×100h の熱処理を施し、Nb₃Sn 層を生成させた。

得られた試料について、SEM 観察、元素分析 (EDS)、EBSD による結晶粒解析を実施した。

(a) S16T (Ti doping to Sn core)



(b) N08T (Ti doping to Nb)



(c) C10T (Ti doping to Cu matrix)

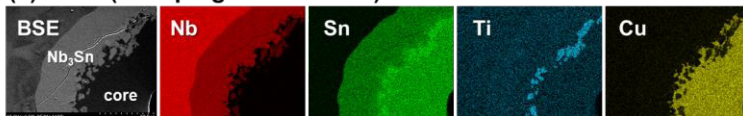


Fig.1. EDS maps for all specimens with a heat-treatment at 685 °C×100 h.

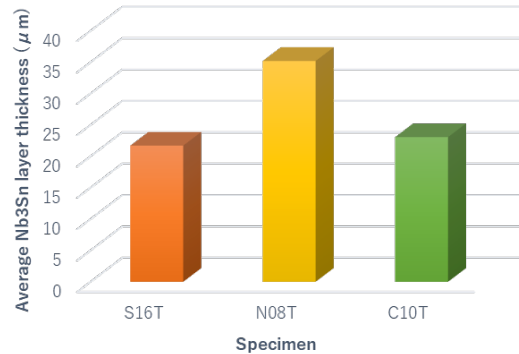


Fig.2. Comparison of Nb₃Sn layer thickness between all specimens with a heat-treatment at 685 °C×100 h.

3. 実験結果と考察

Fig. 1 に最終熱処理後の各試料の SEM 像ならびに EDS マップを示す。Ti を Sn 芯または Cu 母材に添加した場合に、Nb₃Sn 層と Cu-Sn 芯との界面に Ti リッチ層が現れているのが明らかである。Nb に Ti を添加した試料には Ti リッチ層は見られない。組成分析によれば、この Ti リッチ層は Nb、Sn、Ti、Cu がそれぞれ 35、29、10、26at% 程度で構成される 4 元化合物であることがわかった。RRP 線材などで見られる Nausite (Nb_{0.75}Cu_{0.25}Sn₂) とは明らかに異なる組成であり、それとは別の過程で生成したものと考えられる。

通常 Ti は Ti₆Sn₅ 化合物として Cu-Sn 層中を移動する。この Ti₆Sn₅ 化合物が Nb 層界面へ移動し偏析したのち、Nb と何らかの反応をしたに違いない。ブロンズ法ではこうした 4 元化合物は確認されていない。Sn 濃度の高い内部スズ法に対する特徴的な反応と考えられる。Sn-Ti の平衡状態図によれば、Ti₆Sn₅ 相は液相と共存する。Cu-Sn-Ti 系では、この Ti₆Sn₅ 相は 572℃で ε-CuSn 相と反応し液相と CuSnTi 相に相変化するが報告されている[2]。Nb-Cu-Sn-Ti 系では、組成分析結果から考えて、液相が現れる過程で Nb が溶出し、Ti₆Sn₅ 相が Nb と Cu を取り込んで、NbCuSnTi の 4 元化合物に相変化したものと思われる。

Fig. 2 に各試料の Nb₃Sn 層の厚さを比較した。NbCuSnTi の 4 元化合物のない N08T の層厚は、S16T、C10T に比べて 1.6 倍程度大きく、NbCuSnTi の 4 元化合物は Sn の拡散障壁として作用していると考えられる。Sn 濃度勾配も、N08T で明らかに小さかった。

[1] T. Morita et al., "Impact of Ti-doping position on Nb₃Sn layer formation in internal Sn-processed Nb₃Sn superconducting wires", *Cryogenics*, v.122, 103420, 2022

[2] M. Naka et al., "Determination of the liquidus of the ternary system Cu-Sn-Ti", *J. Phase Equilib.*, v. 22, pp. 352-6, 2001

極低温真空条件下における接触熱抵抗測定と評価

Measurement and evaluation of the thermal contact resistance in vacuum and low temperature condition.

上野 航生, 高橋 政彦, 高木 紀和, 栗山 透(東芝エネルギーシステムズ)
 UENO Koki, TAKAHASHI Masahiko, TAKAGI Norikazu, KURIYAMA Toru
 (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)
 E-mail: koki1.ueno@toshiba.co.jp

1. はじめに

伝導冷却方式の超電導磁石では、高熱伝導率の伝熱部材を用いて、極低温冷凍機と超電導コイルを熱的に接続する。これらの伝熱部材の接続界面では、固体表面のミクロな凹凸によって、接触熱抵抗(TCR ; Thermal Contact Resistance)が生じる。TCR については、いくつかの試験報告はあるものの[1]、多数のパラメタに左右されることから、文献値を単純に参考にすることが難しい。そこで今回、超電導磁石製品での使用条件における TCR が測定可能な試験装置を製作し、基礎試験と評価を行った。ここでは、試験装置の詳細と C1020 をサンプルとした試験内容について報告する。

2. 試験装置と接触熱抵抗の測定方法

試験装置の構成を Fig.1 に示す。極低温冷凍機と冷却ステージを接続し、4 K~60 K の温度域にて、真空中の熱抵抗が測定できる。また、ボルトでパネ変位量を調整することで、最大 7200 N の力をサンプルの接触面に対して垂直に加えることができる。サンプルの直径は、φ 30 mm、高さ 15 mm であり、上側のサンプル 1 の上部には、フィルムヒータを取り付けた。フィルムヒータにより熱負荷 Q [W] を印加し、下側のサンプル 2 の接触面を通過して、下部の冷却ステージに熱が流れる。各サンプルの側面には、接触面の上下 7.5 mm の位置に抵抗温度計を設置し、これらの温度差 ΔT [K] を測定することで、接触面を含む熱抵抗 R_{total} [K/W] を次式で算出した。

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (1)$$

ここで、式(1)の R_{total} は、接触熱抵抗に加え、上下のサンプルの母材の熱伝導による熱抵抗も含まれる。そのため、同じロッドから製作した同形状の接触面を持たないバルク型サンプルに対して、 R_{bulk} を測定することで、接触熱抵抗 R_c [K/W] を次式で算出した。

$$R_c = R_{total} - R_{bulk} \quad (2)$$

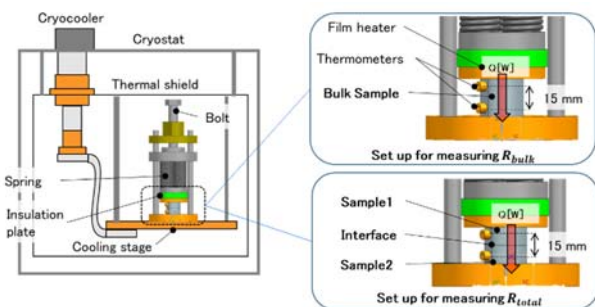


Fig.1 Thermal contact resistance test apparatus

3. 試験結果・考察

試験に使用した C1020 材のバルク型サンプルの熱抵抗 R_{bulk} の測定結果から、熱伝導率 λ_{mes} を算出し、Fig.2 に示す。C1020 の熱伝導率の温度依存性 $\lambda(T)$ と RRR の関係については、実験より次式が与えられている[2]。

$$\lambda(T) = \frac{1}{6.2 \times 10^{-8} T^{2.4} + 0.53 / RRR / T} \quad (3)$$

式(3)において、測定した λ_{mes} から RRR をフィッティングしたところ RRR=53.8 を得た。また、NIST で公開されている RRR50 のデータとも比較すると、ここで用いた C1020 は、RRR50 程度と推定される。

次に、 R_{total} と、式(2)によって計算した R_c を Fig.3 に示す 10K 以下の極低温の領域では、測定した R_{total} の大部分が R_c によるものであることを示している。ここで、TCR の推定式については、橘・佐野川の式[3]が知られており、真空中の接触熱抵抗は、次式で与えられる。

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_0} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \left(\frac{P}{H} \right) \quad (4)$$

なお、 δ : 平均粗さ[m]、 λ : 熱伝導率[W/mK]、 P : 押しつけ圧力[MPa]、 H : ビッカース硬度[MPa]である。また、 $1/h_0 = 1.95 \times 10^{-5} \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right)$ が与えられる。

式(4)によると、温度依存性は、熱伝導率 λ のみにあり、熱伝導率が等しい場合には、熱抵抗は同じ値になるとされている。しかしながら、Fig.2 に示す λ_{mes} のピークを挟んで同一の熱伝導率になる温度(例えば 10 K と 40 K や、15 K と 30 K) にありながら、Fig.3 の R_c は、異なる値を示した。

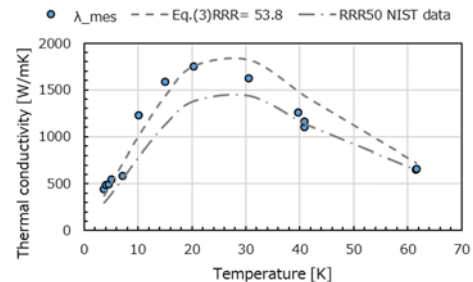


Fig.2 Thermal conductivity of bulk sample

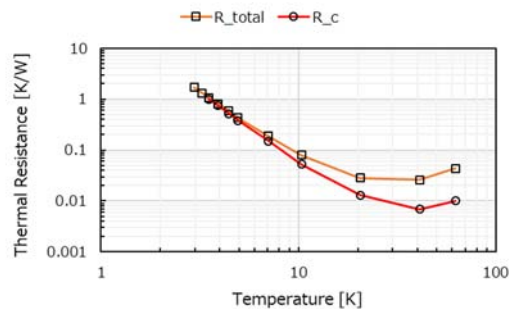


Fig.3 Thermal resistance of R_{total} and R_c

4. まとめ

伝熱部材の接触熱抵抗を把握するため、試験装置を製作し、試験を行った。結果、10 K 以下の極低温域では、母材の熱伝導率と比較して、接触熱抵抗が増加する傾向がみられた。

5. 参考文献

1. R.C. Dhuley, Cryogenics **101** pp.111-124 (2019)
2. 都丸隆行ら, 低温工学, **46**, 7, pp.415-420 (2011)
3. 日本機械学会編, 伝熱工学資料改訂第 5 版(2009)

液体水素浸漬冷却 BSCCO 超電導コイルの過電流通電試験

Overcurrent test of BSCCO superconducting coils with liquid hydrogen immersion cooling

大矢 輝, 白井 康之, 川崎 理香子, 松本 郁哉, 前田 佑一郎, 松本 岳, 塩津 正博(京大); 今川 信作, 岩本 晃史, 濱口 真司(NIFS); 津田 理, 長崎 陽(東北大); 谷貝 剛(上智大); 小林 弘明(JAXA); 大屋 正義(関西学院大)

OYA Hikaru, SHIRAI Yasuyuki, KAWASAKI Rikako, MATSUMOTO Fumiya, MAEDA Yuichiro, MATSUMOTO Gaku, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.); IMAGAWA Shinsaku, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji (NIFS); TSUDA Makoto, NAGASAKI Yoh (Tohoku Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); KOBAYASHI Hiroaki (JAXA); OHYA Masayoshi (Kwansei Gakuin Univ.)

E-mail: oya.hikaru.46r@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

液体水素の利用先の一つとして、超電導機器の冷媒が考えられる。液体水素直接冷却では許容発熱を大きく取れることから、通電中にクエンチ検出に十分な大きさの抵抗成分が生じていても安定な超電導コイルが期待できる。例えば超電導体の一部で常電導転移が発生しても、熱暴走点まではコイル温度が急上昇することなくコイル端子電圧が上昇する。これを検知することでコイル保護が可能になることが期待される。

本報では BSCCO 線材を使用した超電導コイルについて、液体水素浸漬冷却下での過電流通電試験結果を報告する。

2. 試験コイル諸元

試験コイルは線材幅 4.3 mm の DI-BSCCO type H を 77 ターン巻線して製作したダブルパンケーキコイルを 6 つ組み合わせて構成されている。Fig.1 に試験コイルの構成を示す。コイルのインダクタンスは全体で 0.252 H であり、400 A 通電時の最大経験磁場は 4.29 T である。本試験に先立って今川らが液体室素浸漬冷却下における各コイルの通電試験を行った[1]。A5 コイルの臨界電流値は 77.8 A、熱暴走開始時の電流値は 113 A であり、他のコイルについても同程度であった。

3. 実験装置と方法

電源はクエンチ検出機能付きの高精度直流電源を使用した。クエンチ検出の設定はコイル両端電圧が 1 V 以上の状態が 50 ms 以上持続した場合とした。また試験回路において、コイルと並列に 0.25 Ω の保護抵抗を接続した。電流遮断後は 1.01 s の時定数で電流が減衰する。実験方法について、実験槽圧力を約 950 kPa、液体水素温度を約 30 K に保ち、1 A/s の掃引速度でコイルへの通電を開始した。通電は 293 A でクエンチ検出機能によって電流が遮断されるまで行った。

4. 実験結果

Fig.2 に横軸を電流値、縦軸を各コイルの電圧値とした電圧電流特性を示す。各コイル電圧には数 $\mu\Omega$ の抵抗成分が確認できる。コイル組立時においてターミナル部に負荷がかかったことに起因すると考えられる。

A5、A6 コイルについて、電界が線材長手方向に一樣であるという仮定の下、(*)式を用いて電圧電流特性を表現した。(実際には電界分布は一樣ではない。また劣化箇所が発生する電界の影響が大きいことが考えられる。)

$$V/L = E_0 (I/I_c)^n + RI \quad (*)$$

E_0 は一般的な電界基準として 0.1 mV/m とした。 L は線材長さで $L=106.5$ m、 R はコイル抵抗成分である。これより A5 コイルの I_c は 281 A、A6 コイルの I_c は 243 A と求められた。電磁界解析ソフトウェア FEMM を用いて A5、A6 コイルの線材直交磁場を計算し、線材の直交磁場—臨界電流特性と比較すると、線材直交磁場が最も大きくなる A5、A6 コイルのテーブル端部において磁場を考慮した線材の臨界電流値は $I_c = 282$ A、その場所の線材直交磁場の大きさは 2.3 T であった。A6 コイルの I_c はテーブル端部の線材直交磁場から推定される線材の

臨界電流値よりも低く、線材の劣化が考えられる。A6 コイルは最終的に $I_{ct}+50$ A まで通電したが、熱暴走には至らなかった。

電流値が 293 A の付近で A2 コイルの電圧値が急上昇している様子が確認された。電流遮断直前の A2 コイル端子電圧は 470 mV、発熱は 135 W であった。磁場計算と線材特性より、A2 コイルで最も大きな線材直交磁場を受ける部分での線材の臨界電流は $I_c=347$ A、その場所の線材直交磁場は 1.52 T と求められる。電圧が急上昇した原因として、ターミナル部等の抵抗発熱によって発生した気泡が溜まり、冷却が悪化したことが考えられる。電流遮断後に再度通電を行ったところ、A2 コイルに電圧電流特性の大きな変化は確認されなかった。

5. まとめ

本実験より製作したコイルの液体水素冷却下における過電流通電特性を得ることができた。今後は電界分布や実験条件を考慮した解析を行い、通電中のコイルの様子や熱暴走時の温度上昇に関する考察を行う。

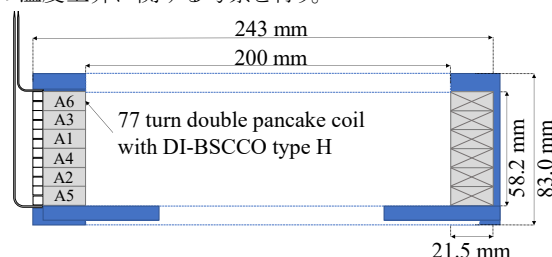


Fig. 1 Liquid hydrogen immersion cooling BSCCO coils

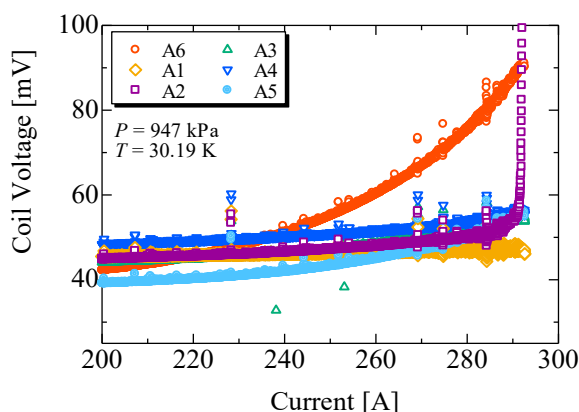


Fig. 2 Voltage of each coils during excitation by 1 A/s to 293 A in liquid hydrogen

6. 謝辞

本研究は科研費補助金(JP19H0213)およびNIFS共同研究(NIFS20K0BA032)の支援の下に実施されました。

参考文献

[1] S. Imagawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.3.

横振動下における極低温液体の流体シミュレーション

Fluid simulation of cryogen under horizontal vibration

池北智亮, 武田 実, 前川一真 (神戸大)

IKEKITA Tomoaki, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)

E-mail: takeda@maritime.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

我々の過去の研究[1]において、液体水素、液体窒素、液体ヘリウムや超流動ヘリウムを用いて、横振動下における極低温液体の気液界面を対象とした光学観測が行われている。しかし、観測データに対して、再現性の高い液面振動モデルは構築されていなかった。そこで本研究では、境界要素法を用いた円筒形タンク内での流体シミュレーションを行い、再現性の高い液面振動モデルを構築することを目的とする。観測データとシミュレーション結果を比較して、液面振動モデルを評価したので報告する。併せて、各種極低温液体の振動特性について解析し、物質による振動特性の違いを考察する。

2. 過去の実験研究

我々は、これまでに光学クライオスタットを横振動試験装置の移動テーブル上に固定し、デジタルカメラ(30 fps)が一緒に移動するようにして、光学観測窓から液面を観測している[1]。クライオスタットのサンプル槽は、下部に直径 96 mm、高さ 80 mm の円柱形、上部に縦 96 mm、横 96 mm、高さ 90 mm の直方体が連結した構造で、底面から約 130 mm の高さまで液体サンプル(約 1 L)が充填される。各飽和液体の振動状態の違いを観測するために、静止時から加速度 0.1 G を 0.2 s 間与えて液面を傾け、その後の等速運動中に液面が自由振動して減衰する際の液面角度 θ (水平面に対する変位角度)の時間変化を調べている。なお、加速後に液面角度が最大となる時間とその角度を、 $t = 0$ 、初期液面角度 θ_0 とした。

3. 数値計算モデル

振動を受けるタンク内部の液体を 1 自由度振動系であるとみなして、振動モデルを構築する。液体のタンク内部の振動を考える場合、液体は非粘性・非圧縮で渦なしと考えることができるため、速度ポテンシャル Φ を導入することができる。ポテンシャル問題として数値計算をするため、境界要素法によって定式化する。

液面変位の動的応答に対して、減衰の傾向を表す γ (ここでは、減衰係数と呼ぶ)を適用する。液面角度の時間変化 $\theta(t)$ が液面の z 方向の変位 η に等しいとすると次式が得られる。

$$\theta(t) \approx \eta = \delta(t)n_z e^{-\gamma t} \quad (1)$$

ここで、 n_z は液面法線方向ベクトルの z 方向成分である。

次に、減衰係数 γ の求め方を説明する。液面振動(スロッシング)の減衰は、タンク壁面での境界層と液体内部での粘性応力の結果として生じる。振動における力学的エネルギーの減少量から散逸エネルギーを求めることができるので、減衰係数 γ を各種液体の動粘性係数 ν の関数として算出する。

数値計算を行うために円筒形領域(直径 96 mm、高さ 130 mm)を想定して、その境界面上に要素を配置する。境界要素は円筒上面に 50 個、側面に 25 個、底面に 25 個配置する。プログラミング言語には Python3 を用いた。この計算に用いた PC は Dell Precision M2800 で、その CPU は intel core i7-4810MQ @2.80 GHz である。この環境で、プログラムの処理にかかった時間は 20.78 s であった。

4. 計算結果と実験結果の比較

流体シミュレーション計算結果の観測データに対する再現性を評価するために、各種極低温液体に関して、計算結果と実験結果を比較した。一例として、Fig. 1 に液体水素の液面角度の時間変化を示す。液面角度の時間変化の誤差を求めた結果、初期液面角度の相対誤差は 6.3%~7.4% (LN_2 が最

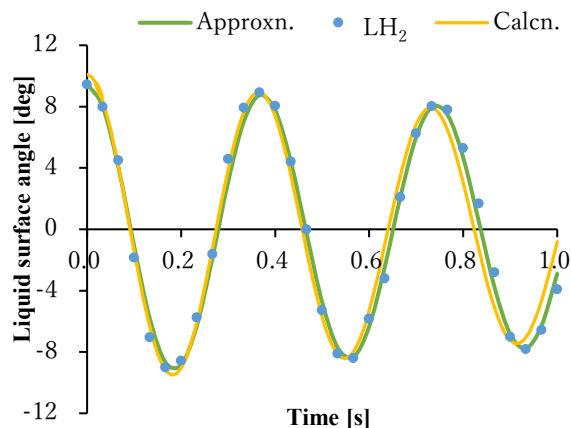


Fig. 1 Time chart of LH_2 surface angle.

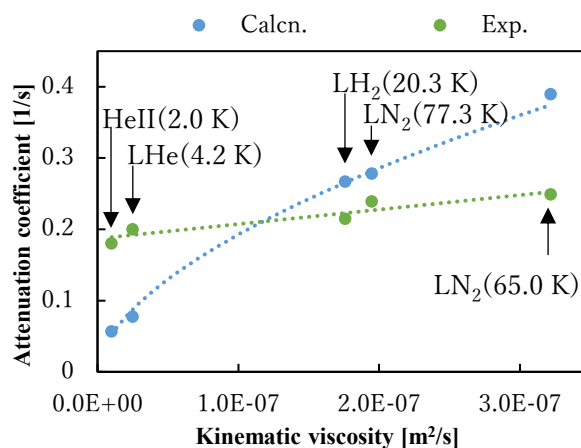


Fig. 2 Relationship between attenuation coefficient and kinematic viscosity.

も相対誤差が大きい)、周期の相対誤差が-1.6%~-1.9% (He II が最も相対誤差が大きい)であった。相対誤差は小さく、固有振動特性に対する再現性の高いモデルを構築できた。

次に、各種極低温液体の動粘性係数をもとに減衰係数を計算で求めた。計算による減衰係数と実験結果から最小二乗法によって導かれた減衰係数を Fig. 2 に示す。計算による減衰係数は $\gamma \propto \sqrt{\nu}$ であり、液体の動粘性係数が高いほど減衰係数が大きく、振動の収束が早いことが分かった。また、減衰係数と動粘性係数の関係について、実験結果と計算結果の違いの考察を行ったところ、実験においてはタンク側面・底面での減衰の影響よりも液体の内部減衰による影響の方が大きいことが分かった。

5. まとめ

本研究により、実験結果と計算結果の違いを評価することによって、実験における減衰では、液体の内部減衰が支配的であることが分かった。これにより、タンク内部における極低温液体の液面振動モデルの観測データに対する再現性を向上させるための知見を得ることができた。

参考文献

1. M. Takeda *et al.*: Adv. Cryo. Eng., Vol. 55 (2010) pp. 311-318.

磁気遮蔽方式による磁気冷凍の可能性に関する研究

— 磁気冷凍の各種パラメータの冷却性能への影響 —

Research on the Possibility of Magnetic Cooling Technology using Magnetic Shields - Influence of various parameters of magnetic refrigeration on cooling performance -

平野 直樹, 小野寺 優太(NIFS);高澤 拓海, 野口 正純, 岡村 哲至(東工大)

HIRANO Naoki, ONODERA Yuta (NIFS)

TAKAZAWA Takumi, NOGUCHI Masazumi, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

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

1. はじめに

高温超伝導材料の研究開発の進展と、近年のヘリウム供給問題から、ヘリウムに頼らなくとも極低温を維持できるシステムの研究開発を行っている。その一方式として、高温超伝導コイルから発生する磁場と磁気冷凍技術を組み合わせることでコイル冷却をアシストする技術の研究を進めている。磁気遮蔽方法によるコイルアシスト冷却の概念図を Fig.1 に示す。磁気遮蔽により磁気熱量効果が制御できることを確認する原理検証試験を行うとともに、超伝導材料を磁気遮蔽材料として用いることの可能性について検討し、これまでに YBCO バルク体の磁気遮蔽効果[1]、YBCO 線材積層による磁気遮蔽効果[2]を報告してきた。今回、これらの実験結果を踏まえ、磁場変化の大きさや磁気作業物質のサイズなど、各種パラメータを変化させた場合の冷却性能に与える影響について、解析的に考察したので報告する。

2. 磁気遮蔽型磁気冷凍の冷却性能解析

・ 解析方法

解析は軸対称 2 次元場 (r-z 平面) で行い、支配方程式には以下に示す遮蔽電流 (渦電流) を考慮したアンペールの法則を用いた。

$$\mathbf{J} = \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right)$$

$\mathbf{J}$: Current density [A/m²] V : Voltage [V]

μ : magnetic permeability [H/m] t : Time [s]

$\mathbf{A}$: Vector potential [T·m] σ : electrical conductivity [S/m]

また、渦電流の大きさを決定する導電率は磁束線に働くピン止め力とローレンツ力が釣り合っていると仮定した。

・ 解析結果の一例

YBCO バルク体の直径を 50 mm と固定し、バルクの厚さや 2 つのバルク体の間隔、温度、印加磁場の条件を変えて、磁気遮蔽効果を解析的に求めた。

Fig.2 に、解析結果の一例として印加磁場 6 T、横軸が厚さ、縦軸が遮蔽磁場のバルク体厚さと温度の依存性を示す。厚さが増すほどに遮蔽磁場が大きくなり、厚さがある程度大きくなると漸近するグラフ形状になっていることがわかる。6 T でバルクの間隔が 30 mm の磁気シールド周辺の磁場ベクトル図に示すように、厚さが増すと磁気シールドを貫通する磁場ベクトルが少なくなるため、その分遮蔽磁場が大きくなったと考えられる。また、ある程度厚みが増すとシールドを貫通する磁場への耐性が飽和するため漸近するようなグラフ形状になったと考えられる。

3. まとめ

数値解析により磁気冷凍に関する各種パラメータが冷却性能に与える影響について検討した。磁気シールドの厚みの増大はシールドを貫通する磁束線を減らすことで遮蔽磁場を増大させることがわかった。そして、臨界電流密度が十分に大きくなる 60 K 以下の温度域では厚さ 8 mm 程度で磁場の貫通に対する耐性が飽和する可能性が示唆された。今後は、今回の結果を基に、77 K よりも低温に

おける遮蔽効果の実験を行い、超伝導コイル冷却をアシストできる磁気冷凍システムの実現可能性を検討する。

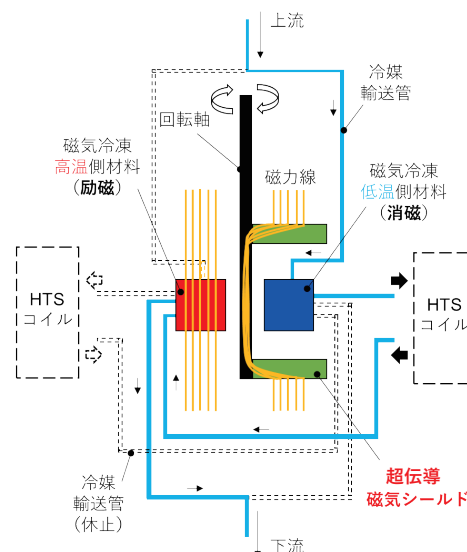


Fig.1 Conceptual diagram of magnetic shielding type magnetic refrigeration system

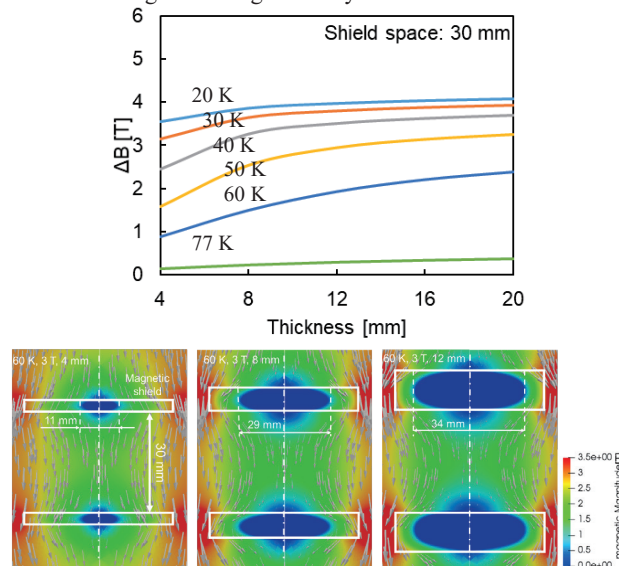


Fig.2 Relationship between bulk thickness and magnetic shielding effect.

謝辞

本研究の一部は、NIFS核融合工学プロジェクト(UFZG016)の支援を受けて行ったものである。

参考文献

- [1] N. Hirano, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.101 (2021) p.32
- [2] N. Hirano, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.102 (2021) p.23

ディスプレイサパルス管冷凍機のハイブリッドモデル

Hybrid model of displacer pulse tube refrigerator

朱 紹偉, 郭 志敏(同済大学)

ZHU Shaowei, GUO Zhimin(Tongji University)

E-mail: sw_zhu@163.com

1. INTRODUCTION

A hybrid model with isothermal and adiabatic for displacer pulse tube refrigerator is introduced, which can be simply calculated by Excel. It not only can be a pre-selected method to supply basic data for CFD simulation to save computing resource, but also can reveal the relation between dead volumes and pistons.

2. STRUCTURE AND ASSUMPTION

Figure 1 is the schematic model of a displacer type pulse tube refrigerator. It combines adiabatic model and traditional isothermal model. The adiabatic model is used by all the parts of the cryocooler, except the parts in the isothermal region of Figure 1. An imaginal isothermal expander receiving the mass flow from the left is introduced at the position where the expander volume is in 90 degrees with pressure. This position could be called as nodal point of the regenerator, where the mass flow rate is almost in phase with pressure wave, which can be got by REGEN3.3 for highest regenerator efficiency. Also, the imaginal expander changes to an imaginal compressor for receiving the mass flow from right part of the regenerator.

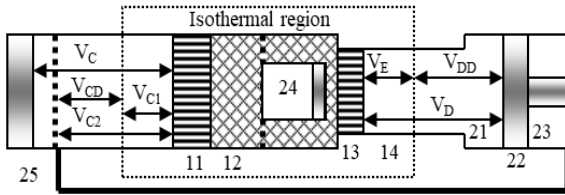


Figure 1 Schematic of pulse tube refrigerator

11. After cooler 12. Regenerator 13. Cold heat exchanger 14. Pulse tube 21. Displacer front space 22. Displacer 23. Displacer back space 24. Imaginal expander 25. Compressor

3. HYBRID MODEL

The pressure P and volume of imaginal expander V_I

$$P = P_0[1 + \alpha \sin(\omega t)] \quad (1)$$

$$V_I = V_{I0}[1 - \cos(\omega t)] \quad (2)$$

The isothermal compressor volume V_{C1} and hybrid compressor volume V_{C2} can be got from

$$M_1 = P/(RT_0)[V_{C1} + V_{HEH} + (T_0/T_{R1})V_{R1} + (T_0/T_I)V_I] \quad (3)$$

$$V_{C2} = V_{C1} + V_{CD0}(P_0/P)^{(1/\kappa)} \quad (4)$$

The volume of the imaginal compressor for right part of isothermal region is opposite with imaginal expander. Cold gas volume V_E and displacer volume V_D

$$M_2 = \frac{P}{R} \left(\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_{HEC}}{T_E} + \frac{V_{R2}}{T_{R2}} + \frac{2V_{I0} - V_I}{T_I} \right) \quad (5)$$

$$V_D = V_E + V_{DD0}(P_0/P)^{(1/\kappa)} \quad (6)$$

The imaginal compressor volume V_{C2} is the combination of the compressor and displacer back space, then compressor volume V_C

$$V_C = V_{C2} + \beta(V_D - V_{D\max}) \quad (7)$$

P_0 is average pressure, α is pressure oscillation amplitude ratio, ω is angle frequency, t is time. R is gas constant. T_0 is room temperature, T_E is cooling

temperature, T_I is temperature of imaginal compressor. T_{R1} and V_{R1} are average temperature and volume of left part of the regenerator, respectively. T_{R2} and V_{R2} are average temperature and volume of right part of the regenerator, respectively. V_{HEH} is after cooler volume, V_{HEC} is cold heat exchanger volume. M_1 is the mass of left part of the isothermal region including imaginal expander, it will be maximum in Equation (3) when V_{C1} is set as 0. M_2 is the mass of right part of the isothermal region including imaginal compressor, similarly, it will be maximum of Equation (5) when V_E is set as 0. V_{CD0} is adiabatic gas volume between isothermal compressor and hybrid compressor head at average pressure, V_{DD0} is adiabatic gas volume between displacer and cold gas at average pressure, β is cross area ratio of displacer back space over front space, κ is adiabatic ratio.

Taking the process of Taylor series expansion, and the first order harmonic is kept, V_D , V_C and force on piston F_C with displacement amplitude x_0 can be got

$$V_{C1} = V_{C10} - \alpha(M_1RT_0/P_0)\sin(\omega t) + (T_0/T_I)V_{I0}\cos(\omega t) \quad (8)$$

$$V_{C10} = M_1RT_0/P_0 - V_{HEH} - (T_0/T_{R1})V_{R1} - (T_0/T_I)V_{I0} \quad (9)$$

$$V_{C2} = V_{C1} + V_{CD0}[1 - \alpha/\kappa \sin(\omega t)] \quad (10)$$

$$V_E = V_{E0} - \alpha(M_2RT_E/P_0)\sin(\omega t) - (T_E/T_I)V_{I0}\cos(\omega t) \quad (11)$$

$$V_{E0} = M_2RT_E/P_0 - V_{HEC} - (T_E/T_{R2})V_{R2} - (T_E/T_I)V_{I0} \quad (12)$$

$$V_D = V_{DS} - a \sin(\omega t) - b \cos(\omega t) = V_{DS} - V_{D0} \cos(\omega t + \phi) \quad (13)$$

$$V_C = V_{CS} - c \sin(\omega t) + d \cos(\omega t) = V_{CS} - V_{C0} \cos(\omega t - \phi) \quad (14)$$

$$F_C = -c\alpha P_0/x_0 \sin(\omega t) + d\alpha P_0/x_0 \cos(\omega t) \quad (15)$$

$$V_{DS} = V_{E0} + V_{DD0} \quad a = \alpha(M_2RT_E/P_0 + V_{DD0}/\kappa)$$

$$b = (T_E/T_I)V_{I0} \quad V_{CS} = V_{C10} + V_{CD0} + \beta(V_{E0} + V_{DD0} - V_{D\max})$$

$$c = \alpha[(M_1RT_0/P_0 + V_{CD0}/\kappa) + \beta(M_2RT_E/P_0 + V_{DD0}/\kappa)]$$

$$d = [(T_0 - \beta T_E)/T_I]V_{I0} \quad V_{D0} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad V_{C0} = \sqrt{c^2 + d^2}$$

$$\phi = \arctan(b/a) \quad \phi = \arctan(d/c)$$

Displacement can be got from equation (6-7) or (13-14). Input power is $-0.5d\alpha P_0$, cooling power is $0.5(T_E/T_I)V_{I0}\alpha P_0$. Equation(15) is basic for linear motor matching¹. Gas spring force on piston is $c\alpha P_0/x_0$, which is proportional to dead volume. Taking pressure as reference, the phase angle differences between pressure wave and swept volumes of the compressor and displacer depend on the nodal point position, dead volumes and input power according to Equation (13-14). $\beta=0$ means ideal inertance tube or double piston pulse tube refrigerator. To displacer type, it needs larger compressor piston diameter in virtue of the dead volume of the pulse tube has to be covered by compressor.

4. CONCLUSION

A hybrid model for displace pulse tube refrigerator is introduced. Analytical solutions of V_D and V_C are got.

REFERENCES

1. 朱 紹偉, 郭 志敏, 第102回2021年度秋季低温工学・超電導学会, p21

パルスチューブ冷凍機の熱交換器に関する検討

Study on aftercooler configuration of pulse tube cryocoolers

保川 幸雄, 松本 伸, 溝口 義則, 柴田 将史(富士電機); 上田 祐樹(東京農工大)
 YASUKAWA Yukio, MATSUMOTO Noboru, MIZOGUCHI Yoshinori, SHIBATA Masafumi (Fuji Electric);
 UEDA Yuki (Tokyo University of Agriculture and Technology)
 e-mail: yasukawa-y@fujielectric.com

1. はじめに

パルスチューブ冷凍機(PTC)の主要構成要素である高温側熱交換器(アフタークーラ)が冷凍機性能に及ぼす影響について、実験に基づいた検討を行っている。アフタークーラは、低温端で吸熱された熱を最終的に系外へ排出する装置である。主な排熱経路は、ガスからメタルへ振動流による非定常熱伝達とメタルによる周囲方向への熱伝導による排熱である。本研究では、振動流におけるアフタークーラの伝熱特性評価を行うことを目的とする。最終的には振動流による熱交換器の設計指針の導出に繋がたいと考えている。

2. アフタークーラ(AC)構成と実験評価方法

AC の熱交換器本体として、伝熱表面積を大きくとることができるメッシュ型(CM)や粘性抵抗を低減できる多孔体型(MH)が通常用いられる。前者は粘性抵抗が大きい、後者は伝熱面積が小さいというデメリットを有する。本研究ではこの両者に加え多孔体型で伝熱表面積を改善した TB 型を用意した。熱設計は定常流条件にて、熱回路網による伝熱モデルを夫々作成して行った。

熱設計の評価は定常流実験で行う。AC としての評価は振動流実験で行う。両実験は、基本的に AC を PTC に組込んだ状態とし、ほぼ同じ熱流体環境条件で実施する。

3. 定常流実験

定常流実験により伝熱モデルの熱設計の検証を行った。AC 内でのガス温度の実験結果を Fig.1 として示す。メッシュ型(CM)と多孔体型(MH)は計算値と実験値で比較的良好一致を見ており、定常流条件における熱設計に問題のないことを示している。また、メッシュ型の方が AC 内全体の温度上昇が抑えられ、伝熱性能が高い [1]。なお、TB 型は製作性に課題があり、計算と実験で乖離が出たものと推定している。

4. 振動流実験

PTC として冷凍機性能評価を行うことにより AC の熱評価を行った。AC での排熱量を直接測定できないため、低温端での熱負荷(ここでは低温端温度)を評価軸とした。Fig.2に AC での粘性ロスを除いた音響パワーに対する低温端無負荷到達温度を示す。多孔体型(MH)および TB 型を搭載した PTC がほぼ同等の冷凍機性能を示し、メッシュ型(CM)を搭載した PTC はこれらより明らかに劣る冷凍機性能を示した。これは定常流での実験結果とは正反対である。

5. 考察

メッシュ型 AC は、定常流実験では高い伝熱性能を示したが、振動流実験では多孔体型、TB 型を組込んだ PTC の方が高い冷凍機性能を示した。この原因を調べるため、AC 内部のガス温度プロファイル調べた。その結果、多孔体型および TB 型は AC の長手方向に沿ってほぼ均一な温度分布を示したのに対し、メッシュ型では圧縮機側でのガス温度が高く、蓄冷器側では低くなった。AC と蓄冷器の境界では外壁温度よりさらに低くなる現象を示した。これは、メッシュ型 AC の一部で壁から熱流入があり、一部が熱交換器として機能しないことを示唆している。この要因を調べるため、AC の熱境界層厚さに対する流路半径の比をパラメータとして比較した。

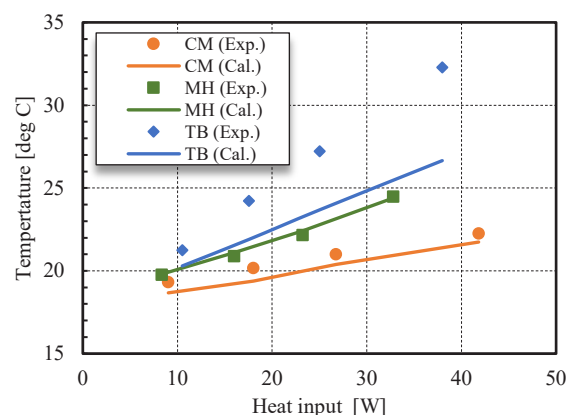


Fig.1 Gas temperature in AC in the steady flow

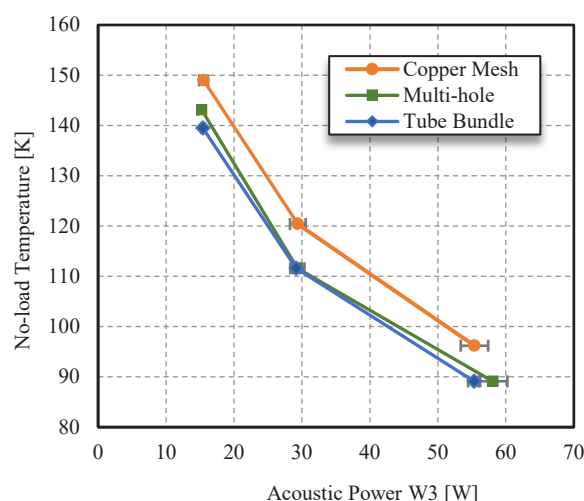


Fig.2 Cooling performance based on the real acoustic power

その結果、メッシュ型(CM)は多孔体型(MH)や TB 型のパラメータよりもむしろ蓄冷器のパラメータに近いことが分かった[2]。

6. まとめ

アフタークーラ構成が冷凍機性能に与える影響について実験的に評価した。その結果、定常流で伝熱性能が高いACが必ずしもPTCの冷凍機性能を高めるわけではないことが示された。振動流では伝熱表面積、粘性抵抗の他、メタルとガスの間の非定常的な熱交換特性が重要であり、さらに実験検証を進めて行く。

参考文献

- Y. Yasukawa, et al.: Effect of Aftercooler Configuration on the Performance of Pulse Tube Cryocoolers, Cryocoolers 21 2021: 221-8
- Y. Yasukawa, et al.: Experimental Study on the Effect of Aftercooler Configuration on the Performance of Pulse Tube Cryocoolers, Cryogenics.2021.103408

2 kW クラスの圧縮機で駆動する 4 K-GM 冷凍機の可能性

Possibility of 4 K-GM cryocooler driven by 2 kW class compressor

増山 新二 (大島商船高専), 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)

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

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

1. はじめに

GM 冷凍機の消費電力は、圧縮機動力により、ほぼ占められる。動力が大きくなると、消費電力も増加するが、これはガス吐出量を大きくする効果を持つ。現状の 4 K-GM 冷凍機において、1-1.5 W 程度の能力を得るためには、おおむね 7-8 kW クラスの圧縮機が使用されている。

このような状況において、少ない消費電力にもかかわらず、冷凍能力が大きく低下しない冷凍機の開発は、省エネルギー化や新規システムの実現に結び付くと考えられる。そこで、われわれは 2 kW クラスの圧縮機で駆動する 4 K-GM 冷凍機の可能性を調査している。[1-2] 今回は、サイズの異なる 3 台の 2 段 GM コールドヘッドを同一の圧縮機にそれぞれ接続したときの冷凍能力を比較した。

2. GM コールドヘッドと圧縮機

試験に使用された 3 台の 2 段 GM コールドヘッドは

- (1) RDK-305D (0.4 W, 4.2/5.1 kW (50/60 Hz)), S サイズ
- (2) RDK-408D2 (1.0 W, 6.9/7.9 kW (50/60 Hz)), M サイズ
- (3) RDE-418D4 (1.8/2.0 W, 6.9/7.9 (50/60 Hz)), L サイズ

で、いずれも住友重機械工業社製である。ここで、カッコ内の数値は、カタログスペックによる 4.2 K の冷凍能力と、通常組み合わせられる圧縮機消費電力の 50, 60 Hz における平均値である。また、大きさの違いにより、それぞれを S, M, L サイズと呼ぶこととする。4 K 冷凍能力の 2 段目蓄冷材の種類や充填割合の影響を避けるため、3 台とも、高温側から Pb, HoCu₂, Gd₂O₃S 球を 50, 20, 30% の体積割合で充填した蓄冷器を使用した (ただし、充填分量は異なる)。また、通常 60/72 rpm で固定化されているコールドヘッドの動作速度を別途設置したインバータ (MITSUBISHI, FR シリーズ) で制御した。

圧縮機は、(1) 2 kW クラス、(2) 7 kW クラス

- (1) SA115 (1.6/1.9 kW (50/60 Hz), ULVAC CRYOGENICS)
 - (2) SSC-3700 (6.3/7.5 kW (50/60 Hz), SUZUKISHOKAN)
- の 2 台を準備し、それぞれの消費電力を電力計 (HIOKI, PW3336) を使用し、電源ラインからの直接入力方式で測定した。なお、本研究の試験はすべて 60 Hz で行われた。

3. 冷凍能力試験結果

冷凍能力試験は、電気ヒータにより 1 段目ステージ温度をその最低到達温度から 70 K 程度まで変化させ、4.2 K での 2 段目ステージ冷凍能力の最大値を測定した。2 kW クラス圧縮機においては、上記の試験を 24~72 rpm の範囲で、7 kW クラス圧縮機では、60~84 rpm の範囲でそれぞれ行った。2 kW クラスの実験結果を Fig. 1 に示す。いずれのサイズのコールドヘッドとも、36 rpm 付近で冷凍能力の最大値を示している。これは、通常の動作速度では不足していた膨張空間へのガス量が、動作速度を遅くすることで、補われるためである。しかしながら、さらに低速度である 24 rpm では、能力低下が見られる。冷凍能力の大きさは、コールドヘッドサイズが大きくなるにつれて向上しており、事前の予想とは異なる結果となった。冷凍能力の最高値は、L サイズにおいて 0.95 W を発揮しており、その時の%カルノーは 3.5% であった。

Fig. 2 は、カタログスペックである GM 冷凍機の消費電力と 4.2 K 能力の関係 (点線は、これらの近似曲線) と、実験から得られた各コールドヘッドの能力の最大値をプロットした結果

を示す。2 kW クラス圧縮機に注目すると、特に M, L サイズのコールドヘッドが、近似曲線から大きく上方向にずれている。

4. まとめ

サイズの異なる 3 台の GM コールドヘッドを 2 kW クラスの圧縮機と組み合わせて、冷凍能力を評価した。圧縮機のガス吐出量から、サイズの小さいコールドヘッドが有効であると予測していたが、結果はまったくの反対であった。L サイズコールドヘッドにおいて、4.2 K で 0.95 W という大きな能力が発揮された。これより、2 kW クラス圧縮機で駆動する 4 K-GM 冷凍機が有する高い可能性が証明されたと考えられる。

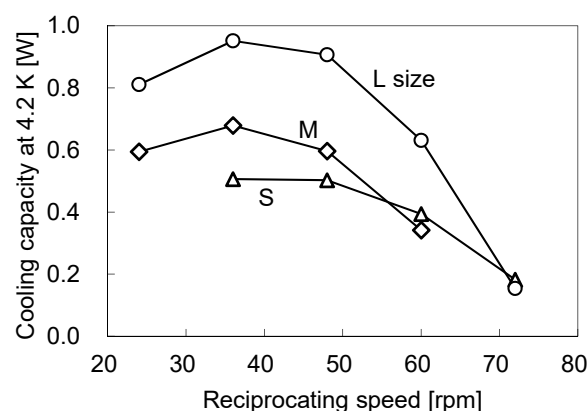


Fig. 1. Reciprocating speed dependence of the cooling capacity at 4.2 K of three types of cold heads with the SA115 (2 kW class) compressor.

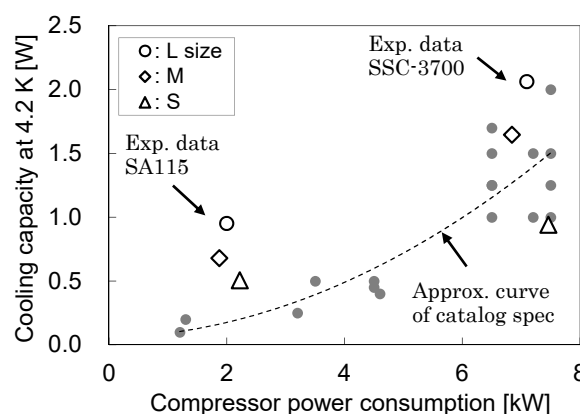


Fig. 2. Comparison the cooling capacity of the experimental results at 4.2 K and the catalog spec of 4 K-GM cryocoolers.

【参考文献】

1. 神代彪瑠, 増山新二: Abstracts of CSSJ conference, Vol. 102 (2021) p. 22
2. S. Masuyama, K. Kamiya, T. Numazawa: Journal of Physics: Conference Series, (to be published)

【謝辞】

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

高温超伝導ケーブルに適用するインジウム圧接の 接合性能の接合条件依存性評価

Joint condition dependency of joint performance in press welding with indium applied to high-temperature superconducting cable

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

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

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

1. はじめに

鉄道総合技術研究所で開発を行っている鉄道用高温超電導き電ケーブル[1]の単位長さは輸送の制約から 400~500 m とされており[2], 夜間の限られた時間でオンサイト接合し, 数 km にわたるシステムを構築することが求められる。我々の共同研究グループでは, 鉄道き電ケーブルの中間接合部オンサイト接合技術として, インジウム箔を接合部に挿入し, 常温あるいは 120°C 以下程度の熱処理でプレスして接合する機械的接合 (インジウム圧接) [3,4]を適用することを検討している。既報[5]においては, Fig. 1 (a)に示す BSCCO 線材を直線状に配置した円形モデルケーブルの接合サンプルを製作し, 接合時の加熱処理の有無による接合抵抗の差が大きいことを確認した。本発表では, 現場での簡易・短時間接合に向けた接合プロセスの簡略化, より実ケーブルに近い体系への接合技術の適用を目的に, 1) 接合前処理簡易化の検討, 2) 円形ケーブル螺旋配置接合に対する当該圧接技術の適用と接合抵抗評価, を実施した結果について報告する。

2. 接合前処理簡易化の検討

接合に用いる高温超電導線材として, ブロンズ系銅合金補強 BSCCO 線材 (住友電工, DI-BSCCO Type HT-CA, 4.5 mm 幅, 臨界電流 207 A at 77 K, self-field)を用いた。過去の研究[4]を元に, 既報[5]では接合前処理として, ①BSCCO 線材の研磨処理 (#1500 耐水研磨紙), ②インジウム箔の 10%希塩酸による酸洗い, ③接合面に対するフラックス ($\text{NH}_3\text{Cl} + \text{ZnCl}$)の事前塗布, を行っていた。現場での簡易・短時間接合のためには, 加熱処理を行わない常温圧接が理想的であり, かつ, これらの前処理を省けることが望ましい。そこで, ③を固定条件として①②の有無による接合抵抗の変化を調査した。100 μm 厚の In 箔の挿入, 接合長 10 mm, 接合圧力 100 MPa で各前処理条件で 2 サンプルずつ製作し, 液体窒素浸漬冷却, 自己磁場下で接合抵抗 R_j を評価した。サンプル製作後のインジウム箔厚さから評価したインジウム抵抗 R_{in} と接合面積 S_j を用いて, インジウムの寄与を差し引いた接合抵抗率 $(R_j - R_{in})/S_j$ の評価結果は, ①有②有で 42.2 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, 39.2 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, ①有②無で 37.0 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, 38.2 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, ①無②有で 35.1 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, 35.6 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, ①無②無で 39.4 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$, 34.5 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ であり, 線材接合においては有意差がないことがわかった。

3. 円形ケーブル接合試験

2 での結果を踏まえて, 接合条件を変えた接合サンプルを 3 種類製作し, 既報[5]で製作した 2 種類の接合サンプルと併せて接合抵抗を比較した。接合サンプル名は, RT-200-A Straight, Heat-200-A Straight (以上 2 種類が既報[5]のもの), RT-100-B Straight, RT-200-B Straight, RT-200-B Spiral とし, RT が常温接合, Heat が 120°C 加熱接合, 100 または 200 が接合に用いた初期インジウム厚さ (μm), A が接合前処理①②③を適用した場合, B が接合前処理③のみを適用した場合, Straight が Fig. 1 の(a) 直線配置, Spiral が(b) 螺旋配置を意味している。なお, 接合の際には 2 方向からそれぞれ 10 kN の接合荷重を与え, 接合長 15 mm で接合した。Fig. 2 に接合



Fig. 1 Joint samples: (a) straight, and (b) spiral arrangements.

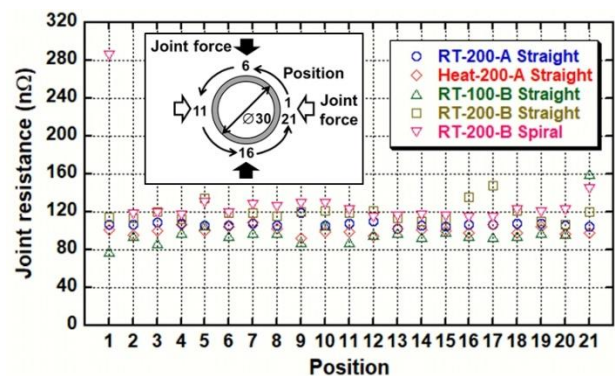


Fig. 2 Joint resistance as a function of position of BSCCO tapes.

サンプルを構成する各線材接合における接合抵抗の測定結果 (77 K, 自己磁場)を示す。直線配置において接合時の加熱の有無や, 接合前処理①②の有無は, それぞれが無の場合にはわずかに接合抵抗が高くなる傾向はあるものの大きな影響を与えない結果となり, 現場での接合における作業簡易化の見通しを得た。またインジウムを薄くした場合には, インジウム抵抗の分だけ接合抵抗が低くなることが確認された。さらに螺旋配置にした場合には, 1ヶ所を除いて直線配置の場合と同等の接合抵抗が得られており, 実ケーブルに対してもこれまでと同等の接合抵抗が得られることを確認した。

今後は, 螺旋配置接合におけるピッチやケーブル直径を変えた場合のねじりひずみの影響の調査と線材固定法の検討を行い, 実ケーブルの現場での接合に向けた最適化を実施していく予定である。

謝辞

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

参考文献

1. M. Tomita, et al.: Energy, Vol. 209 (2020) Art. no. 118318
2. H. Maeda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) Art. no. 4602409
3. T. Nishio, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) Art. no. 4603305
4. R. Hayasaka, et al.: J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1559 (2020) Art. no. 012034
5. S. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p. 123

1.3 GHz NMR 磁石への実装に向けた 高強度 Bi2223 線材間超伝導接合技術の開発

Development of superconducting joints between the high-strength Bi2223 tapes
toward implementation in 1.3 GHz NMR magnet.

中井 優亨 (青学大); 武田 泰明 (NIMS); 稲葉 勇人 (青学大); 末富 佑, 朴 任中, 柳澤 吉紀 (理研);

中島 隆芳, 山出 哲 (住友電工); 濱田 衛, 齊藤 一功 (JASTEC); 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

NAKAI Ukyo (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (NIMS); INABA Hayato (Aoyama Gakuin Univ.);

SUETOMI Yu, PIAO Renzhong, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (SEI, Ltd);

HAMADA Mamoru, SAITO Kazuyoshi (JASTEC); MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5621057@aoyama.jp

1. はじめに

Ag シース (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y [Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO[®] [1]) は優れた臨界電流特性と量産性から、20 T 超の高磁場発生装置を含め様々な超伝導磁石に応用されている [2]。一方、JST 未来社会創造事業では、LTS, Bi2223, RE123 の各線材を直列に接合した永久電流 1.3 GHz (30.5 T) NMR 磁石の開発が進められており、Bi2223 線材間の実用的な手法での超伝導接合技術の確立が必須となっている [3]。前回我々は、高強度 Bi2223 線材 (DI-BSCCO[®] Type HT-NX) 間における高 I_c 超伝導接合の達成について報告した [4]。今回は 1.3 GHz NMR コイルの上部空間の接合配置構造 (ジョイントプレート) の最終設計に向けて、現場での接合作業に適した短い余長で済む底面加熱炉や小型のプレス機を使用した接合部作製の試みを進めるとともに、段ボールを模擬プレートとしたコイル端部の長尺線材間接合に適した作製工程の検討を行った結果を中心に報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 (a) に DI-BSCCO[®] Type HT-NX 線材 [121 芯, $\sim 4.5 \text{ mm}^w \times \sim 0.31 \text{ mm}^t$, I_c (77 K, self-field) $> 170 \text{ A}$] を用いた Bi2223 中層コイルの模式図 [5] を、Fig. 1 (b) に FRP 製ジョイントプレートと底面加熱炉の写真を示す。今回使用した底面加熱炉は従来の抵抗加熱炉より加熱部を短くした構成であり、温度勾配が大きく高温部が短い。そのため、接合作業時の補強材料除去長が先端から約 25 cm で済む。補強材料を除去した線材端部は、0.4° の傾斜面で研磨してフィラメントを露出させた面にスラリーを滴下し、小型のプレス機 (ラム径 $\sim 37 \text{ mm}$) で $\sim 200 \text{ MPa}$ の一軸プレスを行うことで接合部を作製した。熱処理は $P_{O_2} = 3 \text{ kPa}$ 下で、1 次焼成を従来最適と考えていた条件より高温の 830°C で行った。これは長尺線材間の接合では熱が炉外に逃げやすく、接合部の実際の温度がやや低下することが考えられるためである。接合部の通電測定は直流 4 端子法により液体窒素浸漬下で行った。

3. 実験結果

Fig. 2 に模擬プレートを用いた接合の I - V 特性を示す。1 次焼成後の接合試料はゼロ抵抗を示さなかった。これは、小型のプレス機で行った焼成前の一軸プレス圧力が低かったためだと考えられる。しかし、大型のプレス機 (ラム径 $\sim 55 \text{ mm}$) で 200 MPa の中間一軸プレス、 820°C での 2 次焼成を行うことで、ゼロ抵抗と思われる領域が実現し、十分高い接合 I_c が得られた。これは、焼成前の一軸プレスを低い圧力で行った試料においても、厚膜中間層でやや高温の 1 次焼成により結晶成長すれば中間一軸プレス、2 次焼成によって良好な接合界面が形成できることを示唆する新しい結果である。当日は、ジョイントプレートにおける接合作業と通電特性についても報告する。

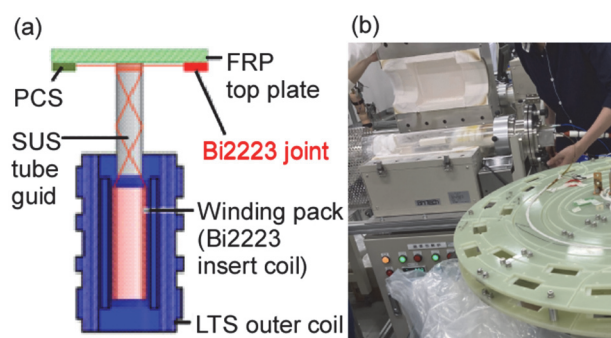


Fig. 1 (a) Schematic illustration of Bi2223 insert coil. [5]
(b) Photograph of the joint plate and a bottom heating furnace.

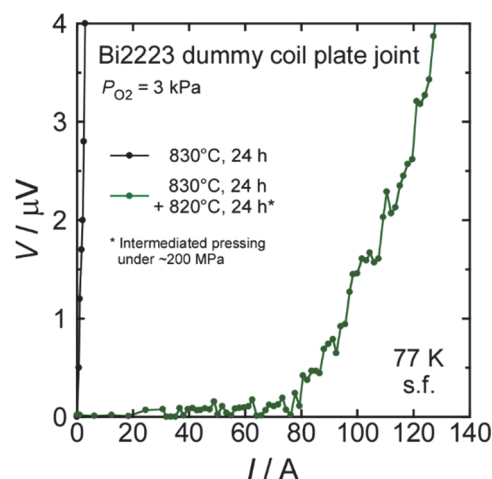


Fig. 2 I - V curves at 77 K in self-field of superconducting joint samples connecting reinforced Bi2223 tapes (Type HT-NX) fabricated on a cardboard plate.

謝辞

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

参考文献

1. N. Ayai *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112
2. T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713-718.
3. H. Maeda *et al.*, *IEEE TAS* **29** (2019) 4602490
4. U. Nakai *et al.*, *Abstract of CSSJ Conf.* **102** (2021) 47.
5. Y. Takeda *et al.*, *IEEE TAS* **32** (2022)

高強度 Bi2223 線材間超伝導接合における 中間厚膜層の金属組成比制御

Metal composition ratio control of intermediate thick film layer on superconducting joints between the high-strength Bi2223 tapes

稲葉 勇人 (青学大); 武田 泰明 (NIMS); 中井 優亨 (青学大)

中島 隆芳, 山出 哲 (住友電工); 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

INABA Hayato, (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (NIMS), NAKAI Ukyo, (Aoyama Gakuin Univ.);

NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (SEI, Ltd); MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5622057@aoyama.jp

1. はじめに

Ag シース (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₇[Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO®[1])は高い臨界電流特性と優れた量産性から超伝導磁石応用が進んでいる[2]。我々は、Bi2223 多結晶中間層の導入により、DI-BSCCO® Type H 線材間の超伝導接合を開発し、実用的な接合臨界電流を実現した[3]。一方、JST 未来社会創造事業では、高温超伝導線材を用いた永久電流 1.3GHz(30.5 T)超高磁場 NMR の設計・開発が進められており、超伝導磁石には Nb 系線材、REBCO 線材と高強度 Bi2223 線材 (DI-BSCCO® Type HT-NX) が用いられる[4]。この Bi2223 線材は両面に補強 Ni 合金テープが Sn を含むはんだで接着されており、Sn と Ag が合金化しやすいことから、接合形成工程を見直す必要がある。本研究では Type HT-NX 線材間の接合形成の各工程、特に中間厚膜層の金属組成比と焼成条件の最適化を行い、再現性良く 77 K で 70 A 以上の接合 I_c を示す接合作製方法の確立を目指した。

2. 実験方法

DI-BSCCO® Type HT-NX 線材間の接合作製では、まず温風と電気化学反応を用いて補強合金テープとはんだを除去した。その後、浅い角度 (~0.4°) で傾斜研磨し超伝導フィラメントを露出させ、その上にスラリーを滴下した。スラリーはエタノールとブタノールの混合溶媒に、Bi2223 仮焼粉末および Bi2223 粉末を混ぜたものである。本研究では中間厚膜層に用いる前駆体粉末に標準組成と、AE-Cu-rich の粉末を用いて ~10 cm の接合試料を作製した。接合は拌み合わせ形状である。焼成は 815 - 825°C、 $P_{O_2} = 3$ kPa 下で行い、一部の試料には焼成後に 100 - 200MPa で一軸プレスをし、815 - 825°C で二次焼成を行った。試料の微細組織観察は SEM により、厚膜部の超伝導特性は SQUID 磁束計により評価した。接合 I_c は液体窒素浸漬下で直流四端子法により調べた。

3. 実験結果

Fig. 1 に 825°C で一次焼成後、200 MPa で中間一軸プレスを施し、825°C で二次焼成した接合試料の I - V 特性を示す。中間一軸プレスを施し二次焼成を行うことで接合 I_c が大幅に改善し、補強材のない Type H 線材間接合の最高値とほぼ同等の値に達した。Fig. 2 に二次焼成後の接合試料の断面二次電子像を示す。高密度な中間層厚膜と良好な接合界面が観察でき、これらは中間一軸プレス、二次焼成の

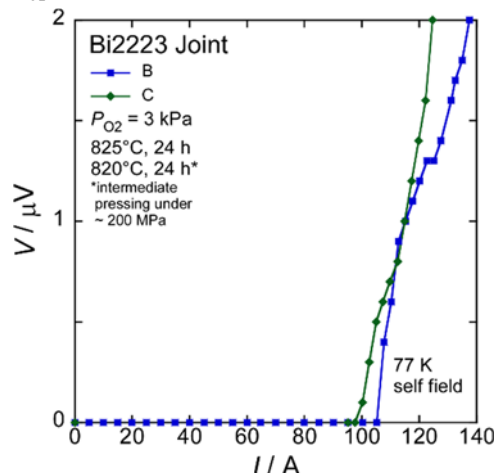


Fig. 1 I - V curves measured at 77 K in self-field for superconducting joints between Bi2223 tapes.

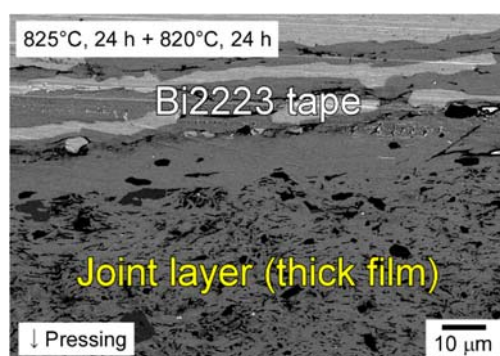


Fig. 2 Polished surface secondary electron image of the jointing section of a sample after second sintering.

効果である。当日は、様々な金属組成の前駆体粉末を用いた接合試料の作製において、一軸プレス圧力、二次焼成条件の最適化についても報告する。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJN17A2 の支援を受けたものである。

参考文献

1. N. Ayai *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112
2. T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713-718
3. Y. Takeda *et al.*, *Appl. Phys. Express* **12** (2019) 023003
4. H. Maeda *et al.*, *IEEE TAS* **29** (2019) 46024

磁気冷凍を適用した循環冷却システムにおける循環方法の検討

Consideration of circulation method in circulation cooling system applying magnetic refrigeration

野口 正純, 岡村 哲至, 高澤 拓海 (東工大); 平野 直樹 (NIFS)

NOGUCHI Masazumi, OKAMURA Tetsuji, TAKAZAWA Takumi (Tokyo Tech); HIRANO Naoki (NIFS)

E-mail: noguchi.m.ah@m.titech.ac.jp

1. はじめに

近年高温超伝導コイルを効率的に冷却するシステムが求められている。産業応用の例として金属の熱加工への応用がある。DC 電源を用い超伝導コイルに磁場を発生させ、高効率モーターを用いて金属を回転させ加熱する方式は約 1MW 規模において 90%を超えるとされている[1]。本研究では複数の超伝導コイルを効率的に冷却する目的として、循環冷却システムについて検討を行っている。室温で用いるコンプレッサーや極低温で用いるクライオファンを使って冷媒を循環させ、それぞれに磁気冷凍システムを組み合わせた循環冷却システムについて数値解析を行いその結果について考察を行う。

2. 磁気冷凍システムを用いた循環冷却システムによる冷却

解析は一次元解析モデルを用いた。解析モデルについては Fig.1 に示す。コンプレッサーを使う場合は、冷媒は左上の Entrance から流入し、Pre-cooling heat exchanger を通過後、極低温冷凍機の Cold head heat exchanger で冷却され、磁気冷凍システムを組み合わせる場合は、消磁された磁性材料によってさらに冷やされ、高温超伝導コイルを冷却する。クライオファンを使う場合は Fig.1 に示すように、Pre-cooling heat exchanger を介することなく冷媒を循環させる。

磁気冷凍システムを用いる場合は冷媒が励磁側と消磁側で分岐して流れる。励磁側を通過した冷媒は、コイルの下流側へ流れコイルからの冷媒と合流する。解析モデルでは、コイルの温度がなるべく低くなるように励磁側と消磁側に流れる冷媒の流量を調節した。また磁気冷凍を用いない場合はコイルがない分岐流路は存在せず、コイル前の磁性材料メッシュには磁性材料が存在しないこととした。磁性材料解析手法については圧力分布を仮定した後、下記に示すエネルギー方程式を解くことによって求めた。

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \rho u \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{4}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - \frac{q_{ex}}{S dx} - \frac{q_{rad}}{S dx}$$

ρ : Density [kg/m³] T : Temperature [K]
 c_v : Specific heat at constant volume [J/(kg · K)]
 c_p : Specific heat at constant pressure [J/(kg · K)]
 u : Flow velocity [m/s] x : Position [m] t : Time [s]
 k : Thermal conductivity [W/(m · K)] q_{rad} : Radiation energy [W]
 q_{ex} : Heat exchange amount at each mesh [W] μ : Viscosity [Pa · s]
 S : Cross sectional area of refrigerant transport pipe [m²]

解析で用いた質量流量の条件について説明する。コンプレッサーを用いた場合について 0.1、0.5、1.0[g/s]を仮定して解析を行った。クライオファンを用いた場合での比較について STIRLING CRYOGENICS 社のクライオファンの流量や吐出圧などのデータを使用し、最大出力の場合を仮定した[1]。

ここで解析結果の一例としてクライオファンを用いた場合の、コイルへの熱負荷に対して磁気冷凍の有無それぞれのコイル温度を表したグラフを Fig.2 に示す。磁性材料には(Er_{0.6}Dy_{0.4})Al₂を合計 1kg 用い、3T の磁場変化が起こった場合を想定した。解析結果についてコイルでの熱負荷が約 20W 以下において磁気冷凍を用いた場合はコイル温度が高くなっているが、これは流路が分岐したことによって流路抵抗が増し、輻

射熱が流路分岐した分増加したことが起因していると考えられる。これによってクライオファンの発生させる質量流量が低下かつ圧力損失と輻射熱によって発生した熱が増したことがコイル温度の上昇を起こしたと考えられる。一方コイルでの熱負荷が約 20W 以上において、コイルでの温度上昇の影響が消磁側であらかじめ冷却することで打ち消すことに磁気冷凍システムの優位性が生まれていると考えられる。また(Er_{0.6}Dy_{0.4})Al₂のキュリー温度が約 30K であり、磁気冷凍システムの能力が向上したことも理由として考えられる。しかし磁気冷凍システムを用いた場合、全体の質量流量の一部を励磁側の流路に分配する必要がある、消磁側に全ての質量流量を流すことができない。これによって約 20W 以上のコイルへの熱負荷においてもわずかながらのコイル温度の低下しか起こらないと考えられる。

当日の発表ではコンプレッサーとクライオファンの場合のコイル温度の比較、他の磁性材料を用いた場合の解析結果や、クライオファンの前後に磁気冷凍システムを使用した解析モデルにおいての解析結果についても報告する。

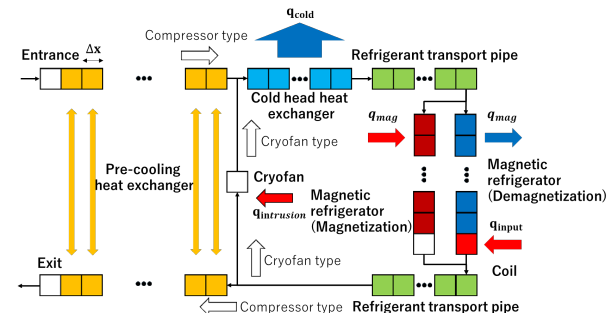


Fig.1 Model of analysis with compressor or cryofan

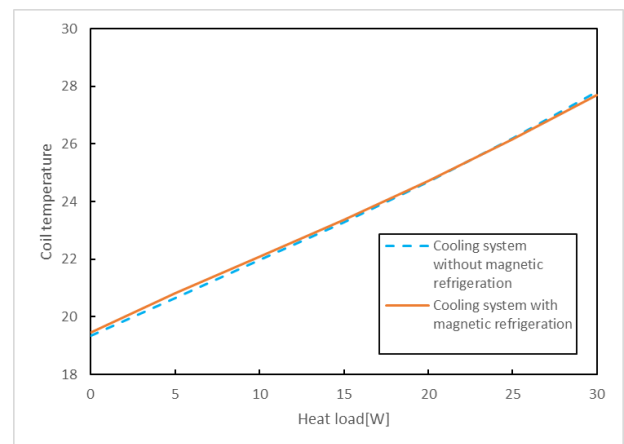


Fig.2 Analysis results using cryofan in light of with magnetic refrigeration and without magnetic refrigeration respective

参考文献

- [1] Massimo Fabbri, et al.: DC induction heating of aluminum billets using superconducting magnets, (2008)
- [2] STIRLING CRYOGENICS, Cryofan Datasheet, https://www.stirlingcryogenics.eu/files/_documents/1/CryofansDatasheet.pdf, <2021.04.05>

ホール素子を用いた超電導ケーブルコア周囲の磁場分布測定

Measurement of magnetic field density distribution around the superconducting cable core by Hall probe method

大倉 大佑, 筑本 知子, 山口 作太郎(中部大学); シスキン・オレグ(チェコ科学技術アカデミープラズマ物理研究所)
 OHKURA Daisuke, CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); SHYSHKIN Oleg (IPP-CAS)
 E-mail: ts21051-6669@sti.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超電導 (HTS) 線材はテープ状となっており、電気伝導特性はテープ面垂直方向にかかる磁場に大きく影響される。超電導ケーブルコアは、fig.1 に示すように、複数の線材を平行にかつ層状に配置された構造をしているため、通電時にはお互いの自己磁界による影響を受けると考えられる。また現在製造されている HTS 線材の単長が最長でも 1 km 程度と短いことから、実際の応用機器においては必ず接続部があり、接続部抵抗のばらつきがどの程度偏流に影響があるのかも安全設計上把握する必要がある。そこで本研究ではホール素子を用いて、通電条件を変えながら超電導ケーブルコア周囲の磁場分布測定を行った。まずは、基礎的な特性の把握のため、ケーブルコアの外導体のうち任意の 1 ～ 5 本に電流を流して測定を行ったのでその結果について報告する。

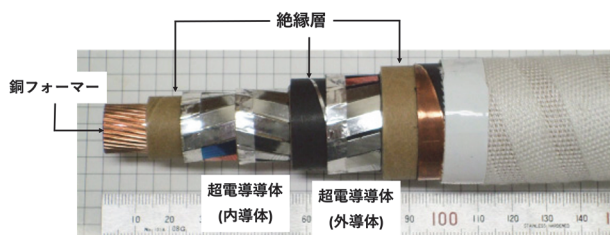


Fig.1 Superconducting coaxial cable (20kV-2kA, DC)

2. 実験方法

測定試料として、定格 2kA の直流送電用ケーブルコア (DI-BSCCO[®]、内導体: 11 本/12 本; 外導体: 16 本、外径 35mm) を用いた。ケーブルコアの磁場分布測定は Arepoc 社 (型番: HHP-VP) の一軸型ホール素子を用い、Fig. 2 に示すようにケーブルコアの任意の線材に電流 (I_a) を流した状態でホール素子の回転方向に対してホール素子が垂直になるように配置して磁場分布の測定をした。

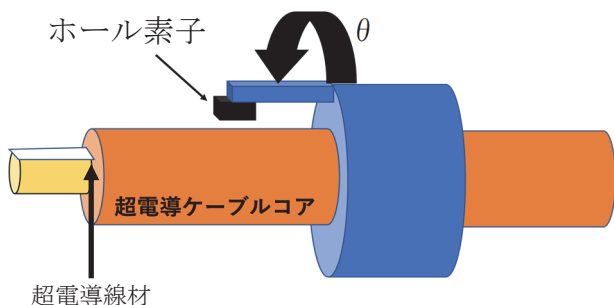


Fig.2 Layout for scanning Hall probe measurement

3. 磁場分布測定結果

Fig. 3 にケーブルの外導体のうち 3 本について、(a) 任意の 1 本 (No. 3) に電流を流した場合、(b) 任意の線材 1 本 (No. 1 又は 2) と隣り合う任意の 2 本 (No. 1 と 2) に $I_a=100A$ の電流を流した場合の磁場分布測定結果を示す。

Fig. 3(a) では電流の大きさにほぼ比例して磁束密度は大きくなった。ここで、磁束密度が最大値をとるときの角

度 (θ_{max}) は、電流を流した線材の中線の位置と等しいと考えられる。これまで外導体 5 本について同様の測定を行なってきており、隣り合う線材の θ_{max} の差の平均値は約 23° であった。測定に用いたケーブルコアの外導体は 16 本であり、これらがケーブル周囲に均等に配置されていると考えるとそれぞれの垂線が成す角は 22.5° と計算され、その間隔とほぼ一致している。また Fig. 3(b) より、隣り合う 2 本同時に流した際はそれぞれの導体の自己磁界が重畳され、最大磁場強度が大きくなっていることがわかる。

謝辞: 磁場分布測定について、鶴岡誠、内田樹、岩田暢祐の各氏のご協力に感謝いたします。

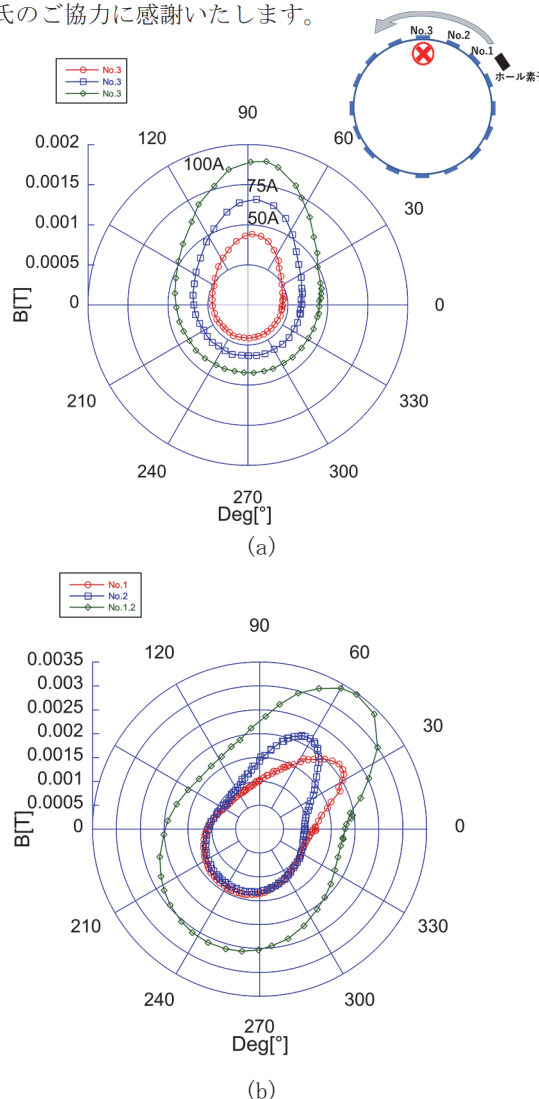


Fig.3 Magnetic field distribution around cable core measured by Hall sensor. (a) $I_a=50, 75$, and 100 A were applied to tape No.3. (b) $I_a=100$ A was applied to tape No.1, No2, and both No.1 and No.2.

