

Abstracts of CSSJ Conference, Vol.100 (2020)

第100回 2020年度秋季

低温工学・超電導学会

講演概要集

2020年 12月8,9,10日 京都大学吉田キャンパス+WEB 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

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



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.OW	1.5W
1段冷却能力(50⁄60Hz)	45W @45K	36W @48K
最低到達温度 *1)		<3.0K for reference only	<2.8K for reference only
	冷却方法	Air/Water	Water
圧縮機仕様	電气枯桃	3Phase 200V, 50/60Hz	3Phase 200V, 50Hz 200,230V, 60Hz
	电以付注	3Phase 380-415V, 50Hz 480V, 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 @4.3K	42W/50W @50K
最低到達温度 *1)		<3.5K for reference only	<3.5K for reference only
	冷却方法	Air/Water	Air/Water
圧縮機仕様		3Phase 200V, 50/60Hz	3Phase 200V, 50/60Hz
	電気特性	3Phase 380,400,415V, 50Hz 480V, 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。



2020年度秋季低温工学·超電導学会

2020年12月8日(火)~12月10日(木)

会場: 京都大学吉田キャンパス国際科学イノベーション棟、百周年時計台記念館 所在地:〒606-8501京都市左京区吉田本町 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, 参加費: 非会員(学生)5,000円 (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: 12月9日(水)18:45-20:45 お屋敷・高瀬川二条苑 京阪鴨東線 出町柳駅乗車 三条駅下車 市営バス 17 号系統 四条河原町・京都駅行き「百万遍」乗車, 10分「京都市役所前」下車 徒歩5分 市営バス3号系統 出町柳駅前行き「百万遍」乗車,10分「京都市役所前」下車徒歩5分 京都大学病院循環路線バス hoop「京都大学前」乗車,約10分「河原町御池」下車 参加費:7.500円(ミニ懐石料理 近江牛しゃぶーかつら) 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:JR / 近鉄 / 地下鉄 / 烏丸線 京都駅から

市バス 206 系統

「三十三間堂 清水寺 衹園・北大路バスターミナル」行 約 30 分 京大正面前 または 百万遍下車 市バス 17 系統

「四条河原町・銀閣寺」行約30分百万遍下車





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/2020a/

- 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。<u>PC を持ち込んでの発</u> <u>表はできませんので注意してください</u>。詳細は上記ホームページの口頭講演要領をご覧ください。
- ポスター講演:ポスター発表および質疑応答はすべてオンラインで行われます。<u>発表資料をあらかじめ WEB 会場のご自身のページにご自身でアップロード</u>しておいてください。質疑応答はご自身のページに用意された掲示板・オンライン会議アプリを通して行ってください。現地に来られる場合にも、ご自身のパソコンをネットに接続してオンライン上にてご対応ください。現地会場には学会運営側でネット環境を整備いたします。詳細は上記ホームページのポスター講演要領をご覧ください。
- 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。ポスター手短紹介もオン ラインで配信いたします。あらかじめご提出いただいた1分以内の紹介動画を現地A会場,および WEB会場にて配信いたします。詳細は上記ホームページの企業展示・ポスター手短紹介要領をご覧 ください。

2020-	中反朳子低価工子、但电等于云				
	A 会場	B 会場	C 会場		
	受付 9:30 ~				
	10:30 - 12:00 HTS コイル	10:30 - 12:00 HTS 線材 特性 (1)	10:30 - 12:00 デバイス (1)		
	p. 1	p. 15	p. 34		
12					
	ポスター手短絡	3介/展示案内 13:15 - 14:15 (A 会	場,WEB 会場)		
月 8	ポスターセッションI 14:15 - 15:15 (WEB 会場) 超電導コイル p. 53, HTS 線材 / 分布 p. 58, HTS 線材 特性 (2) p. 62, 計測・基礎・理論 p. 67				
	15.00 17.00	15:30 - 16:00	15:30 - 16:45		
	15:30 - 17:00 HTS マグネット	磁気分離 n 21	デバイス (2)		
	p. 6	p. 21 16:15 - 17:45 林融会 (1)	17:00 - 18:00		
	17.15 19.00	م الاھی ا ر (1) p. 23	水平水系 p. 45		
	17.13 - 18.00 安定性・保護 p. 12	18:00 - 19:15 核融合 (2)・加速器 (1)	18:15 - 19:15 伝熱特性		
	1	p. 29	p. 49		
	9:45 - 11:15 加速器応用 p.71	9:45 - 11:15 A15 線材 p. 85	10:15 - 11:15 鉄系・引張試験 p. 99		
	7.	がモッション 11.50 - 12.15 (A 云・ ェロー塾「ピンチを乗り切れエンジニ			
12		昼食			
月	論文賞受賞記念講演 p. 126 13:15 - 14:15	特別セッション 13:30 - 14:15 「Go To 博士課程」			
9	ポスター手短紹介 14:20 - 14:45(A 会場,WEB 会場)				
日 (水)	ポスターセッション II 14:45 - 15:45 (WEB 会場) 交流損失・分流 p. 111, 超電導・低抵抗接合 (1) p. 115, 電力応用 (1)・回転機 (1) p. 118, バルク応用 p. 122, 核融合 (3)・加速器 (2) p. 124				
	16:00 - 18:00 回転機 (2) p. 77	16:00 - 18:00 MRI • NMR p. 91	16:00 - 18:00 冷凍機 p. 103		
		」 会 18:45 - 20:45(お屋敷・高瀬川二	 条苑)		
		10:00 - 10:45	10:00 - 11:00		
12	10:30 - 12:15	MgB ₂ p. 143	超電導・低抵抗接合 (2) p. 156		
月	無絶縁コイル p.128	11:00 - 12:15	11:15 - 12:15		
		HTS 線材 臨界電流 p. 146	超電導・低抵抗接合 (3) p. 160		
		<u> </u>	P. 100		
日 (木)	13:15 - 15:15 電力応用 (2)	13:15 - 14:30 HTS 線材 作製・特性	13:15 - 15:15 バルク 作製・着磁		
	p. 135	p. 151	p. 164		

2020年度秋季低温工学・超電導学会 セッションテーブル

※ 各会場とも換気のため常時扉を開放しサーキュレータを運転しています。

2020年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会運営委員会

委員長	土井 俊哉	京都大学
委員	白井 康之	京都大学
	川山 巌	京都大学

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 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 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 宮﨑 寛史 東芝エネルギーシステムズ株式会社 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

12月8日(火)

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

2B-a10:2日目 B 会場の午前 10番目

3C-p05:3日目C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。

12月8日(火) A 会場 10:30 - 18:00

HTS コイル 10:30 - 12:00 座長:王旭東

1A-a01	磁気プラズマセイル用 HTS コイルの高磁気モーメント化に適したコイル構造
	<u>丸山 真輝</u> ,長崎 陽, 津田 理(東北大);船木 一幸(JAXA)
1A-a02	T-A 法を導入した捕捉磁束密度解析による HTS バルク模擬モデルに関する研究

<u>神戸 紀人</u>,都築 啓太,岩月 峻大,安藤 浩哉,及川 大,塚本 武彦(豊田高専) 1A-a03 (取り消し)

- 1A-a05
 積層 REBCO 導体で巻線された高温超電導コイルの結合電流・遮蔽電流分布解析-------4

 植田 浩史, 徳永 佳祐, 内藤 敬介, 金 錫範(岡山大)
- 1A-a06
 分散型遺伝的アルゴリズムを用いた小型 MRI 用 HTS マグネットの基本形状の検討 -------5

 大澤 慶博,井上 雄太,井上 良太,植田 浩史,金 錫範(岡山大)

昼食 12:00-13:15

HTS マグネット 15:30 - 17:00 座長:柳澤 吉紀

1A-p01	25T 無冷媒超伝導マグネットアップグレード計画の進捗	6
	<u>淡路 智,</u> BADEL Arnaud,岡田 達典,髙橋 弘紀,阿部 徹(東北大);宮崎 寛史,花井 哲,	
	井岡 茂(東芝エネルギーシステムズ);藤田 真司,武藤 翔吾,飯島 康裕,大保 雅載(フジクラ):	
	横山 大貴(九大);柁川 一弘(山口東京理科大)	
1A-p02	エポキシ含浸人エピン REBCO コイルのフープ応力試験	7
	藤田 真司,武藤 翔吾,平田 渉,土屋 光揮, 飯島 康裕,大保 雅載(フジクラ);岡田 達典,高橋 弘紀,	
	淡路 智(東北大)	
1A-p03	共巻き REBCO コイルにおける臨界電流の局所的欠陥の影響の低減:	
	較正された劣化線を用いた実験的検証	8
	<u>阿部 徹</u> ,BADEL Arnaud,岡田 達典,淡路 智(東北大);藤田 真司,土屋 光揮,飯島 康裕,	
	大保 雅載(フジクラ)	
1A-p04	巻線・冷却・励磁過程を考慮した高磁場 REBCO コイルの応力・ひずみ分布の数値解析評価	9
	植田 浩史,徳永 佳祐,内藤 敬介,金 錫範(岡山大)	
1A-p05	高磁場 REBCO 無絶縁コイルの電磁・熱応力解析による補強構造評価	10
	德永 佳祐, 内藤 敬介, 井上 良太, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大)	
1A-p06	低粘度熱硬化樹脂 TELENE1800 の極低温熱収縮率	11
	水野克俊(鉄道総研);竹内正基(RIMTEC)	

休憩 17:00-17:15

安定性・保護 17:15 - 18:00 座長:鈴木研人

1A-p07	伝導冷却された CORC ®導体の劣化しないクエンチ検出・	・保護条件の実験的研究	12
--------	-------------------------------	-------------	----

	<u>羅 熙捷</u> ,趙 一帆,雨宮 尚之(京大);WANG Xiaorong,SHEN Tengming(LBNL);	
	荻津 透(KEK);WEISS Jeremy, VAN DER LAAN Danko(Advanced Conductor Technologies LLC)	
1A-p08	REBCO コイル製作の観点に基づいた線材はく離再現試験	13
	水野克俊(鉄道総研)	
1A-p09	低温超伝導線材による磁場下 REBCO テープ線材のクエンチ検出の実証	14
	<u>泊瀬川晋</u> ,伊藤悟,橋爪秀利(東北大);西島元(NIMS)	
12月8日	日(火) B 会場 10:30 - 19:15	
HTS 線材	† 特性 (1) 10:30 - 12:00 座長:小田部 荘司	
1B-a01	通電法および磁化法より求めた REBCO 線材の I _c 値比較	15
	<u>土屋 清澄</u> ,王 旭東(KEK);町 敬人(産総研):藤田 真司(フジクラ);一瀬 中(電中研);	
	菊池 章弘(NIMS)	
1B-a02	市販 REBCO-APC 線材の臨界電流特性	16
	<u>土屋 清澄</u> ,王 旭東,寺島 昭男(KEK);山田 喬平(上智大):菊池 章弘(NIMS);一瀬 中(電中研);	
	藤田 真司(フジクラ)	
1B-a03	パルス強磁場中での市販 REBCO 線材における臨界電流測定	17
	土屋 雄司,吉田 隆(名大);木田 孝則,鳴海 康雄,萩原 政幸(阪大);金道 浩一(東大)	
1B-a04	REBCO コート線材における臨界電流密度の一軸ひずみ依存性に現れるダブルピーク構造の考察	18
	<u>岡田 達典</u> ,美齊津 英典, 淡路 智(東北大)	
1B-a05	広い周波数領域における多芯化高温薄膜超伝導線材の結合時定数の測定	19
	王 寧,陳 妙鑫,重政 茉於,曾我部 友輔,雨宮 尚之(京大)	
1B-a06	導電性中間層を用いた YBCO 線材のクエンチ発生時における電流回避挙動の解析	20
	<u>村本 周平</u> ,井上 靖也,太田 圭佑,土井 俊哉,川山 巌(京大)	

昼食 12:00-13:15

磁気分離 15:30 - 16:00 座長:秋山庸子

1B-p01	常磁性体のための低磁場磁気分離装置の開発に関する基礎的研究21
	三島 史人, 野村 直希, 西嶋 茂宏(福井工大)
1B-p02	磁気力制御法によるマイクロプラスチックの分離に関する研究22
	佐々木 優一,藤澤 玲志,野村 直希,三島 史人, <u>西嶋 茂宏</u> (福井工大)

休憩 16:00 - 16:15

核融合(1) 16:15-17:45 座長:菅野未知央

1B-p03	ITER TF コイル及び構造物の製作進捗	- 23
	小泉徳潔(量研機構)	
1B-p04	ITER TF コイル高精度巻線技術の開発成果	- 24
	<u>諏訪 友音</u> ,梶谷 秀樹,中本 美緒,高橋 良和,吉澤 一美,宇野 康弘,松井 邦浩,小泉 徳潔,	
	中平 昌隆(量研機構);野元 一宏,久野 和雄,藤原 英弘(三菱重工);坂口 香織,吉澤 裕一(東芝)	
1B-p05	ITER TF コイルダブルパンケーキの製作技術開発成果	- 25
	井口 将秀, 梶谷 秀樹, 高野 克敏, 安藤 真次, 宇野 康弘, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 中平 昌隆(量研機構)	
1B-p06	ITER TF コイル巻線部の開発成果	- 26
	<u>梶谷 秀樹</u> ,中本 美緒,諏訪 友音,井口 将秀,松井 邦弘,小泉 徳潔,中平 昌隆(量研機構)	
1B-p07	ITER TF コイル構造物の製作技術開発の概要	- 27
	<u>中平 昌隆</u> ,井口 将秀,櫻井 武尊,高野 克敏,小泉 徳潔(量研機構)	

休憩 17:45 - 18:00

核融合 (2	2)・加速器 (1) 18:00 - 19:15 座長:諏訪 友音	
1B-p09	JT-60SA 超電導コイルのコミッショニング	29
	村上 陽之,土屋 勝彦,薄井 勝富,関 秀一,柏 好敏,河野 勝己,夏目 恭平,福井 良磨,	
	濱田一弥(量研機構)	
1B-p10	JT-60SA ヘリウム冷凍機システムのコミッショニング	30
	夏目 恭平,河野 勝己,福井 良磨,大西 祥広,濱田 一弥(量研機構)	
1B-p11	大電流 HTS 導体(FAIR 導体)の製法改良と導体特性の改善	31
	三戸 利行,小野寺 優太,平野 直樹,高畑 一也,柳 長門,岩本 晃史,濱口 真司,高田 卓,	
	馬場 智澄,大辻 槙(NIFS);筑本 知子(中部大);川越 明史(鹿児島大);川並 良造(川並鉄工)	
1B-p12	次世代ヘリカル型核融合実験装置への適用をめざした 20 kA 級 HTS STARS 導体開発の進展	32
	柳 長門,寺﨑 義朗,平野 直樹,尾花 哲浩,三戸 利行,田村 仁,濱口 真司,小野寺 優太,	
	宮澤 順一,成嶋 吉朗,高畑 一也(NIFS);松永 信之介(総研大);伊藤 悟,橋爪 秀利(東北大)	
1B-p13	高温超電導スケルトンサイクロトロンにおける可変出力エネルギーを考慮した遮蔽電流磁場の	
	数值解析	33
	白井 航大,緒方 隆充,石山 敦士(早大);植田 浩史(岡山大);野口 聡(北大);渡部 智則,	
	長屋 重夫(中部電力);福田光宏(阪大)	
12月8日	日(火) C 会場 10:30 - 19:15	
デバイス	、(1) 10:30 - 12:00 座長:日高 睦夫	
1C-a01	斜め磁場中の十字形ジョセフソン接合における特異な臨界電流特性	34
	馬渡康徳(産総研)	
1C-a02	Bi-2212 ウィスカ十字接合からの THz 発振	35
	<u>高野 義彦</u> , 齋藤 嘉人(NIMS)	
1C-a03	光子数検出器アレイ用 NbN 集中定数力学インダクタンス検出器のマイクロ波応答	36
	栄元 雄山,寺井 誠,成瀬 雅人,田井野 徹, <u>明連 広昭</u> (埼玉大)	
1C-a04	多接合 SQUID を用いたアナログ回路による高速なフーリエ変換	37
	野田 礼華,山梨 裕希,吉川 信行(横浜国大)	
1C-a05	断熱量子磁束パラメトロン回路におけるゲート間配線高密度化の検討	38
	高橋 大地,竹内 尚輝,鈴木 秀雄,山梨 裕希,吉川 信行(横浜国大)	
1C-a06	断熱量子磁束パラメトロン回路の配置最適化と配線インダクタンス最適化による集積性の改善	39
	<u>田中 智之</u> ,AYALA Christopher,吉川 信行(横浜国大)	

昼食 12:00 - 13:15

デバイス (2) 15:30 - 16:45 座長:田中雅光

1C-p01	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} 薄膜を用いた力学インダクタンス検出器の開発40
	三上 光瑠,林 幹二,飛沢 健,有吉 誠一郎(豊橋技科大);中島 健介(山形大)
1C-p02	NMR 装置のための結合共振器を用いた超伝導ピックアップコイルの開発
	藤田 貴紀,關谷 尚人(山梨大);豊島 克幸,田中 良二(JEOL RESONANCE);大嶋 重利(山形大)

- 1C-p04 直流電流の印加による再構成が可能な単一磁束量子ルックアップテーブルの小型化と動作実証------43
 細谷 岳哉,山梨 裕希,吉川 信行(横浜国大)
- 1C-p05
 単一磁束量子を用いた FPGA の実装に向けたシフトレジスタデータリンク FPGA の面積比較 ------- 44

 <u>和田 洋明</u>,山梨 裕希,吉川 信行(横浜国大)

休憩 16:45 - 17:00

液体水素 17:00 - 18:00 座長: 白井康之

1C-p06	省電力 4 K-GM 冷凍機の開発	45
	竹塚 幸輝,関光 正輝, <u>増山 新二</u> (大島商船高専)	
1C-p07	液化水素用高効率 1 段 GM 冷凍機	46
	関光 正輝,竹塚 幸輝, <u>増山 新二</u> (大島商船高専);沼澤 健則(NIMS)	
1C-p08	液体水素タンク内部圧力の時間変化に関する研究	47
	<u>永廣 衛</u> , 武田 実, 前川 一真, 中山 郁夢, 岩佐 太陽, 松田 竜之介 (神戸大);	
	高橋 和彦(トヨタ自動車)	
1C-p09	液体水素用外部加熱型 MgB ₂ 長尺液面センサーの研究開発	48
	<u>福本 祥一</u> ,高田 芳宏,荘林 純一,山本 博和(山本電機製作所);武田 実,前川 一真(神戸大);	
	熊倉 浩明(NIMS)	

休憩 18:00-18:15

伝熱特性 18:15 - 19:15 座長: 岡村 哲至

1C-p10	極低温下でのパルス強磁場印加による銅細線束発熱Ⅱ	- 49
	<u>中川 豪</u> ,松山 友樹,土田 稜,野口 悟(大阪府大);鳴海 康雄,萩原 政幸(阪大)	
1C-p11	過熱液体の突沸現象を応用した高温超伝導機器の局所温度上昇検出 - 検出原理の理解	- 50
	高畑一也(NIFS)	
1C-p12	垂直加熱管内を流れるサブクール液体水素中の膜沸騰熱伝達	51
	塩津 正博,白井 康之,岩見 佳紀,原 真太郎(京大);小林 弘明,野中 聡,成尾 芳博,	
	稻谷芳史(JAXA)	
1C-p13	飽和超流動ヘリウム中の急縮小流路で起こる間欠沸騰現象における液頭圧依存性	- 52

高田 卓,濱口 真司(NIFS);岡村 崇弘(KEK)

ポスター手短紹介 / 展示案内 13:15 - 14:15 (A 会場, WEB 会場)

12月8日(火) ポスターセッション | WEB 会場 14:15 - 15:15

超電導コイル 14:15 - 15:15 座長:藤田 真司

1P-p01	Pilot GAMMA PDX SC 用超伝導コイルの製造	53
	<u>今村 寿郎,</u> 木戸 修一,古閑 康則,沖津 茂樹(日立);南 龍太郎,假屋 強,坂本 瑞樹(筑波大)	
1P-p02	薄板近似を用いた REBCO コイルの三次元電磁界・熱伝導場連成解析	54
	<u>銭 可楨</u> , 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)	
1P-p03	HTS コイルのクエンチ保護に向けた金属 - 絶縁体転移酸化物薄膜の作製	55
	山田 寛之,土屋 雄司,吉田 隆(名大);一野 祐亮(愛工大)	
1P-p04	無絶縁高温超電導コイルの反復窒素窒素冷却による巻線間接触抵抗測定に関する検討	56
	<u>宮本 康平,</u> 小林 大剛,西川 大亮,井上 良太,植田 浩史,金 錫範(岡山大);野口 聡(北大)	
1P-p05	コイル最外層に金属リングを施した無絶縁高温超電導コイルの熱的安定性に関する研究	57

西川 大亮,小林 大剛,宮本 康平,井上 良太,植田 浩史,金 錫範(岡山大)

HTS 線材 J. 分布 14:15 - 15:15 座長:田中 秀樹

1P-p06	磁気顕微法を用いた Co ドープ BaFe ₂ As ₂ 薄膜 J _c -T _c 分布の相関性及び統計的挙動の議論	58
	呉 澤宇,東川 甲平,木須 隆暢(九大);徐 中堂,馬 衍偉(中国科学院電工所)	
1P-p07	長尺高温超伝導線材の臨界電流評価手法の比較検討	59
	鬼塚 雄大,木須 隆暢,呉 澤宇,東川 甲平(九大);町 敬人,衣斐 顕,和泉 輝郎(産総研)	
1P-p08	塗布熱分解法で作製された REBCO 薄膜線材の臨界電流密度分布と磁場中臨界電流特性	60
	<u>田中 祥貴</u> , 酒井 秀哉(福岡工大);寺西 亮(九大);井上 昌睦(福岡工大)	
1P-p09	長手方向に臨界電流分布を有する REBCO 線材の面内 J _c 分布と磁場中 J _c 特性	61
	<u>篠倉 大輝</u> ,江藤 大登,酒井 秀哉,田中 祥貴,井上 昌睦(福岡工大)	
HTS 線材	特性 (2) 14:15 - 15:15 座長:鈴木 匠	
1P-p10	高分解能 X 線 CT を用いた超伝導線材接合部の非破壊評価	62
	<u>森脇 怜也</u> ,太田 真揮人,福原 大貴,井上 昌睦(福岡工大);寺西 亮(九大)	
1P-p11	基板自己加熱方式による Pulsed Laser Deposition 法を用いた YBa₂Cu₃Oℊ +BaHfO₃ 厚膜線材の	
	作製と評価	63
	<u>一野 祐亮</u> (愛工大);佐藤 航,中村 祐介,土屋 雄司,吉田 隆(名大)	
1P-p12	表面レーザー加熱法を用いて作製した厚膜 YBa2Cu3Oy 線材の磁場中超伝導特性	64
	土屋 雄司,松坂 陣,吉田 隆(名大);一野 祐亮(愛工大);岡田 達典,淡路 智(東北大)	
1P-p13	直線形状高温超伝導 WISE 導体における 1kA 級通電実験	65

計測・基礎・理論 14:15 - 15:15 座長:仲井浩孝

成嶋 吉朗, 宮澤 順一(NIFS); 松永 信之介(総研大)

1P-p15	遺伝的アルゴリズムを用いたコイル形状の最適化シミュレーション:	
	基板型 HTS アンテナによる次世代極低温固体 NMR プローブの開発	67
	TRITRAKARN Techit, 岩佐 崇, 田口 春華, 岡村 哲至(東工大);高橋 雅人(理研);小田 翔平,	
	齊藤 敦(山形大);山田 和彦(高知大)	
1P-p16	超伝導体の複素伝導率・対破壊電流・非線形力学インダクタンスのミクロな理論	
	及びサブギャップ状態密度の影響	68
	<u>久保 毅幸</u> (KEK)	
1P-p17	低温下における GFRP 管内圧力変化に伴うひずみの測定	69
	佐藤 更, 武田 実, 前川 一真(神戸大)	
1P-p18	磁気遮蔽方式による磁気冷凍の可能性に関する研究	70
	<u>平野 直樹</u> (NIFS);小野寺 優太,三戸 利行(NIFS);大辻 槙(東大);永井 せつら,岡崎 陽大,	
	岡村 哲至(東工大)	

12月9日(水) A 会場 9:45-18:00

加速器応用 9:45 - 11:15 座長:水野克俊

- 2A-a01 加速器用 HTS マグネットの開発 (8-1) 全体概要 ----- 71
 <u>土屋 清澄</u>, 王 旭東, 寺島 昭男, 大内 徳人, 有本 靖, 植木 竜一, 川井 正徳, 宗 占国, 多和田 正文,
 増澤 美佳, 山岡 広 (KEK); 菊池 章弘 (NIMS); 町 敬人 (産総研); 一瀬 中 (電中研);
 藤田 真司 (フジクラ)
- 2A-a03 加速器用 HTS マグネットの開発 (8-3) 矩形 REBCO コイルのクエンチ解析 -------73

<u>王 旭東</u>, 土屋 清澄 (KEK), 武藤 翔吾, 土屋 光揮, 藤田 真司 (フジクラ)

- 2A-a04 繰り返し変動励磁下での小型高温超伝導二極マグネットの発生磁場の実験及び解析による評価------74 <u>曽我部 友輔</u>,若林 洗希,雨宮 尚之(京大)
- 2A-a05 LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (14) 7 m 長実証機の製造 ------ 75

 <u>菅野 未知央</u>,中本 建志,鈴木 研人,木村 誠宏,池田 博,池本 由希子,岡田 尚起,荻津 透,川又 弘志,寺島 明男(KEK);堀越 篤(日立); MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)
- 2A-a06 LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (15)
 2mモデル磁石3号機を用いた磁石座標系及び磁場分布の総合評価-------76
 <u>鈴木研人</u>,中本建志,菅野未知央,池本由希子,池田博,岡田尚紀,川又弘史,有本靖, 植木竜一,大内徳人(KEK)

休憩 11:15 - 11:30

特別セッション(基盤強化委員会) 11:30 - 12:15 (A 会場) フェロー塾「ピンチを乗り切れエンジニア」 松下 照男

昼食 12:15 - 13:15

回転機(2) 16:00 - 18:00 座長:川越明史

2A-p01	二重電機子バルク超電導同期機に関する研究	77
	武井 慎治,和泉 充,山口 康太,井田 徹哉,SHAANIKA Erasmus(海洋大)	
2A-p02	50 kW 級全高温超伝導誘導同期モータの負荷試験とその定量解析	78
	<u>中村 武恒</u> , 奥野 誠也(京大);吉川 雅章, 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久(イムラ材研)	
2A-p03	マルチフィジックス解析に基づく全高温超伝導誘導同期回転システムの WLTC 解析	79
	奥野 誠也, <u>中村 武恒</u> ,松木 健次郎,COLLE Alexandre(京大)	
2A-p04	50 kW 級高温超伝導誘導同期モータの負荷特性と効率マップの実験的検討	80
	COLLE Alexandre, 中村 武恒, 松木 健次郎, 松浦 潤, 小笠 卓郎(京大);吉川 雅章, 伊藤 佳孝,	
	寺澤 俊久(イムラ材研)	
2A-p05	高温超伝導誘導同期モータの始動特性に与える熱的影響の解析的検討	81
	奥野 誠也, <u>中村 武恒</u> (京大)	
2A-p06	高温超伝導誘導同期モータにおける低損失かつトルク応答の速い始動法に関する解析的検討	82
	松木 健次郎,中村 武恒,COLLE Alexandre(京大)	
2A-p07	輸送機器用高温超伝導誘導同期モータの実用的冷却構造に関する解析的検討	83
	<u>COLLE Alexandre</u> , 中村 武恒(京大)	
2A-p08	希土類系超伝導固定子を有する全高温超伝導誘導同期発電機の負荷回転特性	84
	<u>中村 武恒</u> , 松浦 潤, 小笠 卓郎(京大)	
12月9日	∃(水) B 会場 9:45 - 18:00	
A15 線材	9:45 - 11:15 座長:斉藤 一功	
2B-a01	内部スズ構造 Nb ₃ Sn 拡散対への Zn 添加量が Nb ₃ Sn 結晶組織や超伝導特性に与える影響	85
	<u>森田 太郎</u> ,谷貝 剛(上智大);伴野 信哉(NIMS)	
2B-a02	Mo 添加 Nb ₃ Sn 超伝導線材の Sn 拡散挙動	86
	<u>肥村 康治</u> ,永澤 諒紀,小黒 英俊(東海大)	
2B-a03	Nb-Ta-Hf/Cu-Sn 拡散反応における Nb ₃ Sn 結晶粒微細化メカニズムに関する基礎的研究	87
	<u>伴野 信哉</u> (NIMS);森田 太郎,谷貝 剛(上智大)	
2B-a04	強磁場応用を目指した CuNb 補強 Nb ₃ Sn 導体の高強度化	88