機械加工された REBCO 線材の面内臨界電流密度分布と微細構造観察

J_c distribution and microstructure of REBCO coated conductor cut by mechanical cutting

酒井 秀哉 (福岡工大); 山田 穰 (中部大); ZHAO Yue, ZHU Jiamin (上海超電導); 井上 昌睦 (福岡工大)

SAKAI Shuya (Fukuoka Inst. Tech.); YAMADA Yukata (Chubu Univ.); ZHAO Yue,
ZHU Jiamin (Shanghai Superconductor Technology); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
E-mail: mem21108@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

近年、交流損失の低減や導体の可とう性確保に向けた $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO; RE=Sm, Gd, Y) 線材の細線化が進められている。細線化した線材では幅広の線材に比べ局所的な欠陥の影響が相対的に大きくなり、所望の臨界電流密度 (J_c) が得られない可能性がある。前回の発表では、機械的切断により 1 mm 幅に加工された REBCO 線材の面内 J_c 分布、磁場中 J_c 特性について報告した [1]。本研究では、前回に引き続き、1 mm 幅線材に対して面内 J_c 分布測定及び組織観察を実施するとともに、同一のプロセスで作製された 2 mm, 4 mm 幅線材とも比較した。

2. 実験方法

本研究で使用した試料は、パルスレーザー蒸着法で作製された REBCO 線材で、機械的切断により幅 1, 2, 4 mm に加工されたものである。この線材を 25 mm 長に切り出した後、走査型ホール素子磁気顕微鏡 (Scanning Hall-Probe Microscopy, SHPM) を用いて捕捉磁場分布を測定し、ビオ・サバールの逆問題を解くことで面内 J_c 分布を求めた。その後、安定化層をエッチングし、組織観察と組成分析をエネルギー分散型 X 線分光器搭載走査電子顕微鏡 (SEM-EDS) を用いて行った。

3. 結果と考察

SHPM による捕捉磁場分布、面内 J_c 分布を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a) の捕捉磁場分布を見ると $y=7, 22$ mm 付近では分布の幅が狭くなっていることが分かる。また、Fig. 1 (b) の面内 J_c 分布にて最も低い J_c ($x=3.7$ mm, $y=7$ mm) は、最大の J_c ($x=3.6$ mm, $y=3$ mm) に比べて 17%ほど低下していることが分かった。

次に、SEM-EDS による SEM 像と EDS 像を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) が Fig. 1 の線材長手方向の $y=22$ mm 付近、Fig. 2 (b) が $y=7$ mm 付近に対応している。Fig. 2 (a) について見ると線材幅方向端部において超電導相の剥離のようなものが確認された。組成解析から、これら領域では中間層や基板を構成している Ce や Ni が観察されたことから超電導相の剥離であることが明らかとなった。剥離の大きさは、SEM 像左端では数十 μm 程度であるのに対して、右端では最大で 200 μm 程度であった。Fig. 2 (b) では、線材幅方向端部の剥離は両端とも数 μm であるのに対して線材内部では数十 μm の空隙が観察された。これらは面内 J_c 分布にて J_c が低く観察された領域と対応していることから J_c 低下の原因は超電導相の剥離領域であることが考えられる。また、線材幅方向に生じている剥離は大きさが数 μm ～数十 μm 程度で長手方向全体にわたり断続的に生じていた。この剥離は機械加工時に線材幅方向端部にクラックが形成され、エッチングを行った際に超電導相が流出し形成されたものと考えられる。

同一のプロセスで作製された 2 mm, 4 mm 幅線材に対しても組織観察を行ったところ、両線材ともに線材幅方向端部にクラックや剥離が観察された。これらの詳細については当日報告する。

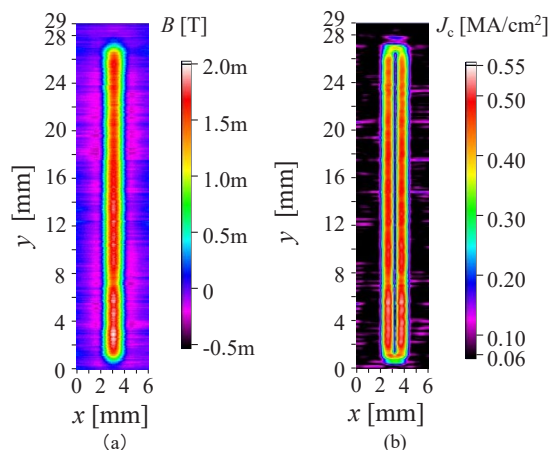


Fig. 1 (a) Magnetic field distribution and (b) J_c distribution of 1 mm-width REBCO coated conductor.

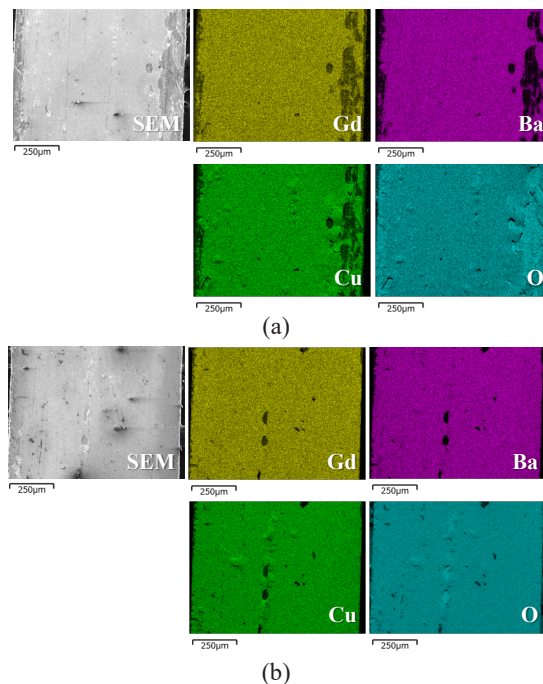


Fig. 2 SEM images and EDS mappings of Gd, Ba, Cu, and O around at (a) $y=22$ mm and (b) $y=7$ mm in Fig. 1.

謝辞

本研究成果の一部は、JSPS 科研費 JP22H02021, ならびに JST-ALCA の支援により得られたものである。

参考文献

1. S. Sakai, *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 102 (2021) p. 2

REBCO 線材の高電界下における電流輸送特性評価(3)

Current transport characteristics of REBCO coated conductors in high electric fields (3)

田中 祥貴(福岡工大); 岩熊 成卓(九大); 井上 昌睦(福岡工大)

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

E-mail: mem21109@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

希土類系超伝導 (REBCO) 線材を用いた超伝導回転機や限流器などの電力機器の詳細な設計には高電界下における電流-電界(I - E)特性も重要となる。しかし、一般的な通電法では通電時の発熱の影響で線材が焼損することがあり、電界基準程度の電圧状態までしか計測されていない。そこで我々は、高電界下における電流輸送特性の評価に取り組んでいる。前回までの報告[1]では電圧発生時に電流をシャントさせるための銅板を REBCO 線材表面に接合し、クエンチを回避させる手法について報告してきた。今回、銅板の厚みを変えた REBCO 線材の通電測定を実施するとともに、印加電流のパルス幅を変更した測定を実施した。

2. 実験方法

幅 2 mm で銅コーティングされた REBCO 線材の表面に、厚さ 100、300、500、1000 μm の銅板をはんだ接合してパルス通電法による電流電圧(I - V)測定を実施した。電流端子間距離は 30 mm、電圧端子間距離は 2~3 mm とした。その概要図を Fig. 1 に示す。

3. 結果と考察

Fig. 2 に銅板未接合 REBCO 線材の I - E 特性を、Fig. 3 に銅板を接合した REBCO 線材の I - E 特性を示す。REBCO 線材のみの測定では 107 A 印加時に 10^{-2} V/m の電界付近で焼損した。一方、銅板を接合した REBCO 線材では 200 A を通電しても焼損しなかった。銅板を接合した REBCO 線材の I - E 特性 (□、◇、▽、△) を見ると、銅板の I - E 特性へと収束する様子が確認できる。測定できる電界の上限は銅板の厚さで決まり、厚さ 100 μm の銅板を接合した I - E 特性では、電界基準より 3 桁以上高い電界範囲にわたってクエンチすることなく測定結果を得ることができた。また、Fig. 3 において低電流印加時から線形に電界が上昇する様子が観察された。これは、銅板と REBCO 線材との界面を流れる電流によるものだと考えられる。REBCO 線材の特性を評価するためには、得られた I - E 特性より REBCO 線材のみの I - E 特性を抽出する必要がある。抽出を行う解析手法については検討中である。

クエンチを生じさせない方法としてはパルス測定におけるパルス幅を短くする手法もある。そこで、上記の実験で用いたパルス幅 2.0 s を、数百 ms 程度へと短縮した通電測定についても実施している。当日は、その結果も含めて発表する予定である。

謝辞

本研究の成果は、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、JST-ALCA、並びに JSPS 科研費 JP22H02021 の結果得られたものである。

参考文献

1. Y. Tanaka, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 102 (2021) p. 1

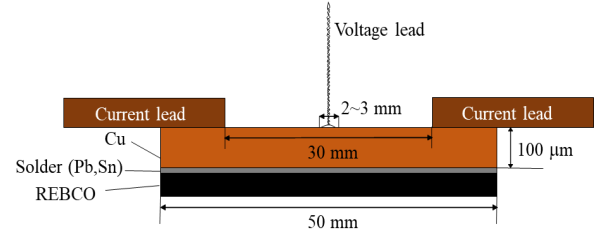


Fig. 1 Schematic of measurement sample.

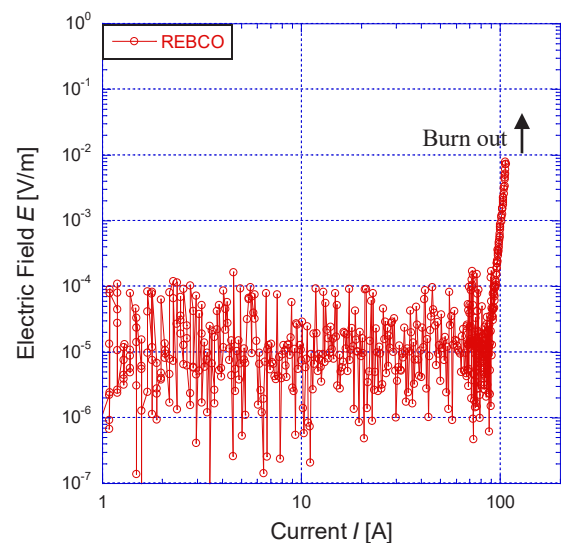


Fig. 2 I - E characteristic of a REBCO tape at 77K, self-field.

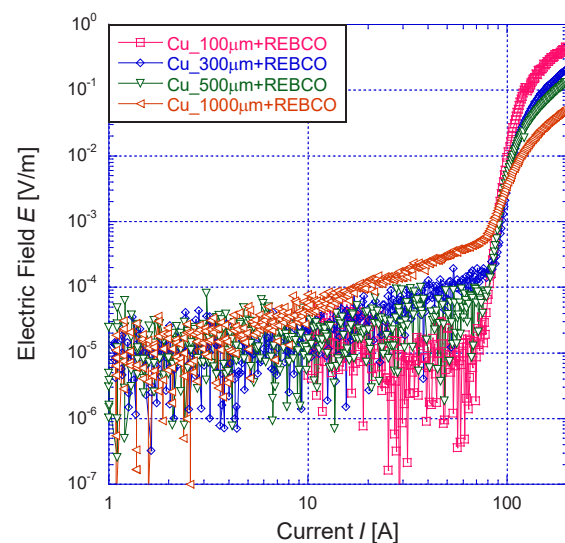


Fig. 3 I - E characteristics of copper plate soldered REBCO tapes at 77K, self-field.

銅安定化材を半田接合した REBCO 線材の電流輸送特性の有限要素解析 Finite element simulation for evaluation of current transport characteristics of REBCO wires

高橋 正希, 田中 祥貴(福岡工大); 岩熊 成卓(九大); 井上 昌睦(福岡工大)
TAKAHASHI Masaki, TANAKA Yoshiki (Fukuoka Inst. Tech.);
IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
E-mail: mem22104@bene.fit.ac.jp

1. 緒言

高温超電導線材を用いた機器の設計では、高電界下における電流輸送特性が必要な場合がある。しかし、一般的には電界基準程度の電圧状態までしか測定が行われていない。そこで我々は、高電界下を含めた電流輸送特性の測定に取り組んでいる。これまで、銅板を超電導線材にはんだ付けすることにより高電界領域での電流分流を促し、クエンチすることなく電流電圧特性を測定している。しかし、超電導線材のみにおける電流電圧特性の抽出方法は確立されていない。そこで本研究では、当該実験時の線材の電流輸送特性を解析的に求めるための手法を検討している。具体的には、電気回路として解く方法と有限要素法による電磁場解析に取り組んでいる。今回は、これらの結果について報告する。

2. 解析方法

幅 2 mm × 長さ 50 mm × 厚み 1 μm の REBCO 線材に厚み 1000 μm の銅板をはんだ付けし、通電測定を行う際の概要図を Fig. 1 に示す。電流端子から流入した電流は、はんだ接合部を介して銅板から超電導層へと流れ込み、反対側の電流端子から流出する。また、電圧端子は銅板上に取り付けられている。このときの等価回路として Fig. 2 のような回路を考えた。ここで、 R_{Cu} は銅の抵抗成分を、 R_i は接合部の抵抗を、 $R_{REBCO}(I)$ は、REBCO 線材の抵抗成分を表している。 $R_{REBCO}(I)$ は、非線形な電流依存を有するため、各部に流れる電流を求めるには、非線形連立方程式を解く必要がある。そこで、MATLAB により解析的に求めた。この等価回路に 4 A から 200 A を通電したときの I - E 特性を算出した。なお、超電導の電流電界(I - E)特性には n 値モデルを想定しており、 n 値及び臨界電流には、それぞれ実験により得られた 36 と 94.5 A を用いた。

3. 結果と考察

Fig. 3 に 1000 μm の銅板を接合した REBCO 線材の I - E 特性の実験値を示す。低電界側では臨界電流に至る前に線形の抵抗が観察され、高電界側では銅板へ分流の様子が確認できる。一方、等価回路から解析的に求めた I - E 特性 (Fig. 4) を見てみると、上述の実験結果の特徴を良く再現していることが分かる。今後は、これらの結果を参考に銅板を接合して得られた I - E 特性から線材そのものの I - E 特性を算出する手法を検討する。

また、有限要素法を用いた I - E 特性の解析についても実施しているので、その結果も当日発表する予定である。

謝辞

本研究の成果は、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、JST-ALCA、並びに JSPS 科研費 JP22H01928 の結果得られたものである。

参考文献

1. Y. Tanaka, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, vol.102 (2021) p.1

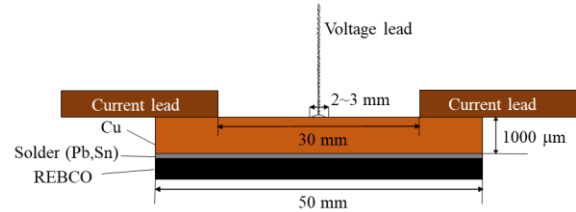


Fig. 1 Schematic of measurement sample

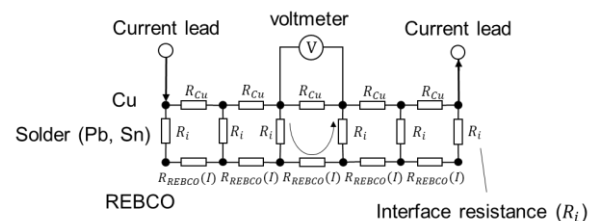


Fig. 2 Equivalent circuit of I - E measurement

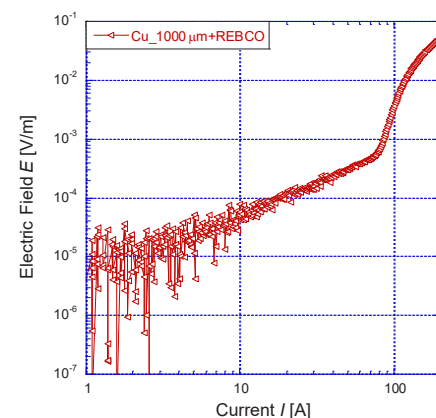


Fig. 3 Measured I - E characteristics

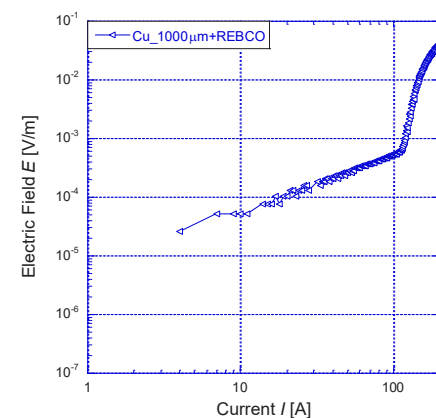


Fig. 4 Calculated I - E characteristics

径方向分割型解析手法を用いた 遮蔽電流磁場解析プログラムの妥当性の評価

Adequacy evaluation of screening current-induced magnetic field analysis which uses radial division analysis

太田 海斗, 小久保 早希, 石山 敦士(早稲田大学); 植田 浩史(岡山大学); 野口 聡(北海道大学)

OTA Kaito, KOKUBO Saki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

UEDA Hiroshi (Okayama University); NOGUCHI Sou(Hokkaido University)

E-mail: yadokari75@akane.waseda.jp

1. はじめに

我々は無絶縁(NI)コイルの医療用加速器等への応用を目指している。NIコイルの課題の一つとして、電流が径方向にも流れてしまい励磁遅れが発生するという点が挙げられる。先行研究において[1]、この励磁遅れを考慮しつつ遮蔽電流磁場解析を可能とする計算機プログラムを開発したが、実規模システムの解析には長時間を要してしまう。そこで前回[2]、電気回路に基づく遮蔽電流磁場簡易計算法(径方向分割型解析手法[3])の適用可能性について報告した。今回は、この遮蔽電流簡易計算法の妥当性の確認を目的として、絶縁REBCO マルチコイルを対象として、3次元非線形過渡電磁場解析に基づく手法と比較したので報告する。

2. 解析対象と解析手法

解析対象は、先に試作実験した 10T 級絶縁 REBCO マルチコイル(絶縁シングルパンケーキコイル 22 個積層)である[4]。その概略図を Fig.1 に示す。また通電電流は Fig.2 に示したように、0[A]から 89[A]へ 0.075[A/s]で励磁し、3600[s]ホールド後、0[A]まで 0.075[A/s]で減磁するとした[4]。今回評価した径方向分割型解析手法では、一つのパンケーキコイルを径方向に分割し、等価回路(Fig.3)を当てはめ、その各要素に遮蔽電流に関する二次回路を適用する[5]。これにより各要素で以下の(1),(2)式が成り立ち、これらを全要素について連立して解くことで周方向電流及び遮蔽電流が導かれる。

$$\sum_{j=1}^m M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \sum_{j=1}^m M_{sci,\theta j} \frac{dI_{scj}}{dt} + \frac{R_{rei}R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti}(I_t - I_{\theta i}) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m M_{sci,\theta j} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \sum_{j=1}^m M_{sci,scj} \frac{dI_{scj}}{dt} + R_{sci}I_{sci} = 0 \quad (2)$$

簡易計算法の評価のため、層間抵抗を大きく設定し絶縁コイルと見なし解析を行った。比較する解析には先行研究で妥当性が確認された[4]有限要素法と高速多重極法を利用した3次元非線形過渡電磁場解析プログラム[6]を用いた。

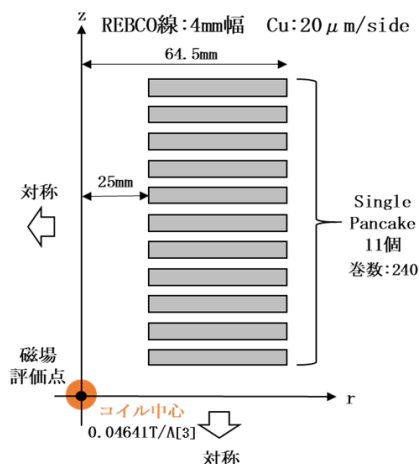


Fig.1. Schematic of model REBCO multiple coil

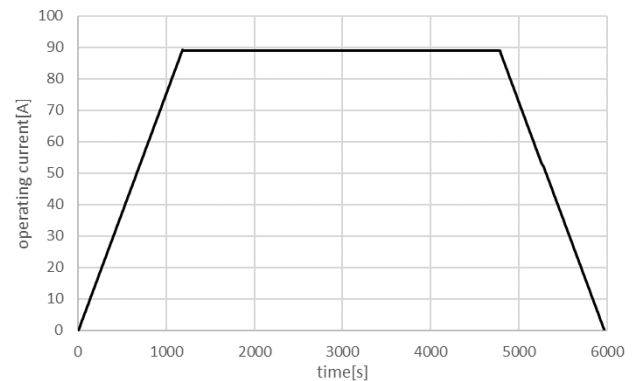


Fig.2. Waveform diagram of operating current

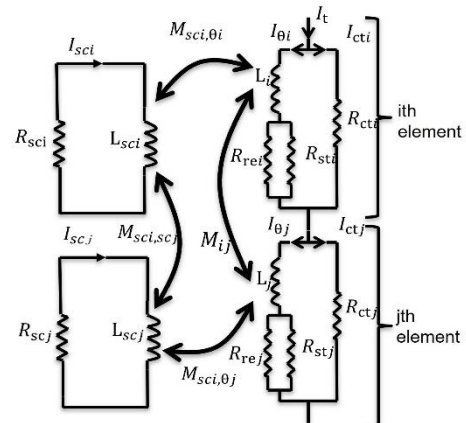


Fig.3. Equivalent circuit used in radical division analysis

3. 解析結果

詳細は当日報告する。

本研究は、科研費(基盤 S:18H05244)によった。

参考文献

1. S.Ueda, et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.32, No.5, 2021, 4601405
2. 小久保早希, 村上将吾, 石山敦士, 植田浩史, 野口聡, 2021 年度秋低温工学・超電導学会, 2A-a04
3. 野口聡, 植田浩史, 石山敦士, 低温工学, Vol.54, No.2, 2019, pp.103-110
4. H.Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No.4, 2016, 4701205
5. 野口聡, HAHN Seungyong, 岩佐幸和, 2017 年度秋低温工学・超電導学会概要集, p20, 1B-a01, 2017
6. H.Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.23, No.3, 2013, 4100805

無絶縁積層 REBCO コイルにおける遮蔽電流磁場低減のための通電波形

Exciting current waveform for reducing screening current-induced magnetic field in multi-stacked no-insulation REBCO coil systems

内山 誠士郎, 小久保 早希, 糸日谷 浩平, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡山大); 野口 聡(北大)

Seishiro Uchiyama, Saki Kokubo, Kohei Itohiya, Atsushi Ishiyama (Waseda Univ.);

Hiroshi Ueda(Okayama Univ.); So Noguchi (Hokkaido Univ.)

E-mail : sei.shieru@ruri.waseda.jp

1. はじめに

我々は、医療用加速器[1]や高磁場 MRI[2]の実現に向け、無絶縁(NI)REBCO 超電導コイルの開発を目指した研究を行っている。これらの実応用では、空間的・時間的に高い磁場精度と安定度が求められる。しかし、REBCO 線材はテープ形状のため、変動磁場に伴って誘導される遮蔽電流により不規則な磁場が引き起こされ、磁場精度・時間安定度が悪化する。さらに NI コイルでは層間が絶縁されていないため、径方向にも電流が流れ、励磁遅れが発生する。これらの現象への対策として、先行研究において、「オーバーシュート法」や「プラトーゾーン」等の通電電流波形の効果を評価した[3]。

今回は、まず試作実験した NI-REBCO コイルシステムの電磁的挙動を、開発した数値解析プログラム[3]を用いて再現し、実験結果との比較により、解析プログラムの妥当性・有効性を評価した。その結果を踏まえて、先行研究で検討した上記の通電波形の効果を再検証する。その上で、負荷率及びプラトーゾーン時間による磁場への影響を調査した。その際に、線材内の電流密度分布の可視化を行い、物理的な挙動を把握することで、適切なプラトーゾーン保持時間を検討した。

2. 解析方法

対象とする小型試作コイルの概略図(ダブルパンケーキ×4)を Fig.1 に示す。電磁場解析は以下の(1)式で示す支配方程式[4]に基づくとし、これに励磁遅れを考慮できるようにした[3]。すなわち、Fig.1 に示される解析対象のコイルシステムの等価回路から導かれる(2)式の回路方程式を解き、周方向電流を算出して、その電流による磁場変化を(1)式の右辺に入力した。

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS' = -\frac{\partial B_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} (I_{op} - I_{\theta j}) \quad (2)$$

3. 解析結果

評価実験においてコイル中心にある評価点の磁束密度を計測し、実験結果と解析結果を比較した。通電条件は運転電流を 30A とし、通電波形として、通常励磁のほか、オーバーシュート波形に長さの異なるプラトーゾーンを組み合わせた複数パターンについて検討した。ここでは例として、プラトーゾーン 100 秒の結果を Fig.2 に示す。両者の間には定性的な挙動の一致が確認できる一方で、定量的な誤差がある。その要因としては、ホール素子による測定誤差(位置と角度)、解析に用い

たコイルの層間接触抵抗の誤差の影響が考えられる。また、同結果の比較を通して先行研究で提案された通電電流波形の効果を再検証した。その詳細は当日報告する。

なお本研究の一部は科研費(基盤 S: 18H05244)によった。

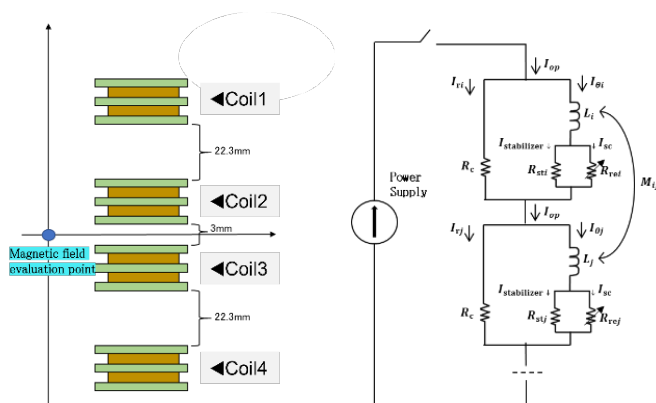


Fig. 1. (a) NI model coil. (b)Equivalent circuit for analysis

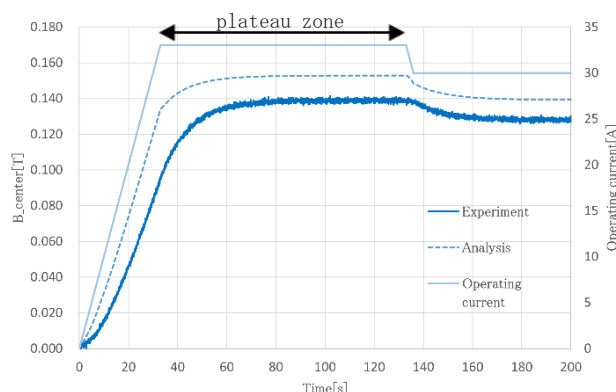


Fig. 2. Comparison of analytical and experimental results in overshoot method with plateau zone of 100s duration

参考文献

1. H.Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.29 (2019) 4101105
2. H.Miyazaki, et al., Supercond. Sci. Technol. Vol.29 (2016) 104001
3. S.Ueda et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.31(2021) 4601405
4. H.Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.23 (2013) 4100805

層間接触不良領域を有する REBCO パンケーキコイルの熱的安定性

Evaluation on Thermal Stability of No-Insulation REBCO Pancake Coils with turn-to-turn electrically non-contact area

天野 一樹, 長渕 大河, 結城 拓真, 濱田 一希, 石山 敦士(早大); 野口 聡(北大); 植田 浩史(岡山大)
 AMANO Kazuki, NAGAFUCHI Taiga, YUUKI Takuma, HAMADA Kazuki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda univ.);
 NOGUCHI So (Hokkaido univ.); UEDA Hiroshi (Okayama univ.)
 E-mail: k_amano@akane.waseda.jp

1. はじめに

我々は高磁場 MRI や医療用加速器への応用を目指し、無絶縁(NI)コイルの研究を行っている。NI コイルでは、局所的劣化発生時に電流が劣化部を避けるように健全層に転流するため、継続運転できる可能性がある[1]。しかし、実際のコイル巻線では線材の表面が様でなく、線材間に接触不良部分が生じる可能性があり、大口径コイルの場合は発生する可能性がより高まる。また、大口径コイルを巻線する場合は複数の線材を接続する必要がある。従って、接触不良領域に接続部分があるような場合、層間の転流が起きないことから NI コイルの特長を生かせない可能性がある。また、線材の銅安定化層厚の削減をすることで高電流密度化を図ることが可能であり、それによってコストを下げることも可能になる。しかし、接触不良を有する NI コイルに適用した場合の熱的安定性は明らかになっていない。そこで今回は接触不良領域を有する REBCO パンケーキコイルにおいて、銅安定化層厚を小さくした場合と、線材接続部があるときの熱的・電磁的挙動について、数値解析に基づく評価を行い、継続運転の可能性を検証したので報告する。

2. 解析方法

解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。解析は PEEC モデルによる電流分布解析と FEM による熱解析を連成して行った[2]。解析(1)では局所的劣化がコイル巻線中央層に発生し、その層の両側隣接層に接触不良領域が集中的に存在する場合を想定した。そして接触不良領域の長さを 4/8 周～6/8 周と変化させた時の挙動について解析した。

解析(2)では 3 本の超電導線を 2 か所、200 mm ラップ接続して製作したコイルを想定した。そして全長の 1/3, 2/3 の位置に接続抵抗を仮定した。加えて、接続部分がある層の内側 1 周と両側 1 周に接触不良領域が存在するとし、それぞれの挙動を解析した。また、どちらの解析においても、想定した REBCO 線材の銅安定化層厚を NI コイルの特長を活かし 2 μ m/side とした場合についても、解析・評価を行った。

3. 解析結果

解析(1)について例として銅安定化層厚 2 μ m/side, 接触不良領域が 5/8 周の時の NI コイルの各発熱量を Fig.1 に示す。通電開始から 2.9 秒後に転流する電流が集中したため熱暴走していることがわかる。また、接触不良領域が 4/8 周の時には熱暴走を起こさなかったため、銅安定化層厚 2 μ m/side の場合、劣化周辺の接触不良が半周以下であれば継続運転の可能性があることがわかった。

解析(2)については例として最も厳しい条件である、銅安定化層厚 2 μ m/side、接続部の両側 1 周に接触不良領域が存在するときの NI コイルの各発熱量を Fig.2 に示す。接続部に電流が流れることから、超電導層での発熱が支配的であった。しかしその発熱は僅かなものであり、熱暴走はしないことがわかった。従って、NI コイル内の接続部周辺に接触不良領域が存在しても、高電流密度化を実現させながら継続運転の可能性が期待できることがわかった。

本研究は、科研費(基盤S:18H05244)によった。

Table.1 Specification of NI-REBCO pancake model coil

REBCO Tape	Overall width [mm]	4.0
	Copper stabilizer thickness [μ m/side]	2, 20
	I_c @77K, self-field[A]	115
Coil	Inner diameter [m]	1.0
	Turn-to-turn contact resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]	2.0×10^{-3}
	Resistance of connection parts [$\mu\Omega$]	*0.0121
	Turns	60
	lop[A]	400
	lop/Ic[%]	70
	External magnetic field [T]	10
	Cooling condition	30K-Adiabatic

*Experimental value

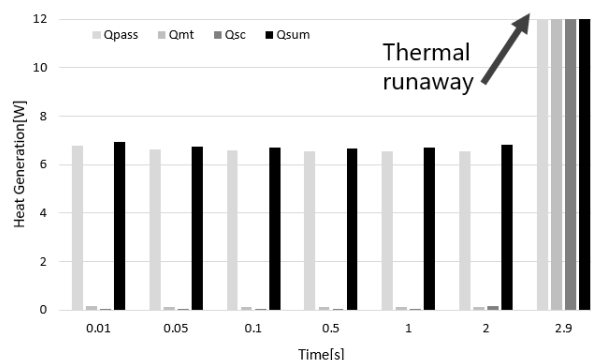


Fig.1 Heat Generation of NI Coil (Copper stabilizer thickness: 2 μ m/side, turn-to-turn electrically non-contact area: 5/8 lap)

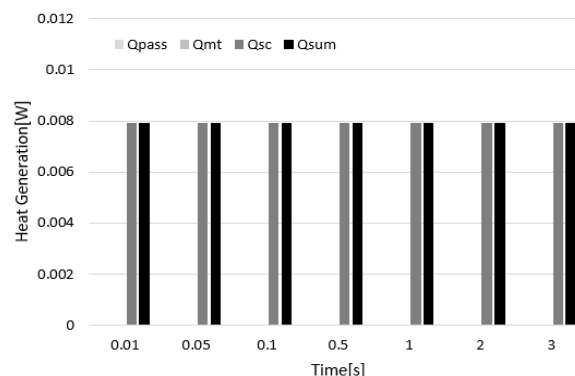


Fig.2 Heat Generation of NI Coil (with turn-to-turn electrically non-contact area over one lap inside of joint)

参考文献

- Y.Yoshihara et al., IEEE Trans. on Appl., Supercond., 30, 4 (2020) 4602005
- T.Wang et al., IEEE Trans. Applied Supercond. 25, 3 (2015) 7010920

劣化のある無絶縁 REBCO コイルの健全性の監視法に関する基礎的検討

Fundamental investigation of monitoring method for detecting the state of health of no-insulation REBCO coils with defects

寺内 和, 結城 拓真, 長瀬 大河, 濱田 一希, 石山 敦士(早稲田大学), 野口 聡(北海道大学), 植田 浩史(岡山大学)

TERAUCHI Nodoka, YUKI Takuma, NAGAFUCHI Taiga, HAMADA Kazuki, ISHIYAMA Atushi(Waseda Univ.);

NOGUCHI So(Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi(Okayama Univ.)

E-mail:non_w70@akane.waseda.jp

1. はじめに

高磁場 MRI や次世代医療用加速器をターゲットとした高温超電導コイルシステムの開発に取り組んでいる。二律背反の関係にある高熱的安定化と高電流密度化を両立する手段として、電気絶縁を施していない REBCO 超電導線を巻線した無絶縁コイル(NI コイル)に着目した。熱的安定性の高い NI コイルでは、局所劣化が発生した場合においても継続して運転できる可能性が示されている[1][2]。しかし一方で実運転を想定すると、新たな局所劣化の発生や劣化領域の拡大などに対する監視法に関しても十分な検討を行う必要がある。今回は、励磁と減磁の繰り返しなどにより運転中に新たに発生・拡大した劣化・欠陥の影響がコイル両端電圧にどのように現れるかについて数値解析に基づき評価したので報告する。

2. 解析方法

今回の解析の対象としたコイルの諸元を Table.1 に示す。高磁場全身用 MRI や医療用加速器への応用を想定し、内径 500mm、50 ターンのシングルパンケーキコイルを例として、10T の外部磁場を与えた。また冷凍機による伝導冷却を想定した。解析は PEEC モデルによる電流分布解析と2次元有限要素法による熱解析の連成モデルを用いた[1][2]。

劣化のパターンは Fig.1 に示すように設定した。本解析ではコイルの一部の臨界電流値 I_c を変化させることでコイル内の劣化を模擬する。90%劣化はコイルの I_c 値を通常の 0.1 倍に、100%劣化は I_c 値を通常の 0 倍、つまり 0A とするものである。それぞれコイルの 21 層と 31 層目の要素に設定した。

表 1 無絶縁 REBCO コイルの諸元
Table 1 Specification of NI - REBCO coil

Parameters	Assumed Values
REBCO conductor	
Overall width [mm]	4.0
Copper stabilizer thickness [$\mu\text{m}/\text{side}$]	20
Tape I_c @77K, self-field [A]	115
Coil	
Turns per pancake	50
Inner diameter [mm]	500
Height [mm]	10

3. 解析結果

Fig.1 の①②のように 90%、100%の劣化が個別に存在する場合における両端電圧の時間変化を表したグラフを Fig.2 に示す。90%劣化を破線、100%劣化を一点鎖線で示している。波形を比較すると両者に励磁開始数秒で Ldi/dt による電圧の立ち上がりがあるが、その後の挙動に違いがある。100%劣化の場合、抵抗電圧 Ri (図中矢印)は徐々に増加し、90%劣化の場合、ある時刻になると抵抗電圧(図中丸印)が出現していることがわかる。

Fig.3 は以下に示す 2 つの場合の電圧変化を示している。

- 1) 最初は 90%の劣化しかないが、新たに 100%の劣化が起こり、新しい抵抗電圧(図中矢印)が生じる。

- 2) 最初は 100%の劣化しかないが、新たに 90%の劣化が起こり、電圧(図中丸印)が発生する。

ここでは例として新たな劣化が発生した場合の両端電圧の挙動について検討した。劣化の拡大が生じた場合についても同様にコイル内の劣化と両端電圧の関係について検討を行った。劣化の出現や拡大によって両端電圧の挙動に違いが出ることから、コイルの両端電圧を監視(常に測定)し、その変化とコイル内の劣化の間に関係を見つけていくことができれば、未だ確立されていないコイルの健全性の監視技術の1つとして応用できる可能性があることがわかった。

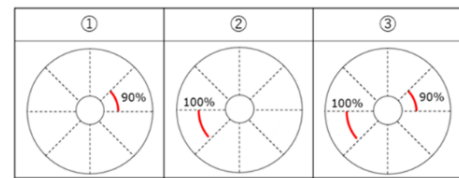


図 1 想定した劣化のパターン
Fig.1 Assumed patterns of defects

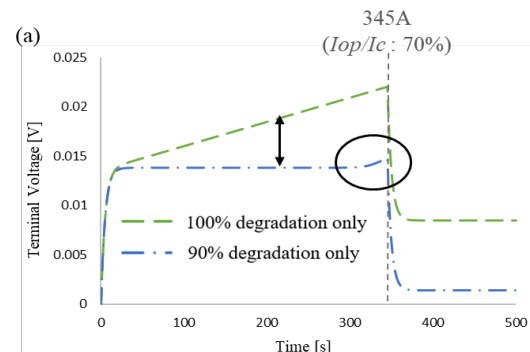


図 2 90%、100%の劣化が個別に存在する場合の両端電圧
Fig.2 Terminal voltage in cases that only 100% and 90% degradation exists individually

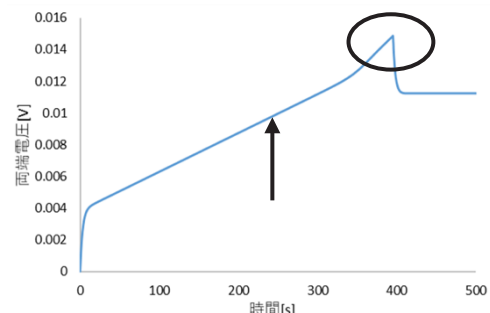


図 3 パターン③における両端電圧
Fig.3 Terminal voltage of pattern③

本研究は、科研費(基盤 S:18H05244)によった。

参考文献

1. H.Onoshita et al, IEEE Trans. on Applied Supercond., 30, 4, 2020,4702605
2. Y.Yoshihara et al., IEEE Trans. on Applied Supercond., 31, 5, 2021,4602005

Multi-Stacked 無絶縁 REBCO パンケーキコイルシステム における局所的劣化発生時の継続運転の可能性

Possibility of continuous operation of Multi-Stacked No-Insulation REBCO Pancake Coil System with a local defect

中村 太郎, 長渕 大河, 結城 拓真, 濱田 一希, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大);植田 浩史(岡山大)
NAKAMURA Taro, NAGAFUCHI Taiga, YUKI Takuma, HAMADA Kazuki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido univ.), UEDA Hiroshi (Okayama univ.)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1.はじめに

超電導コイルの開発において二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定性を同時に実現する無絶縁(NI)コイルが注目されている。本研究では、高磁場 MRI や医療用加速器への応用を想定して、NI-REBCO ダブルパンケーキ(DP)コイルを積層したコイルシステムについて、コイルの一つに局所的劣化が発生した場合における電磁的・熱的挙動の解析・評価を行った。その際、運転温度とコイルの口径をパラメータとして、劣化発生時における継続運転の可否を比較・検討したので報告する。また、従来の PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)モデル[1]をベースに、より簡易化したモデルを適応した解析プログラムを開発したので、その妥当性についても併せて報告する。

2.解析方法

50 ターンの NI-DP コイルを2段積層したコイルシステムについて、上段コイルの25ターン目に 1/8 周にわたって局所的線材劣化($I_c=0$)が発生した場合を解析対象とした。今回、パラメータとした運転温度とコイル口径の組み合わせとして、(1)運転温度: 4.2K, コイル口径 60mm、(2)30K, 60mm、(3)30K, 1000mm の3つを設定した。さらに、断熱、外部磁場 10T(上記の応用を想定)とした条件下で、負荷率 70%の一定電流通電状態で劣化が発生したときの挙動について、PEEC モデルを用いた電流分布解析と二次元有限要素法を用いた熱解析の連成モデルにより解析を行った[1]。また、計算時間の低減を目的として開発した PEEC モデルと簡易等価回路を組み合わせた Mixture モデル(Fig.1)についても同様の解析を行った。

3.解析結果

Fig.2、Fig.3 に(1)4.2K, 60mm、(2)30K, 60mm の条件におけるコイル両端電圧と中心磁場の PEEC モデルによる解析結果を示す。(1)では劣化の発生したコイルの電圧が上昇し、他のコイルでも順に電圧が立ち上がっている。また、この電圧変化に伴うように中心磁場が減衰していく様子が確認できる[2]。一方で、(2)では両端電圧の変化が極めて小さく、中心磁場もほぼ一定であることが分かる。これより、4.2K, 60mm では熱暴走するのに対して、30K, 60mm では熱暴走しないと考えられる。この要因としては、運転温度が30Kであるためにコイルの熱容量が大きくなったことが挙げられる。また、具体的な解析結果は省略するが、(3)30K, 1000mm の条件における解析では、(2)の場合と比べてさらに両端電圧の変化が小さくなる事が確認できた。コイルの口径を大きくすることによって、コイル内の発熱密度を小さくすることができるので、これがさらなる安定化につながると考えられる。

以上より、複数個積層したコイルシステムにおいて局所的劣化が発生すると、発生磁界が減衰し、磁氣的結合により他のコイルでも熱暴走する可能性があるが、高温運転や大口径コイルにおいては熱的安定性が高いために熱暴走を回避して継続運転できる可能性があることが分かった。また、Mixture モデルによる解析は、解析時間を大きく短縮しながら、熱暴走を起こさない条件の判断に利用できる可能性があることが示さ

れた。したがって、Mixture モデルを用いながら必要に応じて PEEC モデルを利用することで、より効率的に解析・評価を行うことが可能になると期待できる。

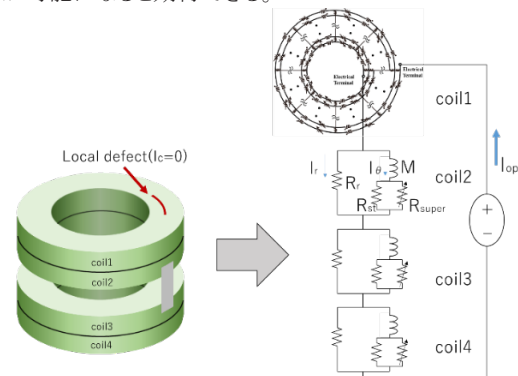


Fig.1 Equivalent circuit of Mixture model

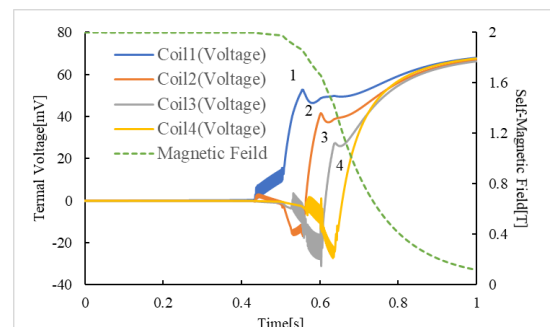


Fig.2 Terminal Voltage and Magnetic Field traces (4.2K, 60mm)

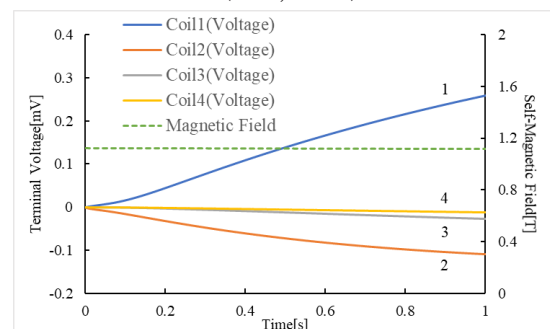


Fig.3 Terminal Voltage and Magnetic Field traces (30K, 60mm)

本研究は、科研費(基盤 S:18H05244)によった。

参考文献

1. T.Wang, et. al, IEEE, Trans. Appl. Supercond, Vol.25 (2015) 7010920
2. J.B.Song, et. al, Supercond. Sci. Technol., vol.28, no.11, (2015) 114001

液体水素浸漬冷却 HTS コイルの通電特性の解明に向けた スプリット型外部磁場コイルの製作と検証

REBCO Split-type External REBCO Field Coil for Excitation Tests of High Temperature Superconducting Coils Immersed in Liquid Hydrogen

山川 友瑚, 村田 将一朗, 生田 勝利, 大屋 正義(関西学院大); 今川信作, 岩本晃史(NIFS); 白井康之(京大)

YAMAKAWA Yugo, MURATA Shoichiro, IKUTA Shohri, OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.) ; IMAGAWA Shinsaku,
IWAMOTO Akifumi (NIFS) ; SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: ics53687@kwansei.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE:希土類) テープ線材を用いたコイルは、高い臨界電流密度特性から強磁場マグネットへの応用が期待されている。現在、液体水素浸漬冷却下における REBCO コイルの通電試験を計画しているが、臨界電流 (I_c) 値が非常に高いため、既存の設備を用いた通電試験が困難である。このため、スプリット型外部磁場コイルを用いて試験コイルに径方向の磁場を印加することで、既存設備の通電容量範囲内で I_c 値以上の通電試験を可能にする計画である。本講演では、外部磁場コイルを試作し、液体窒素中の予備通電試験により設計・製作に問題がないか検証した結果について報告する。

2. 外部磁場コイルの試作

Fig.1 に外部磁場コイルの構造を示す。内径 103 mm、外径 208 mm、巻数 220 ターンのシングルパンケーキ (SP) コイル 2 枚をステンレスケースに挿入し、計 4 組のダブルパンケーキ (DP) コイルを作製した。その後、DP コイルを 2 組ずつ上下に積層し、外部磁場コイルを構築した。SP コイル間はコイルの最内周部同士を編組線で接続し、DP コイル間はコイル端部を電極に固定した後に電極同士を編組線で接続した。ステンレスケースに挿入したのは、上下間に発生する軸方向の反発力に対して各 DP コイルを強固に固定するためである。

3. 外部磁場コイルの I - V 波形解析

Fig.1 の SP1 から SP4 を解析対象として、二次元円筒断面モデルの解析を実施した。各ターンの線材を幅方向に 20 分割した並列回路を想定し、17,600 点 (20 分割×220 ターン×4 コイル) の線電流に対する各点の磁束密度行列をビオ・サバールの法則により計算した。本行列を MATLAB の計算コードに組み込み、スイープ速度 0.1 A/sec で通電した際の線材内電流分布と各ターンの発生電圧を解析した。コードには、REBCO 線材の I_c - B - θ 特性を記述できるフィッティング式[1]を組み込み、 I_c @77 K, s.f.は 125 A, n 値は 20 を用いた。各 SP コイルの I - V 波形解析結果を Fig.2 に示す。36.6 A 通電時に SP4 に発生する電圧は 7.7 mV であり、最内周の電圧が最大で 53 μ V 発生する。最内周の周長は 53 cm であり、発生電圧は 1 μ V/cm に相当する。このため、36.6 A を外部磁場コイルの目標電流値と定めた。

4. 外部磁場コイルの液体窒素中通電試験

外部磁場コイルの液体窒素中通電試験結果を Fig.3 に示す。スイープ速度 0.1 A/sec で通電し、36.8 A で通電を終了した。想定どおり中央の DP2, 3 で電圧の立ち上がりが確認され、その電流値も解析結果とほぼ一致することから、コイルは健全であり、設計・試作に問題はないと判断した。

5. まとめ

スプリット型の REBCO 外部磁場コイルを試作し、液体窒素中で通電試験を実施した結果、実測結果と解析結果で電圧の立ち上がりがほぼ一致し、健全性が確認された。今後は液体水素冷却下で通電試験を実施予定である。

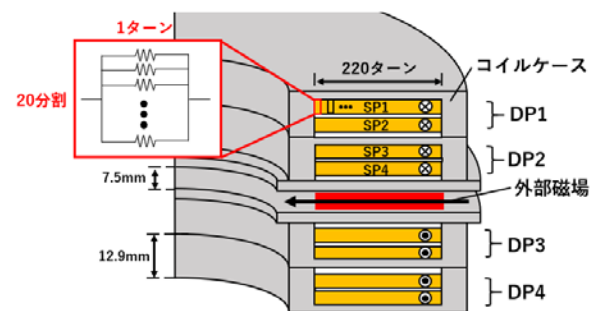


Fig.1 Structure and excitation method of split-type external REBCO field coil

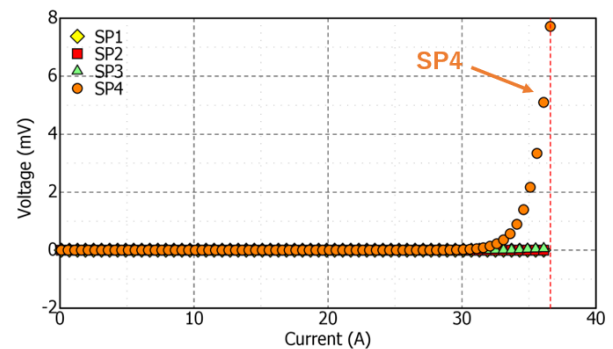


Fig.2 Simulated I - V characteristics of SP coils

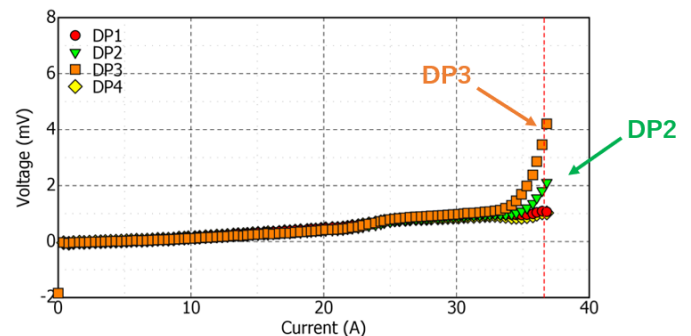


Fig.3 Measured I - V characteristics of DP coils in LN2

謝辞

本研究の一部は NIFS の LHD 共同研究として実施されたものである (NIFS20KOB032)。

参考文献

1. S. Muto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 98 (2019) 2P-p24

ピックアップコイル法による短尺直線状 HTS 線材の 交流損失測定システムの測定感度の改善

Improved measurement sensitivity of AC loss measurement system of
short and straight HTS tapes by a pick-up coil method

永山 悟志, 植田 航太, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

NAGAYAMA Satoshi, UEDA Kota, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k8482845@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導 (HTS) 線材の交流損失特性の高感度測定は、低損失 HTS 線材を開発する上で重要である。本研究では、ピックアップコイル法による交流横磁界印加時の短尺直線状 HTS 線材の交流損失測定システムの高感度化を図ることを目的としている。そのためにこれまで、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検討してきた^{1), 2)}。本発表では、キャンセル残り低減のために、外部磁界印加用マグネット内の磁場分布を考慮したピックアップコイルとキャンセルコイルの最適配置位置やコイルの適切な形状について検討した結果を報告する。

2. 交流損失の測定方法

本研究では交流損失測定法としてピックアップコイル法を採用している。交流損失の測定の際には、ピックアップコイルの信号電圧からサンプルの磁化の微小信号電圧のみを抽出するために、キャンセルコイルの信号電圧を使って余分な測定空間の信号を差し引く「キャンセル」を行う。Fig. 1 は外部磁界印加用マグネットの断面図である。このマグネットは中央のコイルとその両側の 3 対のコイルから成る。同図からわかるように、設計上はこのマグネット内でピックアップコイルとキャンセルコイルをマグネット中心に対して対称な位置に配置することができる。よって、2つの検出コイルの形状を極力近づけられるので、測定2次回路での位相誤差を小さくでき、キャンセル残りの低減を図れる。

Fig. 2 は実際のマグネットの作製後の形状寸法をもとに計算したマグネット内の磁場分布の計算結果である。この図から、実際に作製されたマグネット内においては、2つの検出コイルが配置される空間の磁場分布は完全には対称ではないことがわかる。そこで、実際のマグネット内の磁場分布を考慮したピックアップコイルとキャンセルコイルの最適配置位置やコイルの適切な形状について検討した。

3. 検出コイル対のマグネット内の最適配置位置の検討

マグネット内での検出コイル対の配置位置を変化させたときのキャンセル残りの変化について調べた。Fig. 2 に示す検出コイルの $\Delta z = 0$ の位置を基準とし、検出コイル対の間隔を 84.0 mm に保ったままで、マグネットの z 軸方向に ± 0.5 mm の範囲で移動させてキャンセル残りの測定を行った。

測定結果を Fig. 3 に示す。この結果より、 $\Delta z = +0.3$ mm の位置でキャンセル残りが最小となる結果が得られた。より正確な検出コイル対の最適配置位置の把握により、キャンセル残りのさらなる低減を図ることができる。そこで、現在、マイクロメータヘッドを利用して検出コイル対の位置を精度よく移動させられる治具の作製を進めている。

4. マグネット内磁場分布を考慮した検出コイルの最適形状

検出コイル対が配置される磁場の大きさが等しい場合、ピックアップコイルからの信号を確実にキャンセルするためにキャンセルコイルの断面積をわずかに大きくする。しかし、実際の磁場分布では、Fig. 2 に示すようにキャンセルコイルの位置での磁場が 0.3% 大きくなっている。よって、キャンセルコイル形状とピックアップコイルの形状をより同一に近づけられ、2つ

の検出コイル間の測定電圧の位相差を小さくすることができ、キャンセル残りの低減を図れることがわかった。詳細については当日報告する。

参考文献

- 1) Y. Haramoto et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p. 54.
- 2) R. Tomisaki, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p. 37.

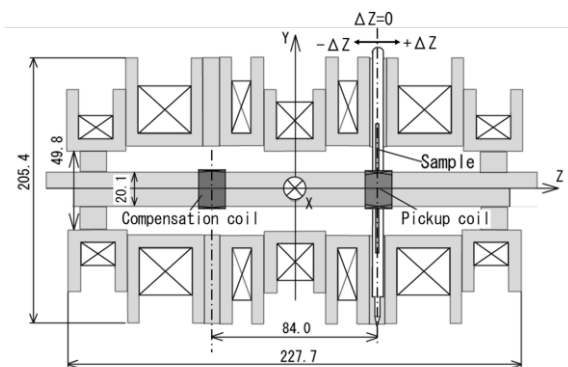


Fig. 1 Cross sectional view of magnet.

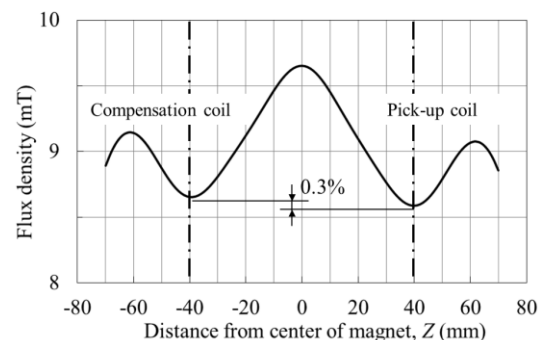


Fig. 2 Magnetic field distributions in the magnet.

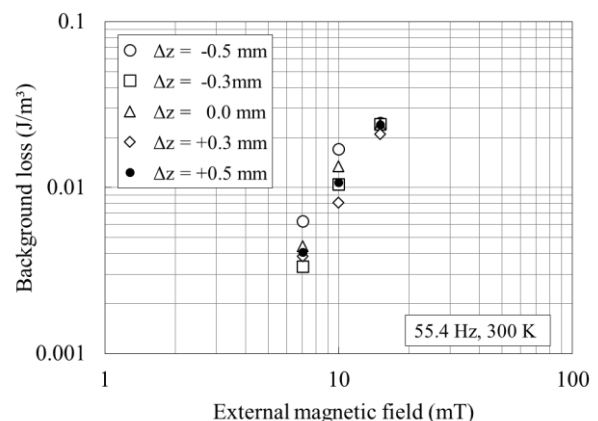


Fig.3 Variation of background loss characteristics by pick-up coils placement position.

パワーエレクトロニクス機器での使用を想定した条件下での HTS サンプルコイルの交流損失測定結果の検討

Study on measurement results of AC loss characteristics of HTS sample coil under the conditions assumed to be used in power electronics devices

野木 大祐, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

NOGI Daisuke, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k7749938@kadai.jp

1. はじめに

超伝導技術の適用領域拡大の観点から、パワーエレクトロニクス機器用の常伝導コイルを高温超伝導コイルに置き換えたときの特性の把握など、産業応用分野への超伝導技術の適用可能性について検討することは重要である。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¹⁾。本発表では、液体窒素蒸発法を用いて、指令電流に高調波成分を重畳させた電流波形を通電した際の HTS サンプルコイルの交流損失特性の測定結果ならびに高調波成分による交流損失増加の要因について検討した結果を報告する。

2. HTS サンプルコイルと交流損失測定条件

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。このテープ線材は、臨界電流 56 A (@77 K, s.f.)、幅 2.9 mm、厚み 0.36 mm である。コイルは 3 ターン 30 層のソレノイド形状で、内径 40 mm、外径 60.5 mm である。

HTS サンプルコイルの交流損失は、液体窒素蒸発法により測定した¹⁾。コイルへの通電は、非対称 H-Bridge インバータシステムで構成される回路で行った。Fig. 1 に通電電流波形の一例を示す。この図の電流波形は基本波振幅 $I_F = 20$ A、周波数 $f_F = 100$ Hz の台形波に、高調波振幅 $\Delta I = 1.72$ A、周波数 $f_h = 13$ kHz の三角波を重畳させたものである。本稿では指令電流として入力している台形波を基本波と定義した。高調波の振幅を 1.0~2.4 A、周波数を 5~21 kHz 変化させたときの交流損失を測定した。

3. 交流損失の測定結果と検討

Fig. 2 に交流損失の測定結果を示す。高調波電流を含む波形による測定結果は、三角のプロットの基本波のみでの結果に対し、条件によっては約 2~3 倍、増加していることがわかる。Fig. 3 は高調波重畳波形での交流損失から基本波での交流損失を差し引いた結果である。Fig. 3 (a) は交流損失増加分の高調波周波数依存性、Fig. 3 (b) は交流損失増加分の高調波電流振幅依存性を示す。これより、交流損失の増加分は高調波電流振幅の概ね 2 乗に、高調波周波数の概ね 1.5 乗に比例する結果となった。

この交流損失増加分の電流振幅及び周波数依存性の要因を調べるために、まず通電電流の周波数解析を行った。Fig. 4 に Fig. 1 で示した電流波形の周波数解析結果を示す。周波数解析結果をもとに、Bi-2223 線材の銀シースにおける渦電流損失を中空円筒の計算式で算出した²⁾。銅合金補強材の周波数ごとに計算した渦電流損失との合計を通電電流波形での渦電流損失とした。計算結果は、Fig. 3 に合わせて示した。測定値と計算値の傾きは同程度の結果が得られたが、特に周波数依存性においては大きさが一致しなかった。高調波成分によるヒステリシス損失の増加などを含め、さらに詳細な検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) W. Funakoshi, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) p. 111.
- 2) Q. F. Zhang, et al.: Cryogenics, vol. 25, pp. 129-138, 1985.

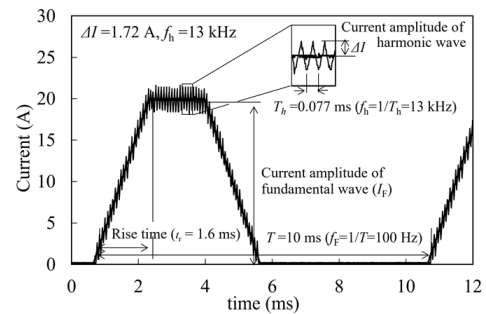


Fig. 1 Current waveform with superimposed harmonic currents.

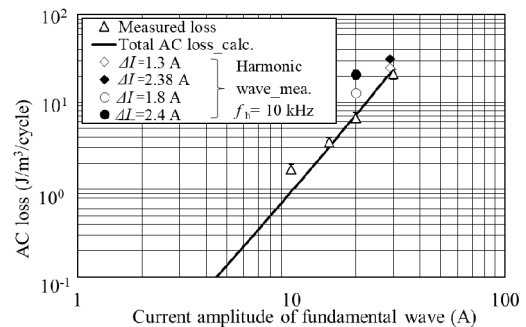


Fig. 2 Measured AC loss characteristics.

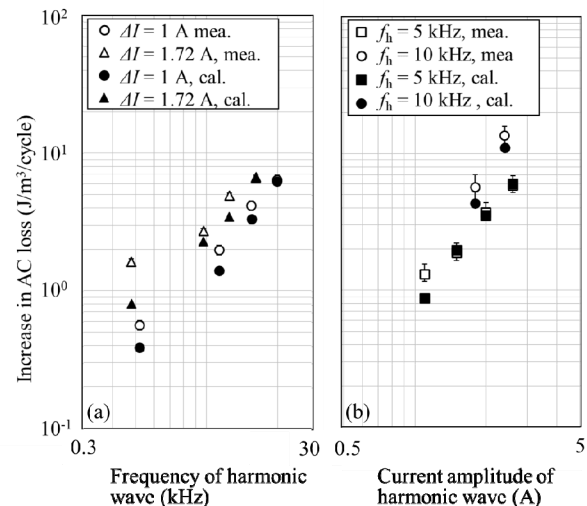


Fig. 3 Increase in AC loss due to harmonic components.

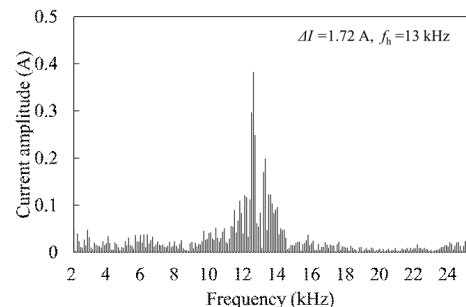


Fig. 4 Frequency analysis result of the applied current waveform shown in Fig. 1.

REBCO 超伝導ダイオードを用いた超短波交流信号の整流特性

Rectification characteristics of very high frequency signals using REBCO superconducting diodes

土屋 雄司 (東北大), 水野 彰人 (名大), 鶴田 彰宏 (産総研), 尾崎 壽紀 (関西学院大), 吉田 隆 (名大)
 TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.), MIZUNO Akihito (Nagoya Univ.), TSURUTA Akihiro (AIST), OZAKI Toshinori
 (Kwansei Gakuin Univ.), YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)
 E-mail: yuji.tsuchiya.c3@tohoku.ac.jp

1. はじめに

超伝導体において、電流の向きによって臨界電流 I_c が変化する性質を超伝導ダイオードと呼ぶ。この特性は、磁束量子に対する非対称なポテンシャルが超伝導体に存在する場合に発現する。例えば、高温超伝導体 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) 薄膜において、非対称形状の微細加工による非対称な磁束ポテンシャル[1]や、薄膜表面の平坦化および薄膜-基板界面での格子不整合ひずみによる非対称な表面バリア[2]によって実現されている。

我々はこれまで、超伝導ダイオードにおける整流特性を用いて、GHz 帯のマイクロ波を用いた長距離ワイヤレス送電や、kHz 帯の近距離ワイヤレス給電を用いた電流リードのない超伝導マグネットへの応用を提案してきた。しかし、上記のような超伝導ダイオードの実用化に向けて、交流信号に対する整流効果の確認が課題である。

そこで本研究では、格子不整合抑制のために成膜した非超伝導 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (PrBCO) バッファ層上に超伝導 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) 薄膜を成膜し、直流入力信号に対する臨界電流の非対称性を測定した。さらに交流入力信号に対する直流出力信号の評価装置を開発し、REBCO 超伝導ダイオードにおける超短波交流信号 (100 MHz 帯) に対する整流効果を測定した。

2. 実験方法

パルスレーザー蒸着を用いて IBAD-MgO 基板上に膜厚 50 nm の PrBCO バッファ層を成膜した後、膜厚 450 nm の YBCO 薄膜を作製した。その試料を、パルスレーザーを用いて幅 100 μm 、長さ 1 mm のブリッジ形状に加工した。試料を液体窒素 (77 K) にて冷却し、電磁石を用いて 0 から 0.4 T までの面内磁場を印加しながら直流四端子法により両方向の電流に対する電流-電圧特性を測定した。さらに、同試料において、伝導冷却 77 K において超伝導マグネットを用いて -5 T から 5 T の磁場中にて、信号発生源、パワーアンプ、用いて 80 MHz、10 W の信号を入力し、ローパスフィルターおよびナノボルトメータを用いて試料からの直流出力電圧を測定した

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に、PrBCO 薄膜上 YBCO 薄膜の面内磁場下における電流-電圧特性を示す。0.16 T において I_c は、磁束量子が YBCO/PrBCO 界面から侵入する方 (正の電流) が高かった。この結果は、薄膜-基板界面における表面バリアが薄膜表面と比較して大きいことを示している。また、反対向きの磁場を印加した場合には、非対称性は反対向きに変化した。

Fig.2 に、PrBCO 薄膜上 YBCO 薄膜の面内磁場下

における 80 MHz の交流入力信号に対する直流出力電圧を示す。低い I_c の 2.4 A 程度に達する電流振幅から電圧が増加し、電流振幅の増加にともない出力電圧が増加した。最大で 1 mV/cm の出力が得られた。以上の結果から、超伝導ダイオードを用いて超短波交流信号 (100 MHz 帯) を直流信号に変換可能であることが示された。

当日は、整流効果の周波数依存性や、電流振幅の大きな領域での発熱について報告する予定である。

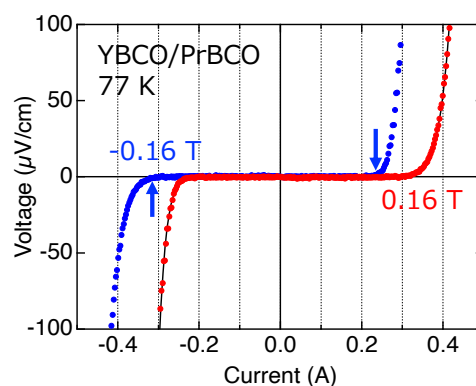


Fig. 1 DC current-voltage characteristics in the YBCO/PrBCO bilayer film at 77 K and at in-plane fields of 0.16 and -0.16 T.

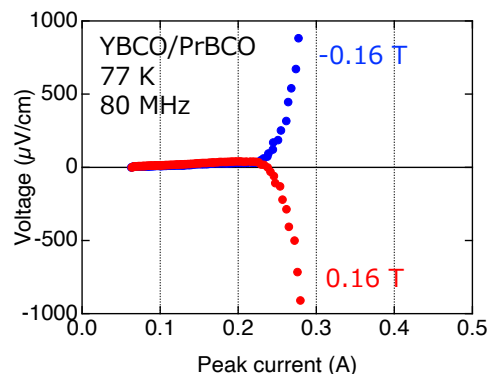


Fig. 2 DC output voltage for very high frequency input signals in the YBCO/PrBCO bilayer film at 77 K and at in-plane fields of 0.16 and -0.16 T.

謝辞

この成果は、科研費(20K15217、22H01522)、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) の助成事業 (JPNP20004) の結果得られたものです。株式会社フジクラ飯島康裕様より金属テープを提供いただきました。

参考文献

- [1] A. Palau *et al.*, Phys. Rev. B 85, 012502 (2012).
- [2] A. Mizuno *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 32, 6601005 (2022).

長尺 Bi2223 線材の金属組成制御と臨界電流特性

Control of cation composition and critical current properties of long Bi2223 tapes

宮本 能伸, 元木 貴則 下山 淳一(青学大); 武田 宗一郎, 中島 隆芳, 山出 哲(住友電工)

MIYAMOTO Yoshinobu, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

TAKEDA Soichiro, NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: c5621061@aoyama.jp

1. 緒言

(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y[Bi2223]超伝導線材は量産レベルで実用的な高い臨界電流特性を有し、すでに送電ケーブル、超伝導磁石、電流リードなど様々な用途に用いられている。しかし、Bi2223 の大きな電氣的磁氣的異方性に由来した本質的に弱いピンニング力のため、高磁場応用は低温域に限定されている。磁場中臨界電流特性の改善には電氣的磁氣的異方性の低減を伴う Bi サイトへの Pb 置換量の増大^[1]と金属組成比を 2 : 2 : 2 : 3 に近づけることが有効な指針であることがわかっているが、これらの実現には系統的な研究が必要である。我々はこれまで仕込金属組成を系統的に変えた高密度 *c* 軸配向 Bi2223 焼結体を作製し、Bi, Pb に対する Sr, Ca, Cu の仕込組成の増加により Bi2223 相中の実効 Pb 置換量が増加する傾向および実効 Pb 置換量の増加に伴い磁場中 *J_c* が向上することを報告してきた。以上の背景のもと本研究では中温域高磁場中においても優れた磁場中臨界電流特性を示す Bi2223 線材の開発を目的として、仕込金属組成を変えた線材の試作を行い、短尺線材、長尺線材における焼成条件と磁場中臨界電流特性の関係を調べている。

2. 実験方法

仕込金属組成を変えた 2 次圧延後の Bi2223 線材(*X* : *Y* = 0.171 : 3.53, 0.176 : 3.63, 0.180 : 3.73, 0.197 : 3.53 ; *X* = Pb/(Bi+Pb), *Y* = (Sr+Ca+Cu)/(Bi+Pb))に対して様々な条件下で焼成し、XRD、SEM、EPMA により構成相や微細組織、局所的化学組成を調べ、超伝導特性は SQUID 磁束計による磁化測定、低温物性評価装置(PPMS)を用いた電気抵抗測定により *c* 軸に平行に印加した磁場下で評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に仕込金属組成 *X, Y* が異なる 2 次圧延後および 2 次焼成を 825°C, *P_{O2}* = 3 kPa 下で 12 時間行った Bi2223 線材フィラメントの表面 XRD パターンを示す。両試料において 2 次圧延後は Bi2212 が残存していたものの、12 時間の 2 次焼成によってほぼ消失した。また、不純物相によるピークにはほとんど違いがないことがわかった。Fig. 2 に 2 次焼成試料の磁化ヒステリシスの幅 ΔM の磁場依存性を示す。*J_c* に相当する ΔM は加圧 2 次焼成で製造された DI-

BSCCO®より劣るものの、仕込組成による違いが認められた。現在、1 次焼成以降の焼成条件の最適化による臨界電流特性の改善を進めている。講演では、仕込金属組成を変えた 4 種類の Bi2223 線材の微細組織、超伝導相分率、Bi2223 結晶中の金属組成比、中温域における臨界電流特性の関係、および長尺線材の均一性について報告する。

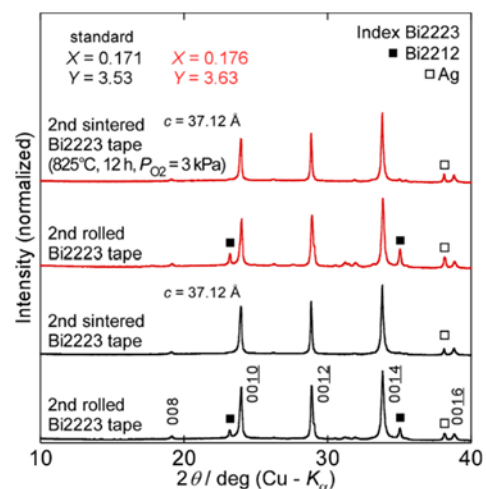


Fig.1 Surface XRD patterns of Bi2223 tapes starting from various cation composition before and after 2nd sintering.

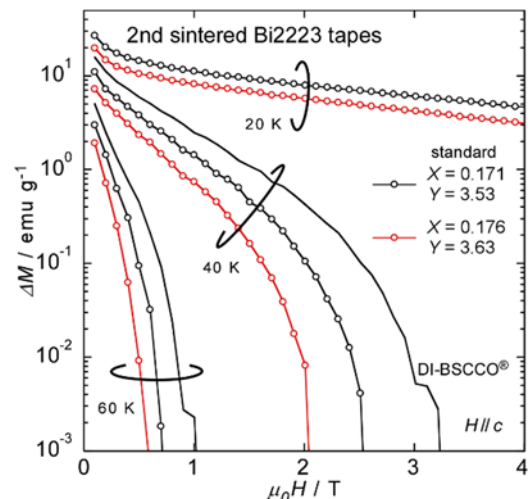


Fig.2 $\Delta M - H$ curves at 20, 40, 60 K of Bi2223 tapes starting from various composition sintered under *P_{O2}* = 3 kPa at 825°C for 12 h.

参考文献

[1] T. Nakashima, S. Kobayashi, T. Kagiya, K. Yamazaki, M. Kikuchi, S. Yamade, K. Hayashi, K. Sato, G. Osabe, J. Fujikami, Cryogenics **52** (2012) 713-718.