<u>淡路 智</u>, 鈴木 匠 (東北大); 小黒 英俊 (東海大); 杉本 昌弘, 浅見 大亮, 福島 弘之, 坪内 宏和 (古河電工)

昼食 12:15 - 13:15

特別セッション(基盤強化委員会) 13:30-14:15 (B 会場)

「Go To 博士課程」 寺尾 悠

MRI・NMR 16:00 - 18:00 座長:和久田毅

2B-p01 MRI用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(N-1) - 1/2 サイズアクティブシールド型3Tマグネットの開発 - ------91 服部 泰佑, 三浦 英明, 殿岡 俊, 松田 哲也, 江口 諒, 森田 友輔, 大竹 俊輔, 井上 達也, 田邉 肇, 佐藤 伸治(三菱電機) 2B-p02 MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(IV-2) 三浦 英明, 服部 泰佑, 殿岡 俊, 松田 哲也, 江口 諒, 森田 友輔, 大竹 俊輔, 井上 達也, 田邉 肇, 佐藤 伸治(三菱電機) 2B-p03 MRI 用高温超電導コイルの再励磁時における磁場安定化に適した励磁方法-------93 西山花名子, 旦尾一樹, 長崎陽, 津田理(東北大); 三浦英明(三菱電機) アクティブシールドを有する3Tホールボディ高温超電導 MRIマグネットの5ガウスライン最小化と 2B-p04 磁場均一度を両立する最適化設計-------94 木戸 勇志,魏亮亮,山田祥子,中村 武恒(京大);松田 哲也,三浦 英明,服部 泰佑(三菱電機) 板橋 幸也, 佐々木 哲史, 長崎 陽, 津田 理(東北大); 三浦 英明(三菱電機) 2B-p06 永久電流 1.3 GHz (30.5 T) NMR マグネットの技術開発 -------96 柳澤 吉紀, 朴 任中, 武田 泰明, 山崎 俊夫 (理研); 末富 佑 (千葉大); 濱田 衞, 斉藤 一功 (JASTEC); 西島元,北口仁(NIMS);植田浩史(岡山大);山口高史,大木康太郎,永石竜起(住友電工); 下山 淳一(青学大);前田 秀明(JST) 2B-p07 永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi2223 NMR の開発 (1) 武田 泰明,朴 任中,柳澤 吉紀 (理研);松竹 優一,谷貝 剛 (上智大);末富 佑 (千葉大);中井 優亨, 岩見 壮徒,元木 貴則,下山 淳一(青学大);濱田 衞,斉藤 一功(JASTEC) 2B-p08 1.3GHz NMR の超伝導プローブ利用の可能性 ------ 98 大嶋重利(山形大)

12月9日(水) C会場 10:15-18:00

鉄系・引張試験 10:15 - 11:15 座長:山本明保

2C-a01	BaZrO ₃ ナノ粒子導入による BaFe ₂ (As _{1-x} P _x) ₂ 薄膜の磁場中超伝導特性向上	. 99
	<u>原田 工夢</u> ,土屋 豪,三浦 正志(成蹊大);木内 勝,松下 照男(九工大)	
2C-a02	Ag/(Ba,K) Fe ₂ As ₂ テープの臨界電流密度異方性及びスケーリング	100

羅 <u>珺怡</u>,岡田 達典,淡路 智,鈴木 匠 (東北大);黄河,张 现平,马 衍伟 (IEECAS)

- <u>長村光造</u>(応用科学研);山田雄一(住友電工);小黒英俊(東海大);中井昭暢(日本電線工業会)

昼食 12:15 - 13:15

冷凍機 16:00 - 18:00 座長:三戸利行

2C-p01	機械学習による高性能磁気冷凍材料 HoB ₂ の発見	103
	<u>寺嶋 健成</u> ,BAPTISTA de CASTRO Pedro,山本 貴史,竹屋 浩幸,高野 義彦(NIMS);	
	HOU Zhefeng(Chinese Academy of Science);岩崎 秀(北大)	
2C-p02	新規ボライド系水素液化用磁気冷凍材料のアトマイズ粒の作製	104
	竹屋 浩幸,山本 貴史,BAPTISTA de CASTRO Pedro,寺嶋 健成,沼澤 健則,高野 義彦(NIMS)	
2C-p03	多層充填ランタン系合金を用いた室温磁気冷凍機の性能	105
	<u>荒木 快生</u> ,岡村 哲至(東工大);裵 相哲(サンデン AT)	
2C-p04	室温磁気冷凍システムにおける熱交換器の小型高性能化に関する研究	106
	<u>安部 勇汰</u> ,岡村 哲至(東工大);裵 相哲(サンデン AT)	
2C-p05	人工衛星搭載用 5W パルス管冷凍機の開発	107
	<u>平塚 善勝</u> ,大塚 清見,恒松 正二,金尾 憲一,楢崎 勝弘(住重)	
2C-p06	極低温冷媒循環方式による HTS コイルの冷却システムに関する研究	108
	<u>永井 せつら</u> ,野口 正純,岡村 哲至(東工大);平野 直樹(NIFS)	
2C-p07	ガスアトマイズ法による HoAl ₂ 球状磁気冷凍材料の作製	109
	<u>山本 貴史</u> ,竹屋 浩幸,齋藤 明子,寺嶋 健成,BAPTISTA de CASTRO Pedro,沼澤 健則,	
	高野 義彦(NIMS)	
2C-p08	断熱多層膜スペーサの熱伝達率の重量依存性	110
	山口 作太郎,神田 昌枝(中部大);松本 一昭(栃木カネカ)	

ポスター手短紹介 14:20 - 14:45 (A 会場, WEB 会場)

12月9日(水) ポスターセッションII WEB 会場 14:45 - 15:45

交流損失・分流 14:45 - 15:45 座長:松本明善

2P-p01	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	
	交流損失特性の測定	111
	船越 湧,平山 斉,川畑 秋馬(鹿児島大)	
2P-p02	回転磁界中の MgB ₂ 超電導コイルの交流損失特性評価	112
	岩田 遥介,寺尾 悠,淵野 修一郎,大崎 博之(東大)	
2P-p03	数値解析による無限長 CORC ケーブルの交流損失評価	113
	<u>李 陽</u> , 曽我部 友輔, 豊本 竜希, 雨宮 尚之(京大)	

2P-p04 銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のクエンチ解析手法の検討------114 <u>曽我部 友輔</u>,若林 洸希,雨宮 尚之(京大)

超電導・低抵抗接合(1) 14:45 - 15:45 座長:植田浩史

電力応用(1)・回転機(1) 14:45 - 15:45 座長:平野 直樹

2P-p10 (取り消し)

- 2P-p11
 IPMSM の埋込磁石としてのバルク超電導体の電磁現象------120

 三村 僚太郎,大崎 博之,寺尾 悠 (東大)

バルク応用 14:45 - 15:45 座長:元木貴則

- 2P-p13
 有限要素法によるマルチシード YBCO 超電導バルクと永久磁石との間の浮上力解析-------122

 石田 裕亮,
 尾上 雄海,
 AHMAD Doa,
 寺尾 悠,
 大崎 博之,
 桜井 雄基,
 松村 知岳,
 片山 伸彦(東大)
- 2P-p14
 クロス型ヨークの大きさがバルク磁石の捕捉磁場特性に及ぼす影響------123

 横山 和哉
 (足利大);岡 徹雄(芝浦工大)

核融合 (3)・加速器 (2) 14:45 - 15:45 座長:村上 陽之

2P-p15	Twisted stacked-tape cable 導体の自己磁場測定	124
	<u>尾花 哲浩</u> ,柳 長門,力石 浩孝,濱口 真司,寺﨑 義朗(NIFS);高安 眞(MIT)	
2P-p16	高温超電導スケルトン・サイクロトロンにおける非円形無絶縁 REBCO コイルの	
	補強構造に関する検討	125
	三宅 雄大,仲井 悠貴,金 錫範,植田 浩史(岡山大);野口 聡(北大);渡部 智則,	
	長屋 重夫(中部電力);福田 光宏(阪大);石山 敦士(早大)	

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

2S-p01 極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の破壊靭性値とオーステナイト相の安定度との相関 ------ 126 <u>櫻井 武尊</u>(量研機構)

懇親会(お屋敷・高瀬川二条苑) 18:45 - 20:45

12月10日(木) A 会場 10:30-15:15

無絶縁コイル 10:30 - 12:15 座長:淡路智

- 3A-a01 HTS コイルのクエンチ保護に向けた金属 絶縁体転移酸化物によるターン間絶縁の基礎検討 ------- 128 山田 寛之, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大);一野 祐亮(愛工大)
- 3A-a03 無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける局所的劣化発生時の過渡的振る舞い
 130

 根本 羽衣, 吉原 優花, 濵中 麻衣, 津吉 杏佳, 北村 真由, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大)

3A-a04	超電導電力貯蔵装置を対象とした無絶縁 REBCO バンドル導体を巻線したパンケーキコイルの	
	充放電実験	131
	<u>宮本 祐</u> , 大牟礼 将人, 石山 敦士(早大)	
3A-a05	層間接触不良のある無絶縁コイルの過渡安定性	132
	北村 真由,濱中 麻衣,吉原 優花,津吉 杏佳,石山 敦士(早大);野口 聡(北大)	

- 3A-a06 intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの接触抵抗率に対する温度サイクルと巻線張力の影響 --- 133 高橋 佳佑,吉田 大佐,高尾 智明(上智大);末富 佑(千葉大);柳澤 吉紀(理研); 前田 秀明(科学技術振興機構)

昼食 12:15 - 13:15

電力応用 (2) 13:15 - 15:15 座長:井田 徹哉

3A-p01	瞬時電圧低下補償用電力貯蔵システムの研究開発	135
	長屋 重夫,渡部 智則(中部電力);中村 亘,河村 浩一(中部電力ミライズ);石井 祐介,	
	岩谷祐(東芝); <u>平野 直樹</u> (NIFS)	
3A-p02	HTS コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの熱的安定性を考慮した運転条件の検討	136
	井上 良太,植田 浩史,金 錫範(岡山大);津田 理(東北大)	
3A-p03	高周波用超伝導線材の開発とそれを用いたワイヤレス電力伝送用高Q値コイルの開発	137
	<u>桶田 将弘</u> ,關谷 尚人(山梨大)	
3A-p04	GdBCO 無誘導巻コイルを用いた抵抗型超電導限流器の液体窒素の流路改変による	
	復帰特性向上に関する検討	138
	松下 直也,柳井 創太,白井 康之,塩津 正博(京大)	
3A-p05	抵抗型超伝導限流器の復帰時間短縮を目的とした金属ポーラス体利用による	
	REBCO 線材の高速冷却	139
	<u>結城 光平</u> ,伊藤 悟,橋爪 秀利(東北大)	
3A-p06	Bi2223 とコーテッドコンダクターにおける航空機用積層導体の臨界電流	
	<u>神田 昌枝</u> ,川合 修平,岩田 暢祐,山口 作太郎(中部大)	
3A-p07	洋上風力用三相同一軸型高温超電導ケーブルの低熱伝導層の厚さがケーブル内の	
	温度分布に及ぼす影響	141
	<u>富岡 和貴</u> ,遠藤 夏実,長崎 陽,津田 理(東北大);宮城 大輔(千葉大)	
3A-p08	ホール素子を用いた超電導ケーブルコアの電流分布測定	142
	<u>筑本 知子</u> ,山口 作太郎(中部大);SHISHKIN Oleg(ハリコフ大)	
12月10	日(木) B 会場 10:00 - 14:30	
MgB ₂ 1	0:15 - 10:45 座長:内藤 智之	
3B-a01	MgB₂ フィラメントへの残留圧縮ひずみ増加による MgB₂ 線材の曲げ耐性向上	143
	<u>田中 秀樹</u> , 鈴木 孝明, 児玉 一宗(日立);西島 元, 松本 明善(NIMS)	
3B-a02	MgB₄ を前駆体とした MgB₂ 多結晶体材料の開発	
	<u>須藤 将太朗,小池 亘,元木 貴則,下山 淳一(青学大)</u>	
3B-a03	部分拡散 ex-situ 法による MgB₂ バルクの作製	145

小池 亘,須藤 将太朗,荒井 孝介,元木 貴則,下山 淳一(青学大)

休憩 10:45 - 11:00

HTS 線材 臨界電流 11:00 - 12:15 座長:井上昌睦

3B-a04	TFA-MOD 法を用いた BaZrO ₃ ナノ粒子導入 (La _{2.x} Ba _x)CuO ₄ 薄膜の作製	- 146
	<u>齋藤 優大</u> ,太田 順也,作間 啓太,三浦 正志(成蹊大)	
3B-a05	BaHfO ₃ ナノロッドを導入した Reel-to-Reel PLD 法 EuBa₂Cu₃O _y 線材が	
	磁場中超伝導特性に及ぼす影響	- 147
	高橋 洸, 宮田 健司, 三浦 正志(成蹊大); 横江 大作, 加藤 丈晴(JFCC); 衣斐 顕, 和泉 輝郎(産総研)
3B-a06	フォースフリーケーブル応用に向けた Reel-to-Reel PLD 法により作製した	
	BaHfO ₃ 添加 YBa ₂ Cu ₃ O _y 厚膜線材の縦磁場中超伝導特性	- 148
	<u>日比野 拓,</u> 土屋 雄司,吉田 隆(名大);一野 祐亮(愛工大);高橋 誠,田橋 正浩(中部大);	
	木内勝(九工大)	
3B-a07	REGREB 法で作製された RE 系コート線材を用いた単層縦磁界超電導導体の通電特性	- 149
	木内勝, 黒木 篤也(九工大);日比野 拓, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大);高橋 誠, 田橋 正浩(中部大)	
3B 208	Bi Sr Ca Cu O フィラメントの強磁堪応思雲流蛙性	150

昼食 12:15 - 13:15

HTS線材作製・特性 13:15 - 14:30 座長:岡田達典

3B-p01	Bi2223 線材に対する後熱処理条件と磁場中臨界電流特性	151
	佐藤 海斗,元木 貴則,下山 淳一(青学大);中島 隆芳,山出 哲(住友電工)	
3B-p02	銅酸化物超伝導材料における実際のキャリアドープ状態制御 (2) - Bi2223 材料について -	152
	<u>下山 淳一</u> ,岩見 壮徒,佐藤 海斗,元木 貴則(青学大)	
3B-p03	溶融成長を用いた YbBCO 丸線の組織観察	153
	<u>小澤 優一朗,小島 寛航,小黒 英俊(東海大)</u>	
3B-p04	Coated Conductor を利用した YBCO 丸線の組織観察	154
	<u>小島 寛航,</u> 小澤 優一朗,小黒 英俊(東海大)	
3B-p05	貼り合わせた RE 系超電導線材の曲げ特性	155
	<u>町 敬人</u> ,和泉 輝郎(産総研);中村 美幸,大倉 大佑, 蓮尾 信也,LEE Sergey(SuperOX Japan)	

12月10日(木) C会場 10:00-15:15

超電導・低抵抗接合 (2) 10:00 - 11:00 座長:伊藤 悟

3C-a01	追加堆積膜を利用した GdBa ₂ Cu ₃ O _y 線材接合時の膜厚の影響	156
	<u>寺西 亮</u> ,土井 裕太郎,佐藤 幸生,金子 賢治(九大);PETRYKIN Valery,	
	LEE Sergey(SuperOx Japan);松本 明善(NIMS);岡田 達典,淡路 智(東北大)	
3C-a02	パウダー・イン・チューブ (PIT) 法による 7 芯 MgB₂ 線材の超電導接続 - 2	157
	<u>熊倉 浩明</u> , 滝川 博幸, 松本 明善, 北口 仁(NIMS)	
3C-a03	BSCCO 超伝導接合試料の磁場中接合抵抗評価	158
	小林 賢介, 内田 公, 西島 元, 北口 仁 (NIMS); 武田 泰明 (理研); 下山 淳一 (青学大)	

3C-a04 FEM を用いた超伝導線材のラップ長と接触抵抗の分布を考慮した臨界電流特性の評価------159 <u>鍾 宇軒</u>,小田部 荘司,赤坂 友幸(九工大);安谷 葵,石原 篤,富田 優(鉄道総研)

休憩 11:00-11:15

超電導・低抵抗接合 (3) 11:15 - 12:15 座長: 筑本 知子

3C-a05 PbBi を用いた REBCO 線材の超伝導接続とその問題点------160 武輪 裕之, <u>小黒 英俊</u>(東海大); 淡路 智(東北大)

161
162
-

 木須隆暢,楊明旭,呉澤宇,鈴木賢次,東川甲平(九大);佐藤茂(ULTEX)

 3C-a08
 コンパクトなLTS-HTS 低抵抗接続を実現するための接合構造の提案------163

 <u>伴野信哉</u>,浅野稔久(NIMS);加藤丈晴(JFCC);前田秀明(理研)

昼食 12:15 - 13:15

バルク作製・着磁 13:15 - 15:15 座長:寺尾悠

3C-p01	均質で形状の自由度に優れた単一結晶成長領域からなる REBCO 溶融凝固バルクの作製	164
	元木 貴則,布川 航太,笹田 廉陛,富久 琢磨,下山 淳一(青学大)	
3C-p02	放電プラズマ焼結法による Co ドープ Ba122 多結晶バルクの作製と超伝導特性の評価	165
	<u>長谷川 友大</u> ,藤井 陸太,德田 進之介,山本 明保(東京農工大)	
3C-p03	放電プラズマ焼結法による CaKFe₄As₄ 超電導バルクの作製	166
	<u>石田 茂之</u> ,SUGALI Pavan Kumar Naik,土屋 佳則,馬渡 康徳,吉田 良行,伊豫 彰,永崎 洋,	
	荻野 拓(産総研);神谷 良久,川島 健司(イムラ材研)	
3C-p04	機械学習を活用した K ドープ Ba122 多結晶バルクの合成プロセスの検討	167
	德田 進之介,長谷川 友大,藤井 陸太,岡田 雄輝,石井 秋光,山中 晃徳,嶋田 雄介(東北大);	
	波多 聰(九大);山本 明保(東京農工大)	
3C-p05	低温磁場配向法による c 軸配向 Bi2223 多結晶材料の作製と物性	168
	岩見 壮徒,元木 貴則,下山 淳一(青学大);武田 泰明(理研)	
3C-p06	Nb-Sn 化合物を前駆体とした Cu 添加 Nb ₃ Sn バルク超伝導体の作製と磁束ピン止め特性	169
	<u>天瀬 洸太</u> ,内藤 智之(岩手大);菊池 章弘(NIMS)	
3C-p07	MgB₂ バルク磁石の FCM および PFM 法による捕捉磁場特性の最近の進展	170
	<u>内藤 智之</u> ,高橋 裕平,平野 達也,難波 空,藤代 博之(岩手大);淡路 智(東北大)	
3C-p08	Gd123 超電導線材を曲げ積層した界磁磁石の着磁特性評価	171
	<u>岩月 峻大</u> ,都築 啓太,神戸 紀人,及川 大,塚本 武彦,安藤 浩哉(豊田高専)	

磁気プラズマセイル用 HTS コイルの高磁気モーメント化に適したコイル構造

Structural design of high magnetic moment HTS superconducting coil for Magnetoplasma sail

<u>丸山 真輝</u>,長崎 陽,津田 理(東北大学);船木 一幸(宇宙航空研究開発機構) <u>MARUYAMA Masaki</u>, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); Funaki Ikkoh (JAXA) E-mail: masaki.maruyama.t2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

次世代の宇宙機推進システムとして、超電導コイルがつくる 磁場空間で太陽風プラズマを受け止めて推力を得る、磁気プ ラズマセイルに注目している。本システムの推力は磁場空間 の大きさに依存するため、磁気モーメントが大きいほど推力も 大きくなる。なお、磁気モーメントはコイルの囲む面積、電流 値、巻数の積で表される。

先行研究では、サイズ、電磁力に対するコイル強度、発熱 量の制限下で検討が行われ、巻数が少ないコイルを多数積 層させたコイル(以下、多積層コイル)が高磁気モーメント化に 適しているものの、REBCO コイルの軸方向圧縮応力が制約 となり、電流を大きくできないことが明らかとなっている。そこで、 本研究では、梯子型補強構造を適用し、軽量化と軸方向圧 縮応力に対する強度向上を両立させ、電流、磁気モーメント を増加させる方法について検討している。今回は、梯子型補 強構造の応力分布解析を行い、梯子型補強構造の適用が通 電電流、磁気モーメント向上に与える影響を検討した。

2. 解析方法

解析したコイルおよび梯子型補強構造の諸元を Table.1 に 示す。また,解析領域とコイル断面図を Fig.1 に示す。なお, 打上ロケットのサイズ制約から補強構造の半径を 2.5 m として いる。解析モデルでは、シングルパンケーキコイルを一体物と して扱い、コイルと補強構造の間は含侵剤で満たすものとした。 電磁界解析および応力解析では、2 次元軸対称の1/2 モデル に有限要素法を適用した。なお、本検討では、REBCO コイル の最大許容軸方向圧縮応力を 100MPa、補強構造の最大許 容ミーゼス応力を 900MPa としている。

3. 解析結果及び考察

コイル内部,補強構造の支柱内部の圧縮応力,補強構造 の支柱,支柱同士をつなぐ円盤におけるミーゼス応力の最大 値を Fig.2 に示す。梯子型補強構造を適用するとコイルに発 生した電磁力は補強構造に伝達し,コイル間で伝達しないた め,軸方向圧縮応力は 100 MPa に到達しなかった。また、支 柱内部の圧縮応力も 900 MPa に到達しなかった。また、支 柱内部の三桁応力に着目すると、約 340A で 900MPa に到達した。その時の z=0 付近における補強構造のミーゼス 応力分布を Fig.3 に示す。補強構造の支柱と円盤の接する部 分で大きな応力が発生していることがわかる。これは、補強構 造が電磁力により軸方向に圧縮される際に、軸方向だけでな く径方向に広がり、接続部に応力が集中するためであると考 えられる。なお、この補強材内部の応力集中を防ぐことでさら なる電流増加が可能となるため、補強構造の形状最適化が 今後の課題となる。

次に,補強構造適用による磁気モーメント向上効果を検討 した。本検討で用いたコイル及び補強構造の質量は合計で 535 kg,磁気モーメントは42.2 Tm³である。この質量は補強材 を用いない107ターン,100積層のコイルと等しい。このコイル では158 A 通電時のコイル内部の軸方向圧縮応力は100 MPaに到達し,磁気モーメントは41.5 Tm³となる。この結果よ り,提案する梯子型補強構造の導入が,磁気モーメント向上 に有効であると考えられる。



Fig.1 Analytical model.



Fig.2 Maximum compressive stress in coil and frame and mises stress in connecting parts of the reinforced structure.



Fig.3 Distribution of mises stress in the reinforced structure.

参考文献

 Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, H. Yamakawa: Conceptual Design of YBCO Coil With Large Magnetic Moment for Magnetic Sail Spacecraft, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 23, No. 3, pp. 1990-1993, Jun, 2013.