Bi_{2.2}Sr_{1.8}CaCu₂O_{8+δ} 単結晶における臨界電流密度のドーピング依存性

Doping Dependence of the Critical Current Density in Bi_{2.2}Sr_{1.8}CaCu₂O_{8+δ} Single Crystals

加藤 準一郎, 三野 裕太郎, Sugali Pavan Kumar Naik (東理大理); 中川 駿吾,
柏木 隆成 (筑波大数理); 石田 茂之, 永崎洋 (産総研); 西尾太一郎 (東理大理)

KATO Junichiro, MINO Yutaro, SUGALI Pavan Kumar Naik (Tokyo Univ. of Science); NAKAGAWA Shungo,
KASHIWAGI Takanari (Univ. of Tsukuba); ISHIDA Shigeyuki, EISAKI Hiroshi (AIST); NISHIO Taichiro (Tokyo Univ. of Science)
E-mail: jun.kato.2020@alumni.tus.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物の電子相図では超伝導の他に、擬ギャップ (PG) や電荷秩序 (CDW)、スピン秩序 (SDW) が混在する。この複雑な電子相図を反映し、臨界温度 (T_c) や上部臨界磁場 (H_{c2}) が特徴的なドーピング (p) 依存性を示すことが近年報告されてきた[1,2]。臨界電流密度 (J_c) については、PG の消失した過剰ドーピング (OD) において超伝導凝集エネルギー (E_{cond}) の増大により J_c も増大することが報告されているが[3]、 T_c や H_{c2} ほど詳細には明らかにされていない。その要因として J_c が E_{cond} だけでは決まらず、磁束ピンニング (ピン止め効率: η) として欠陥構造にも敏感なことがあげられる。本質的な J_c は T_c や H_{c2} と同様に複雑な p 依存性を示す可能性がある。そこで本研究では純良な Bi_{2.2}Sr_{1.8}CaCu₂O_{8+δ} (Bi2212) 単結晶を用いて、 J_c の正確な p 依存性を調べた。

2. 実験方法

Bi2212 単結晶は Floating Zone 法で育成した。 p は還元/酸素アニールにより調節し、経験式 $T_c = T_c^{max}(1 - 82.6(p - 0.16)^2)$ を用いて T_c から決定した。 J_c は MPMS で測定した磁化不可逆曲線より拡張 Bean モデルを用いて算出した。ただし、評価する試料ごとに欠陥構造が不揃いだと、本質的な J_c の p 依存性が得られない。そこで同じ試料について p の調節と J_c の評価を繰り返すことで、 $J_c - p$ を系統的に評価した。

3. 実験結果

右図 (a) は T_c の p 依存性と、50 K と 20 K のゼロ磁場における J_c の p 依存性である。50 K では、測定した p の範囲において p の増加と共に J_c が単調増加した。一方で、低温の 20 K では UD ($p \sim 0.11$) と OD ($p \sim 0.17$) の 2 ヶ所で J_c が増大し、高温とは全く異なる $J_c - p$ が明らかになった。特に UD で J_c が増大することは始めて観測された。続いて右図 (b) は規格化した $j_c (= J_c / J_c(0))$ ($J_c(0)$ は外挿で求めた値) の $t (= T / T_c)$ 依存性である。どの p でもある温度 t_{kink} を境に j_c の t 依存性が大きく変化する。この t_{kink} 以上の高温では単調増加の $J_c - p$ になり、低温では 2 ピークの $J_c - p$ になることが明らかになった。また t_{kink} 以下の低温に注目すると、 $p \sim 0.13$ 以上では $j_c - t$ がほぼ一致するのに対し、 $p = 0.10, 0.12$ では $j_c - t$ が緩やかで、 t_{kink} の値も大きい。このように UD で J_c が増大する試料では温度依存性が変化することが明らかになった。

4. 考察

高温における $J_c - p$ は先行研究で指摘されているように E_{cond} の p 依存性と異方性 (γ) の観点から理解できる[3]。一方で低温における 2 ピークの $J_c - p$ は E_{cond} からでも γ からでも説明できない。特に E_{cond} が減少する UD におけるピークは η の異常な増大を示唆する。この結果から低温と高温で支配的なピンニング機構が異なると考えられる。ここで j_c の t 依存性に注目すると観測された t_{kink} は磁束の次元性の変化と関連付けられている[4]。 t_{kink} より高温では磁束線状態に、低温ではパンケーキ磁束状態になるとされる。 $J_c - p$ が高温と低温で変化することは、磁束の次元性の変化に伴い有効なピンニング中心が変化することからだと考えられる。さらに UD で j_c の t 依存性が

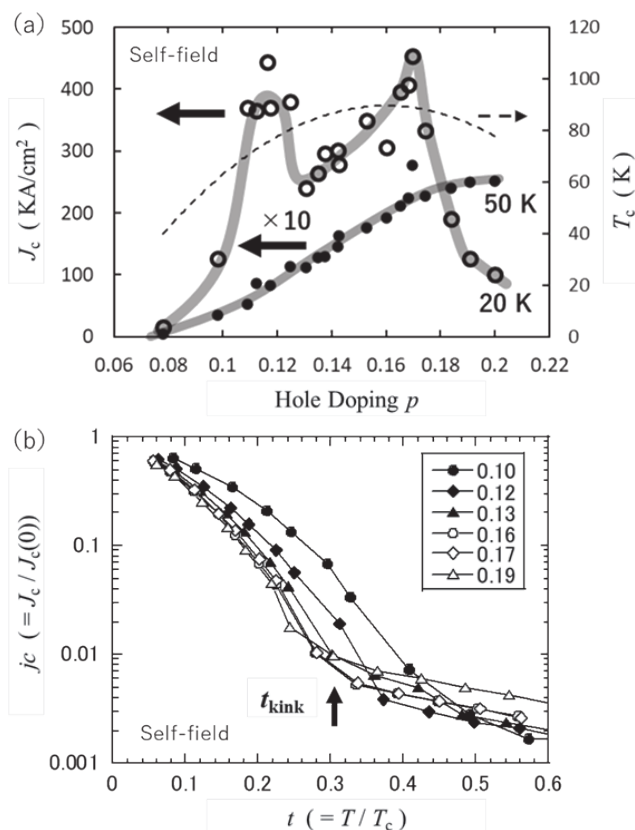


Fig. (a) p dependence of J_c at 20 and 50 K (50 K is multiplied by 10). Dotted line shows $T_c - p$. Each bold line is guide to eye.

(b) T dependence of J_c . T and J_c are normalized by T_c and $J_c(0 \text{ K})$, respectively.

異なることは UD でピンニング機構が変化することを示唆する。これらのことから UD に特有なピンニング中心が存在すると考えられる。ここで電子相図に注目すると、UD では CDW や SDW が発達している。このような場合、超伝導状態が局所的に強く抑制され、不均一になることでピンニング中心として寄与する可能性がある。講演では J_c の磁場依存性などの結果についても示すと共に、Bi2212 における $J_c - p$ の決定因子について電子相図と関連付けた議論をする。

参考文献

1. B. Keimer, et al. *Nature* **518**, 179 (2015)
2. C. Proust, L. Taillefer: *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **10**, 409(2019)
3. J.L. Tallon, et al.: *Phys. Stat. Sol. (b)* **215**, 531 (1999)
4. M. Nideröst, et al.: *Phys. Rev. B* **53**, 9286 (1996)

Pre-tension を変えた高強度 Bi2223 線材における臨界電流-一軸ひずみ特性

Uniaxial strain dependence of critical current of high-strength Bi2223 tapes with various pre-tensions

岡田 達典, 小林 大地, 淡路 智 (東北大); 菊地昌志, 加藤 武志 (住友電工)

OKADA Tatsunori, KOBAYASHI Daichi, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); KIKUCHI Masashi, KATO Takeshi (SEI)

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

1. 背景と目的

住友電工製の高強度 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (Bi2223) テープ線材 (DI-BSCCO Type HT-**) では、銀シース Bi2223 テープ (Type H) と補強合金との貼り合わせの際、合金に pre-tension F_{pre} を印加することで Bi2223 に圧縮性の pre-strain を導入 [1] し、不可逆応力 σ_{irr} ・不可逆ひずみ ε_{irr} が増大する [2]。中でも、Ni 合金を用いた Type HT-NX 線材は $\sigma_{\text{irr}} \sim 450$ MPa を有し、25 T 無冷媒超伝導マグネット (東北大学研強磁場センター) の内挿コイル [3] など、強磁場応用に活用されている。

一方で、33 T 無冷媒超伝導マグネット (設計段階) では 500 MPa 程度の Hoop 応力発生が想定され、30 T 級強磁場マグネットへの応用に向けては更なる機械特性の向上と、その通電特性の理解が必要となる。

本研究では、Ni 合金厚を通常の 30 μm から 100 μm へと厚膜化した “Type HT-NX100” 試作テープ線材を対象に、pre-tension を変えた試料における一軸伸長・圧縮ひずみ下での臨界電流特性に対する pre-tension の影響を調べた。

2. 実験

100 μm 厚の Ni 合金 2 枚で補強した Type HT-NX100 テープに対して、pre-tension を $F_{\text{pre}} = 49, 98, 132, 167$ N と変えた試料を測定対象とした。

臨界電流 I_c は、直流四端子法で求めた電流-電圧特性と n 値モデル ($E_c = 1$ $\mu\text{V}/\text{cm}$) で評価した。東北大学研強磁場センターが所有する $\phi 100$ mm ボアの 10 T 無冷媒超伝導マグネットと He ガスフロー型クライオスタットおよび四点曲げ式ひずみ印加装置 [4] を用いて、($T, B \perp$ テープ) = (30 K, 6 T), (50 K, 1 T), (77.3 K, 0 T) の条件下で I_c の一軸ひずみ依存性 ($-0.6\% \leq \varepsilon_{\text{app}} \leq 0.65\%$) を調べた。なお、磁場は通電電流を 200 A に納めるために印加した。

3. 実験結果と考察

例として、(50 K, 1 T) における Type HT-NX100 テープ ($F_{\text{pre}} = 98, 132, 167$ N) 臨界電流の一軸ひずみ依存性 (縦軸はゼロ印加ひずみの値で規格化) を Fig.1 に示す。いずれの温度・磁場・pre-tension 条件においても、共通して

- (i) $I_c(\varepsilon_{\text{app}})$ は $-0.2\% \leq \varepsilon_{\text{app}} \leq 0\%$ にピークを、 $0.5\% \leq \varepsilon_{\text{app}} \leq 0.6\%$ にキンクを示す
- (ii) “ピークひずみ $\varepsilon_{\text{peak}}$ ” および “キンクひずみ $\varepsilon_{\text{kink}}$ ” の間 ($\varepsilon_{\text{peak}} \leq \varepsilon_{\text{app}} \leq \varepsilon_{\text{kink}}$) で $I_c(\varepsilon_{\text{app}})$ は凡そ線形に減少し、このひずみ領域から除荷後の I_c は初期 I_c 値の 97.5% 以上を維持する (可逆領域)
- (iii) $\varepsilon_{\text{app}} \leq \varepsilon_{\text{peak}}$ および $\varepsilon_{\text{app}} \geq \varepsilon_{\text{kink}}$ から除荷後の I_c は、初期 I_c の 97.5% 以下に低下する (不可逆領域)

という振舞いが見られた。 $\varepsilon_{\text{app}} \geq \varepsilon_{\text{kink}}$ では I_c と同様に n 値も急激に落ち込む (本稿からは割愛) のに対し、 $\varepsilon_{\text{app}} \leq \varepsilon_{\text{peak}}$ における n 値は可逆領域の値と大きく変化

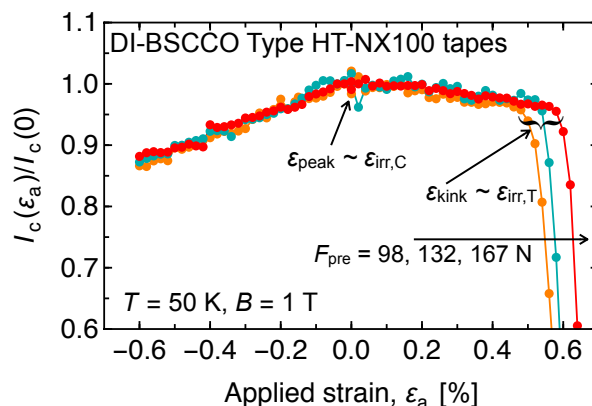


Fig.1 Uniaxial strain dependence of normalized critical current of DI-BSCCO Type HT-NX100 with several pre-tensions measured at (50 K, 1 T).

せず、伸長ひずみと圧縮ひずみでは $I_c(\varepsilon_{\text{app}})$ の不可逆的挙動の起源が異なることが示唆された。

pre-tension の影響に着目すると、 F_{pre} を大きくすることで $\varepsilon_{\text{kink}}$ が増大する傾向が見られ、98 N を印加した試料では $\varepsilon_{\text{kink}} \simeq 0.5\%$ ($\sigma_{\text{irr}} \sim 680$ MPa 相当)、167 N を印加した試料では $\varepsilon_{\text{kink}} \simeq 0.55\%$ ($\sigma_{\text{irr}} \sim 800$ MPa 相当) まで可逆的である。したがって、DI-BSCCO Type HT-NX 線材に対し Ni 合金の厚膜化 (30 $\mu\text{m} \rightarrow 100$ μm) と pre-tension の増大を施すことで、30 T 級の超伝導マグネットにも適用できる。

4. まとめ

pre-tension を系統的に変えた DI-BSCCO Type HT-NX100 テープ線材における臨界電流の一軸ひずみ依存性を調べた。pre-tension の増大によって不可逆伸長ひずみが向上し、33 T 無冷媒超伝導マグネットにも適用可能となることを確認した。一方で、不可逆領域における I_c および n 値の振舞いが伸長ひずみと圧縮ひずみで異なり、不可逆性の起源が異なることが示唆された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (基盤 S: JP18H05248 [淡路] および若手研究: JP21K14192 [岡田]) の支援を受け遂行しました。

参考文献

1. G. Osabe et al.: SEI Tech. Rev., Vol. 84 (2017) p.15.
2. K. Osamura et al.: Mater. Res. Express, Vol. 6 (2019) p.026001.
3. S. Awaji et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) p.4300305.
4. T. Okada, H. Misaizu, and S. Awaji: Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) p.094014.

臨界電流の曲げ歪依存性測定方法の改善について

Advanced measurement technique of bending strain dependence on critical current

長村光造(応用科研); 町屋修太郎(大同大); 山根昇悟(大同大)

OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); YAMANE Shougo (Daido Univ.)

E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

超電導テープの臨界電流の曲げ歪依存性については従来からは3点(4点)曲げ、Goldacker 曲げ等の方法が用いられてきた。しかしこれらの方法では曲げ半径との定量的関係性、試料が弾塑性状態にあるときには、正確な曲げ状態を議論することは難しかった。筆者等は平曲げ、縦曲げについてそれぞれ正確に曲げ状態が実現する方法を考案してきた。それにより臨界電流の曲げ歪依存性について実験を行う方法の基礎について考察してきたので報告したい。

2. 超電導テープ線の曲げ試験方法

典型的な曲げ方法には“両端単純支持集中荷重法”がある。図1に示す4点曲げでは長さ L の両端に支点があり、試料はその外側にも伸びている。中央の2つの圧子で下方に押すことにより曲げが生じる。3点曲げは $h=0$ として中央の2点が重なったものとして取り扱う。試料は弾性体とする。

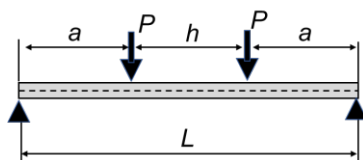


図1 4点曲げ試験方法

図2に示す半円曲げ試験では半円状の治具に厚さ t のテープ試料を沿わせように巻き、その後引張負荷を印加する。

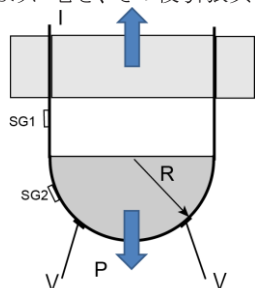


図2 半円曲げ試験方法

3. 曲げ試験方法の数値的解析

図1に示す試料部分はヤング率 E の線としてその曲げ挙動を考察した。4点曲げ試験で最大たわみ y_m が $y_m = L/2$ としたときのたわみの状態を図3に示す。ここでは $a/L=0.2, 0.4$ の計算結果が示されている。また3点曲げ試験の結果も示されているが、3点曲げの方が曲げが大きいことがわかる。従来から報告されているように3点曲げと4点曲げの結果にはそれほど大きな差みられなかった。4点曲げの利点はビームの中心位置に短尺テープを取り付けられることである。さらに半円曲げ試験の計算結果も示されているが、その曲げの半径は大きく、挙動は集中荷重法と大きく異なることが明らかとなった。

さらに図3のたわみの曲率を調べた結果を図4に示す。半円では図2に与えられるように半円治具に試料が沿っているので、どの位置でも曲率は一定である。一方集中荷重法の場合には、荷重点の周りで最もたわみが大きくなり、曲率は小さくなる。特に3点曲げでは中心位置($x=0.5$)の曲率の変化が大

きく、ここには示されていないが最大たわみが大きくなると非常に鋭くなり、曲げ応力が極端に大きくなる。

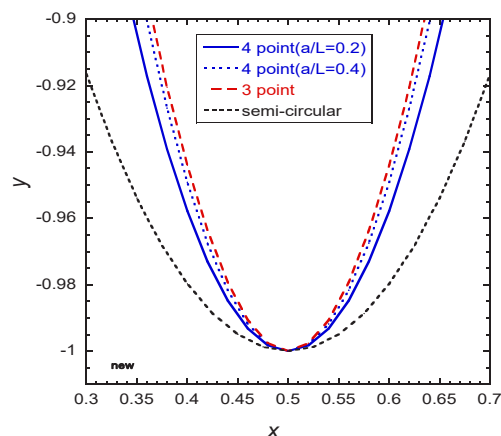


図3 各種曲げ試験方法によるたわみの挙動

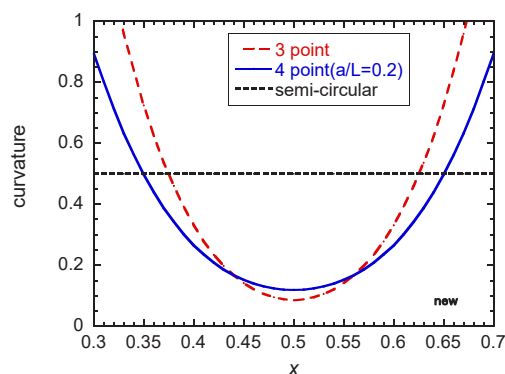


図4 曲率の場所依存性

数値解析から明らかになった知見をもとに臨界電流測定法への応用に関して次の注意点が挙げられる。

- (1) 集中荷重法の場合には曲率は場所によって一定ではなく、そのため電圧測定のための電極スパンの間で曲率が一定でなくなることが起こるので、2つの圧子のスパンの決め方に注意が必要となる。
- (2) また任意の曲率を選ぶためには予め数値的解析から治具の調整が必要となる。
- (3) 半円曲げ法では試料長さ範囲で曲率が一定になるので定量性に優れる。しかし連続に曲げ半径を変えることはできないので、異なる半径ごとに治具が必要となる。

4. まとめ

本報告では様々な曲げ試験方法について解析的にそれらの特徴を比較検討した。それぞれの試験方法には本来の目的に沿った特徴を有するが、pancake windingや spiral windingしたコイルの臨界電流の曲げ依存性を模擬するためには半円曲げ試験方法が適することが明らかとなった。

人工ピン入り RE 系超伝導線材を用いた二層直流超伝導ケーブルの通電特性

Current-carrying properties of double-layer longitudinal magnetic field superconducting cable by RE-based coated tape with artificial pinning centers

山口 終平(九工大), 濱本 拓郎(九工大), 木内 勝(九工大), 吉田 隆(名大)
 YAMAGUCHI Shuhei, HAMAMOTO Takuro, KIUCHI Masaru, YOSHIDA Yutaka
 E-mail: yamaguchi.syuhei889@mail.kyutech.jp

1. はじめに

超伝導線材の電流 I 通電方向と平行に磁界 B が加わる縦磁界下 ($B \parallel I$) では、横磁界 ($B \perp I$) と比べて臨界電流密度 J_c が増加する[1]。さらに、適当な人工ピン(Artificial Pinning Center; APC)を導入することで、より高い J_c が得られ、このような高い J_c 特性を利用した縦磁界ケーブルの開発が進められている[2]。縦磁界ケーブルは、同軸で行きの電流が流れる内側導体層と帰りの電流が流れるシールド層の構造で、超伝導線材に電流を通電した際に生じる自己磁界が、内側導体層の縦磁界になるように巻き線を工夫する必要がある。特に多層構造により、縦磁界が強められると、ケーブルの電流容量が増加することも知られている。従って、高性能な縦磁界ケーブルを開発するためには、単層の検証ばかりでなく、多層構造のケーブル検証が必要である。

本研究では、市販線材されている人工ピン入り RE 系超伝導線材を用いて、内側 2 層の縦磁界直流超伝導ケーブルを設計及び作製し、液体窒素下での通電試験を行い、ケーブルの特性評価を行った。

2. ケーブルの設計・作製および測定

内側 2 層の縦磁界直流超伝導ケーブル作製に用いたのは、市販されている SuperPower 社製の人工ピン入り RE 系超伝導線材で、77 K で自己磁界中の I_c は 110 A 程度である。また、今回は幅が 4 mm の線材を使用した。

内側 2 層の縦磁界直流超伝導ケーブルの設計のため、液体窒素下で線材の J_c の磁界依存性を、直流四端子法を用いて測定した。縦磁界下及び横磁界下での J_c の磁界依存性を Fig. 1 に示す。この結果では、縦磁界の増加と共に J_c が増加するような振る舞いは得られなかったが、0.05 T までは J_c が一定の値を示し、横磁界に比べて、大きな J_c が得られた。この特性に 6 次のフィッティングを行い、磁界依存性を評価した。図中の実線が近似曲線である。

この特性を用いてケーブルの最大電流容量 I_{ct} を求めた。具体的には、直径 10 mm のバーク材製のフォーマに、ケーブルの軸に対して、巻き角度 $\theta = 5^\circ:1$ 層目、 $10^\circ:2$ 層目で線材を巻きつける場合を設計した。得られた結果は、自己磁界

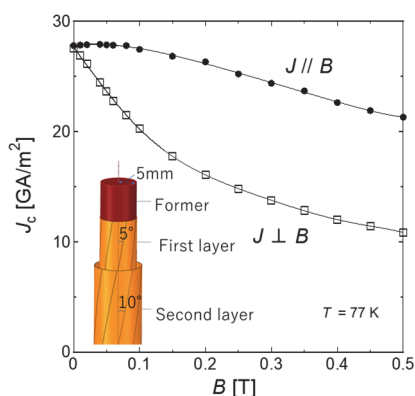


Fig.1 Experimental results of critical current density vs. external magnetic field. Inset shows the structure of the cable to be manufactured.

下でのケーブルの I_{ct} が 1777 A で、縦磁界 0.02 T がケーブルに加わった時に、僅かに増加し 1779 A となることが分かった。この設計に基づき作製した内側 2 層の縦磁界直流超伝導ケーブルの仕様を Table.1 に、外観を Fig. 2 に示す。

ケーブルの通電特性は、液体窒素下で直流四端子法を用いて行った。ケーブルへの通電レートは 10A/s で、 $E = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m の電界基準を用いて I_{ct} を決定した。なお、本ケーブルは内側導体のみなので、シールド層が作る縦磁界を Bi2223 超伝導コイルで模擬して加えた。

3. 実験結果

作製した内側 2 層の縦磁界直流ケーブルの自己磁界下における通電結果を Fig.3 に示す。ケーブルの I_{ct} は、1777 A となり、ケーブル作製時の線材の特性劣化がほとんどなく、設計値と同程度の値が得られることを確認した。このケーブルに縦磁界を加えた場合の特性評価は発表当日に報告する。

Table.1 Specifications of the Superconducting cable.

Number of tapes in the inner layer	First layer : 8 Second layer : 9
Diameter of the former [mm]	10
Pitch angle of inner layer [°]	First layer : 5 Second layer : 10
Total cable length [mm]	524
Cable length [mm]	140

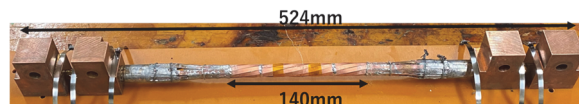


Fig.2 Structure of superconducting DC cable using longitudinal magnetic field effect.

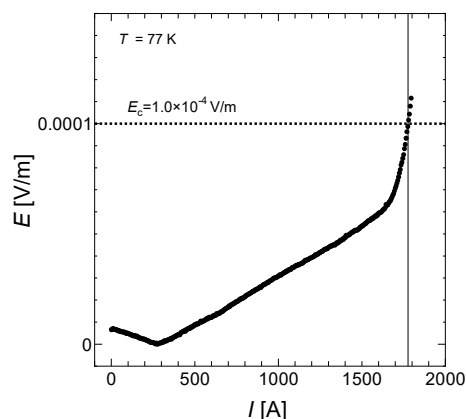


Fig.3 Experimental results of electric field vs. current-carrying capacity.

参考文献

- 1 K. Sugihara et al.: Supercond. Sci. Technol. 28, 104004 (2015) (6pp).
- 2 V. S. Vyatkin et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 25, 6606207 (2015) (7pp).

再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性(3)

Potential of Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Introduction of Renewable Energies (3)

東川 甲平, 佐藤 暢星, 井手 暁仁, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)

HIGASHIKAWA Kohei, SATO Yosei, IDE Akihito, BIAN Wenhao, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

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

1. はじめに

再生可能エネルギー大量利用にはその出力変動補償が大きな鍵となっており、我々はその解決策としてエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの開発を行っている。これまでに、本ケーブルの概念設計^[1]や小型モデルケーブルを用いた機能実証^[2]を行ってきた。一方、上記モデルケーブルは高温超伝導テープ線材 1 枚のみの巻線で製作した電流容量の小さなものであり、その機能実証も 1 か所の再エネから 1 か所の負荷が受電するという極めて単純なマイクログリッドを想定したものであった。そこで本研究では、将来の実展開に不可欠となる項目として、本ケーブルの大電流導体による製作性の確認と、マイクログリッドの多端子化や拡張に関する検討を行った。

2. 大電流導体による製作性の確認

本ケーブルの設計例として、断面積 6 mm^2 程度の導体を直径 100 mm 程度のソレノイドコイル状にすることを挙げている^[1]。このような導体として今回は CORC[®]ケーブル(2 mm 幅 30 ミクロン基板線材を 12 枚バンドルして直径 3.14 mm の丸線として断面積を 7.74 mm^2 としたものを)を選定した。この CORC[®]ケーブル 3.5 m 長を直径 100 mm の巻枠に約 11 ターン巻線した。Fig. 1 にその写真と四端子法による測定結果を示す。まず、巻線を行った印象としては、若干固いが丈夫な丸線ということでハンドリングをあまり気にすることなく、安心感を持って巻線作業を行うことができた。また、四端子法による測定結果からは、CORC[®]ケーブルの自己磁界に加えて巻線による発生磁界を考慮をすれば、 I_c の予測値と実測値はほぼ一致しており、 n 値も 21 と高いことから、巻線による劣化がないことを確認できた。

3. マイクログリッドの多端子化や拡張に関する検討

本超伝導ケーブルを用いたマイクログリッドの将来の実展開にはその拡張性の担保が不可欠であり、具体的には多端子化や複数回線での運用が必要となる。様々なマイクログリッドの構成例を検討しているが、その中でも回線間に磁気結合を持たせた例を紹介する。これは例えば複数回線を本超伝導ケーブルにおいて共巻にすることで実現できる。共巻によって相互インダクタンスが生まれるために、別途回線とするよりも貯蔵可能エネルギーが最大で 2 倍に向上するというメリットもある。Fig. 2(a)にその等価回路を示す。この例は、Line 1 において PV1 による発電があるものの、Line 2 では発電がない状況で、Load 2 が受電できるかということを確認するものである。Fig. 2(b)にそのシミュレーション結果を示す。Line 1 の電流である i_1 を減少させることで、磁気結合の効果により、Line 2 の電流である i_2 が増加していることがわかる。この状態で Load 2 の受電電圧を調整することで 1 MW の電力を受け取れていることがわかる。すなわち、回線間の電力の受け渡しが可能となっている。ちなみに、この状況における PV1 の発電量は 5 MW としており Load 1 における消費電力も 5 MW と設定しているため、Load 2 において余計に消費されている 1 MW はもともと超伝導ケーブルに蓄えられていたエネルギーから供給されているものでもある。すなわち、回線間の電力融通の機能のみならず、そもそもの目的である電力需給バランスのずれの補償も行えていることを示す結果となっている。その他の方式や制御手法についても当日に報告する予定である。

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

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., IEEE TAS 29 (2019) 5402204.
- [2] K. Higashikawa et al., MT27 (2021) FRI-OR7-502-03.

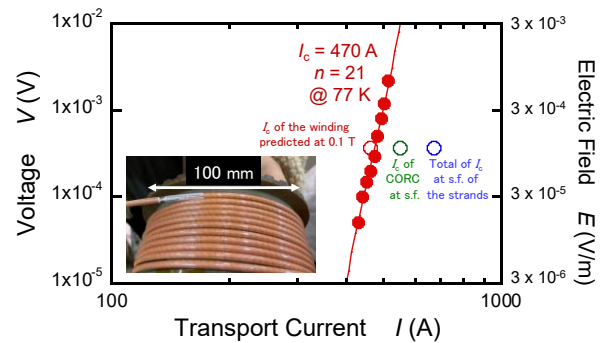


Fig. 1. Photograph of a winding of a CORC[®] cable and its current transport obtained by the four-probe method.

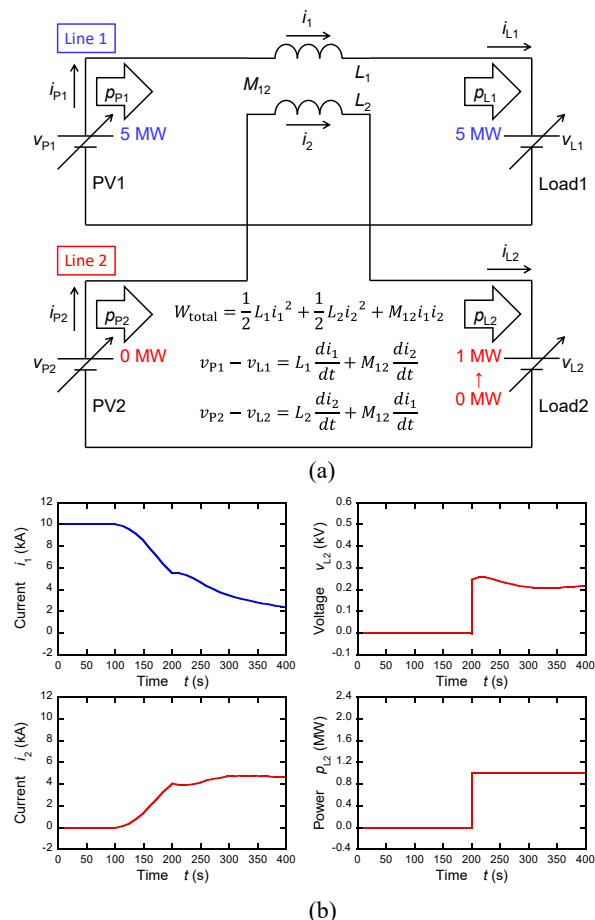


Fig. 2. (a) Equivalent circuit of a co-wound superconducting cable and (b) simulation for power transfer between the lines.

Bi2223 を用いた曲げ部とねじり部のある航空機用積層導体の臨界電流測定

Critical current measurement of Bi2223 of the bending and torsion stacked conductor for aircraft

神田 昌枝, 喜多井 勘太郎, 川合 修平, 山口 作太郎 (中部大学)

KANDA Masae, KITAI Kantaro, KAWAI Kawai, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

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

1. はじめに

近年、航空機の電気・電動化 (MEA: More Electric Aircraft) が進み、銅ケーブルに代わる軽量で大電流が通電できる新しいケーブルが求められている。このため、航空機用に超伝導ケーブルの利用が検討されている[1]。アースが取れなく高空では気圧が低い、高電圧の利用には制限があり、今までは 400 V 以下で利用されてきた。今までに積層導体[2]の開発を進めてきたが今回は、曲がり部のある超伝導ケーブルの臨界電流を評価する実験を開始した。1 本の Bi2223 超伝導テープ線材に曲がり部、ねじり部、また曲がり部とねじり部を組み合わせた状態での臨界電流測定を行った。また航空機に搭載する際は、積層導体となるため、2 本の Bi2223 超伝導テープ線材を積層して 1 本と同様の測定を行った。なお、臨界電流測定中にホール素子で線材表面の磁場測定も行った。

2. 実験試料・方法

本実験に用いた超伝導テープ線材は、Bi2223 超伝導テープ線材 (住友電工, DI-BISCCO, HTA-CA, 横幅 4.6 mm, 厚み 0.35 mm, 臨界電流 190 A 級 @ 77 K) で長さ 545 mm を用いた。まず 1 本単体で Bi2223 超伝導テープ線材を直線、直線状態でねじり、曲げ (R60 mm)、曲げねじり (R60 mm) で臨界電流を測定した。また、Bi2223 超伝導テープ線材 2 本で積層させた 2 層状態で同じ測定を行った。この時、2 層目の電流は 1 層目と逆方向である。ホール素子 (東陽テクニカ, BHT921) は線材の中央に固定し、磁束密度を測定した。

3. 実験結果・考察

Bi2223 を 1 本直線状態での臨界電流は 190.9 ± 38.6 A となった。また、1 本の Bi2223 を R60 mm に曲げた状態の臨界電流は 191.2 ± 30.0 A となった。なお、R120 mm, R240 mm に曲げても臨界電流は低下しなかった。

表 1 に Bi2223 を 2 層積層した結果を示す。直線状態で各層に電流を逆方向で流した時の臨界電流は、 201.3 ± 16 A となり 1 本直線状態よりも臨界電流は高くなった。これは 2 本の線材にお互い逆方向の電流が流れるため、線材の磁場を打ち消し合い、臨界電流が高くなったと考えられる。一方、R60 mm で曲げたときの臨界電流は 205.8 ± 13.9 A となった。以上のことから 2 本積層させた場合の臨界電流は直線状態よりも曲げた方が高い結果となった。また、ねじり部、曲がり部とねじり部を組み合わせた状態においても臨界電流は低下しなかった。

Table1 Critical current of two HTS tapes

Straight		Torsion	
I_c [A]	$I_c \sigma$ [A]	I_c [A]	$I_c \sigma$ [A]
201.3	16	202.2	16.3
Bending (60 mm)		Bending + torsion (60 mm)	
I_c [A]	$I_c \sigma$ [A]	I_c [A]	$I_c \sigma$ [A]
205.8	13.9	203.3	16.3

図 2 に 1 本直線時のヒステリシス曲線、図 3 に 2 本積層させて直線時のヒステリシス曲線を示す。1 本直線状態の測定では磁束密度の変化の幅が 14 mT ~ -15 mT だったが、2 本直線時は磁束密度の変化の幅が 11 mT ~ -11 mT と小さくなった。以上のことから磁束密度が小さくなったことで臨界電流が高くなった。

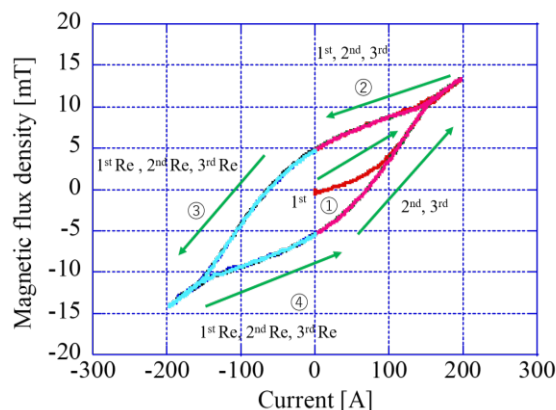


Fig.1 Hysteresis curve of straight HTS tape

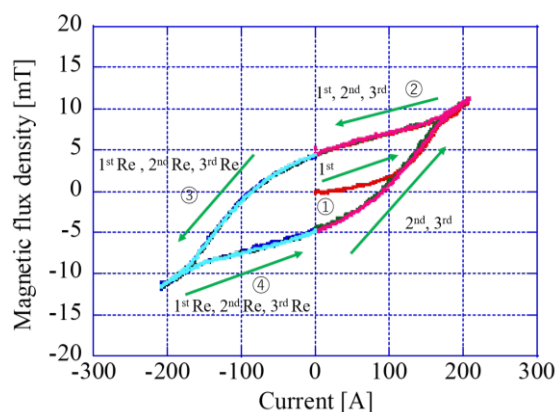


Fig.2 Hysteresis curve of straight two HTS tapes

4. まとめ

本研究では、航空機用超伝導ケーブルに曲げ部、ねじり部、曲がり部とねじり部を組み合わせた状態での影響を研究するため、Bi2223 を各条件において臨界電流測定を行った。その結果、直線状態と比較して R60 mm, R120 mm, R240 mm で曲げても臨界電流は低下しなかった。また、Bi2223 を 2 層積層での臨界電流は、直線より曲げた状態の方が臨界電流は高くなった。また、直線状態と比較すると 2 本積層状態は、磁束密度が小さくなったことで臨界電流が高くなった。

参考文献

1. S. Yamaguchi, M. Kanda, Superconductor Science and Technology Vol. 34 (2021) 014001
2. J. Sun et al, Physics Procedia Vol.36 (2012) pp.1290-1295

HTS テープ線材の短絡電流試験-2

Short circuit experiment of HTS tape conductor for Superconducting DC power transmission (SCDC)

山口 作太郎, 江口 実穂, 神田 昌枝, イワノフ ユーリ(中部大), ニノ宮 晃

YAMAGUCHI Sataro, EGUCHI Miho, KANDA Masae, IVANOV Yury (Chubu Univ.), Akira NINOMIYA (Meiji Univ.)

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

1. はじめに

超伝導ケーブルの短絡電流特性評価のために、テープ線材や複合導体の短絡電流実験を継続している¹⁾。用いる線材はBi2223線材(住友電工)とcoated conductor線材(SuNAM)の2種類であり、臨界電流は共に~200 A級であり、短絡電流ピークは~2.5 kAで実験を行っている。

直流ケーブルはアルミや銅ケーブルでも短絡電流波形規格は決まっていない。これは負荷短絡があっても電力変換器は高速遮断ができるので、ケーブルに大電流が流れるとは限らないからである。多くの直流送電ではケーブルに大電流が流れる事故は極間短絡や地絡を想定している。事故発生箇所が変換器に近いと定格電流の10倍以上のピーク電流が流れる。この状況は超伝導ケーブルでも同様であろう。

一方、既存の交流系ではAC66 kVでは定格電流の20倍の電流が1秒ほど流れる条件でケーブルが作られるが、超伝導ケーブルには過酷な条件であり、参考にならない。

以上の状況を勘案し、臨界電流の10倍ほどの電流を短時間(~1 ms)流して、線材健全性の確認を行っている²⁾。そして、模擬短絡電流の通電前後で線材の臨界電流測定を行い、線材劣化を評価している。今回はSuNAM社の線材の結果を中心に報告する。

2. 短絡電流実験及び線材抵抗測定

SuNAM線材の安定化銅層の厚さは~20 μm であり、住友電工のBi2223線材より安定化材断面積は1桁以上低い値になる。Fig. 1には電流・電圧ピーク以降の実験データに最小二乗法でfittingを行った結果を示す。

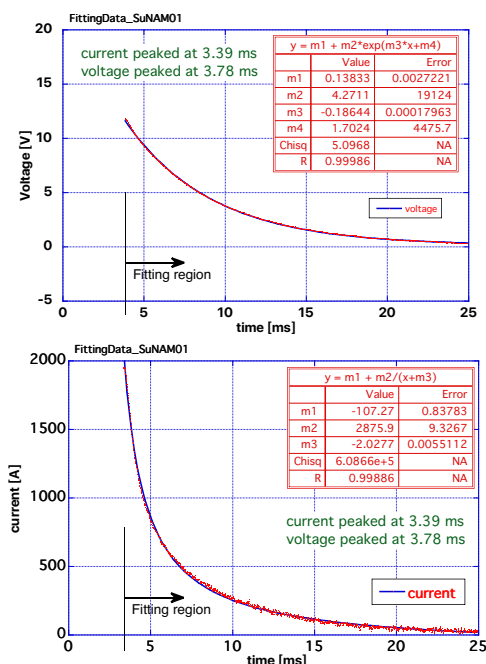


Fig. 1 Experimental waveforms of voltage & current of short circuit after their peaks and the fitting results for SuNAM HTS tape

共に linear correlation coefficient $R > 0.998$ であり、電圧・電流共に関数を実験データの大変良い近似になっている。尚、電圧タップ間距離は 150 mm である。これを元に回路解析を行い、線材のインダクタンスを変えたときに線材抵抗が時間的変化を Fig. 2 に示す。

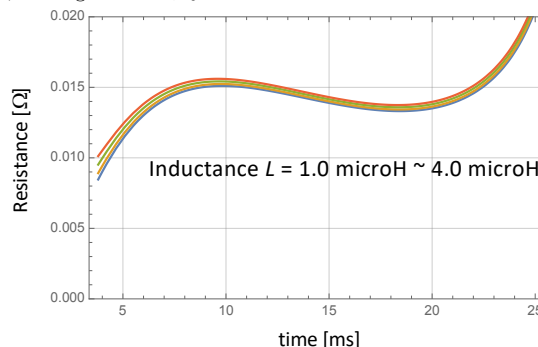


Fig. 2 Resistance estimation during short circuit current for SuNAM HTS tape

Bi2223線材との大きな違いはインダクタンス値が4倍変えても(これほど変化はしないと考えられる)ほとんど抵抗値は同じになっていることである。これは線材が抵抗負荷であることを意味し、~15 mΩの抵抗は線材温度が短時間で~250 Kまで上昇していることを意味²⁾している。尚、~25 ms以降は電流が小さくなるため、このような評価では誤差が大きくなり、温度の高い期間の見積もり及びその後の超伝導に復帰時間をこの方法で見積もることは困難である。

3. 現状のまとめと今後の予定

SuNAM線材は大電流が流れると抵抗が大きくなり、抵抗負荷となるため、短絡電流を抑える可能性がある。これはSuper Ox社がSC-FCLに利用していることから推測できる。同時に短絡電流が流れても線材の臨界電流が低下しないことも意味する。実際、今回の実験後に臨界電流試験を行っているが、劣化は観測されていない。但し、~250 Kまで温度が上がると窒素ガスが一時的に発生するため、断熱二重管内部圧力上昇はBi2223線材に比べて大きいであろう。

今後、発熱量と発生ガス量の見積もりを行う予定している。同時に内管圧力上昇の見積もりを行う必要があると考えている。同時に以上述べた見積もり法による線材温度の精度を確認するために、細い熱電対をテープ線材に取り付け、熱電対の高速サンプリングを行い、温度測定を予定している。

参考文献

- 山口, 神田, イワノフ, 「航空機向け積層超伝導ケーブルの短絡電流試験」2020年度春期低温工学・超伝導学会講演概要集, 1B-a02.
- 山口, 江口, 神田, イワノフ, 「HTS テープ線材の短絡電流試験-1」2021年度秋期低温工学・超伝導学会講演概要集, 2A-p08.

500m 高温超伝導直流送電ケーブルの通電試験及び電流分布 Current test of 500m-long DC Superconducting power cable

筑本 知子, 渡邊 裕文, イワノフ ユーリ, 日野 友明, 奥野 清, 井上 徳之 (中部大)
CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, HINO Tomoaki,
OKUNO Kiyoshi, INOUE Noriyuki (Chubu Univ.)
E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

2013 年度からの経済産業省の委託事業により石狩新港地域に建設された高温超伝導直流送電システム(SCDC)[1]のうち、太陽光～データセンタ間に建設された石狩回線1を用いて、第3回目の冷却試験を2021年8月末の約1ヶ月間にわたり実施した[2]。本試験は、第2回冷却試験後に発生した北海道胆振東部地震による影響の有無の確認ならびに今後の社会実装に向けてSCDCの効率アップのための基礎データの取得を目的とし、冷却循環試験、電気試験等の各種試験を行った。電気試験については、ケーブルの健全性の確認のために静電容量・誘電正接温度特性測定、絶縁抵抗測定、直流耐電圧試験等を実施した他、通電安定性等の確認のため、定格電流通電試験、分流通電試験、を行ったので、その主な結果について報告する。

2. 石狩回線1の構成

回線1のレイアウトとBi系超伝導ケーブルコアの仕様と構成をFig.1に示す。回線1は太陽光発電装置から送電される直流電力を500m送電棟(建屋2、B端末)と500m受電棟(建屋1、A端末)を結ぶ超伝導ケーブル(埋設)を通してデータセンタに供給する設備であり、超伝導ケーブルの途中に接続部が1カ所設置されている。冷凍機、循環ポンプ、LN₂リザーバタンク等は建屋1に設置し、建屋1側からケーブルを格納したケーブル管に供給され、建屋2側からリターン管にて建屋1に戻される。断熱二重管は直管断熱二重管構造であり、二本のケーブル管とリターン管を内管として配置している。

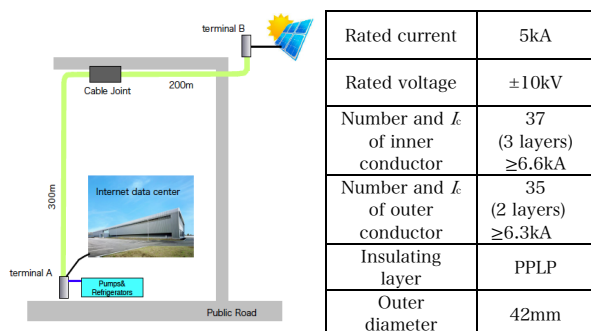


Fig.1 Layout of Line 1 and the specification of BSCCO superconducting cable core

3. ケーブルの健全性の確認試験

ケーブルコアの初期冷却時のケーブルコア損傷の有無の監視のため、内導体-外導体間(内絶縁)および外導体-シールド間(外絶縁)にLCRメーターを取り付け、静電容量Csおよび誘電正接 $\tan \delta$ の計測を行った。その結果、設計値に対してほぼ同等の値が得られ、3回の冷却試験での変化はほとんど見られなかった。また、初期冷却後内絶縁及び外絶縁について絶縁抵抗試験(DC 500V-1

分間)および直流耐電圧試験(DC 600V-10分間)を実施し、絶縁不良のないことを確認した。

4. 定格電流通電試験/低流量時電流通電試験

超伝導ケーブルコアの通電性能を確認するため、標準となる冷凍機設定温度(70K)、窒素流量(40L/min)の下、定格電流通電試験(5kA-1時間)を実施した。また液体窒素循環流量を定格の1/10以下の3.6L/minに落とした状態での通電試験(3kA-1時間)を行った。いずれの条件下でも外導体、内導体ともに両端電圧は $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 以下で超伝導状態は維持され、安定に通電できていることを確認した。

5. 分流通電試験

石狩システムでは超伝導ケーブルコアを構成する線材と電流リードが1対1で取り付けられている。そこで、70K、40L/minの定格条件において、外導体電流リード35本のうち正極側のみ30本外して5本つなげた状態、内導体電流リード37本のうち正極側のみ32本外して5本つなげた状態として500A通電し、電流リードそれぞれに取り付けた貫通型電流センサーにより電流分布の測定を行った。Fig.2に内導体の測定結果を示す。上図は正極側、下図は負極側のそれぞれの電流リードの電流値である。7P09のみ小さな値を示した他はほぼ等しく、中間接続部において、ほぼ均一分流されていることが確認された。

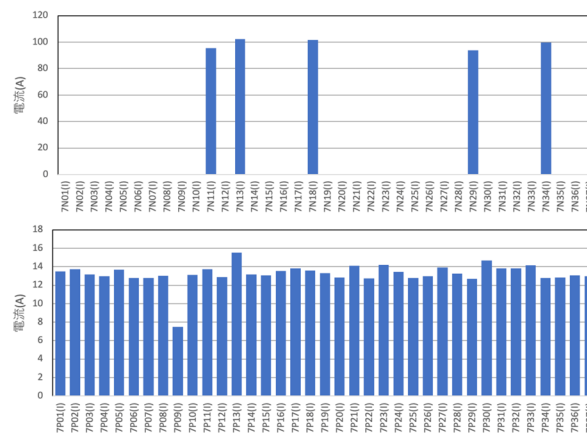


Fig.2 Current distribution measurement of each current lead of inner conductor

謝辞

本研究は石狩超伝導・直流送電システム技術研究組合の研究活動の一環として、同組合が管理する経済産業省の設備を使用して実施した。

参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26 (2016) 5402204
2. 令和3年度 石狩「回線1」再稼働報告書: 石狩超伝導・直流送電システム技術研究組合編著

500 m 高温超伝導直流送電ケーブルの冷却循環試験 Cooling test of 500 m DC superconducting power cable

渡邊 裕文, 筑本 知子, イワノフ ユーリ, 日野 友明, 奥野 清, 井上 徳之 (中部大)

WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, IVANOV Yury, HINO Tomoaki,

OKUNO Kiyoshi, INOUE Noriyuki (Chubu Univ.)

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

1. はじめに

北海道石狩市に設置された太陽光発電所とインターネットデータセンターを結ぶ 500 m の高温超伝導直流送電ケーブル (石狩回線 1) を用いて、2015 年に行った第 1 回、第 2 回の冷却循環試験に続き [1, 2, 3]、2021 年 8 月から 9 月にかけて 3 回目の冷却循環試験を行った [4]。この試験において行った熱侵入量測定及び圧力損失測定などの冷却及び循環に係る試験、並びに石狩回線 1 を構成する機器の性能試験について報告する。

2. 石狩回線 1 冷却循環システムの概要

Fig. 1 に石狩回線 1 の冷却循環システムの配管計装図を示す。CP はターボ型の循環ポンプ、ST はスターリング冷凍機、TB はターボブレイトン冷凍機、FM はコリオリ型の流量計を示す。冷凍機の冷凍能力の仕様値はターボブレイトン冷凍機が 2 kW 以上@66 K、スターリング冷凍機が 1 kW 以上@77 K である。今までの試験で石狩回線 1 の低温への熱負荷は 2 kW を超えないことが分かっているため、今回の試験ではスターリング冷凍機の系統は用いず、ターボブレイトン冷凍機の系統のみ用いた。

超伝導ケーブルは 1 ケ所の接続部を持ち、ケーブルを収める断熱配管はその接続部で 300 m 区間と 200 m 区間に分けられる。断熱配管には平滑管が用いられており、液体窒素循環のために 1 本の外管の中に 2 本の内管が設置されている [2, 3]。外管と内管の間を真空にすることにより真空断熱が行われる。これらの内管の内、超伝導ケーブルを収める内管をケーブル管、液体窒素を送出側に戻すための内管をリターン管と呼ぶ。300 m 区間と 200 m 区間、及びケーブル管とリターン管では内管への多層断熱材の施工は異なる方法が採用されている。リザーバーから出た液体窒素は循環ポンプで加圧され、ターボブレイトン冷凍機で冷却され、流量計で流量計測された後、ケーブル側の端末 A に向かう。ケーブル管を通過しながら超伝導ケーブルを冷却した液体窒素は、500 m 先の端末 B で折り返し、リターン管を通してリザーバーに戻される。液体窒素は 500 m を往復するため、ケーブルの長さは 500 m であるが、液体窒素循環は 1000 m である。

3. 熱侵入測定

第 1 回、第 2 回冷却循環試験同様、今回も熱侵入量測定を行った。測定では、対象とする区間を流れる間の液体窒素の温度上昇と、液体窒素流量から熱侵入量を評価した。

測定された熱侵入量は端末 A は 0.285 ± 0.031 kW、ケーブル管は 0.479 ± 0.28 kW、端末 B は 0.244 ± 0.027 kW、リターン管は 0.221 ± 0.023 kW であり、端末 A 入口からリターン管出口までのケーブル側全体では 1.443 ± 0.033 kW であった。以前測定した結果と比較して、熱侵入量に大きな変化は無く、特に断熱配管部分については不確かさの範囲で一致した。断熱配管の熱侵入量を単位配管長さあたりに換算するとケーブル管 0.986 ± 0.058 W/m、リターン管 0.640 ± 0.060 W/m であった。

4. 圧力損失測定

流路に沿って設置されている圧力計により、液体窒素流量に対する循環の圧力損失を流量 41 L/min 以下の領域で測定した。熱侵入量測定と同様、以前の測定結果と大きな変化はなかった。今回は特に 3.8 L/min という低流量での測定を行った。この流量において、リターン管での圧力損失が負になると共に、ケーブル側全体でも圧力損失が負になる現象が観測された。これは、循環が駆動されることを意味しており、以前中部大の 200 m のシステムでも観測された熱サイホン効果であると考えられる [5]。

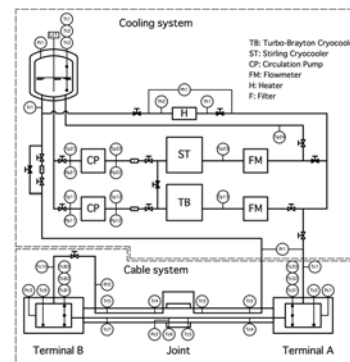


Fig. 1 Piping and instrument diagram of Ishikari Line 1

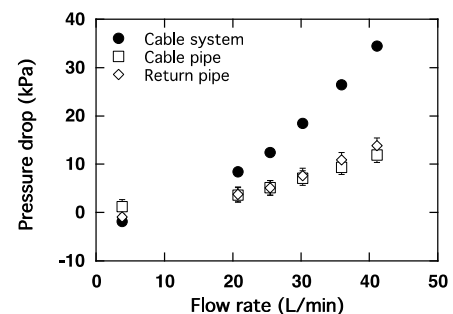


Fig. 2 Pressure drop of circulating liquid

謝辞

本研究は経済産業省の施設である「石狩回線 1」を使用し、石狩超伝導・直流送電システム技術研究組合の管理の下実施した。

参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26 (2016) 5402204.
2. H. Watanabe, et al.: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., Vol. 171 (2017) 012116.
3. Pamphlet of Ishikari Superconducting DC Power Transmission System (I-SPOT).
4. 令和 3 年度 石狩「回線 1」再稼働報告書: 石狩超伝導・直流送電システム技術研究組合編著.
5. Y. V. Ivanov, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26 (2016) 5401204.

三相同軸高温超電導ケーブルにおける内相が作る磁界が外相で生じる交流損失に及ぼす影響

Influence of the magnetic field created by the inner phase on the AC losses in the outer phase in a three-phase coaxial HTS cable

佐藤 亮太, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔(千葉大学);
長崎 陽, 津田 理(東北大学)

SATO Ryota, KOBAYASHI Hiroyasu, SAOTOME Hideo, MIYAGI Daisuke(Chiba University);
NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto(Tohoku University)
E-mail: r.sato17@chiba-u.jp

1. はじめに

三相同軸高温超電導ケーブルは、交流損失が小さく熱侵入量が少ないため実用化が期待されている[1]。このケーブルは、高温超電導体を円周上に配置した超電導層を同軸上に u 相, v 相, w 相を流す三層を配置した構造を取る。外側の相(外相)にはその相よりも内側に配置された相(内相)に流れる電流が作る磁界が印加される。ゆえに、外側の相を構成する导体には位相の異なる空間的に分布した垂直磁界が印加される。これまで、三相同軸高温超電導ケーブルについて、内側の相が作る磁界が外側の相で生じる交流損失に与える影響に関する検討は十分に行われていない。そこで、外側の相の导体本数と位置が交流損失に及ぼす影響について検討を行った。

2. 解析モデル

交流損失計算を行った三相同軸高温超電導ケーブルの导体構造を Fig. 1 に示す。导体は幅に対して厚さが十分に小さいため、导体断面を一次元の領域として扱い一次元有限要素法(T法)を用いた交流損失の計算を行った[2]。超電導特性として n 値モデルを適用した。計算したケーブルの諸元を Table 1 に示す。

3. 解析方法及び結果

それぞれ v, w 相にのみに単相電流を流した場合の交流損失(Condition 1)と全ての相に電流を流した場合(三相電流通電)の交流損失(Condition 2)を計算した。両者を比較することで内側の相が作る磁界が外側の相で生じる交流損失に与える影響を調べた。なお、計算したケーブルの諸元は、Table 1 に示した Cable 1 である。交流損失を Fig. 2 に示す。負荷率に関わらず、それぞれ v, w 相にのみ電流を流した場合の交流損失よりも全ての相に電流を流した場合の交流損失の方が小さくなり、内側の相が作る磁界は外側の相で生じる交流損失を低減させることがわかった。v 相では約 25 %, w 相では約 35 % 交流損失が低減された。なお、今回示した各相の导体が平行に配置された导体配置における交流損失は、平行でない导体配置における交流損失と概ね一致した。

次に v, w 相のケーブル径を変更することで相間距離を変化させ、同様の計算を行った。Condition 1 で得られた結果を分母として交流損失比を導出した。交流損失比を Fig. 3 に示す。計算結果より、相間距離が短いほど交流損失を低減できることがわかった。また、v, w 相に导体を多く配置した Cable 2 の方が Cable 1 に比べて交流損失が大きく低減されることがわかった。

以上より、三相同軸高温超電導ケーブルにおいて、内側の相が作る磁界が外側の相で生じる交流損失を低減させ、相間距離を短くすることが交流損失低減に有効であることが明らかとなった。特に、Cable 2 のような内側の相よりも外側の相に导体を多く配置する構成のケーブルにお

いては、相間距離を短縮することによって大きく交流損失を低減できると考えられる。

本研究は科学研究費補助金(JP19H02120)の補助により実施したものである。

参考文献

- [1] N.Endo et al., IEEE, Vol. 32, No. 1, 2022
[2] S.Sato, N.Amemiya, IEEE, Vol. 16, No. 2, 2006

Table 1 Specifications of three-phase coaxial HTS cable.

		Cable 1	Cable 2
Cable diameter[mm]	u-phase	49.80	
	v-phase	54.24	
	w-phase	58.68	
Number of conductors	u-phase	36	36
	v-phase	36	39
	w-phase	36	42
Width of superconductor[mm]		4.0	
Thickness of superconductor[μm]		1.0	
Critical current of each conductor[A]		300.0	
n value		30	

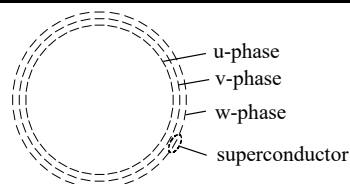


Fig. 1 Cross section of superconductors in a three-phase coaxial HTS cable.

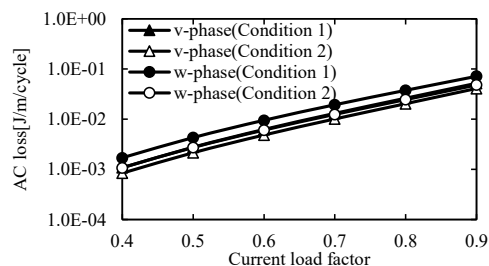


Fig. 2 AC losses of the v and w phases in cable 1.

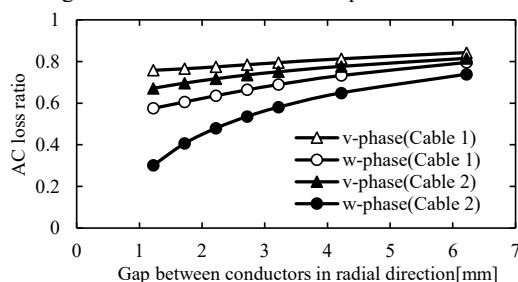


Fig. 3 Relationship between gap between conductors in radial direction and AC loss reduction ratio.

変動磁場用 MgB₂ 線材の基礎検討 — 臨界電流密度と履歴損失 —

Basic study of MgB₂ wire for variable magnetic field

– Critical current density and hysteresis loss –

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立)

TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi)

E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂ 線材は静磁場用磁石で高速励磁や高安定といった価値が実証されたが、近年ではモータや発電機など変動磁場機器で用いるための低交流損失化が期待されている。MgB₂ 線材は多芯化・ツイスト加工が可能のため、低温超伝導線材で培われた低交流損失化のアプローチが有効と考えられる。本研究では変動磁場用 MgB₂ 線材の基礎検討として、フィラメント間金属に強磁性材を用いない断面構成にて長さ1m 程度の線材を試作し、その臨界電流密度および履歴損失を評価した。これらの値をモータ・発電機など応用機器の検討に資することを目的としている。

2. 実験方法

Fig.1 に 51 芯 MgB₂ 線材の断面写真を示す。MgB₂ フィラメントを包むバリア材に Nb を、フィラメント間の母材に Cu-10%Ni を、全体を包むシースに Monel を用いた。線径 0.6mm においてフィラメント径(d_f)はおおよそ 30 μ m であり、ツイストピッチは最短で 5.8mm である。600 $^{\circ}$ C にて熱処理した線材を四端子法による J_c 測定と SQUID による磁化測定とに供した。磁化測定は温度 10, 20, 40K で行い、10K または 20K の測定値から 40K の測定値を差し引くことで、MgB₂ の磁化曲線を得た。

3. 結果

Fig.2 に Transport J_c のフィラメント径依存性を示す。 $d_f = 30\mu$ m および 50 μ m には、本報告の 51 芯線材を 2-3 本ずつ評価した平均値を示しており、 $d_f = 14\sim 20\mu$ m に示した 3 点は参考文献[1]の値である。フィラメント径の縮小化により J_c が低下する傾向が得られた。なお $d_f = 30\mu$ m における J_c は、従来の静磁場用線材 ($d_f > 100\mu$ m) の値の 6 割~7 割程度である。

Fig.3 に $d_f \sim 30\mu$ m のサンプルにおける磁化曲線から得た履歴損失の値を示す。例えば 20K、磁場振幅 1T における MgB₂ フィラメント体積あたりの履歴損失は 0.2 J/cm³/cycle である。低温における Monel は強磁性のため、その履歴損失への影響は詳細に検討する必要がある[2,3]が、本報告の値は応用機器の検討の参考になるとと思われる。

Fig.4 に 51 芯線材の $d_f \sim 30\mu$ m のサンプルから得た Transport J_c と Magnetic J_c 、さらに $d_f \sim 300\mu$ m の単芯 MgB₂ フィラメントのみから得た Magnetic J_c [4]の 10-20K での比較を示す。 $d_f \sim 30\mu$ m と 300 μ m における Magnetic J_c を比較すると、0.8T 以上の外部磁場では良く一致しているが、0.7T 以下では $d_f \sim 30\mu$ m の J_c が外部磁場が低下するにつれて急増している。この差異は、外部磁場に重畳されるフィラメント磁化が細フィラメント化によって低下しているためであり、フィラメント径を細くするほど顕著になるため、履歴損失を定量化する際には留意する必要がある。

参考文献

1. P Kováč, et al.: Supercond. Sci. Technol. 35 (2022) 055004
2. M D Sumption, et al.: Physica C 378-381 (2002) 894-898
3. M D Sumption, et al.: Physica C 382 (2002) 98-103
4. M Kodama, et al.: Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 044006

謝辞

通電法による J_c 測定は、物質・材料研究機構(松本明善先生など)にご協力いただきました。ここに感謝申し上げます。

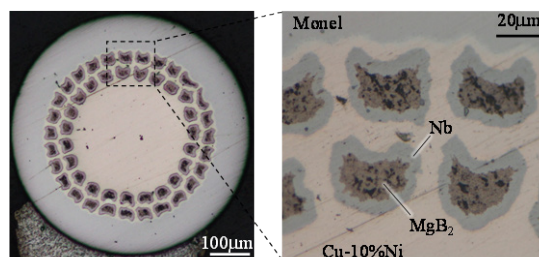


Fig.1 Cross-sections of 51-filaments MgB₂ wire.

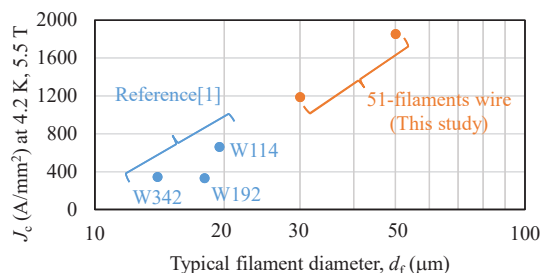


Fig.2 Filament diameter dependence on transport J_c .

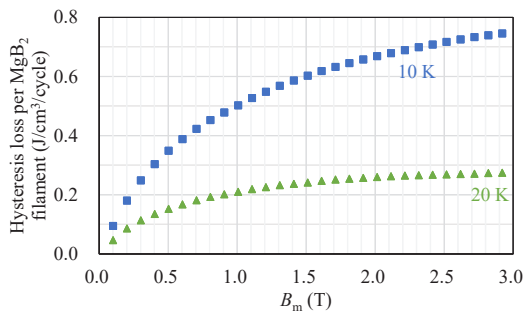


Fig.3 Hysteresis loss on 51-filament wire ($d_f \sim 30\mu$ m).

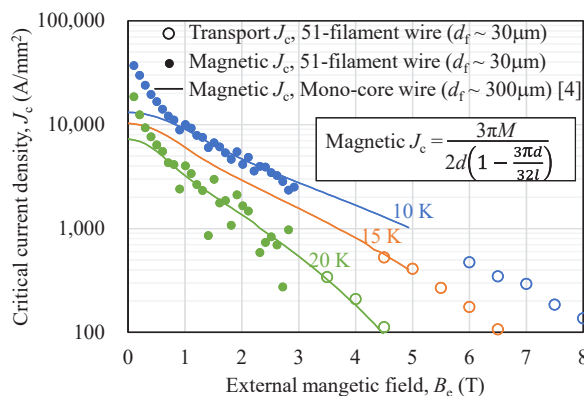


Fig.4 J_c - B - T comparison on magnetic J_c and transport J_c .

IMD 法による 100m 級銅安定化7芯 MgB₂ 線材の開発ならびにこれを用いたソレノイドコイルの試作

Development of 100m-class IMD-processed 7-filamentary MgB₂/Cu wires and the fabrication of solenoid coils using the wires

熊倉浩明, 松本明善, 西島 元(物材機構); 東川甲平, 木須隆暢(九州大)

KUMAKURA Hiroaki, MATSUMOTO Akiyoshi, NISHIJIMA Gen(NIMS), HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu(Kyushu Univ.)

E-Mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

MgB₂の線材化法である Internal Mg diffusion(IMD)法は Powder-in-tube(PIT)法に比べて MgB₂ 層の充填率が高くなって PIT 法よりもはるかに高い J_c や J_e を得ることができるために実用線材として期待されている。我々はこれまで IMD 法による MgB₂ 線材の特性改善ならびに長尺化の研究を進めてきた。今回は 100m 級の銅安定化 7 芯線材を作製するとともに、これを用いてソレノイドコイルを試作し励磁試験を行った。

2. 線材加工法の検討

はじめに IMD 法により、径 1.2mm、長さが約 30m の 7 芯 MgB₂ 線材を作製した。磁界中の J_c を高めるために B 粉末にはコロネン(C₂₄H₁₂)を添加した。金属シースとして熱伝導度の優れた Cu を用い、バリア材としては安価な純 Fe を用いた。線材加工には、スウェーピング、溝ロール圧延、ならびにカセットローラーダイス線引を適用した。Fig.1(a)に熱処理後の線材の X 線マイクロ CT 画像を示す。鉄バリア材の破断によると思われる Mg の銅シースへの染み出しが数多く認められた。Fe バリア材が破れる原因としては、初期の溝ロール圧延加工で断面形状が 4 角形となって 7 芯線材の 6 回対称性が破れるためと考えられる。そこで溝ロール圧延を省略し、スウェーピング加工とカセットローラーダイス加工で 6 回対称性を保持できるように加工を行った。これによって Fig.1(b)に示すように銅マトリックスへの Mg のリークを無くすることに成功し、また走査型磁気顕微鏡観察から局所的な J_c の均一性も向上することがわかった。

3. 100m 級線材の作製とコイルの試作

以上の知見を基に、溝ロール圧延加工を省略して 100m 級の 7 芯線材を作製した。この線材から短尺線材を多数サンプリングして熱処理を行い I_c のバラツキを調べた。残りの約 65m 長の線材を用いて wind & react 法を適用してソレノイドコイルを作製した。熱処理は真空中、640°C で 20 時間行い、その後ワックスで含浸した。コイルの諸元ならびに外観を Fig. 2 に示す。このコイルを 10T の超伝導マグネット内に設置し、4.2K、バイアス磁界中においてコイルの励磁試験を行った。励磁中におけるコイルの発生電圧はコイルの諸元から計算した値に一致し、またホールセンサーで計測したコイルの発生磁界もコイル諸元から計算した値に一致した。これより、コイルには短絡等は存在せず、正しく作られていることがわかった。Fig.3 には、励磁試験の結果 (ロードライン) を、コイルに用いた線材 (短尺線材) の代表的な臨界電流 I_c - B 特性と比較して示す。 I_c はコイル、短尺線材ともに 1 μ V/cm で定義している。これからわかるように、コイルの I_c は短尺線材の I_c の平均値の 70%程度であった。短尺線材の E - I 特性の n 値は 26~31 であるが、コイルの n 値は~16 とかなり小さいことから、コイルの I_c が短尺線材よりも低いのは用いた線材の I_c のバラツキによると思われる。

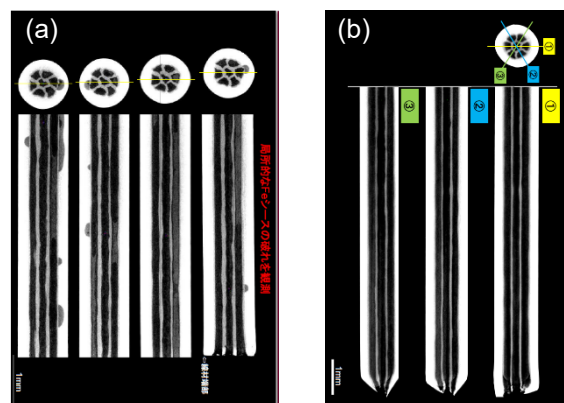


Fig.1 (a)MgB₂/Cu wires fabricated with groove rolling. (b)MgB₂/Cu wires fabricated without groove rolling.

Dimension	Outer dia. : 88mm Inner dia. : 70mm Height : 85mm
Fabrication method	Wind & react method (H.T.: 640°Cx20hr)
Conductor (IMD MgB ₂ wire)	7-filamentary MgB ₂ /Cu Diameter : 1.2mm Length : ~65m
Number of turns	254 turns
Insulation	Silica glass fiber
Impregnation	Wax



Fig.2 Photograph and the specifications of the MgB₂ solenoid coil fabricated with a 65m long IMD 7-filamentary MgB₂/Cu wire.

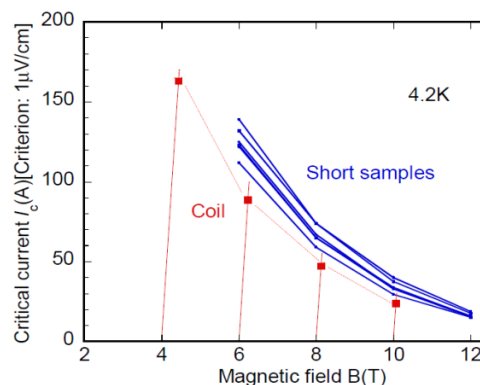


Fig.3 Load lines at 4.2K of the MgB₂ solenoid coil fabricated with the IMD 7-filamentary MgB₂/Cu wire. I_c - B curves of the short wires cut from the same wire are also shown for comparison.

謝辞: 本研究は、JST、ALCA プログラムの支援を受けたものである。

MgB₂ 薄膜の特性向上に必要な後アニール時間の検討

Investigation of post-annealing time required to improve J_c of MgB₂ thin film

山崎 輝, 田代 達哉, 川山 巖, 土井 俊哉 (京都大学)

YAMASAKI Akira, TASHIRO Tatsuya, KAWAYAMA Iwao, DOI Toshiya (Kyoto Univ.)

E-mail: yamasaki.akira.88e@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度($T_c = 39$ K)を有し、液体水素や冷凍機を利用した 20 K 近傍での実用化が期待されている。我々はテープ型 MgB₂ 超伝導線材の実用化に向けて、電子ビーム(EB)蒸着法による MgB₂ 薄膜の作製を行ってきており、Si 基板上に作製した MgB₂ 薄膜(MgB₂/Si)を 650°C で 60 分アニールすることで高い臨界電流密度($J_c = 1.62$ MA/cm² @ 20 K, 5 T)が得られることを報告した[1]。また、MgB₂ 薄膜の線材化を目指して SUS304 基板上に MgB₂ 薄膜を作製し、アニールした試料では MgB₂/Si 試料とは異なり J_c が 0.1 MA/cm² (20 K, 5 T)程度の低いレベルにとどまることを報告した[2]。この原因は基板である SUS304 の構成元素が MgB₂ 層中に拡散していることであると考えられる。そこでアニール時間を短くすることで、基板中元素の MgB₂ 薄膜への拡散を抑制することを考えた。本研究では、基板からの元素拡散がない Si 基板上に MgB₂ 薄膜を作製し、650°C で 1 秒、15 分、30 分、60 分アニールし、 T_c および J_c を調べた。

2. 実験方法

厚さ 500 μ m の Si 基板上に EB 蒸着装置を用いて膜厚 170 nm の MgB₂ 薄膜を作製した。成膜前に 1.0×10^{-7} Pa まで真空引きを行った。基板はハロゲンランプヒーターを用いて 270°C に加熱し、3.20 rpm で回転させた。B 原料直上のシャッターを開けた直後、輻射熱により基板温度が急激に上昇する。そのため、B のシャッターのみを開け、基板温度が安定するまで待ち、Mg のシャッターを開けて MgB₂ 薄膜の成膜を開始した。MgB₂ 薄膜の作製後、同チャンバー内で同軸型真空アーク蒸着(APG)を用いて Nb 層を約 10 nm 成膜した。そして Nb/MgB₂/B/Si 試料をスパッタリング装置に移した後に、Nb 層をさらに 1.8 μ m 成膜した。成膜後、20 mm $\times$ 20 mm の大きさの Nb/MgB₂/B/Si 試料を 10 mm $\times$ 4 mm 程度の大きさに切断し、その試料片についてそれぞれ 650°C で 1 秒、15 分、30 分、60 分アニールを行った。膜中の結晶相の同定は、X 線回析装置(XRD)を用いて $\theta - 2\theta$ 法により行った。 T_c 、 J_c は Quantum Design 社の物理的特性測定装置(PPMS)を用いて、4 端子法により測定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 にアニール前、1 秒、15 分、30 分、60 分アニールした試料の T_c のアニール時間依存性を示す。アニール前の試料の T_c は 35.5 K であり、1 秒、15 分、30 分、60 分アニールした試料の T_c はそれぞれ 37.0 K、36.5 K、36.6 K、37.1 K であった。アニールによって T_c は向上しており、アニール時間との相関はなかった。

Fig. 2 にアニール前、1 秒、15 分、30 分、60 分アニールした試料の J_c の磁場依存性を示す。アニールすることで J_c が向上しており、アニール時間にかかわらず同程度の J_c であった。以上の結果から、MgB₂ 薄膜の結晶性向上に必要なアニール時間は非常に短いことがわかった。

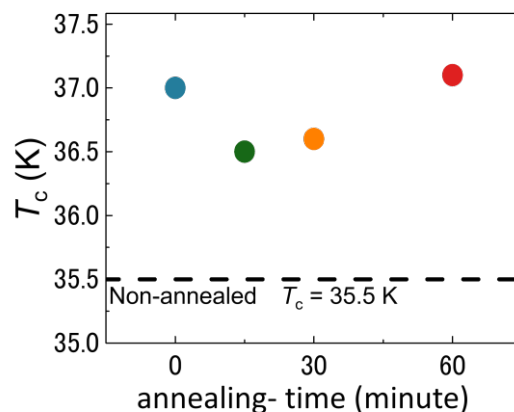


Fig. 1 Annealing time dependence of T_c of the MgB₂ films grown on Si substrates and post-annealed at 650°C.

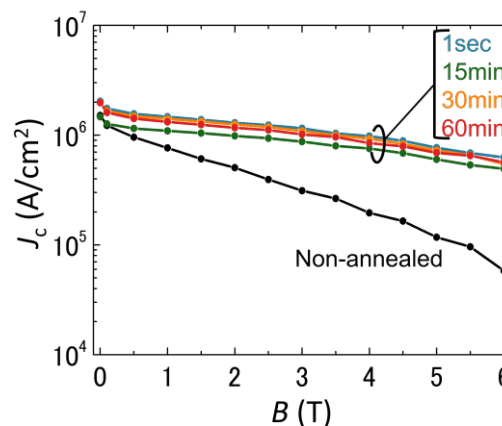


Fig. 2 The J_c -B curves at 20 K for the MgB₂ films grown on Si substrates and post-annealed at 650°C.

4. まとめ

アニール時の基板中元素の MgB₂ 薄膜への拡散抑制に向けて、Si 基板上に作製した MgB₂ の結晶性向上に必要な最低限のアニール時間を検討した。その結果、後アニールした試料ではアニール前の試料に比べて T_c と J_c が向上したが、アニール時間にかかわらず同程度であった。1 秒アニール後の試料の 20 K、5 T における J_c は 0.77 MA/cm² であった。これらのことから、Si 基板上に作製した MgB₂ 薄膜の結晶性の向上に必要な時間は非常に短いことが分かった。

参考文献

1. H. Kambe et al., Appl. Phys. Express. 14 (2021)025504.
2. H. Kambe et al., Abstract of ISS2020, WBP2-3, Kyoto, Japan (2019-12).

X 線 CT で撮影した MgB₂ 多芯線材の画像処理法の検討

Study of image processing method for MgB₂ multicore wire taken by X-ray CT

尾崎 優一, 森脇 怜也, 福原 大貴, 井上 昌睦 (福岡工大)
 OSAKI Yuichi, MORIWAKI Reiya, FUKUHARA Daiki, INOUE Masasyoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
 E-mail: ms-inoue@fit.ac.jp

1. はじめに

MgB₂線材の多芯化が、交流損失低減の観点から進められている。多芯化に伴いフィラメントの径が細くなっているため断線やソーセージングが懸念されている。そこで我々はX線CTによるフィラメント構造解析に取り組んでいる。MgB₂線材は、軽元素のBを含むMgB₂フィラメントとCuを主とした重金属から構成されるためX線CTによる解析が有効であると考えられる。

2. X線CT測定

パウダーインチューブ (Power in Tube, PIT) 法により作製された直径 0.83 mm の 18+1 芯 MgB₂ 線材を評価対象とした。熱処理前と熱処理後の 2 つの試料を用意し、それぞれを 5 mm 長に切断し、X線CTでの測定を行った。測定条件は空間分解能を 1.96 μm 、撮影間隔(回転角)を 0.4 度とした。

3. 画像処理による MgB₂ フィラメント領域の抽出と解析

測定により得られた X 線 CT 断面像の一例を Fig. 1 に示す。MgB₂ フィラメントとその周囲の Nb バリアが明確に分離し観察されていることが確認できる。これらの CT 断面像群に二値化処理を行い MgB₂ フィラメントと Nb バリアの構造解析を行いたいが、X 線 CT 特有のアーチファクトの影響で単純な二値化手法では分離は実現しなかった。そこで画像処理法の検討を行った。対象点の周辺情報を元に閾値を動的に変化させる適応二値化法と特異的な局所ノイズを除去するクロージング法とを組み合わせることにより、それぞれの領域の抽出を行い、3次元モデルの作成を試みたところ、Fig. 2 のように全領域に亘るフィラメント構造の抽出が実現できた。これらの結果を解析したところ、いずれの線材においても MgB₂ フィラメントの断線は確認されなかった。一方、ソーセージングについて確認したところ、外周よりも内周の方が、熱処理前よりも熱処理後の方が、よりソーセージングが強くなっていることが確認された。これは、Fig. 3 に示すようなフィラメント断面積の統計分布からも確認された。

ソーセージングの原因を考察するために Nb バリアに着目したところ、局所的にバリア材が破れ、MgB₂ が漏れ出ているような様子が確認できた。Fig. 4 はバリア材の破れが確認された部位の拡大図である。中央の赤い部分がバリア材が破れている部位である。この領域では、約 0.9 mm にわたって破れていた。このようなバリア材の破れは内側 6 本のフィラメント全てで確認された。また、熱処理前の線材でも内周フィラメントにおいて MgB₂ の漏れこそはないものの Nb バリアが破れている箇所が確認された。いずれも、線材最内層の領域で観測されたことから、これら Nb バリアの破損は線材作製時の機械的圧力による影響であると考えられる。

謝辞

本研究成果の一部は、JSPS 科研費 JP19H05617 並びに JP22H02021 の支援により得られたものである。

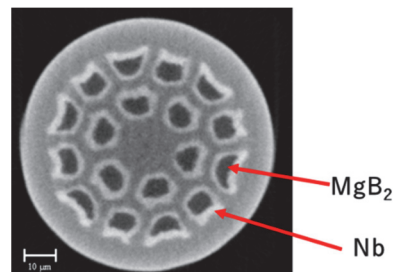


Fig. 1 Cross-sectional XCT image of a 18+1 core MgB₂ wire

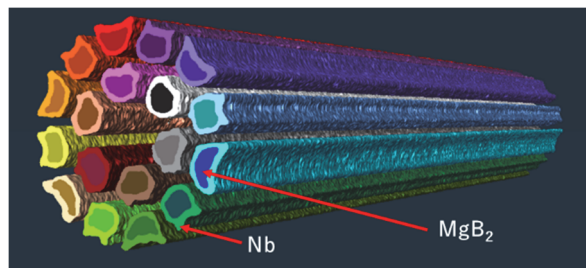


Fig. 2 Three-dimensional model of 18 MgB₂ filaments

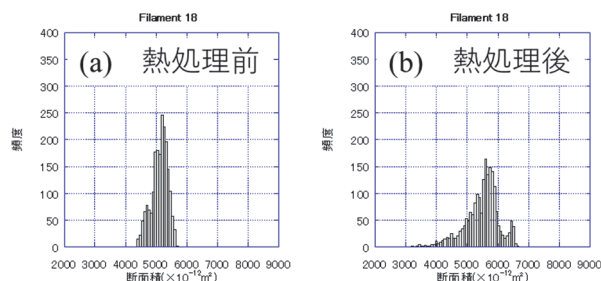


Fig. 3 Statistical distribution of MgB₂ filament cross-sectional area (a) before heat treatment and (b) after heat treatment



Fig. 4 Three-dimensional image of a broken Nb sheath

参考文献

M. Inoue, *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 88

Er-Ba-Cu-O 超伝導接合材を用いた接合 Gd-Ba-Cu-O バルクに対するパルス着磁法の捕捉磁場特性の評価

Evaluation of trapped magnetic field characteristics of pulsed field magnetizing for jointed Gd-Ba-Cu-O bulk using Er-Ba-Cu-O

竹村 賢人, 須藤 正照 (芝浦工大); Remi Dorget (ロレーヌ大学); Longji Dadiel, 坂藤 正樹 (芝浦工大); 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄, 村上 雅人, 坂井 直道 (芝浦工大)
Takemura Kento, Sudo Masaki (SIT); Remi Dorget (UoL); Longji Dadiel, Sakafuji Masaki (SIT); Yokoyama Kazuya (AU); Oka Tetsuo, Murakami Masato, Sakai Naomichi (SIT)
E-mail: na21104@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

本研究では、Gd-Ba-Cu-O バルクの間に設置した Er-Ba-Cu-O 薄板を部分溶融成長させて超伝導接合を行い、パルス着磁 (PFM) への影響を調べることで、効果的な着磁方法を検討した。

接合試料は 77K での捕捉磁場分布評価で良好な超伝導接合を示す単一ピークが得られた。4T 以上のシングルパルスの印加により、接合部からの優先的な磁場の侵入が確認され、50K で 5T 以上の PFM を 1 回印加すると、接合部に 1.2T の高い捕捉磁場が得られた。PFM を 2 回実施すると、被接合部と接合部の両方に 1.2T の磁場の捕捉に成功した。これは接合部と被接合部の J_c -B の違いに起因すると考えられる。

2. 実験方法

被接合材として日本製鉄製の Gd-Ba-Cu-O バルク超伝導体 (ϕ 60mm, Ag9.4wt%添加, Pt0.5wt%添加) を用い、接合材として $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Er123) と $\text{Er}_2\text{BaCuO}_5$ (Er211) をモル比 5:2、 Ag_2O を 10wt%, CeO_2 を 1wt% 混合した焼結体を使用した。各試料は DTA (Differential Thermal Analysis) を使用し、包晶分解温度 (T_p) を測定したところ、被接合材の T_p が 993°C、接合材の T_p が 937°C であった。

Gd-Ba-Cu-O バルクから 25mm 角を切り出し、(110) 面同士が接合面となるように再度切り出し、接合面をラッピングペーパーの 0.3 ミクロンまで使用して鏡面に仕上げた。この研磨面同士の間に厚さ 0.3mm に研磨した接合材を挟んだ。接合試料前駆体は電気炉にて 980°C で 3h 保持した後、940°C まで 0.5h で冷却、920°C まで 12h かけて部分溶融成長させることで、接合材のみ溶融成長し接合した。接合試料は超伝導化のため、酸素雰囲気下で 425°C、300h アニールを施した。

接合試料は PFM 装置のコールドステージ先端に固定し、試料の表面中央に温度センサー、被接合部と接合部の二か所に磁場測定用のホールセンサーを設置した。着磁用のコイルはコンデンサを使用してパルス電流を流した。その際、シャント抵抗の電圧とホール電圧から印加磁場と捕捉磁場を観測した。50K および 70K でのシングルパルス着磁とダブル (2 回) パルス着磁を行い捕捉磁場特性の確認を行った。

3. 実験結果と考察

接合試料の磁場中冷却法 (FCM) による捕捉磁場測定により単一ピークが得られたことから、本試料は良好な超伝導接合が得られている。PFM による着磁において、最大印加磁場を B_a 、試料表面で観測された最大磁場を印加磁場 B_p 、800ms 後の試料に捕捉された磁場を B_t と定義した。Fig.1 に 50K および 70K でのシングルパルスの結果を示す。Fig.1(a) により、70K では B_a が 4T 以上、50K では B_a が 5T 以上で急激に B_t が上昇した。Fig.1(b) から 50K の B_t が 5T 以上で接合部において 1.2T という高い捕捉磁場を得られた。また、70K においては B_a が 4T 以上で B_t の低下が確認された。これは印加磁場による試料の発熱によるものだと考えられる。

接合を行っていない REBCO 系バルクの PFM では試料の外周部から中心部に向かってパルス磁場が侵入することが実験¹⁾と有限要素解析²⁾により報告されている。しかし、今回の結果から接合部の超伝導特性が被接合部よりも低いため、PFM 時に外周部からだけでなく、接合部からも磁場が侵入したと考えられる。その結果、着磁による発熱が分散されバルク全体に磁場が侵入しやすくなったと考えられる。

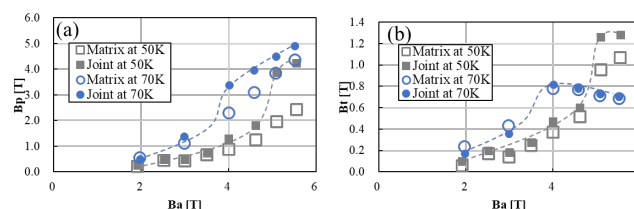


Fig.1 PFM result of single pulse at 50K and at 70K
(a) B_p depend on B_a (b) B_t depend on B_a

Fig.2 に 50K でのダブルパルスの結果を示す。5T 以上のダブルパルスで接合部だけでなく被接合部においても 1.2T という高い捕捉磁場を得ることに成功した。また、Fig.2(b) から 2 回目のパルス着磁では 1 回目と比べてバルクの温度上昇が抑えられたことが確認できる。

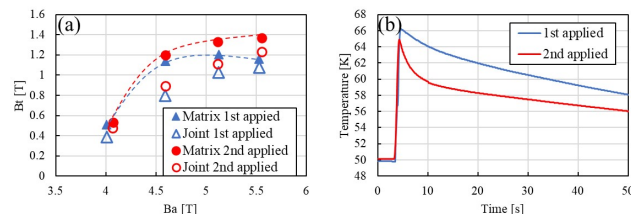


Fig.2 PFM result of double pulse at 50K
(a) B_t depend on B_a (b) Temperature behavior

4. 結論

本研究では超伝導接合を利用した大型超伝導バルクを作製し、PFM における捕捉磁場特性を評価することで PFM の簡便化について検討した。PFM の結果から接合部に優先的に磁場侵入をさせて中心部の捕捉磁場の向上が確認できた。ダブルパルスにより接合部と被接合部の両方に 1.2T の高い磁場の捕捉に成功した。従来は多くのパルス着磁が必要であったが、超伝導接合による接合部の超伝導特性の差異を利用することで発熱を分散し、PFM 時の温度と回数を最適化することができ、簡便な PFM の開発方法が示唆された。

参考文献

1. H. Fujishiro et al.: IEEE Transaction On Applied Superconductivity, 21[3] (2011) pp2724-2726
2. K. Yokoyama et al.: IEEE Transaction On Applied Superconductivity, 22[3] (2012) 4700104

Spark Plasma Sintering 法で緻密化した前駆体から作製した GdBCO バルクの捕捉磁場特性

Trapped field properties of GdBCO bulks fabricated from a dense precursor
prepared by a spark plasma sintering method

箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)

HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: g0321137@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、17 T を超える磁場を捕捉可能である [1,2]。しかしながら強磁場着磁においては、発生するローレンツ力によりバルクが割れることがあるため、実用化にむけて REBCO バルクの機械的特性の向上は非常に重要である。REBCO バルクは半溶融法により作製され、圧粉成型や溶融凝固の際に気孔が生じる。気孔は応力集中による破壊の起点となるため、気孔の低減は重要な課題である。このような課題に対し、TSIG 法が開発されているが、この手法は TSMG 法と比較してやや複雑なセッティングを要する。一方、村上らは Spark Plasma Sintering (SPS) 法で作製した高密度前駆体から空孔の少ない DyBCO バルクが得られたことを報告した [3]。しかしながら捕捉磁場は低下しており、合成条件の最適化が必要である。本研究では、SPS 法によって得られた高密度前駆体を用いて GdBCO バルクを作製し、その超伝導特性および微細組織について調べた。

2. 実験方法

原料粉末として豊島製作所製の Gd123、Gd211 (粒径 3 μm) を使用した。100wt% [Gd123 : Gd211 = 7 : 3 (モル比)] + 0.5wt% CeO₂ となるよう秤量、混合した後、SPS 処理を施した。SPS 条件はパンチ・ダイス径 20mm、印加圧力 50 MPa、昇温レート 50°C/min、焼結保持時間 10min、真空雰囲気とした。

得られた SPS バルクを覆うカーボンシートをやすりで除去した後、大気中で TSMG 法により結晶成長を行った。種結晶は Generic Seed を使用し、それと前駆体の間に Buffer 層を配置した。成長したバルクは成形後、400°C の酸素中で酸素富化処理を 150 h 行った。

試料の評価は、Hall 素子を用いて捕捉磁場測定、SQUID 磁束計を用いて磁化測定を行った。臨界電流密度 J_c は磁化測定データより拡張型ビーンモデルを用いて算出した。また SEM による微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

図 1 に SPS 中の GdBCO 前駆体の変位を示す。各 SPS 温度での前駆体の密度は表 1 に示す通りであり、焼結温度の上昇とともに増加していく。焼結中の変位の大きな変化は 2 回見られた。一般的に RE123 および RE211 の固相反応温度が 900°C 付近であることから、SPS 温度 850°C 付近からの収縮は Gd123、Gd211 の焼結によるものと考えられる。300°C 付近からの収縮については現在検討中である。

図 2 に 77 K における捕捉磁場の SPS 処理温度依存性を示す。SPS 温度 600°C バルクの捕捉磁場は通常前駆体のバルクの捕捉磁場 (0.42 T) に比べて高い値を示した。これは SPS 焼結によりマクロクラックが抑制された効果であると考えられる。しかしながら焼結温度 700°C 以上のバルクの捕捉磁場は焼結温度に反比例して低下している。原因としてバルクの高密度化に伴い酸素富化処理が不足し、超伝導特性が抑制されている可能性がある。

講演では、各種超伝導特性および微細組織について報告し、気孔率など SPS 法による前駆体の高密度化の効果について議論する予定である。

Table. 1 Diameter and density of Normal and SPS bulks

Sample	After SPS		After Crystal Growth	
	Diameter (mm)	Density (g/cm ³)	Diameter (mm)	Change in diameter (%)
(Normal bulk)	(20.0)	(3.82)	(16.9)	(15.7%)
SPS-600°C	20.3	4.41	18.0	11.3%
SPS-700°C	20.2	4.51	17.9	11.4%
SPS-800°C	20.2	4.92	18.5	8.4%
SPS-900°C	20.1	6.67	20.1	0

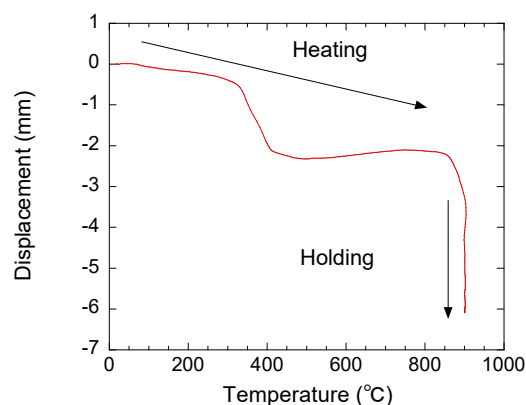


Fig. 1 Displacement of GdBCO precursor during SPS process.

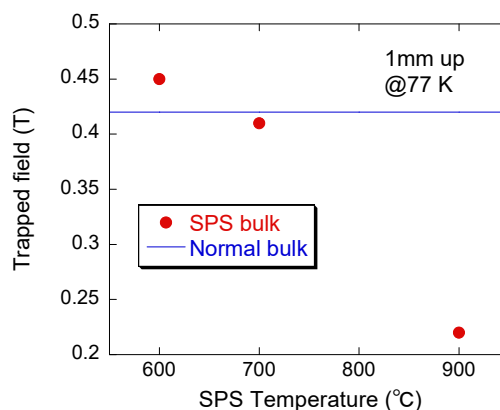


Fig. 2 SPS temperature dependence of the trapped field of GdBCO bulks.

参考文献

1. M. Tomita *et al.*, Nature, **421** (2003) 517-20.
2. J. H. Durrell *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **27** (2014) 082001.
3. A. Murakami *et al.*, Physics Procedia, **45** (2013) 57-60.

REBCO バルク体のパルス着磁特性に関する数値解析

Numerical analysis on pulsed-field magnetization of REBCO bulk

横山 和哉, Mahmoud Asaad, Yu Cong (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)

YOKOYAMA Kazuya, Mahmoud Asaad, Yu Cong, (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: yokoyama.kazuya@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

REBCO バルク磁石は小型・安価な装置で、従来の永久磁石を超える強磁場を容易に発生できるため、様々な応用が検討されている。その中でモーターや発電機への応用があるが、その際には着磁方法として、オンサイトで短時間で作業できることからパルス磁化法 (PFM) が有効であると考えられる。一方で PFM は、超伝導マグネットを用いた磁場中冷却法よりも捕捉磁場が低いため、捕捉磁場の向上が必要であり、かつ実用化の面から着磁の簡便化も課題である。著者らは、これまでにバルク体に細孔を空けたり、着磁の際に用いる軟鉄ヨークのサイズや形状等を変更したりして、捕捉磁場を向上させる手法について実験による検討を行ってきた。今後、着磁方法の改善を進めるためには、時間的・経済的な面から数値解析による検討が必要である。現在、本研究室のバルク磁石装置に基づいた解析モデルを構築し、これまでに実施した実験と同様のシミュレーションを行っている。本文では、解析結果と実験結果を比較し、本解析モデルの妥当性を検討する。

2. 解析モデル

Fig. 1(a)に着磁コイルを取り付けたバルク磁石装置の概観、及び同図(b)に市販のプレポストプロセッサ PHOTO-GRADE (PHOTON 社)を用いて作成した三次元シミュレーションモデルをそれぞれ示す。解析において、バルク体の非線形電気特性には n 値モデル

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad \dots(1)$$

ここで、 E_0 は超伝導体の臨界電流密度 J_c を定義する基準値 臨界電流の磁場依存性には Kim-Anderson モデル

$$J_c(B, T) = \frac{J_{c0}(T)}{\left(1 + \frac{B}{B_0}\right)^\alpha} \quad \dots(2)$$

ここで、 B_0 , α は実測値から得られるフィッティングパラメータ

$$J_{c0}(T) = J_{cn} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^m \quad \dots(3)$$

ここで、 J_{cn} は $T=0$ における電流密度をそれぞれ用いた。

さらに、バルクの温度変化を考慮するために、以下の熱伝導方程式を用いた。

$$\rho \cdot C \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q \quad \dots(4)$$

ここで、 ρ は密度、 C は比熱、 κ は熱伝導率、 Q は発熱であり、 $Q=E \cdot J$ で与えられる。

なお、解析ソフトには有限要素法による動磁場及び温度の過渡応答解析ソフト Photo-Eddy/Thermo (PHOTON 社)を用いた。

3. 解析結果

Fig. 2 に 20 および 50 K における総磁束量の印加磁場依存性について、解析結果と実験結果の比較を示す。解析結果の方が総磁束量の値が大きくなっているが、変化の傾向はいずれの結果も一致している。絶対値の違いは、本解析では試料の不均一性を考慮していないためと考えられる。

4. まとめ

本文は、着磁方法の改善について数値解析による検討を進める準備として、本研究室の実験装置に基づく解析モデルを構築し、これまでの実験結果と解析結果を比較した。総磁束量の印加磁場依存性について比較した結果、絶対値に差はあるものの変化の傾向は一致しており、本解析モデルの妥当性が確認できた。今後、効率的な着磁方法について数値解析及び実験の両面から検討する予定である。なお、本研究は JSPS 科研費 20K04449 の助成を受けたものである。

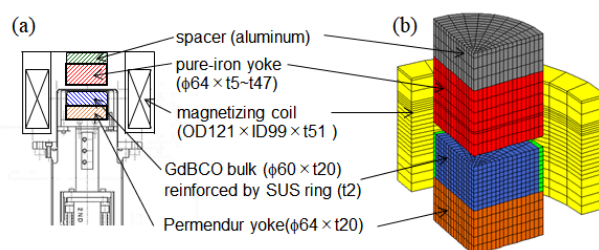


Fig. 1. (a) Schematic of our bulk magnet system and (b) three dimensional simulation model

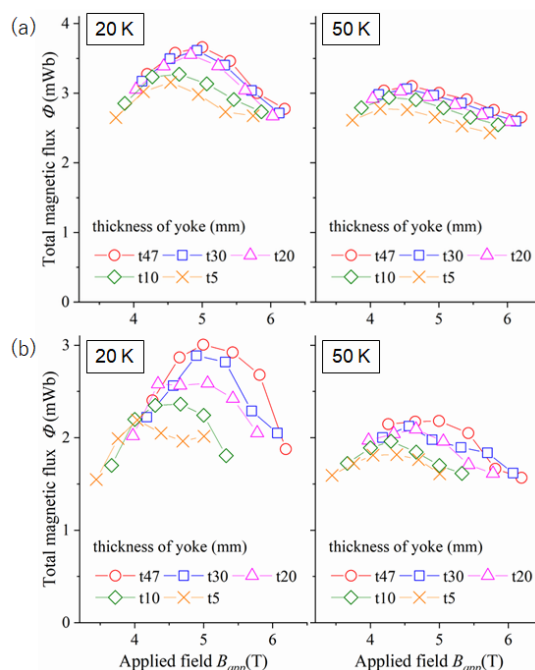


Fig. 2. (a) Simulation and (b) experimental results of applied field dependence of total magnetic flux at 20 and 50 K

無酸素銅板/MgB₂超伝導バルク積層のパルス着磁における 無酸素銅の効果Ⅲ:シミュレーション解析による実験結果の再現

An effect of OFC plates on the pulsed-field magnetization process
for OFC-plates/MgB₂-bulks stackingⅢ: reproduction of experimental results by analysis

吉田 智貴, 内藤 智之 (岩手大)

YOSHIDA Tomoki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: g0321179@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体はバルク応用に適した材料であるが、動作温度での比熱 C が小さく、熱的に不安定な材料である。そのため、超伝導バルクの着磁法の一つであるパルス着磁(PFM)には不向きであるとされていた。しかし、我々の研究グループでは MgB₂ リングバルクと無酸素銅板を積層し、リング内部に軟磁鉄 Yoke を挿入した複合構造において、PFM 法による MgB₂ バルクの捕捉磁場としては最高の 1.61 T を達成した[1]。前回の学会までは、[1]で未解明であった無酸素銅板が捕捉磁場特性に与える影響をシミュレーション解析により明らかにし[2]、さらに実験による検証結果を報告した[3]。しかしながら、解析では無酸素銅板により捕捉磁場が低下したのに対し、実験では捕捉磁場が向上したという異なる結果が得られた。本研究では、この違いについて、無酸素銅板とバルクの熱コンタクトに着目して解析を行い、複合構造の効果を明らかにすることを目的とする。

2. 解析方法

Fig.1 にシミュレーションモデルの概略図を示す。2 枚の無酸素銅板(外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 0.5 mm、残留抵抗率 $RRR = 30$)を上下面に積層させた MgB₂ リングバルク(外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 18 mm)に対し、2 次元軸対称有限要素モデルを構築した。また、実験におけるバルクと無酸素銅板間の熱コンタクトを再現するために、新たに接触熱抵抗(外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 1 mm)を両者間に設定し、パラメータとした(計算では熱伝導率を使用)。スプリットコイル(内部に軟磁鉄 Yoke を設置)を用いて外部磁場(rise time = 12 ms, duration time = 300 ms)を印加した。MgB₂-銅複合体は真鍮ホルダーを介して冷凍機コールドヘッドに接続した。真鍮とコールドヘッド間に接触熱抵抗を配置することで冷凍機による冷却を再現した。初期温度は $T_s = 20$ K とし、バルクの臨界電流密度 $J_c(B, T)$ 特性には実測値をフィッティングしたものを用い、捕捉磁場と温度上昇を算出した。

3. 解析結果

Fig.2 に接触熱抵抗の各熱伝導率、印加磁場 $B_{center} = 2.50$ T における無酸素銅板表面の温度上昇の時間依存性を示す。これまでに、渦電流によって無酸素銅板で発生した熱のバルクへの伝導は、解析では減磁過程、実験では減磁後にそれぞれ支配的であるという結果が得られている。図に示すように、バルクと無酸素銅板間の接触熱抵抗の熱伝導率を変化させることにより、 $\kappa = 1E+0$ W/(m K)において実験結果を再現することが出来た。

Fig.3 に各接触熱抵抗(熱伝導率)におけるバルク表面中心の捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。減磁過程において無酸素銅板の発熱が多く伝わる $\kappa = 1E+1$ W/(m K)では $B_{center} = 1.90$ T のとき最大捕捉磁場 $B_{top} = 1.11$ T を示し、減磁後に無酸素銅板の発熱が多く伝わる $\kappa = 1E+0$ W/(m K)では $B_{center} = 2.20$ T のとき $\kappa = 1E+1$ W/(m K)より 0.11 T 高い $B_{top} = 1.22$ T を得た。以上より、[1]で期待した無酸素銅板による熱はけ効

果は無いことが分かった。ただし、渦電流による磁場の侵入遅延によるロングパルス化の効果は期待できることから、講演では捕捉磁場向上のため無酸素銅板からバルクへの熱の伝播を抑制させたモデルについても報告予定である。

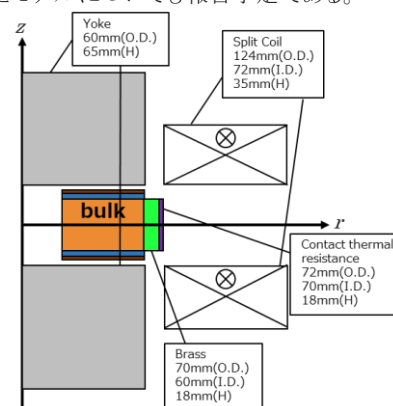


Fig.1 Schematic view of numerical model

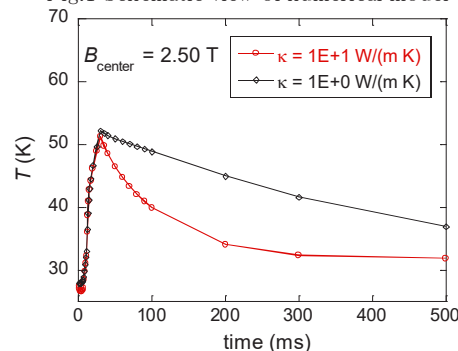


Fig.2 The time evolution of temperature on OFC plate after applying the pulse field of 2.50 T for each model.

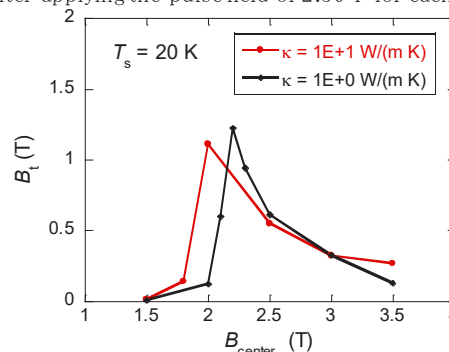


Fig.3 Effective applied field (B_{center}) dependence of trapped magnetic field, B_t , at 20 K for each model

参考文献

- [1] T. Hirano, et al.: *Supercond. Sci. Technol.* **33** (2020) 085002 (10pp)
- [2] T. Yoshida, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101* (2021) p.115
- [3] T. Yoshida, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102* (2021) p.52

MVT 法 MgB₂ 超伝導バルクの捕捉磁場特性モデリング

Modeling of trapped magnetic field properties of MgB₂ superconducting bulks produced by MVT method

池田 直生, 田中 里佳, 白旗 知暉, 山本 明保(東京農工大学)
 IKEDA Nao, TANAKA Rika, SHIRAHATA Tomoki, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)
 E-mail: s215628y@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体は高い臨界温度 $T_c = 39$ K を有することから、液体ヘリウムを必須としない 20 K 近傍での応用が期待されており、線材やバルク磁石等への材料化が進められている。本研究室で開発された MVT(Magnesium Vapor Transport)法[1][2]は、ホウ素源ペレットにマグネシウムの金属蒸気を輸送することで、熱処理中に高圧を要することなく、比較的大型かつ高密度の MgB₂ 超伝導バルクを得ることができる作製方法である。本研究では、MVT 法で作製した MgB₂ バルクの捕捉磁場特性について、電磁界解析による計算と実験結果との比較考察を行った。また、*in-situ* 法で作製した MgB₂ バルクとの比較も行った。

2. モデリング方法

MVT 法により作製された直径 $D = 20$ mm、厚み $t = 2.3$ mm のバルク[2]について JMAG-Designer 20.0 を用いて電磁界解析を行った。支配方程式にはマクスウェル方程式から導かれる式を用い、超伝導体の非線形性は(1)式に示す $E-J$ 特性を用いて考慮した。

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $n = 50$ とした[3]。

J_c-B 特性は実験[2]から得られた $T = 20$ K におけるデータを基に以下の式でフィッティングしたものを用い、比較として *in-situ* 法で作製されたバルクについても同様に近似した[3]。

$$J_c(B) = J_{c0} \exp\left(-\left(\frac{B}{B_0}\right)^Y\right) \dots\dots\dots (2)$$

着磁は実験[2]と同様に磁場中冷却着磁(FCM)を仮定した。

3. 結果と考察

シミュレーションにより得られた MVT 法バルクと *in-situ* 法バルクの断面における磁束密度分布と電流密度分布を Fig. 1 に示す。磁束密度はバルク中心部で大きくなっているが、MVT 法バルクでは 2 T 以上の磁束密度を有する領域が *in-situ* 法バルクと比較して大きく広がっている。電流密度に注目すると、MVT 法バルクは *in-situ* 法バルクに比べて $J = 2.5 \times 10^9$ (A/m²) 以上の高い電流密度の領域がバルク外周部付近に広く分布していることが分かる。

バルク中心を原点とし、径方向に対して r 軸、厚み方向に対して z 軸を定義した場合の径方向の磁束密度分布 $b_z(r)$ を Fig. 2 に示す。バルク表面における磁束密度は、バルク外周から中心 ($r = 0$) に向かって増加し、シミュレーションにより得られた表面中心部の捕捉磁場は 2.04 T (MVT 法バルク)、1.49 T (*in-situ* 法バルク) であった。MVT 法バルクの捕捉磁場実測値はバルク上面で 1.75 T、下面で 1.80 T であり、シミュレーション値の 85%~88% であった。*in-situ* 法バルクでは計算値と実測値がよく一致することが報告されており[3][4]、MVT 法で計算値と実測値が異なることは、この MVT 法バルク内で J_c-B 特性に若干の不均一性が存在することを示唆する。一方、バルク中心部の最大捕捉磁場は MVT 法バルクでは 2.69 T と予測され、*in-situ* 法バルクの 2.03 T と比較して約 1.3 倍高かった。これは、MVT 法バルクの J_c-B 特性が *in-situ* 法バルクよりも優れていることに由来する。

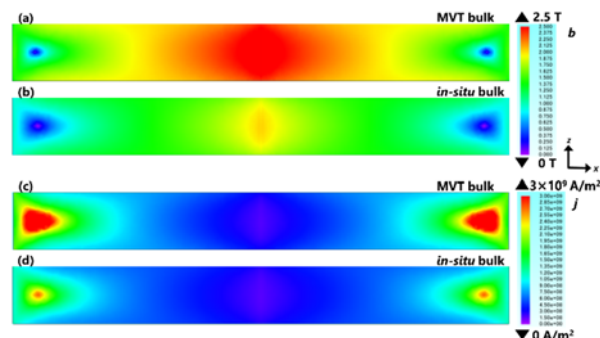


Fig.1 Bulk cross-sectional magnetic flux density b and current density j distributions. (a) b distribution of MVT bulk. (b) b distribution of *in-situ* bulk. (c) j distribution of MVT bulk. (d) j distribution of *in-situ* bulk.

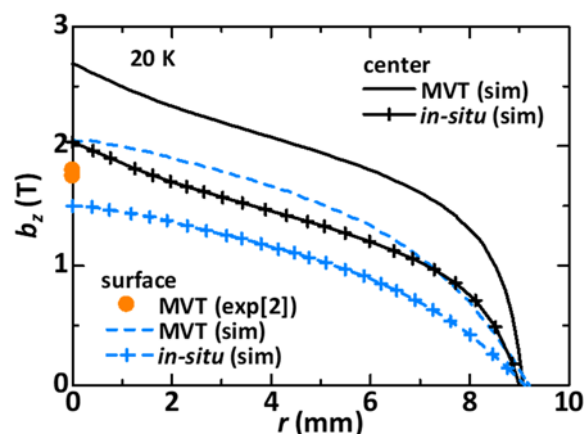


Fig.2 Radial distribution of z -axis magnetic flux density b_z .

参考文献

1. Y. Sanogawa, et al.: J. Japan Inst. Met. Master, Vol. 83, No. 9 (2019) p. 341-345
2. R. Tanaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.78
3. M. D. Ainslie, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) p. 6800504
4. H. Fujishiro, et al.: Supercond. Sci. Technol., vol. 27, No.6 (2014) p. 065019

謝辞

本研究はJSPS科研費(JP18H01699, JP21H01615)、並びに科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業CREST(JPMJCR18J4)の支援を受けて行ったものである。

MgB₂ アレイを用いた周期交替磁場の生成 Generation of periodic magnetic field using bulk MgB₂ array

紀井 俊輝(京都大学); 富田 優, 赤坂 友幸(鉄道総研)

Kii Toshiteru (Kyoto University); TOMITA Masaru, AKASAKA Tomoyuki (RTRI)

E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

京都大学では複数のバルク超伝導体でアレイを構成し外部から磁場変化を与えた際にバルク超伝導体内部に生じる超伝導誘導電流を利用し、高度に制御された複雑な磁場分布の生成・制御の研究を行っている。本研究ではバルク MgB₂ を用いてアレイを構築し放射光発生用のアンジュレータ周期交替磁場の生成・制御を行い、希土類銅酸化物超伝導体と比較し周期交替磁場の個々のピーク間における磁場強度のばらつきを抑制できることを確認した。

2. バルク超伝導体アンジュレータ

運動する電子ビームに加速度を与えることで放射光を発生することができる。放射光施設では、ほぼ光速にまで加速した電子ビームを周期交替磁場中で蛇行運動させることで、高輝度な放射光を発生し、さまざまな研究を推進している。電子ビームを蛇行させる装置はアンジュレータまたはウィグラーと呼ばれ、ネオジム永久磁石を用いて周期交替磁場を生成する方式が主流であるが、磁石材料の性能限界により高性能化は頭打ちとなっている。そこで、京都大学では永久磁石による限界を超える、放射光の短波長化や輝度向上を目指し、複数のバルク超伝導体を周期的に配置したアレイとソレノイドコイルを組み合わせ、超伝導転移後にソレノイドにより外部から磁場を変化させバルク超伝導体内部にループ状の誘導電流を流し、誘導電流により周期交替磁場を生成するバルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータを提案し開発を行っている[1]。Fig. 1 にアンジュレータの構造模式図を示す。濃く塗りつぶされた部分がバルク超伝導体で、淡色部分がスペーサーとなっており外側からの伝導冷却によりバルク試料を冷却可能な構造となっている。

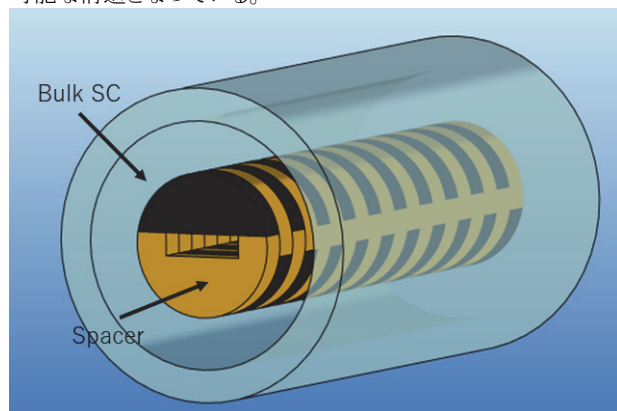


Fig.1 Schematic drawing of bulk HTS array

2013 年には希土類銅酸化物バルク超伝導体 (REBCO) でアレイを構築し、永久磁石の限界を超える周期磁場生成を実証することに成功[2]しているが、ピーク磁場強度の不均一性の解消は不可欠でありバルクの選別やソーティングによる均一化に取り組んでいる。

3. MgB₂ バルク超伝導体アレイ

これまでに試験機で磁場生成に用いていた REBCO では、臨界電流密度が高いものの種結晶を用いた高度な疑似単結晶化プロセスが不可欠であり複数のバルク超伝導体を切り出した際の臨界電流密度のばらつきが比較的大きく、過去の試

験機では標準偏差で 15% 程度のばらつきがあるものを使用せざるを得なかった[3]。

そこで、今回は焼成後の疑似単結晶化プロセスが不要で、比較的特性のそろった試験片の合成に適した MgB₂ に着目しアレイの構築を行った。Fig. 2 に MgB₂ アレイの写真を示す。

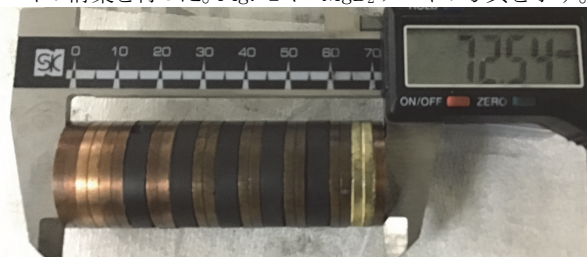


Fig.2 Photograph of MgB₂ array

アレイ外径は 25 mm で、厚さ 5 mm の疑半円形状の MgB₂ バルク超伝導体を 10 片 (5 周期分) スタックしたものを用了。

4. アンジュレータ磁場計測

0.5 T の磁場中で温度 20 K まで MgB₂ アレイを冷却後、外部磁場を 0T まで下げ、アンジュレータ磁場計測を行った。Fig. 3 の実線で磁場計測結果を示す。また比較用に GdBCO 13 片 (6.5 周期) で構築したアレイによる磁場計測結果を点線で示す。

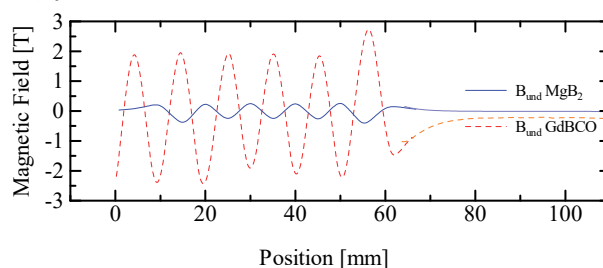


Fig.3 Field distribution along beam axis for MgB₂ and GdBCO

GdBCO アレイでは周期数が異なっているため直接の比較はできないが、Fig.3 に示すように、MgB₂を用いた場合、左右の対称性が GdBCO の場合より高く、ピーク磁場強度のばらつきが抑制されていることが確認できた。

5. まとめ

臨界電流密度のばらつきを抑制して複数のバルクの作成が可能な MgB₂ を周期的に配置したアレイを用いて周期交替磁場生成を行った。銅酸化物超伝導体と比べて磁場の強度は低いものの、より均一度の高い周期磁場の生成を確認することができた。数値計算との詳細な比較を行うための基礎データとして今後の活用を予定している。

参考文献

1. T. Kii, et al.: Proc. FEL2006 (2006) p. 653
2. R. Kinjo, et al.: APEX Vol. 6 (2013) 042701
3. T. Kii, et al.,: Proc. FEL2010 (2010) p. 649

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H01127 の助成を受け行われた。

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(その1): 全体概要 Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Part 1): Overview

石山 敦士(早大), 野口 聡(北大), 植田 浩史(岡山大), 渡部智則, 長屋重夫(中部電力),

福田光宏(阪大), 鷲尾方一(早大), 東達也(QST 放医研)

ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.), NOGUUCHI So (Hokkaido Univ.), UEDA Hiroshi (Okayama Univ.),

WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.,Inc), FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.),

WASHIO Masakazu (Waseda Univ.), HIGASHI Tatsuya (QST)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

科研費および JST-OPERA プロジェクトにおいて、 α 線核医学治療のための α 線放出 RI (^{211}At) 製造用「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を進めている[1]。従来 AVF サイクロトロンにおいては、ビーム加速のための磁場形成に鉄芯が使用されてきたが、本装置では、空芯の REBCO コイルシステムのみで必要となる高精度の磁場を発生させることを目指している (Fig.1)。鉄芯の磁化特性の非線形性を考慮する必要がないため、出力エネルギーを変化させることができ、PET 用 RI 製造等への応用など多機能化が期待できる。まず(その1)として、HTS-SC 用 REBCO コイルシステム開発のための基盤技術の開発状況 (2022 年春) の概要を報告する。

2. HTS-SC 用 REBCO コイルシステムの基盤技術

本研究では、HTS-SC用REBCOマルチコイルシステム開発のための基盤技術として、1)高機械強度化のためのコイル補強構造 (YOROIコイル構造)、2)高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術 (無絶縁コイル巻線技術)、3)高精度の磁場を発生する技術 (遮蔽電流による不整磁場の評価と低減)、4) 5-High統合技術 (Fig.2) を活かしたマルチコイル設計最適化技術の確立を目指している。

本セッションでは、まず本発表において、研究目的、研究開発スケジュールおよび現在の開発状況の全体概要について報告する。具体的には、2022年度実験実施予定の小型実証用REBCOコイルシステムの設計・製作 (完了) と実験評価内容[2]、実規模HTS-SC用のコイルシステムの設計 (磁気シールド付コイルシステム) [3]、そして実規模コイルシステムにおける遮蔽電流と電磁応力評価[4]について紹介する。次に他の本学会において発表予定のテーマとして、無絶縁コイルにおいて層間接触不良領域と線材接続部がある場合の安定性評価[5]、REBCOマルチコイルにおける劣化発生時の継続運転の可能性評価[6]、および、劣化のある無絶縁コイルに新たな劣化の発生・拡大が発生したときの検出法 (健全性の監視法) に関する基礎的な検討[7]、さらに、REBCO2枚バンドル導体を巻線したコイルにおいて片方の線材に劣化が発生したときの過渡的な振舞い[8]について紹介する。また、遮蔽電流磁場の空間的・時間的な精度・安定度を解析評価するための回路解析に基づく簡易計算プログラム[9]、無絶縁コイルにおける遮蔽電流磁場影響評価のための実験と影響低減法に関する検討[10]、実規模HTS-SC用コイルにおける遮蔽電流磁場の影響と通電波形制御による影響低減効果[11]について紹介する。

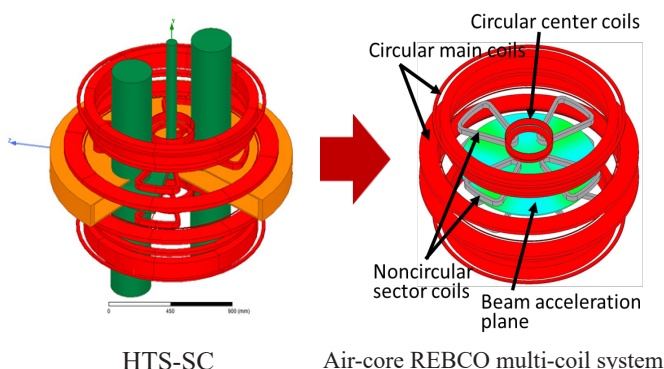


Fig. 1 Schematic drawings of HTS-SC and REBCO multi-coil system.

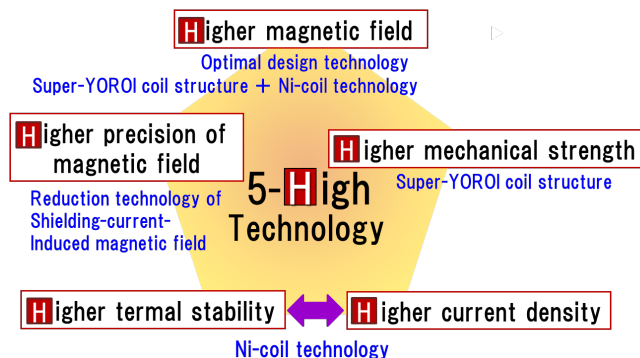


Fig. 2 5-High REBCO magnet technologies for HTS-SC

これまでの検討は、主として、REBCO 線材の優れた特性を最大限活かしつつ HTS-SC 用 REBCO コイルシステムとして求められる性能・機能を実現することに注力してきた。今後は、実応用に向けて、工業製品として求められるロバスト性、安全性、信頼性を確保しつつ、期待される性能を低コストで実現するコイル化技術の確立を目指す必要がある。最後にそのための研究計画について紹介する。

本研究は科研費基盤研 S (18H05244) に依った。

参考文献

1. H. Ueda, et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., 29, 5, 2019, 4101105
2. 2022年度春季低温工学・超電導学会 2C-a02.
3. 2022年度春季低温工学・超電導学会 2C-a03.
4. 2022年度春季低温工学・超電導学会 2C-a04.
5. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 1P-p09
6. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 1P-p11
7. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 1P-p10
8. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 2P-p07
9. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 1P-p07
10. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 1P-p08
11. 2022 年度春季低温工学・超電導学会 2P-a12.

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(その2): 小型実証 REBCO コイルシステムの設計・製作

Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Part 2):
Design and construction of a small demonstration REBCO coil system

石山 敦士(早大), 野口 聡(北大), 植田 浩史(岡山大), 渡部智則, 長屋重夫(中部電力),
福田光宏(阪大), 鷲尾方一(早大), 東達也(QST 放医研)

ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.), NOGUCHI So (Hokkaido Univ.), UEDA Hiroshi (Okayama Univ.),
WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.,Inc), FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.),
WASHIO Masakazu (Waseda Univ.), HIGASHI Tatsuya (QST)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

高温超伝導スケルトン・サイクロトロン(HTS-SC)の実現に向けて、5H(高機械強度、高電流密度、高熱的安定性、高磁場、高精度磁場)を可能とする超伝導コイル化技術の開発に取り組んでいる。今回は、無絶縁コイル巻線技術と YOROI コイル補強構造を適用した小型実証モデル(実機のコイル径の半分弱)として UBSC (Ultra-Baby Skeleton Cyclotron)用 REBCO コイルシステムを設計[1]・製作したので、その内容を報告する。2022 年度秋に、同コイルシステムを用いて、発生磁場精度、冷却や励磁時のコイル変形、熱的安定性等について評価実験を行う予定である。

2. UBSC 用 REBCO コイルシステム

設計した小型実証用REBCOマルチコイルシステムの諸元をTable 1に、断面および模式図をFigs.1,2に、製作完了間近のコイルシステムの写真をFig.3に示す。無絶縁ダブルパンケーキ (DP) コイル (SUSテープを共巻き) から構成され、各コイルはYOROI構造により補強してある。線材幅は6mm、厚さ0.1mmである。運転温度は30K (冷凍機伝導冷却) で、出力エネルギー可変 (5, 4, 2.5MeVの3段階。加速粒子:陽子) を想定して、通電電流を540A, 483A, 382Aとし試験を行う予定である[1]。引出し半径は0.2mを想定している (実規模は0.5m)。

本研究は科研費基盤研 S (18H05244) に依ったことを付記する。

参考文献

1. T. Ogata, et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 31, No. 5, 4400105, 2021

Table.1 Specification of REBCO coil system for UBSC

	Center coil #1	Center coil #2	Main coil #3	Main coil #4	Sector coils
Inner radius (mm)	70.00	80.10	283.13	314.37	-
Outer radius (mm)	79.80	80.94	314.43	332.63	-
Lower z-coordinate (mm)	120.00	120.01	78.79	70.12	70.00
Upper z-coordinate (mm)	151.00	135.01	141.79	133.12	101.00
SUS between turns (mm)	0.096	0.005	0.68	0.258	0.1125
No. of turns/SP	50	8	40	51	60
No. of DP	2	1	4	4	2

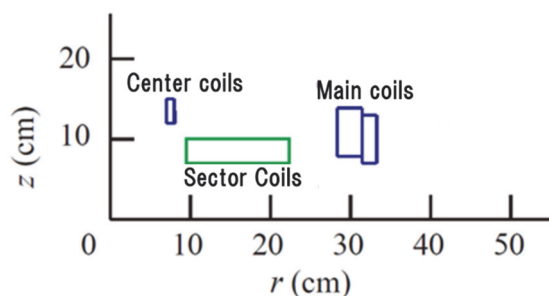


Fig. 1 Optimized arrangement of REBCO coil system

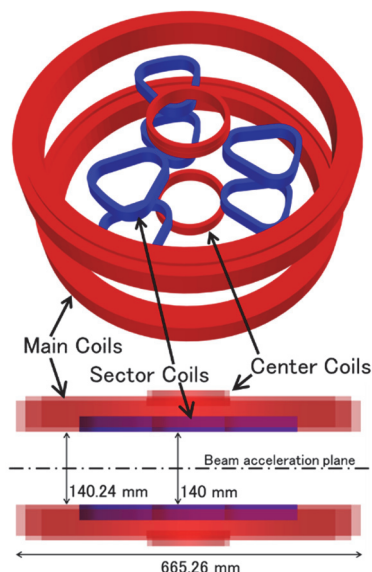


Fig.2 Schematic of the REBCO coil system

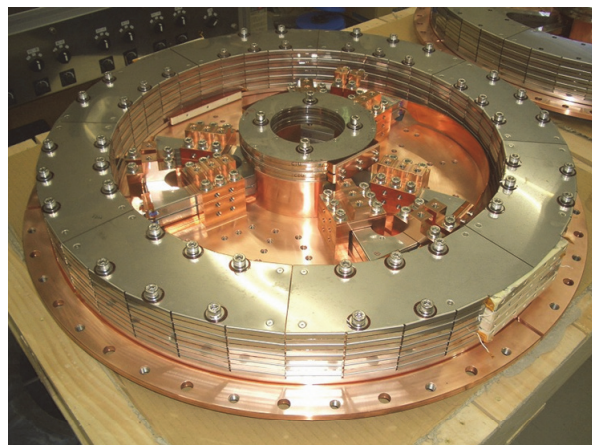


Fig.3 Photo of the REBCO coil system for experiments

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(その3): 実規模コイルシステムの設計

Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Part 3): Design of real-scale coil system

野口 聡(北大), 石山 敦士(早大), 植田 浩史(岡山大), 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力), 福田 光宏(阪大),
福田 光宏(阪大), 鷺尾 方一(早大), 東 達也(QST 放医研)
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.), ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.), UEDA Hiroshi (Okayama Univ.),
WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.,Inc), FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.),
WASHIO Masakazu (Waseda Univ.), HIGASHI Tatsuya (QST)
E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

科研費および JST-OPERA プロジェクトにおいて、 α 線核医学治療のための α 線放出 RI (^{211}At) 製造用「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTS-SC)」の開発を進めている¹⁾。HTS-SC は空芯であり、出力エネルギー可変を容易にしている。本連報その2で報告している UBSC (Ultra-Baby Skeleton Cyclotron) 用 REBCO コイルを設計し[1]、設計原理の確立・実証のために現在製作中である。さらには、実規模サイズの HTS-SC 用 REBCO コイルの設計手法の開発も進めてきた[2]。

2. HTS-SC 用 REBCO コイルの最適化設計

AVF 最適化サイクロトロンにおいては、効果的なビーム加速のために、等磁性磁場と AVF (Azimuthally Varying Field) が必要である。AVF は、ビームの回転軌道に沿って軌道面に垂直な方向 (方位角方向) に変化する磁場であり、ビームを発散させることなく加速させる。従来の設計[2]では、以下の式で表される AVF の強度 (フラッター F^2) を 0.04 として設計検証を実施してきた。

$$F^2 = \frac{\langle B_z^2 \rangle - \langle B_z \rangle^2}{\langle B_z \rangle^2}$$

$$\langle X \rangle = \frac{1}{2} \oint_0^{2\pi} X(r, \theta) d\theta$$

ここで、 B_z は磁場の z 方向成分を表す。初期 REBCO コイル設計後のビーム軌道計算により、ビームの収束性が良くないことが判明した。その後、フラッター F^2 を 0.05 に上げ、再設計を実施した。本設計より、より実用化に近づくため、アクティブシールド・コイルも設計に含んでいる。

3. コイルシステムの最適化設計例

Fig. 1 にターゲットする等磁性磁場と、セクターコイルの作る AVF、および設計対象の主コイルが発生すべき磁場を示す。また Fig. 2 に設計したコイルシステムの外観を示す。Fig. 3 には、設計したコイルの発生磁場と、等磁性磁場からの誤差を示す。なお、今後、設計したコイルの発生磁場を用いてビーム軌道計算を実施し、ビームの収束性を検討する。

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

参考文献

[1] T. Ogata, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, no. 5, 4400105 (2021).

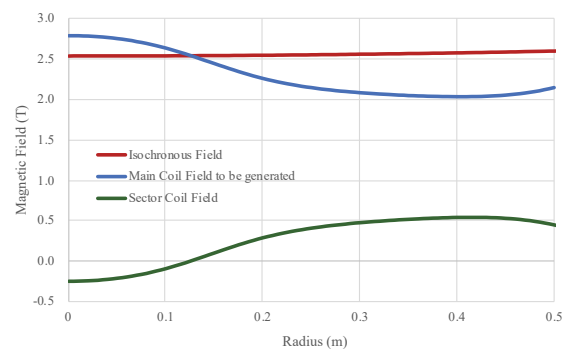


Fig. 1. Azimuthal average magnetic field in the median plane of HTS-SC coil system for acceleration of 40 MeV D^+ .

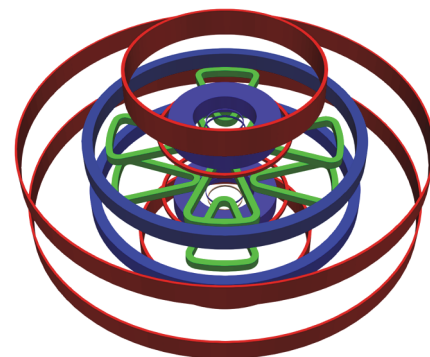


Fig. 2. Optimally shape-designed HTS-SC coil system. Blue, green, and red coils are, respectively, the main, the sector, and the shield coils.

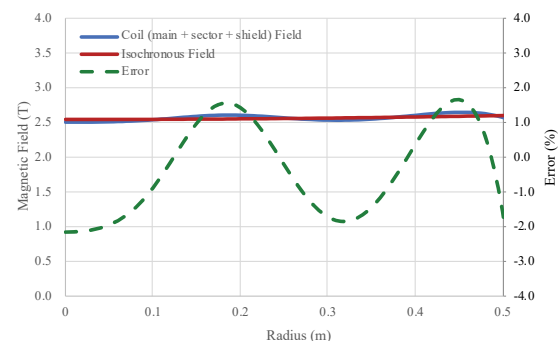


Fig. 3. Ideal isochronous field and coil-generating field with error.

[2] H. Ueda, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, 4101105 (2019).

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発(その4): 実規模コイルシステムにおける遮蔽電流と電磁応力評価

Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron (Part 4):

Evaluation of screening current and electromagnetic stress in real-scale coil system

植田 浩史, 仲井 悠貴, 井上 良太, 金 錫範(岡山大); 石山 敦士(早大); 野口 聡(北大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);
福田 光宏(阪大); 鷺尾 方一(早大); 東 達也(QST 放医研)

UEDA Hiroshi, NAKAI Yuki, INOUE Ryota, KIM SeokBeom (Okayama Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.,Inc);

FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); WASHIO Masakazu (Waseda Univ.); HIGASHI Tatsuya (QST)

E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

エネルギー可変で多種の粒子を加速可能な空芯型高温超伝導サイクロトロン(スケルトン・サイクロトロン, HTS-SC)の開発に取り組んでいる[1]。このコイルシステムを構成する無絶縁 REBCO 高温超伝導コイルは, 高磁場化や高電流密度化により小型かつ高出力強度を実現できる一方で, コイルが経験する電磁力は著しく増加する。さらに, REBCO 線材のテープ形状に起因する大きな遮蔽電流や無絶縁巻線のため流れる巻線間電流に起因する電磁力が発生する。本発表では, 設計を行った実規模スケルトン・サイクロトロンの高温超伝導コイルシステムを対象に, 数値解析により高温超伝導コイル特有の遮蔽電流と電磁応力について評価したので, その結果を報告する。

2. 解析モデル

これまでに実規模サイズの HTS-SC 用 REBCO コイルの設計手法の開発も進めてきたが, 今回は, アクティブ・シールド付きコイルシステムの設計を行った[2]。設計を元に, コイルには, 幅 6 mm, 厚さ 0.1 mm (超伝導層 1.0 μm) の REBCO 線材を用いた巻線で離散化し, 解析モデルとした。通電電流はコイル毎に異なるが, 最大 1.0 A/s で運転電流まで励磁し, その後一定でホールドする。各コイルはパンケーキ巻いたものとする。遮蔽電流解析では, REBCO 線材の厚み方向における電磁場が一様とする近似を用い, 積分方程式, 高速多重極法や超伝導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた三次元電磁場数値解析[3]により遮蔽電流磁場の計算を行った。なお, 無絶縁巻線を採用することになっているが, 今回の遮蔽電流解析では考慮していない。

3. 遮蔽電流磁場

励磁完了時におけるミッドプレーン(加速平面)上の周方向平均遮蔽電流磁場分布を Fig. 1 に示す。今回のコイルシステムにおいては, 周方向平均で最大 4.0 mT 程度の遮蔽電流磁場が生じている。設計時の誤差よりも十分小さいもので, 設計時の誤差を補正するトリムコイルなどで対応できる範囲である。励磁完了時の半径 0.3 m および 0.5 m (取り出し半径) 上の周方向遮蔽電流磁場分布を Fig. 2 に示す。セクターコイルの巻線部に対応して, 遮蔽電流磁場の急峻な変化が見られるが, 半径 0.3 m で最大 6.5 mT 程度であり, 設計時の誤差補正ができれば, ビーム集束に必要なフラッターを乱すほどの磁場ではない。また, rz 平面の巻線断面の電流分布を示す。これを基にした電磁力計算については, 当日報告する。

<謝辞>

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

参考文献

1. 2022年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2C-a01 (2022).

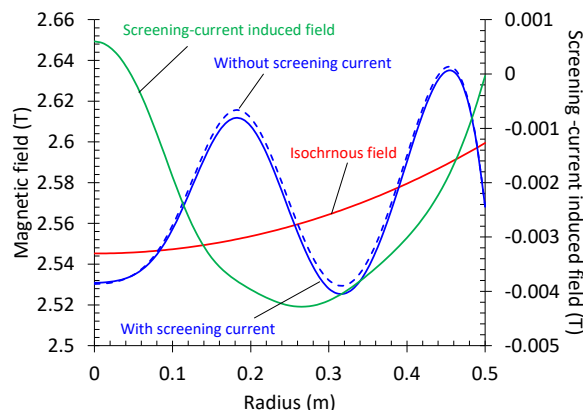


Fig. 1. Azimuthal average of screening current-induced field generated by HTS multi-coil system for HTS-SC.

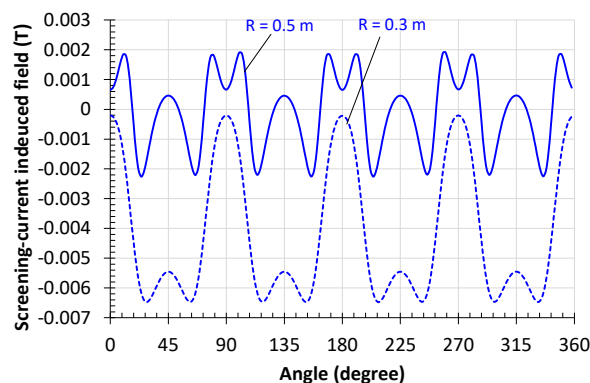


Fig. 2. Azimuthal distribution of screening current-induced field at extraction radius.

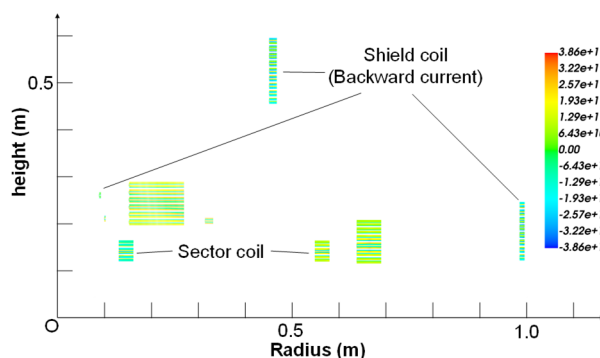


Fig. 3. Cross-sectional view of current density in HTS coils.

2. 2022年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2C-a03 (2022).

3. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 4701505 (2014).

磁化メタン発酵法を活用した水処理プロセスの余剰汚泥抑制の可能性

Potential of excess sludge reduction of wastewater treatment process using magnetic methane fermentation

酒井 保蔵, 荷方 稔之 (宇都宮大); サハ ミヒル ラル (ダッカ大)

SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONNGI Miki (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

余剰汚泥の発生が原理的に少ないメタン発酵法に磁気分離を応用した磁化メタン発酵法と、好気処理を組み合わせ、廃水浄化に伴う余剰汚泥削減の可能性を検討した。その結果、余剰汚泥をほぼゼロに抑制できることがベンチスケール実験により示された。磁気分離によりメタン発酵プロセスからの微生物の漏出を抑制し、後段の好気処理で上乗せ排水基準までの浄化を達成した。曝気電力も大幅に抑制できると予想された。

水処理に伴う余剰汚泥は産業廃棄物の大きな割合を占め、削減技術が期待されている。我々は磁気分離を活用した活性汚泥法である磁化活性汚泥法により微生物の増殖と自己消化をバランスさせ、余剰汚泥ゼロで水処理可能であることを明らかにしたが、中・高負荷条件では汚泥濃度が増加し曝気電力が増加することが課題となった。メタン発酵法は排水中の有機物の大部分がバイオガスに転換されるため微生物の増殖を抑制できる。磁気分離を活用した磁化メタン発酵法で汚濁成分の大部分を処理し、後段で残存有機物を好気的に処理することで、高負荷条件でも曝気動力を抑制した余剰汚泥レスの水処理法を提案することを目的として、ベンチスケール実験により検証した。

2. 実験方法

ベンチスケール実験装置は、磁化メタン発酵槽(MMF, 6 L)、担体流動法(MBBR, 1 L)、接触酸化槽(CO, 2 L)から構成される[1]。Fig. 1 に処理フローを示した。磁化メタン発酵槽は回転磁石ドラム型の磁気分離装置(磁石ドラム直径 97 mm, 長さ 100 mm, 最大磁束密度 80 mT, 6 mm ピッチ多極プラスチック磁石)により、磁化消化汚泥を分離し、汚泥は MMF 槽に戻し、嫌気処理水のみを MBBR 槽に流出する。磁化消化汚泥はマグネタイトを消化汚泥に対してほぼ同濃度に添加した。MBBR は 1cm×1cm×1cm のスポンジ状の微生物担体を 20%程度投入し、曝気により流動化させた。担体に付着した微生物により好気処理が行われ、剥離した微生物と共に CO 槽に流出する。CO 槽は同じスポンジ担体を固定床とし、エアリフトによって槽内を循環させ、担体に付着した微生物で好気処理を行なった。CO 槽の流出は固液分離操作を行わず、そのまま流出させた。濁度の増加を確認したら CO 槽を逆洗し、逆洗液中の汚泥を沈降分離し、全量を MMF 槽に返送した。実験中、水処理プロセスから汚泥の引抜きは行なわなかった。用いた排水は有機成分としてポリペプトンとグルコースを 1:1 で含み、無機栄養塩を加えたものを用い、BOD 濃度 3 g/L とし、流量 3 L/d で連続処理した。9 L のプロセス全体の容積負荷は 1.0 kg-BOD/(m³・d)である。

3. 結果と考察

(1) 水処理性能 初段のメタン発酵の有機物除去率は 270 日の実験期間の平均で BOD 98%, COD_{Cr} 94%に達した。後段の好気処理を含む全体の平均除去率は BOD 99.5%, COD_{Cr} 98%となった。CO からの流出水の BOD 濃度は平均 15 mg/L であった。一般排水基準の 120 mg/L はもちろん、栃木県上乗せ排水基準の 20 mg/L を達成できた。

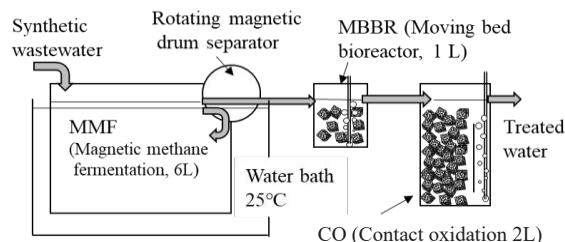


Fig.1 Process flow of bench scale test

SS 濃度は MMF 流出水で平均 134 mg/L となった。MMF 槽内の MLSS 濃度はマグネタイトを含めて平均 43 g/L であるため、磁気分離の SS 回収率は 99.6%となった。MMF 流出水はマグネタイトはほとんど含まれていなかった。メタン発酵は発泡反応であるため微生物の沈降分離は困難である。後段の好気処理に嫌気微生物が混入して不安定化することを防ぐために磁気分離が効果的に機能していると推察された。

(2) 省エネルギー性の評価 90%以上の COD_{Cr} 成分を嫌気処理で除去できるため、後段処理の必要酸素量は全有機物を好気処理する活性汚泥法と比較すると 1/10 以下となる。曝気動力は水処理に必要な電力の大部分を占めるといわれることから、大幅な電力の節約が期待できる。嫌気処理から発生するバイオガスは平均 5 L/d であった。メタンを 60 vol%とすると、流量 3 L/d の本実験条件では 1 m³の排水処理から 1 m³のメタンガスが副生できる。バイオガス発電により、曝気に必要な全電力を得られる可能性がある。また廃熱で 25℃以下の排水を 25℃まで昇温できる可能性がある。水処理に必要な電力の節約は温室効果ガス節約に寄与できる。

(3) 余剰汚泥抑制の評価 メタン発酵は排水中の C 成分の大部分をバイオガス(CH₄と CO₂)に転換するため、活性汚泥法の 1/5 程度の余剰汚泥発生率であるといわれる。本研究では後段の好気処理から発生する余剰汚泥の全量をメタン発酵に返送し、プロセス全体として余剰汚泥ゼロエミッションでの水処理を試みた。270 日の実験で MMF 槽の汚泥濃度は 20~23 g-VSS/L で安定した。1 日の BOD 処理量は 3 kg/m³であり、活性汚泥法であればそのおよそ半分が余剰汚泥になると推察される。余剰汚泥の水分量を 80%とすると、約 7.5 kg の脱水汚泥を抑制できたと見積もることができる。100 m³/d の処理規模で 0.75 トン/d の脱水汚泥を抑制できる。2 万円/トンの処分費として約 500 万/年の汚泥処分費が節約でき、汚泥処理に伴う温室効果ガスも抑制できる。

4. おわりに

磁気分離をメタン発酵に活用した磁化メタン発酵を初段に、担体流動法、接触酸化法の好気処理を後段に構成した水処理プロセスにより、全体の容積負荷 1 kg/(m³・d)の高い負荷条件で余剰汚泥を抑制した省エネルギー性に優れた水処理プロセスが構築できた。水処理性能も良好であった。

参考文献

[1] S. Eda, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.195

電磁力を利用した海水からのマイクロプラスチック分離の研究

Study on micro-plastic separation from sea water by electromagnetic force

西嶋 茂宏, 三島 史人, 野村 直希 (福井工大)
 NISHIJIMA Shigehiro, MISHIMA Fumihito, NOMURA Naoki
 E-mail: nishijiman@fukui-ut.ac.jp (9 point)

1. はじめに

世界の海に存在していると言われているプラスチックごみは、現在、1 億 5000 万トンである。しかも少なくとも年間 800 万トンが新たに流入していると推定されている。このため 2050 年には重量比較で、海洋に存在する魚類の量を上回るとされている。これらは自然界では分解せず、長時間存在し続け、地球規模の問題となることが危惧されている。

さらなる問題は、大きさが 5 mm 以下のプラスチックと定義されるマイクロプラスチックである。これは、その大きさ故に、海流に乗って広範囲に拡散するとともに、プラスチックのもつ特徴(難分解性、生態系の破壊)も持つためその影響が懸念されている。さらにそれ以外にも懸念する大きな理由がある。それは、残留性有機汚染物質(POPs)である。プラスチックは普通、疎水性を示すので、これら POPs を大量に吸着している。また、その大きさ故に、海洋生物がマイクロプラスチックを餌と誤認し、摂取することになる。するとマイクロプラスチックに付着した POPs が海洋生物の脂質に移動し、それら食物連鎖を通して人間に影響を与える可能性が指摘され、問題視されているのである。

海洋流入するプラスチックの 82%がアジアの国々からと言われており、このため、東アジアの海洋におけるマイクロプラスチックの密度は、北太平洋の 27 倍、世界平均の 16 倍と言われている。日本は世界的スケールで見ると、北太平洋還流の中に位置しており、アジアの国々で投棄されたプラスチックが直接、日本近海を通過するため、日本近海は、マイクロプラスチックのホットスポットと言われている。

2. 分離器の設置場所及び分離サイズ

分離器の基本原則とその原理の検証、さらには、その分離プロセスのシミュレーションが可能であることは既に報告した。そこでここでは開発した分離器を、どこに設置し、どの程度のサイズのマイクロプラスチックを分離すべきかを検討した。特に、対象が海洋であるので、設置方法等の工夫が必要である。

我々は、陸上養殖場への応用を想定している。図1にそのフローの概念図を示した。陸上養殖場で海水を、あるいは発電所の温排水を取り入れている養殖場を想定している。その取り入れる配管に分離器を設置し、養殖している魚介類には、マイクロプラスチックの混入した海水が接することがないようなシステムにする。

次に問題になるのが、分離すべきマイクロプラスチックのサイズである。すべて分離できればそれに越したことはないが、それは基本的に困難である。このため、効果的な分離サイズについて検討した。検討している分離器の分離効率、サイズに依存するため、その分離サイズの設定は重要である。

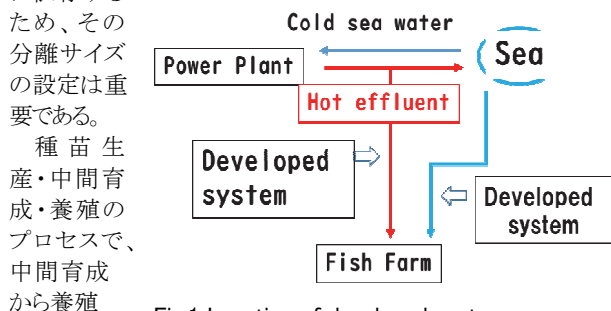


Fig.1 Location of developed system.

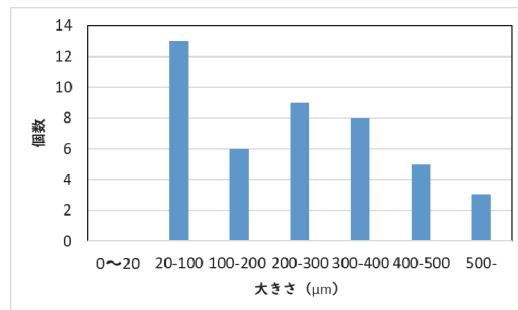


Fig.2 Size distribution of micro-plastics.

の期間を対象とすることにした。中間育成の期間で、魚体長を 3 cm 程度とすると、その飼料の大きさは、0.3-0.5 mm 程度である。つまり、この程度の体長の稚魚に対して、0.3 mm 程度以上のマイクロプラスチックを分離できることが望ましい。これは、稚魚の口の大きさから呑み込める大きさのサイズを検討した論文を基に決定した。なお、中間育成期間は魚体長が小さいため、ここでの POPs の蓄積が無視できると考えると、もう少し大きな cut off size としても良い。

実際に、越前海岸から取水し、存在するマイクロプラスチックのサイズ分布を取った結果を図 2 に示す。これは、18m² の海水の中に存在していたものである。1m³あたり、2-3 個のマイクロプラスチックが存在することが明らかになった。

3. 計算

並行して分離シミュレーションを行った。海水に電流を流し磁場を印加することで電磁力を発生させ、その中のマイクロプラスチックに、その反力を働かすことで運動制御する。計算体系を図 3 に、

Z方向の運動方程式

$$F_z = -mg + \rho V g - 6\pi\eta r(v_z - v_{fz}) \quad (1)$$

X方向の運動方程式

$$F_x = \frac{3}{4}V(J \times B) - 6\pi\eta r(v_x - v_{fx}) \quad (2)$$

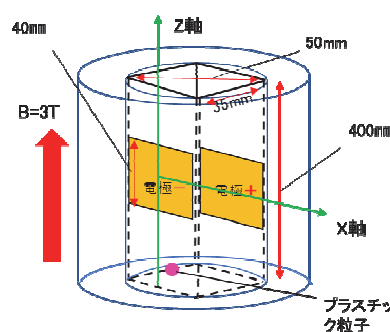


Fig.3 Calculated system

4. 結論

超電導磁石を用い海水にローレンツ力を誘起させ、その反力をマイクロプラスチックに与えることで、マイクロプラスチックの運動制御を行い、マイクロプラスチックを海水から分離できることが明らかになった。特に、実際に海洋に存在するマイクロプラスチックを観察し、その 0.3 mm 以上のサイズを対象として分離するとよいことが示唆された。この検討の下、粒子軌跡計算を行い、分離可能であることを明らかにした。

発電プラント配管中のクラッド除去のための高勾配磁気分離装置に関する検討

Study on high gradient magnetic separation systems for crud removal in power plant pipes.