— 1 —

T-A 法を導入した捕捉磁束密度解析による HTS バルク模擬モデルに関する研究 Study of EM analysis models for trapped magnetic flux of bulk HTS using *T-A* formulation

<u>神戸 紀人</u>,都築 啓太,岩月 峻大,及川 大,塚本 武彦,安藤 浩哉(豊田高専) <u>KAMBE Norihito</u>, TSUZUKI Keita, IWATSUKI Takahiro, OIKAWA Dai, TSUKAMOTO Takehiko, ANDOH Hiroya(NITTC) E-mail: j2003@toyota.kosen.ac.jp

1. 研究背景

近年の省エネルギー化や環境負荷低減化の動向に伴っ て、高効率なモータの開発が期待されている。回転機の界磁 極にバルク超電導体を用いた超電導モータもその一つであり、 の研究対象である。モータの開発と性能評価には、磁場解析 ソフトウェアを用いたモデルの設計とシミュレーションが不可欠 である。しかし、商用の磁場解析ソフトウェアでは着磁された 超電導体が捕捉する磁場を扱うことができる設計になってい ない。そのため、磁場解析ソフトウェアで疑似的にバルク超電 導体モデルの磁束再現を行う機能が求められている。プログ ラミングを用いて、バルク超電導体の性能を示す Jc-B 特性を 与えることでバルク超伝導体の捕捉磁束密度の再現を行うこ とができる機能の実装を行う。

2. 研究目的

臨界電流密度を考慮したバルク超電導体の磁束密度分 布の電磁解析手法の構築を行った。プログラムには収束に近 づくまで自動でこの反復計算を行うように記述した。作成した プログラムを疑似モデルに適用することでバルク超電導体の 捕捉磁束密度分布を計算できるフローを構築した。しかし、磁 束密度分布の精度には課題が残っており、原因として電流設 定の層数が少ないことが考えられる。本研究ではプログラムを 適用するバルク超電導体の疑似モデルの見直しを行い、更 なる精度向上を目指す。

3. 研究方法

通常の超電導体の解析手法では、電流ベクトルポテンシャル法(T法)と磁気ベクトルポテンシャル法(A法)を供用する。 本研究では超電導空間と解析空間の計算を別々に行い、反 復計算を行う *T-A*法[1]の考え方を導入し、電磁解析ソフトウ ェアと自作のプログラムを組み合わせた実装を行った。T-A 法では、A法で超電導体に対して電流密度分布を与えて計 算し、T法では領域内の磁場から *Jc-B*特性に沿った電流を 計算した。A法の計算を磁場解析ソフトウェアの解析機能を使 用し、T法の計算は計算手法を VBScript で記述した。この 2 つの手法での計算を繰り返し行い、値を収束させた。商用の 磁場解析ソフトウェアである Magnet7.9 を使用してバルク超電 導体の疑似モデルに対して自作のプログラムの適用と磁場解 析を行った。



Fig.1 T-A Formulation

バルク超電導体の疑似モデルは、複数のコイルを円筒状 に並べて再現した。モデルは直径 46 mm,厚さ 15 mmの GdBa₂Cu₃O₇-y(Gd123) 超電導体を再現した。これは先行研 究によってバルク超電導体の性能を示す *Jc-B*特性と、表層 1 mmの最大磁束が取得済みであり、解析結果と実測値の比較 が容易であると考え採用した。作成したバルク超電導体の疑 似モデルを Fig2 に示す。これまでの研究成果で使用した 11 個のコイルを縦列に並べた1層モデルに加えて、11 個の縦列 に並べたコイルを3枚重ねにすることで形成した3層モデルを 提案し検証を行った。



Fig.2 Analysis model of bulk

4. 研究成果

収束条件として、極限を厳密に議論するために必要なεδ論法で示されるεの値を参考に、収束を決定した。定数ε を 0.00001 と定め、誤差基準で収束を判定し、反復回数 20 回で収束したとみなして計算を打ち切った。20 回反復後の 3 層モデルと1層モデルの各表層1 mmの磁束密度分布をFig.3 に示す。3層モデルの捕捉磁束密度分布は1層のものと比べ て緩やかな形状を得た。バルク超電導体の捕捉磁束密度分 布の形状により近い山なりの形状となった。



Fig.3 Magnetic Field Density of bulk HTS at 1 mm above surface

5. まとめ

本研究では、磁場解析ソフトウェアを使用したバルク超電 導体の捕捉磁東密度の再現を行う手法構築と解析モデルの 検討を行った。バルク超電導体の疑似モデルに使用するコイ ルを縦方向にも細分化することで、より実測値に近い捕捉磁 東密度分布を取得することができたと考えられる。今後は、さ らなる細分化や形状が異なるバルク体での適用、角度依存性 等を組み込んで精度を高めていきたい。

- H. Ueda, et al.: Current Status of Numerical Simulation Techniques for High-Temperature Superconducting Application Equipment, *TEION KOGAKU*, Vol54, No.2 (2019) pp.90-91
- 2. 土屋寛明:磁束反射効果を用いた超伝導バルク磁石の 磁場解析高精度化,博士論文,(2019)

液体水素浸漬冷却高温超伝導コイルの冷却安定性の検討 Study on cryogenic stability of HTS coils immersed in liquid hydrogen

<u>今川信作</u>, 岩本晃史, 濱口真司(NIFS); 白井康之, 原真太郎, 川崎理香子, 塩津正博(京都大); 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, HARA Shintaro, KAWASAKI Rikako, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.); TSUDA Makoto, NAGASAKI You (Touhoku Univ.);

YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); KOBATASHI 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冷却安定な高温超伝導コ イルの開発を目指している。大気圧の液体水素中の限界熱流 束は 10 W/cm²程度であり、液体窒素の半分程度であるが、液 体へリウムと比較すると10 倍も高い。一方、20 K における純金 属の電気抵抗は室温の 1/100 程度に低くなることから、常伝導 転移をした場合でも導体の熱暴走が生じない「完全安定」な条 件が成立しやすい。密巻のテープ線材の場合、有効な冷却チ ャンネルの確保が課題となるが、線材間の熱伝導が良好であ れば、コイル表面の冷却だけで実用的なコイル電流密度にお いて冷却安定条件を満足することが期待できる。本研究では、 Bi2223 テープ線材を密巻したダブルパンケーキコイル(DP)を 積層して、液体水素中で5T 程度の磁場を発生するコイルを計 画しており、設計と製作および今後の計画を報告する。

2. コイルの設計

漏れ磁場とコイルクエンチ時の発熱の低減の観点から磁気エ ネルギーを小さくするため,図1に示すように、外側コイル(コイ ルA)と内側コイル(コイルB)を直列に接続して逆向きに電流を 流す構成とする。断熱ケースに収納したサンプル試験も可能な ように、サンプル空間幅を20mmとし、断熱ケースをコイルAと コイルBの間に上部から挿入する構造とした。そのため、サンプ ルのリードや冷媒配管は上向きに取り出す構造となっている。

巻線はダブルパンケーキとし、1層の高さは「線材幅(4.3 mm) +絶縁厚さ(0.025 mm)×2」に巻線誤差による膨らみ分として 0.5 mmを加えた配置で磁場を計算した。サンプル空間を直径 160-200 mm、コイル外径250 mm以内の条件で、400 A通電時 の最高磁場が5 Tとなるようなコイル組合せを検討した結果を 表1に示す。コイルAについては、層数の少ない方が線材全長 を短くできるが、外径の制約より、77列×12層または88列×10 層が候補となり、バランス電圧方式のクエンチ検出の適用を考 慮して前者を選択した。コイル B については、サンプル中心 (R=90 mm)の磁場強度、磁気エネルギー、および、線材全長 を考慮して、73列×8層(表1のCase 2)を選択した。この場合、 サンプル中心の鉛直磁場は、図2に示すように、400 Aで4.7 T となる。磁場は、直方体の体積電流要素(要素内は一様電流) を用いて数値計算により求めた。

コイル A とコイル B を逆向きに通電することにより, 各々のコイ ル内の最高水平磁場を低くする効果があり, 400 A 通電時の水 平磁場(線材垂直磁場)の最高値は, コイル A が 2.93 T, コイル B が 2.10 T となる。住友電工製 DI-BSCCO Type-H(77 K の自 己磁場での臨界電流 180 A)の場合, 上記の垂直磁場におけ る 20 K の臨界電流[1]は400 A 程度である。線材垂直磁場は端 部の層で高いため, 性能の高いパンケーキコイルを端部に配 置することによりクエンチ電流の向上が期待できる。

3. 今後の計画

現在,コイルAが2個,コイルBが1個のDP(図3参照)の製作が 完了し,液体窒素中での臨界電流測定の準備を進めている。 大きな性能低下が無いことを確認した後,DPを順次製作して, 全DPについて液体窒素中で臨界電流を測定する計画である。 各DPの臨界電流を考慮して積層位置を決めてコイルを一体化 し、来年度に液体水素中での通電試験を計画している。さらに ReBCO線材で製作したDPを組み込むことも検討している。



Fig. 1. Sketch of LH₂ cooled 5 T coil with HTS tape conductors.

Table 1Parameter study of Coil-A and Coil-B at 400 A. m and
n are turn and layer numbers of Bi2223 tape, respectively.



Fig. 2. Vertical magnetic field in the Case 2 in Table 1.



Fig. 3. A photo of double-pancake coils of Coil-A and Coil-B.

謝辞

本研究は、核融合科学研究所共同研究 NIFS20KOBA032の 支援の下に実施されました。

参考文献

1. N. Ayai et al.: Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012112.

積層 REBCO 導体で巻線された高温超電導コイルの結合電流・遮蔽電流分布解析

Numerical evaluation on coupling and screening currents in HTS coils wound with REBCO bundle conductor

植田 浩史, 徳永 佳祐, 内藤 敬介, 井上 良太, 金 錫範(岡山大学) <u>UEDA Hiroshi</u>, TOKUNAGA Keisuke, NAITO Keisuke, INOUE Ryota, KIM SeokBeom (Okayama Univ.) E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO線材はテープ線材であるため、大電流化のために 積層導体構造が採用される。ROEBEL導体[1],TSTC導体 [2] CORC導体[3]など様々な REBCO導体が提案されている。 本報告では、単純な REBCO積層導体を対象にする。 REBCOコイルの不整磁場は、テープ線材の幅広面に垂直磁 界が印加され、長時定数の誘導電流が流れることで発生する。 積層導体では、さらに、テープ幅広面に平行な磁界により、 線材間で結合電流が流れる。したがって、線材の遮蔽電流と 積層導体の線材間結合電流が重畳されることにより、電磁的 振舞いはさらに複雑になることが予想される。今回は、積層 REBCO導体で巻線された高温超電導コイルの結合電流・遮 蔽電流分布について数値解析により検証した。

2. 多層薄膜近似

REBCO線材は、幅 4-6mm, 超電導層が ~1µm の薄膜で あるため、電磁場解析では, Fig. 1(a)のようにテープ幅広面に 平行な向きに電流だけを考慮する薄膜近似を用いて, 未知 数を電流ベクトルポテンシャルの定義として, オームの法則, ファラデーの電磁誘導の法則, ビオ・サバールの法則に基づ いて定式化することが多い[1][2]。

$$\{\boldsymbol{\nabla} \times \rho(\boldsymbol{\nabla}T \times \boldsymbol{n})\} \cdot \boldsymbol{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S} \frac{(\boldsymbol{\nabla}T' \times \boldsymbol{n}') \times \boldsymbol{R}}{R^3} \cdot \boldsymbol{n} dS' = -\frac{\partial \boldsymbol{B}_0}{\partial t} \cdot \boldsymbol{n}$$
⁽¹⁾

ここで、Tはテープ面法線方向の電流ベクトルポテンシャル, nはテープ面の法線ベクトル、dは超電導層の厚み、 B_0 は外 部磁場、 ρ は抵抗率である。積分範囲Sは超電導体の全領域 であり、Rはソース点rからフィールド点rに向かうベクトルで ある。我々もこれまで REBCO コイルの遮蔽電流磁場を薄膜 近似を用いた電磁界解析により評価してきた[3]。

一方,今回対象とするREBCO線材積層導体では、線材間 を無絶縁とした場合、積層方向(テープ面垂直方向)に電流 が流れる。また, c 軸方向に電流が流れるため,超電導の電 流電圧特性の異方性を考慮しなければならない可能性もある。 このように、これまので薄膜近似では表現できない電磁現象 が現れる。そこで今回は、Fig. 1(b)のように薄膜の積層として 近似(多層薄膜近似では、薄膜間の磁気的結合,すなわ ちコイル軸方向(薄膜平行方向)の磁場がつくる誘導電流を 考慮しなければならない。そこで、従来の薄膜厚さ方向の電 流ベクトルポテンシャルだけでなく、薄膜平行方向のポテンシ ャルT_Iの薄膜内分布を線形近似して定式化に組み込む。

$$T_{//} = T_{i//} + \Delta T_{i,i+1} \frac{z}{d}$$
(2)

ここで、 $T_{i//}$ は、i層の薄膜平行方向のポテンシャル、 $\Delta T_{i,i+1}$ は i 層と i + 1 層の薄膜平行方向のポテンシャルの差分、z はi 層の薄膜からの距離である。

3. 解析例

解析対象のコイルの諸元を Table 1 に示す。は、幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm(超電導層 1.0 μm)の REBCO 線材を用いた、内



Fig. 1. Thin-film approximation. (a) single layer (conventional), (b) multilayer.

Table 1 Specifications of model coil.		
	Model 1	Model 2
Inner radius (mm)	50.0	50.0
Outer radius (mm)	90.4	90.4
height (mm)	99.5	990.5
Bundle	-	2
Turns / Single pancake	200	100
Number of single pancakes	20	20
Transport current (A)	200	400



Fig. 2. Numerical results of cross-sectional distribution of current density in winding. (a) single layer. (b) multilayer

径 50 mm, 巻数 200 のシングルパンケーキを 20 段重ねたものである。

Fig. 2 にコイル断面の電流分布の一例を示す。Fig.2(b)より, 導体内のテープ毎に電流が流れ、さらに電流が偏っているこ とがわかる。他の条件の検討結果については,当日報告す る。

- 1. W. Goldacker et al., SUST 27 093001 (2014).
- 2. M. Takayasu et al., SUST 25 014011 (2012).
- 3. D.C. van der Laan, SUST 22 065013 (2009).
- 4. H, Ueda et al. IEEE Trans. Appl. Supecond. 23 4100805 (2013)
- 5. H, Ueda et al. *IEEE Trans. Appl. Supecond.* 23 4100805 (2016)

分散型遺伝的アルゴリズムを用いた 小型 MRI 用 HTS マグネットの基本形状の検討 Study on the fundamental shape of HTS magnet for compact MRI using a distributed genetic algorithm

<u>大澤 慶博</u>, 井上 雄太, 廣瀬 瞭, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範 (岡山大学) <u>Osawa Yoshihiro</u>, Inoue Yuta, Hirose Ryo, Inoue Ryota, Ueda Hiroshi, Kim SeokBeom (Okayama University) E-mail : kim@ec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

磁気共鳴効果を利用する MRI 装置は, 被曝の心配がない ため, 高度な診断ができる優れた医療装置である. しかし, MRI 装置の重量や電磁場漏洩の問題により, 専用の MRI 室 が必要となるため, 手軽に使用できる装置とは言えない. そこ で, 我々は, 高温超電導線材を用いた人指用小型 MRI 装置 の開発を行っている. 一方, 高温超電導線材を用いたHTSマ グネットは, 高価かつ複雑な構造で作製することが難しい. 従 って, 小型 MRI 用高温超電導マグネットの開発においては, 高温超電導線材の使用量を最小限かつシンプルなマグネット 形状に設計する必要がある. そこで, 本研究では, シンプル かつ線材使用量を抑えた構造を明確にするため, 分散型遺 伝的アルゴリズムによる最適化計算及び電磁場数値解析によ り, 小型 MRI 用 HTS マグネットの基本形状設計を行ったの で, その結果について報告する.

2. HTSマグネットの基本形状設計仕様

本検討において使用した線材は,幅4 mm,厚さ0.1 mmの REBCO線材である.Fig.1に小型MRIの概念設計を示す.概 念設計において,室温空間の内径は,人間の手や指のサイ ズと計測用コイルの挿入等を考慮して,60 mmとした.また, HTSマグネットの最小内径はHTSマグネット用の低温容器の 真空層等を考慮して,76 mmとした.なお,HTSコイル配置の 制限空間は,静磁場源全体の小型化を図るために200 mm× 200 mmと設定した.HTSマグネットは,高さ8.6 mmのダブルパ ンケーキ(DP)コイルを高さ方向に積層したシンプルな構造と した.また,発生磁場の精度は,直径20 mmと高さ10 mmの円 筒状の測定空間において磁場強度3 T,磁場均一度10 ppm 以下を目標とした.

3. 解析方法と結果

本研究の解析では、DPコイルの高さを8.6 mmに固定し、 DPコイルの幅(巻き数)および各コイルの配置を設計パラメー タとした.なお,運転温度は40 Kを想定し,運転電流は発生 磁場の形状依存性を観察するために100 Aに固定した.また, 目的関数は磁場均一度と線材使用量として, MGG(Minimum Generation Gap)世代交代モデルおよび分散型遺伝的アルゴ リズムを併用し、多様性のある最適化計算を行った.検討結 果の一例をFig.2とFig.3に示す. Fig.2のように外側空間 (Space1)と内側空間(Space2), それぞれの空間に配置される コイルの数を変更して比較を行った.ここで、Pattern Iは Space2を疎にSpace1を密に配置したモデルであり、Pattern II はSpace2を密にSpace1を疎に配置したモデルである. 最適化 計算の結果, Pattern Iでは磁場性能を満たすために必要な線 材量は1891 m, Pattern IIでは1764 mとなった. これよりPattern IIの形状の方が130 m近く線材量を抑えられる事がわかった. Pattern IIは, Pattern Iに比べて, Space2の内側コイルで約50 m, Space1の外側コイルで約80 mの削減されたことになる.ま た, Pattern IIの内側コイルの数を8個に固定し, 外側コイルの 個数をパラメータにしたときの解析結果をFig.3に示す.外側 コイルが6個の場合,コイル数が少ないため,一つあたりの巻 線数が多くなり,線材使用量が増加したと考える.一方, Fig.3 に示されたように10個以上のコイルを設置する必要は無いこ とが分かる. 従って, 本研究により, Space2に8個, Space1に8 個のDPコイルを配置することで、設定した制限空間において、 要求する磁場性能を最も効率良く発生させることができると判 明した. 今後は,提案モデルについて遮蔽電流磁場の影響 を考慮した,HTSマグネットの最適形状設計を行う.







Fig.3 Analytical results of the total wire consumption as a function of number of outside coils.

6

8

Number of outside coils

10

25T 無冷媒超伝導マグネットアップグレード計画の進捗

Progress of upgrade project of 25 T cryogen-free superconducting magnet

<u>淡路 智</u>、バデル アーノー、岡田 達典、高橋 弘紀、阿部 徹(東北大金研);

宮崎 寛史、花井 哲、井岡 茂 (東芝エネルギーシステムズ);藤田 真司、武藤 翔吾、飯島 康裕、大保 雅範 (フジクラ); 横山 大貴 (九州大);柁川 一弘 (山口東京理科大)

AWAJI Satoshi, BADEL Arnaud, OKADA Tatsunori, TAKAHASHI Kohki, ABE Toru (Tohoku Univ.); MIYAZAKI Hiroshi, HANAI Satoshi, IOKA Shigeru (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation); FUJITA Shinji, MUTO Shogo, IIJIMA

Yasuhiro, DAIBO Masanori (Fujikura Ltd.); YOKOYAMA Hiroyuki (Kyusyu Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Yamaguchi Sanyo-

Onoda City University)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE=希土類及び Y)は、その高い磁 場中臨界電流と機械特性から強磁場応用が期待されてい る。これにより世界中で強磁場超伝導マグネット開発が 実施されている。一方で、東北大金研では、Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y

(Bi2223)を用いた 25T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)の開発に成功し、2016年度より共同利用に供してい る [1]。次のステップとして、内層Bi2223コイルをREBCO コイルで置き換えることで、30Tへのアップグレード計画 を実施している[2]。REBCOは、引っ張り方向の機械的強 度が高い一方で、多層構造に起因した剥離に弱い問題や、 部分的に L の劣化が起こることが報告され、その強磁場 への適用には堅牢(ロバスト)なコイル化技術が求められ ている。本プロジェクトでは、劣化がおきにくく、部分劣 化が起きても問題なく運転可能で、最悪の状況でもコイ ルを焼損から保護できる絶縁コイルを目指し、R&Dを実 施し、最終的なロバスト REBCO コイル構造を決定した。 2. ロバスト REBCO コイル

コイルは超伝導層が内側になるように REBCO テープ 2枚を共巻きし、絶縁は 0.035 mm のフッ素コートポリイ ミッドテープを用いた。伝導冷却の冷却パスを確保する ため、コイルはエポキシ含浸するが、フッ素コートポリイ ミッドにより各ターンは機械的に分離されている。また、 パンケーキコイル上下には 0.33 mm の FRP 板をつけ、一 方にはさらに 0.3 mm の Al シートを貼り付けてある。こ れにより、コイルの剛性を保ちつつ、全ターン離型するこ とで剥離応力をほぼゼロとする[3]。また、 2枚の超伝導 テープを共巻きすることで、一枚に局所劣化が起きても、 もう一枚に分流して焼損を防ぐ構造とした。

3. R&D コイルテスト

人工ピン入り EuBCO 線材を用いてコイルを作製し、東 北大金研強磁場センターの大口径 11 T 超伝導マグネット(\$360mm 室温ボア)中で電磁力試験を行った。このと き、最大で 460 MPa の hoop 力下で安定した運転を確認 した。その後、液体窒素温度で *IV* 特性を測定した結果、 試験前後で大きな変化が見られず、460 MPa までの電磁 力で問題ないことを確認した。

また、一部劣化させた EuBCO 線材を用いて作製したダ ブルパンケーキコイル試験において、2枚バンドル巻き コイルでは、77.3 K で劣化無しコイルと同等の *IV*特性 を示すことを確認した[4]。

4. アップグレード用 REBCO インサート

表1にアップグレード用 REBCO インサートの設計を 示す。内径 68 mm、外径 274 mm の single pancake を 56 個 積層した構造であり、245 A で 16 T を 32 mm の室温空間 に発生する設計となっている。25T-CSM の外挿 14T-LTS マグネットと合わせることで、30 T の磁場発生となる。 このとき線材にかかる最大 hoop 力は、*BJR* で計算すると $TABLE \ I \\ Basic design \ specifications \ for \ RE123 \ insert \ coil \ for \ 30T\text{-}CSM$

Wire	EuBa ₂ Cu ₃ O _y with BaHfO ₃
Size of wire (mm)	w4.1 x t0.15
Thickness of Hastelloy (mm)	0.05
Thickness of Cu stabilizer (mm)	0.04 (circumference)
RT bore (mm)	32
No. of bundled tapes	2 (face-to-back)
Inner diameter (mm)	68.0
Outer diameter (mm)	274.4
Coil height (mm)	283.9
No. of turns/pancake	308
No. of pancakes	56
Operating current (A)	245
Total No. of turns	17248
B_{\max} (T)	30.1
$B_{\rm r}^{\rm max}$ (T)	5.3
Central field (T)	16.0
Self-inductance (H)	15.6
Insulator thickness (mm)	0.035
Hight of pancake coil incl. FRP (mm)	4.9
Al plate thickness (mm)	0.3
Space current density (A/mm ²)	149.7
Conductor current density (A/mm ²)	199.8
Maximum hoop stress in conductor BJR (MPa)	384
Axial compressive stress (MPa)	36.2

384 MPa となり、用いる 40 μm 厚 Cu メッキ EuBCO 線材 の応力限界である約 550 MPa よりも十分小さい。詳細な 有限要素法による計算では、最大 hoop 応力は 350 MPa と 見積もられている。仮に 500 MPa までの電磁力を許容す ると、最大 322 A の通電により最大 35.4 T の磁場発生が 可能となると試算できる。

5. まとめ

これまでの R&D によりロバスト REBCO インサートコ イルの指針を得て、25T-CSM を 30T にアップグレードす る REBCO インサートコイルの設計を行った。REBCO テ ープ2枚バンドル巻きにより、局所的な *I*。の劣化があっ ても安定に通電できることや、460MPa までの hoop 力で も劣化が起きないことを確認した。クエンチ保護や交流 損失等についても合わせて報告する。

謝辞

本研究の一部は科研費基盤研究(S) JPK18H0528 の補助 を受けて実施した。

- 1. S. Awaji et al.: Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 065001.
- 2. S. Awaji et al.: IEEE TAS, 29 (2019) 4300305.
- 3. Miyazaki et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 4600905.
- 4. 阿部徹ら、2020 年秋期低温工学・超電導学会 1A-p03.

エポキシ含浸人エピン REBCO コイルのフープ応力試験

Hoop stress tests of an epoxy-impregnated REBCO coil using APC-type REBCO tapes

藤田 真司, 武藤 翔吾, 平田 渉, 土屋 光揮, 飯島 康裕, 大保 雅載 (フジクラ);

岡田 達典, 高橋 弘紀, 淡路 智 (東北大)

<u>FUJITA Shinji</u>, MUTO Shogo, HIRATA Wataru, TSUCHIYA Koki, IIJIMA Yasuhiro, DAIBO Masanori (FUJIKURA);

OKADA Tatsunori, TAKAHASHI Kohki, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

フジクラでは独自の Hot-wall PLD 装置を用いて、人工ピン として BaHfO3を導入した EuBa₂Cu₃Oy (BHO-EuBCO)線材を 開発し、*I*。均一性に優れる長尺製品を提供している.これまで 磁場中 *I*。特性や各種機械特性の評価を行ってきたが、強磁 場マグネット応用では、短尺サンプルの評価だけでなく、強磁 場による電磁応力に対するコイルの挙動を明らかにすること が重要である.本研究では、人工ピン線材を用いてエポキシ 含浸コイルを作製し、強磁場中で大きなフープ応力を印加す る試験を実施した.

2. 実験方法

使用した線材と作製したコイルの諸元を Table 1 に示す.線 材は標準的な人工ピン線材 (FESC-SCH04) であり,ポリイミド テープの 2 重ラップ巻き絶縁を施した.ここで,内側のポリイミ ドテープは熱応力による REBCO の剥離劣化防止のため,フ ッ素コーティングをしたもの (FPI)を使用した.コイルは内直径 150 mm の 2 層のパンケーキコイルであり,エポキシ樹脂を用 いて真空加圧含浸を行った.含浸コイルの液体窒素中での *I-V*カーブにおける n 値 (0.001~0.1 µV/cm 領域) は 26 であり, 健全性を確認した.

フープ試験では液体ヘリウムを用いてコイルを 4.2 K に冷却し,東北大の大口径超伝導マグネットにより11 T のバックアップ磁場を印加してコイルに通電した.4.2 K,11 T バックアップ磁場中でのコイル L の計算値は 1251 A であった.

3. 実験結果と考察

Fig. 1 に 4.2 K, 11 T バックアップ磁場中でコイルに 250 A まで通電した際のコイル電圧およびコイル中心磁場の測定結 果を示す. 240 A で電流を Hold した際には異常は無かったが, 250 A で電流を Hold した際に下側のパンケーキコイル(Btm coil)で電圧が発生していることを確認したため,電流を落とし た. 250 A 通電時点でのフープ応力は *BJR* 計算(絶縁を除い た線材の断面積換算)でコイル全体に 600 MPa 程度であり, 最大は 608 MPa であった. この値は線材自体の不可逆応力 (600-700 MPa)に近いものである.

液体窒素中でコイルの特性を確認したところ, Btm coil が 大きく劣化していることが確認された. コイルの Btm coil 側の 表面に複数の電圧タップを取り付け,劣化部位を詳細に調査 した結果,巻線内の 130 ターン目に位置する線材間のラップ 接続部でのみ,劣化していることを確認した. 接続部以外は 劣化が無かったことから,接続部を除く巻線部は 600 MPa も のフープ応力が印加されても劣化しないことが確認できた.

ラップ接続での劣化は, 接続部が長手に引張られた際に 生じる応力集中が原因と考えられる. そこで, Fig. 2 の図中に 示す両面ラップ接続構造(Type A, B)を検討し, その引張特 性を調査した. その結果, 通常のラップ接続では, 接続してい ない線材に比べて強度が3 割ほど低下するが, Type B 構造 では接続していない線材と同程度の強度を有することが確認 できた(Fig. 2). 従って, このような接続構造を採用することで, さらに大きなフープ応力に耐え得ると考えられる. Table 1 Specifications of REBCO tape and coil.

	REBCO tape
Туре	FESC-SCH04-FPI
Tape dimensions	4.1 mm \times 0.16 mm (with insulations)
REBCO layer	BHO-EuBCO, ~2.5 μm
Hastelloy thickness	50 µm
Stabilizer	20 µm electroplated Cu
	REBCO coil
Inner diameter	150 mm
Outer diameter	192 mm
Coil height	8.7 mm
No. of turns / pancake	137
No. of pancakes	2
Tape length / pancake	75 m
$I_{\rm c}~(0.1~{\rm \mu V/cm})$ at 77 K	48.1 A
<i>n</i> -value at 77 K	26



----- Top coil V(V) - - - Btm coil V(V) ---- Coil joint V(V) ----- B_Hall (T)





Fig. 2 Tensile test results at 77 K, self-field for non-jointed tape and jointed tape (lap joint, Type A and Type B).

共巻き REBCO コイルにおける臨界電流の局所的欠陥の影響の低減: 較正された劣化線を用いた実験的検証

Mitigate the effect of local tape defects on REBCO coils using 2 tape bundle conductor : Experimental validation with calibrated defect

> <u>阿部 徹</u>, BADEL Arnaud, 岡田 達典, 淡路 智 (東北大); 藤田 真司, 土屋 光輝, 飯島 康裕, 大保 雅載 (フジクラ) <u>ABE Toru</u>, BADEL Arnaud, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); FUJITA Shinji, TSUCHIYA Koki, IIJIMA Yasuhiro, DAIBO Masanori (FUJIKURA) Email: t.abe@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE: 希土類及び Y)線材は高磁場中における臨界電流密度特性に優れており、超伝導マ グネットのさらなる高磁場化に向けた利用が試みられて いる。しかし、REBCO線材は局所的な欠陥の影響を受け やすく、コイルを構成する上で問題になっている。その改 善方法として、REBCO線の2枚共巻きによるコイル化技 術が提案されている[1]。その改善の効果の評価のため、ま ずは人工的に劣化させた短尺試料の磁場中 *I-V* 特性を調 べた。そして、2バンドル内の一方の線に局所的に劣化が ある小型ダブルパンケーキコイルの特性について調べた。

2. 実験方法

劣化線は、フジクラ製の BaHfO₃ (BHO) 添加 EuBCO 線材 (FESC-SCH04) について、室温において曲げ半径 6 mm で両側曲げ加工を行うことで作製した。Table. 1. に 線材の諸元を示す。この劣化線の短尺試料について、東北 大金研の 20 T 超伝導マグネットを用いて、0 T から 15 T の磁場Bを ab 面に平行に印加し、液体ヘリウム中 4.2 K で直流 4 端子法により I-V特性を測定した。

また、2 バンドルコイル(内径 40 mm x 外形 94 mm、 101 turns/pancake)は、下コイルの一方の線に対して同 様の曲げ加工を施したものを用い、超伝導層を内向きに重 ねて共巻きした。劣化部は下コイルの中心付近(55 ター ン)に位置する。この小型ダブルパンケーキコイルの *I-V* 特性を 77 K 以下の各温度、自己磁場下で測定した。冷却 には GM 冷凍機伝導冷却方式のクライオスタットを用い た。

3. 実験結果

Fig. 1 に 4.2 K の 0 T から 15 T の磁場中における短尺 の劣化線の *I-V*特性の測定結果を示す。1 µV/cm で決定し た劣化線の臨界電流 *I*。は、4.2 K 自己磁場中で 33 A であ り、磁場の増大に伴って減少した。*I-V*特性は線形に近い 電圧の立ち上がりが見られた。Fig. 2 はコイルの *I-V*特性 の測定結果である。77 K では正常な上コイルと劣化部の ある下コイルの *I-V*特性はほとんど変わらないが、温度の 低下に伴って両者の差が増大する傾向が見られた。これら の考察については当日議論する。

Table. 1. Pro	perty of REBC	O tape
---------------	---------------	--------

Tape width	4 mm
Tape thickness	0.11 mm
REBCO thickness	$2.5~\mu{m}$
Hastelloy [@] thickness	50 µm
Copper thickness	20 µm



Fig. 1. *I-V* characteristics of damaged REBCO short sample at 4.2 K, 0-15 T.