三島史人, 長濱葵, 野村直希, 西嶋茂宏 (福井工業大学)

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

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

1. はじめに

日本における原子炉を構成する材料は、耐食性の高い金属(ステンレス)が選ばれるが、高温環境において僅かではあるが腐食する。冷却材中の腐食生成物は系内を循環し、炉心部に付着すると、そこで中性子の照射を受けて放射化される。放射化した腐食生成物は剥離し、再び系内を循環し配管等に付着する。炉水中の腐食生成物あるいは配管系に付着した腐食生成物はクラッドと呼ばれている。クラッドはプラント内の熱効率の低下だけでなく、放射線量の上昇の原因となり、作業従事者の被ばくの原因となる。

プラント内の放射線量を減らすためにはクラッドを低減する必要があり、機器等の使用材料の成分管理、復水浄化系の改良、酸素注入などのさまざまな対策が講じられている。また、PWRにおいては二次系給水系で放射化はしていない鉄系のクラッドが水質処理で管理されている¹⁾。

本研究では課題となるクラッドが常磁性体であることに着目し、磁気分離法を用いてクラッドを除去することが可能か検討を行った。本研究では作業被ばくにおいて代表的なクラッドであるコバルト酸化物(体積磁化率 χ は 2×10^{-3} 程度)と、より磁化率の小さいヘマタイト(2×10^{-4} 程度)を模擬クラッド試料として高勾配磁気分離実験し、本稿ではヘマタイトの分離結果について報告する。

2. 磁気分離理論

磁気分離とは、物理的外力として粒子に作用する磁気力の差を利用した分離手法である。分離対象となる粒子に作用する主な力として、磁気力 F_M とドラッグ力 F_D がある。磁気力とドラッグ力は一次元表示すればそれぞれ以下のようになる。

$$F_M = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \frac{\chi}{\mu_0} B \frac{dB}{dx} \quad (1)$$

$$F_D = 6 \pi \eta r_p (v_f - v_p) \quad (2)$$

ここで、 η は媒体の粘性係数、 r_p は粒子径、 v_f は流体の速度、 v_p は粒子の速度、 μ_0 は真空の透磁率、 B :磁束密度、 χ は粒子の磁化率を表す。磁気分離が成立する条件は $F_M > F_D$ を満たすことである。

3. 高勾配磁気分離実験

内径20mm長さ20cmの透明な塩化ビニールパイプ管の中に強磁性細線(SUS430)線径0.3mm、20メッシュ(磁気フィルタ)を100枚装填した高勾配磁気分離流路を、バルブハ永久磁石回路(NEOMAX製、最大磁束密度1.5[T]の磁場領域に設置し、磁気分離流路内に、pH6の α - Fe_2O_3 懸濁液(50ppm)を定量送液ポンプ(ELEYA RP2100)により流速1cm/s(対象粒子径5 μm とし、(1)(2)式より決定)で通水した。通水後、磁気フィルタを通過した液を回収し、吸引ろ過し(孔径0.45 μm 、メンブレンフィルタADVANTEC製)、その乾燥重量を磁気フィルタで捕捉されなかった粒子として測定した。ヘマタイト粒子の初期投入量50mgを100とし、磁気フィルタを通過した粒子重量を引いて、分離率を算出した。(以降の実験結果も同様に分離率を算出している。)

また、分離対象粒子の分散性を検討するために、ヘマタイト粒子(α - Fe_2O_3)のゼータ電位測定を行い、等電点を確認した。本研究ではBWRプラント配管中のクラッドを対象に検討しており、BWR炉内の水質を管理値内のpH(原子炉水と給水

に重点をおいての管理でpH5.8~8.5、復水脱塩装置出口でpH 6.5~7.5 at 25°Cとされている²⁾。)を参考に、本実験では、懸濁液をpH6とし(平均粒子径50 μm)、磁気分離を実施した。その分離率88%となった。分離後の液は薄い赤色をしており、小粒径の粒子(粒子径5 μm 以下の粒子)が磁気分離できていないことが確認された。また、永久磁石の磁場形状では、磁気分離流路内の磁気フィルタに一定の磁気力を作用させられなかったことも分離率低下の要因と考えられる。

そこで、ソレノイド型超電導磁石を用い、分離流路に最大磁束密度2Tを印可した分離実験を行った(図1)。その結果、分離率は99.9%以上であった。図2に示すように、ヘマタイト粒子は、流入部の磁気フィルタから後段に向かい均一に捕捉され、100段のうちおよそ30段付近までに、全粒子が捕捉されていたことが確認された。

実験条件は、印加磁束密度2Tであり、磁気フィルタ全体に対し、均一な磁場を印可でき、磁場の向きが流体の流れの向きと一致したことで、各磁気フィルタにおいて、有効に利用できたと考えられる。

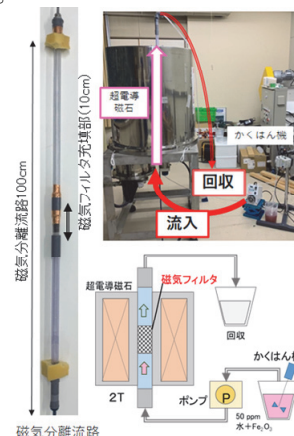


Fig.1 Schematic view and photo of superconducting high-gradient magnetic separation system.

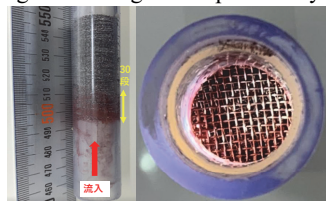


Fig.2 Magnetic filter after high gradient magnetic separation

4. まとめ

本研究ではBWRプラントの模擬クラッドを対象に超電導高勾配磁気分離を実施し、分離可能なことを示した。今後は、粒子の粒度分布の状況や性状について詳細に検討し、さらに、磁気フィルタの形状や配置により、破瓜条件を検討して、ゆく必要がある。

参考文献

- 石樽 顕吉 他,「原子力発電プラントの水化学管理の実績と将来展望」,日本原子力学会誌, Vol. 37, No.10 (1995)
- 原子炉水化学ハンドブック 7章 BWR1 次冷却系の水化学管理 日本原子力学会編 P194-195

常磁性体分離のための淘汰管を用いた磁気分離装置の高度化

Advancement of magnetic separation systems using selection tubes for paramagnetic materials.

長濱葵, 野村直希, 西嶋茂宏, 三島史人; (福井工業大学)

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

E-mail: aoi246911@gmail.com

1. 緒言

常磁性粒子を対象とした従来の高勾配磁気分離法では、磁気フィルターと超電導磁石を用いた装置を使用している。常磁性体の磁気分離において、7T 以上では分離効果は大きいものの、できる限り強磁場を使用せず分離効率を上げることが工業的には求められている。

そこで、淘汰管分級に磁気分離法を適用する。淘汰管内に停留し、見かけ上無重力状態にある小粒径の粒子に磁場を印加することで低磁場でも常磁性粒子を分離可能とする手法を提案した。さらには淘汰管内に高勾配磁気フィルターを適用することで、印加磁場をより低磁場化する手法についての検討を行ったので報告する。

2. 淘汰管の原理

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

$$F_D = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f)g - 6\pi\eta r(v_f - v_p) \quad (1)$$

ここで、 r は粒子半径 [m]、 ρ_p は粒子の密度 [kg/m³]、 ρ_f は媒質の密度 [kg/m³]、 η は流体の粘度 [Pa·s]、 v_f は流体の速度 [m/s]、 v_p は粒子の速度 [m/s] である。 v_f を 0 としたときに導かれる粒子の沈降終端速度 v_s を式 (2) に示す。

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

3. 磁気分離理論

磁気分離を行う際、分離対象の粒子には磁場発生源 (高勾配磁気分離の場合、磁気フィルター細線) に引き寄せられる磁気力 F_M と、流体からの抵抗力であるドラッグ力 F_D が作用する。 F_M は式 (3) で表される。

$$F_M = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\chi}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (3)$$

ここでの $\mathbf{B}$ は外部磁場 [T]、 r は分離対象粒子の粒子半径 [m]、 χ は体積磁化率、 μ_0 は真空の透磁率 [H/m] である。

磁気力 F_M がドラッグ力 F_D より大きければ、磁気分離可能となるが、淘汰管内では粒子が浮遊しているので、磁気力に対するドラッグ力がほぼ無いと考えられ (厳密には磁気けん引する際のドラッグ力は発生する)、弱い磁気力においても磁気分離可能となる。

4. 常磁性粒子を分離するための淘汰管磁気分離の検討

先の実験において、淘汰管に高勾配形成磁気フィルターを適用した淘汰管磁気分離を実施し、0.5T (625T²/m) で常磁性粒子を示す色ガラスの磁気分離が可能であった。そこで淘汰管内に停留状態の粒子に同様の高勾配磁場を印加した場合、分離領域において、粒子作用する(1)式のドラッグ力と、(3)式の磁気力の差分を計算し、粒子の停留状態の変化について検討した。

本研究では Fig.1 に示すように超電導磁石の高磁場領域内に浮遊する常磁性 (体積磁化率 3.14×10^{-4}) を示す粒子を磁気けん引する実験体系を想定している。管内の流速は、式 (2) から粒子径 75 ~ 240 μ m の粒子が停留する平均流速

35mm/s とした。管内の径方向位置 (管壁から管中心) の流速分布を区分化し、その流れ場のみと流れ場+磁気力場で停留する粒子径の変化を Fig.2 に示した。図中の黒色のプロットは、流れ場のみ (従来の淘汰管) で、それぞれの径方向位置で停留可能な粒子の粒子径 (図縦軸) を示している。例えば、横軸 $r=0$ では 250 μ m の粒子を捕捉できることを示している。また、白色のプロットは、流れ場+磁気力場で、黒色のプロットと同条件の流速時に、磁気力でアシストし停留可能となる粒子径である。計算結果より、磁気力を作用させることで、磁気力を作用させると $r=0$ で 100 μ m の粒子を捕捉できることが分かる。

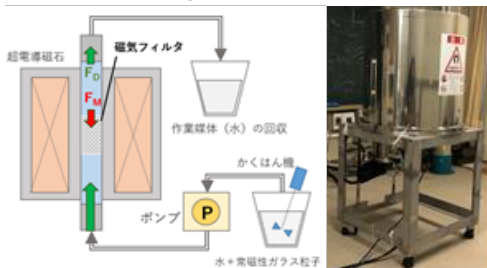


Fig.1 Schematic illustration of separation system and photo of magnet field source of the system.

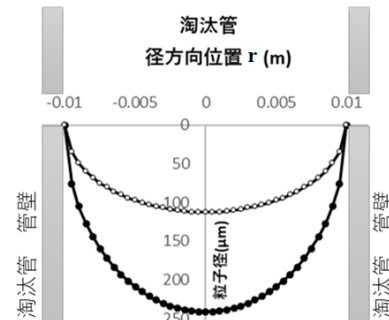


Fig.2 Particle size that can be captured in the separation tube (●: without magnetic force, ○: with magnetic force).

5. まとめ

本研究では低磁場印加条件で高勾配磁気分離を適用した淘汰管を模した計算を行った。その結果から淘汰管の流れ場のみよりも、磁気力を用いることで停留制御可能な粒子を小さくでき、結果的に捕捉粒子の分布幅が狭くなり、従来の淘汰管よりも高精度に粒子を分級制御可能であることが分かった。

今後は、超電導ソレノイド磁石を用いた低磁場印加条件での確認実験を行ってゆく。さらに磁気分離装置として粒子の捕捉および回収などの最適方法を検討してゆく。最終的には、粒子に作用させる磁気力の最適化のために、強磁性細線フィルターの線径・形状や淘汰管内での配置方法の確立も目指してゆく予定である。

参考文献

1. N.Nomura, F.Mishima, S.Nishijima, "Development of Novel Magnetic Separation for Paramagnetic Particles Using the Selection Tube", IEEE Trans. on Appl. Supercond. (2000) | Vol.32, (6) PP.1-4
2. F. Mishima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.167

ローレンツ力を利用した海水・油分離装置中の不導体に作用する力

Study of the force acting on an insulator in the sea water/oil separation equipment using Lorentz forces

赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹 (神戸大)

AKAZAWA Teruhiko, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki (Kobe Univ.)

E-mail: akazawa@maritime.kobe-u.ac.jp

はじめに

本研究グループが研究しているローレンツ力を利用した海水・油分離装置の原理を Fig.1 を用いて以下に説明する。海水が流れるダクトに対向する 1 組の電極板を取り付け、海水に電流密度 J で通電を行う。また、海水の流れる方向に磁場 H を印加する。海水は導電体であるため、ローレンツ体積力と呼ばれる電磁力 F_L がはたらく。一方、油は不導体であるため電磁場からのローレンツ体積力がはたらかず、海水からの反力より F_L と逆向きの分離力 F_s がはたらく。分離空間の後方に仕切板を導入し、流路を分割すれば、海水の流れを汚水排出側の流れと、浄化された海水排出側の流れに分けることができる。油や魚卵を不純物として海水に混ぜ、この手法で分離が実際にできることを報告[1]している。

これまでの研究では、不導体に作用する F_s は、海水に作用する F_L の単純な浮力としてしか議論されていなかった。本研究では、 F_s についてより詳細に理論的に調べたので、その報告を行う。

2 次元流体モデルでの分離力

2 次元流体モデルを用いて、不導体にはたらく力を考える。 xy 面内に不導体のかたまりがあり、流体中に静止しているとする。不導体以外の領域は、密度 ρ 、粘度 μ 、電気伝導度 σ の流体で満たされているとする。流体に無限遠で電流密度が x 方向で大きさが J_0 となるように電場を、 z 軸の正方向に磁束密度の大きさが B の磁場を印加する。点 (x, y) における電位を $\phi(x, y)$ とすると、電流密度 J は

$$J = -\sigma \nabla \phi \quad (1)$$

である。不導体の境界で、単位法線ベクトルを n とすると

$$J \cdot n = -\sigma \nabla \phi \cdot n = 0 \quad (2)$$

が成り立つ。

ところで、ローレンツ体積力を受ける流体の運動は次式ナビエーストックス方程式で支配される。

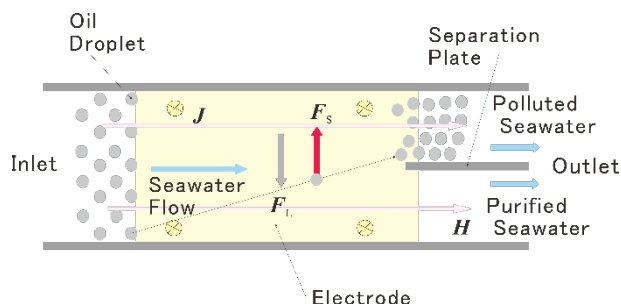


Fig.1 Schematic diagram of the seawater/oil separator using Lorentz forces.

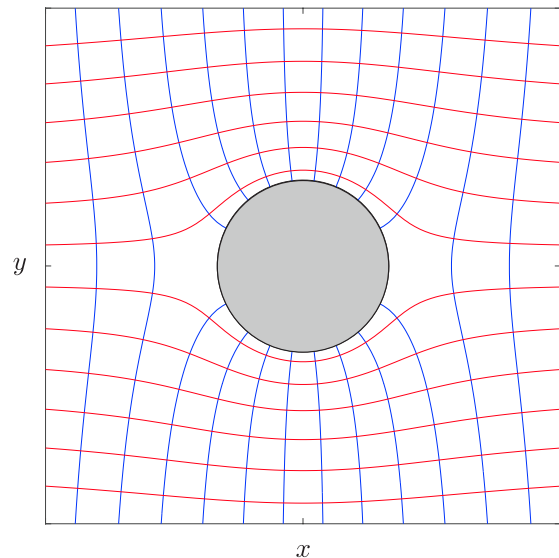


Fig. 2 Equipotential lines (blue) and isobaric lines (red) around an insulating circle (2D fluid model). The insulator boundary is isobaric.

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla p + \mu \Delta v + J \times B \quad (3)$$

いま、 $v = 0$ の静止流体を考えると、(3) は

$$-\nabla p + J \times B = 0 \quad (4)$$

となる。2 次元系であることを考慮し、(1)、(4)から

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -B\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = B\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5)$$

の関係が成り立つ。(2)、(5)より、圧力 p が調和関数で与えられ、不導体の境界線上で p が一定となることがわかる (Fig. 2)。つまり、流体が静止している場合、 F_s が流体中の不導体に作用しないため、不導体も静止したままとなる。この結果は、2 次元流体モデルが成り立つ環境では、ローレンツ力を利用した分離装置を用いて、海水と不導体の分離ができないことを意味している。

本研究発表会では、3次元流体中の不導体球にはたらく F_s の考察も行う予定である。海水と不純物の電気伝導度の差により不純物まわりには電場の歪みが生じており、3次元モデルでは2次元モデルと異なり、これにより流体は静止することができず不純物まわりに局所流れが起きる。この局所流れにより不純物には F_s がはたらくが、 F_L による単純な浮力では説明できないことがわかる。

参考文献

1. T. Akazawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.63.

Bi2223 線材と Nb-Ti 線材の Bi-Pb はんだ接合の低抵抗化 Low resistance of Bi-Pb solder joints between Bi2223 and Nb-Ti wires

井上 和朗, 松本 凌, 小林 賢介, 内田 公, 西島 元, 竹屋 浩幸, 北口 仁, 高野 義彦 (NIMS)
INOUE Kazuo, MATSUMOTO Ryo, KOBAYASHI Kensuke, UCHIDA Akira, NISHIJIMA Gen, TAKEYA Hiroyuki,
KITAGUCHI Hitoshi, TAKANO Yoshihiko (NIMS)
E-mail: INOUE.Kazuo@nims.go.jp

1. はじめに

2014 年に開発された 1020 MHz (24 T) 核磁気共鳴装置 (NMR) の超伝導磁石には、最内層コイルに $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223) が用いられたが、NbTi-Bi2223 超伝導接合技術が確立しておらず、永久電流運転ではなかった。現在、1.3 GHz (30.5 T) NMR 用超伝導磁石の開発が進んでいる[1]。我々は、Bi-Pb-Sn はんだに Bi2223 線材を Ag シースごと挿入して接合する方法で、NbTi-Bi2223 の接合に取り組んできた[2]。NbTi 線材のはんだ接合技術は確立しているものの、NbTi と Bi2223 の異種接合技術を確立するためには、Bi2223 のはんだによる良好な超伝導接合条件を見出す必要がある。しかしながら、Ag シースを溶融除去した Bi2223 線材のはんだによる超伝導接合の実現は難しい。

代替法として Ag シースを除去せずに Bi2223 線材のはんだによる接合を試みたところ、Ag シースを溶融除去しないほうが接合抵抗を低減できることが分かった。本研究において、開発目標である $0.1\text{ n}\Omega$ 以下の接合抵抗を得るために、接合処理温度の最適化及び接合長さの長尺化を実施した。

2. 実験方法

Pb 及び Bi の原材料をモル比 50.2:49.8 で計量、混合し、真空引きした石英管中で加熱溶融することで超伝導はんだを合成した。接合処理温度と接合抵抗の関係を調べるために、Bi-Pb はんだと接合長さ 3 cm の 2 本の Bi2223 線材 (type HT-NX, 住友電工) をガラス容器中に充填し、電気炉中で $140\sim 310^\circ\text{C}$, 1h, 加熱溶融し接合処理を行った。次に、接合長さと接合抵抗の関係を調べる目的で、NbTi 線材 (k55/1.3/60, JASTEC) といくつかの接合長さを有する Bi2223 線材をガラス容器中の Bi-Pb はんだで接合した。作製例として、Fig.1 に接合長さ 42 cm の試料を示す。また、液体ヘリウム中で、4 端子法による電流-電圧測定から自己磁場下での接合抵抗を見積もった。さらに、はんだ接合部を研磨し、SEM による接合界面の断面観察も行った。

3. 結果と考察

Fig.2 に接合処理温度を変えて接合した試料の接合抵抗を示す。 310°C で接合処理した試料では、高い接合抵抗を示すが、接合温度を下げるにつれて低抵抗化し、 210°C 以下で接合処理した試料は、ほぼ同じ抵抗値となった。

接合界面の状態の接合処理温度による影響を調べる目的で、SEM による接合界面の断面観察を行ったところ、接合温度 310°C の試料では、Ag シースが、溶融除去され Bi2223 とはんだが直接的に接合していた。一方、接合温度 160°C の試料では、Bi2223 が Ag シースで完全に覆われた状態が保持されており、Bi2223-Ag はんだ間の接合が実現していた。接合抵抗と SEM による接合界面像から、接合温度を低くして、Ag シースの溶融を抑制した試料では、Bi2223-はんだ間の接合抵抗を低減できることが分かった。

次に、接合長さが 3cm の試料では、開発目標の $0.1\text{ n}\Omega$ に届かないため、接合長さを伸ばした試料を作製した。Fig.3 に接合長さを変えて接合した試料の接合抵抗を示す。接合抵抗は、接合長さ(接合面積)と逆比例関係にあることが分かる。

接合長さが約 40 cm 以上の試料で、 $0.1\text{ n}\Omega$ 以下の接合抵抗を達成することができた。

謝辞

本成果は、JST 未来社会創造事業 [JPMJMI17A2] の支援によって得られたものです。



Fig.1 Sample with joint length of 42 cm

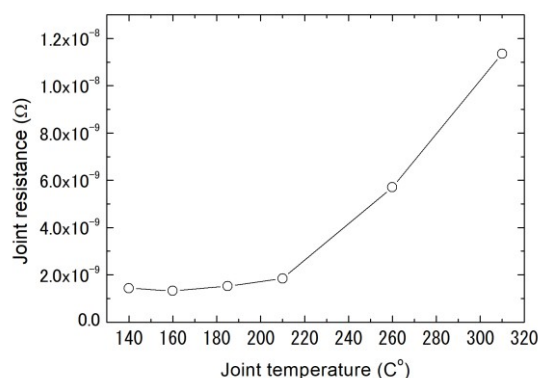


Fig.2 Joint resistance as a function of joint temperature

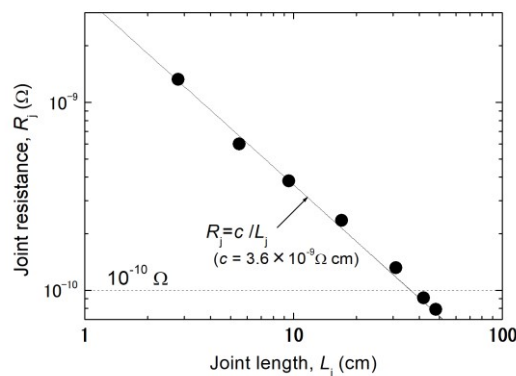


Fig.3 Joint resistance as a function of joint length

参考文献

1. H. Maeda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) p.4602409
2. R. Matsumoto, et al.: Appl. Phys. Express, Vol. 10 (2017) p.093102

REBCO 線材内部層間抵抗の臨界温度近傍までの 温度依存性評価

Evaluation of temperature dependence of the interface resistance inside REBCO tape up to critical temperature

阿竹 洋輔, 伊藤 悟, 高橋 弘紀, 橋爪 秀利 (東北大)

ATAKE Yosuke, ITO Satoshi, TAKAHASHI Kohki, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yosuke.atake.r6@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材のラップジョイントに関して、接合に用いられる線材のメーカー、型番、Lot によって、接合抵抗が大きく異なることが報告されている[1]。この原因のひとつとして、線材内部の Cu/Ag, Ag/REBCO 層界面に存在する接触抵抗（層間抵抗）のばらつきが考えられており、実際に、単位面積相当の層間抵抗である層間抵抗率は 4–100 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ (77 K, self-field) と大きく異なることが報告されている[2,3]。このため、層間抵抗の発生メカニズムの解明及び、その低減が線材接合技術において重要となる。我々のグループは、住友電工社製の REBCO 線材 (SCC®) の層間抵抗率を 10–70 K, 0–15 T 磁場中での測定を実施し、層間抵抗率は 10–40 K では磁場の増加に対し減少し、50–70 K では増加する、非金属的な挙動を示す結果を得た[4]。本研究では、銅氧化物/金属界面である Ag/REBCO 界面に着目し、REBCO の物性の影響をより詳細に調査するため、10 K から臨界温度 (T_c) 付近までの層間抵抗率温度依存性を評価した。

2. 実験方法

本実験では SuperPower 社製 (SCS4050-AP), フジクラ社製 (FYSC-SCH04) の 4 mm 幅の REBCO 線材 2 種を用いた。Fig. 1 に試験部の概念図を示す。試験体を試験体下部から伝導冷却し、ヒータを用いて 10–95 K に保った。層間抵抗率の測定方法として、コンタクトプローブ CTL (Current Transfer Length) 法[4,5]を用いた。これは線材表面にコンタクトプローブを用いて電流を与え、電流が REBCO 層に転流する部分の表面電位を測定することで、層間抵抗率を求める方法である。初期電位から $1/e$ に減少する距離を転流距離 (CTL) とし、別途、数値解析で求めた層間抵抗率と転流距離の関係から層間抵抗率を算出した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に得られた層間抵抗率温度依存性を示す。SuperPower, フジクラ社製の線材でそれぞれ 91.5 K, 94.8 K で REBCO の常伝導転移が観測された。結果として、10–80 K までは温度の上昇に対して減少傾向が得られた一方で、85 K 以上の領域では、急激に上昇する結果が得られた。この挙動は銀や銅の抵抗率の温度上昇に対する変化では説明ができないものであるため、REBCO の物性が層間抵抗率の挙動に大きな影響を与えている可能性が考えられる。Ag/REBCO 界面付近において、REBCO の酸素欠乏層が存在する[6]。また、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ は δ が増加するに従い、 T_c が低下し、 $\delta \geq 0.6$ で非超伝導化すること[7]が報告されている。本研究で用いた線材の Ag/REBCO 界面付近にこのような酸素欠損の分布が存在すれば、温度の上昇に従い、酸素欠乏層が段階的に常伝導転移し、層間抵抗率の上昇につながったと考えることができる。今後、線材の断面観察による REBCO 層内の酸素分布の調査や、常伝導状態の REBCO の温度に対する抵抗率の挙動などの物性に関する調査が必要である。

4. まとめ

本研究では、REBCO 線材の層間抵抗率の挙動に対し、REBCO の物性に着目し、 T_c までの温度依存性評価を実施した。その結果、 T_c 付近で急激な層間抵抗率の上昇が得られた。この結果は層間抵抗率の挙動に REBCO の物性が大きな影響を与える可能性を示唆するもので、今後、線材の REBCO 層内の酸素欠損という観点から研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H01884 の助成および JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 の支援を受けたものです。また、本研究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における共同研究 (課題番号 20H0205, 202012-HMKGE-0202, 202112-HMKGE-0202) により実施されたものです。

参考文献

1. Y. Kim et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) Art. no. 6800704
2. S. Ito et. al.: Nucl. Fusion, Vol. 61 (2021) Art. no. 115002.
3. N. Bagrets et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 31 (2021) Art. no. 6601508
4. Y. Atake et. al.: 27th International Conference on Magnet Technology 2021, WED-PO2-613-06
5. R. Hayasaka et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) Art. no. 9000805
6. T. Watanabe et. al.: Phys. Procedia, Vol. 45 (2013) pp.165–168
7. X. Zhang et. al.: ACS Appl. Mater. Inter., Vol. 13 (2021) pp. 54204–54209

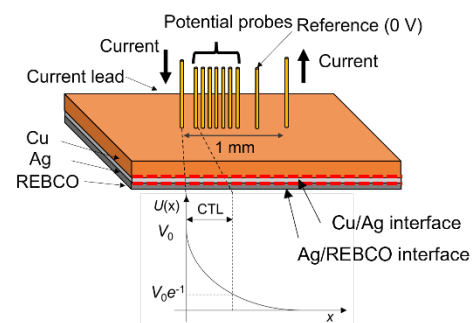


Fig. 1 Schematic of test section

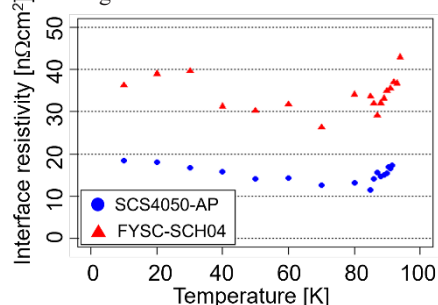


Fig. 2 Temperature dependence of the interface resistivity

送電ケーブル応用を目指した REBCO 線材の低抵抗接続法の基礎検討(2)

Basic study of low resistance joining method for REBCO tapes
for transmission cable application (2)

加藤誠士郎, 筑本知子(中部大学)

KATO Seishiro, CHIKUMOTO Noriko (Chubu Univ.)

E-mail: ts22001-7481@sti.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導の応用の一例として抵抗値が 0 であることを活かした超伝導送電が存在する。我々は送電用のケーブルの開発を目指しているが、開発の中でも重要な課題として、超伝導線材の接合がある。送電用として用いるためにはケーブル長は数 10 km 必要であるが、製造単長は BSCCO 系で 1 km 弱、REBCO では数 100 m 程度であるため、複数の線材を接続して用いることになる。そこで、性能を損なわずにいかに低抵抗で接続できるかが重要である。

超伝導を用いた送電技術において必ずしも完全なる 0 抵抗のケーブルは必要なく、故に超伝導接続は要求されない。が、ケーブル組立て現場等のオンサイトでの接続が要求されるため、これまでは様々な技術上制約からテープを金属シースごと重ね合わせはんだ接続する方法が一般的に行われてきた。その際に加熱による劣化が生じる可能性があるため、融点の低い共晶はんだ (PbSn 系) あるいは Pb フリーの低融点はんだを使用される。しかし、Pb を用いた製品の国際的な規制は年々強まる一方であり、またそれらを用いた接続法で安定した特性を得るためには、熟練を要する。そこで我々は、REBCO 線材について、簡便でかつはんだを使用しない接合方法についての研究を行っている。今回はこれまで行われた基礎研究を進展させ、接合特性と再現性の向上に向けて条件検討を行った結果を報告する。

2. 実験及び結果

低抵抗接続法の検討にあたって、本実験で使った REBCO 線材の模式図を Fig.1 に示す。以前我々が行っていた検討から、線材の銅安定化層を重ね合わせ加熱加圧することによって直接拡散接合を行う方法での接合を目指した。拡散接合の接合強さは接合時の温度と圧力、またその時間、そして接合する金属表面の清浄さ平滑性などに影響される。そのためまずは、銅テープ (NILACO 製、厚さ 100 μm 、幅 5 mm) を用いたプロセス検討を行った。その結果、洗浄に用いる溶液はクエン酸 0.1 mol/L、接合圧力 30 MPa、10 分間で電気抵抗値が最も低くなった。

続いて、SuperOx Japan 製 GdBCO 線材を用いた接合を試みた。銅テープと同条件で接合を試み、接合に成功した。

更なる低抵抗の接続を得るため、接合雰囲気に着目し接合を行った。これまでの実験では加熱加圧は熱プレス機を用いて大気中で行っていたが、金属表面の酸化を防止するため、加圧方法を金具とボルトによる締め上げ、加熱方法を窒素を導入した電気炉に変更し、拡散接合を行った。温度は変わらず 200 $^{\circ}\text{C}$ 、圧力はプレススケール (富士フィルム) による測定で約 45 MPa 程度であり、窒素の流量は 0.1 L/min である。この条件で接合は成功した。以上の方法で接合された超伝導線材の外観写真を Fig.2 に示す。

これらの接合した超伝導線材について室温及び液体窒素温度で四端子法により接合部の抵抗を測定した。抵抗測定時の端子間距離は 2 cm とし、一つの試料につき三回測定を行った後、電流方向を反転し三回測定した。各種条件

での接合試料の抵抗値は常温では大きな差はなかったが、液体窒素温度では抵抗値に差がみられた。本実験で最も低い抵抗値を示した条件は 50 $^{\circ}\text{C}$ の 1 mol/L クエン酸に 10 分浸漬することで表面洗浄し、金具をボルトで 100 cN $\cdot$ m のトルクで締め上げ加圧し、窒素ガス雰囲気下で 10 分間 200 $^{\circ}\text{C}$ で加熱した場合であった。その抵抗値は 54.6 n $\Omega \cdot \text{cm}^2$ となった。この時の測定結果 (Sample #1) を table 1 に示す。これは使用した超伝導線材メーカーがはんだを用いて接合した場合の接続部抵抗値 70 n $\Omega \cdot \text{cm}^2$ よりも小さい値である。しかし、同じ条件でも他の試料 (Sample #2) では table 2 に示すように 217.4 n $\Omega \cdot \text{cm}^2$ となり、同条件のサンプル間の差が大きく表れた。

現状では低抵抗接続の再現性の向上及び、磁場分布測定による線材中の電流経路の確認を行っているところである。

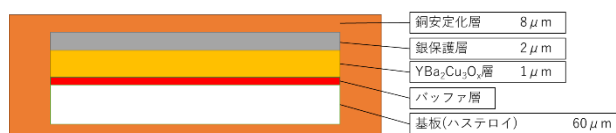


Fig.1 Schematic illustration of REBCO superconducting tape



Fig.2 Photograph of joined REBCO tapes

Table 1 Resistivity of joined REBCO tape (Sample #1)

Current direction	Joint resistance (n $\Omega \cdot \text{cm}^2$)	
	forward	reverse
1	55.2	60.5
2	55.9	52.8
3	45.4	57.8
average	54.6	

Table 2 Resistivity of joined REBCO tape. (Sample #2)

Current direction	Joint resistance (n $\Omega \cdot \text{cm}^2$)	
	forward	reverse
1	218.4	214.1
2	218.7	214.8
3	219.5	218.6
average	217.4	

液体水素冷却超電導発電機向け REBCO 集合導体の開発(1)

REBCO 線材スパイラル試験

Development of REBCO assembled conductors for liquid hydrogen cooled high-temperature superconducting generators (1) -Spiral Tests of REBCO wires-

生田 勝利、大屋 正義(関学); 三浦英明、服部泰佑、殿岡俊(三菱電機)

IKUTA Shohri, OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.); MIURA Hideaki, HATTORI Taisuke, TONOOKA Shun (Mitsubishi Electric)
E-mail: shohri1231@kwansei.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて液体水素の冷熱を活用した 600 MW 級高温超電導発電機を開発する。そのため 6 kA 級の大電流導体が必要となり、複数本の REBCO 線材を束ねた集合導体の設計・製造技術の開発を開始した。本研究では基板厚 50 μm の線材を用いてスパイラル試験を行い、スパイラルピッチに対する臨界電流(I_c)値の維持率を検証した結果について報告する。

2. 600 MW 級発電機の設計

ターゲットとする 600 MW 級発電機の界磁コイルを超電導化するためには 6 kA 級の大電流導体が必要となる。6 kA の大電流を 1 本の線材に流すのは困難であり、数本の線材を束ねた集合導体化技術が必要となる。20 K, 5 T において 6 kA の通電電流を負荷率 70% で流すためには 8,571 A の I_c が必要になる。一般的な人工ピン入り線材では、77 K, s.f. の I_c と 20 K, 5 T/c の I_c の比率は 4.2 倍であるため[1]、77 K で必要な I_c は 2,040 A となる。外径 6 mm の集合導体を検討しており、外径と線材 1 本あたりに流せる電流値を考慮すると、直径 5 mm のフォーマーに 18 枚の線材を 6 層構造にする集合導体が開発ターゲットの目安となる。今回はフォーマー径 4 mm に対する I_c 維持率の検討を行った。

3. 解析方法

Fig.1 に線材スパイラル曲げ計算モデルを示す。半径 R のフォーマーに対して、スパイラルピッチを L_p 、線材の基板厚を t_h 、銅メッキ厚を t_c として、超電導面を内側にして巻き付けた場合の曲げひずみ ε_{in} を以下の計算式で求め、超電導層の歪みと超電導特性の維持率の関係[2]から I_c 維持率を算出した。Fig.2 に実線で解析結果を示す。

$$\varepsilon_{in} = \frac{\sqrt{4\pi^2(R+t_c)^2 + L_p^2}}{\sqrt{4\pi^2(R+t_c+t_h/2)^2 + L_p^2}} - 1$$

4. 実験方法

ハステロイ基板厚が 50 μm 、銅メッキ厚が 20 μm の線材を用いて、直径 4 mm のフォーマーに対してスパイラル試験を実施した。スパイラル曲げ前の I_c を測定した後、フォーマーに線材を巻き付けてスパイラル曲げ後の I_c を測定し、スパイラル曲げ前後の I_c を比較して維持率を算出した。

5. 実験結果・考察

Fig.2 にスパイラル曲げ後の I_c 維持率をドットで示す。解析結果とは異なり、実験値はスパイラルピッチが狭くなるほど I_c 維持率が上昇した。本結果は、スパイラルピッチが短いほど隣り合う線材とのギャップが狭くなり、線材に印加される垂直磁場が低減されたためと推測するが、詳細は講演で説明する。スパイラル曲げによる I_c の低下は確認されず、フォーマー径 5 mm に対して基板厚 50 μm の線材でも設計できる可能

性がある。講演では、超電導層を外側にして巻き付けた時の I_c 維持率についても報告する。

6. まとめ

600 MW 級発電機の界磁コイルを超電導化するため 6 kA 級の大電流導体の開発を開始した。基板厚 50 μm の線材でスパイラル試験を行い、スパイラルピッチに対する I_c 維持率を検証した結果、フォーマー径 4 mm に対しても I_c の低下は確認されなかった。今後は基板厚の異なる線材でスパイラル試験を行い、導体設計のためのデータベースを構築する。

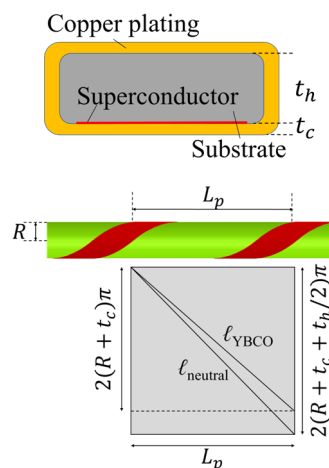


Fig.1 Wire cross section and calculation model of wire strain for spiral bending

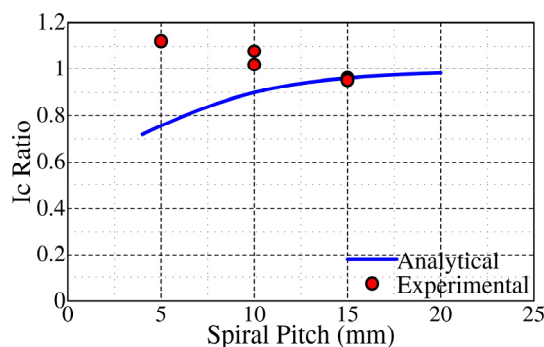


Fig.2 Comparison of experimental and analytical results for former diameter of 4 mm

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)の助成事業(JPNP20004)の結果得られたものである。

参考文献

1. S. Fujita et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) #001505
2. D. C. van der Laan.: Supercond. Sci. Technol., Vol.32 (2019) #033001

全超電導回転機におけるエアギャップ中の希薄ガスを用いた 回転子冷却構造の基礎検討

Fundamental Study of Rotor Cooling Structure Using Dilute Gas in Air Gap in Fully Superconducting Rotating Machines

赤坂 和紀, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大), 岡井 敬一, 田口 秀之 (JAXA)

AKASAKA Kazuki, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo), OKAI Keiichi, TAGUCHI Hideyuki (JAXA)

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

1. はじめに

カーボンニュートラルに向けて、航空機の推進系においても電動化の動きがある。推進用モータの高出力密度化が求められる中で、全超電導回転機の適用が期待されている。しかし、固定子と回転子のそれぞれに冷却機構を設ける必要があり、構造の複雑化が問題となっている。そこで、冷却構造を簡略化するためにエアギャップ中の希薄ガスの熱伝導と対流熱伝達を用いた回転子の冷却方法の実現性について検討した。数値解析では静止状態と回転状態における回転子表面の温度を算出するため、有限要素法解析ソフト COMSOL®を利用し、実験装置をモデルに非定常状態熱解析を行った。本講演では回転子の冷却特性を数値解析および実験結果より考察した結果を報告する。

2. 実験

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。実験装置自体は液体窒素を用いて浸漬冷却し、回転子は希薄ガスによる伝導冷却を行なった。リークによる他気体混合の影響を最小限にするため、容器内は真空状態で冷却し、230 K まで冷却した後ヘリウムガスを注入した。注入直後の容器内圧力は 0.032 MPa であった。ヘリウムガス注入後の回転子表面温度は白金温度センサを用いて測定した。

3. 解析条件

静止状態ではヘリウムガスの対流は考えず、単純な熱伝導解析とした。実験条件に合わせて容器内圧力は 0.032 MPa とし、初期温度は 230 K、ヘリウム容器外壁温度は液体窒素温度の 77 K として回転子表面温度を算出した。

その一方で、回転状態においては静止状態の解析モデルをもとに対流を考慮し、回転子表面の風損による発熱も考慮した。気体-固体間の熱伝達は熱伝達係数の実験式[1]を用い、熱伝達条件を与えた。回転数をパラメータとし、各回転数における回転子表面温度を算出した。

4. 結果

Fig. 2 に実験結果と静止状態の解析結果を比較したものを示す。実験結果より、回転子を回転させていない静止状態においても回転子表面が 80 K まで冷却された。この結果より、希薄ガスを用いた伝導冷却でも回転子を十分に冷却することが可能だと考えられる。

さらに回転状態の解析結果 (Fig. 3) より、回転数を増加させることで対流により冷却が促進されることが分かった。しかし、回転数が 1000 rpm の時は回転子表面が 77 K まで冷却されているのに対し、10000 rpm まで増加させると温度が僅かに上昇し、79 K で収束する結果となった。1000 rpm 時は風損により最大 4×10^{-4} W/m² の熱が生じるのに対し、10000 rpm の時は最大 0.3 W/m² の熱が生じているため、10000 rpm の時は風損による損失が大きいためにより回転子表面温度が上昇したと考えられる。

参考文献

1. M. Fenot, et al.: International Journal of Thermal Sciences, Vol.50 (2011) pp.1138 -1155

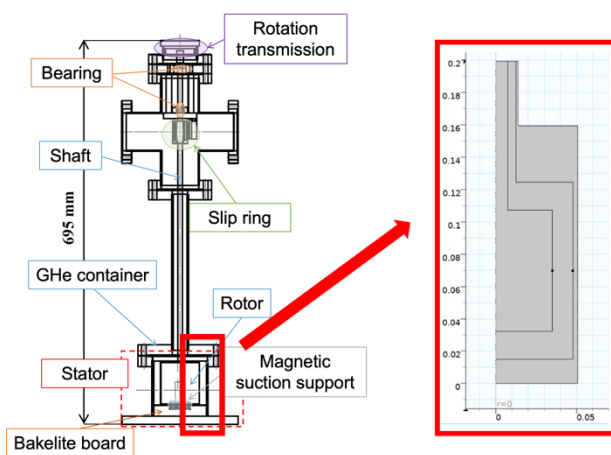


Fig. 1 Experimental model and Analytical model

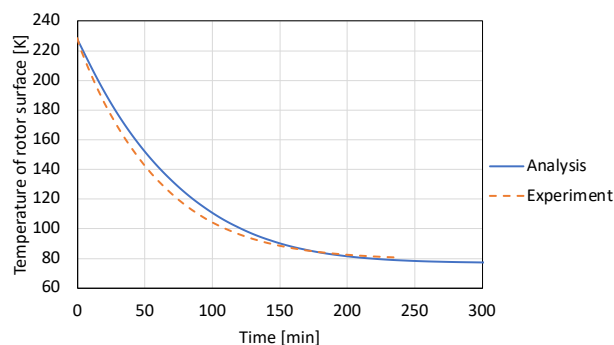


Fig. 2 Comparison of experimental and analytical results

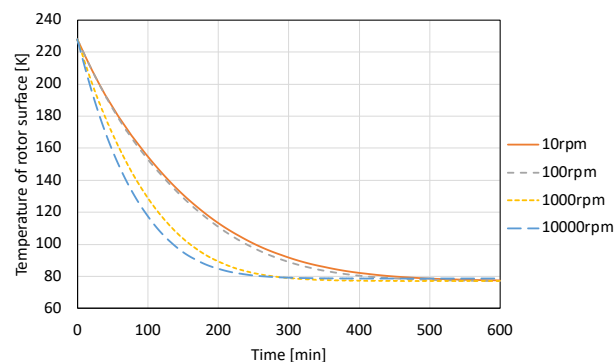


Fig. 3 Temperature of the rotor surface at different rotational speeds

H- ϕ 法と A-V 法を組み合わせた有限要素法解析による 超電導磁気軸受シミュレーション Superconducting magnetic bearings simulation by FEM analysis using a coupled H- ϕ and A-V formulation

奥村 皐月, 尾上 雄海, 寺尾 悠, 大崎 博之, 桜井 雄基, 松村 知岳, 片山 伸彦(東大)

Satsuki Okumura, Takemi Onoue, Yutaka Terao, Hiroyuki Ohsaki,

Yuki Sakurai, Tomotake Matsumura, Nobuhiko Katayama (The University of Tokyo)

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

1. はじめに

超電導磁気軸受(SMB)は高温超電導体が含まれる固定子と永久磁石が含まれる回転子で構成される。ピン止め効果により機械的接触がないため、低損失、長寿命、省メンテナンスであることが特徴として挙げられる。そのため、フライホイールや極低温ポンプ、人工衛星搭載用軸受等に SMB を用いることが検討されている。SMB を設計する際には回転損失特性を含む電磁界特性を詳細に検討し、最適な設計を行うことが重要である。本研究ではリング状に配列された YBCO パルク超電導体の固定子とリング状永久磁石と鉄磁気回路で構成される回転子で構成されるSMBを対象として3次元数値解析を行い、その電磁特性を報告する。

発生する渦電流損失特性を解析する。また、実験との比較も行っていく予定である。

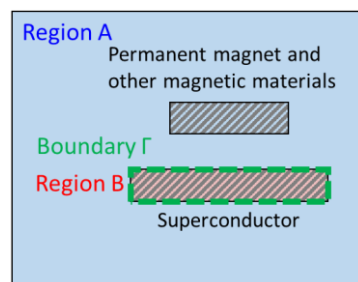


Fig.1 Schematic of analysis method

2. 解析手法

H- ϕ 法と A-V 法を組み合わせたモデル[1]を使用して SMB における回転損失について解析を行った。この解析方法では永久磁石やその他の磁性材料部分を含む空気領域(領域 A)と超電導領域(領域 B)に分けている(Fig. 1)。また、計算負荷を低減するために 3 ステップに分けて解析を行っている。その詳細は以下の通りである。

ステップ 1: 全空間(領域 A+B)において ϕ 法(ϕ : 磁気スカラーポテンシャル)を用いて永久磁石と鉄ヨークが作る静磁界解析を行う。

ステップ 2: H- ϕ 法を用いて超電導体に誘導される電流解析を行う。超電導体内部(領域 B)において H 法を用いて超電導磁界解析を行い、その他の空間(領域 A)において ϕ 法を用いて超電導電流が作る磁界解析を行う。

ステップ 3: 全空間(領域 A+B)において A-V 法を用いて渦電流解析を行う。

解析対象とした SMB のパラメータを Table 1 に示し、解析対象の外観を Fig.2 に示す。解析には汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics[2]を用い、超電導体の E-J 特性として n 値モデルを使用している。

Table 1 Specifications of analyzed SMB

Critical current density J_c	3.3×10^8 [A/m ²]
Reference electric field E_c	1.0×10^{-4} [V/m]
n value	21
PM residual flux density	1.2 [T]
The relative magnetic permeability of steel yoke	100
PM (radius × height)	12×14 [mm]
SC (radius × height)	34×16 [mm]
Yoke (radius × height)	5×10 [mm]

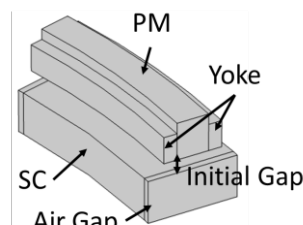


Fig.2 View of analyzed SMB

3. 解析結果

SMB の回転子が重力の影響により沈み込む過程の浮上力と超電導体のヒステリシス損失を算出した。最大浮上力は 757N であり、最大ヒステリシス損失は 1.9 W である。また、回転子が回転運動する過程の超電導体のヒステリシス損失(Fig.3)と回転子の渦電流損失を算出した。超電導体のヒステリシス損失は周期性を伴う振動を繰り返しつつ減少した。この振動周期は回転速度に依存している。0.8 秒から 1 秒において、損失平均は約 3.38 mW であり、P-P 値は約 1.05mW の振動が生じている。渦電流損失の平均は約 1.48 mW である。本発表では浮上力と損失の関係について報告する。

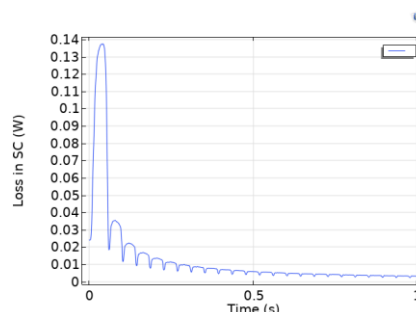


Fig.3 Hysteresis loss in superconductors

4. まとめと今後の展望

SMB のモデルを構築し、損失解析を行った。特に浮上力と損失の関係に着目した。今後、回転時における回転子側

参考文献

1. A. Arsenault, et al., IEEE TAS, Vol. 31, No. 2, 2021
2. COMSOL Multiphysics® Version 5.6, www.comsol.com

SMES 応用を想定した無絶縁 2 枚バンドルコイルにおける 局所劣化発生時の挙動と貯蔵効率への影響

Behavior and effect on storage efficiency in no-insulation bundle coil
with defects for SMES applications

小笠原 友樹, 宮本 祐, 石山 敦士(早稲田大学)

OGASAWARA Tomoki, MIYAMOTO Yu, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)

E-mail: o-tomoki@toki.waseda.jp

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置 (SMES) には、長寿命で大電力の瞬時応答が可能であるといった利点がある。しかしその一方で、電力貯蔵密度が極めて小さいという課題もある[1]。これについては、高熱的安定化と高電流密度化の両立が可能な無絶縁コイル (NI コイル) を利用することで、高貯蔵密度化を実現することが可能になると考えられる。また、SMES は電力機器であるため、大電流・低インダクタンス設計が重要となる。そのため、我々は複数の無絶縁 REBCO 線材を集合導体化して巻線したコイル (バンドル NI コイル) の利用に着目した[2]。そして今回は、このバンドル NI コイルに局所劣化が生じた時のバンドル導体内の電流分布と貯蔵効率への影響について解析評価を行ったので報告する。

2. 解析方法

解析には、PEEC モデル[3]を拡張して作成したバンドル NI コイル用の数値モデルを用いた[4]。解析対象としたコイルの諸元は、内径 60 mm、ターン数 25 のシングルパンケーキコイルで、局所劣化は内側素線の 12.5 ターン目に I_c が 30% になるように設定した。通電電流は、最大値 100 A、最小値 80 A の三角波で、充放電周期は 3 s から 18 s まで 3 s おきに解析を行った。層間電気抵抗値は $49.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ (実測値[4]) とした。

3. 実験結果

はじめに、バンドル NI コイルに局所劣化が生じた時の貯蔵効率への影響を、通常のバンドル NI コイルと比較した時の貯蔵エネルギーの割合 $\eta_{\text{degradation}}$ として求めた。結果的に、Table 1 に示す通り、どの充放電周期においても貯蔵効率が 99.9% 以上であり、バンドル NI コイルに局所劣化が生じた場合でも、貯蔵効率への影響はほとんどないことが分かった。

続いて、バンドル NI コイルに局所劣化が生じた時のバンドル導体内の電流分布について、充放電周期を 3 s とした時の充電開始から 0.75 s 時点における周方向電流分布を Fig.1 に、径方向電流分布を Fig.2 に示す。まず、Fig.1 に示す周方向電流に関しては、内側素線では最初に減少し局所劣化のある 12.5 ターン目付近を境に増加するよう分布しているのに対し、外側素線では最初に増加し、その後減少するよう分布している。次に、Fig.2 に示す径方向電流に関しては、最初は素線間の径方向電流の方が大きい、局所劣化のある 12.5 ターン目付近を境に導体間の径方向電流の方が大きくなり、素線間の径方向電流は減少するよう分布している。これは、局所劣化のある 12.5 ターン目よりも内側のターンでは、劣化を避けるように内側素線から外側素線への電流の転流が増えるため、素線間の径方向電流の方が大きくなり、外側素線の周方向電流が増加したと考えられる。一方で、12.5 ターン目よりも外側のターンでは外側素線から内側素線への電流の転流が増えるため、導体間の径方向電流の方が大きくなり、内側素線の周方向電流が増加したと考えられる。

以上より、バンドル NI コイルを SMES に応用することで、局所劣化が発生した場合でも高い貯蔵効率を維持しつつ、転流による安全運転が可能であることが示された。

Table 1 Storage efficiency in each charge-discharge cycle

Charge-Discharge cycle	Storage efficiency $\eta_{\text{degradation}}$ [%]
3s	99.955
6s	99.947
9s	99.947
12s	99.949
15s	99.995
18s	99.995

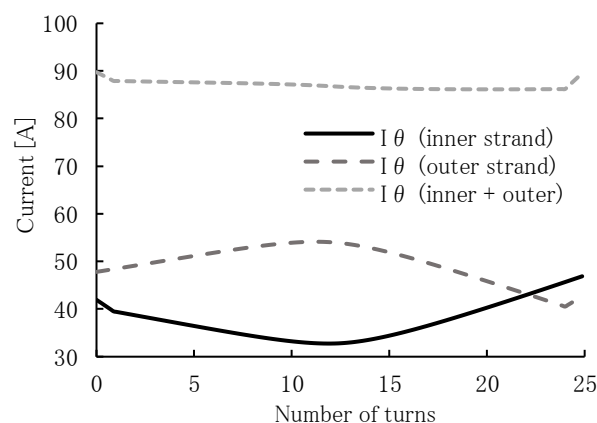


Fig.1 Circumferential current of NI bundle coil with defects

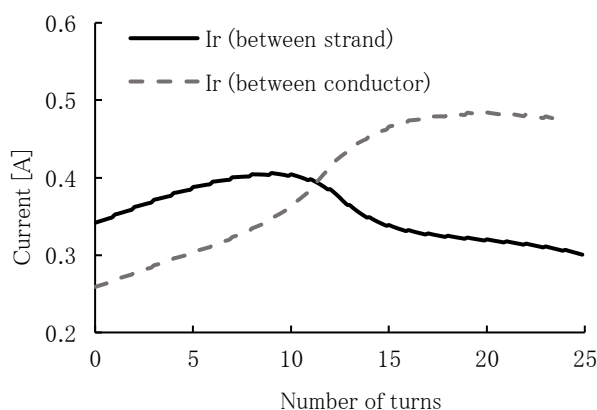


Fig.2 Radial current of NI bundle coil with defects

参考文献

1. K. Shikimachi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19, 3, 2009, pp. 2012-2018
2. M. Omure, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31, 5, 2021, 5700105
3. T. Wang, et al.: *IEEE Trans. on Applied Supercond.*, 25, 2015, 7010920
4. Y. Miyamoto, et al.: *IEEE Trans. on Applied Supercond.*, 32, 6, 2022, to be published

磁気誘導型ドラッグデリバリーシステム用磁場発生源上空の磁束密度勾配向上

Improvement of the magnetic flux density gradient above a magnetic field source for Magnetic Drug Delivery System

野島渉平, 長崎陽, 津田理 (東北大学)

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

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

1. はじめに

磁気誘導型ドラッグデリバリーシステムは、安全かつ有効的ながん治療を提供できると考えられている。先行研究では、磁場発生源に超電導バルク磁石を用いた検討が行われ、磁性粒子と組み合わせることで薬剤の誘導が可能となることが示されている[1]。薬剤を患部のみに集積させるには局所的に大きな磁束密度勾配を作る必要があるが、超電導バルク磁石では局所的に磁束密度勾配を大きくすることは容易ではない。そこで、本研究では、HTS コイルと径方向のスリットを持つ円筒状の HTS バルク体(以下、バルク体)を同軸上に配置した磁場発生源を用いて、磁場発生源上空に、超電導バルク磁石よりも大きな磁束密度勾配を作る方法について検討した。

2. 解析方法

解析には 3 次元有限要素法(H 法)を用いた。解析に使用したモデルを Fig.1 に示す。解析では計算量を減らすために 4 分の 1 モデルを使用した。円筒状のバルク体には径方向に 1 度分のスリットが入っており、周方向の大きな遮蔽電流ループの形成を抑制する役割を果たしている[2]。バルク体の J_c - B 特性に関しては Kim モデル[3]を採用した。また、バルク体の外周部に、バルク体と同軸の HTS コイルを配置した。なお、この HTS コイルには 200A/mm^2 の電流を流すことができるとし、HTS コイルの内径と円筒状バルク体の外径、また、それぞれの高さは等しいとした。ただし、HTS コイルのアンペアターンを一定としたため、コイルの高さが 2 倍になる場合にはコイルの径方向厚さを半分とした。解析に使用したバルク体と HTS コイルの諸元を Table 1 に示す。比較の対象とした円柱状超電導バルク磁石の外半径と高さはそれぞれ 30mm, 20mm とした。これに対し、円筒状バルク体の外半径と高さがバルク磁石と同じものをモデル A、外半径が 2 倍のものをモデル B、高さが 2 倍のものをモデル C、外半径と高さが 2 倍のものをモデル D とした。解析では、直径 10mm 以内に薬剤を集積させることを想定し、これらのモデルにおける中心軸から 5mm 離れた点の磁束密度勾配を評価した。

3. 結果及び考察

モデル A, B, C, D と超電導バルク磁石における中心軸から 5mm 離れた位置における磁束密度勾配の大きさを Fig.2 に示す。Fig.2 より、 $z < 30\text{mm}$ の領域では、Sample B, D を用いる(外径を大きくすることにより、バルク磁石と同等以上の磁束密度勾配を作れることがわかった。これは、バルク体の外径が大きくなると遮蔽領域の径方向長さが大きくなり、遮蔽電流が作る磁束密度(HTS コイルの作る磁束密度と逆方向)が、遮蔽領域上空では大きくなるのに対して、遮蔽領域よりも内側の遮蔽電流領域上空では小さくなるためと考えられる。以上より、HTS コイルと径方向のスリットを持つ円筒状のバルク体を同軸上に配置した磁場発生源を用いることにより、超電導バルク磁石を用いた時よりもバルク体上空に大きな磁束密度勾配を作れることが分かった。今後は、バルク体上面からより離れた位置においてもより大きな磁束密度勾配を作るのに適した磁場発生源(HTS コイル・バルク体)の形状や大きさについて検討する予定である。

Table 1. Specifications of HTS bulk and HTS coil

Model	A	B	C	D
Outer radius of HTS bulk : R_{in} [mm]	30	60	30	60
Inner radius of HTS bulk : R_{out} [mm]			1	
Height : H [mm]	20	20	40	40
Width of HTS coil : W_{coil} [mm]	50	50	25	25
Ampere-turn of HTS coil [$\times 10^5 \text{AT}$]		2		
Critical current density : J_{c0} [$\times 10^9 \text{A/m}^2$]			1	
n value			21	
Kim parameter : B_0 [T]			0.4	

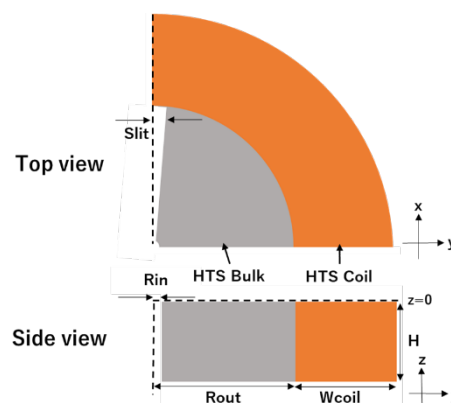


Fig.1 Schematic illustrations of an analytical model.

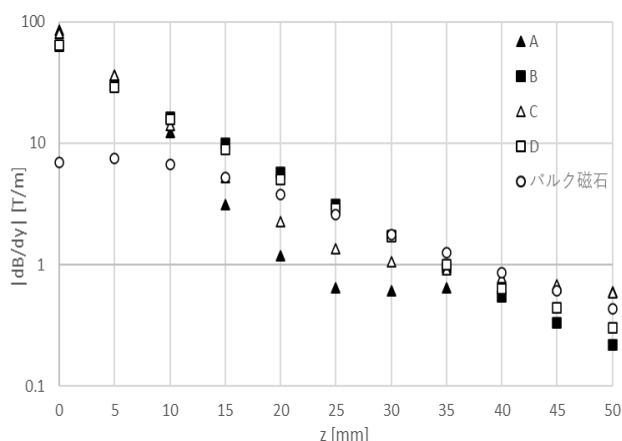


Fig.2 Simulation results of the absolute value of magnetic flux density gradient at 5mm away from the central axis.

参考文献

- Shigehiro Nishijima et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.18, No.2(2008)
- Y. B. Kim et al. : *Phys. Rev. Lett.* 9, 306 (1962)
- Z Y Zhang et al. : *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.25, No.2(2012)

超電導デモ用超電導モーターカーの作製

Superconducting motor car for superconductivity demonstration

井浦 康伸, 尾崎 優一, 川崎 玄貴, 高橋 正希, 立石 航也, 中本 隼太郎, 平原 永将, 森 竜之佑, 井上 昌睦(福岡工大)

IURA Yasunobu, OSAKI Yuichi, KAWASAKI Genki, TAKAHASHI Masaki, TATEISHI Koya,
NAKAMOTO Syuntaro, HIRAHARA Eisuke, MORI Ryuunosuke, INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
E-mail: mem22101@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

我々は、オープンキャンパスや初等教育者向け公開講座などに利用できる超電導デモ装置として、小型の超電導モーターカーの作製に取り組んでいる。

本稿では、ステーターに超電導バルクを用いた超電導モーターカーを作製し、2021年11月のMT27に合わせて福岡市科学館で実施された低温工学・超電導学会主催の市民公開講座に出展したので概要を報告する。

2. 超電導モーターカーの作製方法

初めに常電導モーターを作製した。直流モーターのローターには、直径0.7mmの銅線を集中巻により25巻したものを、界磁には、異方性のフェライト磁石を用いた構成とした。

次に、界磁の一部を超電導バルクに置き換えて同等の性能(回転数)となる配置を検討した。このときのローター及び界磁の磁石の配置図をFig.1, Fig.2に示す。超電導バルクは液体窒素で冷却するため、ローターからは10mm程度離れることを想定して、これらの配置にて試験を行った。

フェライト磁石を10mm離れたときの常電導モーターの回転数は336rpmであった。一方、片側の磁石を超電導バルクに置換えた場合は、12mm離れたときに、同程度の318rpmが得られた。今回用いたフェライト磁石と超電導バルクの表面磁場分布は、Fig.3及びFig.4に示すように、形状および強度が大きく異なっているため、同一の界磁条件とは言えないが、この回転数が同じとなる配置を参考にモーターカーを作製することとした。なお、これらの試験は単三乾電池2本を直列接続したものを電源として用いている。

上記の超電導モーターと付属する超電導バルクを冷却する容器や電源を手製の車体に搭載し超電導モーターカーを作製した。しかしながら、当初は十分なトルクが得られず走行には至らなかった。その後、磁石の距離を近づける等して走行させることに成功し、市民公開講座で披露した。発表当日は、作製した超電導モーターカーを展示する予定である。

3. まとめ

小型の超電導モーターカーを作製し、走行させることに成功した。現状は界磁の片側のみを超電導バルクに置換えており、またトルクも小さいことから、今後は界磁を強くするための車体や冷却機構の改良、超電導バルクへの着磁方法の検討を進めたいと考えている。

参考文献

- [1] K.Ohyama *et al.*: IEEJ Trans. FM, Vol. 126, No.7 (2006) p.612-622

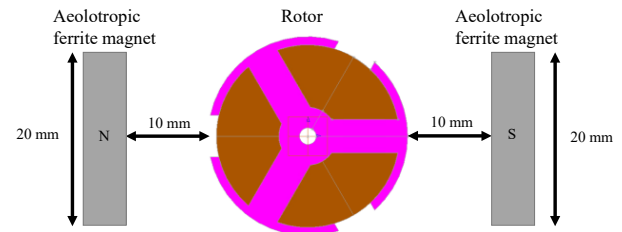


Fig.1 Schematic of a motor using Aeolotropic ferrite magnets

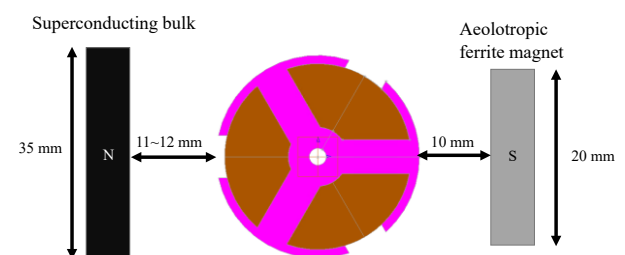


Fig.2 Schematic of a motor using Aeolotropic ferrite magnets and Superconducting bulk

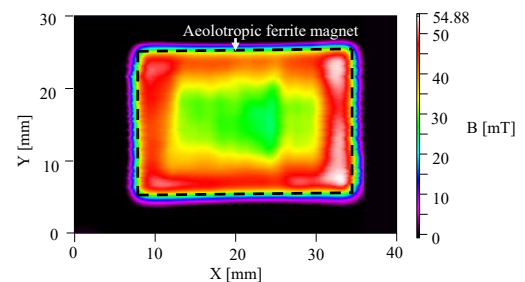


Fig.3 Magnetic field distribution of an Aeolotropic ferrite magnet

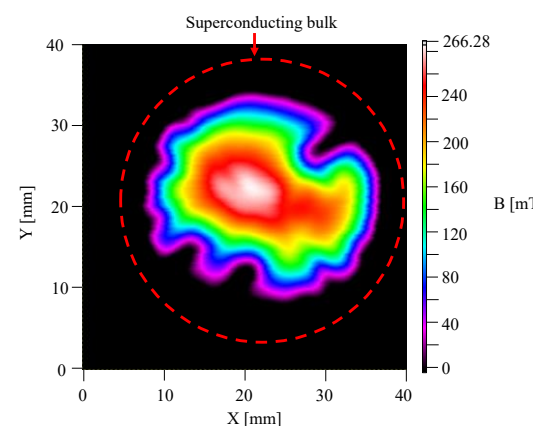


Fig.4 Magnetic field distribution of a superconducting bulk

縮小版 FAIR 導体の開発と通電特性の評価 Development of a Reduced-Size FAIR Conductor and Evaluation of Current-Transport Characteristics

小野寺 優太, 平野 直樹, 成嶋 吉朗, 馬場 智澄, 三戸 利行 (NIFS), 川並 良造 (川並鉄工株式会社)
ONODERA Yuta, HIRANO Naoki, NARUSHIMA Yoshiro, BABA Tomosumi, MITO Toshiyuki (NIFS)
KAWANAMI Ryoza (Kawanami Ironworks Inc.)
E-mail: onodera.yuta@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合実験装置には大電流容量の HTS 導体が必要とされ、その候補導体として REBCO 線と高純度アルミニウムシートを交互に積層し、円形断面のアルミニウム合金のジャケットの溝部に入れ、蓋部を摩擦攪拌接合 (FSW) で接合した後で、導体に捻りを加える FAIR 導体の開発を進めている[1]。77 K、自己磁場中での通電試験にて FSW の条件出しを行い、導体の製作プロセスの最適化を行ってきた[2]。さらに、低温・高磁場中にて通電特性の評価を行ってきた。次の段階として、高磁場中でのコイル形状試験を計画しているが、試験装置に挿入するためには曲げ径を小さくする必要あり、その曲げ半径に耐えるため、直径を 12 mm から 6 mm に縮小した FAIR 導体を考案した。縮小版 FAIR 導体は小型であるため、SMES や磁気冷凍機などの幅広いコイル用途での使用が期待できるものの、その実現性については確認できていない。そこで、本研究では 1 m 長の縮小版 FAIR 導体を試作し、通電測定によって特性評価を行った。

2. 実験

Fig. 1 に縮小版 FAIR 導体の断面模式図を示す。導体製作において、4 mm 幅の REBCO 線材 ($I_c = 475$ A/cm-w at 77 K s.f.) を 15 枚用いた。導体端部は階段状に REBCO 線材を裁断するとともに、同様に階段状の溝を掘った半割の円筒銅で挟み込み、間に低融点半田を流し込むことで電流導入部を製作した。無回転、1 回転/m 捻り、1.5 回転/m 捻りの 3 本の 1 m 長縮小版 FAIR 導体を試作し、それぞれにおいて、液体窒素中に浸漬させて自己磁場中での通電特性の計測を行った。

3. 実験結果

Fig. 2 に無回転、1 回転/m 捻り、1.5 回転/m 捻りのそれぞれにおける通電試験の結果を示す。電解基準 ($E_c = 10^{-4}$ V/m) のときの電流値はそれぞれ 1190 A, 1020 A, 1470 A であった。無回転および 1 回転/m 捻りのサンプルにおいて、通電試験の際に端部での発熱が顕著であり、製作時の内部歪みの影響によって I_c 特性が劣化したことが考えられる。製作順として 3 本目にあたる 1.5 回転/m 捻りのサンプルでは、端部における発熱が観測されなかった。そこで、1.5 回転/m 捻りのサンプルに着目し、簡易的に、線材諸元である 77 K 中の I_c の磁場依存性および 3 T 中での角度依存性をもとに 77 K における I_c の角度磁場依存性を外挿することで、自己磁場の影響を考慮した縮小版 FAIR 導体の I_c 値を計算した。Fig. 3 に臨界電流値を流した時の解析時の導体断面における磁場分布を示す。この結果から、 I_c 値は 1830 A であることがわかった。したがって、従来の FAIR 導体と同様に 2 割以下の劣化にとどめた縮小版 FAIR 導体を製作できることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、NIFS-UFZG-002 および、日本学術振興会の科研費 (19K14691) の助成を得て行ったものである。

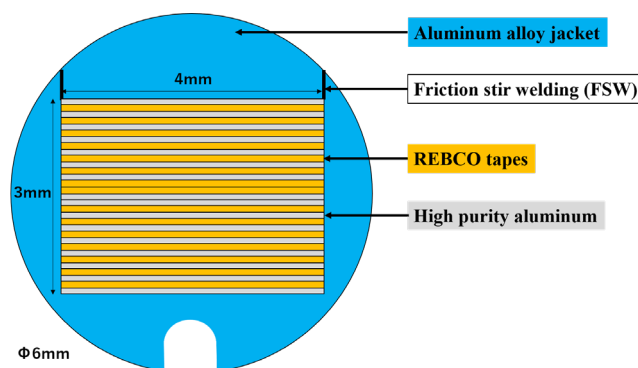


Fig. 1 Cross-sectional structure of reduced-size FAIR conductor

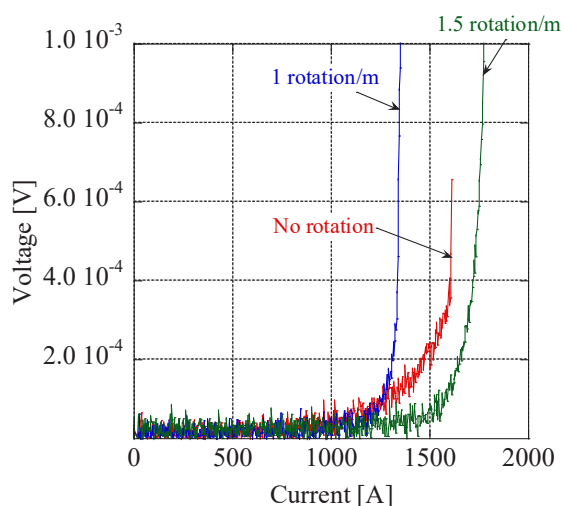


Fig. 2 I - V characteristics of reduced-size FAIR conductor at each twist pitch

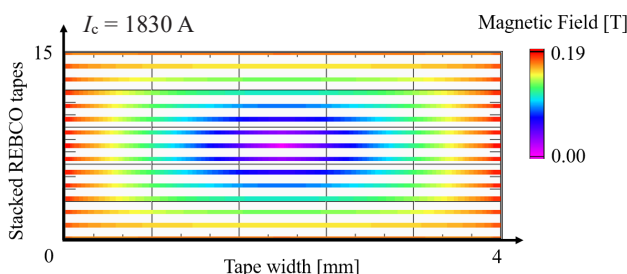


Fig. 3 Magnetic field distribution in cross section of reduced-size FAIR conductor (1.5 rotation/m)

参考文献

- [1] T. Mito et al., Journal of Physics Communications 4.3 (2020): 035009.
- [2] T. Mito et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31.5 (2021): 1-5.

重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの 電磁・構造解析

Electromagnetic-structural analysis of a superconducting magnet with active shielding for a heavy ion rotating gantry

尾花 哲浩 (NIFS)

OBANA Tetsuhiro (NIFS)

E-mail: obana.tetsuhiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

QST 病院にて現在移動中の重粒子線用回転ガントリーには、鉄ヨークを用いた超伝導マグネットが使用されている[1]。マグネットの重量は鉄ヨークが支配的となり、1台のマグネットの重量は数トン程になる。本回転ガントリーでは、10 台のマグネットを使用しているため、数10トンの重量物が強固なフレームに搭載された状態となり、非常に困難な制御が求められている。そこで、マグネットの軽量化により、回転ガントリーの制御系と支持構造を簡素化するため、鉄ヨークを使用しないアクティブシールド型超伝導マグネットの設計研究を進めている[2]。本講演では、有限要素法(FEM)モデルを用いたアクティブシールド型超伝導マグネットの電磁・構造解析について発表する。

2. FEM モデル

アクティブシールド型超伝導マグネットは、ダイポールコイルの外周にアクティブシールドコイルを配置した構造である。各コイルには、径 1 mm 程の NbTi 素線を使用する。ダイポールコイルの内半径と外半径は 90 mm と 210 mm であり、層数は 60 である。一方、アクティブシールドコイルの内半径と外半径は 300 mm と 350 mm であり、層数は 25 である。Fig.1 に、電磁・構造解析のための FEM モデルを示す。モデルは、NbTi 素線、コイル巻線用エポキシ樹脂、およびコイル支持材(アルミニウム合金)で構成される。

3. 電磁・構造解析

コイルに発生する電磁力を求めるために、FEM モデルを用いてマグネットの磁場解析を行った。Fig.2 に、マグネットの定格運転時(マグネット中心磁場 2.37T)における磁場分布を示す。各コイル内では、大きな磁場勾配が生じている。特に、x 軸上付近のダイポールコイルでは、コイルの内層と外層の磁場が高く、コイル中央部の磁場は非常に低い。コイルの最大経験磁場は 2.46T であり、マグネット中心での磁場と同程度の大きさである。

電磁力によるコイル断面への影響を調べるために、マグネットの構造解析を行った。本解析では、磁場解析から得られた電磁力データを使用した。Fig.3 に、電磁力によって生じたマグネットの変位分布を示す。ダイポールコイルは電磁力により、マグネット中心に向かって径方向に変位する。また、シールドコイルでは、変位は x 軸上に近づくにつれて増加し、コイル形状は外側に広がる。マグネットの最大変位は、シールドコイル内層部に生じており、その変位量は 95 μm 程である。

FEM モデルの詳細、解析での境界条件、コイル内部の応力分布等は、学会当日に報告する。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 19K04364 の助成を受けたものです。

参考文献

1. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.104
2. T. Obana : IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 32 (2022) 4400304

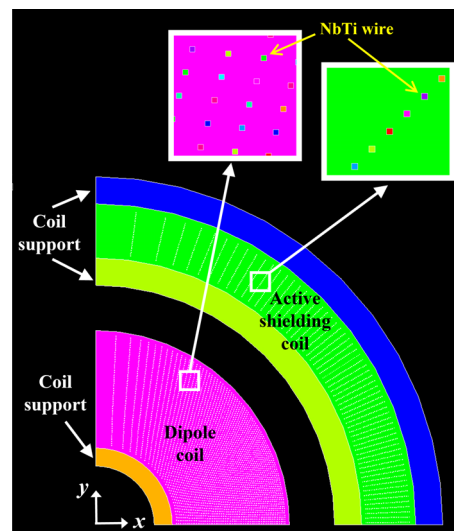


Fig. 1 The cross-section of a superconducting magnet with active shielding in the first quadrant.

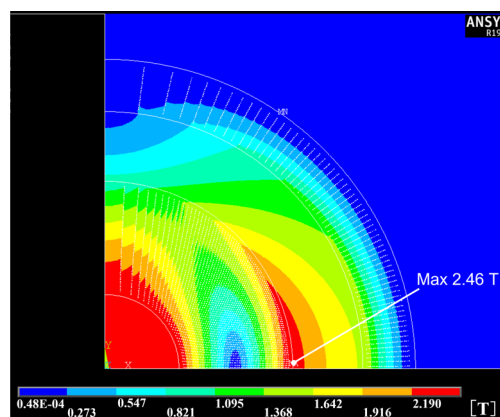


Fig. 2 Magnetic field distribution of the magnet cross-section in the first quadrant.

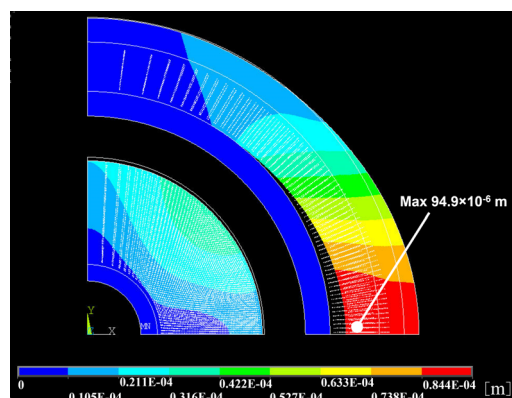


Fig. 3 Displacement distribution of the magnet cross-section in the first quadrant.

次世代医療用高温超電導サイクロトロンにおける遮蔽電流磁場の影響評価

Evaluation of screening current-induced field in next-generation high-temperature superconducting cyclotron for medical applications

熊谷 塁, 糸日谷 浩平, 小久保 早希, 石山 敦士(早稲田大学);
植田 浩史(岡山大学);野口 聡(北海道大学);福田 光宏(大阪大学)

KUMAGAI Rui, ITOHIYA Kohei, KOKUBO Saki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
UEDA Hiroshi (Okayama University); NOGUCHI So (Hokkaido University); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka University)
E-mail: kmgi_ruri@ruri.waseda.jp

1. はじめに

次世代の癌治療法として、 α 線核医学治療の研究が行われている。 α 線放出核種として想定される ^{211}At は、半減期が7.2時間と短く、病院近くでの生産施設が必要となる。そこで我々のグループでは、 ^{211}At を安定的に製造できる超小型・高強度の加速器として、高温超電導スケルトン・サイクロトロン(HTS-SC)の開発を目指している[1]。

HTS-SCに用いるREBCO線材はテープ形状のため、磁場変動により遮蔽電流が顕著に誘導されてしまう。この遮蔽電流による不整磁場が、ビーム加速に必要な磁場の時間的・空間的精度を乱してしまう。サイクロトロンでは設計値に対して誤差 10^{-4} 以下の高い精度の磁場が要求されるため、遮蔽電流磁場の影響評価と低減が重要となる。

今回は、HTS-SC実規模モデルを対象として、まず最適化設計によるコイル配置や電流密度を元に、遮蔽電流磁場の解析モデルを作成し、その妥当性を検証した。また、遮蔽電流磁場の影響評価を行い、その結果に基づきビーム軌道計算を行った。

2. 解析対象及び解析方法

Fig.1に示す、HTS-SCを解析対象とした。解析モデル諸元をTable 1に示す。線材幅は6mm、線材厚は0.1mm、運転電流値は299A、励磁速度は1A/s、取り出し半径は500mmとした。磁場の解析手法として、我々のグループが開発した3次元非線形過渡電磁場解析プログラムを用いた[2]。

3. 解析結果

粒子加速面における粒子取り出し半径までの周方向平均磁場を計算したものをFig.2に示す。粒子の取り出し半径において1.732Tの磁場強度が必要であるのに対して、計算結果は1.785Tとなり、設計誤差は 10^{-2} T程度となった。また、最適化設計による磁場分布と同様の傾向を示したことから、解析モデルの妥当性が確認された。

次に、通常励磁とOvershoot法の2パターンにおいて計算した、取り出し半径における遮蔽電流磁場の周方向平均値をFig.3に示す。今回はovershoot率15%を適用した。2パターンとも値は 10^{-3} T程度となり、目標とする設計磁場に対して 10^{-4} 以下の精度を満たすことができなかった。しかし、設計誤差に比べ1/10程度小さく、遮蔽電流磁場による理想磁場に対する影響は小さいと考えられる。ビーム軌道計算については当日報告する。

本研究の一部は、科研費基盤研究S(18H05244)に依った。

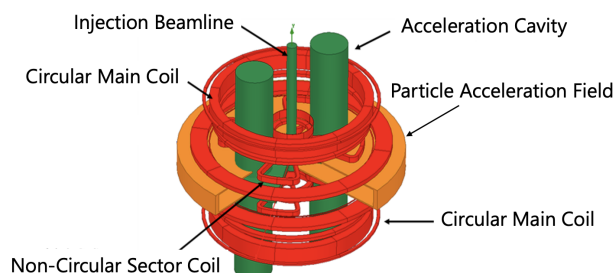


Fig.1 HTS-SC

Table 1. Analytical Model Specifications

コイル種類	メイン コイル 1	メイン コイル 2	メイン コイル 3	メイン コイル 4	セクター コイル
内径 (m)	0.13142	0.14255	0.55520	0.64062	非円形
外径 (m)	0.18451	0.14498	0.65160	0.73488	非円形
底面座標 (m)	0.18621	0.22967	0.22787	0.11220	0.12000
上面座標 (m)	0.22321	0.26267	0.27887	0.20420	0.54000
ターン間 SUS 厚 (mm)	0.124	0.508	0.827	0.583	0.05
ターン数	237	4	104	138	170
DP コイル数	2	1	4	7	3
電流密度 (MA/m ²)	144.300	29.829	50.600	66.614	284.762

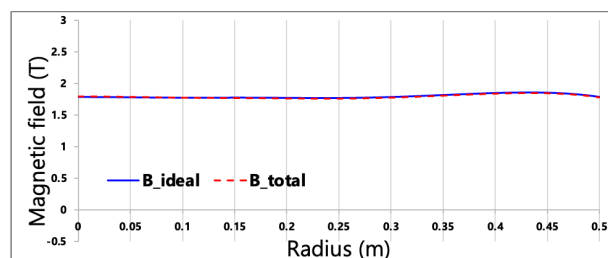


Fig.2 Average Magnetic Field in Circumferential Direction

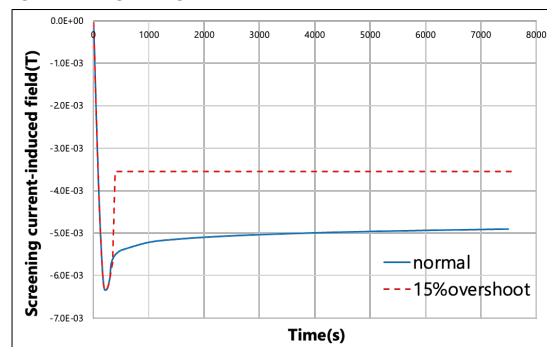


Fig.3 Average SCIF in Circumferential Direction

参考文献

1. H. Ueda, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.29, 4101105 (2019)
2. H. Ueda, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23, 4100805 (2013)

磁化メタン発酵法を活用した生物学的水処理法のカーボンニュートラル化への可能性

Possibility of biological wastewater treatment process under carbon neutral condition utilizing magnetized methane fermentation

猪瀬 絢加(宇都宮大), 齊藤 翼(宇都宮大), 酒井保藏(宇都宮大), 荷方 稔之(宇都宮大), 六本木 美紀(宇都宮大)

INOSE Ayaka, SAITO Tsubasa, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONNGI Miki (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁気力により微生物を分離できる磁化メタン発酵(MMF)法を20℃で運転することで、生物学的水処理法のカーボンニュートラル化の可能性をベンチスケール試験により検討した。後段に好気処理を組み合わせた水処理システムで、合成排水のCOD_{Cr}濃度が4 g/Lのとき、副生バイオガスで発電したと想定すると[1]、好気処理の曝気全電力をまかない、さらに廃熱で排水を約5℃昇温できることが示唆された。また、処理水は上乗せ排水基準を達成した。

メタン発酵法は高い微生物濃度で運転され、バイオガスが発生するため、水と微生物の沈降分離は難しい。しかし、MMFは磁気分離により高速・確実に分離できるだけでなく、通常メタン発酵よりも高濃度で運転できる。メタン発酵は曝気動力が不要で、メタンガスを回収できる省エネ性に優れた生物処理プロセスであるが、一般に36℃で運転され、排水の加温にエネルギーが必要である[2]。本研究では高濃度のメタン発酵法を磁気分離で実現し、低水温でも十分な活性を維持することで20℃での無加温メタン発酵の可能性を検討した。

2. 実験方法

Fig. 1に嫌気処理である磁化メタン発酵(MMF)槽(6 L)、好気処理である担体流動(MBBR)槽(1 L)と接触酸化(CO)槽(2 L)からなるベンチスケール実験装置を示す。模擬排水(4 g-COD_{Cr}/L)を6 L/dで連続流入した。容積負荷は全体で2.7 kg/(m³・d)となる。MMF槽は水浴により20℃に設定した。MMF槽には、消化汚泥とマグネタイトを1:1の濃度に混合した磁化消化汚泥を用いた。汚泥はMMF槽流出部にある磁石ドラム(直径97 mm、長さ100 mm、最大磁束密度80 mT、6 mmピッチの着磁磁石)により分離し全量をMMF槽に返送した。磁気分離水は、後段のMBBR段、CO段の順で生物処理した。両段では1 cm角のスポンジ状の生物支持体を用い、前者は流動状態で、後者は充填状態で使用した。好気処理は固液分離槽は設けず、CO槽からの流出水の濁度が増加したらCO槽を逆洗して剥離汚泥を回収して余剰汚泥とした。

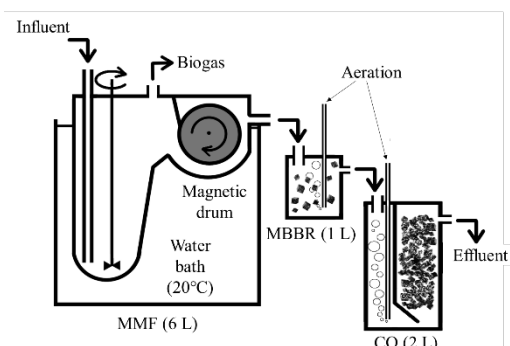


Fig. 1 Bench scale apparatus

3. 結果及び考察

(1) 磁気分離による嫌気性微生物と好気性微生物の分離

MMF槽は磁気分離によりほぼ99%以上の汚泥を回収して反応槽に戻すことができた。メタン発酵は排水中の炭素成分をバイオガス(メタン、CO₂)に転換し発泡するため、汚泥の沈

降分離は難しい。後段の好気処理への嫌気菌の流入は好気処理悪化を引き起こすため、メタン発酵の排水処理応用の大きな課題であったが、磁気分離により解決できた。

(2) MMF槽の高濃度化による低温発酵への適応

MLVSS(マグネタイトや灰分を除く有機物)濃度で24 g/Lの沈降分離不可能な高濃度の消化汚泥を磁気分離により、濃縮・回収し、分離水を後段に供給できた。沈降分離によるメタン発酵の2倍以上の消化汚泥(微生物)を発酵槽に保持できた。嫌気処理では酸素の供給が反応を制限しないため、消化汚泥の高濃度化は高速化に直結する。MMFは容積負荷6 kg/(m³・d)での運転が可能で、従来のメタン発酵法の2倍以上の高負荷運転ができる[3]。本研究ではこの利点を生かし、MMFの負荷条件を4 kg/(m³・d)に抑え、代わりに発酵温度を36℃を20℃まで低温化した。メタン発酵では過負荷運転になると発酵槽のpHが中性から酸性に移行し、メタン菌が失活することが知られている。本研究では20℃でもpHの低下はほとんど見られず、安定したバイオガスの発生と水処理性能を維

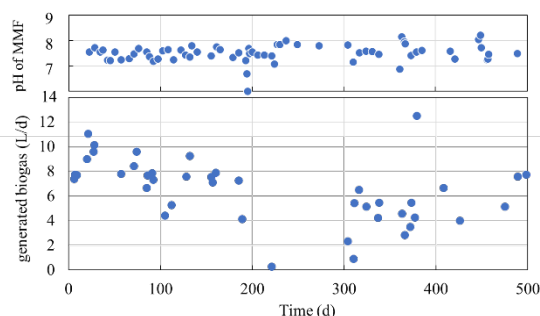


Fig. 2 Change of pH and biogas production with time

持できた。pHとバイオガス発生量変化をFig. 2に示す。

(3) 水処理プロセスの低炭素化

MMF段での溶存TOC除去率は400日平均で92%(80%~99%)であった。後段の必要酸素量は全てを好気処理する場合の1/10以下となり、曝気動力が大幅に節約できる。活性汚泥法は電力の大部分が曝気で消費されるため、低炭素化の寄与が大きい。さらに、本実験条件で平均33 MJ/(m³・d)のバイオガスが副生できた。バイオガス発電を適用した場合、文献[1]によれば、曝気電力を発電しながら、廃熱で水温を約5℃加温できることが示唆された。15℃の低温の排水でも、カーボンニュートラルで水処理を行なえる可能性が示された。

(4) 水処理性能

処理水のBOD濃度は平均7 mg/L、SSは3 mg/Lであった。磁性粉の漏れも認められなかった。栃木県の上乗せ排水基準(日間平均でBOD 20mg/L、SS 40 mg/Lの半分以下まで浄化できることが示された)。

参考文献

- 小川ら: 廃棄物学会論文誌, Vol. 14(5), (2003) p.258-267
- 公害防止の技術と法規編集委員会: 新・公害防止の技術と法規 2016 水質編, (2016) p.82
- S. Eda, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.62

現状の磁化活性汚泥法の適応条件と高負荷対応への改善策

Suitable condition of magnetic activated sludge process and improvement of the process for high loading operation.

日野口 稜大, 小笹 峻諒, 野村 侑樹, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大)

HINOBUCHI Ryota, KOSASA Toshiaki, NOMURA Yuuki, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONNGI Miki, (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁化活性汚泥(MAS)法は高負荷では汚泥濃度の上昇にともなう曝気動力の増加や磁気分離への負担増などの課題が明らかになった。これらの課題を整理し、高負荷への対策について、磁気力を活用した余剰汚泥処理を含めた新たなプロセスを検討した。余剰汚泥を低温で焼却しマグネタイトを曝気槽に返送する方法、湿式酸化で有機物を分解する方法などを提案し、適用可能性を検討した。

磁気分離による活性汚泥法である磁化活性汚泥法は低負荷条件では、余剰汚泥の発生を抑制でき、バルキングや目詰まりなど固液分離トラブルが原理的に起こりにくい優れた方法であるため、現在、小規模の実プラントを用いた実証試験が進められている。一方、高負荷では、汚泥の増殖と自己消化がバランスする平衡濃度が 20 g/L を超え、汚泥濃度の増加は曝気動力の増加の原因となり、また、磁気分離の負担も増加する。磁化メタン発酵の活用による解決策が検討されているが、悪臭が少なく、負荷変動にも強いなど磁化活性汚泥法はメタン発酵より運転が容易であるなどメリットも多い。本研究では中・高負荷条件に磁化活性汚泥法を適用するため、MAS 法における汚泥濃度低減の方法を提案し、ベンチスケール実験で有効性の検証を行なった。

2. 実験方法

ベンチスケール実験には、回転磁石ドラム式の磁気分離装置を備えた標準磁化活性汚泥(MAS)実験装置(5 L)と接触酸化(CO)槽(0.5 L)を用いた[1]。排水は食品工場の実排水を希釈して用いた。高負荷対応のため(i)前曝気の適用、(ii)汚泥の自己消化、(iii)汚泥の乾式酸化を試みた。

(i) 前曝気の適用では、1 L の曝気槽を MAS 法の前段に設置し、排水中の有機物の一部を処理し、MAS 法の容積負荷の低減を試みた。排水は、実排水を BOD 2250 mg/L になるように希釈して用いた。

(ii) 汚泥の自己消化では、MAS 槽から 200 mL の汚泥を引抜き、汚泥量の 0.5%に当たる NaOH を添加し、熱処理して汚泥を可溶化し、MAS 槽に戻し自己消化させた。

(iii) 汚泥の乾式酸化では、MAS 槽から引抜き抜いた汚泥を 300℃で熱処理し、マグネタイトを酸化させずに有機物を酸化分解し、粉碎後に MAS 槽に再び投入することで磁性粉のリサイクルを行ないながら BOD 2000 mg/L になるように希釈した実排水の連続水処理を行なった。

3. 結果と考察

MAS 法は、原則として、余剰汚泥を引き抜かず汚泥の増殖と自己消化がバランスする平衡濃度で運転する。余剰汚泥を抑制することで汚泥処理の手間とコスト、温室効果ガスの削減が期待できる。実証研究において、活性汚泥汚泥法の推奨容積負荷 0.5~1.0 kg/(m³・d)のうち、0.5 kg/(m³・d)程度であれば、平衡汚泥濃度(MLVSS)が 12~15 g/L となることからわかったが、これは工場排水処理の一般的な汚泥濃度の 2~4 倍高濃度である。

微生物の酸素必要量は BOD 成分の酸化に必要な部分と内生呼吸により消費される部分があり、後者は汚泥濃度に比例して増加するとされる。また汚泥濃度が 10 g/L を超えると汚

泥の粘性が増加し曝気の効率も低下する。これらの理由から、0.7~1.0 kg/(m³・d)の中・高負荷条件では、平衡汚泥濃度が 20 g/L を超え、曝気動力の増加やブローの増強が必要となり、MAS 法の余剰汚泥削減のメリットを上回る場合があることが考えられた。

(i) 前処理の適用では、MAS 槽の 1/5 容積である 1 L の曝気槽で MAS 槽に流入前に排水を曝気処理したところ TOC 成分の 89%が除去できた。曝気条件が同じでも前処理槽がない場合に比べて曝気槽の DO が飽和濃度に近い値まで上昇し、曝気動力を低減できる可能性が示唆された。この条件で連続処理を継続したところ、MAS 槽で糸状菌が増殖し汚泥流出の原因となった。糸状菌の増殖を抑制できれば微生物濃度の低い前曝気槽で有機成分の大部分を好気処理でき、プロセス全体の曝気動力の低減が期待できると考えられた。

(ii) 汚泥の自己消化では、可溶化処理条件を検討した。NaOH を加えない場合、120℃、90 分加熱でも可溶化は十分でないことがわかった。NaOH を 0.5%加えると 100℃、90 分で十分可溶化した。MAS は磁気分離で 40~50 g-VSS/L まで濃縮できるため、NaOH の添加量を沈降分離の約 1/4 に節約できた。14 g-VSS/L の MAS 法で 4%/d の汚泥減容化が可能であった。この結果は、MAS 槽の 2 倍程度の活性汚泥プロセスにおいて 8%/d の余剰汚泥を引抜き、MAS 槽で自己消化で湿式酸化分解できることを示唆している。この条件で、活性汚泥槽の平衡濃度は約 7 g-VSS/L となると予想される。

(iii) 汚泥の乾式酸化では、磁気分離により、加熱処理の前に磁気分離して風乾し、半日程度で水分を自然で乾燥レベルまで除去できた。一方、マグネタイトを 40 日間循環利用するとマグネタイトの劣化が若干認められたため、加熱処理の方法や条件は改善の余地があると推察された。水処理結果は MAS 槽流出水で BOD 5~25 mg/L、SS 3~82 mg/L、CO 槽流出水で BOD 10 mg/L、SS 1~8 mg/L と良好であった。

実排水の磁化メタン発酵による処理は、過去に検証している[2]。磁化メタン発酵法(6 L)と CO 法(2 L)を組み合わせた嫌気/好気プロセスで 4.3 kg/(m³・d)の高負荷条件で水処理を行ない、一般排水基準を達成できた。曝気動力も数分の 1 に節約でき、余剰汚泥も抑制できた。一方、負荷変動により pH が大きく低下した場合は、復帰に時間を要することが分かった。

4. おわりに

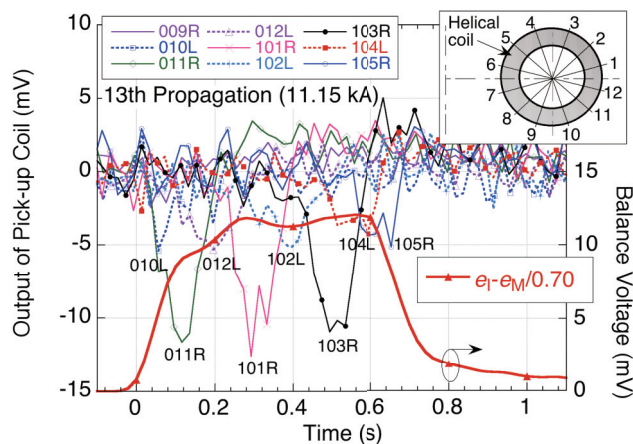
MAS 法において、系外にマグネタイトを含む余剰汚泥を排出せずに平衡汚泥濃度を下げる工夫が実験的に検証された。いずれの方法も効果は認められた一方で、手間やコストの増加が課題となると予想された。MAS 法の高負荷条件への適用には、これらの方法を、さらに改善する必要がある。

参考文献

1. T. Kosasa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.43
2. Y. Wakui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.18

とができる。この値とバランス電圧の差から求めた値を比較することにより、抵抗成分の分離と伝播位置の同定が可能である。13回目の伝播の場合をFig. 4に示す。電圧計算では、導体を長手方向に0.01 mの要素に分割し、伝播速度から各要素の常伝導到達時刻を求め、各要素の電圧を積分することにより V_R を求めた。バランス電圧から求めた V_R と比較すると、 $\alpha=0.7$ が最適であることが分かる。特に伝播開始時と伝播停止後の電圧変化には t_r の影響が小さいので、明確である。この数値から1層目で伝播したと結論できる。

常伝導伝播が停止して超伝導に回復する過程の抵抗成分には時定数 τ で減衰する特徴的な波形が現れるため、最適な α が0.70(1層目)か0.81(2層目端部)かを判別することが可能である。回復過程に着目して α を判別した一覧をTable 1に示し、伝播距離が1ピッチ以内の15回の抵抗成分の時間変化をFig. 5に示す。10th以降は、20thと26thを除いてピックアップコイルにより伝播位置が判明しており、飽和ヘリウム冷却では、全てコイル最下部近傍が起点で、コイル上部を通過した所で停止した。3rd, 9th および 20th は2層目最終列の伝播で、それ以外は1層目の伝播である。伝播開始と回復の時刻より、1st, 6th, 7th, 8th も最下部近傍が起点で、各々、3ピッチ目、2ピッチ目、4ピッチ目、5ピッチ目まで伝播してコイル上部で停止したと考えられる。2ndと9thは回復の時刻がこれらとは異なることから、起点あるいは停止位置が異なると推定される。飽和ヘリウム冷却において、コイル最下部近傍が起点となっている原因は、導体姿勢が水平のため最大熱流束が低いことに加えて、各層の端部はヘリウム泡が滞留しやすいためと考えられる。コイル上部を通過した所で伝播が停止する理由には、1, 2層目最終列に着目するとコイル上部は泡が溜まらず良い冷却状態が維持されることと、外側赤道部から最上部では磁場が低いことが関わっていると考えられる。



導体バンドル枚数の違いによる無絶縁 REBCO パンケーキコイルの 電流分布および安定性の調査

Investigation on current distribution and stability of NI REBCO pancake coils with
different number of bundled conductors

小高 一真, 野口 聡 (北海道大学)
KODAKA Kazuma, NOGUCHI So (Hokkaido University)
E-mail: kodaka@em.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

無絶縁 (No Insulation; NI) Rare-Earth Barium Copper Oxide (REBCO) パンケーキコイルの励磁特性、熱的安定性を向上させるために、REBCO 導体をバンドル化して巻線された (Multi-Bundled; MB) コイルが提案されている [1]。MB コイルはこれまで問題となっていた励磁遅れを改善させることが可能であり、熱的安定性も維持されている。しかし、バンドル枚数の違いが電流分布や安定性にどのように変化をもたらしているかの詳細な検討は報告されていない。そこで本研究では導体の枚数が MB コイル内部の電流分布に与える影響を調査し、安定性の差異についても調査した。

2. 解析手法・モデル

電流解析では、詳細な電流分布を調べることが可能な区分要素等価回路 (Partial Element Equivalent Circuit; PEEC) 法を用いてコイルをモデル化した。また、得られた電流から各抵抗成分における発熱量を計算し、有限要素法 (Finite Element Method; FEM) によって熱分布を得た。

表 1 にコイル諸元と解析条件を示す。バンドル枚数が 2, 3, 4 枚の MB NI コイルを比較する。すべてのコイルのサイズは等しく、6 個のシングルパンケーキコイルを積層させたときを想定した。REBCO テープ 1 枚当たりの電流量が等しくなるように運転電流はテープ枚数に比例している。本研究ではすべてのコイルにおいてコイル外側のテープから、Tape1~4 と呼ぶ。

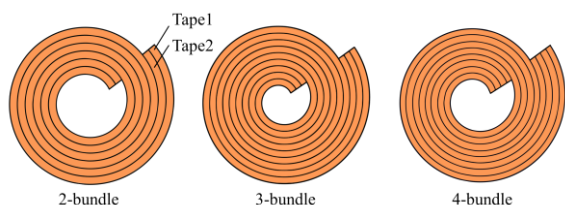


Fig. 1. MB NI coil models.

3. 解析結果

1 枚あたり 450 A の運転電流が流れる定常状態において、上から 3 つ目のコイルの Tape1 中央部を常電導転移させ、安定性を評価した。局所常電導転移後の電流分布変化を図 2 に示す。いずれのコイルも Tape1 に流れる電流は常電導部で減少し、そして隣接するテープに転流している。2 枚バンドルコイルでは、Tape1 の電流がほとんど全て Tape2 へ、3 枚バンドルコイルでは Tape2 と Tape3 へ半分ずつ移る。4 枚バンドルコイルでは Tape1 の電流に加え、Tape3 の電流も誘導電流の影響を受けて Tape2, 4 へと転流している。時間が経過すると Tape3 の電流は 450 A に戻るが常電導転移直後には Tape2, 4 への負荷が大きくなることが考えられる。

以上から、MB NI コイルは常電導転移が発生すると隣接するテープへと電流を移すことで熱的安定性を保つことが確認できた。しかしテープ枚数を増やしても、電流の共有は隣接するテープ間のみであり、誘導電流によってさらなる負荷がかかるため、3 枚バンドルが最も適していると考えられる。

TABLE I
SPECIFICATIONS OF REBCO TAPE AND COILS,
AND SIMULATION CONDITIONS

Parameters	Value		
Number of bundled tapes	2	3	4
Specifications of coils			
Coil i.d., o.d. [mm]	120.0, 139.2		
Number of turns	48	32	24
Number of single pancakes	6		
Contact resistivity [$\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$]	70.0		
Inductance [mH]	56.3		
Conditions			
Operating temperature [K]	20.0		
External magnetic field [T]	14.0		
Operating current [A]	900	1350	1800
Simulation time step [s]	0.001		

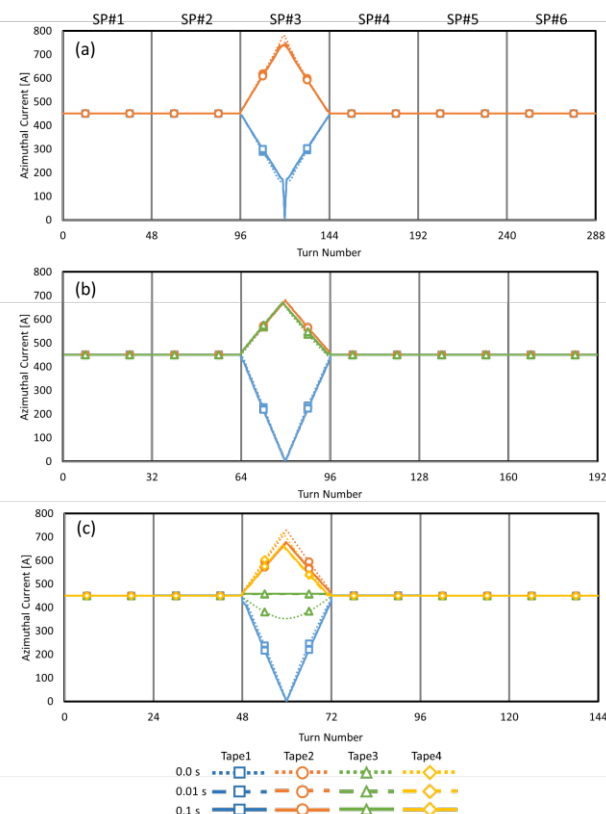


Fig. 2. Time variation of current distribution in normal-state transition test, (a) 2-bundle, (b) 3-bundle, (c) 4-bundle.

参考文献

1. J. Geng, and M. Zhang, "A parallel co-wound no-insulation REBCO pancake coil for improving charging delays," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 32, Jun. 2019, Art. no. 084002.

交流電による無絶縁 REBCO コイルの ターン間接触抵抗測定時の電流現象解析

Current Behavior Simulation of NI REBCO Coils at Turn-To-Turn Contact Resistance Measurement by AC Current

間藤 昂允(北大); 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範(岡大); 野口 聡(北大)

MATO Takanobu (Hokkaido Univ.); INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBoem (Okayama Univ.);

NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

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

1. はじめに

無絶縁(No-Insulation: NI)巻線技術が、超高磁場応用に向けた REBCO マグネットで広く採用され始めている。NI REBCO マグネットは熱暴走を起こしづらく、高い熱的安定性のもと超高磁場を生成することができる。NI 技術の熱的安定性は、本質的に常伝導転移時の電流の径方向迂回挙動に起因するので、熱的安定性を決定するパラメータとしてターン間接触抵抗値が重要となっている。ターン間接触抵抗値は、遮断試験を実施して得られた電流減衰特性から求められることが一般的である。しかし、遮断法では動作温度や電流値、外部磁場が変動する状況下で接触抵抗を測定することが困難である。そこで、交流電による径方向抵抗測定手法(LFAC法)が提案された。適切な周波数の交流を通電し、入力電流及びコイル電圧の比からターン間接触抵抗を求める方法である。これまで、様々な条件下で測定が行われてきており、適切な通電交流電流の条件が明らかになってきている。

本発表では PEEC 法により LFAC 法の詳細な電流解析を行い、電流現象を調査することで実験の妥当性及びより正確なターン間接触抵抗値の求め方について検討したので報告する。

2. 実験値と数値計算結果の比較

まず、実験で得られた電流・電圧波形と一致する接触抵抗率を数値計算上で同定する。実験で使用された REBCO シングル・パンケーキ・コイルの諸元を表 1 に示す。このコイルに振幅が 10 A、周波数が 10 Hz の交流電流を通電した結果が図 1(a)である。LFAC 法の計算式から、NI REBCO コイルの接触抵抗値は $142 \mu\Omega$ となる[1]。続いて、PEEC 法[2]を用いてシミュレーションし、実験と同じ波形を得た(図 1(b))。この時の接触抵抗率は $103 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、抵抗値に換算すると $120 \mu\Omega$ である。従来の LFAC 法で求めた接触抵抗値が、数値計算で求めた抵抗値と一致しない。実験測定結果では、電流と電圧波形に位相差を観察でき、インダクタンス成分の存在が認められる。より詳細に調査するため、PEEC 法により電流分布を調査する。

3. 交流電流印可時の電流分布

図 1(b)の点 A における周方向電流分布を図 2 に示す。最内周と最外周において、周方向電流が流れている様子が確認できる。適切な周波数の電流を印加し、径方向に均等に電

流を流す場合、このような一周にわたる転流領域が生じてしまうため、インダクタンス成分が生じる。これを加味した補正方法についての検討が必要である。

参考文献

- [1] S. Noguchi, et. al., "Turn-to-Turn Contact Resistance Measurement of No-Insulation REBCO Pancake Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, 2019, Art. no. 4601605.
- [2] R. Miyao, et. al., "Thermal and Electromagnetic Simulation of Multistacked No-Insulation REBCO Pancake Coils on Normal-State Transition by PEEC Method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, Apr. 2018, Art. no. 4601405.

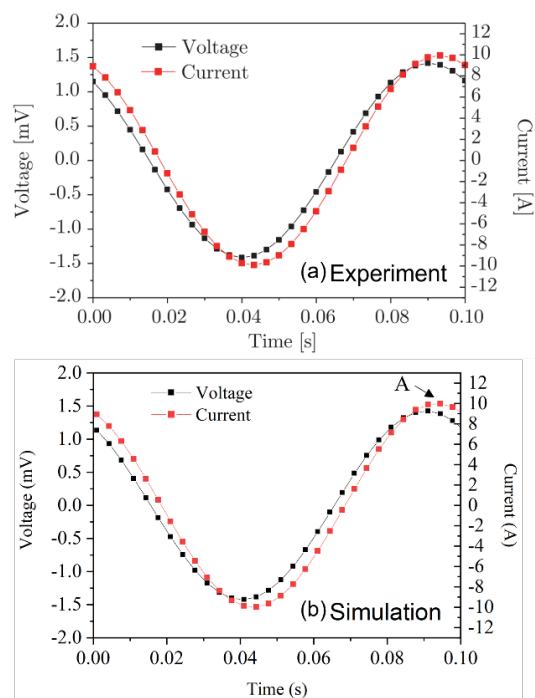


Fig. 1. Waveforms of current and voltage when LFAC method is applied to NI REBCO pancake coil in (a) experiment, and (b) simulation.

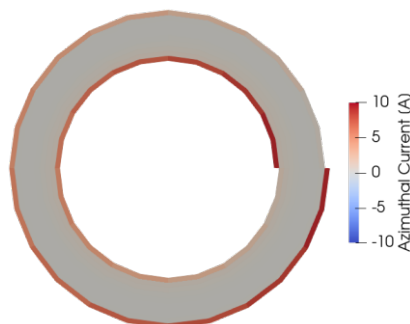


Fig. 2. Azimuthal current distribution applying LFAC method.

TABLE I
COIL AND REBCO TAPE SPECIFICATIONS,
AND OPERATING CONDITIONS

Parameters	Value
Coil inner diameter [mm]	60.0
Coil outer diameter [mm]	62.9
Tape width [mm]	4.0
Tape thickness [mm]	0.144
Turn [-]	10
AC frequency [Hz]	10
AC amplitude [A]	10

LFAC 法を用いた NI REBCO コイルにおける接触抵抗の測定精度に関する検討

Investigating of the measurement accuracy of the contact resistance in NI REBCO coil by LFAC method

井上 良太, 宮本 康平, 小林 大剛, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大); 野口 聡(北大)

INOUE Ryota, MIYAMOTO Kohei, KOBAYASHI Hirotaka, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama Univ.);

NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

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

1. はじめに

近年、高電流密度化および高熱的安定化を両立する高磁場マグネットの開発に向けて、無絶縁高温超電導(NI)コイルが注目されている。その一方で、NI コイルの通電特性や熱的安定性は、巻線間接触抵抗によって支配される。したがって、NI コイルの巻線間接触抵抗の大きさを正確に測定することが重要である。そのため、我々は、低周波の交流通電による測定手法(LFAC 法)を提案してきた[1]。しかし、NI コイルの入力インピーダンスは、周波数の増加と共に複雑に変化するため、巻線間接触抵抗の測定に適した周波数が不明確であった。そこで、本発表では、巻線張力の異なる NI コイルを作製し、NI コイルの等価抵抗および等価インダクタンスの周波数特性を測定した。また、部分要素等価回路(PEEC)モデルの電流分布解析から、NI コイルにおける巻線間接触抵抗の測定に最適な周波数を明確にした。

2. 実験および解析条件

Fig.1に作製したNI試験コイルを示す。また、Fig.2に測定された接触抵抗率の検証用PEECモデルを示す。なお、本検討では、LFAC法の測定精度を明らかにするために、僅かな接触抵抗率の違いを模擬した3種類のNI試験コイル(巻線張力: 0.5 kg, 1 kg, 2 kg)を作製した。NI試験コイルの諸元をTable1に示す。なお、実験では、交流10 A_{peak}を通電し、ロックインアンプを用いて、NI試験コイルの等価抵抗 R_{eq} および等価インダクタンス L_{eq} を測定した[2]。また、PEECモデルによる電流分布解析で用いた接触抵抗率 ρ_{cont} は、以下の式で求めた。

$$\rho_{cont} = \frac{R_{eq}(f_{cont})}{N-1} \times \left\{ w \times 2\pi \times \left(\frac{(D_{in} + D_o)/2}{2} \right) \right\}$$

ここで、 $R_{eq}(f_{cont})$ は、周方向電流(等価インダクタンス)がほぼ0となる周波数 f_{cont} における等価抵抗 R_{eq} 、 N はコイルのターン数、 w はREBCO線材の幅、 D_o はコイル外径である。

3. 結果および考察

Fig.3およびFig.4に測定および解析したNI試験コイルの等価抵抗 R_{eq} および等価インダクタンス L_{eq} の周波数特性を示す。Fig.3およびFig.4より、巻線張力の大きさによって周波数特性は異なるものの、約10 Hz以下のNI試験コイルの等価抵抗は上昇し、等価インダクタンスは減少した。これは、コイル周方向の電流が減少し、コイル径方向の電流が支配的となるためと考えられる。一方、約10 Hz以上の周波数領域における等価抵抗は徐々に増加し、1 kHz以上では、その増加が顕著に表れた。これは、周波数の上昇と共に通電用の電極間に電流が集中し、電流の流れる面積が減少したためと考えられる。

また、等価インダクタンスがほぼ0となる周波数 f_{cont} から求めた接触抵抗率 ρ_{cont} を用いて、等価抵抗および等価インダクタンスを解析した結果は、実験値と概ね一致した。したがって、 f_{cont} は、NIコイルの接触抵抗測定に最適な周波数と考えられる。また、 f_{cont} は、巻線張力が大きくなる(接触抵抗が小さくなる)ほど、低周波化することがわかった。これは、コイル径方向の電流が、より低周波領域で支配的となるためと考えられる。

以上より、LFAC法は、等価インダクタンスがほぼ0となる周波数 f_{cont} におけるNIコイルの等価抵抗 $R_{eq}(f_{cont})$ から、巻線間の接触抵抗および接触抵抗率を高精度に測定できることがわかった。

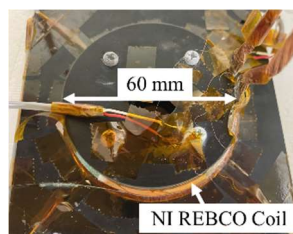


Fig.1 NI test coil

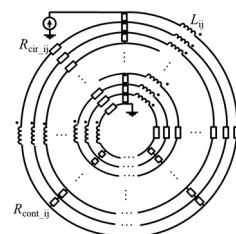


Fig.2 Analytical model of NI test coil

Table 1 Specifications of the NI test coils.

REBCO wire	Width w (mm)	4
	Thickness t (μm)	72
	Critical current I_c (A)	150
Inner diameter D_{in} (mm)	60	
Outer diameter D_o (mm)	63	
Number of turns N	20	
Winding tension (kg)	0.5, 1.0, 2.0	
Contact resistivity ρ_{cont} ($\mu\Omega\text{cm}^2$)	380, 184, 31	

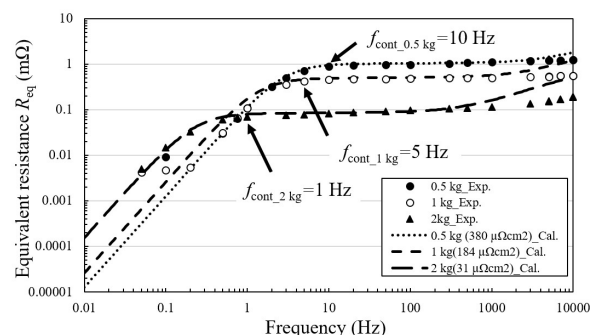


Fig.3 The measured and calculated equivalent resistance of the three test coils by AC current with 10 A_{peak}.

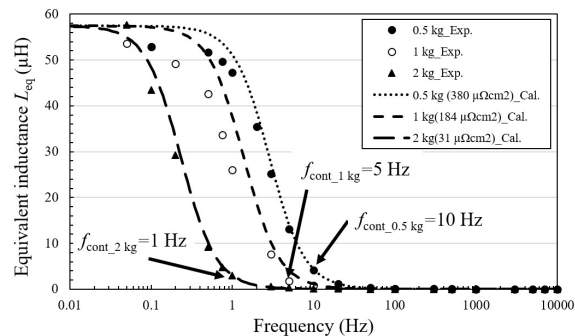


Fig.4 The measured and calculated equivalent inductance of the three test coils by AC current with 10 A_{peak}.

参考文献

1. S. Noguchi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.29, no. 5, 2019, 4601605
2. K. Miyamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.44

不均一な接触抵抗率が局所劣化のある無絶縁コイルの熱的挙動に与える影響

The Effect of Non-uniform Contact Resistivity on The Thermal Behavior of The No-insulation Coil with The Local Degradation

仲田 悠馬, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔 (千葉大学);
長崎 陽, 津田 理 (東北大学)

NAKADA Yuma, KOBAYASHI Hiroyasu, SAOTOME Hideo, MIYAGI Daisuke (Chiba Univ.);

NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: nakada1125@chiba-u.jp

1. はじめに

焼損を避けることができる超電導コイルとして、無絶縁コイル(NIC)が提案されている。無絶縁コイルでは導体間が絶縁されていないため、電流が劣化部を避け径方向へ分流する。そのため、劣化部に臨界電流値を大きく超えた電流が流れ込まず、劣化部における発熱を抑えることができる。しかし、実際の導体間の接触抵抗率は、接触面の状態、冷却サイクル、圧力によって大きく変化する[1]。そのため、接触抵抗率の分布によっては電流が分流せず、劣化部の温度が大きく上昇する可能性がある。本研究では、無絶縁コイル内部の電流分布を PEEC モデル[2]を用いて解析を行い、接触抵抗率の分布が異なる場合の無絶縁コイルの温度分布、電流分布について検討した。結果より、接触抵抗率の分布が変わることによる、コイル全体の発熱量と温度上昇量の変化、そして熱的安定性への影響を調査した。

2. 解析モデル及び解析方法

当モデルでは高温超電導体の臨界電流 I_c の 30 K における磁場依存性[3]を反映し、数値解析を行っている。温度分布解析は、二次元円筒座標系熱伝導方程式を用いた。境界条件は、コイル内外で熱の出入りの無い断熱条件とした。解析に用いた Y 系テープ導体、超電導コイルの諸元、及び解析条件を Table 1 へ示す。接触抵抗率(R_{ct})の取りうる値の範囲を最大で $1.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2 \sim 142.2 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ [1]とし、法則性を持たずに分布するものとした。解析では、劣化部の臨界電流値を周囲の導体の 20%の値とした。コイルの運転負荷率は 6 割とした。

3. 解析結果

Fig. 1 に劣化部をもつ接触抵抗率の不均一な無絶縁コイルと接触抵抗率が均一である無絶縁コイル全体の発熱量推移を示す。接触抵抗率の不均一な無絶縁コイルの励磁中の発熱量は、分散が大きくなるにつれ増大し、接触抵抗率が均一の場合より大きくなる。これは、接触抵抗率が小さい箇所に大電流が流れることで発熱量が増大するためである。励磁終了時から 2765 秒経過後における劣化部の温度は 37.8 K 以下であり、温度上昇量はどのケースにおいても 5.1 K 以下である。コイル全体の接触抵抗率の取りうる値の範囲が $14.4 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2 \sim 129.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$, Fig. 2 に示す劣化部周囲の 1 ターンの接触抵抗率を変更した場合のコイル全体の発熱量の時間推移を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より接触抵抗率が $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の場合には、励磁終了後の発熱量が 23.3 W であり、その後も上昇し続け熱暴走に至った。接触抵抗率 $1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下の場合には、励磁終了後に発熱量が減少し続けた。接触抵抗率の大小に関わらず、劣化部を避け接触抵抗に分流する電流の量、及び分布はほとんど変化しなかったため、接触抵抗の大きさがそのまま発熱量の差となったと考えられる。

以上より、接触抵抗率の分布が不均一となることで、コイル全体の発熱量は分散の大きさに比例して増大していくことが明らかとなった。また、劣化部周囲の接触抵抗率が $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を超える場合、劣化部における発熱量が著しく増大し、熱暴走に至ることを明らかにした。

Table 1. Specifications and analysis conditions of NIC.

Number of turns	100
Critical current at 0 T, 30 K [A]	1133
Divisions per turn	10
Tape width [mm]	4
Tape thickness [mm]	0.16
n value	33
Coil i.d. [m]	0.5
Excitation rate [A/s]	2
Excitation time [s]	235

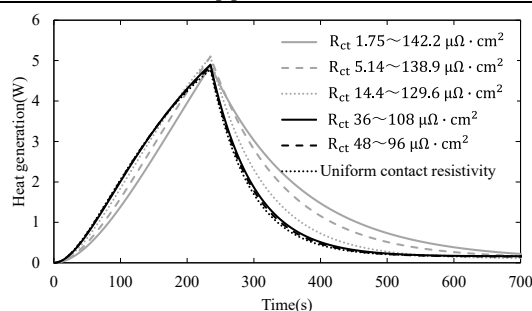


Fig. 1. Transition of the heat generation in each no-insulation coil with different distribution of contact resistivity.

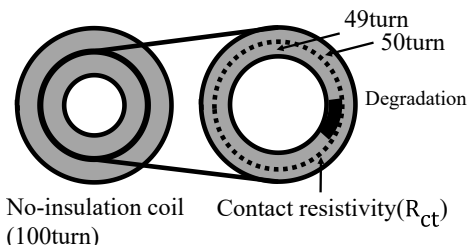


Fig. 2. The location of the degradation and the contact resistivity to be changed.

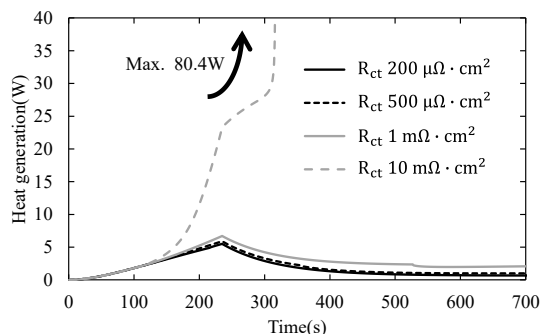


Fig. 3. Transition of the heat generation in each no-insulation coil with different value of contact resistivity around the degradation.

参考文献

1. M. Bonura, et al., IEEE vol.29 no 5 2019
2. Tao Wang et al., IEEE vol.25.no 3 2015
3. Selvamanickam, V et al., Superconductor Science and Technology 25.12(2012)

Bi2223コイルの液体窒素中の熱暴走についての数値解析 Simulation on thermal runaway in liquid nitrogen for a Bi2223 coil

今川信作, 岩本晃史, 濱口真司(NIFS); 白井康之, 川崎理香子, 大矢輝, 松本郁哉, 前田佑一郎, 松本岳, 塩津正博(京都大); 大屋正義(関西学院大); 津田理, 長崎陽(東北大); 谷貝剛(上智大); 小林弘明(宇宙科学研究所)

IMAGAWA Shinsaku, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji (NIFS); SHIRAI Yasuyuki, KAWASAKI Rikako, OYA Hikaru, MATSUMOTO Fumiya, MAEDA Yuichiro, MATSUMOTO Gaku, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.);

OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.); TSUDA Makoto, NAGASAKI You (Tohoku Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.);

KOBAYASHI Hiroaki (JAXA)

E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

1. はじめに

液体水素で直接冷却することによりクエンチ保護が可能な電圧発生まで冷却安定な高温超伝導コイルの開発を目指している。Bi2223 テープ線材を用いて、内径 200 mm の6個の外側ダブルパンケーキコイルと外径 160 mm の4個の内側ダブルパンケーキコイルで構成されるマグネット(図1 参照)を製作し、液体窒素および液体水素中で熱暴走に至る発熱(電圧と電流値)を測定した。実測結果を再現する数値解析モデルの構築を進めており、ここでは、液体窒素中での各ダブルパンケーキコイルおよび組立コイルの熱暴走実験について、周方向には一様を仮定した有限差分法による解析結果を報告する。

2. 数値解析の方法

冷却は、Bi2223 線材内の温度分布を無視して、カプトン絶縁の熱伝導と液体窒素中の熱伝達のみを考慮した。Coil-A は 77 列×2 層のコイルなので、ダブルパンケーキの場合は、上下対称を仮定し、77 点の温度を収束計算により求めた。組立コイルの場合は、最も磁場の高いダブルパンケーキコイルの2層について計算した。発熱の評価においては、安定化材への分流を考慮する必要があり、近似式により大まかな分流比を求めてから超伝導線材の電界と等しくなる比を収束計算で求めた。

コイル各列の I_c の評価は、線材テープ幅方向に 0.1 mm 幅の 43 要素に分割し、各要素の I_c を n 値モデルで求め、その和をその列の I_c とした。磁場分布の計算においては線材内の電流分布を考慮する必要があり、列内の各要素が等電位となる電流分布を収束計算により求める必要がある。通電電流、 n 値および温度によって変化するが、簡便のため、 n 値は 7 一定、電流値 I はコイル I_c 近傍、温度は 77.3 K の条件で求めた分布に固定し、各要素の磁場は全電流に比例するとした。Coil-A のダブルパンケーキコイルの磁場分布の一例を図2に示す。

n 値は磁場、温度、負荷率に依存する。ここでは、 n 値は主に I_c/I に依存すると考えて次式を仮定し、コイル電圧が実測値に一致する条件を試行錯誤により求めた。

$$n(I_c/I) = n(0) + (n(1) - n(0))(I_c/I)^m \quad (1)$$

3. 解析結果

ダブルパンケーキの場合のコイル電圧と温度分布の解析結果の例を図3と4に示す。式(1)の $n(0)$ と $n(1)$ は、3 点の電流値におけるコイル電圧計算値が実測値と一致するように選んだ。式(1)の m は 0.7-0.8 の場合に全域において計算値と実測値が良く一致する。熱暴走に至る電流値は、計算の方が実測よりも高くなるが、計算では周方向に一様発熱を仮定していることが主要因と考えられる。熱暴走は、発熱最大の列の熱バランスで決定され、今回の計算では 84 K 付近が限界値となった。列間の熱伝導を考慮することにより、許容発熱が高くなる。この計算では、線材特性は全長において一様を仮定しているため、列間の熱伝導を考慮する効果は大きくはないが、局所的な劣化がある場合にはその効果が大きくなると考えられる。

謝辞

本研究は、科研費補助金 K119H02130 および NIFS 共同研究 NIFS20K0BA032 の支援の下に実施されました。

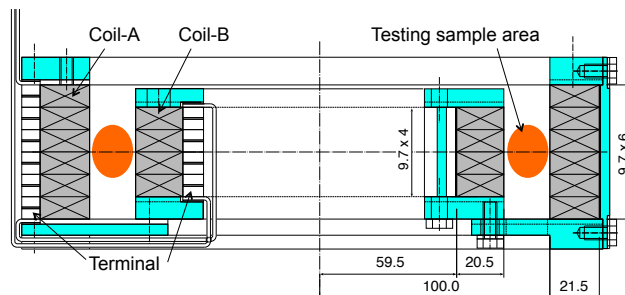


Fig. 1. Sketch of LH₂ cooled 5 T coil with HTS tape conductors.

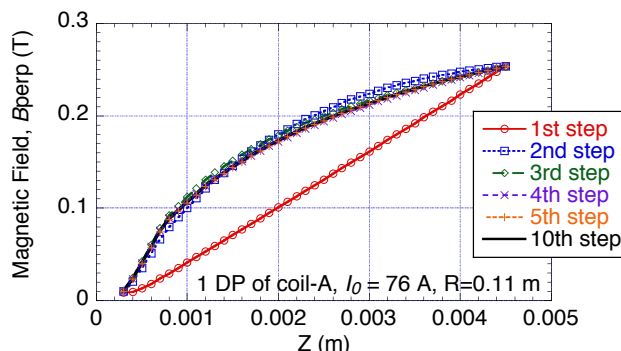


Fig. 2. Equivalent magnetic field normal to the tape at the radius of 0.11 m of a Coil-A double pancake coil.

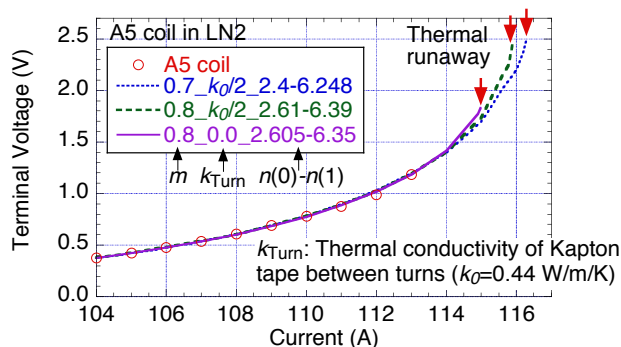


Fig. 3. Terminal voltage of Coil-A double pancake coil. Lines show calculated results, and symbols show the data of A5 coil.

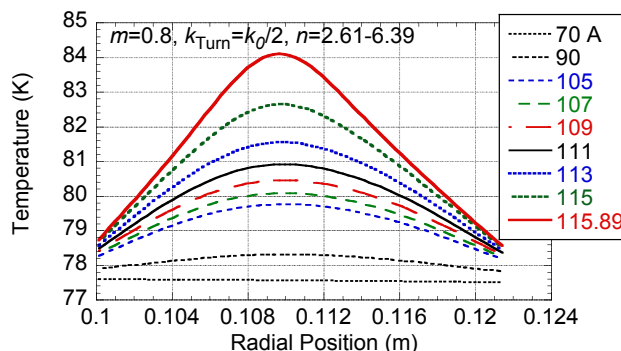


Fig. 4. Calculated temperature of Coil-A double pancake coil for the case of $m=0.8$ with heat transfer between turns.

銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の動的抵抗測定

Dynamic resistivity measurements of copper-plated multifilament coated conductors

曾我部 友輔, 陳 妙鑫, 雨宮 尚之 (京都大学)

SOGABE Yusuke, CHEN Miaoxin, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

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

1. はじめに

直流電流を通電している薄膜高温超伝導線に交流磁界が印加されると、動的抵抗と呼ばれる抵抗が発生する。動的抵抗は、回転機やフラックスポンプなどへの応用時に問題とされている。動的抵抗は外部交流磁界による交流損失が抵抗として現れたものであり、交流損失低減手法の一つであるマルチフィラメント化が有効と考えられる。しかし、安定性向上のために銅分流層を複合した銅分流層複合マルチフィラメント線においては結合電流が誘導されるため、結合電流の減衰時定数が外部磁界の時定数よりも十分短い場合にのみマルチフィラメント化が有効となる[1]。

2. 測定試料及び測定方法

我々は 4 つの試料を測定した。それぞれの試料の諸元を Table I に示す。直線状のモノフィラメント線及びマルチフィラメント線、スパイラル状のモノフィラメント線及びマルチフィラメント線が測定試料である。全ての試料は SuperPower 社及び古河電気工業株式会社製の薄膜高温超伝導線であり、銅分流層が両面にめっきされている。また、スパイラル状試料は、測定装置の都合上、使用した線材長は約 275 mm であり、直線状試料よりも使用線材長が長い。スパイラル状試料の外観を Fig. 1 に示す。

動的抵抗の測定には、最大磁束密度 100 mT、最高周波数約 200 Hz まで発生可能な交流電磁石を使用した。動的抵抗は試料に取り付けた電圧タップによる電圧から測定した。通電電流 I_t 、測定電圧が V であるとき、一周期当たりの単位長さ当たりの動的抵抗 R_d は、以下の式で与えられる。

$$R_d = V / I_t df \quad (1)$$

ここで、 d は電圧タップ間距離、 f は外部磁界の周波数である。

3. 測定結果及び考察

Fig. 2 に、外部磁場周波数 65.3 Hz、 I_t と試料臨界電流 I_c の比である i が 0.7 の場合の、測定された動的抵抗を示す。STF1、STF5、SPF1 の測定結果においては、動的抵抗の特徴である閾値磁界が、10 mT 付近に存在していることが確認できる。

まず、直線状試料である STF1 と STF5 を比較すると、これら二つに関しては動的抵抗の違いはほとんど見られない。すなわち、直線状薄膜高温超伝導線においては、マルチフィラメント化による動的抵抗の低減効果は見られなかった。長さ 130 mm の銅分流層複合マルチフィラメント線における結合電流の特性周波数は、過去の測定結果から約 7.4 Hz と概算され、今回の測定条件である 65.3 Hz はこの特性周波数よりも十分高いため、STF5 においては、フィラメントは完全に結合していると予想される。このような条件下ではマルチフィラメント化は効果を発揮せず、モノフィラメント線のように振舞い、結果として動的抵抗も変化しなかったと考えられる。

次に、STF1 と SPF1 を比較すると、SPF1 の方が小さくなっている。また、SPF1 では閾値磁界が不明瞭になっている。これはスパイラル状になっていることに起因しており、薄膜高温超伝導線に印加される磁界の方向が一定ではなく、変化しているためであると考えられる。薄膜高温超伝導線に垂直に磁界が印加される領域における超伝導線内電流分布は、STF1 と同様になっているが、その他の領域では大きく異なっているためである。

最後に、STF5 と SPF5 を比較すると、スパイラル化によって顕著に動的抵抗が低減されていることがわかる。例えば、 $B_a = 60$ mT においては、SPF5 における動的抵抗は STF5 の約 15% になっている。SPF5 における結合電流の特性周波数は約 3.8 kHz と概算され、測定条件の 65.3 Hz よりも十分高い。このため、SPF5 においては各フィラメントの結合は解けた状態であり、マルチフィラメント化の効果が十分に発揮され、動的抵抗が低減されたものと考えられる。

これらの結果より、スパイラル状のマルチフィラメント線において、動的抵抗が有効に低減されることが確認された。

Table 1 Specifications of measured samples.

Straight samples		
Sample name	STF1	STF5
Number of filaments	1	5
Copper thickness per side		40 μ m
Substrate thickness		30 μ m
Tape width		4 mm
Sample length		130 mm
Spiral samples		
Sample name	SPF1	SPF5
Number of filaments	1	5
Copper thickness per side		40 μ m
Substrate thickness		30 μ m
Tape width		4 mm
Core diameter		3 mm
Spiral angle		55°



Fig. 1 Photo of a spiral copper-plated coated conductor

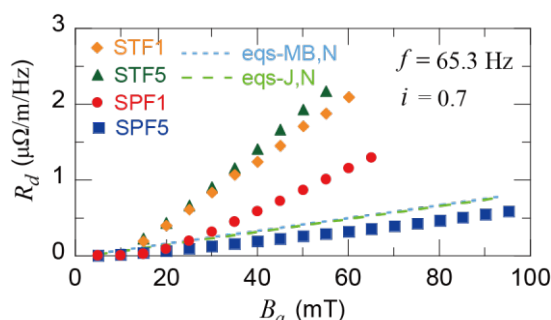


Fig. 2 Measured dynamic resistivity of four samples

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H00245 の助成を受けたものである。

参考文献

1. N. Amemiya, et al.: SUST, Vol. 31 (2018) 025007

超高磁場発生用 REBCO 内挿コイルの電圧挙動に関する検討

Investigation on voltage behaviors of insert REBCO coils for ultra-high magnetic field generation

野口 聡, 間藤 昂允 (北海道大学); HAHN Seungyong (SNU)

NOGUCHI So, Mato Takanobu (Hokkaido Univ.); HAHN Seungyong (Seoul National Univ.)

E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

世界中で超高磁場用 REBCO 内挿コイルの開発が進められている[1]。内挿コイルとして REBCO マグネットを用いる場合、外挿コイルも十分な磁場を発生していることが多い。その際に、REBCO 内挿コイルの遮蔽電流による過剰応力や、コイル変形などが多く報告され始めている[2]。その一方で、REBCO 内挿コイルの励磁時の電圧が予測値よりも大きいケースがあることがある。

本稿では、REBCO 内挿コイルの励磁の電圧挙動について検討した。

2. REBCO 内挿コイルの電圧挙動

一般的な無絶縁 REBCO 内挿コイルの簡易等価回路を Fig. 1 に示す。キルヒホッフの第2法則より、通常、以下の式が採用される。

$$L_{in} \frac{dI_{in}}{dt} + M \frac{dI_{out}}{dt} + \frac{R_{SC} R_{mt}}{R_{SC} + R_{mt}} I_{in} = R_{ct} I_{ct}$$

左辺第1, 2項はコイルに鎖交する磁束の変化から導出される電圧 V_{in} は、コイル形状が変化しないことが前提である。実際に、コイル形状変化を考慮すると以下の式が導出される。

$$V_{in} = \frac{d\Phi}{dt} = L_{in} \frac{dI_{in}}{dt} + I_{in} \frac{dL_{in}}{dt} + M \frac{dI_{out}}{dt} + I_{out} \frac{dM}{dt}$$

右辺第2, 4項はコイル形状変化により現れる項である。一般的に、それらの項は大変小さく、無視できるほどである。しかし、20T を超えるような超高磁場下では、無視できない場合もある。

本原稿では、シミュレーションのテストケースとして、外挿マグネットが事前に 30 T まで励磁された後、REBCO 内挿コイルを 150 A まで 0.5 A/s で上昇させ、60 s 保持した後、0 A まで減少させた。なお、REBCO 内挿コイルは、2 つのダブルパンケーキ (各シングルパンケーキが 23 ターン) を積み重ねており、内径は約 16 mm である。REBCO 内挿コイルのインダクタンスは、0.271 mH であり、コイル形状変化がない場合の誘導電圧は 0.136 mV ($=0.271 \text{ mH} \times 0.5 \text{ A/s}$) である。

Fig. 2 にコイルの誘導成分を示す。図中の V_c が従来 (コイル形状変形を考慮せず) の誘導電圧であり、 V_d がコイル変形により発生する誘導電圧であり、 V は $V_c + V_d$ である。コイル変形による誘導電圧は、従来の誘導電圧の約 13% である。

続いて、Fig. 3 に各シングルパンケーキの最大フープ歪みを示す。超高磁場下での励磁中に REBCO 内挿マグネットが膨張し続け、誘導電圧が増大していると考えられる。なお、変形解析は1次元有限要素法で行った。

3. まとめ

超高磁場下発生用の REBCO 内挿コイルでは、従来 (コイル形状が変化しない) の誘導電圧よりも大きな誘導電圧が発生することが実験的に確認もされており、シミュレーションでも可能性を提示できた。しかし、実験結果ほどの電圧発生は確認できておらず、より詳細なシミュレーションが必要であると思われる。特に、遮蔽電流分布などにも影響が出る可能性がある。今後の詳細な検討が望まれる。

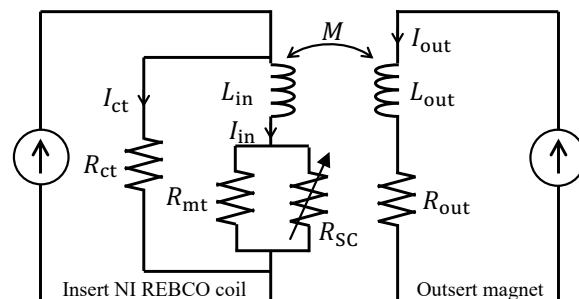


Fig. 1. Simplified lumped electric circuit of insert NI REBCO and outsert magnet.

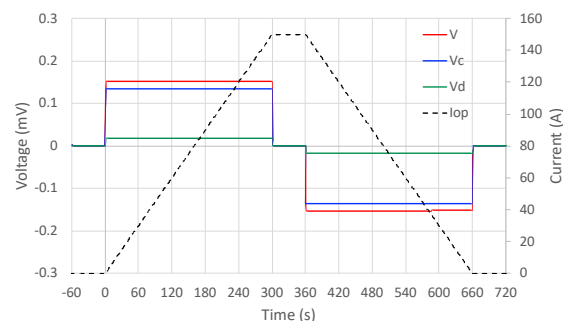


Fig. 2. Waveforms of voltages (red: total voltage V , blue: conventional inductive voltage V_c , inductive voltage due to coil deformation V_d).

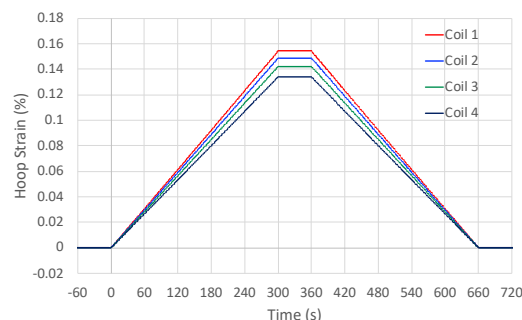


Fig. 3. Time-transient hoop strain. Every pancake coils linearly expands during charging. Stress simulation was done with 1-D finite element method.

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, Jun. 2019.
- [2] S. Noguchi, Abstracts of CSSJ Conference, 3A-a05 (2021).

T-A 法を用いた2T 伝導冷却型高温超電導MRIマグネットにおける 遮蔽電流磁場解析

Shielding-current-induced field analysis of a 2T conduction-cooled high-temperature

Superconducting MRI magnet using T-A formulation

松本 雅大, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔(千葉大); 長崎 陽, 津田 理(東北大)

MATSUMOTO Masahiro, KOBAYASHI Hiroyasu, SAOTOME Hideo, MIYAGI Daisuke (Chiba University.);

NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku University.)

E-mail: m.ma2mo10@chiba-u.jp

1. はじめに

MRI では高解像度な診断画像を撮影するために、撮像領域の高い磁場に加えてその高い時間的安定性と、空間的均一性が求められる。小型で高磁場を発生できる高温超電導コイルの実用化が期待されているが、高温超電導体はテープ線材であるため遮蔽電流が流れる。この遮蔽電流が時間的に減衰することで遮蔽電流磁場も減衰するため、撮像領域の磁場の時間的安定性に大きな課題が生じている。MRI に求められる磁場の時間的安定性は ± 1 ppm/h 以下であり、これを実現するためのコイル構造や励磁方法などの検討を数値解析を用いて行うこと、さらには試作レス設計を可能とする技術開発を検討することは極めて重要である。遮蔽電流磁場変動はコイルの励磁電流負荷率や線材の n 値により異なることが予想される。そこで本研究ではMRIコイルの電流負荷率及び n 値が遮蔽電流磁場の大きさとその減衰量に及ぼす影響の検討を行った。

2. 解析モデル及び解析方法

数値解析法として商用ソフトである COMSOL による T-A 法 [1]を用いて撮像領域内の磁場解析を行った。コイル概形[2]を Fig.1 に示す。このコイルは 10 個のダブルパンケーキコイルで構成され、定格電流 270 A 通電時にコイル中心部で 2T を発生する。超電導体特有の臨界電流密度-磁場-角度(J_c - B - θ)特性を考慮するために、参考文献[3]に示されている実験結果と参考文献[4]に示される補間手法を用いた。励磁条件は、電流スweep速度を 0.1 A/sec., 運転電流を 20, 30, ..., 260, 270, 260, ..., 30, 20 A と 10 A 変化する毎にホールド時間を 400 sec., 運転温度を 4.2 K とした。 n 値は 33 としたときの電流負荷率を、14.57 %, 19.43 %, 29.14 %とした。なお、電流負荷率とは 2 T 励磁時の運転電流 270 A と 270 A 通電時に最大垂直磁場が加わる線材の臨界電流値の比である。また、電流負荷率が 19.43 % のとき、 n 値を 23, 33, 60 とし、電流負荷率と n 値が遮蔽電流磁場とその時間変化に及ぼす影響について検討を行った。

3. 解析結果及び考察

Table.1 に電流負荷率、および n 値が遮蔽電流磁場とその時間変化に及ぼす影響を示す。電流負荷率の違いがコイル中心部での遮蔽電流磁場と励磁電流の関係を Fig.2 に示す。マイナスはコイル磁場に対して逆向きを意味する。電流負荷率が高い場合及び n 値が小さい場合に遮蔽電流磁場が小さく、減衰量が大きくなる結果が得られた。電流負荷率が高いと遮蔽電流が流れやすいフリーカレント領域が狭いため線材内部に抵抗が発生しやすくなる。 n 値が小さい場合、 E - J 特性より線材内部に抵抗が発生しやすくなる。この発生した抵抗により遮蔽電流が減衰し、遮蔽電流磁場の減衰が大きくなったと考えられる。また、各運転電流ホールド時にも同様の理由で遮蔽電流磁場が減衰したため運転電流 270 A のときの遮蔽電流磁場の大きさが小さくなったと考えられる。

以上の結果より、遮蔽電流磁場とその減衰量は電流負荷率に大きく依存することから、実機運転時において負荷率を検討する際に、重要なパラメータとなりえることを示唆した。

参考文献

1. H. Zhang, et. al. : Supercond. Sci Technol vol.30 no.2,(2016)
2. K.Masatoshi, et al. : Abstracts of CSSJ Conference, Vol.97(2018) p.92
3. Selvamanickam, V., et al. : Superconductor Science and Technology 25.12(2012)
4. U. Hiroshi, et al. : IEEE Trans.Appl. Supercond., Vol. 26, NO. 4, 2016.

Table.1 Analysis results for changing n -value and current load factor.

Current load factor [%] (n value)	14.57 (33)	19.43 (33)	29.14 (33)
Maximum value of shielding-current-induced field [mT]	27.79	27.08	25.81
Shielding current magnetic field attenuation [mT]	0.13	0.16	0.21
Current load factor [%] (n value)	19.43 (23)	19.43 (33)	19.43 (60)
Maximum value of shielding-current-induced field [mT]	26.85	27.08	27.31
Shielding current magnetic field attenuation [mT]	0.18	0.16	0.13

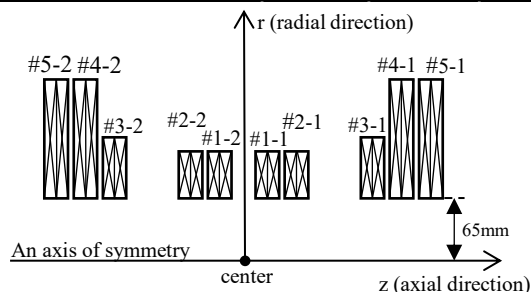


Fig.1 Schematic view of MRI magnet [2].

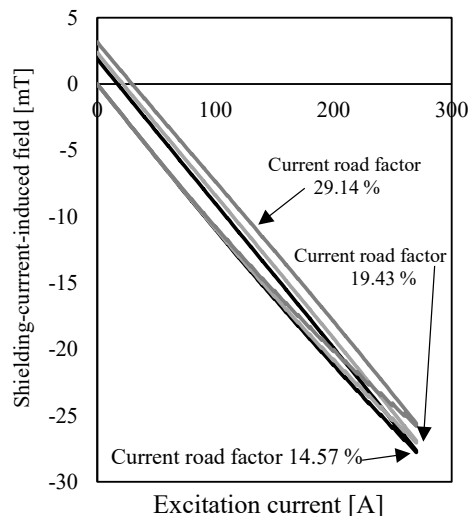


Fig.2 Analytical result of the shielding-current-induced field when current load factor is changed.

超良好均一度(± 0.1 ppm)を目指すシミング計算の MRI 磁石を用いた試験と改良

Test of shimming calculation with magnetic field interpolation to achieve very fine homogeneity of ± 0.1 ppm using MRI magnet

阿部充志, 佐々木憲一, 萩津透, 齊藤直人, 三部勉, 下村浩一郎(高エネ研), 飯沼裕美(茨城大), 多田紘規(名古屋大), 小山駿, 田中陶冶(東京大), MuSEUM Collaboration

Mitsushi Abe, Ken-ichi Sasaki, Toru Ogitsu, Naohito Saito, Tsutomu Mibe, Koichiro Shimomura(KEK), Iinuma Hiromi(Ibaraki Univ.), Hiroki Tada(Nagoya Univ.), Shun Oyama, Toya Tanaka (U. of Tokyo)
E-mail: abemk@post.kek.jp

1. はじめに

J-PARC で計画している、ミュオン磁気能率、電気能率(g-2/EDM)およびミュオニウムの超微細構造の精密測定(MuSEUM: Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave)実験では、空間的・時間的に ± 0.1 ppm 以内の磁場変動に調整された実験領域が必要である。このため、それぞれ、3.0T および 1.70T を永久電流通電の超電導磁石を用い、磁場分布を補正する受動的(磁化鉄片利用)シミングにより空間的均一度を実現し、実験室の温度調整により時間的な磁場変動を抑制する計画である。MuSEUM 実験では全身 MRI 磁石を再利用する。通常の MRI 磁石では 10ppm 程度の均一度(直径 50cm 球内)に、調整(磁場シミング)される[1]が、MuSEUM 実験では狭い領域(20cm 直径 30cm 長の回転楕円体)ではあるが、 ± 0.1 ppm 以内の超良好均一磁場に調整する。ここでは、計測磁場を入力、シム片配置を出力とする、シミング計算について議論する。

2. シミング作業と計算アルゴリズム

磁場シミングの手順およびシミング計算アルゴリズムにはは参考文献[2]の方法を用いる。シミング作業の手順は、(1)磁場計測(直径 40~50cm 球面上)、(2)シミング計算、(3)鉄片配置作業、の繰り返しである。シミング計算には、MRI 磁石用に開発した打ち切り特異値分解(TSVD: Truncated Singular Value Decomposition)正則化利用の計算法[2]を利用する。

前報告[3]のように MuSEUM 実験で使用予定の磁石で磁場シミングを試行している。この時には ± 0.1 ppm の均一度を達成することは出来なかったが、次の 3 点の改良と計算誤差の把握が必要であることを把握した。

- 鉄片最小単位の見直し、
- 計測面内部の磁場分布の内挿計算の精度確認、
- 磁石軸に垂直な磁場成分 B_z の影響把握。

参考文献[2]のシミング計算では、 $\mathbf{B}^{\text{ER}} = \mathbf{B}^0 - \mathbf{B}^{\text{MS}}$ とし、誤差磁場を補正する磁気モーメント配置 $\mathbf{M}$ の関係式から TSVD 利用で逆問題解(SVD 固有分布 k について加算)、

$$\mathbf{B}^{\text{ER}} = \mathbf{A}\mathbf{M}, \rightarrow \text{逆問題解 } \mathbf{M} = \sum (\mathbf{v}_k \mathbf{u}_k^t / \lambda_k) \mathbf{B}^{\text{ER}}, (1)$$

を算出し $\mathbf{M}$ を求める。さらに、鉄シム片が磁気飽和し、1cc 当

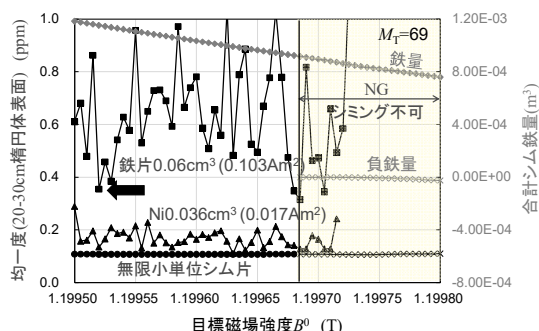


Fig. 1. Predicted homogeneities on 20-30cm-spheroid surface. Target magnetic field is scanned with three minimum iron piece units.