Fig. 2. *I-V* characteristics of double pancake coil. The top coil includes the damaged area at 55th turn in total 101 turns.

参考文献

 S. Awaji, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019), 4300305.

巻線・冷却・励磁過程を考慮した高磁場 REBCO コイルの 応力・ひずみ分布の数値解析評価

Numerical evaluation on stress and strain of high-field REBCO pancake coil

in consideration of winding, cooling and excitation processes

植田 浩史, 徳永 佳祐, 内藤 敬介, 井上 良太, 金 錫範(岡山大学) <u>UEDA Hiroshi</u>, TOKUNAGA Keisuke, NAITO Keisuke, INOUE Ryota, KIM SeokBeom (Okayama Univ.) E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導線材を用いた高磁場マグネット,具体的には,研究用高磁場コイル,核磁気共鳴(NMR),磁気共鳴イメージング(MRI),加速器(サイクロトロン,ビーム輸送系),超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)などの研究開発が世界各国で進んでいる。しかし,高温超伝導マグネットの研究開発の進展により、多くの実験が実施され、実際的な課題も明らかになってきた。REBCO線材は基板上に約1µmの超伝導層を結晶成長させた薄膜という脆弱な構造をしているため、超伝導線材端部のマイクロクラックが,高磁場・遮蔽電流による局所的な電磁力によって進展し、コイル性能劣化まで進む可能性が指摘されている[1]。そこで,今回は,REBCO コイルを対象に線材が経験する巻線時の張力、冷却時の熱応力、励磁時の遮蔽電流を考慮した電磁力[2]により、REBCO 線材が受ける応力・ひずみを数値解析によって評価した。

2. 解析モデル

解析対象のコイル(Fig. 1(a))は,幅4mm,厚さ0.1mm(超 伝導層 1.0 μm)の REBCO 線材をシングルパンケーキ巻きで 巻いた内径 50 mm のコイルを 22 個積層したもので,このコイ ルは 245 A 通電時にコイル中心磁場は 11.5 T 発生する。Fig. 1(b)に電磁界解析[3]によってコイル断面における巻線内の電 流分布を示す。遮蔽電流の影響により、コイル上部になるほ どのパンケーキコイルで電流が巻線上端に偏っていることが わかる。この遮蔽電流は,線材内の電磁力分布の著しい不均 一性を生じる。さらに, Fig. 1(b)の電流分布に基づいて応力 解析を行った。解析においては、コイルの機械的構造として、 ポリアミド被覆 REBCO 線材 非含浸 絶縁コイル, REBCO 線 材 非含浸 無絶縁コイルの解析を実施した。解析では、巻線 張力(今回はすべて1 kg)による内部応力,曲げひずみ,冷 却時の熱応力, 励磁時の電磁力を考慮した。 すべての巻線 のターン間の接触は, Fig. 2 のようなギャップ要素としてモデ ル化し,一体接触(接触面間が一体として挙動する),(b)開 口接触(接触部が離れて,自由境界になる),(c) 滑り接触 (接触面平行方向に滑る)の3つの接触状況を考慮した。

3. 解析結果

Fig. 3 に周方向(フープ)ひずみのコイル内分布と積層コイルの一番上のコイルのフープ応力の解析結果を示す。非含浸無絶縁コイルは、フープ応力が100 MPa 程度に対して、絶縁被覆 REBCO線材非含浸コイルは160 MPa まで発生し、線材上端と下端で応力が遮蔽電流の影響で100 MPa 程度の差がある。このように、遮蔽電流により、想定以上の局所的な応力がかかる。絶縁コイルは、線材を包んでいるポリアミド被覆(30μm)が冷却の際に縮む影響で、接着していないので隙間ができて REBCO線材が変形するためだと考えられる。

他の条件の検討結果については,当日報告する。

- 1. S. Hahn et al. Nature 570 496-499 (2019).
- 2. 2018 年秋季低温工学·超電導学会講演概要集 3C-a09 (2018)
- 3. H, Ueda et al. IEEE Trans. Appl. Supecond. 23 4100805 (2013)



Fig.1 Numerical model. (a) Cross-sectional view and (b) Current distribution.



Fig. 2 Gap element for contact problem. (a) Integral contact, (b) Opening contact, (c) Sliding contact.









高磁場 REBCO 無絶縁コイルの電磁・熱応力解析による補強構造評価 Numerical Evaluation on Reinforcement against Thermal and Electromagnetic stress in High Field No-Insulation REBCO coil

<u>徳永</u>佳祐, 内藤 敬介, 井上 良太, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大) <u>TOKUNAGA Keisuke</u>, NAITO Keisuke, INOUE Ryota, KIM SeokBeom, UEDA Hiroshi (Okayama University) E-mail: pklj7a6r@s.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年,高磁場 REBCO コイルは NMR や加速器への応用 が著しく進んでいる. REBCO コイルは,高い熱的安定性や高 電流密度化の観点から無絶縁 (NI)コイルでの運用が進めら れている[1]. その一方で、REBCO コイルの機械的劣化や破 損,また NI コイル特有の電磁的課題が挙げられている. REBCO コイルは,巻線過程や冷却時,励磁減磁に際して, 様々なひずみと応力を経験する. 加えて,遮蔽電流により生 じる不均一な電磁応力も経験する. さらに, NI コイルでは,励 磁や減磁の際,電流が径方向に対しても流れるため,絶縁コ イルとは異なる電磁力分布となる[2]。

本発表では、冷却時の熱応力解析、そして遮蔽電流を加 味した電磁応力解析を従来の絶縁コイルとNIコイルを対象に 行った.また、NI コイルでは、径方向へ流れる電流の影響を 考慮し、その電磁応力解析を行った.当日は電磁応力解析 の結果として、1)一様な電流が分布する場合、2)遮蔽電流に よる影響を加味した電流分布の場合、3)遮蔽電流と径方向へ のバイパスする電流を加味した電流分布の場合のそれぞれ の場合について報告する.

2. 解析モデル及び条件

本解析で用いたコイルを Fig. 1 に示す. 4 mm 幅の REBCO 線材(超電導層:1 µm, Hastelloy:50 µm, copper:20 µm)を240ターンしたシングルパンケーキ(SP)コイルを40個積 層している.また,補強構造として、SUS により構成される YOROI 構造を適用している.通電電流 200 A,運転温度 10 Kにおいて、中心磁場 10 T が発生し、20 T の一様な外部磁 場を与えている. 遮蔽電流や超電導特性を考慮した三次元 電磁場数値解析を用いて、遮蔽電流分布および電磁力を算 出し、その結果を、静的な荷重として構造解析を行った.構造 解析では、コイル巻線部は複合則に基づく一様な弾性体とみ なし[4]、冷却(300 K から 10 K)による時間変化は考慮せずコ イル内に温度勾配が存在しない定常状態を仮定している.10 N の巻線張力により生じる巻線内応力分布を初期値として与 えた[3].また、コイル巻線と補強構造間には接触条件を適用 しており、摩擦は考慮していない.

3. 解析結果

Fig. 2 にコイル上部における冷却過程と励磁過程に生じる 周方向応力及び周方向ひずみの解析結果を示す.なお,(a) は遮蔽電流による影響を考慮しない場合,(b)は遮蔽電流に よる影響を加味した場合における解析結果をそれぞれ示して いる.また,Fig. 3 に上端から6番目のSPコイル上の評価線 (巻線上部と下部から0.2 mm)における周方向応力を示す.2 つの図から遮蔽電流の有無で応力分布が大きく異なることが 確認できる.遮蔽電流の影響が含まれないFig. 2(a)では,巻 線内に局所的に大きな応力は生じず,Fig. 3の青線のように 巻線上部と下部における応力分布が不均一にならないことが 確認できる.一方で,遮蔽電流の影響で不均一な電磁力が 生じるFig. 2(b)では,軸方向圧縮力により,コイルが大きく変 形している.この変形に伴い,プレートによって押しつぶされ るコイル巻線内側上部には600 MPaもの応力が生じる.また, Fig. 3 の赤線のように巻線内で応力分布が著しく不均一性を 持つことがわかる.

NI コイルにおける径方向へバイパスする電流を考慮した 電磁応力分布については当日報告する.











Fig. 3 Numerical results of the circumferential stress on the evaluation lines in 6th SP coil (a) without and (b) with the effect of screening current.

- 1. S. Hahn et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 3, 1592-1595 (2011).
- 2. S. Noguchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 29, 4602607 (2019).
- 3. V. Arp, AIP Journal of Appl. Physics, 48, no. 5, 1977.
- X. Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 26, 4600804 (2016).

低粘度熱硬化樹脂 TELENE1800 の極低温熱収縮率

Thermal shrinkage of low viscosity thermosetting resin, TELENE1800 at cryogenic temperature

水野 克俊, (鉄道総研); 竹内 正基, (RIMTEC) <u>MIZUNO Katsutoshi</u>, (RTRI); TAKEUCHI Masaki, (RIMTEC) E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、浮上式鉄道応用を目指した REBCO 磁石 の開発を行っている。700 kA を超える起磁力のため、レースト ラックコイル直線部には 200 kN を超える電磁力が働く。Fig. 1 に示すように、実機大 REBCO コイルは 8 個のパンケーキコイ ルから構成されるが、そのままでは電磁力に耐えることができ ないので、アルミニウム合金製のコイルケースに収められてい る。車載超電導磁石は振動環境で運用されるため、パンケー キコイルとコイルケースが一体化されていなければ摩擦熱が 発生してしまう。そのため、パンケーキコイルとコイルケース間 の空隙を樹脂で充填する必要がある。エポキシ樹脂では粘性 が高く空隙に浸透させるのが困難であることに加え、上記の 用途では REBCO 線材とエポキシ樹脂が接触する可能性もあ り、はく離のリスクも否定できない。そこで、エポキシに代わる 充填用樹脂として低粘度熱硬化性樹脂 TELENE1800 (RIMTEC 製)を用いることとした。

2. TELENE1800 について

TELENE®はナフサC5留分のジシクロペンタジエンを用いた熱硬化性樹脂である。該樹脂は一般に大型車体用バンパーやボディパネルなど耐衝撃と大型一体成形が要求される分野に重用されるが、TELENE1800 は低粘度で包埋用途に特化しており過去には浮上式鉄道の地上コイルモールド樹脂としても検討された[1]。硬化前のTELENE1800 はエポキシ樹脂と比較しても極めて低粘度(室温で10 mPa・s 以下)であるため充填性に優れている。TELENE1800 を充填した実機大REBCO コイルは、設計通りの固有モードを示し、加振試験においても発熱は許容範囲に収まっていることが確認された[2]。コイル充填の検証を行う中で、TELENE1800 は熱応力によるクラックが発生しにくいことが確認され、他の低温応用も期待できるので詳細な特性を評価することとした。

3. 三点曲げ試験

TELENE1800 と比較のためのエポキシ樹脂の供試体を製作し、JIS K7171 に基づく曲げ試験を液体窒素中で実施した[3]。Fig. 2 に応力-ひずみ曲線を示す。最大強度はいずれも200 MPa 程度であるものの、その挙動は大きく異なる。エポキシ樹脂は降伏することなく破断しているが、TELENE1800 は塑性変形しており、試験装置の最大変位 15 mm を与えても破断に至ったのは4 供試体中1 個だけであった。

4. 熱膨張測定

熱膨張測定は伝導冷却で行い、測定には極低温用ひず みゲージを用いた。計測の信頼性確認のため、一部の供試 体ではFBG(Fiber Bragg Grating)センサも併用して熱膨張を 計測した。フィラーなし(Neat)のTELENE1800に加えて、フィラ ー或いは繊維強化した供試体の熱膨張、および比較のため のエポキシ樹脂の文献値[4]も併せてFig. 3 に示す。77 Kで 比較すると、フィラーなしは 1.4 %程度とエポキシ樹脂よりも熱 収縮が大きかった。ガラス繊維で強化した供試体やアルミナ フィラーを配合した供試体では、0.2~0.3 %と銅やステンレス に近い熱収縮となっており、繊維やフィラーの物性と配合比 からも妥当な結果であると考えられる。



Fig. 1 Structure of the real-scale REBCO coil



Fig. 2 Stress-strain curves of epoxy resin and TELENE1800 measured by three-point bend test [2]



Fig. 3 Thermal expansion of epoxy resin and TELENE1800

- M. Suzuki and T. Fujimoto: J-RAIL'01, (2001) pp. 169–170
- K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p. 1
- M. Takeuchi, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p. 64
- 4. G. Hartwig: Cryogenics, Vol. 28, No. 4 (1998) pp. 216-219

伝導冷却された CORC®導体の劣化しないクエンチ検出・保護条件の実験的研究

Experimental study on protectable conditions of conduction-cooled CORC[®] wire against quench initiated by transient and local thermal disturbance

羅 熙捷, 趙 一帆, 雨宮 尚之(京大); Xiaorong Wang, Tengming Shen(LBNL); 荻津 透(KEK); Jeremy Weiss,

Danko C van der Laan (Advanced Conductor Technologies LLC)

LUO Xijie, ZHAO Yifan, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); Xiaorong Wang, Tengming Shen (LBNL); OGITSU Toru (KEK);

Jeremy Weiss, Danko C van der Laan (Advanced Conductor Technologies LLC)

E-mail: x-luo@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

CORC®導体は薄膜線材を金属コアにスパイラル状巻いた 一種の高温超伝導ケーブルである。このような構造のケーブ ルにおいてクエンチが発生した場合、電流が金属コアに分流 し、金属コアが安定化材として働くことが期待されている。 我々は、伝導冷却された CORC®導体に局所的な常伝導部を 発生させ、導体全体の電圧を観測しこれがある閾値を超えた ら(クエンチ検出)、一定時間遅らせて(待って)から(検出時 間と遮断器動作時間を模擬)、電源を制御することにより電流 を指数関数的に減衰(外部抵抗によるエネルギー回収を模 擬)させることによりマグネットのクエンチを模擬する実験を行 った。

2. 試料導体と実験手順

Table 1 に諸元を示す CORC[®]導体で実験を行った。使用 した CORC[®]導体は幅 2 mm、銅安定化層 5 μ m × 2 の薄膜線 材 2 本を直径 2.56 mm の銅コアに巻いたものである。温度 45 K、外部磁場 1.1 T で測定した臨界電流値が約 470 A であ った。

試料導体の概念図を Fig. 1 に示す。試料導体長手方向の 電圧が Fig. 1 に示した合計 14 区間で測定した。実験の手順 は以下の通りである。

- 1. 試料導体に所定の磁界を印加する。
- 2. 試料導体の温度を所定の値に制御し、臨界電流を測定 する。
- 3. 所定の電流を流し、温度を所定の値に制御する。
- 4. 試料導体中心にあるヒータにより常伝導部を発生させる。
- 5. 試料導体全体の電圧(全電圧)が所定の値(検出電圧)になったら(マグネットのクエンチ検出を模擬)、所定の遅延時間待って(遮断器動作までの遅れなどを模擬)、試料電流をあらかじめ設定した時定数で指数関数減衰させる(外部抵抗によるエネルギー吸収時の電流減衰を模擬)。
- 6. 試料導体の劣化の有無を調べるため、臨界電流を測定 する。

3. 実験結果

一例として、磁界1.1T、初期定常温度45K、電流450A、 検出電圧100mV、遅延時間0.1s、時定数1s場合の、クエン チ・電流減衰過程の電流、銅コア全電圧、テープ1全電圧、ヒ ータ付近の電圧(区間1)、ヒータ付近以外のテープ1電圧(テ ープ1全電圧引く区間1電圧)の時間変化をFig.2に示す。 クエンチを開始してから約6s間、テープ1上電圧はヒータ付 近(1)しか出現しなかった。約6s付近、ヒータ付近電圧が低 下し、ヒータ付近以外のテープ1電圧(Tape1-1)が上昇し始 めた。このような電圧低下現象は銅コアへの分流、または銅コ アによる冷却効果の影響と考えられる。

薄膜線材単線(有効長さ180 mm、幅4 mm、銅安定化層 20 μ m × 2)を用いて通電電流150 A で行った先行研究の実 験結果[1]と比べると、CORC[®]導体に使われる線材の銅安定 化層厚さがより薄く(5 μ m × 2)、通電電流(450 A)がより高か ったが、検出電圧100 mV に到達する時間(約11 s)は薄膜線 材単線の場合(約0.6 s)より長いことがわかった。

謝辞

本研究は一部 JST 未来社会創造事業グラント番号 JPMJMI19E1 の支援、一部科研費国際 B(18KK0087)の支援、一部日米科学技術協力事業(高エネルギー物理分野)の 支援によって行われた。

Table 1. Sample information		
Tape width	4 mm	
Plated-copper thickness	5 mm	
Thickness of Hastelloy substrate	30 mm	
Former	C101 copper	
	(OD = 2.56 mm)	
Final diameter	2.7 mm	
Layer	1	
Tape	2	
Total length	$\sim 700 \text{ mm}$	
Length between terminals	~ 515 mm	
Critical current	~ 330 A (45 K, 2 T)	
(Temperature, magnetic field)	~ 370 A (45 K, 1.7 T)	
	~ 420 A (45 K, 1.4 T)	
	~ 470 A (45 K, 1.1 T)	







Fig. 2 Typical experimental result

参考文献

 X. Luo, S. Inoue, N. Amemiya, "Experimental study on quench detection and protection conditions of copper-stabilized coated conductors using short samples," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 8, Dec. 2019, Art. no. 4703511.

REBCO コイル製作の観点に基づいた線材はく離再現試験

Reproduction test of the delamination of REBCO coated conductors from the viewpoint of coil fabrication

<u>水野 克俊</u>(鉄道総研) <u>MIZUNO Katsutoshi</u> (RTRI) E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

REBCO コイルの製作においては、線材はく離[1]の対策 が不可欠であり、すでに多数のはく離を回避できるコイル製 作手法が提案されている。鉄道総研では熱可塑性樹脂を用 いたコイル製作手法[2]で安定したコイル製作を実現している。 同手法ではコイル端面のみを銅板などの冷却部材に接着し ており、ターン間の向かい合う線材面は非接着な構造となっ ている。

しかしながら、コイル製作に用いた線材の種類は限られて おり、線材幅や銅保護層の構造など仕様が異なる場合でも 有効な手法であるかは不明である。これまでに実績のない線 材をコイル製作に用いる際には、小型の検証用コイルを多数 製作し通電評価するのが最も確実な検証方法であると考えら れる。しかしながら、検証用コイル製作のための線材コストや 手間は軽視できず、今日では多数のメーカーから線材が販 売されており選択肢が豊富であることも考慮すれば、簡易な 試験で線材とコイル製作手法の適合性を確認できることが望 ましい。そこで、コイルのターン間を再現した供試体によるは く離再現試験を考案した。供試体を引き剥がしていく過程で 線材がはく離しなければ、コイルに大きな熱応力が発生して もターン間の樹脂が破壊されるだけでコイル自体は劣化しな いと予想される。

2. はく離試験方法

はく離試験として、T形はく離試験(JISK6854-3:1998を参 考)とたがね試験(JISZ3114:2013を参考)の2種類を検証した。 T形はく離試験では、Fig.1に示すようにL字に折り曲げた線 材対を樹脂で接着し、接着面に対して直行方向に荷重を与 える。たがね試験では供試体を固定し、接着面にたがねを挿 入していくことで供試体を引き剥がしていく。なお、いずれの 供試体も線材と樹脂だけで構成されており、ジグ等に線材を 固着させることはしていない。線材対の接着方法はコイルの ターン間を再現したものとなっており、エポキシ含浸コイルを 想定した供試体ならば、エポキシ樹脂で隙間なく張り合わせ ている。熱可塑性樹脂を用いたコイル製作手法を想定した供 試体では、向かい合う線材面は非接着で端面だけが接着さ れた構造となっている。(Fig. 2)。

供試体の製作には、4 mm 幅線材(銅メッキ厚 20 μ m、基 板厚み 50 μ m)を用いた。Fig. 3 にエポキシ接着供試体の T 形はく離試験後の線材写真を示す。銅保護層は裂けることな く残存しているものの、縦方向に多数のふくらみが確認できる (Fig. 3)。この様な銅保護層の膨らみによる線材の劣化は既 に報告されており[3]、本供試体においても劣化している可能 性は高い。T 形はく離試験、たがね試験それぞれ 10 回行っ たものの、すべての供試体で同様の銅層の膨らみが確認さ れた。その一方で、熱可塑性樹脂で線材端部を接着した供 試体では、銅保護層の裂傷や膨らみは全く確認されなかった (Fig. 4)。同線材を用いたコイル製作[2]では、エポキシ含浸し た際は劣化し、熱可塑性樹脂を用いた手法ならば劣化が回 避できており、本はく離試験との整合性が取れている。

異なる仕様の線材に対してもこれらのはく離試験を実施す るとともに、試験後の線材に対して通電試験も行っており、詳 細は当日発表する。



Fig. 2 Schematic drawing of the cross-sectional views of test specimens. (a) Bonded with epoxy resin. (b) Bonded with thermoplastic resin.



Fig. 3 REBCO CC after the T-peel test. This test specimen was bonded with epoxy resin.



Fig. 4 REBCO CC after the chisel test. This test specimen was bonded with thermoplastic resin.

- T. Takematsu, et al.: Physica C, Vol. 470 (2011) pp.674–677
- 2. K. Mizuno, et al.: Physica C, Vol. 518 (2015) pp.101–105
- H. Shin and A. Gorospe: Supercond. Sci. technol. Vol. 27 (2014) 025001

共巻き低温超伝導線材による REBCO パンケーキコイルのクエンチ検出の実証

Demonstration of Quench Detection for REBCO Pancake Coil Using Co-wound Low Tempera-

ture Superconducting Wires

<u>泊瀬川</u>晋, 伊藤 悟(東北大); 西島 元 (NIMS); 橋爪 秀利(東北大) <u>HASEGAWA Shin</u>, ITO Satoshi (Tohoku Univ.); NISHIJIMA Gen (NIMS); HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.) E-mail: shase@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、希土類系銅酸化物超伝導(REBCO) コイルの クエンチ検出手法として、低温超伝導線材をクエンチ検出 器として使用することを提案している[1]。これまでに、4.2 K、自己磁場下にて、Nb-Ti線材を REBCO コイル表面に 設置した体系でのクエンチ検出を実証した。一方、REBCO コイル内部全体からクエンチを検出するには、検出器を REBCO コイルと共巻きする必要がある。この時、コイル 空間電流密度の減少を避けるべく、検出器をターン間絶縁 体内に収めることが望ましい。そこで本研究では、ターン 間絶縁された REBCO パンケーキコイルを作製し、絶縁層 内に Nb-Ti線材をクエンチ検出器として共巻きした体系 での早期クエンチ検出の実証を試みた。

2. 実験方法

本実験では, SuperPower 製の REBCO 線材(SC4050)を用 いてターン数 20 の REBCO シングルパンケーキコイルを作製 し、クエンチ検出の対象とした。REBCO コイルの諸元を Table 1 に示す。ターン間絶縁には市販のポリイミドテープ(厚さ 0.135 mm)を使用した。また, 直径 0.1 mm の Supercon 製 Nb-Ti/Cu線材(54S43), Nb-Ti/Cu-Ni線材(SW-18)をクエンチ検出 器(以下 QD)として, REBCO 線材, 絶縁テープと共巻きをした。 Table 2 に QD の諸元を示す。 REBCO 線材中のホットスポット 発生を模擬するため,線材中の長さ3mmの領域に荷重を与 え, 局所的に臨界電流(Ic)を0Aとした。QDには, バイアス電 流(検査電流, Im)を流した。Im は,「断熱環境下で 0.1 V 検出 (本実験のクエンチ検出閾値)から1秒後に QD 内温度が 150 K[2]以下となる」ように、事前に数値計算で求めた値とした。 Nb-Ti/Cu QD, Nb-Ti/Cu-Ni QD の Im はそれぞれ 1.4 A, 0.3 A であり, Im の 4.2 K, 自己磁場下での臨界電流(Ic)に対する負 荷率は~0.15, ~0.03 である。REBCO 線材への印可電流(Iop) は0Aから1A/sで増加させた。また,サンプルはクライオスタ ット内で LHe(4.2 K)により浸漬冷却した。

3. 結果·考察

Fig. 1 に 4.2 K, 自己磁場下における REBCO コイル中の 電圧(V_{RE}), QD 中の電圧(V_{OD}), I_{OP} の時間変化を示す。Nb-Ti/Cu QD では(Fig.1 (a)), Iop = 118 A の時に VQD がバックグラ ウンド電圧(VBG, <2.0×10-3V)を超えた。しかし VQD は 10-3 V スケールを維持したため, REBCO 線材焼損を防ぐために Iop を遮断した。一方, Nb-Ti/Cu-Ni QD では, Iop = 111 A の時に V_{BG}以上の V_{QD} が発生し、その直後に 0.1 V に到達した。Nb-Ti/Cu-Ni QD の方が Im 負荷率が小さにも関わらず VBG 以上の Vop が生じた時刻が近いのは, Nb-Ti/Cu-Ni QD の熱拡散率 が小さく, REBCO コイル内ホットスポットから入熱による, QD 内の局所温度上昇が促進されたためと考えられる。また,電 圧上昇の挙動の違いは,常伝導抵抗の差による電圧降下の 大きさの差によるものと考えられる。以上より, 共巻き Nb-Ti/Cu-Ni QD による,自己磁場下での早期クエンチ検出の可 能性が示された。Nb-TiQDは9T以下の磁場環境(励磁中含 む)での使用を想定している。Imとして今回設定した0.3Aを仮 定すれば、Nb-Ti/Cu-Ni QD の 9 T での Im 負荷率は~0.6 (>> ~0.03)となるため、9T以下の磁場環境での早期クエンチ検出 も期待される。

4. まとめ

本研究では、4.2 K,自己磁場下での、共巻き Nb-Ti QD を用いた REBCO パンケーキコイルの早期クエンチを実証した。発表会当日は、外部磁場下での結果も報告する。

謝辞

本実験は,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て実施されました。

- [1] S. Hasegawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29
- (2019) 9001305
 [2] R. Heller, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26 (2016) 4201105

Table 1 Specifications of the REBCO single pancake coil					
Items		Values			
Conductor width/thickness		4.0 mm/0.095 mm			
Conductor <i>I</i> _c at 77 K, s.f.		126 A			
Insulator thickness		0.135 mm			
Inner diameter/ Outer diameter		20 mm/ 24.7 mm			
Total turns		20			
Coil inductance		~13.2 mH			
Table 2 Specifications of the QDs					
	Nb-Ti/Cu QD	Nb-Ti/Cu-Ni QD			
Diameter (bare/insulated)	0.07 mm/ 0.102 mm				
Ic at 4.2 K, s.f	9.3 A	10.9 A			
Ratio					



通電法および磁化法より求めた REBCO 線材の Ic 値比較 Comparative study of critical currents determined by transport current and magnetization measurement

<u>土屋清澄</u>, 王 旭東 (KEK); 町 敬人 (産総研);藤田真司 (フジクラ); 一瀬 中 (電中研); 菊池章弘 (NIMS) <u>TSUCHIYA Kiyosumi</u>, WANG Xudong (KEK); MACHI Takato (AIST); FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); KIKUCHI Akihiro (NIMS) E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

REBCO線材は、低温・高磁場から高温・低磁場まで幅 広い応用が考えられ、種々の分野で開発が推進されてい る。この開発のためには、幅広い温度範囲、磁場領域での REBCO線材の臨界電流特性を明らかにする事が望まれ るが、4.2 K, 77 K 以外の温度での full size線材の測定は 容易ではない。そこで、我々は広い温度範囲での磁化測定 を行い、その磁化の値を一点での実測 I_c 値(本研究では 4.2K, 5T の I_c 値)にスケールする方法により各種温度 における I_c 値の推定を試みた。本発表では、この磁化か ら推定した I_c 値と通電法 I_c 値の比較結果について報告 する。

2. 磁化測定と磁化からの l。値推定

Quantum Design 社の Magnetic Property Measurement System (MPMS) を使用して、 $4.2 \sim 77$ K、 $0 \sim 7$ Tの範囲 でフジクラ製 REBCO 線材の磁化測定を行なった。サン プルサイズは4x5mm (コーナー部は切断) で、垂直磁 場をB=0から B_{mas}, B_{max}から-B_{max}, -B_{max}から 0.5 T と変化 させて磁化を測定し、ヒステリシス曲線を得た。その一例 を Fig. 1 に示す。この図で、ある磁場におけるヒステリ シスの幅 Δ m(B)は臨界電流 I_cに比例する。この比例係数を 求めるには、Bean モデルを仮定し、サンプル形状を考慮 した遮蔽電流の計算が必要で、本測定で用いたサンプル 形状での計算は容易ではない。そこで、ここでは仮定の入 らない実験的手法、4.2 K, 5 T における Δ m を 4-mm 幅線 材の実測 I_c値(@ 4.2 K,5 T,E=1 μ V/cm)でスケールする ことで I_c値の推定を行なった。Fig. 2 に推定した I_c(B,T) 値と実測 I_c値(@ 4.2 K, 77 K)を示す。



Fig. 1. Magnetization loops of Fujikura FESC2 sample at various temperatures.

3. l。値(通電)とl。値(磁化)の比較

磁化の値から推定した I_c 値(I_c - Δm)と通電法で得た I_c 値 (I_c -tra)の詳細な比較を行うには、広い温度範囲での通電法 I_c 値が必要となる。然し乍ら、4 mm 幅線材でこのデータ を得るのはほとんど不可能である。幸い Microbridge サン プルを用いて(株)フジクラで測定された $I_c(B,T)$ データ が入手できたので、それとの比較を行なった。比較に先立 ち、フジクラのデータと 4-mm 幅サンプルの I_c 値の比較 を行い、両者に大きな差がないことを確認した。 I_c -tra と



Fig. 2. I_c -values of 4-mm wide FESC2 samples determined from rescaled Δm and measured I_c -values.

I_e-Am の比較はそれぞれ 4.2 K, 5 T の値で normalize して 行なった。Fig. 3 にその結果を示す。図に見られるように、 両者は低温部で非常に良く一致している。又、高温部では 磁場の上昇と共に両者の差は広がる傾向を示している。 この原因としては、両者で測定している電界領域が違う こと、高温、磁場下で n 値が非常に小さくなることなど が挙げられる。磁化から推定する I_e 値と通電法の I_e 値の 差は、30K 以下では 20~30 %、30~50K の範囲でも 50 % 以下であること、磁化から推定した I_e 値は通電法 I_e 値よ り小さめであることも分かる。



Fig. 3. Comparison of normalized Ic(B,T) and normalized Δm .

4. まとめ

磁化から推定したI。値と通電法I。値を比較した。低温域で は両者は良く一致することから、通電法の測定が困難な 場合には磁化から推定する手法も有効な方法であるがこ とが分かった。磁化から得たI。値と通常の通電法で得たI。 値の違いは4.2~30 Kの温度域では20~30%、30~50K の範囲でも最大50%程度であった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(19H01911)の助成により実施したものである。

市販 REBCO-APC 線材の臨界電流特性 Critical current characterization of commercial REBCO conductors with artificial pinning centers

<u>土屋 清澄</u>, 王 旭東, 寺島 昭男(KEK); 藤田 真司(フジクラ); 一瀬 中(電中研); 山田喬平(上智大); 菊池章弘 (NIMS) <u>TSUCHIYA Kiyosumi</u>, WANG Xudong, TERASHIMA Akio (KEK); FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.);

ICHINOSE Ataru (CRIEPI); YAMADA Kyohei (Sophia Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

REBCO線材は高温高磁場領域で優れた臨界電流特性 を有することから、様々な超伝導機器への応用が期待さ れている。然し乍ら、その4.2K、高磁場磁石への応用を 考えると、さらなる特性の向上が望まれる。磁場中特性の 向上を目指した多くの基礎的研究と線材メーカーの努力 により、近年、人工ピン入りの市販 REBCO線材が出現し 始めてきた。 我々は高磁場磁石設計の立場から REBCO 線材の現状把握および基礎的データの収集を目的として、 数社から人工ピン入り線材を入手し、その臨界電流特性 の測定、比較を行ったのでその概略について報告する。

2. 臨界電流測定

SuperPower, Fujikura, Shanghai SC, SuperOx4社の REBCO-APC 線材の I。測定を行った。測定した線材の諸 元をTable 1 に示す。用いたサンプルホールダーは、NIMS 強磁場ステーションの 18 T ソレノイド (口径 52mm) の 中で、4mm幅線材のL測定が可能なもので、サンプルに 流せる最大電流は1100 A である[1]。その外観を Fig. 1 に示す。測定温度は、4.2 K(液体ヘリウム中)である。サン プルの長さは~180 mm で、電圧タップは Ic 測定用(タ ップ間距離:25 mm) 、ホールダーR 部の電圧モニター用 (タップ間距離:15 mm) 2つとサンプルのクエンチ保護 用の4つである。線材と電極の接続には Sn-Bi はんだを 用い、その接続長は18mmである。また、線材はハステ ロイ基板が外側になるように取り付けた。サンプルをホ ールダーに取り付けた後、まず、液体窒素中、自己磁場下 での測定を行った。 その後、18T ソレノイド内に挿入して 垂直磁場下での I。測定を行った。臨界電流値は I。測定用 タップ電圧の電界値が1 μV/cm となる時の電流値とし、 n 値は 0.1-1 µV/cm の範囲で求めた。

Table 1	Technical	characteristics	of REBCO	-APC samples

Conductor	Hastelloy	Cu stab	Size (mm)	入手時
	(µm)	(µm)	(w x t)	期(年月)
SuperPower	30	5 x 2	4.0 imes 0.05	2016/9
SCS4030-AP				2020/7
Fujikura FESC-2	50	20 x 2	4.0 x 0.11	2019/5
Fujikura FESC-5	50	7 x 2	4.0 x 0.08	2020/6
Shanghai SC	30	10 x 2	4.0×0.06	2019/1
SuperOx-AP-N2	40	6 x 2	4.0 x 0.06	2020/3
SuperOx-AP-N3	60	17 x 2	4.1×0.11	2020/3

3. 測定結果

Fig. 2 に測定したサンプルの 4.2 K、垂直磁場下におけ る I_c-B 特性を示す。これらのサンプルの I_c値は 4.2 K, 15 T において 350~850 A であり、ピン導入が無い線材の 100~250 A を大きく上回っている[1]。また、I_c値の磁場 依存性を見ると、SuperPower-AP 線のものは他とは少し 異なる。この原因が製法やピンの種類の違いによるもの かどうか現時点では明らかではないが、SuperPower-AP 線の I_c値は I_c(B)~ $B^{-\alpha}$ で、その他の線材は I_c(B)~1/(B+a)



Table 2. Ic $(1\mu V/cm)$ and n-values at 77 K and self-field condition measured by the sample holder.

	Ic (A)	n- value
SuperPower-AP30	150	29
Fujikura FESC-2	148	32
Fujikura FESC-5	247	30
Shanghai SC	163	29
SuperOx-AP-N2	180	34
SuperOx-AP-N3	184	30

Fig. 1. Sample holder



Fig. 2 Critical current of REBCO-APC conductors at 4.2 K in $B \perp$.

で良くフィットできる。n 値は、どの線材においても磁場 依存性は見られず、その値は 40~60 にあった。これらの 値はピンが導入されていない線材とほぼ同じであった。

4. まとめ

4 mm幅の市販REBCO-APC線の4.2 K、垂直磁場下に おける臨界電流測定を行った。従来の線材より磁場中のI。 値が大きく、測定時に働く電磁力も3倍程度となった。こ のため線材の動きも多く見られたが、 0.2μ V/cmレベルで のI。値を求めることも可能であった。測定したREBCO-APC線材の77 K, self field のI。値は、先に測定したピン なし線材のI。値[1]より低い傾向にあるが、4.2 Kにおける I。(B)特性は3倍以上向上していることが分かった。

謝辞

測定サンプルを提供して頂いた線材メーカーの方々に 御礼申し上げます。又、サンプルホールダーを製作して頂 いたKEK 機械工学センター、I。測定でご協力頂いたNIMS 強磁場ステーションの皆様に感謝いたします。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., Cryogenics 85 (2017) 1.

パルス強磁場中での市販 REBCO 線材における臨界電流測定 Critical Current Measurement of Commercial REBCO Coated Conductors under Pulsed High Magnetic Field

<u>土屋 雄司</u>(名大); 木田 孝則(阪大); 鳴海 康雄(阪大); 萩原 政幸(阪大); 金道 浩一(東大); 吉田 隆(名大) <u>TSUCHIYA Yuji</u> (Nagoya Univ.); KIDA Takanori; NARUMI Yasuo; HAGIWARA Masayuki (Osaka Univ.); KINDO Koichi (Univ. of Tokyo); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.) E-mail: tsuchiya@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

NMR などのマグネット応用では、高精度で長時間安定 した定常強磁場が求められる。これまで定常磁場の最高値 は、常伝導マグネットと超伝導マグネットを組み合わせた ハイブリッドマグネットによって実現されてきた。最近で は、最内層に高温超伝導 REBCO コイルを使用した 45 T 級の定常マグネットが超伝導のみで実現されている[1]。 今後、強磁場超伝導マグネットの更なる強磁場設計に向け て、高温超伝導線材の評価方法において、50 T 級の強磁場 中での J。測定手法の開発が求められている。

これまで、強磁場中の輸送測定による J。評価方法については複数報告がある[2-4]。しかし、昨今の市販線材はJ。 が高く、パルス磁場中での限られた空間での大電流輸送測 定は困難であるため、我々は磁化法による J。測定に着目 した。パルス磁場中の磁化は、超伝導体における臨界電流、 保護層における遮蔽電流のそれぞれによる磁化について 検討する必要があると考えた。

以上の背景から、本研究では 50 T のパルス磁場中での 磁化測定により、市販 REBCO テープ線材における J。測定 手法の開発を行った。

2. 実験方法

市販のフジクラ社、SuperPower 社製の人工ピンニング センターを添加した REBCO 線材(型番は FESC-SCH04、 SF4050-AP)を直径約 2 mm の円形に加工し、最大 20 個の 線材を重ね合わせた。パルス強磁場中の磁化測定は、大阪 大学先端強磁場科学研究センター (AHMF) にて、パルス 幅 35 ms の非破壊型ミッドパルスマグネットを使用して 行った。図 1(a)の内挿図に示すように、最大 50T のパルス 磁場中、温度 4.2-77 K にて磁化を測定した。保護層による 磁化を評価するため、100 K においても磁場測定を行った。 J_c の算出は、臨界状態モデルを用いて磁化のヒステリシス から行った。

3. 実験結果及び考察

図1(a)と(b)に、それぞれ任意単位での磁化及び J_cの磁場 依存性を示す。図1(a)のように、2 T 以上の磁場中で磁化 のヒステリシスはメジャーループを示した。パルス磁場の 最大値が小さいほど磁化は大きくなった。これは、励磁速 度の違いによる電界の変化に起因すると考えられる。図 1(b)のように、算出した J_cは 2T で最大値を示した。これ は、図1(b)に矢印で示すように、同じ励磁速度かつ磁化ヒ ステリシスのメジャーループ上の測定は、2-40T の範囲で あり、この範囲で正確な J_c が測定されていると考えられ る。40 K 以下の低温では、上記磁場範囲にて、J_c の磁場依 存性は、磁場の-1 乗に比例していた。測定時の電界につい て考えると、励磁速度が 5 kT/s であるため、算出される電 界は 1 V/m オーダーであり、典型的な輸送測定の電界の 10,000 倍と見積もられる。

当日は、保護層の影響やパルス磁場と定常 磁場中の Jc との比較についても報告する予定である。



Fig. 1 Field dependences of (a) magnetization and (b) J_c in the REBCO tapes from SuperPower Inc.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(20K15217)、JST-A-STEP、NEDO、及び名大産総研アライアンスからの助成を 受けて実施しました。強磁場中の測定は、強磁場コラボラ トリーを通じた AHMF との共同研究によって実施しまし た。

- [1] S. Hahn et. al., Nature 570, 496-499 (2019).
- [2] D. T. Ryan et al., IEEE Trans. Magn. 32, 2803 (1996).
- [3] B. A. Glowacki *et al.*, Physica C **384**, 205 (2003).
- [4] M. Leroux et al., Phys. Rev. Appl., 11, 054005 (2019).

Consideration on Double-Peak Structure Appeared in Uniaxial Strain Dependence of Critical Current Density of *RE*BCO Coated Conductors

OKADA Tatsunori, MISAIZU Hidenori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.) E-mail: tatsu.okada@imr.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Understanding the temperature, magnetic field, and uniaxial strain dependence of critical current, $I_c(T, B, \varepsilon)$, is important for the design of high-field magnets. However, it is difficult to understand $I_c(T, B, \varepsilon)$ in *REB*a₂Cu₃O_{7- δ} coated conductors (*RE*BCO-CCs) because *RE*BCO has two domains in which physical quantities respond to uniaxial strain almost oppositely [1]. In particular, an appearance of anomalous double peaks of $I_c(B,\varepsilon)$ in low fields has been reported [2,3], but it has not been understood for ten years.

Here we report a reasonable explanation of it obtained via measurements and model calculations [4].

2. Experimental method

We investigated *RE*BCO-CCs with different pinning mechanisms; random pinning (GdBCO without APC by SuNAM) and *c*-axis-correlated pinning ((Y, Gd)BCO with BaZrO₃ nanorods by SuperPower). Uniaxial strain dependence of *I*_c at 77.3 K under magnetic fields was measured by using a four-point bender inserted in a liq. N₂ cryostat [1]. Magnetic field was applied parallel to the *c* axis of *RE*BCO by a large-bore cryogen-free superconducting magnet (φ 100-10T-CSM) at HFLSM. Transport *I*_c was evaluated by using the *n*-value model with a criterion of 1 μ V/cm.

3. Experimental results and discussions

Top panels in Fig. 1 show the uniaxial strain dependence of normalized I_c measured at 77.3 K under several magnetic fields. We found that $I_c(B, \varepsilon)$ in the *c*-axis-correlated pinning sample (SuperPower) exhibit mountain-shaped behavior regardless of magnetic fields while those in random pinning sample (SuNAM) show a crossover from mountain-shaped behavior to valley-shaped one and then to mountain-shaped one with increasing *B*. Observed valley-shaped behavior is considered to be a sign of double peaks. Similar crossover can be seen in YBCO without APC [2] and (Y, Sm)BCO with (Y, Sm)₂O₃ particles [3]. These results indicate that presence/absence of double peaks is influenced by pinning mechanism.

4. Modeling of $I_c(B, \varepsilon)$

To understand effects of pinning on $I_c(B, \varepsilon)$, we constructed a phenomenological model taking pinning mechanisms into account. Our model is based on a series circuit approximation of two domains in *RE*BCO [5]. Difference in pinning mechanism is reflected by introducing the temperature-scaling behavior for random pins or matching-field behavior for *c*-axis-correlated pins to the pinning force density, $F_p(B)$. In addition, we subjected opposite strain dependences to physical quantities in two domains based on experimental data of the strain dependence of critical temperature in de-twinned *RE*BCO-CCs [1].



Fig.1 Uniaxial strain dependence of normalized I_c . Behaviors in measured data (top panels) are roughly reproduced by our model (bottom panels) (after [4]).

5. Calculated results and discussions

Bottom panels in Fig.1 are results calculated by our model with random pins (left) and *c*-axis-correlated pins (right). Although there are quantitative discrepancies between measured data and calculation, we succeeded in reproducing observed $I_c(B, \varepsilon)$ in a qualitative manner. This suggests that the presence/absence of double peaks of $I_c(B, \varepsilon)$ can be understood by considering differences in pinning mechanism (random pins/correlated pins).

6. Conclusions

We clarified that the double peaks of $I_c(B, \varepsilon)$ appear in *RE*BCO-CC with random pins but do not appear in *RE*BCO-CC with correlated pins by experiment. We also clarified that the presence/absence of double peak structure can be understood by considering the random/*c*-axis-correlated pinning. Details of those described above are reported in Ref. [4].

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI (Early-Career Scientists: 18K13783 and Grant-in-Aid for Scientific Research(S): 18H05248).

References

- 1. S. Awaji, et al.: Sci. Rep., Vol. 5 (2015) p.01156
- 2. D.C. van der Laan, et al.: SuST, Vol. 23 (2010)p.072001
- 3. M. Sugano, et al.: SuST, Vol. 23 (2010) p.085013
- 4. T. Okada, et al.: SuST, Vol. 33 (2020) p.094014
- 5. K. Osamura, et al.: SuST, Vol. 29 (2009) p.065019
広い周波数領域における多芯化高温薄膜超伝導線材の結合時定数の測定 Coupling time constant measurements of striated coated conductors in wide frequency range

王 寧,陳 妙鑫,重政 茉於,曽我部 友輔,雨宮 尚之(京大)

WANG Ning, CHEN Miaoxin, SHIGEMASA Mao, SOGABE Yuseke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: n-wang@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. Background

The striation, that is dividing the superconductor layer into filaments, is an effective approach to reduce AC loss. Striated coated conductors, in which filaments are connected electrically through some transverse conductance, could improve the robustness against local normal transition because the current sharing between filaments through its plated copper. However, it should be noted that the striation is effective to reduce AC loss only after the decay of the coupling current, which is the eddy current flowing through the transverse conductance between filaments. The coupling current is characterized with the coupling time constant, which is determined from the AC loss measured at various frequency. In this study, we are improving the performance of the AC loss measurement system in wide frequency range, and measured the AC loss of striated coated conductors to determine their coupling time constants.

2. AC loss measurement system

As shown in Fig. 1, the system measures AC losses of samples using the pick-up coil, and cancels the background signal using the compensation coil, which is a coil with the same turns as the pickup coil but wound in the opposite direction. We fill the cryostat with liquid nitrogen, immerse the magnet and the sample liquid nitrogen, then measure AC losses. This system measures the frequency dependence of AC losses (Q_m-f plot) in 0.5 mT AC magnetic field at 77 K.

3. Samples and experimental results

The AC losses of two types of striated and copper-plated coated conductor samples fabricated by Furukawa Electric Co., Ltd. and SuperPower Inc. were measured at 77 K. One was straight samples of different lengths, the other was spiral samples wound on GFRP rods of different diameters. For the straight samples, the Debye curve of the coupling loss is observed in Fig. 2, and f_{peak} (the frequency gives $Q_{\text{m}}-f$ plot the peak) increases with decreasing sample length. The coupling time constants are about 1 ms, 0.3 ms, 0.09 ms calculated from $1/(2 \pi f_{peak})$. For the spiral samples, the peak of Debye curve is obvious at a sample wound on 10 mm GFRP rod but a little flat at a sample wound on 5 mm GFRP rod as shown in Fig. 3, which may due to a slight difference in the sample production process. Besides, it is somehow caused by the high frequency performance of the measurement system cannot meet the requirements as well. The coupling time constants are 0.2 ms and 0.05 ms corresponding to the red and blue curve in Fig. 3.

4. Conclusion

First, the experimental results of straight samples indicate that we can measure the frequency dependence of AC losses over 1 kHz, but as the frequency is higher, the noise is much more which will influence the accuracy of the measurement system somehow. In other words, the performance for high frequency measurement still needs to be promoted.

Second, the loop length of coupling currents decreases as the length of the straight samples decrease so the coupling time constants become smaller. For spiral samples, due to the winding angle is the same, the pitch decreases as the diameter of GFRP rods decreases so the loop length of coupling currents also decreases, and the time constants get smaller as well.

5. Acknowledgments

This work was supported by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1, Japan.







Fig. 3 Experiment results of spiral samples

導電性中間層を用いた YBCO 線材のクエンチ発生時における電流回避挙動の検討

Numerical simulation of current distribution when quenching in REBCO coated conductor using conductive buffer layer

<u>村本</u>周平, 井上 靖也, 太田 圭佑, 川山 巌, 土井 俊哉(京大) <u>MURAMOTO Shuhei</u>, INOUE Seiya, OTA Keisuke, KAWAYAMA Iwao, DOI Toshiya (Kyoto Univ) E-mail: muramoto.shuhei.45z@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は低コスト YBCO 線材の開発を目的に、{100}<001> 集合組織を有する Ni メッキ Cu テープ (Ni/Cu/SUS) 上に導 電性を有する中間層を介して YBCO をエピタキシャル成長さ せる線材構造の研究を進めている。この線材構造では、 YBCO 層の一部で超伝導性が破れた際、YBCO 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。当研究室ではこれまで に、導電性中間層として SrTio.95Nb0.05O3 (Nb-STO) を用いた YBCO/SrTio.95Nb0.05O3/Ni/Cu/SUS 試料を作製し、2.6 MA/cm² (77 K、自己磁場)の臨界電流密度 (Jc) が得られた事を報告 した[1]。また、臨界電流密度 (Jc) 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]。

しかしながら、YBCO 層から Cu テープへ全電流が回避する のに要する距離と中間層の抵抗率 (ρ_b) 及び Cu テープの層 厚 (dcu) の関係は明らかではない。また、Cu テープが安定化 層として有効に働くために求められるρ_bの上限も明らかではな い。本研究では、有限要素法による電流分布解析を行い長手 方向の発熱分布を求めた。

2. 解析方法

電流分布解析の計算にはフォトン(株)の解析ソフト PHOTO-VOLT を使用し、有限要素法を用い設定する電圧を 境界条件として各メッシュに対して $\nabla \cdot J = 0$ が満たされるように 計算を行った。解析を行ったモデルは2次元でありYBCO層 の一部の超伝導状態が破れたYBCO/導電性中間層/Cuの構 造である。YBCOの電気的特性は当研究室の先行研究の試 料[3]に基づいて設定した。そして、 ρ_b を1.0×10⁴ ~ 1.0× 10⁰ Ω ·cm の範囲で10倍ずつ変化させ、 d_{Cu} が30、50、100 µm の場合でそれぞれ解析を行った。

3. 結果及び考察

Fig. 1 (a) に電流回避の計算を行ったモデルの概略図を示 す。実際の計算には対称性を利用し右半分である赤の点線 部のみを用いた。Fig. 1 (b) に ρь を変化させて計算した際の YBCO 層の常伝導領域を流れる電流 (*I*_{NS}) を示す。ρь を 10 倍ずつ増加させたとき、YBCO の超伝導消失領域を流れる電 流が増加することがわかった。また *d*cu が大きいほど YBCO の 超伝導消失領域を流れる電流が減少することがわかった。 数値計算結果より、YBCO 層の超伝導消失領域と超伝導 領域の境界付近での発熱密度を計算した。この発熱密度と液 体窒素の冷却能との比較を行った。この比較結果から、境界 付近での発熱密度が最も大きい $d_{\rm Cu}$ が 30 µm の場合でも、 $\rho_{\rm b}$ が $1.0 \times 10^2 \Omega \cdot {\rm cm}$ 以下では線材での発熱密度が液体窒素の 冷却能を下回っていた。このことより、 $\rho_{\rm b}$ が $1.0 \times 10^2 \Omega \cdot {\rm cm}$ 以 下であれば YBCO 層の一部で超伝導状態が破れても線材は 液体窒素により冷却されると考えられる。

謝辞

本研究の一部はJST-ALCA、JPMJAL1109の支援を受けた ものである。



Fig. 1 (a)A schematic model for current distribution analysis and (b) dependance in the current flowing through YBCO normal state layer (I_{NS}) as a function of resistance of conductive buffer layer (ρ_b).

- [1] T. Doi et al., Master. Trans. 58 (2017) 1493.
- [2] T. Doi et al., APEX 12 (2019) 023010.
- [3] M. Hashimoto et al., JSAP Spring Meeting (2015) 12a-P9-11.

常磁性体のための低磁場磁気分離装置の開発に関する基礎的研究

Basic research on the development of low magnetic field separation for paramagnetic substance

三島史人、野村直希、西嶋茂宏(福井工業大学)

<u>Mishima FUMIHITO</u>, Naoki NOMURA and Shigehiro NISHIJIMA (Fukui University of Technology) E-mail: f-mishim@fukui-ut.ac.jp

1. はじめに

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、7 T 以上では効果は大きい が、磁気分離装置の現場での使用として考えるとできる限り強 磁場を使用せず分離効率を上げることが求められている。そ こで我々は淘汰管分級に磁気分離法を用いることで、低い印 可磁場(1.5 T 程度)でも常磁性粒子の磁気分離を可能とする 手法を提案してきた。今発表では淘汰管内に高勾配磁気フィ ルターを適用することで、さらに印加磁場を低磁場化する手 法についての検討を行った。模擬サンプルとして色ガラス (SiO₂)を用いて淘汰管分級に磁気力制御を用いた高勾配磁 気分離法の検討を試みたので、その結果について報告する。

2. 淘汰管の原理

淘汰管は粒子の沈降速度と装置下部から流入した懸濁液 の上昇速度との関係により、微粒子を粒径により選別する装 置である。淘汰管内の粒子には、流体によるドラッグ力、浮力 と重力が働く。この粒子に作用する合力を式[1]に示す。また、 この式から流体の速度 v_r=0としたときに導かれる粒子の沈降 終端速度v_sを式[2]に示す。

$$F_{D} = \frac{4}{3}\pi r^{3}(\rho_{p} - \rho_{f})g - 6\pi\eta r(v_{f} - v_{p})$$

$$v_{s} = \frac{2r^{2}(\rho_{p} - \rho_{f})g}{9\eta}$$
(2)

ここで、r は粒子半径 [m]、 ρ_p は粒子の密度 [kg/m³]、 ρ_f は粒子の密度 [kg/m³]、 η は流体の粘度 [Pa·s]、 v_f は流体の速度 [m/s]、 v_p は粒子の速度 [m/s]を示す。

3. 常磁性粒子を磁気分離するための淘汰管を利用した磁気 分離装置の検討

実験装置として、内径20mm、長さ1mの塩ビパイプ管を用 いた淘汰管を用いて、常磁性を示す黒色ガラス(平均粒子径 180 µm、体積磁化率 3.17×10⁻⁴)を磁気分離した。流速の決 定については、式[2]に従い、粒子径180μmが釣り合う速度 を計算し、実験の流速を3.5 cm/s付近に設定した。淘汰管下 部から定量送液ポンプ(EYELA RP-1000)を用いて流速 3.5 cm/s で送液し、ガラス粒子を高さ40 cm の位置に留めた。そ して、その高さ40 cmの位置の淘汰管側面に、最大磁束密度 1.3 T の永久磁石回路を配置することで、停留しているガラス 粒子の磁気分離を実施した。その際、装置分離部に適用した 磁場積(B×gradB)は、磁石近傍2mmで180T²/m、磁石遠方 20 mm で 20 T²/m の磁気力が作用している状態で、開放勾配 磁気分離法にて実施され、分離は成功した。計算と実験から、 停留している粒子は、磁場積の大きさによって、粒子が淘汰 管側面に設置された磁場源に回収される移動速度いわゆる 分離回収時間に差があるものの、分離領域のどの位置にお いても良好な分離回収が可能であった。

今後、本磁気分離装置での常磁性体の大量処理を目指す には、磁場発生源の低磁場化と大型化、(今回はバルバッハ 永久磁石回路であるが、超電導磁石化した際のボア径いわ ゆる磁気分離領域の拡大)が必要となる。それは同時に装置 製作コストの低減も期待できる。そこで、さらなる低磁場化を 検討するため、磁気フィルターを適用した淘汰管内での高勾 配磁気分離について実施した。

高勾配形成磁気フィルターを適用した淘汰管を利用した 色ガラスの低磁磁気分離実験

印加磁場を低磁場化し、磁場積として 20 T²/m 以上になる ように、磁気フィルター(線径:0.8 mm, 15 メッシュ,材質 SUS430)を淘汰管の流路内に設置し、高勾配磁気分離装置 として改良した。その実験体系模式図と磁気フィルターの写 真を Fig.1(a)に示す。本実験においても淘汰管内に常磁性を 示す黒色ガラス粒子と反磁性を示す黄色ガラス粒子を淘汰管 (流体停止時)に投入した。流路が閉塞しないようSUS430 製メ ッシュを俵状にして淘汰管内に設置した。前の実験と同じ流 速 3.5 cm/s で色ガラス試料を管内に停留させた。磁気フィル ターを設置したことによる粒子の閉塞や停留状況などの変化 は目視上では観察されなかった。

ガラス粒子が停留した状態を維持しつつ、磁場発生源を淘 汰管(管壁)から距離 30 mm、20 mm、2 mm に配置し高勾配 磁気分離実験を実施した。その際、磁束密度を測定し、磁気 フィルターの強磁性細線近傍の磁場積を計算した。それぞれ の磁場積は、最大印加磁場 0.2 T (30 mm)で磁場積 50 T²/m、0.5 T (20 mm)で 300 T²/m、1.3 T (2 mm)で 1600 T²/m であった。0.5 T、1.3 T での実験の様子を Fig.1(b)に示す。

今回の試料条件における磁気分離実験の結果、0.2 T (50 T²/m)で、黒ガラス粒子(常磁性粒子)が磁気フィルターに捕捉されることが確認できたが、瞬時には捕捉されず、停留状態に戻る粒子も観察された。一方、磁場 0.5 T、(300 T²/m)の磁気力においては、黒ガラス粒子は、磁気フィルターに瞬時に強固に捕捉された。



Fig.1 (a) Photographs of the magnetic filter and illustration of the HGMS experimental setup. (b) The novel High Magnetic Separation System using selection tube applied low magnetic fields.