たり 1.711Am^2 (飽和磁化 2.15T)の磁気モーメントを持つとしてシム鉄量配置 $\mathbf{V}$ を求める。ここまでは連続値であるが、実配置は最小単位でシム片数を整数化して配置する。

$$(\text{シム片枚数})_j = V_j / (\text{鉄片最小単位}) \quad (2)$$

このため $\pm$ 最小単位の半分の範囲で鉄量誤差が生じ、誤差磁場を作る。シミング後の均一度を、鉄片最小単位を変えて推定した結果を図 1 に示す。最小単位 0.06cc は MRI 磁石の通常使用で用いていた最小単位であり、0.036cc の Ni のシム片の場合と連続鉄量値の場合を追記している。前者では、0.3ppm 以下の均一度は難しいが、後者の Ni(飽和磁化 0.6T)利用では、磁気モーメントの最小単位が約 1/6 となり、0.2ppm 以下の超良好均一度が可能であると解る。実際に Ni シム片を用いたシミング試行では、目標の均一度を得た[3](図 2)。

(ii)内挿磁場計算では、Field Camera で計測した 50cm 球面上の 576 点の磁場データから、MuSEUM 実験領域のシミング後の磁場分布を 0.01ppm 以下の誤差で再構成できることを確認した。また、(iii)の垂直成分の磁場 B_z の影響があり得るが、 $1.70 \times 10^{-4}\text{T}$ 以下であれば均一度への影響は無視でき、実機では中心磁場を計測し磁場の低下が無いことを確認することで、 B_z 成分の影響の有無を確認出来ると把握した。

3. シミング試行結果

以上の改良を行ったシミング計算とシム片を使ってシミング試行を行った。その結果、図 2 に示す磁場分布を得た。中心磁場に対して、 ± 0.1 ppm の等高線が MuSEUM 実験領域の外側に位置していることから、目標の均一磁場が得られたことが解る。

参考文献

- T. C. Cosmus, M. Parizh, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.21 (2011) p.2104
- M. Abe, et. al., IEEE Trans. Applied Supercond, Vol. 27 (2017) p.4400812
- K. Sasaki, et al., MT27, Nov. 15-19, 2021, Fukuoka, Japan, no. THU-P03-713-03

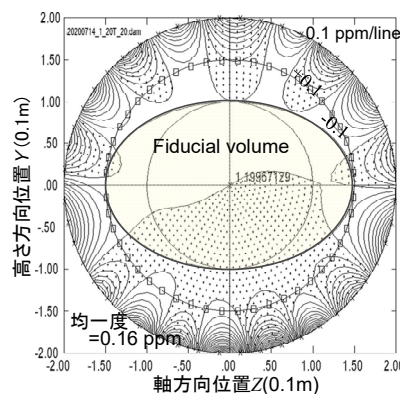


Fig. 2. Shimmed result using 0.036cc Ni shim pieces at last iterative shimming operation. Obtained homogeneity was 0.016 ppm in the MuSEUM fiducial volume.

液体水素間接冷却 MgB2 コイルの通電特性試験

Demonstration of MgB2 coil system with liquid hydrogen indirect cooling

谷貝 剛, 猪俣 涼, 恩地太紀(上智大学); 横田 康弘, 新富 孝和,(高エネルギー加速器研究機構);

平野 直樹(核融合科学研究所); 駒込 敏弘(前川製作所); 濱島 高太郎(東北大学)

YAGAI Tsuyoshi, INOMATA Ryo, ONJI Taiki (Sophia University); MAKITA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK);

HIRANO Naoki(NIFS); KOMAGOME Toshihiro(MAEKAWAMFG. CO., LTD); HAMAJIMA Koutarou(Tohoku University)

E-mail: Tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会・水素社会の到来に向けて、再生可能エネルギーを有効利用できる電力システムの実現が急務であり、その安定化のための電力貯蔵システムが欠かせない。本グループでは先進超電導電力変換システム(Advanced Superconducting Power Conditioning System: ASPCS)を提案している。ASPCS は超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES), 燃料電池, 電気分解装置, AC/DC 変換器, DC/DC 変換器及び制御系から構成されている[1]。再生可能エネルギー由来の電力を高周波・低周波成分に分離して安定化できる上、水素冷熱も有効利用できるシステムである。

SMES 用コイルは、液体水素(20 K)による間接冷却方式を採用し、定格 600A の MgB₂ ラザフォード導体で構成される。総容量 10 kJ 級の SMES コイルについて交流連続通電試験を行い、その特性を評価した。

2. 実験のセッティング

コイルは 20 K での定格 600 A で設計されたラザフォード導体を用いて巻き線されている。SMES コイルは、ワインド・アンド・リアクト(W&R およびリアクト・アンド・ワインド(W&R)法を用いて製作された 3 つのダブルパンケーキコイル(DPC)を直列接続して構成する。コイルの諸元を次に示す[2]。

Table 1 Specification of 3-DPC

Specification of SMES	3-DPC
Strand Material	MgB ₂
Strand Supplier	HyperTech Research Inc.
Operating temperature	20 K
Stored Energy	10.5 kJ
Inductance	58.1 mH
Rated current	600 A
Maximum current	1.2 kA
Magnetic field	1.2 T

本試験では直流励磁と交流励磁の二通りの方法でコイル通電試験を行った。直流励磁試験では、電流値を 50 A から 346 A とし、コイル電圧や各部温度の測定を行った。交流励磁試験においては三角パルス波電流を流した。この試験では励磁速度を 10 A/s から 50 A/s、最大電流を 0-600 A の範囲で変更し、最大電流依存試験および励磁速度依存試験を行った。冷却は、液体水素のサーモサイフォン循環による、銅伝熱板を介した間接冷却にて行った。

3. 実験結果と考察

Figure 1 は、320A 直流通電の結果である。DPC No.2 とコイル電極の接続部分で 0.03 mΩ の直流抵抗が観測されたため、その発熱によりコイル端から温度が上昇(Fig. 1(b)), クエンチに至る現象が観測され、その閾値がおよそ 3W 程度とわかった。また、交流損失の特性では、伝導板での渦電流損失は非支配的である一方、ヒステリシス損失が 2.4W 程度になるとクエンチに至る事が分かった。クエンチは、ヒステリシス損失の他に電極付近のジュール熱の影響を受けるコイル最外層、も

しくは一番高磁場で特にヒステリシス損失が大きいコイル最内層のどちらかで発生していると考えられる。直流・三角波通電の双方において、クエンチ時、コイル周囲の樹脂と伝導板に設置したセンサーは 21K 程度(Fig. 1(c)), である一方、No.2 に設置した電極は通電中に温度が上昇し、クエンチ時に 23K 近く、さらに通電終了後に大きな温度上昇が観測されている(Fig. 1(d))。

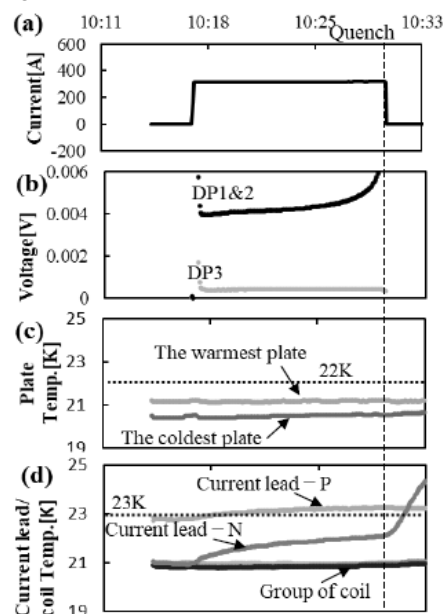


Fig. 1 Experimental result of time and (a)Current, (b)Coil voltage, (c)Cu plate temp., (d)Current lead/ coil temp.

Hypertech 素線の特性から推定すると、背景磁場 1T 未満、通電電流 320A でコイルがクエンチする場合、MgB₂ の温度が局所的に 28K 以上になって電圧が発生していると考えられる。電極接続部の接触抵抗による損失と交流損失は発生範囲が異なるため、直流および交流通電では MQE 評価値は異なる。液体水素間接冷却は伝導冷却の範疇であり、その冷却に対数安定性を詳細に解析するためには、表面で測定できないコイル内部の温度上昇を適切に評価する必要があり、熱平衡方程式に基づく数値計算による定量的な評価が必須と考えられる。

謝辞

本研究は公益財団法人 JKA 2021 年度機械振興補助事業(研究補助) 課題番号:183 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. K Hamajima, et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol.14 No.11(2014)
2. T. Yagai, et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol. 56, No. 5, (2021) pp.269-276.

CuO 二重鎖銅酸化物超伝導体における磁束ピンニング Flux pinning properties of CuO double layer superconductor

下山 淳一、齋藤 晶文、元木 貴則(青学大)、椋田 秀和(阪大)、佐々木 進(新潟大)
SHIMOYAMA Jun-ichi, SAITO Akifumi, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.),
Hidekazu Mukuda (Osaka Univ.), Susumu Sasaki (Niigata Univ.)
E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物超伝導体においてはCuO₂面が超伝導発現の舞台となっており、異方的な電気的磁気的特性、磁束ピンニング機構や臨界電流特性は、層状構造におけるブロック層の厚さとキャリアドーピング状態に主に支配されていると理解されている。例外としては高圧下で超伝導を示す梯子型Cu-O構造を持つ超伝導体(Sr,Ca)₁₄Cu₂₄O₄₁が知られている。また、REBa₂Cu₃O_{7-δ}(RE123)ではCuO鎖面も超伝導に寄与していることが指摘されており、RE123の特異的に小さい電気的磁気的異方性もその傍証になっている。RE123の類縁物質であるRE₂Ba₄Cu₇O_{15-δ}(RE247)やREBa₂Cu₄O₈(RE124)も適当なホールドーピングにより90 K級の超伝導を示すが、REがPrの場合にはPr123を含めて酸素アニールを十分に行っても超伝導が現れない。ところがFig. 1に結晶構造を示したPr247だけは酸素を抜いた組成(δ=0.6~0.7)でT_c~20 K級のバルクの超伝導を示しその起源が議論されてきたが、最近の⁶³CuのNMR測定により、超伝導状態ではCuO₂面は反強磁性状態で超伝導に寄与していないことが明らかになった[1]。Pr247ではCuO二重鎖が導電性を持つことから、この層が超伝導を担っていると考えられる。b軸方向に伸びる1次元的な局所構造が超伝導を駆動していれば一般的な銅酸化物超伝導体とは異なる新奇な物性の発現が期待できる。

以上の背景のもと、CuO二重鎖超伝導体の特徴の一部を理解するために本研究ではPr247超伝導体の焼結体試料を用いて磁束ピンニング特性を調べた。

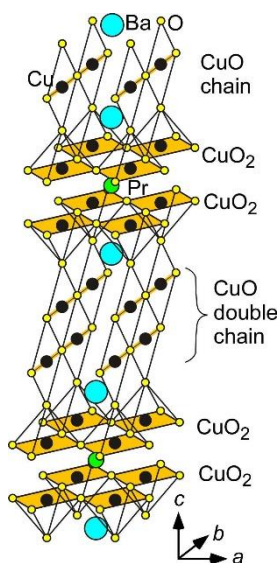


Fig. 1 Crystal structure of Pr₂Ba₄Cu₇O₁₅.

2. 実験

Pr247およびPrサイトの30%をYで置換した(Pr,Y)247焼結体を石英封管内、950~965°Cで焼成することにより作製した。得られた焼結体試料の酸素量は酸素またはAr気流中でアニールすることにより調整した。試料の酸素量の相対変化は重量測定、構成相、格子定数は粉末X線回折測定、超伝導特性はSQUID磁束計を用いた磁化測定により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 2はAr気流中500°Cで12hアニールしたPr247, (Pr,Y)247について0.2 Oeの磁場下で評価したZFC-FC磁化の温度依存性である。これらの試料はAr気流中500°C付近でアニールすることにより20 K級の超伝導と低温で完全反磁性に相当する大きな反磁性を示す。なお、両試料とも300°Cで酸素アニールした場合、超伝導を示さなく

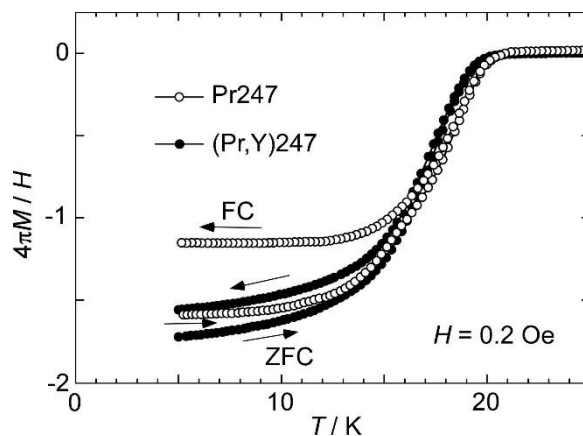


Fig. 2 ZFC-FC magnetization curves of sintered bulks of Pr247 and (Pr,Y)247 annealed in flowing Ar at 560°C for 12 h.

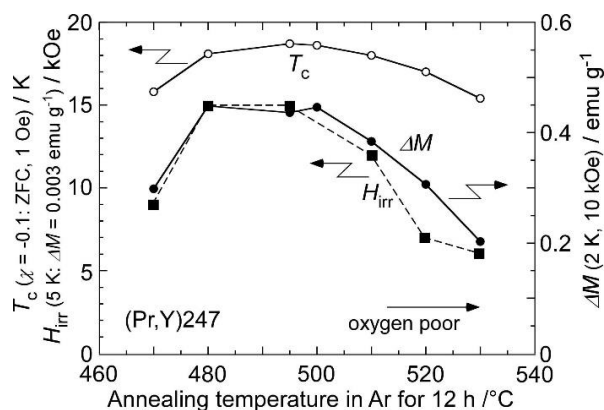


Fig. 3 Dependences of T_c , H_{irr} at 5 K and width of magnetization hysteresis, ΔM , at 2 K under 10 kOe on annealing temperature under flowing Ar for a (Pr,Y)247 sintered bulk.

なることを確認している。興味深いのはFC磁化が通常の銅酸化物超伝導体の焼結体と比べて非常に大きいことで、これはピンニング力が弱いことを意味する。Fig. 3に(Pr,Y)247焼結体の同じ小片を用いて調べた T_c 、5 Kにおける不可逆磁場 H_{irr} と2 K、10 kOeでの磁化ヒステリシスの幅 ΔM のAr気流中アニール温度に対する変化を示した。アニール温度が高い、つまり平衡酸素量が少ないほど、 T_c の低下に比べて大きく H_{irr} が低下し ΔM が急激に小さくなるという、一般的な銅酸化物超伝導体におけるアンダードーピング状態に類似した挙動が認められる。今後はc軸配向した焼結体や薄膜の作製にも取り組み、異方的な物性をより詳細に調べる予定である。

参考文献

1. S. Nishioka et al., *Appl. Phys. Express* **15** (2022) 023001

フッ素フリーMOD 法を用いた人工ピン導入 REBCO 線材の開発

Development of fluorine free MOD APC doped REBCO wire

吉原 健彦, 本田 元気, 永石 竜起, 小林 慎一(住友電工);

蟹江 澄志(東北大, 多元研); 岡田 達典, 淡路 智(東北大, 金研)

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

KANIE Kiyoshi (Tohoku Univ., IMRAM), OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ., IMR)

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

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_x(REBCO)薄膜の作製方法の中で、有機金属塗布熱分解法(MOD 法)は真空装置を必要とせず、高い原料収率が実現できる手法である。その中でもフッ素フリーMOD(FF-MOD)法は、良好な2軸配向膜を短時間で得ることができるため[1]、低コストな量産線材を実現可能とする工業的に優れた製法と考えられる。一方で、典型的な市販REBCO線材の持つ77.3 K、自己磁場の $I_c > 200$ A/4mm幅を有し、かつ、100 m長以上に長尺化したFF-MOD法の報告事例は無く、現状、実用化には至っていない。

また、低温磁場中の特性改善に関しFF-MOD法においてもピンニングセンターの導入に関する研究報告は多くあるものの[2, 3, 4]、超電導層厚みが1 μ m以下であることや、実験が主に単結晶基板上に留まっており、長尺線材への適用は進んでいない。今回、FF-MOD法にナノ粒子を直接添加する方法および結晶化プロセスの検討により、1 μ m以上の厚膜化および線材長尺化を実現できる製法を開発した。

FF-MOD法による薄膜線材において77.3 Kの I_c が200 A/4mm幅を超える120 m長の人工作品入り線材の作製に成功したので報告する。

2. 実験方法

Ni/Cu/SUSから成る30 mm幅のクラッド基板[5]上に、中間層CeO₂/YSZ/Y₂O₃をRFスパッタリング法により成膜した。東北大学多元物質科学研究所で、ソルボサーマル法[6]により作製したBaMoO₃(BMO, M=Zr, Hf)ナノ粒子を添加したフッ素フリーGdBa₂Cu₃O_x(GdBCO)溶液をダイコートにより塗布し、酸素雰囲気下で仮焼、低酸素雰囲気下にて本焼を行うことで人工ピン入りREBCO層を成膜した。磁場中 I_c はマイクロブリッジを形成したサンプルを用いて、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター所有の無冷媒超伝導マグネット20T-CSM, 25T-CSMにより評価を行った。

3. 実験結果

GdBCO+2.7 mol%BZOの120 m長線材を作製した。Fig.1に液体窒素中の通電法により測定した77.3 Kの長手方向の I_c 分布を示す。77.3 Kの平均 I_c が218 A/4mm幅であり、また、長手方向に均一な I_c 分布を有することが示された。Fig.2に77.3 K、5 T、20 K、20 Tにおける I_c の磁場角度依存性を示す。人工ピン無しGdBCO線材に対して3.4 mol%BZO添加膜では全角度領域において I_c の向上を確認できた。断面TEM観察の結果、GdBCO層内に主に粒径6~10 nmのBZO粒子が分布していることが分かった。 I_c の磁場角度依存性の結果と合わせて考察することで、添加したBZO粒子はランダムピンとなっていると考えられる。また、B//cにおける20K、20Tの I_c が194 A/4mm幅を有することが分かった。添加しているナノ粒子濃度や、ナノ粒子サイズの最適化によりさらに低温磁場中特性の改善が予想される。

本成果により、FF-MOD法が人工ピン入り超電導線材の作製に適用可能な手法であることが分かり、低コストな低温磁場中特性に優れた超電導線材の量産化が期待できる。

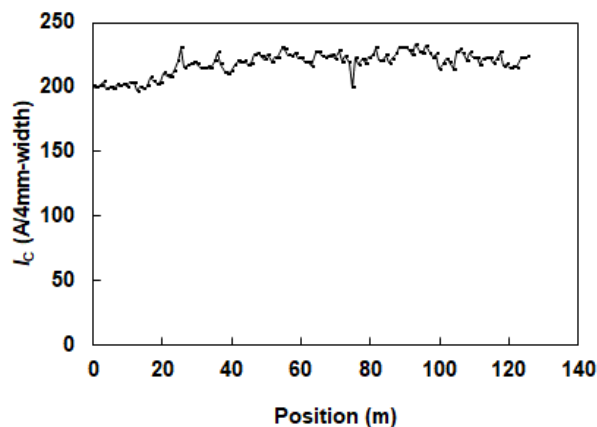


Fig.1 Longitudinal I_c distribution of FF-MOD GdBCO+BZO2.7 mol% tape

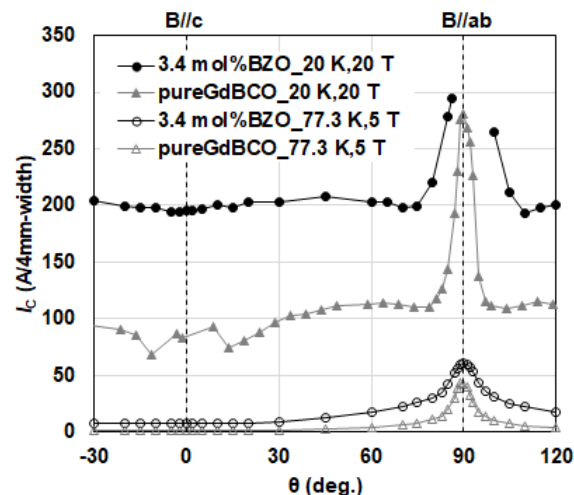


Fig.2 I_c -B- θ properties of FF-MOD GdBCO w/ and w/o BZO

4. 謝辞

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

参考文献

1. Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804.
2. F. Lu *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 045016.
3. L. Soler *et al.*, *NATURE COMMUNICATIONS*, **11** (2020) 334.
4. M. Ozawa *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. **102** (2021) p.8.
5. K. Ohki and T. Nagaishi, *Ceramics* **47** (2012) No.4 280.
6. N. Chamorro *et al.*, *RSC Adv.*, **10** (2020) 28872.

FF-MOD 法 Y123 薄膜における様々な不純物金属添加効果 Effects of impurity doping by various metal elements for Y123 thin films prepared by FF-MOD method

小澤 美弥子, 元木 貴則, 大崎 瑛介, 下山 淳一(青学大)

KOZAWA Miyako, MOTOKI Takanori, OSAKI Eisuke, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5621052@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MOD 法は、均質で平坦な表面を有する薄膜が短時間で得られ[1]、常圧下の簡便な焼成装置のみで作製することができるため、低コストでの高い量産性が期待でき、工業化に有望な手法である。しかし、他の手法に比べて RE123 薄膜の結晶性が高いため、有効なピンニングセンターが少なく、磁場中 J_c が低いという課題がある。これまで我々は、原料溶液への Cl 添加により生成する $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$ ($\text{Ba}2342$) が RE123 の結晶配向を促進し 2 軸配向薄膜が得られる条件が拡大するとともに、不純物金属と共添加することで臨界電流特性が大きく改善することを報告してきた[2]。RE123 溶融凝固バルクにおいては Tb を添加すると BaTbO_3 がバルク内に分散し、磁場中 J_c が向上することが報告されている[3]。また Y123 に Pr を添加すると Y サイトに Pr が置換し弱超伝導領域が生成する。特にドーパ量が 1% 以下の場合、希薄ドーパ効果により点欠陥的なピンとなり J_c が向上することが報告されている[4]。以上の背景のもと、本研究ではフッ素フリーMOD 法による Y123 薄膜の臨界電流特性の改善を目的とし、金属組成を精密に調整した自作溶液を用い、Cl と不純物金属 ($M = \text{Tb}, \text{Pr}$) の共添加効果を系統的に調べた。

2. 実験方法

仕込組成比 $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} : \text{Cl} = 0.9 : 2 : 3 : 0.2$ 、不純物金属 M を Y に対して 0 - 30 mol% で混合した溶液を (Cl, M) 共添加 Y123 原料とし、これを $\text{SrTiO}_3(100)$ 単結晶基板上にスピコート法により塗布した後、仮焼を行った。この塗布と仮焼を 3 回繰り返し、最終膜厚が約 300 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、酸素アニールにより酸素量を制御することで、(Cl, M) 共添加 Y123 薄膜を作製した。得られた試料について、XRD による相同定、SEM による微細組織観察を行い、磁化特性は SQUID 磁束計により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に (Cl, Tb) 共添加試料の Tb 添加量と $J_c(40 \text{ K}, \sim 4 \text{ T})$ の関係を示す。820°C 焼成では Tb を 5 mol% 以上添加した試料で J_c が大きく低下したが、760-800°C 焼成では 10 mol% 以上の高濃度 Tb 添加試料においても高 J_c を維持した。Fig. 2 に作製した (Cl, Pr) 共添加試料の Pr 添加量と T_c^{onset} の関係を示す。いずれの焼成条件においても Pr 添加量の増大に伴い T_c が向上した。通常よりも長時間かつ低温までの酸素アニールをすることによってオーバードープ状態にある薄膜に対して Pr を添加したことでホール濃度が減少し、最適キャリアドーパ状態に近づいた可能性が考えられる。Fig. 3 に Pr 添加量と $J_c(40 \text{ K}, \sim 4 \text{ T})$ の関係を示す。焼成温度が低くなるほど高濃度 Pr 添加で J_c が向上する傾向が認められた。Pr 添加によって高 J_c 膜が得られる熱処理温度が低温側に広がることも示唆する結果である。講演ではより高濃度の Pr 添加薄膜の特性についても報告する。

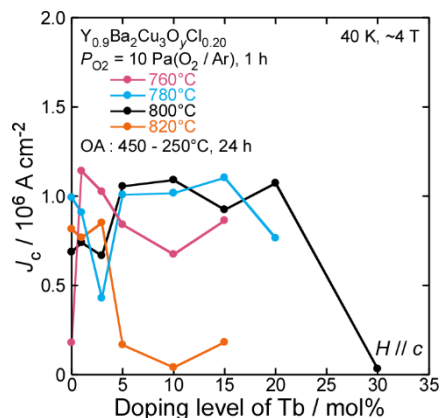


Fig. 1. Relationship between J_c (40 K, $\sim 4 \text{ T}$) and Tb doping level for Y123 films sintered at various temperatures.

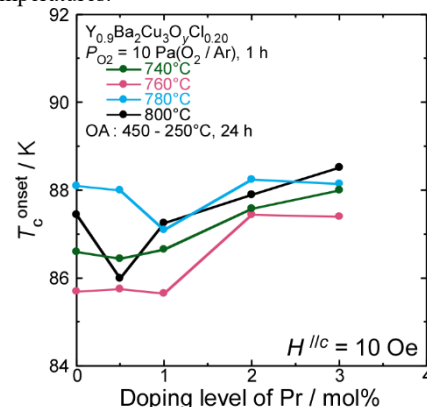


Fig. 2. Relationship between T_c and Pr doping level for Y123 films sintered at various temperatures.

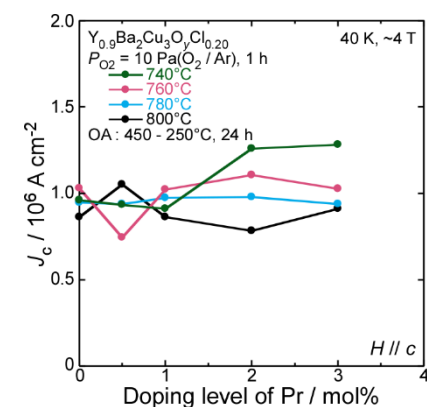


Fig. 3. Relationship between J_c (40 K, $\sim 4 \text{ T}$) and Pr doping level for Y123 films sintered at various temperatures.

参考文献

- [1] Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 095017.
- [3] Y. Tazaki *et al.*, *Physica C* **460-462** (2007).
- [4] J. Shimoyama *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005). 3778.

低エネルギーAu イオン照射で欠陥導入した YBa₂Cu₃O_y 薄膜の磁場中超伝導特性

Superconducting Properties in Magnetic Fields of YBa₂Cu₃O_y Thin Films
with Artificial Pinning Center introduced by low energy Au Ion Irradiation

伊東 智寛(名大), 尾崎 壽紀(関学大), 一瀬 中(電中研), 土屋 雄司(東北大),
岡崎宏之(量研機構), 越川博(量研機構), 山本春也(量研機構), 八巻徹也(量研機構), 吉田 隆(名大)
ITO Tomohiro (Nagoya Univ.), OZAKI Toshinori (Kansei Gakuin Univ.), ICHINOSE Ataru (CRIEP),
TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.), OKAZAKI Hiroyuki (QST), KOSHIKAWA Hiroshi (QST),
YAMAMOTO Shunya (QST), YAMAKI Tetsuya (QST), YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)
E-mail: yoshida@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまで、Vapor-Liquid-Solid (VLS) 成長法を用いた YBa₂Cu₃O_y (YBCO) 厚膜線材の高速成膜プロセスに関して報告を行ってきた。VLS 線材は液相を介して成長するため、LPE 膜同様に欠陥の少ない組織を有していることを確認した。[1, 2]

本研究では VLS 厚膜の磁場中特性を向上するため、薄膜作製プロセスとは独立に欠陥導入可能なイオン照射を用い、磁場中特性に関して検討を行った。

2. 実験方法

本研究に用いた試料は、LaAlO₃ (LAO) 単結晶基板上に VLS 成長法を用いて YBCO 膜を作製した。はじめに LAO 上に Solid 層として、YBCO を基板温度 $T_s = 850^\circ\text{C}$ 、酸素分圧 $P_{O_2} = 53$ Pa、膜厚 200 nm で作製した。その後、Liquid 層として Ba₃Cu₇O₁₀ (BCO) を $T_s = 850^\circ\text{C}$ 、 $P_{O_2} = 200$ Pa、膜厚 50 nm で作製した。最後に Vapor 層として YBCO を $T_s = 940^\circ\text{C}$ 、 $P_{O_2} = 53$ Pa、膜厚 1.4 μm で作製した。

YBCO の総膜厚 1.6 μm において Au イオンが LAO 基板まで到達するようにこれまでの各種実験から Au イオン種、照射エネルギーおよびイオン数密度を検討した。その結果、それぞれイオン種を Au⁺、照射エネルギーを 18.0 MeV、照射イオン数密度を 6.7×10^{11} ion/cm² と一定とした。

超伝導特性は、PPMS (Physical Property Measurement System) を用いて直流四端子法により測定を行い、 J_c 算出における電界基準は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

3. 実験結果及び考察

Au イオン照射前後における T_c の変化を測定した結果、Au イオン照射前が $T_c = 90.9$ K を示したのに対して、照射後は $T_c = 87.8$ K を示し約 3 K 程度低下した。本結果と同様に低エネルギーイオン照射による T_c 低下が多く報告されており[3]、本実験での T_c の低下も、Au イオン照射により YBCO における結晶欠陥が形成されたためと考えられる。

Fig. 1 に Au イオン照射前後の印加磁場に対する J_c の変化を示す。測定温度はそれぞれ 65 K 及び 77 K とした。その結果、77 K における自己磁場下における J_c は、Au 照射前試料の 0.97 MA/cm² を示したのに対して、照射後は T_c の低下により 0.78 MA/cm² である。一方、磁場中 J_c は照射後試料が比較的高い値を示したため、65 K においては全ての磁場領域で照射後試料の J_c が向上した。以上から、Au イオン照射によって薄膜内への人工ピンニングセンター導入が示唆された。

Fig. 2 に Au イオン照射前後の磁場印加角度に対する J_c の変化を示す。測定温度及び磁場はそれぞれ 65 K 3 T とした。Au イオン照射後の試料は、ほとんどすべての角度において照射前に比べ J_c の値が向上していることが確認される。 J_c の最小値 $J_c^{\min}$ はそれぞれ 0.23 MA/cm² 及び 0.31 MA/cm² を示した。一方、 $B//ab$ 近傍での J_c の低下が確認された。

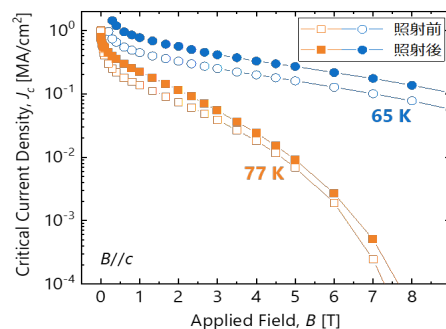


Fig. 1 The dependence of J_c on the applied magnetic field. (Au irradiation vs no-irradiation)

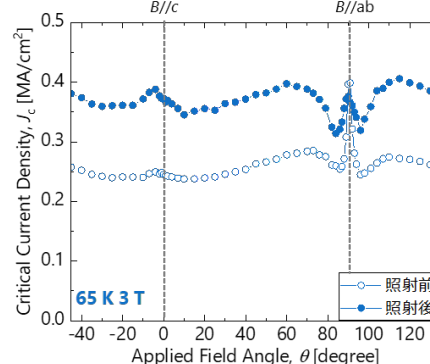


Fig. 2 The angular dependence of J_c on the applied magnetic field. (Au irradiation vs no-irradiation)

微細構造観察などから Au イオン照射における構造変化などの結果が未だ詳細は得られていないが、今回の結果から Au イオン照射によって薄膜内にナノパーティクル形状の欠陥のような等方的なピンニングサイトが導入したことが考えられる。

当日は Au イオン照射前後の J_c 特性の比較に加え、BHO 添加試料の J_c 特性について比較・検討を行う予定である。

参考文献

1. T. Ito *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 6601304, 2021
2. T. Ito *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 6601205, 2021
3. Y. Zhang *et al.*: Sci. Rep. **10**, 14848, 2020

パルス電流を用いた高温超伝導線材における強磁場中臨界電流の測定 Measurement of critical current in high magnetic field in HTS tapes using pulsed current

土屋 雄司 (東北大), 水野 謙一郎 (MTL), 坂井 徹, 吉田 隆 (名大), 小濱 芳允 (東大), 淡路 智 (東北大)
TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.), MIZUNO Kenichiro (MTL), SAKAI Itsuki, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.),
KOHAMA Yoshimitsu (Univ. Tokyo), AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: yuji.tsuchiya.c3@tohoku.ac.jp

1. はじめに

RE 系および Bi 系高温超伝導線材は、近年 NMR や強磁場マグネットの応用にて 4.2 K、20 T 以上の低温超強磁場や、20-40 K の中温領域での高パフォーマンス運用が注目されている。さらに、各メーカーの線材開発により、想定運転領域での線材の臨界電流 I_c が大きく向上しており、素線にて 1000 A 超の大電流通電試験手法が必要である。高特性線材の I_c 測定には、微小ブリッジを用いた通電特性からの見積もり[1]、U 字試料ホルダー[2]、パルス通電[3]などが提案されている。これまで我々のグループでは、パルス通電による I_c 評価装置を開発しており、77 K および自己磁場中の測定を主に行なってきた。

本研究では、無冷媒超伝導マグネットとパルス電流測定装置を組み合わせ、強磁場中大電流パルス通電測定を行った。

2. 実験方法

電圧 10 V および電流 500 A 容量のパルス電流源、前置増幅器、オシロスコープを用いて、SuperPower 社製 REBCO 線材(SF4050-AP、4 mm 幅、 $I_c = 120$ A)の 77 K 自己磁場中での電流電圧特性を測定した。電流源の電圧は 10 V、電流のパルス幅は 1 ms、最大電流は 120 A、電流掃引速度は 0.4 A/ μ s とした。電圧端子間距離は 8 mm とした。次に、磁場中測定に向けて、20 T 無冷媒超伝導マグネット、He フロークライオスタットと前述のパルス電流による I_c 測定装置を組み合わせ、4 K から 77 K、0-19 T における前述の REBCO 線材および住友電工社製 BSCCO 線材(CETS-2020-052, $I_c = 180$ A)の電流電圧波形の測定を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に、77 K、0 T で REBCO 線材にパルス通電した際の電流および電圧の波形を示す。電流は台形波状に印加した。電圧は、電流掃引によって試料電圧端子間に最大 140 μ V の誘導性電圧が発生した後、電流掃引が止まると 0.7 ms 程度で抵抗性電圧は 46 μ V にて一定となった。さらに、電流減少時には増加時の逆方向きの誘導性電圧が発生した。電流一定時に電圧が増加していないことから、発熱による温度上昇による I_c 低下がないことがわかる。電流掃引時の誘導性電圧は抵抗性電圧より大きく、より精密な測定には誘導電圧を補償する回路の導入が必要であると考えられる。

Fig. 2 に、20 K、19 T にて REBCO 線材にパルス通電した際の電流および電圧の波形を示す。電流掃引時は、0 T の結果と同様に 140 μ V 程度の誘導性電圧が生じた。その後、電流一定時には 100 μ V の抵抗性電圧と、 ± 50 μ V の電圧振動が生じた。電流がゼロになった後も ± 100 μ V の電圧の振動が生じた。電圧の振動は、電磁誘導が原因であると考えられる。振動周期は 200 Hz 程度であり、測定プローブの 1 mm 程度の機械的振動で外部磁場 19 T に対して 0.5% の磁場変動があると仮定すると見積もりは 20 μ V 程度の電圧となり、実測値より 1 桁小さかった。

より精密な測定に向け、電圧振動の抑制が必要であると考えられる。

当日は、測定装置の詳細、強磁場中測定での電圧振動の原因についての考察、大電流通電時の発熱の影響について報告する予定である。

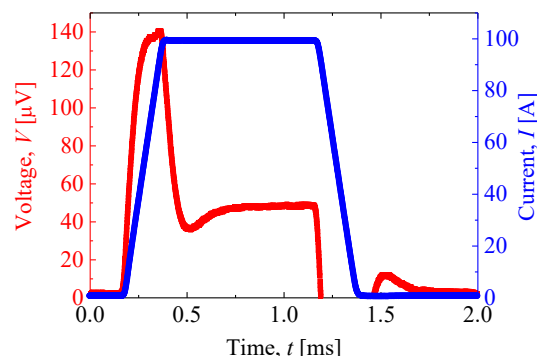


Fig. 1 Current and voltage waveforms during a current pulse at 77 K and 0 T in a REBCO tape.

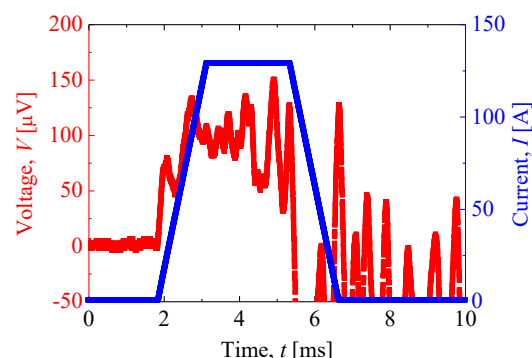


Fig. 2 Current and voltage waveforms during a current pulse at 20 K and 19 T in a REBCO tape.

謝辞

この成果は、名大-鈴木商館の共同研究、科学研究費補助金 (20K15217, 20K20892, 22H00104, 22H01522)、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) の助成事業 (JPNP20004) の結果得られたものです。名大今岡淳准教授、産総研町敬人様より予備実験において測定装置をご提供いただきました。東北大 Arnaud Badel 准教授より通電測定についてご議論をいただきました。

参考文献

- [1] S. Fujita *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 18466670 (2019).
- [2] K. Tsuchiya *et al.*, Cryogenics **85**, 1-7 (2017)
- [3] F. Sirois *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23**, 034018 (2010).

フィードバック回路を用いたパルス電流による高温超伝導線材の臨界電流測定

Measurement of Critical Current in High Temperature Superconducting Tapes Using Pulsed Current Circuit with Feedback Circuit

坂井 巖(名大工)、土屋 雄司(東北大)、小濱 芳允(東大)、吉田 隆(名大工)

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

YOSHIDA Yutaka(Nagoya University)

E-mail: sakai.itsuki.m2@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

近年、送電ケーブル、核融合などの様々な機器において、超伝導線材への大電流通電が期待されている[1]。これらの超伝導機器の性能評価試験の際には、超伝導線材への大電流通電が必要となる。送電ケーブルの性能評価試験の1つとして、故障発生時の過電流を想定した、4.9 kA のパルス電流が通電されるなど、超伝導線材へのパルス電流通電が必要とされている。[2]。超伝導線材へのパルス通電の問題の1つとして、パルス電流が一定でないと、それに伴って電圧の値が変化することが挙げられる。

本研究では、パルス電流通電中の電流振動の抑制を目的として、フィードバック回路を用いてパルス電源を作製し、作製したパルス電源を用いて液体窒素中における市販 REBCO 線材の臨界電流を測定した。

2. 実験方法

抵抗、コンデンサ、オペアンプ、IGBT、直流電源、ファンクションジェネレータを用いて、Fig. 1(a)に示すフィードバック回路を用いたパルス電源を作製した。ここで、 I_{test} の大きさは、 I_{test} がすべて R_{sense} に流れると仮定すると、以下の式で表される。

$$I_{test} = \frac{V_{pulse} \left(1 + \frac{R_{NFB2}}{R_{NFB1}}\right)}{R_{sense}}$$

R_g , R_{pd} , C_{LPF} , R_{att} の4つの素子について、抵抗や容量の値を変化させ、 I_{test} の波形を電流プローブと波形測定器を用いて測定した。Table 1 に C_{LPF} 以外の素子の値や電源の電圧を示す。 C_{LPF} は 0(開放状態)から 100 μF の範囲で変化させた。この時、上式から $I_{test} = 20$ A となる。パルス幅は 1 ms とした。パルス電流に含まれる電流の振動の大きさを評価するため、パルス波形が立ち上がった後の I_{test} の最大値を I_{max} 、最小値を I_{min} として、 $I_{max} - I_{min}$ の値を測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1(b)に、 C_{LPF} の値を変化させたときの、 $I_{max} - I_{min}$ の値の変化を示す。Fig. 1(b)の内挿図に、 $C_{LPF} = 10$ μF の時の I_{test} の波形を示す。このとき、 $I_{max} - I_{min} = 5.27$ A だった。この時のパルス電流の大きさは 18.2 A であり、20 A よりも小さかった。これは、上式の R_{sense} には R_{sense} 素子の抵抗のほかに配線の接触抵抗等も含まれているためだと考えられる。一方、 $C_{LPF} = 0$ F(開放状態)の時は $I_{max} - I_{min} = 23.5$ A であり、 C_{LPF} の値が増加するにつれ、 $I_{max} - I_{min}$ の値は小さくなった。 $C_{LPF} = 10$ μF の時、パルス電流が立ち上がる速度は 161 A/ms であった。一方、 $C_{LPF} = 100$ μF において、パルス電流が立ち上がる速度が 4.58 A/ms となり、電流が設定値の 18.2 A に達しなかったため、 $I_{max} - I_{min}$ は定義されなかった。 $C_{LPF} = 100$ μF のときパルス電流の立ち上がりが $C_{LPF} = 10$ μF の時と比較して遅くなったのは、 R_g と C_{LPF} とで構成されるローパスフィルタの時定数 $\tau = 1$ ms となり、 I_{test} の立ち上がり時間 $T_r = 2.2\tau = 2.2$ ms がパルス幅より長くなったためだと考えられる。

当日は、 R_g , R_{pd} , R_{att} の値を変化させたときの $I_{max} - I_{min}$ の値の変化や、作製したパルス電源を用いて市販 REBCO 線材の

電流電圧特性を測定した結果について報告する予定である。

Table 1 Resistance and voltage values.

Parameters	Values
V_{DC}	10 V
V_{pulse}	0.1 V
V_+ , V_-	± 15 V
R_{sense}	10 m Ω
R_{NFB1} , R_{NFB2}	1 k Ω
R_g	10 Ω
R_{pd}	1 k Ω
R_{att}	0 Ω

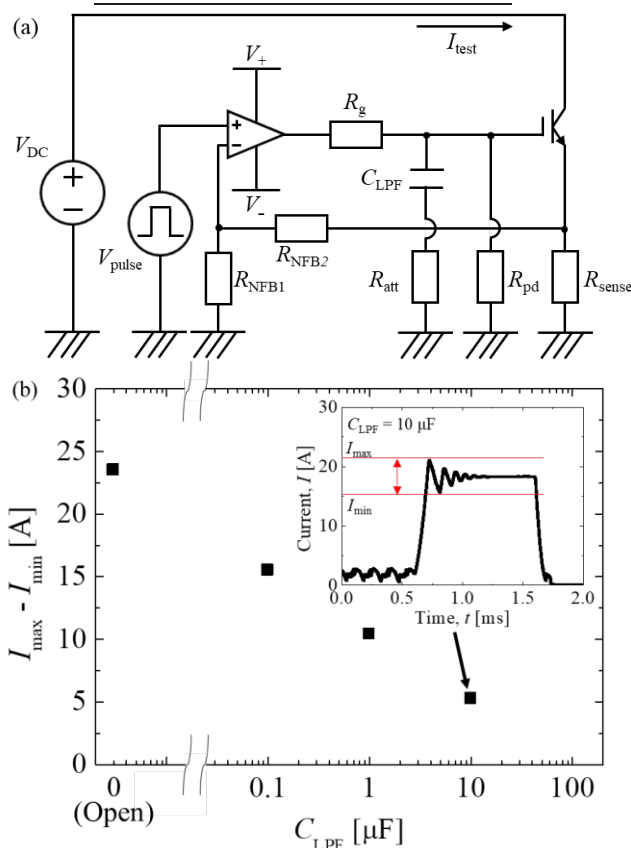


Fig. 1 (a) Circuit diagram of pulsed current circuit with feedback circuit. (b) Capacity of C_{LPF} dependence of $I_{max} - I_{min}$. Inset shows pulse current waveforms with a C_{LPF} of 10 μF .

謝辞

本研究の一部は、鈴木商館一名大の共同研究、科学研究費補助金(20K15217, 20K20892, 22H00104, 22H01522)、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)の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。

参考文献

- [1] R. Wesche *et al.*: Fusion Eng. Des. **82** (2007) 1385-1390.
- [2] M. J. Gouge *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1708-1711.

磁化のダイナミック測定による希土類系高温超伝導コート線材の E - J 特性評価： 磁気顕微鏡法とピックアップコイル法の比較

Measurement of E - J Characteristic in Rare Earth-Based High Temperature Superconducting Coated Conductor by Dynamic Measurement of Magnetization: Comparison between Magnetic Microscopy and Pickup Coil Method

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

一般に用いられている超伝導線材の電流輸送特性の評価手法は、直流四端子法と磁化測定より臨界電流密度 (J_c) を導出する磁気的手法とに大別できる。高温超伝導体は熱擾乱の影響やランダムな磁束ピン止め特性によって、なだらかな電界-電流 (E - J) 特性を有する事から、磁化測定における緩和現象が顕著となり、測定条件に伴う電界基準の変化が測定結果に大きな影響を及ぼす。しかしながら、磁化測定におけるこの電界基準の影響は一般には充分整理されていない。また、磁気共鳴画像法 (MRI) や核磁気共鳴 (NMR) 用超伝導マグネット応用の観点からは、永久電流モード運転時に対応する、 $10^{-12} \sim 10^{-10}$ V/m 程度の超低電界領域における J_c が重要となるが、これは通常の電圧測定による電界感度に比べ6桁以上小さな値であり、四端子法では計測が困難な領域である。現時点では、測定可能な高電界側の特性から外挿して近似的な検討にとどまっており、特性解明が喫緊の課題であった。本研究は、高温超伝導体の磁化の緩和現象と E - J 特性との関係を明らかにするとともに、外部磁界下における E - J 特性の評価手法として磁気顕微鏡法 (SHPM) と磁気特性測定システム (MPMS) によるピックアップコイル法を用いた磁化測定の結果を比較して述べる。

2. 実験方法

幅5 mmの希土類系高温超伝導コート線材を対象に77 K、垂直磁界下で測定した。磁界中走査型ホール素子磁気顕微鏡 (In-field SHPM) を用いて、試料直上の磁場分布 (B_z) を測定した。予備実験として、2次元 B_z 空間分布の測定により試料の空間均一性を検討し、Biot-Savart則の逆問題により磁化電流 (J) との関係求めた。MPMSを用いて、試料全体の磁気モーメント (m) を測定した。解析に予備実験で確認された実効的な線幅4.65 mmと長さ4.70 mmを用いて J ならびに、形状補正係数を考慮し E を導出した[1]。

3. 結果と考察

外部磁界を掃引させながら、In-field SHPMを用いて試料中心における B_z のピーク値付近で測定を行った。 B_z の空間分布と磁化電流 (J) の関係により、掃引磁界モード測定での J を定量的に算出できた。また、MPMSを用いてヒステリシスループを測定し、同様に J を求めた。四端子法による E - J 特性と Fig. 1 に比較した。各測定法の電界について、四端子法の J_c は一般的に 1×10^{-4} V/m、In-field SHPMは磁界掃引速度0.57 T/minにより 1.1×10^{-5} V/m、MPMSの場合は試料の磁化および薄膜の形状補正係数を考慮して約 1×10^{-8} V/mと見積もられた。これにより、各測定法の電界基準は明確の差にあり、測定される J も広い電界領域に亘って変化することが分かった。

定常磁界0.1 Tにおいて、In-field SHPMを用いて試料中心付近における1次元幅方向の B_z 分布の時間変化を測定し、 J に加えてファラデー則により電界 (E) 分布を導出した。また、

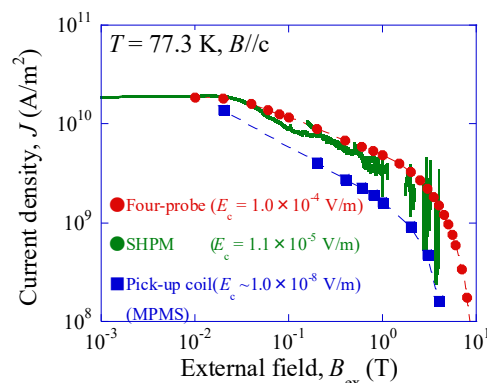


Fig. 1. Current density J as a function of external field at different electric field criterion E_c , characterized by four-probe transport method, SHPM and MPMS-based pick-up coil method.

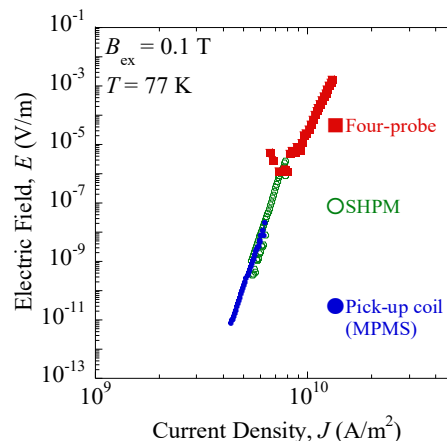


Fig. 2. Electric-field v.s. current-density characteristics at external field 0.1 T, by four-probe transport method, SHPM and MPMS-based pick-up coil method.

MPMSを用いて m の磁化緩和特性を測定し、 E - J 特性を導出した。Fig. 2に四端子法による結果と共に比較した。複数手法の整合性が良く、かつ 10^{-11} V/mまで広い電界領域に亘る E - J 特性を取得できた。

4. まとめ

高温超伝導体の磁化と E - J 特性との関係を整理し、自己磁場下と磁界中における磁化測定手法の比較を行った。磁化のダイナミック計測から広い電界領域に亘る E - J 特性を取得できた。

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

参考文献 [1] Z. Wu, K. Higashikawa, K. Imamura and T. Kiss, IEEE TAS 32, 9000505 (2022)

LHD ポロイダルコイルの長期信頼性～24 年間の圧力損失の変化

Long-term reliability of LHD poloidal coils - pressure drop changes over 24 years

高畑 一也, 森内貞智, 大場恒揮, 鷹見重幸, 今川信作 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, MORIUCHI Sadatomo, OBA Koki, TAKAMI Shigeyuki, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

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

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)のポロイダルコイルは、サブチャンネルを持たないケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を使用した強制冷却型コイルである。3対、6個のコイルから構成され、径の小さなものからIV, IS, OVコイルと呼んでいる。また上下コイルは-U, -Lを付記して区別する。CIC導体を採用するに当たって懸念されたことは、外部からの異物の混入による冷媒流路の閉塞である。異物には、金属粉、圧縮機からの油分・水分、ヘリウムガス中の不純物ガスの固化体などが考えられる。そこで、運転開始から24年間、流路閉塞等の異常が見られないか、冷媒圧力損失の観測を継続してきた。

2. 圧力損失の評価

LHDは、1年のうち3～5ヶ月間を1つのプラズマ実験サイクルとして運転を行っている。運転開始から24年間で23回の実験サイクルを経験した。実験期間中は、各コイルに約60 g/sの超臨界圧ヘリウムが16パラレルパスを流れる。観測された圧力損失およびコイル流量から管摩擦係数を評価した。Darcyの管摩擦係数 λ は次式で定義する。

$$\Delta P = \lambda (L / D_h) (\rho V^2 / 2) \quad (1)$$

ここで ΔP はコイル入口・出口の圧力差(圧力損失)、 L は流路長、 D_h は水力学的直径、 ρ は冷媒の密度、 V は平均流速である。管摩擦係数はレイノルズ数に依存するが、実際のレイノルズ数は2,000から3,000までバラツキがある。そこで、経験式を用いてレイノルズ数が2,500のときの管摩擦係数を外挿によって求め、同条件での経年変化を調べた。使用した経験式は、Kathederの経験式[1]を変形したものであり、次のように表される。

$$\lambda = v^{-0.72} (\alpha + 19.5 / Re^\beta) \quad (2)$$

ここで v はボイド率、 Re はレイノルズ数である。 β は定数でコイル毎に一定の値を使う。 α はデータ毎の変数である。

3. 管摩擦係数の長期観測結果と考察

図1に、この24年間の実験期間中の平均管摩擦係数を示す。第15サイクルを除いて、全体的に緩やかな減少傾向が観測された。そして、第19サイクル以降はいずれのコイルも一定値に収束している。その収束値は、4個のコイルでほぼ等しく約0.09であった。残りのIV-Uコイル、OV-Lコイルはそれより高い値で収束した。

第15サイクルの一時的な管摩擦係数の増加は、この実験期間前に循環圧縮機の油を初めて交換したことが原因であると推測している。新品の油から発生した不純物が固化し、コイル入口の冷媒導入孔に溜まり、部分的な閉塞が生じた可能性がある。コイルへの不純物混入の指標となるのが、入口メッシュフィルターの閉塞である。実際、第15サイクルの初期冷却において入口メッシュフィルターの閉塞現象が観測されていることから、循環ヘリウム中に不純物が多かったことを示唆している。冷却システム全体の不純物管理[2]の重要性が再認識された。

一方、長期的な減少傾向は、2個のコイルでは顕著に表れていない。第15サイクルの経験から、外部からの不純物の影響であれば、全てのコイルに管摩擦係数の増加が見られると考えられる。このことから長期的な減少傾向は、素線に付着していた不純物がヘリウムガスによって洗浄されたためと推測される。ただしその不純物は同定できていない。

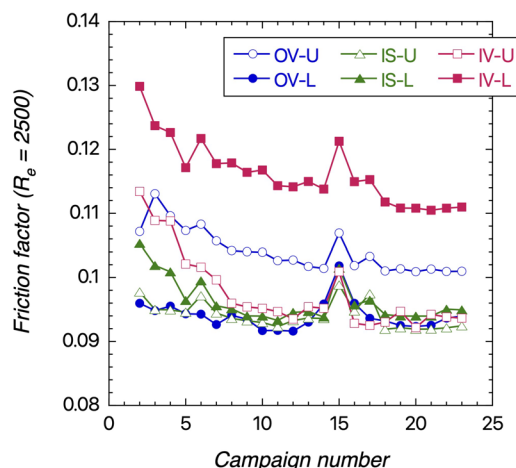


Fig. 1 Interannual trends in friction factor over the twenty-third campaigns for the six LHD poloidal coils.

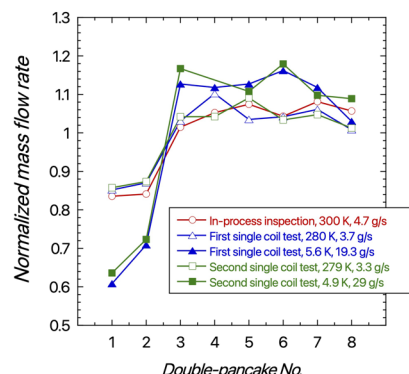


Fig. 2 Mass flow distribution between double-pancakes of the IV-L coil.

図1のように、減少傾向が収束してもIV-Lコイルの管摩擦係数は約0.11と、他のコイルより約20%高い値を示した。これは、製作時の検査およびコイル据付前の単独冷却・励磁試験の結果からすでに予測されていた。図2は、検査時、第1回および第2回の単独冷却試験の際の、常温および低温におけるダブルパンケーキ間の流量バランスの測定結果である。流量は平均値で規格化している。#1, #2ダブルパンケーキの流量が他に比べ明らかに少ないことが分かる。原因は同定できていないが、製作時の検査時にもすでにこのアンバランスは観測されている。図1の管摩擦係数は流量分布が均一として計算しているので、図2の流量アンバランスを考慮することで、IV-Lコイルの管摩擦係数の増加が定量的に説明できた。

流量アンバランスや外部からの不純物混入といった予期せぬ事象もあったが、LHDポロイダルコイルは24年間に渡り、クエンチすることなく安定に運転することができた[3]。

参考文献

- [1] H. Katheder: Cryogenics, Vol.34 (1994) p.595
- [2] 森内貞智: 冷凍, Vol.85, No.989 (2010) p.207
- [3] K. Takahata, et al.: Cryogenics, Vol.91 (2018) p.1

LHD ヘリカル導体の過渡安定性解析

Numerical analysis on transient stability of large helical device conductor

大屋 正義(関学); 今川信作(NIFS)

OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.); IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

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

1. はじめに

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカルコイルにおいて、有限長の常電導部が非対称に伝播する現象が観測されている。LHD 導体は、NbTi/Cu ラザフォード導体、CuNi 層で覆われた純アルミニウム安定化材、銅シースから構成されている。以前に、アルミ安定化材と銅シース内に発生するホール電界を考慮したクエンチ解析コードを作成して現象再現を試みたが、非対称性が弱く、完全な現象再現には至っていなかった[1]。今回、超電導体から CuNi 層を介したアルミ安定化材への電流拡散現象を見直した結果、非対称伝搬現象の再現に成功したので報告する。

2. 解析モデル・条件

LHD 導体の二次元解析モデル(yz断面)を図 1 に示す。全長 800 mm で、長手方向中央下部に設けた 10 mm 長のヒータから 1 ms 間だけ入熱 Q_H を与えて常電導部を発生させた。電流 I_0 は $-z$ 方向に流し、外部磁場 B_0 は $+x$ 方向に印可した。

電流拡散解析には FDTD 法を用い、下式を空間・時間領域において差分して解いた。

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E} \cdots (1)$$

$$\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{H} + \mathbf{j}_0 \cdots (2)$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho_x & 0 & 0 \\ 0 & \rho_y & -R_H B_0 \\ 0 & R_H B_0 & \rho_z \end{pmatrix} \mathbf{j} \cdots (3)$$

(3)がホール電界を考慮して拡張したオームの法則であり、 ρ が異方性を考慮した比抵抗、 R_H がホール係数[2]、 $\mathbf{j}_0$ が初期電流密度分布である。発熱項 Q_j は $\mathbf{E} \cdot \mathbf{j}$ により求めた。以前の解析では、0.44 mm 厚の CuNi 層内の電流拡散も解いていたが、上式における電流拡散速度は比抵抗に比例するため CuNi 層内における電流拡散が非常に速く、現実的な時間差分では表現できないことに着目し、本解析では CuNi 層内の電界 E_z がy軸方向には等しいと仮定して計算した。

熱伝導解析には以下の式を用い、液体ヘリウムの冷却項 Q_c には熱伝達曲線の近似式を組み込んだ[3]。 C は熱容量、 k は熱伝導率である。

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(B, T) \nabla T) + Q_H + Q_j - Q_c$$

3. 解析結果

解析結果の概要を以下にまとめる。

- ・ **12 kA**: 49 W の入熱までは常電導部が発生しなかったが、50 W 入熱時に片側伝搬が発生した。入熱を 200 W まで増加させても片側のみに伝搬した。
- ・ **12.5 kA**: 6 W の入熱までは常電導部が発生しなかったが、7 W 入熱時に片側伝搬が発生した。本条件において、入熱開始から 20 ms 後の発熱密度分布は図 2 に示すとおりであり、 $-z$ 方向のみに常電導部が伝搬している様子が分かる。さらに入熱量を増加させると、53 W 以上では両側伝搬が発生し、最小伝搬エネルギーにも非対称性が存在した。
- ・ **13 kA**: 6 W の入熱までは常電導部が発生しなかったが、7 W 以上の入熱に対しては両側伝搬が発生した。

各電流値において片側伝搬あるいは両側伝搬が発生する最小の入熱値における伝搬速度を図 3 に示す。同図中には導体試験結果[4]も合わせて示す。丸ドットが電流下流($-z$)方向、四角ドットが電流上流($+z$)方向への伝搬速度をそれぞれ示している。伝搬速度解析結果と実測結果は良く一致しており、解析コードの改良により非対称伝搬現象を精度よく再現可能になった。

4. まとめ

LHD 導体で発生する非対称伝搬現象について、CuNi 層内の電流拡散速度を考慮してクエンチ解析コードを改良した結果、伝搬速度解析結果と実測結果は良く一致し、非対称伝搬現象の再現に成功した。

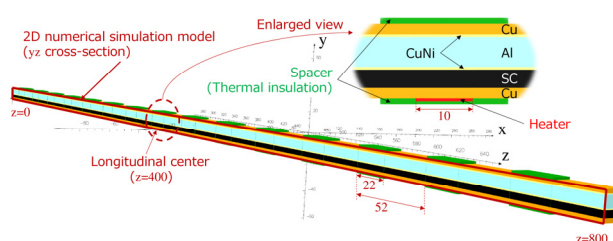


Fig. 1 Numerical simulation model of LHD conductor.

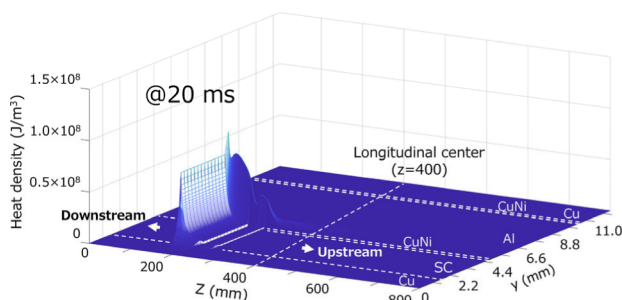


Fig. 2 Simulated joule heat density at 20 ms after heating. ($T_0 = 4.2$ K, $B_0 = 6$ T, $I_0 = 12.5$ kA, $Q_H = 7$ W)

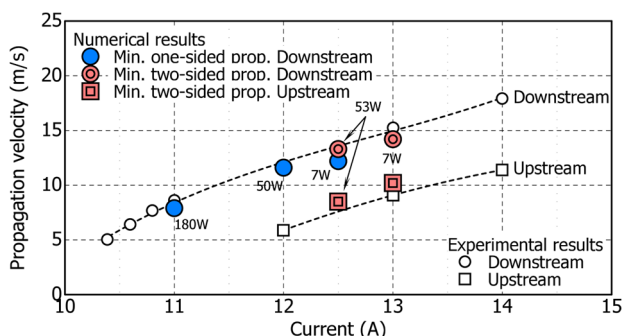


Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results.

参考文献

1. M. Ohya et al.: *Adv. Cryogenic Eng.*, Vol. 51 (2006) p.1455-1462.
2. N. Yanagi et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 14, No. 2 (2004) p.1507-1510.
3. S. Imagawa: *Proc. of ICEC24-ICMC2012*, p.591-594.
4. S. Imagawa: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 31, No. 5 (2021) #4700605.

改良型 WISE 導体の電流導入部の開発 Development of current feed structure of the modified WISE conductor

成嶋 吉朗, 柳 長門, 宮澤順一 (核融合研, 総研大)

NARUSHIMA Yoshiro, YANAGI Nagato, MIYAZAWA Junichi (NIFS, SOKENDAI)

E-mail: narushima.yoshiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所(NIFS)では、高温超伝導(HTS)導体のヘリカル型核融合炉マグネットの適用を目的に、種々の型式の導体を作製し、その研究を進めている。WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes) 導体[1]は、積層された HTS テープ線材を所定のコイル形状等に巻き線したのち、低融点金属を含浸・固定する。含浸前は積層された HTS テープ線材は自由に動けるので、ひずみのない巻き線が可能であり[2]、柔軟にコイルを作ることができる。この WISE 導体の磁場中での通電特性を明らかにすることを目的とする。

2. WISE 導体の通電試験と課題

図 1 に示すように、アルミニウムパイプ内部に収めた HTS テープを無酸素銅の電流導入部に接続した全長 2m の U 字形の WISE 導体を製作した。 $B = 5\text{--}8\text{ T}$ 、 $T = 30\text{--}50\text{ K}$ の環境下で通電試験を実施した結果、 $I_c = 10.8\text{ kA@40 K}$ 、 5 T の臨界電流値を得た[3, 4]。一方、 $T = 30\text{ K}$ では、 $B = 5\text{ T}$ で最大電流値 16.9 kA を記録したが、臨界電流値に至る前に電流導入部内部にて高温超伝導テープに焼損が発生した。このとき、超伝導部分は健全性が保たれていた。図 2(a)は通電試験終了後に WISE 導体のアルミニウムパイプを電流導入部から取り外したものである。左側(電源正側)は HTS テープが残っているが、右側(電源負側)の HTS テープは焼損、切断されていた。アルミニウムパイプの端部には通電によるものと思われる切り欠きが見られた(図 2(b))。電流導入端子の電圧波形を図 3(a)に示す。正側(灰色実線)は電流の増加と共に電圧が線形に増加している一方、負側(黒色実線)は電流の増加と共に電圧が非線形に増加する。そのため、 $I_{ps} < 12.3\text{ kA}$ では負側の電圧が低い、 $I_{ps} > 12.3\text{ kA}$ では負側の電圧が高くなる。正側の平均抵抗値は約 $32\text{ n}\Omega$ であるのに対して、負側の抵抗値は電流値と共に上昇し、 $I_{ps} = 16.6\text{ kA}$ では $51\text{ n}\Omega$ に達する。(図 3(b))。 $I_{ps} = 16.6\text{ kA}$ で電圧、抵抗値が急激に増加していることから、この時に HTS テープが焼損したとみられる。 $I_{ps} > 16.6\text{ kA}$ では正側の電圧と抵抗値に変化は見られないのに対して負側の電圧と抵抗値が急激に増加する。なお、他の超伝導部分の抵抗値は零であり、健全性は保たれていることが分かった。

3. 電流導入部の改良

電流導入部は、無酸素銅の電流ターミナルと REBCO テープ線材を低融点金属含浸で接続しており、アルミニウムパイプの固定が十分でなかったために製造過程で歪が生じたことが電流導入部での焼損の原因と考えられた。図 4 に示すように固定強度を十分に確保するため一体化構造とし、さらに表面が絶縁されていたアルミニウムパイプに代えて、銅パイプを用いてクエンチ時の電流パスを確保し、通電試験を行う予定である。

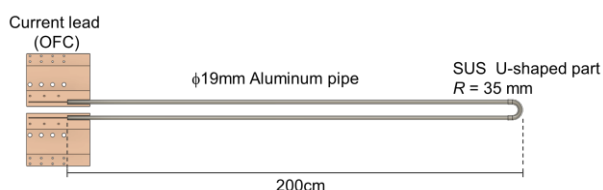


Fig.1 Overview of WISE-U conductor

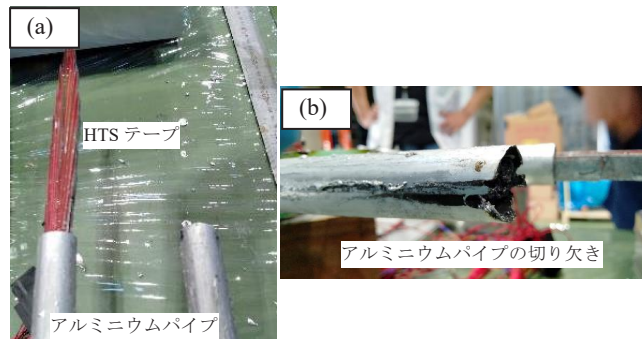


Fig.2 (a) End of the WISE-U conductor removed from the current lead. HTS tapes on the positive side (left) are still intact, but those on the negative side (right) are burned and cut. (b) Aluminum pipe on the negative side. The notch can be seen.

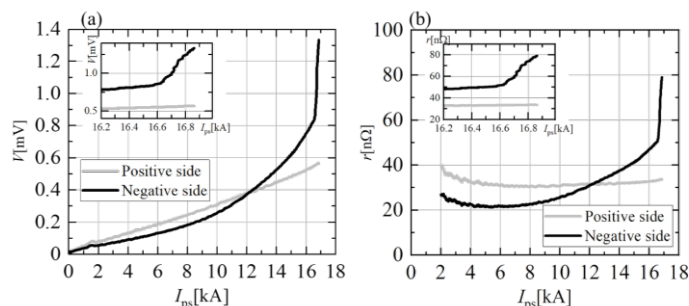


Fig.3 (a) Voltage V and (b) resistance r of current lead against the supply current.

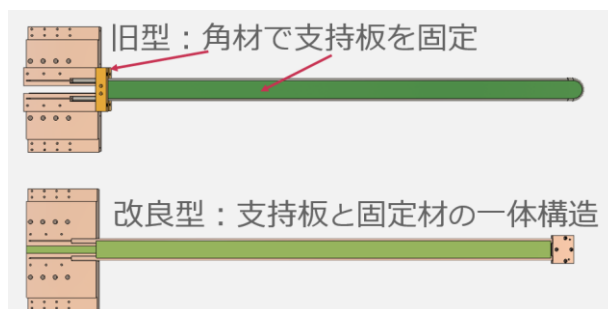


Fig.4 Previous WISE conductor (Upper) and developed WISE conductor (Bottom). The WISE conductor is firmly anchored to the current leads.

謝辞

本研究の一部は核融合科学研究所の予算(UFZG-003、UFZG-009)により実施された。

参考文献

1. 宮澤順一 他 特許第 6749541 号
2. N. Narushima, et al.: PFR, Vol. 15 (2020) 1405076
3. N. Narushima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2021) 1A-a03
4. N. Narushima, et al.: PFR, Vol. 17 (2022) 2405006

JT-60SA CS における電源電圧による過渡応答に影響を受けた電圧分布の評価

Evaluation of Voltage Distribution affected by Transient Response due to Power supply voltage in JT-60SA CS

園田 翔梧, 中村 一也, 結縄 ことみ(上智大学); 村上陽之, 濱田一弥, 畠山昭一, 高橋幸司(量研機構)
 SONODA Shogo, NAKAMURA Kazuya, YUINAWA Kotomi (Sophia University); MURAKAMI Haruyuki, HAMADA Kazuya,
 HATAKEYAMA Shoichi, TAKAHASHI Koji (QST)
 E-mail: shogo_sonod@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

核融合超電導トカマク型実験装置「JT-60SA」は日本と欧州により2020年3月に那珂核融合研究所において建設された。超電導マグネットは中心ソレノイド(CS), 平衡磁場コイル(EFC), トロイダル磁場コイル(TFC)から構成される[1]。

CSは電氣的に独立した4つのモジュールから成り, 1つのモジュールは6つの8層パンケーキコイル及び1つの4層のパンケーキコイルで構成されている。CSは周囲の構造物(CS構造物, TFCケース, EFCカバー, 接地抵抗)を介して接地されている。電流は常電導ブスバー及び超電導フィードから成る電流リードを通して, 電源から供給される。CSモジュールのターミナル間の耐電圧は10 kVであり, 理想的に分圧した場合, 各層間の耐電圧は約0.38 kVとなる。JT-60SAに用いられている電源電圧には交流成分が含まれている。この電圧がCSモジュールに印加された場合, コイル内に一時的に集中した電圧分布が生じ, この過電圧は層間絶縁材の耐電圧を超え, コイルが損傷する可能性がある。

本研究では, JT-60SA CSモジュールの電源電圧の測定結果から, 最大電圧印加速度(dV/dt)を算出した。また, 先行研究で作成された解析モデルを用いて過渡応答による層間電圧への影響を調査した。

2. JT-60SA CS モジュール用電源電圧測定

JT-60SA CSモジュール用電源システム[2]はコンバータ変換器, ベース電源, 高電圧発生回路, クエンチ保護回路から構成されている。ベース電源は4つの並列に接続された双方向ブリッジから構成され, 1つのユニットは背中合わせに接続された12個のサイリスタから成る。高電圧発生回路は複数の機械的スイッチと静的サーキットブレイカーにより, 最大定格電圧を発生させるよう操作される。JT-60SA 実機運転において, CSモジュールに印加された電源電圧を測定した。Fig. 1にCSモジュールの端子間電圧を-5 kVに保った際の測定結果を示す。サンプリング周波数は10 kHzである。-5 kVを基準とした電源電圧の変動が確認された。これは電源のシステムの影響である。この変動の最大電圧印加速度(dV/dt)は20 MV/sであった。

3. CS 過渡応答解析

先行研究より作成した回路シミュレーションモデル[3]を用いて, 過渡応答による層間電圧への影響を調査した。解析モデルはCS(4モジュール), 電流リード(常電導ブスバー及び超電導フィード), 構造物(CS構造物, TFCケース, EFCカバー, 接地抵抗)より構成されている。電源電圧は初期値0 Vから一定の印加電圧速度($1.0E+5 \sim 1.0E+8$ V/s)で上昇され, 最大電圧を5 kVに保った。Fig. 2にCSにおける層間の電圧分布解析結果を示す。横軸は層間数, 縦軸は電源の定格電圧(5 kV)で規格化した層間電圧である。印加電圧速度の上昇により, 各モジュール端において電圧の上昇が確認された。これは, CSモジュールの周囲に設置されている構造物の影響である。印加電圧速度82 MV/s時, 層間の規格化電圧は導体間の絶縁材の規格化耐電圧値に達した。実機電源の最大電圧印加速度20 MV/s時の層間最大規格化電圧0.05は

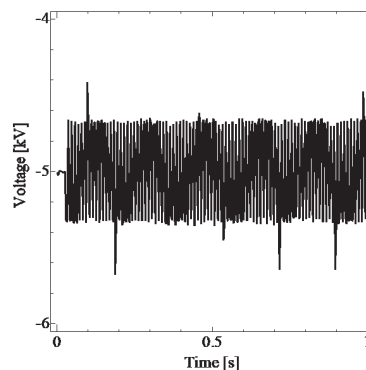


Fig.1 Measurement results of power supply voltage on the CS

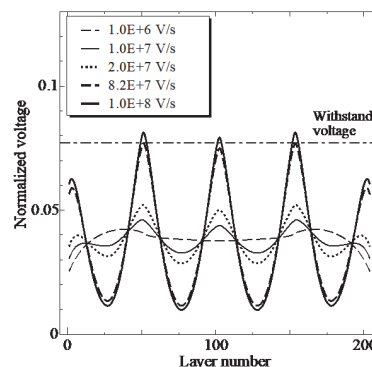


Fig.2 Voltage distribution between layers in the CS

電源の定格電圧5 kVにおいて, 0.25 kVとなるため, 層間の耐電圧値0.38 kVを下回る。よって, 絶縁は損傷しないことが示された。

4. まとめ

本研究では, 電源電圧の最大印加電圧速度, またCSの層間電圧に対する印加電圧速度の影響を評価した。その結果, 実機電源の最大印加電圧速度は20 MV/sであることを確認した。CSの過渡応答解析において, 20 MV/s以下の印加電圧速度では, 層間の最大電圧は絶縁材の耐電圧値0.38 kVを超えないことが示された。ゆえに実機の電源では, 過渡応答により層間の絶縁は損傷しないことが示された。

謝辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金(20K04422)の助成金により実施したものである

参考文献

- 鎌田 裕: J. Plasma Fusion Res., vol. 96, no. 7, (2020), p. 327-330.
- 山内 邦仁: 低温工学, vol. 53, no. 3 (2018), p. 130-137.
- H. Meguro, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30, no. 4, (2020), Art. no. 4201705.