5. まとめ

小規模な淘汰管を用いて低磁場印加条件の高勾配磁気 分離実験を実施した。磁束密度 0.5 T 程度の低磁場適用で 常磁性粒子の磁気分離が可能であり、淘汰管を用いた磁気 分離法が常磁性体の分離に有効であることが示された。

今後は、より粒径の小さい常磁性粒子の捕捉と磁場領域拡 大をめざし、強磁性細線フィルターの線径・形状や淘汰管内 での配置方法などを詳細に検討してゆく。さらに超伝導磁石 の広大な磁場領域を装置に適用することで、処理量の増大を 図る予定である。

本研究は福井工業大学学内研究費の助成を受けて実施したものである。

磁気力制御法によるマイクロプラスチックの分離に関する研究

Study on microplastic separation by magnetic force control method

<u>西嶋茂宏</u>, 三島史人, 野村直希 (福井工大) <u>NISHIJIMA Shigehiro</u>, MISHIMA Fumihito, NOMURA Naoki (Fukui University of Technology) E-mail: nishijima@fukui-ut.ac.jp

1. はじめに

近年プラスチック製の日常用品は量産されると同時に 大量に廃棄されている。プラスチックは分解し難く、海 洋環境に多大な負荷を与えている。現在、これらの人体 への影響は見られていないが¹⁾、潜在的危険性を考慮する とプラスチック類の早期回収が望まれる。

海洋に存在するプラスチック量は約1億5千万tと考 えられ、年間約800万tのペースで増加しており、2050 年には重量ベースで魚より多くなっていると推定されて いる²⁾。また、プラスチックの分布状態は東アジアが80% を占めており、海流によって運ばれるため日本の海岸に も多く存在している²⁾。

マイクロプラスチックとは 5mm 以下の大きさのものと 定義されており、種類としてはポリプロピレンやポリエ チレン、ポリスチレンが多くを占めている。これらは自 然環境下では分解されにくく、長距離を海流に乗って運 ばれるため世界規模の汚染となっている。

プラスチック自身は不溶性のため化学物質のような汚 染を引き起こすことはないが、その大きさ故、海洋生物 の誤飲が多く、消化されないため異物として海洋生物に 影響を与える。一方で、それに付着する残留性有機汚染 物質(POP)は疎水性であることが多く、食物連鎖により 生物濃縮されやすい性質を持っている。POP はその毒性の ため体内の重要器官に取り込まれた場合、食中毒や発疹、 免疫低下等の症状を引き起こす可能性があると言われる。

このように悪影響を与える可能性の高いマイクロプラ スチックであるがその除去法は、現在、プラスチック類 の流出抑制が唯一の方法である。このため、現存のマイ クロプラスチックや今後増加するマイクロプラスチック を海洋から分離・除去する方法の開発は SDGs の一つを実 現するための有力な手法を提供することになる。そこで、 本研究ではそれらを分離・除去する手法について検討し たので、その結果について報告する。

2. 分離手法

本研究では海洋中のマイクロプラスチック分離・除去す る手法として、ローレンツ力を用いた手法を適用するこ とにした⁴⁻⁵⁾。海水に磁場を印加するとともに電流を流す ことによりプラスチックの分離・除去する手法である。 媒質に磁場下で電流が流れている状態を考える。媒質中 に絶縁球が存在する場合、その絶縁球にはローレンツ力 の反力がはたらくことになる。この結果、絶縁球はある 条件の下で浮上あるいは沈降させることができることに なる。この反力は、Leenov³⁾ らにより求められており、次 式で表されることが示されている。

$F = -3/4 V (\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B})$

この原理を利用し、マイクロプラスチックを浮上ある いは沈降させることを考えた(場合によっては濃縮する)。

3. 実験

実験の概略図を図1に示す。実験ではハルバッハ磁石 を利用し、流路を電極が磁石の中心と対称となるように 設置した(流路内平均磁場0.87T)。海水を模した濃度3.4%



Fig. 1 Schematic illustration of experimental set up.

の食塩水(密度:1.03×10³kg/m³)をタンクから流して実 験を行った。流路はアクリル製で25×25×565mmである。 電極はメッシュ状のステンレスから成り、30mm 離して流 れに直交するように設置した。装置内磁場は平均0.87T である。実験に用いたプラスチックは直径6mmのポリス チレンであり、その密度は1.07×10³kg/m³であった。

4. 結果と考察

電流密度 8.30×10³ A/m²、流速 6.5×10⁻²m/s の時のプ ラスチック粒子の浮上の様子を図 2 に示す。プラスチッ ク粒子は流されつつ浮上していることが分かる。



Fig.2 Levitation of plastic ball.

装置設計のために粒子軌跡計算を開水路体系で実施した。実験結果およびLenovの計算を利用して、60t/hの装置の予備設計を行った(流速7.4×10⁻¹m/s)。90%以上の分離率を考えた場合、ボア直径約20cm、長さ22cm,B=2Tの超電導磁石であれば実現できることが示された。

5. 結言

ローレンツ力を利用した海洋からのマイクロプラスチ ックの分離法を検討するとともに、その実用の可能性を 調査した。また、この手法を用いた小規模の分離装置の 予備的検討を行った。

- 1) https://www.who.int/news-room/detail/22-08-201 9-who-calls-for-more-research-into-microplasti cs-and-a-crackdown-on-plastic-pollution : World Health Organization ホームページ
- べ辺篤彦ら:「環境研究総合推進費 終了研究成果報 告書~沿岸から大洋を漂流するマイクロプラスチッ クの動態解明と環境リスク評価~(4-1502)」
- 3) D. Leenov and A. Koji: J Chem. Phys. 22(1954)683
- 4) 寺田隆哉ら:「電磁力を利用した低融点金属内介在物 分離に関する基礎的研究」、低温工学 44 (2008) 32-37
- 5) 西垣和ら:「MHD 方式による海洋流出油の分離回収技 術の基礎研究」、低温工学 37 (2002) 343-349

ITER TF コイル及び構造物の製作進捗 Progress of manufacture of ITER TF coil and structure

小泉 徳潔, 中平 昌隆, 井口 将秀, 松井 邦浩, 中本 美緒, 梶谷 秀樹, 櫻井 武尊, 諏訪 友音(量研機構) <u>KOIZUMI Norikiyo</u>, NAKAHIRA Masataka, IGUCHI Masahide, MATSUI Kunihiro, NAKAMOTO Mio, KAJITANI Hideki, SAKURAI Takeru, SUWA Tomone (QST)

E-mail: koizumi.norikiyo@qst.go.jp

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構;QST)は,ITER における日本の国内機関として,Fig. 1 に示す ITERトロイダ ル磁場(TF)コイル[1,2](スペア1個を含み19個.以下,TFC と記す.)のうち9個のTFC,19個分のコイル容器(CC)の調 達を担当している.TFCは,ITERの超電導コイルの中でも最 大級であり,かつ,製作の難易度も最も高いコイルである.日 本では,初号機と二号機を完成させ,ITERサイトに納入して いる.本報では,日本が担当しているTFC及びCCの製作進 捗を報告する.

加えて, ITER において, 日本と同様に, TFC の調達を担当している欧州での進捗, 及び ITER サイトでの組立準備状況についても, 簡単に紹介する.

なお, TFC の製作手順の詳細等は, [1]を参照されたい.

2. 日本における TFC 及び CC 調達進捗

日本では、ITER の工程を満足させるために、TFC の製作 は2製造ライン[1]で進めている. Table 1 に、TFC の ITER サ イトへの納入順に、各製造ラインの進捗をまとめた.

第一製造ラインでは,既に,3機の製作を完了し,現在, 安定的に量産段階に入っている.第二製造ラインでは,初号 機の製作を進めているが,巻線部(WP)をCCに挿入して,封 止する最終工程(一体化)まで進んでおり(Fig. 2),こちらでも 大部分の作業が量産段階に入っている.

以上から,日本における TFC 製作は,当初危惧された多数の技術的な問題点を解決しながら,安定的な量産体制に移行したと言える.

また, CC の製作では、日本分の6機、欧州分の7機の製作を完了しており、量産も最終段階となっている. 2021年には、 全ての CC の製作を完了する計画である.

3. 欧州における TFC 調達進捗

欧州においても、3 機の TFC の製作を完了し、このうち 2 機が ITER サイトに納入済である.後続の3機の一体化を進め



Fig. 1. ITER-TF coil

Suppliers	TFC delivery sequence to ITER from Japanese industries							Total		
		2	3	4	5	6	7	8	9	
1st (MHI & Melco)	IT	IT	С			Α			D	5
2 nd (Toshiba)				Α	Α		W	D		4

D: Under DP fabrication, **W**: Under WP fabrication, **A**: Under assembly of WP and CC, **C**: Completed, and **IT**: Delivered to ITER site.



Fig. 2 4th Japanese TF coil manufactured in the 2nd line.



Fig. 3 1st Japanese TF coil in the ITER assembly building.

ており,欧州でも TFC の量産が安定的に進められている.

4. ITER サイトの組立準備状況

ITERサイトでは、TFCの受入検査,真空容器との組立前の 準備作業を進めている.日本分 TFC 2機及び欧州分 TFC 1機については、受入検査に合格し、組立前作業を進めてい る.一方、ITERのある仏国では、COVID-19の感染拡大が深 刻であり、当初計画した進捗を達成するのに苦労している.

Fig. 3 には、ITER のトカマク組立建屋に搬入された日本の TFC 初号機の写真を示す. TFC が小さく見え、ITERの巨大さ が実感できる.

5. まとめ

日欧では, ITER TF コイルの製作は, 量産段階に入っており, ITER サイトでも TF コイルの組立が開始された.

謝辞

TFCの製作で,ご尽力いただいた三菱重工,東芝,三菱電機,現代重工等多数のメーカの協力に感謝します.

- (1) 低温工学, 55 No.5 (2020) 315-345
- (2) 低温工学, 55 No.6 (2020) (掲載予定)

ITER TF コイル高精度巻線技術の開発成果 Development of high-accuracy winding for ITER toroidal field coil

<u>諏訪 友音</u>, 梶谷 秀樹, 中本 美緒, 高橋 良和, 吉澤 一美, 宇野 康弘, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 中平 昌隆(量研機構) <u>SUWA Tomone</u>, KAJITANI Hideki, NAKAMOTO Mio, TAKAHASHI Yoshikazu, YOSHIZAWA Kazumi, UNO Yasuhiro, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI, KORIKIYO, NAKAHIRA Masataka (QST)

E-mail: suwa.tomone@qst.go.jp

1. はじめに

ITERトロイダル磁場コイル(TFコイル)は、Nb₃Sn 超伝導素 線を用いた導体を巻線した 7 つのダブルパンケーキコイル (DP)とコイル容器から構成され、それぞれの DP は、絶縁を施 した TF 導体をラジアルプレート(RP)と呼ばれる溝付きステン レス鋼板に挿入した構造となっている。

TF コイル製作における技術課題は、導体絶縁を施した熱 処理後 TF 導体を RP 溝へ挿入するために、熱処理後の巻線 と RP 溝の周長差を 0.023%の高精度で管理することであった。 そこで、全ての DP において、RP 溝への導体挿入を確実に行 える製作方法を立案し、さらに、その合理化を進め、効率的に 本作業を実施できるようにした。

2. 技術課題の解決策と RP 組立プロセスの合理化

RP 溝に TF 導体を挿入可能とするため、これまでに、巻線 する際に高精度に巻線周長を管理する技術を開発した。さら に、熱処理によって導体が伸びることで巻線周長が変化する ため、RP 溝を熱処理後の巻線周長に合わせて調整する方法 も開発した¹⁾。これらにより、巻線とRP 溝の周長差の平均を最 大で±0.03%、これに加え、各ターンにおける平均周長差から のばらつきを±0.023%まで吸収できる製造方法を開発した²⁾。

一方、この方法では巻線の熱処理完了まで RP 溝の組立 を開始することができず、ITER の要求工程を満足することが 難しかった。巻線の製作とRPの組立を並行してすすめ、製作 工程を合理化するためには、量産した DP の巻線周長に対し て統計的な処理を行うことで、高精度に熱処理後の巻線周長 を予測し、次の2 段階に分けて合理化を実施した³⁾。

まず、合理化ステップ1として、熱処理前の巻線周長 と熱処理後の導体の伸びから熱処理後の巻線周長を計算 し、計算値に合わせて、RP 溝周長を決定した。これによ り、巻線の熱処理前に RP の組立を開始することが可能と なる。この方法では、熱処理前の巻線周長はそれぞれの DP における測定値を用い、導体の伸びは合理化前に蓄積 したデータの平均値を採用することとした。次に、合理 化ステップ2として、合理化前と合理化ステップ1で製 作した DP における熱処理後の巻線周長の平均値に合わ せて RP 溝の周長を決定し、巻線製作と完全に並行して RP の組立を実施することとした。

3. 熱処理後における巻線周長

TF コイルには4社のNb3Sn 素線の導体が使用されている ため、それぞれの導体で熱処理後の伸びが異なる。各社の 伸びの違いを考慮して、熱処理後の巻線周長が設計値どお りとなるように巻線を実施したため、Fig. 1 に示すように、A、B、 D 社の伸びの違いによらず、熱処理後の巻線周長と設計値 の差の平均はほぼゼロとなった。C 社の巻線周長と設計値の 差は大きかったが、C 社の導体を用いた DP は全 63 体中 3 体のみであるため、原計画通りの RP 組立を選択した。従って、 巻線周長の設計値からの平均的なずれは RP 溝周長を調整 することで打ち消すことが可能であることを示せた。

4. 巻線周長とRP 溝の周長差

A 社の導体を用いた DP について、合理化ステップ1に従い RP 組立を実施した場合の巻線と RP 溝の周長差における

累積誤差を評価すると、許容周長差 0.023%以内となった。そのため、合理化ステップ1に従って、A社のDPは巻線の熱処理前に RP の組立を開始可能となった。さらに製作工程を加速するため、合理化ステップ2の適用可否の検討を実施した。 合理化ステップ2を適用する前の各社の製作結果を用いて、 巻線と RP 溝の周長差の累積誤差を評価すると許容周長差 0.023%以内となることが分かったため、巻線製作と RP 組立を 完全に並行して実施できる目途がたった。B及びD社は DP 製作の合理化前に、A社の DP製作で合理化ステップ1及び 2の両方が可能であることが分かったため、原計画から合理 化ステップ2に移行した。

Fig. 2 に各製作方法でまとめた巻線と RP 溝の周長差を示 す。いずれの製作方法でも、巻線と RP 溝の周長差は許容値 ±0.023%以内となり、問題なく RP 溝に巻線を挿入可能である ことを確認した。

5. まとめ

開発した方法によって、厳しい製作精度と要求工程の両 立を可能とし、63体中60体のDPについてRP溝への巻線挿入 を完了し、残りのDP製作も順調に進めている。



Fig. 1 Average difference in the design length of windings after heat treatment shown in the bottom graph.



Fig. 2 Average difference between RP groove length and conductor length shown in the bottom graph.

- 1. K. Matsui, et al.: TEION KOGAKU 47 (2012) 166-171
- 2. T. Hemmi, et al., J. Plasma Fusion Res. 92 (2016) 402-407
- 3. T. Suwa, et al., TEION KOGAKU 55 (2020) 319-327

ITER TF コイルダブルパンケーキの製作技術開発成果 Development of Double Pancake Manufacturing Technology for ITER TF Coil

<u>井口 将秀</u>, 梶谷 秀樹, 高野 克敏, 安藤 真次, 宇野 康弘, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 中平 昌隆(量研機構) <u>IGUCHI Masahide</u>, KAJITANI Hideki, TAKANO Katsutoshi, ANDO Shinji, UNO Yasuhiro, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka (QST) E-mail: iguchi.masahide@qst.go.jp

1. はじめに

ITER トロイダル磁場コイルの巻線部(WP)は、高さ 14 m、 幅 9 m、厚さ約 110 mm の D 型のダブルパンケーキ(DP)7 枚 を積層した構造である。DP は絶縁含浸工程を除くと、①ラジ アル・プレート(RP)と呼ばれる D 型の溝付きオーステナイト系 ステンレス鋼板を、10 枚のセグメントを溶接・機械加工して製 作する、②RP 溝に熱処理後の超伝導導体を挿入する、③オ ーステナイト系ステンレス鋼製のカバー・プレート(CP)を製作 する、④CPを RP 溝に被せ、RP-CP 間及び CP-CP 間を溶接 する(これらの溶接を CP 溶接と呼ぶ)、工程を経て完成する。 上記製作工程には三つの重要な技術課題が存在する。

- 超伝導 (Nb₃Sn) 生成熱処理後の導体を RP 溝に挿入す るために、導体長と RP 溝の周長との差を±230ppm の 範囲内とすること。
- 2. WP の寸法公差を達成するために、CP 溶接後の DP は 平面度 3.5 mm 以下とすること。この DP の平面度を達成 するために、RP は平面度 1 mm以下を達成すること。
- 3. RP、CP の母材及び溶接部は、有害な欠陥がなく、かつ 4 K で降伏応力:900 MPa 以上、破壊靭性値:180 MPam^{0.5}以上を満足すること。

これら技術課題をメーカと協力しながら解決し DP 製作を 進めた。本発表では、RP・CP 製作及び CP 溶接に関わる 1~ 3 の技術課題及び解決策を紹介するとともに、これまでの開 発成果について報告する。

2. RP 製作技術開発及び成果

RP 製作における 1~2 の技術課題を解決する主要技術の 一つとして、溶接変形の小さいレーザービーム溶接(LBW)を RP セグメント同士の溶接(RP 溶接) へ適用する技術を開発し てきた。一方、技術課題 3 を満足するために、RP は強度を高 めるために窒素を多く添加した 316LN を構造材料として使用 する。そのため、高出力LBWを適用しても凝固割れ等が発生 しない溶接技術の確立が必要であった。まず、高窒素添加 316LN の高出力 LBW に対する割れ感受性を確認した。その 結果、7 kW 程度では溶接割れは生じないが、10~30 kW で は、溶接ルート部付近に溶接割れが発生しやすいことが分か った。そこで、大出力 LBW で生じた溶接割れを、裏面から小 出力 LBW することで取り除く方法を検討した。その結果、厚さ 40 mm を溶接割れ無く溶接できることを確認した。

溶接厚さを増すために、高出力LBWでも溶接割れを抑制 する方法を検討した。検討の結果、構造材料の化学成分をフ ェライトに近づけるように最適化すること、及び溶接条件を最 適化することで、溶接割れが抑えられることを明らかにした。こ れらの結果、Fig. 1 左図に示すように、LBW で 50 mm 深さを 溶接することが可能となり、実機 RP 溶接を開始した。さらに、 実機製作と並行して RP 溶接の合理化を進め、Fig. 1 右図に 示すように、70 mm 深さの LBW を実現した。開発した LBWを 適用することで、RP 平面度は一部冷間プレスを用いて矯正し たが、目標の 1 mm を満足することができた。

3. CP 溶接技術開発及び成果

RP 及び CP の製作公差から、RP-CP 間では 0.5 mm 程度 の、CP-CP 間では 0.7 mm 程度の隙間が生じ、これは一般的 な LBW の隙間と比べると大きい。また、溶け込み深さは RP-CP 溶接では 2 mm 以上を、CP-CP 溶接では 2.5 mm 以



Fig. 1 Welding sequence and result of macroscopic examination by etching of weld joint with a 50-mm and 70-mm thickness using high energy LBW.





上を達成する必要がある。そのため、種々の隙間に対して適切な溶け込み深さを得られる溶接方法確立する必要がある。 そのため、0.1mm~0.7mmの隙間を設けた試験体用いて、溶 接隙間と溶け込み深さとの関係を明らかにし、溶接条件を最 適化した。また、CP溶接部の4K機械特性に問題がないこと を確認し、要求される溶接品質を満足する CP 溶接手法を確 立した。

CP溶接後のDPの寸法公差を満足するためには、約1000 本ある溶接線の溶接順序及び拘束治具配置を最適化する必 要がある。これは、固有歪法を用いた有限要素法による溶接 変形結果と、小規模から実規模の試験体の溶接変形を比較・ 検討することで最適化した。

実機 CP 溶接後の DP の平面度の結果を Fig. 2 に示す。 全てにおいて平面度の上限である3.5 mm を満足しており、良 好な結果となった。これの結果が示すように、開発した溶接方 法によって安定した品質で CP 溶接を実施できることが実証さ れた。

4. まとめ

開発した製作技術を基に、実機 DP 製作を進めている。現 在までに、63 基中 55 基の DP を完成させており、製作は順調 に進捗している。

謝辞

DP製作の成功は、三菱重工業、東芝、三菱電機を始めと する多くのメーカの協力によります。深く感謝いたします。

ITER TF コイル巻線部の開発成果 Development of ITER Toroidal Field Coil Winding Packs

<u>梶谷 秀樹</u>,中本 美緒,諏訪 友音,井口 将秀,松井 邦浩,小泉 徳潔,中平 昌隆(量研機構) <u>KAJITANI Hideki</u>, NAKAMOTO Mio, SUWA Tomone, IGUCHI Masahide, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka (QST) E-mail: kajitani.hideki@qst.go.jp

1. はじめに

ITER TF コイル巻線部(WP)は、7枚のダブル・パンケーキ (DP)を積層し、各DP端部のジョイント部を半田接続、対地絶 縁及び冷却配管/計測線取付けを行う構造であり、量子科学 技術研究開発機構(以下、量研機構)は、9基のWPを製作す る。WPの製作では、以下の技術課題があった。

- 実機 WP のジョイント部の健全性を評価するためのジョイント性能非破壊検査手法の確立
- ② コイル容器との一体化を問題なく達成するために必要となる厳しい寸法精度を満足するための含浸手法の確立
- プラズマ閉じ込め磁場を精度良く生成するのに必要となる電流中心線(Current Center Line: CCL)の高精度評価手法の確立
- ④ WPの完成試験である80Kコールド試験で発生した予想 外の冷却配管絶縁部の放電現象の解決

これら技術課題をメーカと協力しながら解決しWP製作を進めた。①については[1][2]で報告済であるため、本発表では、② ~④の技術課題及び解決策を紹介するとともに、これまでのWPの開発成果について報告する。

2. WP 含浸手法の確立

WP をコイル容器と一体化させるためには、WP の厚さ(面 外方向)のバラツキ偏差を 4.5 mm 以内にする必要がある。こ れは、WP 厚さのバラツキが大きいと、WP とコイル容器の一体 化プロセスにおいて、両者の隙間を高粘度樹脂で充填すると きに、居所的に樹脂が充填できなくなるリスクが生じるためで ある。そこで、積層した 7 枚の DP を圧縮し、面外方向の平面 度を矯正しながら含浸硬化させる手法を確立することで、本リ スクをなくした。WP 含浸後の WP 厚さ測定結果を Fig.1 に示 す。CCL 評価位置は WP 全周に渡り 8 か所あるが、横軸はそ の位置番号を示す。このように、WP 全周に渡り WP 厚さバラツ キを 4.5mm 以内にできた。

3. 高精度 CCL 評価手法の確立

プラズマ閉じ込め磁場を精度良く生成するためには、精度 良くWPのCCLを評価する必要があり、コイル直線部(Fig.1 横軸中のCCL位置番号:1~3)で±1mm,コイル曲線部 (Fig.1横軸中のCCL位置番号:4~8)で±2mmのCCL位 置公差に入る必要がある。しかし、CCLはWP内部に存在す るため、外部からそれを確認することはできない。また、コイル 容器と一体化プロセスでは、WPの変形によってCCLも変化 するため、それもトレースできなければならない。そこで、WP 内周面に基準マーカを取り付けて、その位置を測定すること で外部からCCLを精度良く評価しトレースできる手法を確立 した。Fig.2に本手法で評価したWPのCCLを示す。このよう に全て公差を満足できた。

4. 冷却配管絶縁部における放電

WPの完成試験として、WP全体を80K付近まで冷却する コールド試験を実施した。しかし冷却後の耐電圧試験におい て、WP含浸後に取り付ける冷媒供給用の冷却配管から放電 が発生した。検証を通じ放電要因として、本来は固体絶縁さ れるべき冷却配管絶縁部の樹脂充填率が低下していることが わかった。そこで、樹脂の充填率をあげるための絶縁手法の 見直しを行った。これを全 WP に適用し、その結果、これまで 一度も放電は発生していない。これにより、本手法の妥当性 を確認できた。

5. これまでの WP 開発成果

以上の技術課題を解決しながら WP の製作を進め、現在までに6基の WP を完成させている。Fig.3 に WP 初号機完成時の記念写真を示す。残り3基の WP についても順調に製作を進めている。



Fig.1 Result of WP thickness after impregnation



Fig.2 Result of WP CCL position



Fig.3 Memorial photo of the first completed WP

- H. Kajitani, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.34
- H. Kajitani, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.51

ITER TF コイル構造物の製作技術開発の概要

Outline of the manufacturing technology development about ITER TF coil structure

<u>中平 昌隆,</u> 井口 将秀, 櫻井 武尊, 高野 克敏, 小泉 徳潔(量研機構)

<u>NAKAHIRA Masataka</u>, IGUCHI Masahide, SAKURAI Takeru, TAKANO Katsutoshi, KOIZUMI Norikiyo (QST) E-mail: nakahira.masataka@qst.go.jp

1. はじめに

ITER トロイダル磁場(TF)コイル(Fig.1)[1]は、世界初の製作品であり、これだけの大型超伝導コイルの製作経験が世界的に著しく少ないことから、調達責任者である量子科学技術研究開発機構(QST)が主導し、メーカーとその製作技術開発に取り組んできた.本報では、この製作上の技術課題とその解決方法について、概要を紹介する.

なお,TFコイルの主要緒言、TFコイル構造物の製作手順の詳細等は、[1,2]を参照されたい.

2. TF コイル構造物の製作上の技術課題

TF コイル構造物の主な製作上の技術課題は、1) 材料、 2) 設計、3) 溶接、4) 非破壊試験、5) 高精度組立である. 1) 材料と、3) 溶接については、[2]に概要を紹介しているの で、そちらを参照されたい.2) 設計について、既存の製作設 計の常識を越えて採用した特徴的なものに部分溶け込み溶 接(Partial Penetration Weld: PPW)の適用がある.通常、PPW は非溶け込み部先端の形状がシャープであり、応力集中が 発生しやすく評価が複雑になるため、その採用を避けることが ほとんどである.しかし TF コイルでは他機器の取り合い構造 が多数あり、これらについては発生応力が小さく、溶接変形の 低減や製作作業の合理化を考えて PPW を適用した.適用に おいて、評価手法と設計データの構築が課題である.4) 非 破壊試験については、超音波探傷試験(Ultrasonic Test: UT)



Fig. 1. ITER TF coil structure.



Fig. 2 Closure welding of ITER TF coil structure.



Fig. 3 Concept of the sensitivity setting for attenuation by weld metal.

における、溶接部での音波の減衰対策が課題である. これは、 TF コイル構造物に用いるオーステナイトステンレス鋼の溶接 部では、材料組織が柱状になり、音波の進路を曲げたり、散 乱を生じたりすることで減衰が生じることによる. 5) 高精度組 立については、TF コイルの巻線部を TF コイル構造物に格納 した後の封止溶接(Fig.2)のための開先合わせが最も難しく、 10m 以上の大きさの構造物に対して、1mm 以下の合わせ精 度を達成することが課題である.

3. TF コイル構造物の製作技術開発

PPW に関しては、4K でのき裂進展試験を溶接継手から切り出したコンパクト(Compact Tension: CT)試験片にて行い、き裂が溶着金属内を伝播すること、Paris 則に基づく理論式によく合致することを確認し、溶着金属のき裂進展特性曲線を作成した.この物性を元に、PPW を適用する全ての接手の応力拡大係数を評価し、ITER 運転寿命中に破断に至らない初期き裂の大きさを設定した.この初期き裂の大きさから、設計上の部分溶け込み部の大さの制限値を求め、かつ溶接後の UT により、実際の部分溶け込み部の先端が、設計通りの位置にあることを確認することで、PPW の適用を可能とした.

UT の減衰対策は、継手試験片から減衰特性を求め、これ により実際の試験で適切に感度を上げて探傷することにより、 減衰の問題を解決した(Fig. 3).

高精度組立のために TF コイル構造物の最終機械加工で は、巨大な機械加工機を含めた加工エリア全体を 20±5° に 管理するか、TF コイル構造物と同材料で既知の長さのものを 用いて加工機の位置精度の温度補正を詳細に実施するかの いずれかの方法を用いて高精度の加工を実現した.

4. まとめ

ITER TF コイル構造物は、数々の技術課題を解決し、製作 が可能となった. これにより、日本は ITER プロジェクトに大き く国際貢献することが出来た.

謝辞

TFコイル構造物の製作に当たっては、三菱重工業,三菱 電機,東芝、現代重工を始めとする各社のご協力と努力によ り、成功することが出来ました.ここに深く感謝いたします.

参考文献

(1)低温工学, 55 No.5 (2020) 315-345
 (2)低温工学, 55 No.6 (2020) (提載子信)

(2)低温工学, 55 No.6 (2020)(掲載予定)

Development Results of WP Integration Techniques for ITER TF Coils

NAKAMOTO Mio, BABA Takashi, KASAI Yuma, SAKAMOTO Kazuyuki, SHIMIZU Tatsuya, SAITO Kengo, KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka (QST)

E-mail: nakamoto.mio@qst.go.jp

1. Introduction

A set of 18 ITER Toroidal Field (TF) coils functions as a constraint to keep generated plasma within a vacuum vessel by generating uniform magnetic field when installed around the vacuum vessel. The quality of magnetic property for each TF coil is guaranteed by defining tolerances on a current center line (CCL) within the coil. CCL positions of TF coil is controlled by aligning CCL positions of Winding Pack (WP) to datum of a TF coil structure (TFCS) during WP integration into the TFCS and transferring the CCL position information of the WP to the TFCS with good accuracy. However, there are two major factors which might jeopardize the precise control of CCL positions; 1) welding deformation of a TFCS and 2) gravitational deformation of a WP. Moreover, after closure welding of a TFCS, a WP is completely enclosed in the TFCS. The transferring of the CCL position information needs some technique to achieve the required accuracy. In this presentation, the WP integration techniques developed through qualification trials and structural assessments are reported followed by the TF coil fabrication progress in Japan.

2. Welding Deformation of TFCS

Closure welding of a TFCS is divided into 1) butt welding of straight portion, AU and curved portion, BU of D-shape, 2) poloidal welding of covers, AP and BP for AU and BU, respectively, and 3) splice plate (SP) welding of two SPs installed between AP and BP for adjustment. The impact of welding deformation on a final TF coil was minimized by performing WP integration in vertical orientation with the straight portion facing bottom so that the only contact surface between a TFCS and a WP is the back side of AU where the impact of welding deformation is small. Furthermore, from the outcomes of welding qualifications trials, the impact of each welding on the final coil shape was assessed. Some extra materials were left on the surfaces and holes where the welding deformation is not trivial or where the tight tolerances are defined. The final machining of those portions is performed after the closure welding to satisfy the given tolerances. During the final machining, CCL positions are also optimized by shifting machining axis from TFCS datum to compensate for the alignment errors of WP integration process.

3. Gravitational Deformation of WP

Since the straight portion of TF coils are located closer to plasma, error field contribution is higher at the straight portion; therefore, the tighter tolerance is given to the straight portion of the CCL. On the other hand, as mentioned already, WP integration is performed in vertical posture with straight portion facing bottom in Japan; therefore, deformations of a TFCS and a WP occur due to the weight of the curved portion. Even though a TFCS and a WP deforms similar manner, the amounts of deformations are different due to structure differences; a WP deforms more than a TFCS. In order to regain the closer-to-ideal CCL positions at the straight portions after integration, deformation of the WP was corrected to the same level as the TFCS at the straight portion.

4. Transfer of CCL Position Information

CCL positions of a WP is traceable from CCL markers attached on the inner surface of the WP (**Fig. 1**); however, after poloidal welding, inner surface of the WP become inaccessible. WP position marks are attached on one side of the WP at the location of resin injection holes on a TFCS. Those marks are measured before and after closure welding to monitor the change in the WP shape. Utilizing structural analysis, the final CCL positions are calculated from those measurements to assess the deviations from nominal and the uncertainties in the calculation. Assessment results summarized in **Fig. 2** show the evaluated values are within tolerances.

5. Progress in WP Integration in Japan

The developed techniques have been applied to actual fabrication of coils and two TF coils have been completed. The third TF coil is in the final inspection phase and will be completed by the end of November. Following three coils are in WP integration process in parallel. In 2022, all of TF coils except for the spare coil will be completed.

Acknowledgement

The development of WP integration techniques for TF coils would not be realized without the cooperation of Mitsubishi Heavy Industries, LTD. and Mitsubishi Electric Corporation. The authors would like to thank those companies for their tremendous effort in the development of the integration techniques and successful fabrication of TF coils with the developed techniques.



Fig.1 CCL markers at the CCL evaluation cross sections, A to H. A set of 4 CCL marks are attached at each cross section.

CCL deviations and uncertainties



Fig.2 Deviations and uncertainties in CCL positions of TF coils. Bars extended from the markers indicate the uncertainties for each value. For the 3rd coil, uncertainties are in evaluation.

Reference

1. M. Nakamoto, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 55 (2020) to be published

JT-60SA 超電導コイルのコミッショニング

Commissioning of Superconducting Magnets for JT-60SA

村上 陽之, 土屋 勝彦, 薄井 勝富, 関 秀一, 柏 好敏, 河野 勝己, 夏目 恭平, 福井 良磨, 濱田 一弥 (量研) MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, USUI Katsutomi, SEKI Shuichi, KASHIWA Yoshitoshi, KAWANO Katsumi, NATSUME Kyohei, FUKUI Kazuma, HAMADA Kazuya (QST)

1. はじめに

欧州と日本が共同で建設を進めているトカマク型核融合 実験装置 JT-60SA 装置の組み立てが 2020 年 3 月に完了し、 現在はファーストプラズマに向けたコミッショニングの作業を進 めている。JT-60SA には3 種類の超電導コイルが用いられ、 18 個のトロイダル磁場(TF)コイルと4 モジュールから成る中心 ソレノイド(CS)および6個の平衡磁場コイルで構成される[1]。

超電導コイルのコミッショニングは、冷却前試験としてクエ ンチ検出用の高圧計測線の導通確認や、冷媒の温度計、圧 力計、差圧計の動作確認およびコイル・給電機器の耐電圧試 験を実施し異常のないことを確認した。冷却開始後は、コイル に20Aの電流を通電し、コイルの抵抗値変化および超電導遷 移温度の測定を実施している。4Kへの冷却が完了した後は、 定格の TF:25.7 kA、PF:20 kA の通電試験を計画しており、 クエンチ検出システムの調整および接続抵抗測定、AC ロス 測定を実施し、プラズマ運転が問題なく行えることを確認する。

本発表では、通電試験の概要および 20 A 通電試験の状 況について報告する。

2. 超電導コイルの通電試験

18 個の TF コイルは直列に接続され一つの電源で励磁さ れる。一方で、10個のPFコイル(4個のCSモジュール+6個 の EF コイル)は、個別に電流を変化できるように、それぞれ異 なる計10個の電源で励磁される。

通電試験の最初にクエンチ検出システムの調整を行う。 JT-60SA のクエンチ検出システムの回路を図1に示す。TFコ イルは直列接続かつ同形状であるため、各コイルの誘導電圧 はほぼ同じであり、コイル間でブリッジ回路を組み誘導電圧を 除去する。一方、PF コイルは各コイルの発生電圧が異なるた め、各コイルに組み込んだピックアップコイルの電圧を用いて 誘導電圧を除去する。誘導電圧除去のバランス調整のため、 クエンチ検出システムには可変抵抗が組み込まれており、 3kA 程度の低電流領域で調整を行う。また、クエンチ検出信 号は B 接点を用いて停電等の異常で作動するようにし、かつ 二重化することで確実にコイルを保護できるように設計した。

コイル通電は TF コイル系統および PF コイル単独と電源 ごとの励磁から開始する。通電電流は、TF コイルは 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25.7 kA、PF コイルは 1, 3, 5, 10, 15, 20 kA と定 格電流まで徐々に電流を大きくし、接続抵抗や発生電圧に異 常のないことを確認しながら通電試験を進める。また、通電ス テップごとにクエンチ保護回路の動作試験も実施し、この時に 生じる急速な磁場変化を用いて AC ロスの評価を行い、運転 に支障のある発熱が生じないことを検証する。

個別の通電試験が完了した後は、図2に示すようなプラズ マ運転を模擬した電流パターンで励磁を行う。まず、TF コイ ルを励磁せず PF コイルのみの通電を実施し、各コイル電流 は図3に示すように目標電流の10%,20% と順次電流を大きく しながら通電を行う。その後 TF 励磁状態で同様の試験を実 施する。通電ステップごとに、コイルに取り付けられた変位計 でコイルの変形を評価し、異常な変形が無いことを確認しな がら通電試験を進める。

これらの試験を通して、開発した超電導コイルが所定の性 能を有することを確認する計画である。

3. コイル抵抗変化および超電導遷移温度の確認

冷却中のコイル抵抗変化を測定するため、コイルに 10~ 20 A の直流電流を通電し電圧を計測する。PF コイルに関し ては、ピックアップコイルの発生電圧は0となるため、クエンチ 検出システムを用いて電圧測定を実施する。TF コイルは、図 4 の通りブリッジ回路の片端を短絡する配線変更を行うことで、 クエンチ検出システムを使用して電圧を測定できるようにした。 20 A 通電による抵抗測定試験の結果は、当日発表する。

参考文献

1. Y. Koide, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55, (2015) 086001











JT-60SA ヘリウム冷凍機システムのコミッショニング Commissioning of helium refrigerator system for JT-60SA

<u>夏目 恭平</u>,河野 勝己,福井 良磨,大西 祥広,濱田 一弥(量研機構) <u>NATSUME Kyohei</u>, KAWANO Katsumi, FUKUI Kazuma, ONISHI Yoshihiro, HAMADA Kazuya (QST) E-mail: natsume.kyohei@qst.go.jp

1. はじめに

トカマク型プラズマ実験装置 JT-60SA が 2020 年 3 月に完成し、JT-60SA ヘリウム冷凍機システムには、超伝導コイルやサーマルシールドといった負荷機器と、極低温へリウムを分配するための冷媒分配システムが接続された。運転に先立ち、各機器の健全性を確認するコミッショニング作業として、リーク試験、ガスパージ作業、ヘリウム精製運転、流量調整運転が行われた。本講演ではこれらの結果について報告する。

2. 負荷機器及び冷媒分配システムの接続と試験

超伝導コイル[1]やサーマルシールドといった負荷機器と 冷媒分配システムは、SUS316L 製の配管で接続され、ヘリウ ム冷凍機[3]から極低温ヘリウムが供給される[3]。Fig. 1 にトカ マククライオスタット内の冷媒配管の写真を示す。配管接続は、 一部を除き突合せ自動溶接とし、極力統一化された品質を確 保している。リーク試験は、配管及び機器内に設計圧 2.0 MPa のヘリウムガスを封入し、加圧積分法で行った。また、機 器は耐圧試験として 2.5 MPa まで加圧することで、健全性を 確認した。冷媒分配システムの現地溶接箇所は約5千箇所あ り、進捗に応じて各種試験を断続的に実施した。

3. ガスパージ作業、ヘリウム精製運転、流量調整運転

異物や水分の除去を目的として、配管及び機器内に乾燥 窒素ガスを2.0 MPa 封入し、安全弁の取り付け口から一気に 排出する、ガスパージ作業を行った。本作業により、配管及び 弁が設計通り接続されていることと、弁のシートリークの有無も 同時に確認した。コイル製作時や配管接続時の加工作業で 発生したと考えられる金属粉などが、弁の台座などに付着す ることで、いくつかの弁にはシートリークがあり、必要に応じて ガスケットの交換などを実施した。また、ヘリウム純度向上のた め、ヘリウムガスでのパージ作業も行った。

全ての弁の動作を確認した後、ヘリウム冷凍機システムを 負荷機器に接続し、ヘリウム精製運転を行った。目標とする ヘリウム純度は、露点-60℃以下、窒素濃度 10 ppm 以下とし た。ヘリウム精製運転は予定よりも早く、約3日間で目標の値 に到達することができた。前述したヘリウムリーク試験及びガ スパージ作業が、組立に伴い繰り返されていたため、系内が 既に比較的清浄な状態となっていたと考えられる。

冷却開始前に各負荷機器や冷媒分配システムの圧力損 失を確認し、各弁を適切な開度としておくため、ヘリウム精製 運転中に各系統の流量調整を行った。その際、圧力計や流 量計などの測定機器の動作を確認した。

参考のため、Fig. 2 に完成した JT-60SA の全景写真を示 す。講演では、実際に開始されている超伝導コイルの冷却の 状況についても報告する予定である。



Fig. 1 Piping in the tokamak cryostat

- 1. Y. Koide, et al.: Nucl. Fusion 55, 2015, 086001.
- K. Kamiya et al.: IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser. 897, 2017, 012015.
- K. Natsume, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., 30, 2020, 4203605.



Fig. 2 Overall view of JT-60SA

大電流 HTS 導体(FAIR 導体)の製法改良と導体特性の改善

Improvement of manufacturing method and conductor characteristics of high current HTS conductor (FAIR conductor)

三戸利行,小野寺優太,平野直樹,高畑一也,柳長門,岩本晃史,濱口真司,高田卓,馬場智澄(NIFS);大辻槙(東京大学); 筑本知子(中部大学);川越明史(鹿児島大学);川並良造(川並鉄工株式会社)

MITO Toshiyuki, ONODERA Yuta, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya, YANAGI Nagato, IWAMOTO Akifumi,

HAMAGUCHI Shinji, TAKADA Suguru, BABA Tomosumi (NIFS); OTSUJI Maki (University of Tokyo);

CHIKUMOTO Noriko (Chubu Univ.); KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.); KAWANAMI Ryozo (Kawanami Ironworks Inc.) E-mail: mito@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所では、核融合実験装置に適用可能な大 電流容量の高温超伝導(HTS)導体及びコイルの開発研究を 進めている。HTS の特徴を生かした高い安定性と高電流密度 を両立でき、安全なコイル保護を可能とすることが目標である。 運転温度 20 K、磁場 12 T で通電電流 12.5 kA を実現できる 導体として、REBCO テープ線と高純度アルミニウムシートを交 互に積層し、外径 12 mm の円形断面のアルミニウム合金ジャ 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、電流分布の均一化及び機械特性の一様化を図るため に導体に捻りを加えて製作する FAIR 導体を開発している。

2. FAIR 導体の製法改良

製法を改良した複数の短尺導体を試作し、液体窒素中で 導体I。を測定する通電試験を実施している。導体の捻りピッチ を横軸として、導体に使用した REBCO 線の I。×枚数で測定 した導体I。を規格化した結果をFig.1 にまとめる。

1回目の導体試作では、無回転捻りの導体にも臨界電流特 性の劣化が観測され、更に捻った導体では、同条件で製作し た導体間のバラツキを観測するための複数のサンプル間の特 性差も大きく、室温と液体窒素温度との熱サイクルを経ること で更に劣化が進むなど、捻りと I。劣化との定量的な評価はで きなかった。この特性劣化の原因は、REBCO 線と高純度アル ミニウムシートの積層時の不整と、ジャケット蓋部を FSW 接合 する際の導体長手方向の強度の不均一さが原因であると判 断し、その改良を行った。2回目の導体試作では、導体 I。の劣 化を 20 %以下に抑えることができ、特に 1 回転/m の捻りを加 えた導体では I。劣化のない導体の開発に成功した[1]。しかし、 2回転/m の捻りを加えた導体では FSW 部分に亀裂が生じ、 FSW 条件の最適化が必要なことが明らかとなった。3回目の 導体試作では、強固な FSW が行えるように FSW のツール形 状を変更した、結果として3回転/mの捻りを加えても亀裂が生 じない導体の開発に成功した。捻りと I。劣化の関係では、2回 転/m の捻りまでは、導体の L。劣化は 20 %以下に抑えられて おり、3回転/m の捻りで L が 60 %以上大きく劣化する結果が 得られた。この原因は3回転/m の捻りによって、REBCO 線に 不可逆な歪みが生じるためと推定された[2]。しかし、1回転/m の導体の I。劣化が2回転/m よりも大きく、導体長手方向の特



Fig. 1. Normalized Ic measurement of FAIR conductors

性の均一性も良くなかったことから、FSW 条件の更なる見直し を行った。3回目+P.J.の導体試作では、導体長手方向の均一 性を向上させるため、本接合の前に、パイロット接合を行う FSW の改良を実施した。FSW の均一性は向上したが、I。特性 は 40 %近く劣化する結果となった。積層 REBCO 線部分を空 洞としたアルミニウム合金ジャケットに同条件で FSW を行って 確認したところ、空洞部の形状が大きく変形しており、強固な FSW によって REBCO 線に残留応力が加わることが I。劣化の 原因と判断した。4回目の導体試作では、ソフトな FSW 条件と 導体長手方向の均一性を両立させるため、2回目導体試作時 の FSW ツール形状に戻し、パイロット接合と組み合わせる改 良を行った。結果として I。劣化を 20 %以下に抑え、導体長手 方向にも均一な特性の導体を製作できる目処が得られた。

3. 導体 I。劣化の原因とその改善方法

導体が均質に製造されていない場合、異種材料の熱収縮 差によって局所的な応力集中が生じ、座屈が発生する機構を 明らかにするため、1 枚の REBCO 線をアルミニウム合金のカ バーで覆い、拘束点の隙間を変化させて液体窒素温度まで 冷却する要素実験を行い、座屈による劣化が発生する条件及 びその機構を明らかにした[3]。

導体 I。の劣化は導体長手方向に一様に生じているのでは なく、局所的な劣化が複数箇所で起きたためだと結論づけた。 そのことを裏付けるデータとして、導体臨界電流値での電圧 発生の立ち上がりの傾きを示す n 値を、規格化した導体 I。を 横軸としてまとめたグラフを Fig. 2 に示す。 I。劣化が大きかっ た 1 回目及び 3 回目+P.J.の試作導体では、導体の劣化を示 すn値の低下も大きいことが分かる。更にn値と I。には明確な 相関があり、I。劣化を 20 %以下にするためには n 値を 15 以上 に保つことが必要であることが明らかとなった。



Fig. 2. Relation between n value and normalized Ic

- 1. T. Mito et al.; J. Phys. Commun., 4 035009 (2020)
- T. Mito *et al.*; Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.66
- M. Otsuji *et al.*; Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.90

次世代ヘリカル型核融合実験装置への適用をめざした 20 kA級 HTS STARS 導体開発の進展

Progress of the 20-kA-class HTS STARS conductor for the next-generation helical device

<u>柳</u>長門, 寺﨑義朗, 平野直樹, 尾花哲浩 (NIFS); 松永信之介 (総研大); 三戸利行, 田村 仁, 濱口真司, 小野寺優太, 宮澤順一, 成嶋吉朗, 高畑一也 (NIFS); 伊藤 悟, 橋爪秀利 (東北大)

<u>YANAGI Nagato</u>, TERAZAKI Yoshiro, HIRANO Naoki, OBANA Tetsuhiro (NIFS); MATSUNAGA Shinnosuke (SOKENDAI); MITO Toshiyuki, TAMURA Hitoshi, HAMAGUCHI Shinji, ONODERA Yuta, MIYAZAWA Junichi, NARUSHIMA Yoshiro, TAKAHATA Kazuya (NIFS); ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.) E-mail: yanagi@nifs.ac.jp

1. はじめに

次世代のヘリカル型核融合装置のマグネットに大電流容量 の高温超伝導(HTS)導体を適用することを検討している。そ こで、現在、内部構造の異なる3種類の導体を並行して開発 しており、STARS、FAIR、WISE と名付けている。このう ち、STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure)導 体は、多数枚の REBCO 線材を単純に積層して安定化銅ジ ャケットに収納し、外側をステンレスジャケットで補強した構造 である[1]。これはヘリカル型核融合炉 FFHR への適用をめざ して 2005 年頃から開発を始めたものであり、2014 年には 100 kA 級予備試験体を製作して試験を行い、温度 20 K、磁場 5.3 Tにおいて、電流値 100 kA を達成した[1-3]。現在は、断面を 縮小して 20 kA 級で実用となる導体の開発を進めている。

2. 20 kA 級 STARS 導体 3 m サンプルの製作と試験

開発を進めている 20 kA 級 STARS 導体の断面図を Fig. 1に示す。このうち、(a)に示す電気絶縁のないタイプにつ いて 2019 年度に長さ約3mのサンプルを製作した。製作 の最重要点として、ステンレスジャケットにレーザビーム 溶接を施した。試作段階において銅安定化材の内側で溶接 時の温度上昇を測定したところ最高 44℃であり、REBCO 線材の特性には全く問題がないことを確認した。製作され たサンプルについて液体窒素(77K)で冷却して、自己磁 場下での試験を進めた。Fig.2は臨界電流の測定結果であ る。1回目の通電試験で臨界電流約4,000 A を確認した。 これは、線材単線の特性をもとに導体内における電流分布 と自己磁場分布(強度と方向)を正確に考慮して求められ る値に近く、導体の製作方法に問題がなかったことが確認 できた。サンプルの昇温後に2回目の冷却と通電を行った ところ、臨界電流は1%ほど低下した。この原因は現在の ところ不明である。その後、導体に曲げ試験を行い、さら に臨界電流が低下したが、内部の線材に実際に印加された ひずみが可逆範囲内であったため、除荷後は臨界電流は元 の値に復帰した。その後、10回まで昇温、再冷却を繰り返 したが、顕著な臨界電流の低下は認められず、良好な結果 を得た。今後は、ヘリウムガスを用いた冷却(4-50K)を 行い、最大9Tの外部磁場を印加した条件で通電試験を行 う計画である。この際に、電磁力の繰り返し印加を行うこ とが重要な試験項目であり、千回以上を計画している。

3. 20 kA 級内部電気絶縁型 STARS 導体の製作

STARS 導体の設計では、本来、ステンレスジャケット と銅安定化材の間に電気絶縁を入れる仕様としている[1]。 上述のサンプルについては最初の製作であったため、これ を省略した。現在、2本目のサンプルとして、実際に電気 絶縁を入れたサンプルの製作を並行して行っている。この サンプルについても、改めて、液体窒素冷却における通電 試験や、その後のヘリウム冷却・高磁場導体試験を行うこ とを検討している。



Fig. 1 Cross-sectional layout of the 20-kA-class HTS STARS conductor (a) without and (b) with internal electrical insulation.



Fig.2 Results of critical current measurement: (a) Voltage signal obtained over 2.1 m of voltage-tap length as a function of the applied sample current. (b) Variation of the measured critical current value on the cooling cycle.

- [1] N. Yanagi et al.: Nucl. Fusion 55 (2015) 053021.
- [2] Y. Terazaki et al.: IEEE Trans. Appl SC. 24 (2014) 4801305.
- [3] S. Ito et al.: Fusion Eng. Des. **136** (2018) 239.