ITER TF コイルターミナル接合部電位分布の劣化分布依存性

Voltage distribution in degraded ITER TF coil terminal joint

泊瀬川 晋, 梶谷 秀樹, 宇野 康弘, 川崎 勉, 中本 美緒, 中平 昌隆(量研機構)

HASEGAWA Shin, KAJITANI Hideki, UNO Yasuhiro, KAWASAKI Tsutomu, NAKAMOTO Mio, NAKAHIRA Masataka (QST)

E-mail: hasegawa.shin2@qst.go.jp

1. はじめに

ITER トロイダル磁場コイル(TFC)は 68kA 級のメインバスバー(MB)に接続され、TFC と MB のジョイントボックスは接合される(ターミナル接合部)[1]。ターミナル接合部の構造は Fig. 1 のようになっており、当該部の接合抵抗(R_j)は、超伝導ケーブル抵抗(バルク抵抗+接触抵抗: R_{sc})、銅スリーブのバルク抵抗(R_{slv})、インジウム抵抗(バルク抵抗+接触抵抗: R_{in})、銅シムプレートのバルク抵抗(R_{shim})に分けられる。この内 R_{in} の値及び分布はターミナル接合部の組立時の状態(電気、機械特性)に依存すると考えられる。ターミナル接合部の状態の把握は TFC の運転に重要であるため、 R_{in} の分布のターミナル接合部組立時の検査が必要である。そこで R_{in} の分布の検査手法として、電流が流れたターミナル接合部の電位分布を測定する方法を検討している(Fig. 1 参照)。先行研究では、同様の手法を“室温環境下”の TFC の巻き線間接合部の検査に利用する検討がなされた[2]。一方、室温条件ではバルク抵抗が大きく、接触抵抗を含む R_{in} の増加(劣化)の電位分布の変化への寄与が小さくなり、ターミナル接合部の冷却が必要となる可能性がある。本研究では、室温での本手法の有効性を確かめるため、ターミナル接合部の劣化分布と電位分布の関係の温度依存性(室温、77 K)を、数値解析、実験で調査した。

2. 数値解析条件

ターミナル接合部で非接触領域があるような、過度な劣化がある場合の電位分布を予測した。Fig. 2 に 3 次元有限要素解析モデルを x - y 平面で見た図を示す。 R_{in} と対応するインジウムの抵抗率(ρ_{in})を、Table 1 に示すように設定した。劣化領域の総面積と分布が異なる 9 ケースを仮定した。劣化領域の総面積は、ターミナル接合部の接合界面全領域の 0~66%とした。300 K 及び 77 K を仮定し、印加電流は 20 A とした。

3. 実験条件

解析結果の実証のため、室温及び 77 K での試験を行った。試験サンプルは、2つのジョイントボックスサンプル、銅とステンレスのシムプレート、インジウムワイヤで構成されている。実際の MB の超伝導ケーブルには Nb-Ti を使用しているが、本試験の超伝導ケーブルにはすべて Nb₃Sn を使用した。しかし、両超伝導体の電気抵抗率は同程度であり、また電位分布の測定領域に超伝導ケーブルは含まれていないことから、両ケーブルの電気特性の差の影響は無視できるとみなした。試験サンプルに 20 A を印加し、ターミナル接合部の電位分布を測定した。また、接合界面にポリイミドフィルムを配置し、数値解析と同様の 9 種類の局所劣化を再現した。

4. 結果

x 座標が等しい 2 つの電圧タップ間の電位差を $V(x)$ とする(Fig. 1 参照)。参考までに、室温の case 5、case 7 の結果を Fig. 3 に示す。数値解析と実験で、ターミナル接合部の接合面の 33%以上が劣化すれば室温で $>1 \mu V$ 、77 K で $>0.1 \mu V$ の $V(x)$ の変化が生じることを確認した。また、Table 1 の全ケースにて、77 K と室温では劣化による $V(x)$ の変化の割合に有意な差は見られなかった。ここで、劣化に対する電位分布の変化の感度を表す指標として、 $\alpha = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\max}$ を定義する。 $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$ は、 $|V(x)|$ の最大値を劣化領域の異なる各ケースで比較した時の最小値(case 5)、最大値(case 7)である。数値解析結果では、 α は室温時に 0.94、77 K で 0.93 となっており、両者は同程度である。試験結果では、 α は室温時に 0.90、77 K で 0.79 となり、77 K の結果は解析結果と 16%程度異なる。これは、77 K の $V(x)$ が小さく、計測ノイズのばらつきの影響が実験結果に比較的多く含まれてしまったことによると考えられる。ただし、77 K の α が室温のそれを上回らない点は解析結果と同様である。この結果と、77 K での $V(x)$ が小さいことより、本手法は室温下で有効である可能性が示唆された。

5. まとめ

ITER TFC のターミナル接合部の電位分布の、 R_{in} 分布と温度への依存性を調査した。結果、ターミナル接合部の接合面の 33%以上が劣化すれば $0.1\text{--}10 \mu V$ の電位分布の変化が生じることを確認した。また、77 K の R_{in} 分布に対する電位分布の変化の割合が室温のそれを上回することは確認されず、各温度の電位変化の大きさも考慮し、本手法は室温で有効である可能性が示唆された。

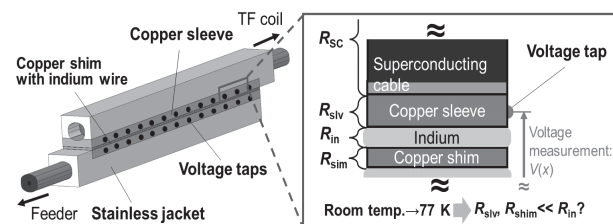


Fig. 1 TFC-MB terminal joint

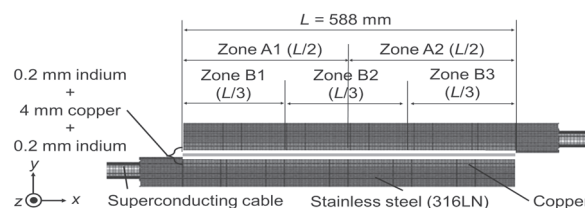


Fig. 2 Analytical model

Table 1 Distribution of ρ_{in} in the numerical analysis

Case	$\rho_{in} [\Omega m]$				
	A1	A2	B1	B2	B3
1	8.8×10^{-8}	8.8×10^{-8}	-	-	-
2	10^{15}	8.8×10^{-8}	-	-	-
3	8.8×10^{-8}	10^{15}	-	-	-
4	-	-	10^{15}	8.8×10^{-8}	8.8×10^{-8}
5	-	-	8.8×10^{-8}	10^{15}	8.8×10^{-8}
6	-	-	8.8×10^{-8}	8.8×10^{-8}	10^{15}
7	-	-	10^{15}	10^{15}	8.8×10^{-8}
8	-	-	8.8×10^{-8}	10^{15}	10^{15}
9	-	-	10^{15}	8.8×10^{-8}	10^{15}

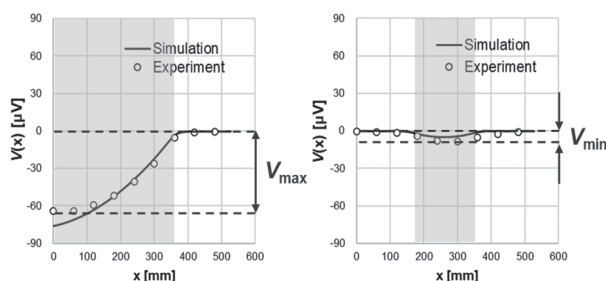


Fig. 3 Results of the numerical analysis and experiment at room temperature: degraded region is highlighted with gray color (left case 7, right: case 5)

参考文献

- [1] J. Rong, et al., *Fus. Eng. Des.*, Vol. 138, pp. 44–47, 2019
- [2] H. Kajitani, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29, Art. No. 4200604, 2019

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(16)

- 7 m 長実証機磁石の製造

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (16)

- Construction of 7 m-long prototype magnet

菅野 未知央, 中本 建志, 鈴木 研人, 池本 由希子, 岡田 尚起, 荻津 透, 川又 弘志, 寺島 明男 (KEK);
木村 誠宏 (東大); 堀越 篤, 千葉 知雄, 瀧本 良寛 (日立); MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)
SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, SUZUKI Kento, IKEMOTO Yukiko, OKADA Naoki, OGITSU Toru,
KAWAMATA Hiroshi, TERASHIMA Akio (KEK); KIMURA Nobuhiro (Univ. of Tokyo);
HORIKOSHI Atsushi, CHIBA Tomoo, TAKIMOTO Yoshihiro (Hitachi); MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)
E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ルミノシティを現行 LHC の 10 倍以上の 3000 fb^{-1} まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。目標達成には実験衝突点近傍の加速器システムの性能向上が不可欠であり、KEK はビーム分離超伝導双極磁石 (D1 磁石, 磁石名は MBXF) の開発を担当している。日本の貢献として、7 m 長の実証機 1 台と実機 6 台を製造することになっている。

2014 年から約 5 年間に渡って KEK 所内で進めてきた 2 m 長のモデル磁石開発を終え、同じ磁石断面で 7 m 長の実証機を製造した。本発表では、実証機磁石 (MBXFP1) の製造について報告する。

2. 7 m 長実証機の概要

2 m モデル磁石までは KEK が所内で製作したが、実証機、実機は日立製作所が製造を担当する。したがって、KEK から日立製作所に技術移転を行った上で、7 m 長磁石の設計、製造方法および磁石性能を検証することが実証機の目的である。設計パラメーターを Table 1 にまとめた。Nominal, Ultimate は定格電流、受入条件電流での値を示している。

本磁石では、大口径かつコイルが単層構造であることから、電磁力に対するコイルの機械的支が課題である。組み立て段階でコイル周方向に 100 MPa 以上の予備応力を負荷し、これが磁石組み立てから励磁中まで適切に維持されているかをひずみゲージにより確認した。また、モデル磁石では磁場精度に問題があり、20 unit (1 unit は主双極磁場 B_z の 10^{-4}) 以上の大きな 6 極成分が発生していた。実証機では、Nb-Ti/Cu ラザフォードケーブルをコイル断面内で周方向に適切に配置するための GFRP 部品 (ウェッジ) 断面設計の修正を行った。

3. 実証機製造

KEK が開発した回転テーブル式の巻線機を使用し、 $\cos\theta$ 型コイル 2 台の巻線を実施した。コイル成形のための圧縮加温工程 (キュアリング) 後の 7 m 長コイルの写真を Fig.1 に示す。予備応力管理の一環として、コイルの円周方向寸法測定を行い、規定値内であることを確認した。

磁石組み立ては以下の工程を経て進められた。まず、コイル外径面にクエンチ保護ヒーターおよび対地絶縁を配置した。次に、コイルの位置決め、およびヨークとの間のスペーサーとしての非磁性ステンレス製カラーを組み付けた。純鉄製の鉄ヨークは上下 2 分割構造であり、プレスで圧縮した状態でキー挿入固定により固定した。この工程でコイル断面がほぼ確定するが、ひずみゲージ測定値から 99 MPa と許容範囲内の予備応力を確認した。

ヨーク磁石の外側にヘリウム容器となるステンレスシェルを縦継ぎ溶接し、コイル間のリード接続、端板溶接、

Table 1 Design parameters of MBXFP1.

Coil aperture	150 mm
Field integral	35 T·m
Nominal field	Nominal: 5.60 T Ultimate: 6.04 T
Current	Nominal: 12.11 kA Ultimate: 13.23 kA
Operating temperature	1.9 K
Field quality	$<10^{-4}$ with respect to B_z ($R_{ref}=50 \text{ mm}$)
Differential inductance	4 mH/m
Stored energy	Nominal: 340 kJ/m
Conductor	Nb-Ti/Cu cable
Magnetic length	6.26 m
Magnet mech. length	6.76 m
Radiation dose	$>25 \text{ MGy}$



Fig.1 7 m-long coil after curing.

長手方向にコイルを支持するための予備荷重負荷を経て実証機磁石が完成した。

4. まとめ

LHC 高輝度化アップグレード計画のためのビーム分離双極磁石の 7 m 長実証機の製造が完了した。KEK で実施した実証機磁石の冷却、励磁試験の結果については [1] [2] を参照されたい。

参考文献

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

LHC 高輝度アップグレード用超伝導双極磁石の開発 (17) — 7 m 長実証機磁石励磁試験結果

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (17) — Test results of 7-m long prototype magnet

鈴木 研人、菅野 未知央、中本 建志、池本 由希子、岡田 尚起、岡田 竜太郎、荻津 透、川又 弘史、田中 賢一、
高橋 直人、寺島 昭男 (KEK)；木村 誠宏 (東大)

SUZUKI Kento, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, IKEMOTO Yukiko, OKADA Naoki, OKADA Ryutaro,
OGITSU Toru, KAWAMATA Hiroshi, TANAKA Kenichi, TAKAHASHI Naoto, TERASHIMA Akio (KEK);
KIMURA Nobuhiro (Univ. of Tokyo)
E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は欧州原子核機構 (CERN) が主導で進めている LHC 高輝度化アップグレード「HL-LHC」への貢献として、ビーム分離用双極磁石 (通称 D1、磁石名 MBXF) の製造責任を担っている。MBXF は NbTi 超伝導磁石であり、現行 LHC と同様超流動ヘリウム温度 (1.9 K) まで冷却され、定格運転電流 12 kA にて 5.6 T の磁場強度を生み出す仕様となっている。2019 年から 7m 長実証機 (MBXFP1) 製造を開始し [1]、2021 年夏に KEK 所内の 9 m 長縦型クライオスタットにて 1.9 K 下で励磁試験を実施した。本発表では、励磁試験結果について報告する。

2 クエンチトレーニング試験結果

MBXFP1 のクエンチトレーニング試験を一度の磁石昇温を挟んだ 2 つのサイクルに分けて実施した。結果を図 1 に示す。第 1 サイクルでは定格電流値 12.11 kA に対し、余裕を見て 12.31 kA の目標電流で試験を行っている。正味 3 回のクエンチを経て定格電流値に到達後、12.31 kA で安定して通電可能となった。第 2 サイクルでは第 1 サイクルと同様 3 回のクエンチを経て定格に到達し、最大で 12.866 kA までの通電に成功した。また、定格電流値の 105% で 4 時間保持を行い、問題なく通電できる事を確認した。

3 磁場測定結果

2017 年と 2018 年に実施した 2、3 号機モデル磁石の励磁試験では、コイル断面設計の誤りに起因する大きな 6 極成分が見受けられた。この事を受けて MBXFP1 では計算モデルを見直し磁場特性の改善を図った [2]。図 2 は磁石中心で測定した 6 極成分の電流値依存性である。超伝導線材の磁化の影響を受けてヒステリシスが見られるが、低電流側のオフセット量が 20 units 近く削減できたことが分かった。尚、MBXFP1 に適用したモデルにはまだ改善すべき点が見られたため、今後製造する実機の磁場設計ではさらなる改善を施した [3]。

4 長尺クエンチ保護ヒーター (QPH) 性能評価

HL-LHC で稼働する MBXF では、クエンチ保護ヒーター (QPH) によって超伝導コイルのクエンチを促進させ、蓄積エネルギーは基本全てジュール熱へと変換させる仕様となっている。この時、クエンチ伝播が遅いと局所的な温度上昇を招きコイルを損傷させる恐れがある。2 m 長モデル磁石試験から、短尺 QPH は設計通りの保護性能を有する事が分かっているが、7 m 長磁石で使用する長尺 QPH の性能評価は MBXFP1 の励磁試験で初めて実施する事になった。QPH の性能は、クエンチ発生後の電流値の二乗を時間積分した値 ($\int I^2 dt$) で評価する。この値は「MIITs (単位: kA^2s)」と呼ばれ、コイルのホットスポット温度の指標となる。電流遮断と同時に QPH を作動した際に得られた MIITs を図 3 に示す。MBXF は、QPH が通常の 4 回路動作したケースだけでなく、最悪 2 回路しか動作しないケースでも安全に保護されるよう設計されている。今回のヒーター試験においても、測定結果と計算が非常に良く一致していることが分かる。本結果より、実機で用いる QPH の性能に問題ない事を明らかにした。

5 まとめ

HL-LHC 向け MBXF 実証機である MBXFP1 の励磁試験を実施した。トレーニング試験を経て、定格電流値の 105% による長時間保持試験に成功した。また、磁場測定を行い、課題

であった 6 極成分の削減を確認できた。さらに、長尺 QPH の性能評価を初めて実施し、性能に問題ない事を明らかにした。上記以外にも、本講演では今後の実機製造計画及び励磁試験に向けた試験設備の改良についても報告する。

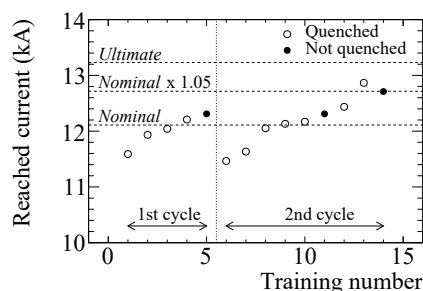


Fig. 1: Training history of MBXFP1.

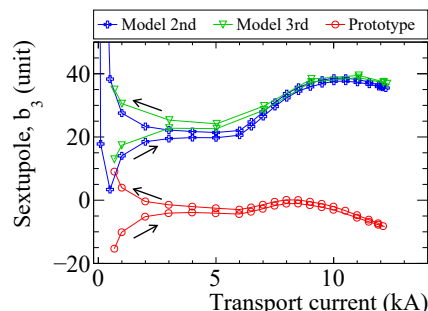


Fig. 2: Variation of b_3 measured at the magnet center for the model magnets and MBXFP1.

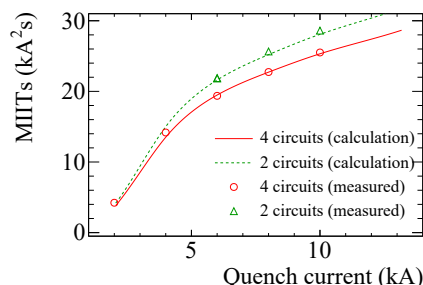


Fig. 3: Measured and simulated MIITs.

参考文献

1. M. Sugano, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 103, (2022) 3C-a06.
2. K. Suzuki, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 30 (2020) 9001168.
3. K. Suzuki, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 32 (2022) 9000407.

加速器用 HTS マグネットの開発(9-1)

— スキュー6極マグネットの作製 —

Development of HTS accelerator magnet (9-1)

— Fabrication of a skew sextupole REBCO magnet —

藤田 真司, 武藤 翔吾, 土屋 光揮 (フジクラ) ; 王 旭東, 寺島 昭男, 土屋 清澄 (KEK)

FUJITA Shinji, MUTO Shogo, TSUCHIYA Koki (FUJIKURA) ; WANG Xudong, TERASHIMA Akio, TSUCHIYA Kiyosumi, (KEK)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

SuperKEKB のルミノシティ向上のための特殊 6 極マグネット(ノーマル 6 極とスキュー 6 極を組み合わせたマグネット)を実現するため, REBCO 線材を用いたマグネット開発を行っている[1]. これまでに, ノーマル 6 極マグネットの試作[1,2]や, クエンチ保護検証[3]等を行ってきた. 今回, スキュー 6 極マグネットを作製したので, その結果について報告する.

2. コイル寸法精度向上検討

ノーマル 6 極用レーストラックコイル作製時の課題として, コイル寸法精度が挙げられる. 今回, コイル寸法精度向上を目的として, 含浸方法を変更した. Fig. 1 に示すように, REBCO 線材の絶縁テープのうち外側のポリイミドテープの外周に B ステージのエポキシ樹脂を塗布したものを用いた. この線材を用いてコイルを巻き線した後, Fig. 2(a)(b)に示す押え/加熱治具にコイルをセットし, コイルを加熱することでエポキシ樹脂をフローさせ, その状態でコイルの直線部を所定の寸法まで押込んだ. この方式では, エポキシ樹脂の厚さで寸法を調整できることから, 寸法精度の向上が期待できる.

3. コイル/6 極マグネット作製結果

コイルは Fig. 1(c)に示す矩形レーストラック形状であり, 真鍮製の巻枠に 36 ターン×2 層巻き線したパンケーキコイルである. コイル寸法は長さ 200 mm, 幅 102 mm であり, 6 極マグネットの磁場精度には主に幅寸法が影響するため, 幅寸法の精度が重要であり, ± 0.1 mm を目標としている. 当初の設計ではシングルパンケーキコイルであったが, コイル同士の接続作業を考慮して 2 層パンケーキコイルに変更した経緯があり, コイル寸法は維持する必要があったため, REBCO 線材と 0.2 mm 厚の銅テープを共巻きしてかさ増している. 作製した 6 個のコイルの LN_2 中での I_c , n 値, およびコイル幅寸法を Table 1 に示す. #4 のコイルのみ n 値がやや低いが, それ以外は I_c , n 値共に良好であった. #4 コイルは 3 回の室温 $\leftrightarrow$ LN_2 のヒートサイクル試験で特性に変化がなかったことから, 良好と判断した. コイル幅寸法は目標精度には至っておらず, やや大きめになった. この原因として, コイルのターン数が少ないためエポキシ層による寸法調整可能範囲が狭いことが考えられる.

各コイルに真鍮製のカバーを取付け, アルミ製の枠に取付けた. 電磁力によるコイル変形を抑制するため, カバーはコの字断面となっており, コイルの長辺部をサポートできる構造となっている. への時型の銅板でコイル同士を接続し, これらの銅板による電流ループを打ち消すためのループ電極を取り付け, 口出し電極を取り付けた. これらの銅板, 電極にはすべて REBCO 線材を半田付けしている. 完成した 6 極マグネットの外観を Fig. 3(a)に示す. マグネットを LN_2 で冷却し, 通電した結果(マグネット全体の電圧から接続抵抗を差し引いた電圧)を Fig. 3(b)に示す. $I_c(0.1 \mu\text{V}/\text{cm}) = 100.6 \text{ A}$, $n = 20.7$ であり, 良好な結果が得られた. 今後, 既に作製しているノーマル 6 極マグネットと組み合わせた評価試験を行う予定である.

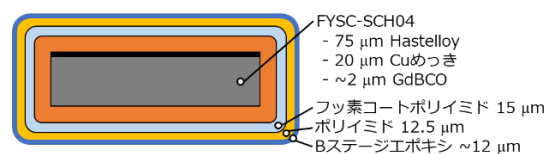


Fig. 1. Schematic image of a REBCO tape used in this work.

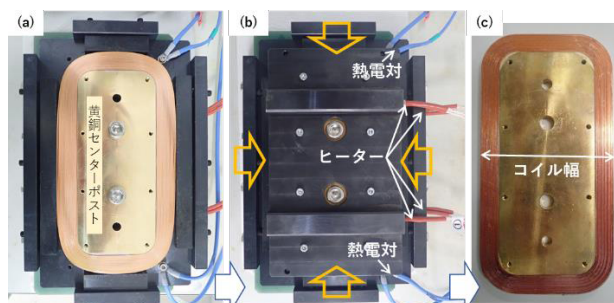


Fig. 2. (a)(b) Impregnation procedure and (c) appearance of an impregnated coil.

Table 1. Manufacturing results of six coils for a skew sextupole.

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
I_c [A] ($0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ criteria)	111.8	100.1	94.6	99.7	112.5	110.2
n -value ($0.001 \sim 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$)	24	27	23	17	27	30
Coil width [mm]	102.30	102.00	102.78	102.35	101.92	102.17

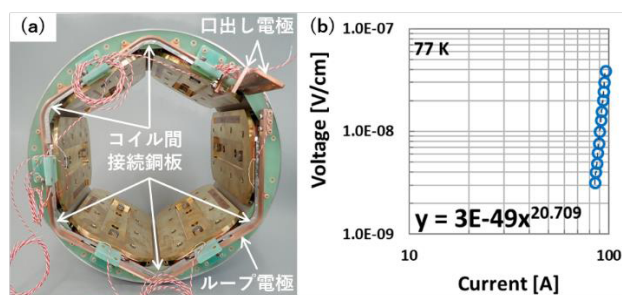


Fig. 3. (a) Appearance of the fabricated skew sextupole and (b) I - V characteristics measured at LN_2 temperature.

謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667, 19H01911)の助成により実施したものである.

参考文献

- [1] K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) 4002604.
- [2] S. Fujita *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.49.
- [3] X. Wang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) 4005305.

加速器用 HTS マグネットの開発(9-2) -LHe フリー伝導冷却システムの開発- Development of HTS Accelerator magnet (9-2) -Development of Liquid He Free Conduction Cooling System-

川井 正徳, 王 旭東, 土屋 清澄, 大内 徳人, 宗 占国, 青木 和之(KEK)

KAWAI Masanori, WANG Xudong, TSUCHIYA kiyosumi, OHUCHI Norihito, ZONG Zhanguo, AOKI Kazuyuki (KEK)

E-mail: Masanori.kawai@kek.jp

1. はじめに

SuperKEKB 加速器の光学補正のために、ビーム衝突点(IP)前後約220mの直線部に計16台の補正用六極電磁石が配置されている。さらなる補正性能の向上を目指して、我々はREBCO 線材を用いた HTS 六極電磁石の開発を行ってきた[1-5]。この六極電磁石をIP周辺に設置したヘリウム冷凍機で冷却する場合、低温配管の熱負荷だけで約 ≈ 240 W(1 W/m)となるため冷凍能力の約半分を低温配管の冷却に使用されることになる。また、大型ヘリウム冷凍機設備の導入費用や高圧ガス保安法による冷凍機運転体制などの理由から、電磁石の冷却は小型冷凍機でシステム構築する方が望ましい。そこで我々は小型冷凍機による HTS 六極電磁石の冷却システムの開発を行っている。今回は、小型冷凍機の冷凍能力などの基礎データの収集と実機サイズの HTS 六極電磁石の冷却試験(無通電)を行ったので報告する。

2. 冷却システムの冷凍能力測定

小型冷凍機は、1.5 W@4.2 K の冷凍能力を持つ SHI GM 冷凍機 RDK-415D を使用し、冷凍機 1 段目で放射シールドと電流リード(銅)を、2 段目で電磁石の冷却を行う。1 段目と2 段目の間には、HTS リードを設けて室温側から電磁石への熱侵入を低減する。GM 冷凍機を使用して冷却システムを構築する上で、クライオスタットへの熱侵入量(冷凍機各冷却ステージへの熱侵入量)の把握と断熱が重要なポイントとなる。具体的な熱侵入の要因は、伝熱としてサポートロッド、各種センサーケーブル、電流リード(伝熱+発熱)があり、さらに放射シールドや電磁石への放射による熱侵入がある。その中の熱侵入の大半を占める電流リードの設計やサポートロッド・センサーケーブルから許容できる熱侵入量を知るために、本冷却システムの冷凍能力(Capacity Map)測定を行った。測定は、冷凍機 1 段目に近い放射シールドと2 段目と接続した伝熱板に其々ヒーターを取付け、1 段目に 0-25 W、2 段目に 0-60 W 入熱した時の各ステージの温度から冷凍能力を評価した。測定結果を Fig.1 に示す。PtCo 温度計と Cernox 温度計を用いて、ヒーター入熱から十分に温度が安定した状態で各条件に対する定常温度を評価した。また同じ測定を 5 回行い、再現性があることを確認した。冷却システムの熱設計において、定格 250 A の HTS 六極電磁石に対して 1 段目と 2 段目への熱負荷は其々約 25 W と約 1 W と予想される。この場合、Fig.1 より 1 段目と 2 段目の定常温度は約 44 K と 4 K 弱となる。

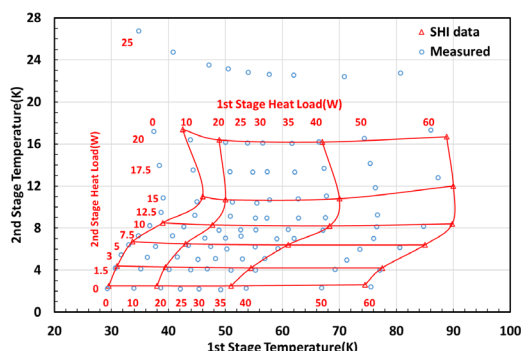


Fig. 1 Capacity map of the GM cryocooler.

3. 実機サイズの HTS 六極電磁石の冷却試験

冷凍能力測定後に電流リード、HTS リード、HTS 六極電磁石などを設置し、無通電の冷却試験を行った。温度測定は冷凍能力測定と同様に PtCo 温度計と Cernox 温度計を用いた。Fig.2(a)に REBCO 線材を用いた HTS 六極電磁石を、Fig.2(b)にコイルと鉄ヨークと組み合わせた HTS 六極電磁石の写真を、Fig.2(c)に HTS 六極電磁石をクライオスタットに取付けた 3D CAD 図を示す。電磁石の冷却重量は、約 93 kg となる。Fig.3 に冷却試験結果を示す。GM 冷凍機を起動し、約 85 時間でクライオスタット内の各所の温度が定常温度になった。冷凍機 1 段目、放射シールド及び HTS リード高温側の温度は 35-37 K に、鉄ヨーク及電磁石の温度は 7-13 K となった。なお、電磁石の設計目標温度は定格 250 A 通電で 30 K 以下である。

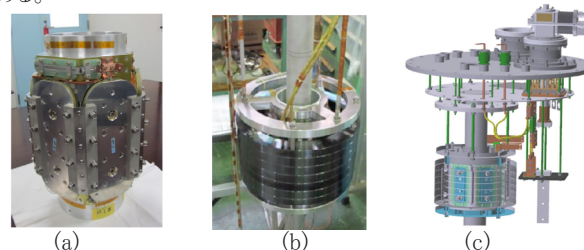


Fig. 2 Photographs of (a) the HTS sextupole coil and (b) the HTS sextupole magnet. (c) 3D CAD of the assembling.

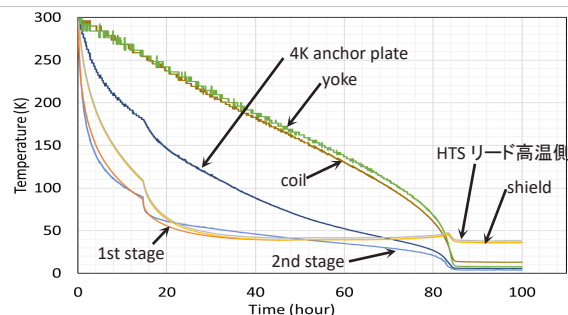


Fig.3 Cooling curves of the HTS sextupole magnet.

4. まとめ

小型冷凍機を用いた冷凍能力の測定と HTS 六極電磁石の冷却試験(無通電)を行い、冷却システムの熱設計に向けたデータ収集を行った。今後は、定格通電時の HTS 六極電磁石の冷却試験と実機の熱設計を行っていく予定である。

謝辞

本研究は科学研究補助金(15H03667、19H01911)の助成により実施したものである。

参考文献

- [1] K. Tsuchiya et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (2016) 4100904.
- [2] X. Wang et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (2017) 4700105.
- [3] K. Tsuchiya et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (2019) 4002604.
- [4] X. Wang et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (2020) 4600304.
- [5] X. Wang et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (2022) 4005305.

(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		府山 伸行	(広島総技研) 15
阿部 充志	(KEK) 104	G	
赤坂 和紀	(東大) 84	高明陽	(九大) 4
赤坂 友幸	(鉄道総研) 70	郭 志敏	(同済大) 30
赤澤 輝彦	(神戸大) 79	H	
天野 一樹	(早大) 43	HAHN Seungyoung (Seoul 大)	102
雨宮 尚之	(京大) 6, 7, 8, 9, 10, 11, 101	箱石 裕人	(岩手大) 66
青木 和之	(KEK) 121	濱田 一希	(早大) 43, 44, 45
青木 星也	(京大) 2	濱田 一弥	(量研機構) 116
有田 拳	(九工大) 13	濱田 衛	(JASTEC) 34
ASAAD Mahmoud (足利大)	67	濱口 真司	(NIFS) 27, 94, 100
阿竹 洋輔	(東北大) 33, 81	濱島 高太郎	(東北大) 105
淡路 智	(東北大) 52, 107, 110	濱本 拓郎	(九工大) 54
B		播磨屋 稔	(京大) 10
馬場 智澄	(NIFS) 89	泊瀬川 晋	(量研機構) 117
伴野 信哉	(NIMS) 25	橋爪 秀利	(東北大) 81
辺 文浩	(九大) 55	畠山 昭一	(量研機構) 116
C		服部 泰佑	(三菱電機) 83
陳 妙 _	(京大) 101	八鳥 孝志	(京大) 9
千葉 知雄	(日立) 118	東 達也	(量研機構) 71, 72, 73, 74
筑本 知子	(中部大) 37, 58 , 59, 82	東川 甲平	(九大) 4, 5, 55 , 62, 112
D		日野 友明	(中部大) 58, 59
DADIEL Longji (芝浦工大)	65	日野口 椋大	(宇都宮大) 93
土井 俊哉	(京大) 1, 2, 63	平原 永将	(福岡工大) 88
DORGET Remi (Lorraine 大)	65	平野 直樹	(NIFS) 29 , 36, 89, 105
E		平山 斉	(鹿児島大) 47, 48
小田部 莊司	(九工大) 13	本田 元気	(住友電工) 107
江口 実穂	(中部大) 57	堀越 篤	(日立) 118
永崎 洋	(産総研) 51	福原 大貴	(福岡工大) 64
F		I	
藤本 大貴	(九大) 19	一瀬 中	(電中研) 109
藤田 寛和	(京大) 7	井手 暁仁	(九大) 55
藤田 真司	(フジクラ) 120	飯沼 裕美	(茨城大) 104
福田 光宏	(阪大) 71, 72, 73, 74, 91	池田 直生	(東京農工大) 69
福井 聡	(新潟大) 15	池北 智亮	(神戸大) 28
古瀬 充穂	(産総研) 15	池本 由希子	(KEK) 118, 119
		生田 勝利	(関西学院大) 46, 83
		今川 信作	(NIFS) 27, 46, 94 , 100 , 113, 114

今村 和孝	(九大)	5	木村 誠宏	(東大)	118, 119
稲葉 勇人	(青学大)	34, 35	木須 隆暢	(九大)	4 , 5, 55, 62, 112
猪俣 涼	(上智大)	105	北口 仁	(NIMS)	80
猪瀬 絢加	(宇都宮大)	92	喜多井 勘太郎	(中部大)	56
井上 和朗	(NIMS)	80	木内 勝	(九工大)	54
井上 昌睦	(福岡工大)	21, 38, 39, 40, 64, 88	小林 大地	(東北大)	52
井上 徳之	(中部大)	58, 59	小林 弘明	(JAXA)	27, 100
井上 良太	(岡山大)	14 , 74, 97, 98	小林 大剛	(岡山大)	98
井上 雄太	(岡山大)	14	小林 宏泰	(千葉大)	60, 99, 103
石田 茂之	(産総研)	51	小林 賢介	(NIMS)	80
石山 敦士	(早大)	41, 42, 43, 44, 45, 71 , 72 , 73, 74, 86, 91	小林 慎一	(住友電工)	107
伊藤 慶信	(山形大)	20	小高一真	(北大)	96
伊藤 悟	(東北大)	33 , 81	児玉 一宗	(日立)	61
伊東 徹也	(テラル)	15	小濱 芳允	(東大)	110, 111
伊東 智寛	(名大)	109	小久保 早希	(早大)	41, 42, 91
糸日谷 浩平	(早大)	42, 91	駒込 敏弘	(前川)	105
井浦 康伸	(福岡工大)	88	小笹 峻諒	(宇都宮大)	93
IVANOV Yury	(中部大)	57, 58, 59	越川 博	(量研機構)	109
岩熊 成卓	(九大)	21, 39, 40	小瀧 博司	(日立)	61
岩本 晃史	(NIFS)	27, 46, 100	小澤 美弥子	(青学大)	108
岩本 雄二	(神戸大)	79	熊谷 塁	(早大)	91
岩田 佳之	(放医研)	11	熊倉 浩明	(NIMS)	62
			栗山 透	(東芝エネルギーシステムズ)	26

K

梶谷 秀樹	(量研機構)	117
神谷 宏治	(NIMS)	32
神田 昌枝	(中部大)	56 , 57
蟹江 澄志	(東北大)	107
柏木 隆成	(筑波大)	51
片山 伸彦	(東大)	85
加藤 準一朗	(東京理科大)	51
加藤 誠士郎	(中部大)	82
加藤 武志	(住友電工)	52
川畑 秋馬	(鹿児島大)	47, 48
川井 正徳	(KEK)	121
川合 修平	(中部大)	56
川又 弘志	(KEK)	118, 119
川並 良造	(川並鉄工)	89
川崎 玄貴	(福岡工大)	88
川崎 理香子	(京大)	27, 100
川崎 勉	(量研機構)	117
河島 裕	(テラル)	15
川山 巖	(京大)	1, 2, 63
紀井 俊輝	(京大)	70
金 錫範	(岡山大)	14, 74, 97, 98

L

李 陽	(京大)	10, 11
-----	------	---------------

M

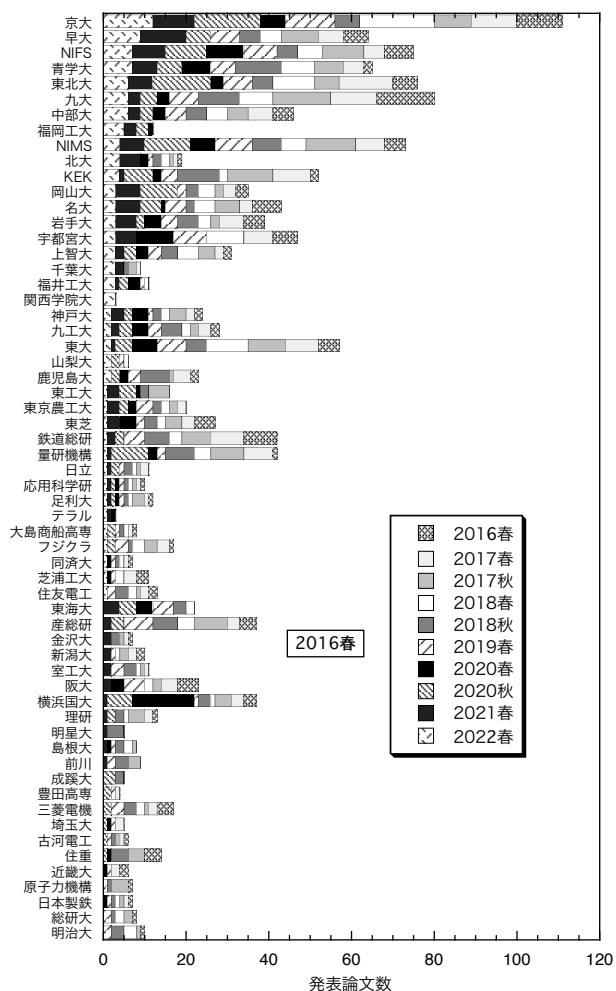
町屋 修太郎	(大同大)	53
前田 佑一郎	(京大)	27, 100
前川 一真	(神戸大)	28
槇田 康博	(KEK)	105
増山 新二	(大島商船高専)	32
間藤 昂允	(北大)	97 , 102
松本 明善	(NIMS)	18 , 19, 62
松本 郁哉	(京大)	27, 100
松本 岳	(京大)	27, 100
松本 雅大	(千葉大)	103
松本 伸	(富士電機)	31
松本 凌	(NIMS)	80
松村 実典	(京大)	2
松村 知岳	(東大)	85
松野 哲也	(有明高専)	13
三部 勉	(KEK)	104
三野 裕太郎	(東京理科大)	51
三島 史人	(福井工大)	76, 77 , 78

三戸 利行	(NIFS)	89, 94	中村 幸太	(上智大)	16
三浦 英明	(三菱電機)	83	中村 新一	(TEP)	22
三輪 将也	(青学大)	22, 23	中村 太郎	(早大)	45
宮城 大輔	(千葉大)	60, 99, 103	中島 隆芳	(住友電工)	34, 35, 50
宮本 康平	(岡山大)	98	成嶋 吉朗	(NIFS)	115
宮本 能伸	(青学大)	50	縄維 典生	(広島総技研)	15
宮本 祐	(早大)	86	荷方 稔之	(宇都宮大)	75, 92, 93
宮崎 佳樹	(鉄道総研)	17	二ノ宮 晃	(明治大)	57
宮澤 順一	(NIFS)	115	西島 元	(NIMS)	62, 80
溝口 義則	(富士電機)	31	西嶋 茂宏	(福井工大)	76, 77, 78
水野 彰人	(名大)	49	西尾 太一郎	(東京理科大)	51
水野 謙一郎	(MTL)	110	野木 大祐	(鹿児島大)	48
森 竜之佑	(福岡工大)	88	野口 正純	(東工大)	29, 36
森下 勇樹	(広島総技研)	15	野口 総	(北大)	41, 42, 43, 44, 45, 71, 72, 73, 74, 91, 96, 97, 98, 102
森田 太郎	(上智大)	25	野島 渉平	(東北大)	87
森内 貞智	(NIFS)	113	野村 直希	(福井工大)	76, 77, 78
森脇 怜也	(福岡工大)	64	野村 侑樹	(宇都宮大)	93
元木 貴則	(青学大)	22, 23, 34, 35, 50, 106, 108	沼澤 健則	(NIMS)	32
棕田 秀和	(阪大)	106			
村上 陽之	(量研機構)	116			O
村上 純	(山形大)	20	大場 恒揮	(NIFS)	113
村上 雅人	(芝浦工大)	65	尾花 哲浩	(NIFS)	90, 94
村本 周平	(京大)	1	小笠原 友樹	(早大)	86
村田 将一朗	(関西学院大)	46	小方 正文	(鉄道総研)	17
MUSSO Andrea	(CERN)	118	緒方 康博	(テラル)	15
武藤 翔吾	(フジクラ)	120	小川 純	(新潟大)	15
			荻津 透	(KEK)	104, 118, 119
	N		大倉 大佑	(中部大)	37
長渕 大河	(早大)	43, 44, 45	大崎 博之	(東大)	84, 85
長濱 葵	(福井工大)	77, 78	大内 徳人	(KEK)	121
永石 竜起	(住友電工)	107	大屋 正義	(関西学院大)	46, 83, 114
長岡 孝	(広島総技研)	15	岡 徹雄	(芝浦工大)	65, 67
長崎 陽	(東北大)	27, 60, 87, 99, 103, 100	岡田 尚起	(KEK)	118, 119
長屋 重夫	(中部電力)	15, 71, 72, 73, 74	岡田 竜太郎	(KEK)	119
永山 悟志	(鹿児島大)	47	岡田 達典	(東北大)	52, 107
内藤 智之	(岩手大)	24, 66, 68	岡井 敬一	(JAXA)	84
仲田 悠馬	(千葉大)	99	岡村 哲至	(東工大)	29, 36
中川 駿吾	(筑波大)	51	岡崎 宏之	(量研機構)	109
中平 昌隆	(量研機構)	117	奥村 皐月	(東大)	85
中井 優亨	(青学大)	34, 35	奥野 清	(中部大)	58, 59
仲井 悠貴	(岡山大)	74	恩地 太紀	(鉄道総研)	33, 105
中本 美緒	(量研機構)	117	小野寺 優太	(NIFS)	29, 89
中本 隼太郎	(福岡工大)	88	尾上 雄海	(東大)	85
中本 建志	(KEK)	118, 119	大井 修一	(NIMS)	18, 19
中村 一也	(上智大)	16, 116	大崎 瑛介	(青学大)	108

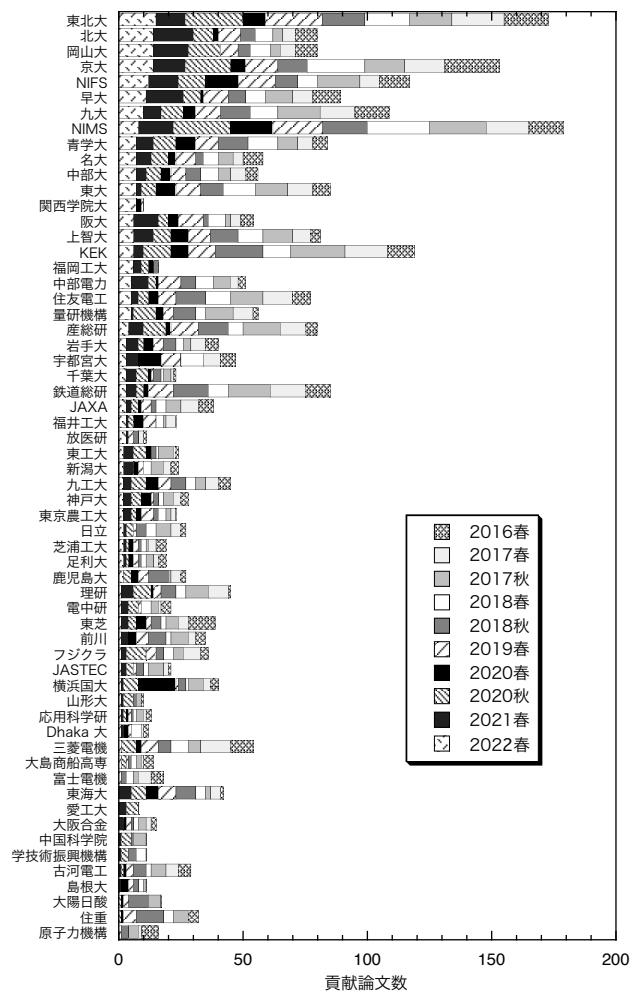
尾崎 優一	(福岡工大)	64, 88	正 孝幸	(テラル)	15
長村 光造	(応用科学研)	53	祖父江 卓哉	(京大)	7
太田 海斗	(早大)	41	曾我部 友輔	(京大)	6, 7, 8, 9, 10, 11, 101
大矢 輝	(京大)	27, 100	SOMJAIJAROEN Natthawiro	(九大)	4, 5
大屋 正義	(関西学院大)	27, 100	園田 翔梧	(上智大)	16, 116
小山 駿	(東大)	104	須藤 正照	(芝浦工大)	65
小山田 拓真	(岩手大)	24	末富 佑	(理研)	34
尾崎 壽紀	(関西学院大)	49, 109	SUGALI Pavan Kumar Naik	(東京理科大)	51
P			菅野 未知央	(KEK)	118, 119
朴 任中	(理研)	34	鈴木 研人	(KEK)	118, 119
R			鈴木 孝明	(日立)	61
六本木 美紀	(宇都宮大)	92, 93	T		
S			立木 実	(NIMS)	18
SAHA Mihir Lal (Dhaka 大)		75	多田 紘規	(名大)	104
齋藤 晶文	(青学大)	106	田口 秀之	(JAXA)	84
齊藤 敦	(山形大)	20	高木 紀和	(東芝エネルギーシステムズ)	26
齊藤 一功	(JASTEC)	34	高橋 明	(京大)	6, 7
齊藤 直人	(KEK)	104	高橋 弘紀	(東北大)	81
齊藤 翼	(宇都宮大)	92	高橋 幸司	(量研機構)	116
坂藤 正樹	(芝浦工大)	65	高橋 政彦	(東芝エネルギーシステムズ)	26
坂井 巖	(名大)	110, 111	高橋 正希	(福岡工大)	40, 88
坂井 直道	(芝浦工大)	65	高橋 直人	(KEK)	119
酒井 秀哉	(福岡工大)	38	高畑 一也	(NIFS)	113
酒井 保蔵	(宇都宮大)	75, 92, 93	鷹見 重幸	(NIFS)	113
作間 啓太	(山梨大)	12, 20	高野 義彦	(NIMS)	80
桜井 雄基	(岡山大)	85	高尾 智明	(上智大)	16
早乙女 英夫	(千葉大)	60, 99, 103	高澤 拓海	(東工大)	29, 36
佐々木 憲一	(KEK)	104	武田 実	(神戸大)	28
佐々木 進	(新潟大)	106	武田 宗一郎	(住友電工)	50
佐藤 亮太	(千葉大)	60	武田 泰明	(NIMS)	34, 35
佐藤 暢星	(九大)	55	竹村 賢人	(芝浦工大)	65
關谷 尚人	(山梨大)	12, 20	竹屋 浩幸	(NIMS)	80
仙波 実怜	(青学大)	22, 23	瀧本 良寛	(日立)	118
柴田 將史	(富士電機)	31	田丸 隼也	(九大)	21
重政 茉於	(京大)	6	田中 秀樹	(日立)	61
下村 浩一郎	(KEK)	104	田中 啓文	(九工大)	13
下山 淳一	(青学大)	22, 23, 34, 35, 50, 106, 108	田中 賢一	(KEK)	119
新富 孝和	(KEK)	105	田中 里佳	(東京農工大)	69
塩津 正博	(京大)	27, 100	田中 陶冶	(東大)	104
白旗 知暉	(東京農工大)	69	田中 祥貴	(福岡工大)	39, 40
白井 航大	(早大)	41	田代 達哉	(京大)	63
白井 康之	(京大)	27, 46, 100	立石 航也	(福岡工大)	88
			寺西 亮	(九大)	18, 19, 21
			寺尾 悠	(東大)	84, 85
			寺島 昭男	(KEK)	118, 119, 120

寺内 和	(早大)	44			Y
TODESCO Ezio	(CERN)	118	谷貝 剛	(上智大)	25, 27, 100, 105
富田 優	(鉄道総研)	17, 33, 70	山田 穰	(中部大)	38
殿岡 俊	(三菱電機)	83	山出 哲	(住友電工)	34, 35, 50
土屋 清澄	(KEK)	120, 121	山口 作太郎	(中部大)	56, 57 , 37
土屋 光揮	(フジクラ)	120	山口 柊平	(九工大)	54
土屋 雄司	(東北大)	3, 49 , 109, 110 , 111	八巻 徹也	(量研機構)	109
津田 理	(東北大)	27, 60, 87, 99, 100, 103	山川 友瑚	(関西学院大)	46
塚本 修巳	(横浜国大)	16	山本 明保	(東京農工大)	69
鶴田 彰宏	(産総研)	3, 49	山本 春海	(鉄道総研)	33
			山本 健太郎	(名大)	3
	U		山本 春也	(量研機構)	109
内田 公	(NIMS)	80	山根 昇悟	(大同大)	53
内田 翔	(京大)	1, 2	山崎 輝	(京大)	63
内山 誠士郎	(早大)	42	山下 知久	(鉄道総研)	17
植田 浩史	(岡山大)	14, 42, 43, 44, 45, 71, 72, 73, 74 , 91, 97, 98, 41	柳 長門	(NIFS)	94, 115
植田 航太	(鹿児島大)	47	柳澤 吉紀	(理研)	34
上田 天馬	(九工大)	13	保川 幸雄	(富士電機)	31
上田 祐樹	(東京農工大)	31	横山 和哉	(足利大)	65, 67
上野 航生	(東芝エネルギーシステムズ)	26	吉田 智貴	(岩手大)	68
梅田 民樹	(神戸大)	79	吉田 隆	(名大)	3, 49, 54, 109 , 110, 111
宇野 康弘	(量研機構)	117	吉原 健彦	(住友電工)	107
宇佐美 雄生	(九工大)	13	YU Cong	(足利大)	67
			結縄 ことみ	(上智大)	116
			結城 拓真	(早大)	43, 44, 45
	W			Z	
王 旭東	(KEK)	120, 121	ZHAO Yue	(Shanghai Superconductor Technology)	38
鷺尾 方一	(早大)	71, 72, 73, 74	ZHU Jiamin	(Shanghai Superconductor Technology)	38
渡邊 裕文	(中部大)	58, 59	朱 紹偉	(同済大)	30
渡部 智則	(中部電力)	15, 71, 72, 73, 74	宗 占国	(KEK)	121
呉 澤宇	(九大)	4, 5, 112			
	X				
許 光煒	(京大)	8			

所属別発表件数の推移



所属別貢献論文数の推移



複 写 を さ れ る 方 に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、公益社団法人 日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人 学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル

TEL 03-3475-5618 FAX 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本学会へご連絡下さい。

本誌に掲載された講演概要の著作権は低温工学・超電導学会が所有しています。

第 103 回 2022 年度春季

低温工学・超電導学会講演概要集

2022 年 5 月 19 日 発行

発行／公益社団法人 低温工学・超電導学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-12-8 パレドール本郷 302 号

電話 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573

E-mail: cssj@csj.or.jp URL: <http://csj.or.jp/>

銀行口座 みずほ銀行 本郷支店

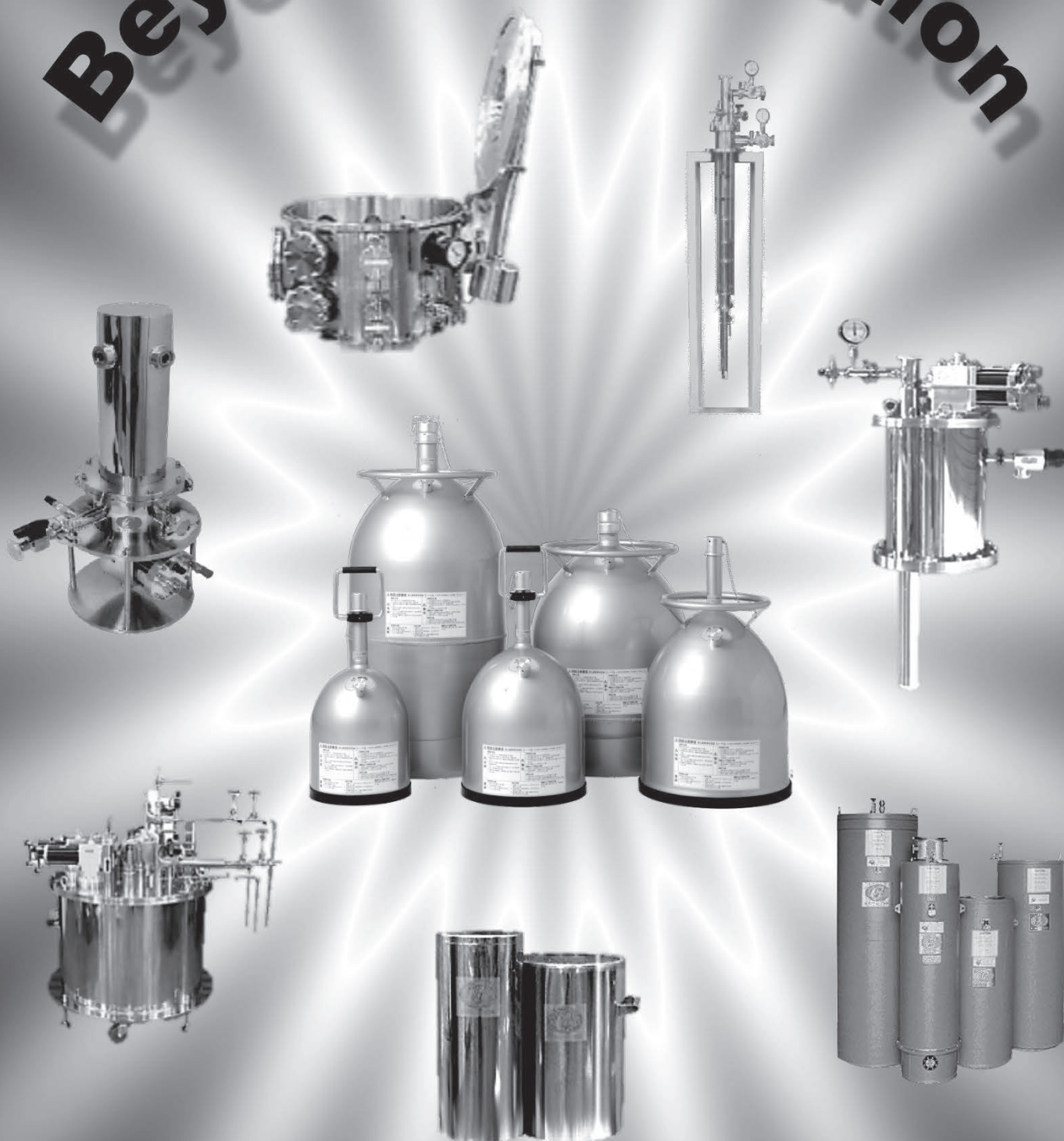
普通 1012705 公益社団法人 低温工学・超電導学会

郵便振替口座 00140-8-192430 公益社団法人 低温工学・超電導学会

印刷／松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438 番地

Beyond Imagination



株式会社ジェック東理社

埼玉県川越市芳野台2丁目8番52号

Tel: 049-225-7555 FAX: 049-225-7558

<http://www.jecctorisha.co.jp/>



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



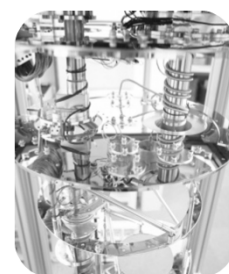
20K



10K



4K



<10mK

液体窒素ジェネレーター



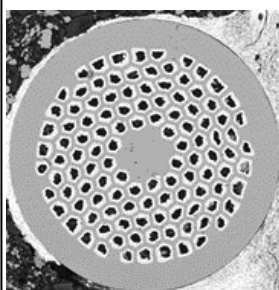
クライオポンプ



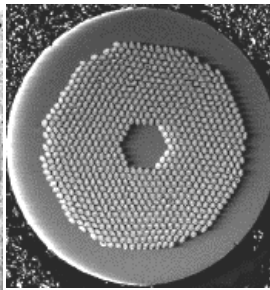
冷凍機を応用したクライオポンプ及び低温機器製品の
設計・製造・販売・サービスまで一貫体制で提供します



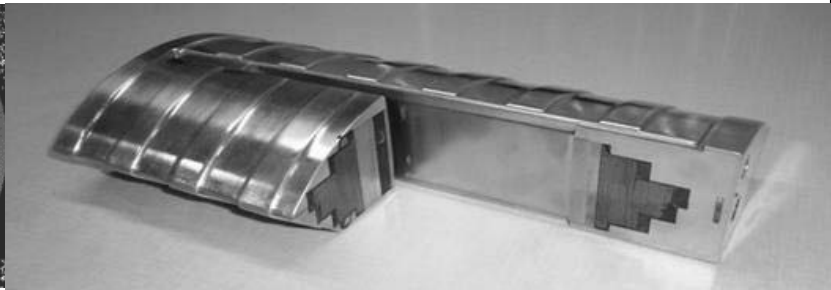
米国Hyper Tech社は、アプリケーションや研究用途に合わせ様々なMgB2線をご提供いたします。
またMgB2 マルチフィラメント線を使用したソレノイドコイルを設計及び製作も可能です。NbTi、Nb3Sn、
MgB2、BSCCO、(RE)BCO超電導体を用いた伝導冷却超電導コイルもご提供できます。



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

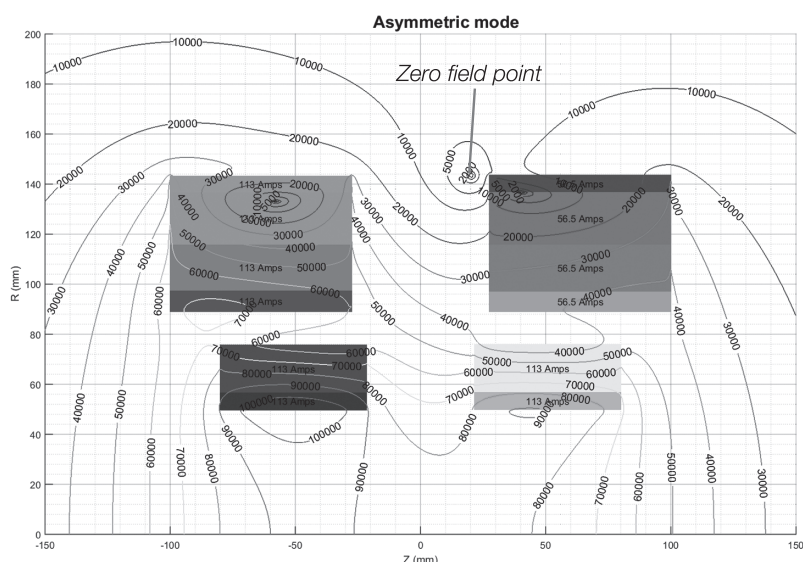
東京支社 〒140-0011 東京都品川区東大井5-26-22
大阪営業所 〒592-0002 大阪市高石市羽衣5-16-8

URL <http://www.nikiglass.co.jp>

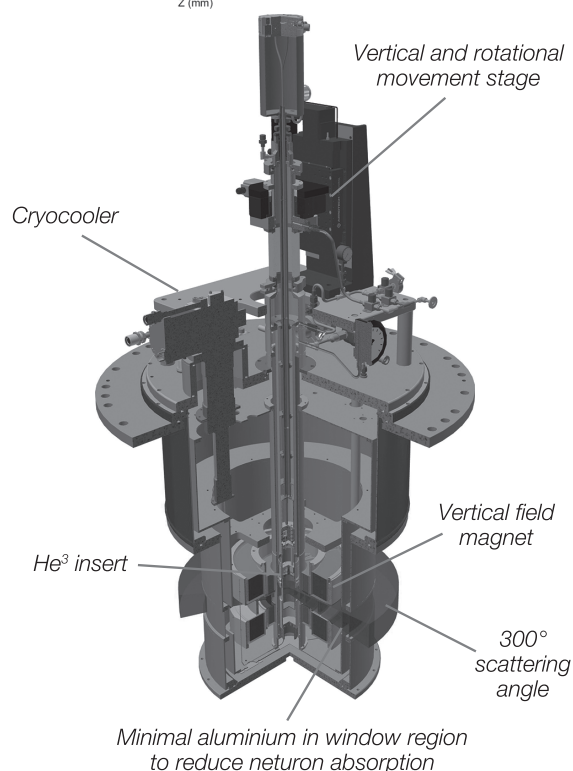
TEL : 03-4218-4700 FAX : 03-4212-3423

TEL : 072-242-7611 FAX : 072-242-7622

中性子散乱研究用無冷媒垂直磁場対称 / 非対称スプリットペアマグネットシステム



- 10T 対称磁場マグネットモード運転
- 8.4T 非対称磁場マグネットモード運転
(ゼロ磁場点が磁場中心面($Z=0$)から20mm移動)
- 中性子吸収を最小限に抑えるために最適化された
マグネットコイル巻枠
- 試料空間は<1.6 Kから375 Kまでの温度制御
が可能
- 300mK までの温度に対応する ^3He インサート
- $\pm 180^\circ$ 回転方向、 $\pm 15\text{mm}$ 鉛直方向の移動が可
能なマニピュレーションステージ



日本代理店 <http://www.naccjp.com> nacc-c@naccjp.com



日本オートマチックコントロール株式会社 理科学システムグループ

東京営業所 〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-4
TEL 03-5434-1600 FAX 03-5434-1630

最先端テクノロジーを支える!!



大陽日酸
The Gas Professionals

大陽日酸の極低温機器システム

ヘリウム液化装置

Helium Liquefier

Linde社製 高効率新型膨張タービンを搭載

ニーズに応える高性能高信頼性を実現

- コンパクト設計
- ダイナミックガスベアリング式膨張タービン採用
- コンピュータ制御による全自動運転
- 8,000時間以上の連続運転
- 数多くの納入実績
- 万全のメンテナンス体制
- 消費電力が小さく、ランニングコストが低い
- 圧縮機をガス設備とすることが可能

主な仕様

機 種		L70	L140	L280
圧力1.0MPaG ^{※1} 未満時の保証液化能力 ^{※2} ()内はLN ₂ 予冷なし	周波数 50Hz	32~63L/h (14~29L/h)	79~108L/h (34~50L/h)	153~233L/h (76~115L/h)
	周波数 60Hz	40~63L/h (18~29L/h)	79~107L/h (33~49L/h)	143~216L/h (69~106L/h)
概略寸法(mm)	φ×H	1,100×2,600	1,300×2,600	1,600×2,600
消費電力(kW) (液化用圧縮機)	50Hz	42~76	89~114	141~210
	60Hz	51~75	91~113	133~224

※1:1.0MPaG以上も可能。

※2:液化能力は純He使用時のものです。

※標準仕様以外にも、御要望により各種設計・製作致します。

写真
Model type L280

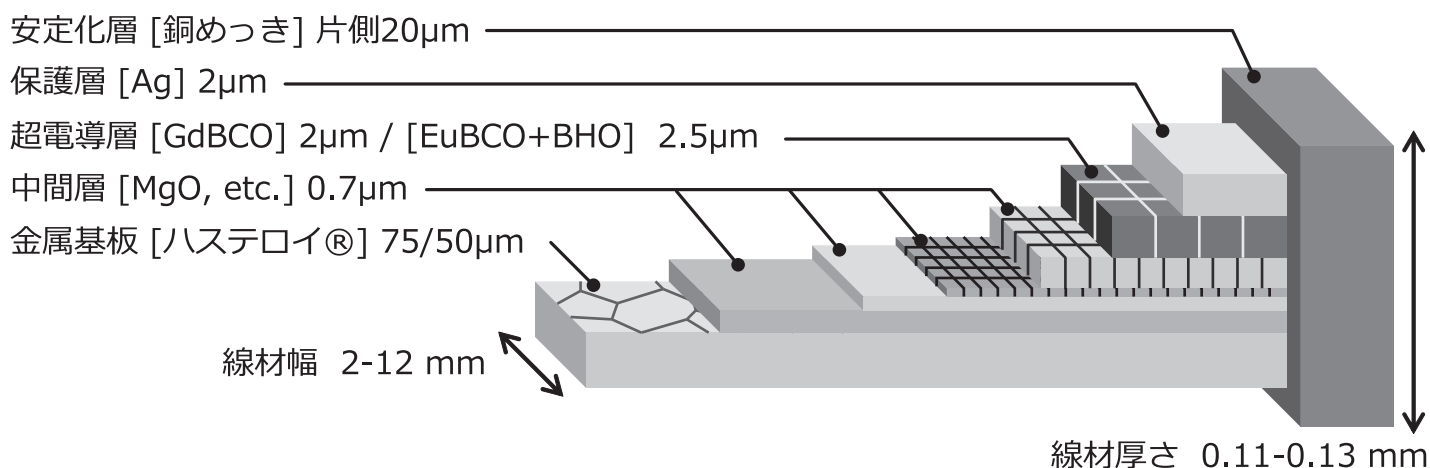
■ 大陽日酸株式会社 ■
オンサイト・プラントユニット
プラント事業部 宇宙・低温機器営業部
〒210-0861 川崎市川崎区小島町6-2(京浜事業所)
Tel:044-288-6937 Fax:03-6866-0111

■ 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 [μ m]	安定化層 [μ m]	臨界電流 [A]		備考
					77K, S.F.	20K, 5T ^{*3}	
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	≥ 165	368	人工ピンなし
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	≥ 550	1,104	人工ピンなし
FYSC-S12	12	0.08	75	—	≥ 550	—	人工ピンなし
FESC-SCH02	2	0.11	75	20	≥ 30	257	銀保護層 ^{*1}
FESC-SCH03	3	0.11	50	20	≥ 63	497	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	≥ 85	663	人工ピン ^{*2}
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	≥ 250	1,990	人工ピン ^{*2}
FESC-S12	12	0.06	50	—	≥ 250	—	銀保護層 ^{*1}

*1 銀保護層線材は12mm幅のみ提供しております。

*2 人工ピン仕様は低温・高磁場におけるマグネットアプリケーション用途でのご使用を推奨しております。

*3 I_c @20K, 5Tは参考値であり、実際の性能を保証するものではありません。

HELIALは進化しています。 忘れてませんか？ AIR LIQUIDEを

フランスの物理学者ジョルジュ・クロードが液体空気の製造に成功し、彼と実業家ポール・デロルムによりエア・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ます。

ガスから液化・冷凍装置まで

技術の 小池

極低温のトータル・システムサプライヤー

Linde 社製

ヘリウム液化・冷凍装置

トータルシステムで 対応します

小池酸素は、1976年にヘリウム液化機を販売して以来、多くの大学・研究機関に種々のヘリウム液化機および関連装置を納入させていただいております。

納入にあたっては、さまざまなニーズに対応できる当社システムエンジニアが、回収・精製・液化のリサイクルシステムの設計・制作・据付けにあたり、トータルに行なっております。



L70、140、280タイプ

●15～280 ℓ/hの標準液化装置

膨張タービンとスクリーコンプレッサーの採用、精製器内蔵などによる高効率、高信頼性のシステム

●標準および特殊仕様の冷凍装置



250L 100L 50L

クライオサーム社製

液体ヘリウム容器

●HELIOS 50A

●STRATOS 100SL-J

●IONOS250

その他必要に応じて御対応いたします。

□その他 取扱品目

ヘリウムガス精製器、各種クライオスタット、各種真空配管
ヘリウムガス回収用機器（高圧圧縮機、長尺容器、ガスバッグ）

リンデ社ヘリウム液化装置国内販売代理店

小池酸素工業株式会社
KOIKE SANSO KOGYO CO., LTD.

<http://www.koikeox.co.jp>

ガス部 極限グループ

〒136-0072 東京都江東区大島9-1-1

TEL03-5875-5045 FAX03-5875-5496

DI-BSCCO	Type H	Type G	Type HT-SS	Type HT-CA	Type HT-NX
	大電流密度線材	低熱伝導率線材	異なる補強材を用いた高強度線材		
応用例		電流リード	マグネット	電力ケーブル	高磁場マグネット
補強材 (厚さ)	—	—	ステンレス (0.02mm ^t)	Cu 合金 (0.05mm ^t)	Ni 合金 (0.03mm ^t)
平均幅	4.2+/- 0.2mm	4.2+/- 0.2mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.2mm
平均厚さ	0.23+/- 0.01mm	0.23+/- 0.01mm	0.29+/- 0.02mm	0.35+/- 0.02mm	0.31+/- 0.03mm
許容引張強度* 77K, I _c 維持率 95%	130 MPa *	130 MPa *	270 MPa *	250 MPa *	400 MPa *
許容両曲げ直径* RT, I _c 維持率 95%	80mm *	80mm *	60mm *	60mm *	40mm *
臨界電流, I _c 77K, 自己磁場	170A, 180A, 190A, 200A				

DI-BSCCO 線材断面

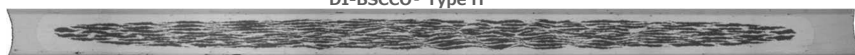
* 参考値

DI-BSCCO® Type H, Type G



DI-BSCCO® Type H

DI-BSCCO® Type HT-SS, HT-CA



DI-BSCCO® Type HT-SS

DI-BSCCO® Type HT-NX



DI-BSCCO® Type HT-NX

e-mail : hts@info.sei.co.jp

<https://sumitomoelectric.com/super/>

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

MEIHO SHA
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

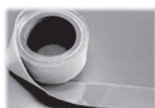
E-mail: info@meihosha.co.jp HP: www.meihosha.co.jp

「織る」「塗る」「形づくる」のコア技術で Dreams to Reality を実現します

複合材料総合メーカーの**アリサワ**が
これまで培ってきた極低温超電導技術で
様々なご要望にお応えします

《取り扱い品目》

1. 絶縁材料（耐放射線性含む） 超電導コイル用絶縁テープ、スペーサー
2. 各種複合材料及び加工製品（耐放射線性、非磁性含む）
プリプレグ、CFRP・GFRP・AFRP、積層板、FWパイプ、3次元加工品、接着組立品



絶縁テープ



プリプレグ



スーパー
インシュレーション



積層板



CFRP



クロス巻き
パイプ



FWパイプ



オートクレープ
成形品



3次元加工品



インサートデュワ



《採用実績》

核融合実験炉、素粒子加速器・検出器
非磁性クライオスタット
小型コイル巻き線

お問い合わせは、(株)有沢製作所 東京支店まで

TEL : 03-3861-2141
E-mail : denzetsu@arisawa.co.jp



株式会社 **有沢製作所**

低温での電気・磁気・熱特性を自動測定 液体ヘリウム不要！

完全無冷媒・低温材料物性自動測定システム CFMS

CRYOGENIC
CRYOGENIC LIMITED

お問い合わせNo: CG01

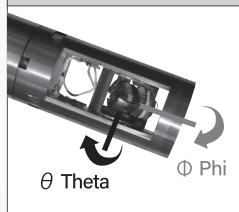
他にない先進機能

- 試料温度1.6 K～高温 (700 K/1100 K) に対応
- 完全無冷媒超伝導マグネットを5～18 Tから選択可能
- 試料ロードロック室を採用し、簡易で素早い試料交換

測定モード(用途)

- 磁気特性
- 電気特性
- 比熱特性
- 熱輸送特性

2軸ローテーター



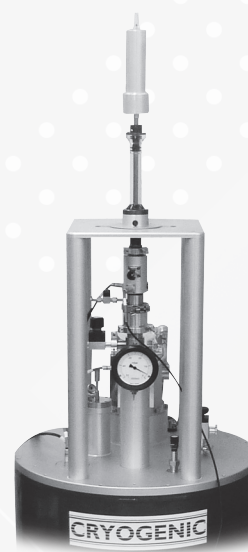
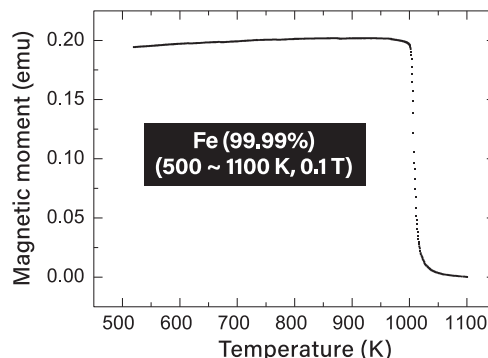
Heプローブ (300 mK) ローテーター付き



最高: 700 K 高温電氣的測定 プローブ



最高: 1100 K 高温VSMプローブ



インサートタイプの希釈冷凍機、優れた冷却性能

希釈冷凍機インサート

お問い合わせNo: LCG02

アプリケーション

- スピントロニクス材料
- 超伝導材料
- トポロジカル物質
- 量子コンピューター



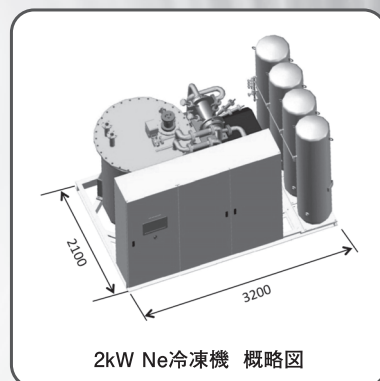
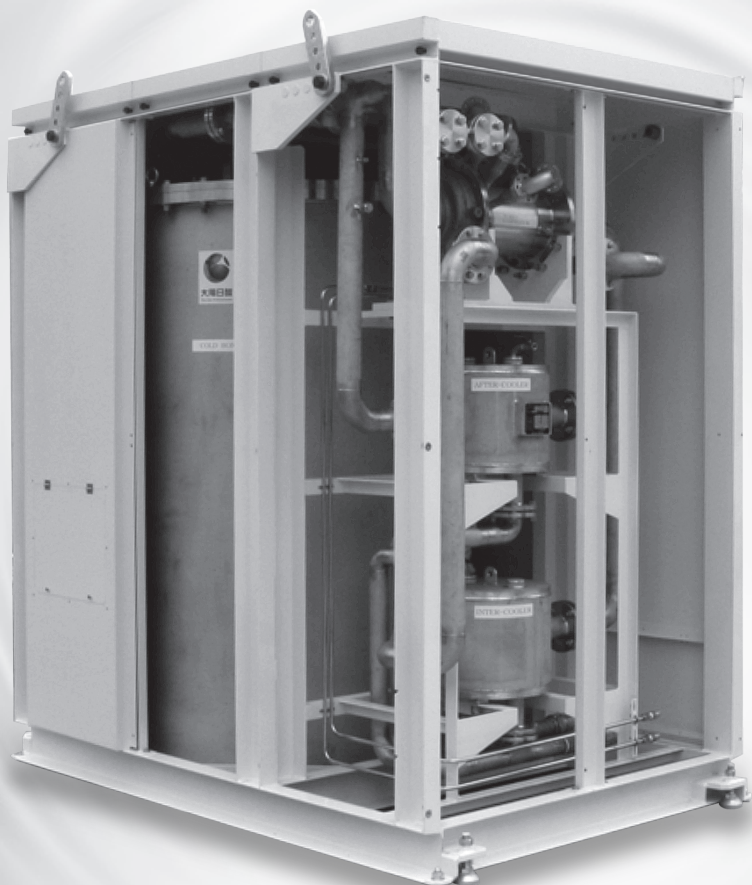
Leiden Cryogenics
Leader in Low Temperature Techniques

無冷媒式クライオスタット
にも対応可！



大陽日酸
The Gas Professionals

超電導電力機器冷却用 ネオン冷凍機



2kW Ne冷凍機 概略図

省エネの決め手となる超電導機器の普及推進のため、
長期間メンテナンス不要な冷却システムを提供しています。

- 冷媒にネオンガスを使用することで、回転機器の効率と信頼性を向上。
- 回転機器に磁気軸受を採用し、メンテナンスフリーを実現。
- ターボ圧縮機の回転数で冷凍能力を調整し、運転効率を大幅に改善。

・お問い合わせ・

大陽日酸株式会社 イノベーション営業部

〒108-0014 東京都港区芝5-30-9 藤ビル

TEL:03 (5439) 5882 URL <http://www.tn-sanso.co.jp>