高温超電導スケルトンサイクロトロンにおける可変出力エネルギーを考慮した 遮蔽電流磁場の数値解析

Numerical evaluation of screening current-induced magnetic field considering variable output energy in HTS coil system for Skelton Cyclotron

<u>白井 航大</u>,緒方 隆充,石山 敦士 (早稲田大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北海道大); 渡部 智則,長屋 重夫 (中電); 福田 光宏 (阪大) <u>Kodai SHIRAI</u>, Takamitsu OGATA, Atsushi ISHIYAMA(Waseda Univ.); Hiroshi UEDA(Okayama Univ.) ; So NOGUCHI(Hokkaido Univ.) ; Tomonori WATANABE, Shigeo NAGAYA(Chubu Electric Power Co., Inc.); Mitsuhiro Fukuda(Osaka Univ.) E-mail: shirakou-0918@akane.waseda.jp

1. はじめに

我々は、α線放出 RI(²¹¹At)を安定的に製造・供給できる超 小型・高強度出力に加え、エネルギー可変で多目的使用を可 能とする次世代加速器の実現を目指して、無鉄心の REBCO コイルシステムを用いた高温超電導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⁾。出力エネルギー可変 に伴う多機能化が実現できれば、1 台の装置でα線核医学治 療用²¹¹At の製造だけでなく、PET 用 RI 製造や BNCT 用中 性子照射も可能になる。HTS-SC では粒子加速面において、 空間的・時間的に高精度な磁場が要求されるが、REBCO 線 材に誘導される遮蔽電流に起因する磁場が、発生磁場の質 を悪化させてしまう。そこで、HTS-SC の小型実証用モデルで ある、Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron(UBSC)を試作し、電磁 的・熱的・機械的振る舞いを確認する予定である。

本研究では、UBSC を対象に、出力エネルギー可変時の遮 蔽電流の振る舞いを数値計算し、遮蔽電流磁場による不整磁 場の影響評価を行った。

2. 解析対象及び解析手法

Fig.1 に示す、円形のメインコイルと非円形のセクターコイル からなる小型実証用スケルトンサイクロトロン(2021 年度試作・ 2022年度実験予定)を解析対象とした。解析手法として、我々 が開発した3次元非線形電磁界解析プログラムを用いた⁽²⁾。

3. 解析結果

今回、出力エネルギーとして、5MeV、4MeV、2.5MeV の 3 つの段階を想定し、それに対応する 540A、483A、382A を運 転電流とした。Fig.2(a),(b)に本解析の励磁パターンを示す。 各段階の通電電流は、(a):540A-483A-382A、(b):382A-483A-540A でそれぞれ励磁及び減磁速度 1A/s、各段階で 7200s ホールドしたものを 3 サイクルにわたって解析を行い、 粒子加速面における遮蔽電流磁場による不整磁場の影響評 価を行った。同図に、粒子の取り出し半径である半径 0.2m に おける周方向遮蔽電流磁場値を示す。また、Fig.3 に、通電電 流と遮蔽電流磁場の関係を示す。Fig.3 から、2 サイクル目以 降は、ほぼ一定のループとなっていることがわかる。また、 Fig.2 及び Fig.3 から、(a)と(b)の1 サイクル目を比較すると、(b) の励磁パターンの方が遮蔽電流磁場の変化が大きく出ている。 磁場の時間安定度の点から、(a)のようにはじめに電流の最大 値まで励磁した方がより磁場の時間安定度が高いと言える。

本研究の一部は、科研費基盤研究 S(18HD5244)に依った。 参考文献

(1)H.Ueda, et al.; *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23, 4100805 (2013)
(2) H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23, 4100205 (2013)







Fig.2 Excitation pattern and time variation of the screening current-induced field at the extraction radius of 0.2m



Fig.3 Exciting current vs. screening current-induced field at the extraction radius of 0.2m

斜め磁場中の十字形ジョセフソン接合における特異な臨界電流特性 Anomalous critical-current properties of cross-type Josephson junctions in oblique magnetic fields

<u>馬渡 康徳</u> (産総研) <u>MAWATARI Yasunori</u> (AIST) E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

ジョセフソン接合における直流臨界電流に関して、接合面 に平行に磁場を印加した場合、臨界電流の磁場依存性にフ ラウンホーファー型の干渉パターンが現れることが知られてい る[1]。しかし、接合面に垂直磁場を印加した場合の臨界電流 に関する研究は少なく[2-4]、特に斜め磁場中の臨界電流の 振舞は明らかではない。

本研究では、超伝導膜により挟まれた面状のジョセフソン 接合において、平行および垂直磁場の影響をともに考慮し、 ゲージ不変位相差の静的な2次元分布について理論解析を 行った。2枚の超伝導ナノストリップを十字形に重ねた小さい 接合における直流臨界電流を求め、その直流臨界電流は特 異な磁場依存性を示すことを明らかにした。

2. 超伝導ナノストリップによる十字形ジョセフソン接合

2 枚の超伝導ストリップを Fig. 1 のように十字形に重ねた 接合について考察する。超伝導ストリップの厚さ d_s は磁場侵 入長 λ より薄く、かつストリップ幅 w は Pearl length λ^2/d_s より 狭いものとし、超伝導ストリップの磁気遮蔽効果は十分小さい 場合を考える。超伝導ストリップにより挟まれた弱結合(障壁) は、2 枚の超伝導ストリップの交差した領域と同一の正方形の 面 $w \times w$ をもち、その厚さは d_j である。この接合のサイズ w は Josephson length λ_j より小さいものとし、接合の磁気遮蔽効果 や自己磁場の効果も十分小さい場合を考える。

このような、「薄くて狭い」超伝導ストリップで挟まれた、「小さい」接合におけるゲージ不変位相差 $\theta(x,y)$ の 2 次元分布は、任意の方向に印加された一様な磁場 (B_x, B_y, B_z) に対して簡潔な表式で与えられる。

接合を通過するジョセフソン電流密度は $J_c \sin\theta$ で与えられ、 J_c はジョセフソン臨界電流密度である。これを接合面 -w/2 < x, y < +w/2 で積分した正味の電流の最大値として、直流ジョセフソン臨界電流 I_c が求められる。

3. 直流ジョセフソン臨界電流の磁場依存性

x, y, および z 方向の磁束を、それぞれ

$$\Phi_x = B_x (d_i + d_s) w \tag{2}$$

$$\Phi_y = B_y (d_j + d_s) w, \tag{3}$$

$$\Phi_z = B_z \, w^2 \tag{4}$$



Fig. 1: Schematic of a cross-type Josephson junction: superconducting strips of width w and thickness d_s , and barrier layer of area $w \times w$ and thickness d_j .

と定義し、十字形ジョセフソン接合における直流臨界電流を、 これら磁束の関数として、 $I_c(\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z)$ と表す。ゼロ磁場に おける臨界電流は、 $I_{c0} = I_c(0,0,0) = J_c w^2$ である。磁場方 向が yz 面内にある($\Phi_x = 0$)場合の臨界電流 (I_c は対数表示) の磁場依存性を Fig. 2 に示す。

Fig. 2(a) は、垂直磁場 Φ_z をパラメータとする I_c の平行 磁場 Φ_y 依存性である。 $\Phi_z = 0$ の場合は、よく知られた干 渉パターン $I_c(0, \Phi_y, 0)/I_{c0} = |(\phi_0/\pi\Phi_y)\sin(\pi\Phi_y/\phi_0)|$ で ある[1]。垂直磁場 Φ_z を増加させると、その干渉パターンが 大きく変調されることがわかる。特に、 Φ_z/ϕ_0 が 0, 1, 3, 5,... の場合と 2, 4, 6,... の場合の振舞に大きな相違が見られる。

Fig. 2(b)は、平行磁場 ϕ_y をパラメータとする I_c の垂直 磁場 ϕ_z 依存性である。 $\phi_y = 0$ の場合は、積分正弦関数 Si(z) を用いて $I_c(0,0,\phi_z)/I_{c0} = |(\phi_0/\pi\phi_z) \operatorname{Si}(\pi\phi_z/\phi_0)|$ で 与えられ、 I_c は ϕ_z とともに単調に減少する[4]。しかし、平行 磁場 ϕ_y の効果により、 I_c vs ϕ_z にも $|\phi_z|$ が小さい領域に 干渉パターンが現れる。



Fig. 2: Magnetic field dependence of the Josephson critical current: (a) I_c vs parallel field Φ_y , and (b) I_c vs perpendicular field Φ_z .

- A. Barone and G. Paterno, *Physics and Applications of the Josephson Effect* (Wiley, New York, 1982).
- [2] I. Rosenstein and J. T. Chen, Phys. Rev. Lett. 35, 303 (1975).
- [3] A. F. Hebard and T.A.Fulton, Phys. Rev. Lett. 35, 1310 (1975).
- [4] S. L. Miller, K. R. Biagi, J. R. Clem, and D. K. Finnemore, Phys. Rev. B 31, 2684 (1985).

Bi-2212 ウイスカ十字接合からの THz 発振

THz emission from Bi-2212 cross-whisker junction

<u>高野 義彦</u>, 齋藤 嘉人(NIMS, 筑波大) <u>TAKANO Yoshihiko</u>, SAITO Yoshito (NIMS, Univ. of Tsukuba) E-mail: takano.yoshihiko@nims.go.jp

1. はじめに

銅酸化物高温超伝導体の固有ジョセフソン接合(IJJ)を利 用したテラヘルツ発振器[1]は、量子カスケードレーザーや共 鳴トンネルダイオードに次ぐ小型テラヘルツ発振源として注目 されている。IJJ によるテラヘルツ発振素子の発振パワーの増 強、周波数の向上に向けて、発振素子の形状や冷却性能の 向上や新規材料の探索など、さまざまな研究開発が行われて きた。これまでに開発されてきたIIJによるテラヘルツ発振素子 は、基本的に全て Bi 高温超伝導体単結晶をメサ状に微細加 工した構造であり、単結晶育成や微細加工にノウハウが不可 欠であり、より簡便な IIJ テラヘルツ発信器が求められている。

2. 方法

そこで我々は最も簡便な固有ジョセフソン接合であるウイ スカ十字接合をベースにしたテラヘルツ発信器の開発に取り 組んだ。Bi-2212 ウイスカ十字接合[2]は、ウイスカが MgO 基 板に密着しているため排熱に優れており、ウイスカ上に作製さ れた発振素子の冷却効率は既存の素子と比較して有利であ り、結果的に高バイアスの印加が可能になると考えられる。加 えて、ウイスカそのものがアンテナのエレメントとして機能し、 指向性を持つ発振素子を実現できる等の可能性秘めている。 また、Bi-2212 ウイスカの育成は、乳鉢と電気炉さえあれば可 能であり、大型の単結晶育成装置や高度な育成技術を必要 としないこともメリットである。

3. 結果

我々は、まず長尾らが開発した Te-dope 法[3]によってウイ スカ結晶を育成した。幅約 30μm のウイスカを二本 MgO 基板 の上に 90°交差して置き、酸素気流中で 850℃30 分間アニ ールしウイスカ十字接合を作製した。

図1に、作製したウイスカ十字接合のSIM像をす。長手方向の共振をねらい接合数を増やし発振強度を増すために、 FIBにより下部ウイスカに切り込みを入れた。図2に素子断面 図を示す。上部電極にあたる上部ウイスカは超伝導接合して いること、さらにMgO基板との密着性が良いことから高い排熱 性が期待される。図3に電流を印加したウイスカ十字接合の IV特性とボロメータの反応が示す。ボロメータから明瞭な応答 を観測し我々はウイスカ十字接合からのテラヘルツ発振の観 測に初めて成功した。FT-IR分光器によるスペクトルから発振 周波数は、約700GHzであることが分かった。

参考文献

- 1. L. Ozyuzer, et al., Science 318, 1291 (2007).
- 2. Y. Takano et al., Phys. Rev. B 65, 140513 (2002).
- 3. M. Nagao et al., Appl. Phys. Lett. 79, 2612 (2001).



図 1. ウイスカ十字接合の SIM 像



図 2.素子の断面構造の模式図



図 3. ウイスカ十字接合からのテラヘルツ発振特性

— 35 —

光子数検出器アレイ用 NbN 集中定数力学インダクタンス検出器の マイクロ波応答

Microwave response of NbN Lumped–Element Kinetic Inductance Device for Photon–Number Resolving Detector Array

栄元 雄山, 寺井 誠, 成瀬 雅人, 田井野 徹, <u>明連 広昭</u>(埼玉大院理工) EIMOTO Yusan, TERAI Makoto, NARUSE Masato, TAINO Tohru, and <u>MYOREN Hiroaki</u> (Saitama Univ.) E-mail: y_eimoto@super.ees.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

生体試料に導入された蛍光物質からの蛍光を時間相関 分光することにより、蛍光物質の周りの生体試料の情報を得る ことができる。中赤外領域での測定が可能で光子数検出可能 なイメージング検出器として、光学 LEKID アレイを検討してい る[1,2]。入力に光ファイバーアレイを用いることを前提に検出 器の間隔を250 μmとして LEKID を設計し、コプレーナ線路を 用いたマイクロ波読み出しによる基礎的な応答を測定した。

講演ではさらに詳細な設計およびマイクロ波領域での共振特性などを詳しく報告する。

2. 光学 LEKID アレイの設計

光学 LEKID アレイの 1 素子分の設計レイアウトを図 1 に示 す。入力をシングルモードの光ファイバーアレイとし250 µm間 隔で配置することを仮定して、16 µm×80µmのミアンダ型のイ ンダクタ L を光検出部、幅 154 µm,高さ 30 µm のインターデ ジタル型のコンデンサ C と接続した集中定数形 LC 共振器を 構成し、図の下部に配置されたコプレーナ線路と結合する。



図 1 LEKID1 素子分の設計レイアウト

ミアンダ型のインダクタは、厚さ20 nm、幅 500 nm の NbN ナノ ワイヤで形成され、主に力学的インダクタンスによる1 µm□当 たり 14pH 程度のインダクタンスを仮定して設計した。それぞ れの LEKID の共振周波数を変えるために、インターデジタル 型のコンデンサの容量を変化して設計した。 これにより、2.0 ~5.0 GHzの間で共振ピークを持つように 12 個の LEKID を 設計し、コプレーナ線路の中心部に配置した。

3. 素子の作製

NbN 薄膜は、MgO(100)単結晶基板上に室温で Ar と N2の 混合ガス中で直流スパッタリング法にて堆積した。 微細加工 は、電子ビーム描画法とフォトリソグラフィ法を用いて行った。

4. 測定結果

作製したLEKIDのマイクロ波領域でのマイクロ波透過特 性は、0.5 Kに到達可能な無冷媒冷凍機を用いて測定した。 測定の結果、2.18 GHz~4.18 GHzの間で11つの共振ピーク が観測れた。共振ピークを観測できなかった素子は明らかな 欠陥を生じていた。1Kで観測したQ値は約38400~209000と 比較的良好な値を示した。測定結果より、力学インダクタンス を決定するロンドンの磁場侵入長λ₀はλ₀=463nmとなった。



図2 共振ピーク温度変化



図2に、た3.828 GHz付近に現れる共振ピークの温度変化 を示す。温度上昇に伴い、一旦共振周波数が上昇したのち 減少に転じる。酸化物基板表面の2レベルシステム(TLS)の影 響を加味したMattis-Bardeen理論による複素伝導率の虚部 の温度依存性の曲線と共振周波数の温度依存性の比較[3] を図3に示す。 パラメータフィッティングから、NbN薄膜の超 伝導転移温度は17.5Kと見積もられたが、これは温度計と素 子温度の不一致によると考えられる。また、インダクタンスはほ とんど力学インダクタンスで与えられることが示唆された。さら に、2 K以下での共振周波数の上昇はTLSの影響であると考 えられる。

5. まとめ

膜厚20 nmのNbNナノワイヤを用いたLEKIDを作製し、共振 ピークの観測を行った。温度変化による共振の変化から、超 伝導転移温度をNbN薄膜の膜厚により調整することにより中 赤外光の単一光子検出が期待できることが示唆された。

- S. Doerner, A. Kuzmin, K. Graf, I. Charaev, S. Wuensch, and M. Siegel, Journal of Physics Communications, vol. 2, no. 2, p. 025016, 2018.
- B. A. Mazin et al., Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 125, no. 933, pp. 1348–1361, 2013.
- 3. R. Barends et al., Appl. Phys. Lett., vol.92, p. 223502, 2008.

多接合 SQUID を用いたアナログ回路による高速なフーリエ変換 Rapid Fourier transform by using superconductor circuits with multiple SQUIDs

野田礼華,山梨裕希,吉川信行(横浜国大)

NODA Raika, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.) E-mail: noda-raika-vx@ynu.jp

1. はじめに

情報化の進む近代の社会において、半導体集積回路 (CMOS 回路)はコンピュータの構成において至るところ で使われている.特にコンピュータ上で行われるフーリ エ変換を用いた演算処理はデジタル信号処理の分野で広 く用いられている.このフーリエ変換を行うために半導 体集積回路を用いたプロセッサの開発が進んできた.し かし、半導体集積回路は微細加工技術の限界や消費電力 の増大,計算時間の長さといった問題があり、性能に限界 を迎えつつある.[1]

そこで、半導体集積回路に代わる高速かつ低消費電力 性に優れた超電導回路が注目されている。超電導素子に 用いられる Josephson 接合では、接合部に印加される磁 束密度と、ゼロ電圧状態で流れる Josephaon 電流の最大 値(しきい電流)はフーリエ変換の関係にある。この性質を 応用することでフーリエ変換をアナログ回路で行うこと が期待できる。本研究では、多接合 SQUID を用いること により、外部からの制御が可能なフーリエ変換を行う回 路を提案する。その回路のシミュレーションを行い、動作 の確認を行った。

2. しきい電流特性

方形な Josephson 接合に並行な磁束密度 Bが印加されると超電導極間の位相差 θ が空間的に変化する. そのため, Josephson 電流密度も空間的に変化する. 接合に流れることができる全 Josephson 電流は電流密度を接合面で積分した量であり,次式で与えられる.

$$I_{max} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} J_c(x) e^{i\beta x} dx \right|$$
(1)

ただし, J_c は接合の電流密度を磁界方向に積分した値で あり、 $\beta = \{2e(d+2\lambda)/\hbar\}B, d$ は接合の絶縁体膜厚、 λ は ロンドンの磁気侵入長である.(1)より,接合を流れる最 大電流は,接合の Josephson 電流分布のフーリエ変換に 等しいことがわかる.

3. 多接合 SQUID の回路構成

一般的に Josephson 接合は一度設計したらその電流 密度を変えることが難しい. そのため, Fig. 1 に示すよう に多数の dc-SQUID を並列に接続した回路を考える.各 dc-SQUID に流れる最大電流 I_{n} は外部からのコントロー ル電流 I_{cn} によって制御できるため、Josephson 接合の臨 界電流値を空間的に任意に変化させることができる.こ の回路を用いて dc-SQUID の最大電流 I_{n} をコントロール 電流 I_{cn} の制御によって設定し、多接合 SQUID の外部磁 場に対するしきい値特性のシミュレーションを行った.

4.7点余弦波入力のシミュレーション結果

7 個の dc-SQUID アレイでは 7 点の入力信号に対する 応答を調べることができる。7 点の *I*_nについて擬似的な 余弦波分布を生成し,そのしきい値特性をシミュレーシ ョンにより求めると Fig. 2 が得られた。このミュレーシ ョン結果から,外部の電流によって各 dc-SQUID に流れ る最大電流を制御し,多接合 SQUID のしきい電流から7 ーリエ変換が正しく得られることが確かめられた。

参考文献

- T. Ono, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 27, No.4 (2017) 1301505.
- 2. T. Van Duzer and C. Turner: "Superconductive Device and Circuits," 1999, Prentice-Hall Inc., p. 177.



Fig. 2 Dependence of the threshold current of a seven dc-SQUID array on the external magnetic flux. The maximum critical current of each dc-SQUID is set to $I_{T1} = 76 \ \mu\text{A}, I_{T2} = 142 \ \mu\text{A}, I_{T3} = 184 \ \mu\text{A}, I_{T4} = 200 \ \mu\text{A}, I_{T5} = 184 \ \mu\text{A}, I_{T6} = 142 \ \mu\text{A}, \text{ and } I_{T7} = 76 \ \mu\text{A}.$



Fig. 1 Schematic of a multiple SQUID array

断熱量子磁東パラメトロン回路におけるゲート間配線高密度化の検討 Investigation of high density gate-to-gate wiring in adiabatic quantum-flux-parametron circuits

<u>高橋</u>大地,竹内 尚輝,鈴木 秀雄,山梨 祐希,吉川 信行(横浜国立大学) <u>TAKAHASHI Daichi</u>, TAKEUCHI Naoki, SUZUKI Hideo, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU) E-mail: takahashi-daichi-ms@ynu.jp

1. はじめに

現在広く使われている CMOS を用いた半導体集積回路は、 微細加工技術の発展に伴いその集積度や動作速度を向上さ せてきた。しかしながら、今日では微細化の限界や消費電力 及び発熱量の増大、配線遅延等の問題により今後の継続的 な発展が困難であると考えられている。これに対し、超電導集 積回路は高速動作性や低消費電力性に優れ、CMOS に代わ る次世代のデバイスとして研究されている。中でも断熱量子 磁束パラメトロン(Adiabatic Quantum-Flux-Parametron: AQFP) 回路[1]は CMOS と比べ数桁低い低消費電力性を特徴とし、 AQFPを用いることで低消費エネルギーな LSIを構築すること ができる。本研究では、AQFP のゲート間配線に用いるストリッ プラインの構造を変更することによる配線の高密度化を提案 する。提案する配線構造について、シールド効果の検討を行 った。

2. AQFP のゲート間配線

AQFP のゲート間配線は、Fig.1 のように M1 層をグラウンド 層とM2 層でシールドしたストリップライン構造となっている。現 在 AQFP の配線に用いられている構造では、Fig.2 (a)のように wall 型の積層コンタクトによってグラウンド層と M2 層を接続し ている。配線幅は 5 μ m,積層コンタクトも含めた配線セル全 体の横幅は 10 μ m である。今回提案する配線構造では、 Fig.2 (b)のように pillar 型の積層コンタクトを一定の間隔で配 置し、グラウンド層と M2 層を接続する。これにより、配線セル 全体の横幅を 8.5 μ m に削減できる。また、隣り合う配線のコン タクトを共有することで、配線同士の間隔を 7 μ m に削減する ことができる。

3. シールド効果の検討

長さ100 µmの2本の平行な配線を仮定して配線同士のカ ップリングをシミュレートした。配線間の距離 dと結合係数の関 係を Fig.3 に示す。コンタクトの間隔を 50 µm 及び 25 µm とし た場合と、wall 型のコンタクトを用いた場合、シールドしないマ イクロストリップラインを用いた場合での結合係数を比較した。 Fig.3 に示すように、コンタクトの間隔が狭いほどシールド効果 は高くなる。ただし、コンタクトの間隔を狭くすると、単位長さ当 たりのインダクタンスが大きくなる。コンタクトの間隔が 50 µm の場合もシールドしていないときと比べ結合係数が十分小さく なり、提案する配線構造はシールド効果が十分にあると言え る。

4. まとめ

AQFP のゲート間配線の構造について検討を行った。提案する配線構造では、配線セル全体の横幅を15%, 隣り合う







Fig. 2 (a) Conventional stripline and (b) proposal stripline for AQFP gate-to-gate wiring



Fig. 3 Coupling factor as a function of the distance between wires

配線同士の距離を30%削減することができる。コンタクトの間 隔を狭くするとカップリングは小さくなるが、単位長さ当たりの インダクタンスが大きくなる。コンタクトの間隔が50μmの場合 でも、シールドしない場合と比べて結合係数は十分小さくなる ことを確認した。

参考文献

 N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device," Supercond. Sci. Technol., 26, 035010

断熱量子磁束パラメトロン回路の配置最適化と配線インダクタンス最適化による集 積性の改善

Improvement of integration density of diabatic quantum-flux-parametron circuits by optimization of placement and routing inductance

<u>田中 智之</u>, Christopher L. Ayala, 吉川信行(横浜国大) <u>TANAKA Tomoyuki</u>, Christopher L. AYALA, Yoshikawa Nobuyuki (YNU) E-mail: tanaka-tomoyuki-wy@ynu.jp

1. はじめに

近年の情報化社会は、半導体集積回路が牽引してきた。しかし、近年加工寸法は数 nm におよび、スケーリング則の限界を迎えつつあり、さらなる性能向上を満たすことが難しくなっており、CMOS に代わる集積回路技術が必要である。

これを踏まえて、我々は断熱量子磁束パラメトロン (adiabatic quantum-flux-parametron; AQFP) に注目し、研 究を行っている。AQFP 集積回路は、CMOS 集積回路に比べ、 6 桁程度の低い消費電力で動作し、5~10 GHz 程度で駆動 できるという利点がある[1]。AQFP 回路を用いることで、省エ ネルギーで高速な計算器を構築できる。

AQFP 回路には、伝搬可能な距離が、800 µm と短いという問題がある。長距離の信号伝搬には、リピータを挿入し、電流増幅が必要で、回路面積、レイテンシが増加する。この問題を解決するために 2 つの異なるアプローチで取り組んできた。

1 つ目は、論理セルの配置を入れ替え、端子間の長さを短 くすることでリピータの挿入を減らす方法である。遺伝的アル ゴリズムを用いて実装した。2 つ目は、配線距離が線路中のイ ンダクタンスによって決まることに着目し、太い配線を用いて、 配線限界を伸ばし、リピータの挿入を減らす方法である。異な る配線幅を同じチャネル領域で扱える Glitter チャネル配線法 を用いて実装した。

これまでに、2 つの手法のそれぞれでリピータの挿入を削 減できることを確認したため、本発表では、配置最適化と、信 号線のインダクタンス最適化の両方を同時に行うことで、更に リピータの挿入を削減する方法について報告する。

2. 遺伝的アルゴリズムによる配置最適化

チャネル配線領域を挟み、上下に配置される AQFP 論理 セルの順序を適切に決めることで、配線長を短くでき、リピー タを削減できる[2]。 Fig.1 に例を示す。また、チャネル領域 のトラック数が削減できるため、回路面積の削減も期待できる。 探索には、遺伝的アルゴリズムを用い、下側のセルの順番を 遺伝子として変化させ、探索を行った。



Fig.1 By optimizing the placement of logic cells, we can shorten the wiring length and channel area.

3. Glitter 配線法を用いたインダクタンス最適化

AQFP 回路の伝搬距離は、線路のインダクタンスによって 決まり、おおよそ 50 pH が最大値である。長さあたりのインダク タンスは、線路の幅を広げることで削減可能である。Glitter を 用いることで、幅の異なる配線を同一のチャネル領域に配置 可能で[3]、各配線が 50 pH に近づくように最適化するプログ ラムを作成した。Fig.2 に例を示す。これにより、配線長に余 裕のある配線には細い配線が、長い配線には太い配線が割 り当てられ、回路面積の増加を抑えつつ、長距離の配線が可 能になり、リピータの削減に成功した。

4. 配置最適化とインダクタンス最適化の組み合わせ

これまでに作成した、遺伝的アルゴリズムの適応度(評価 関数)は、チャネル内の配線の長さの総和の逆数を用いて計 算していた。しかし、配線幅が可変になり、長さに対して自由 度が増したため、新たな適応度関数の定義が必要になった。 特に、チャネル内の同時に水平方向に配線する配線の数に 対するパラメータが必要である。この数が多いと、インダクタン ス削減のために配線幅を広げたとき、他の配線の長さが伸び てしまい、その配線幅を広げる必要があるからである。

適応度関数をいくつか定義し、その違いにより出力される 解の結果や、計算時間について評価した。詳細については 発表にて報告する。

- N. Takeuchi, et al., Supercond Sci. Technol., Vol. 26, no 3, 035010 (2013)
- T. Tanaka, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, pp. 1-6, (2019)
- H. H. Chen, et al., IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 5, no. 4, pp. 459-465, (1986)



Fig.2 Wide wires are used for long wires to reduce the inductance, and narrow wires are used for short wires to prevent increased area.

YBa2Cu3O7-&薄膜を用いた力学インダクタンス検出器の開発

Development of $YBa_2Cu_3O_{7\mathchar`-\delta}$ –based microwave kinetic inductance detectors

三上光瑠,林幹二,飛沢健,田中三郎,有吉誠一郎 (豊橋技科大);中島健介 (山形大)

H. Mikami, K. Hayashi, T. Hizawa, S. Tanaka, S. Ariyoshi (Toyohashi Univ. of Technol); K. Nakajima (Yamagata Univ) E-mail: mikami.hikaru.yv@tut.jp, ariyoshi@tut.jp

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 波は、0.1~10 THz の周波数帯(波 長:3 mm~30 µm) に位置する電磁波であり、高空間分 解能でありながら人体に無害であるため、非破壊・非 侵襲イメージングへの応用が期待されている。量子型 検出器である力学インダクタンス検出器(MKID)は、 周波数分割多重化方式により単一の読み出し線から THz 波入射による信号の全画素同時読み出しが可能で ある[1]。

我々は超伝導転移温度(T_c)が最高93Kに達する高 温超伝導体 YBa₂Cu₃O₇₋₈(YBCO)に着目し、液体窒素 温度以上で簡便動作が可能なMKIDの実現を目指して いる。本研究では、電磁界解析による設計、および YBCO 製 MKID の作製と評価を行った。

2. 実験方法

まず、電磁界シミュレータ Sonnet Lite を用い、Fig.1 に示す Rewound 型の YBCO 製 MKID の解析を行った。 モデルとした MKID 1 画素は、コプレーナ導波路 (YBCO/MgO)の線幅 40 µm の読み出し線と全長 12.24 mm の 1/2 波長共振器から構成されている。解析 条件は、周波数範囲 1~10 GHz、基板厚 500 µm、比誘 電率 9.7、解析空間サイズ 5000 µm × 5000 µm、シー トインダクタンス Ls = 1.0 pH/sq、薄膜の交流抵抗 Rs = $4.9 \times 10^{-29} \Omega$ Hz⁻²/sq [2] とした。

次に、反応性 RF マグネトロンスパッタリング法を 用いて格子定数と結晶構造が YBCO と比較的近い MgO (100) 基板上で均一に 200 nm 堆積させた。加え て YBCO 薄膜の転移温度を4端子法で測定し、X線回 折や SEM 観察による評価を行った。その後、YBCO 層 に全 25 画素の Rewound 型スパイラル共振器、および 1 本の読み出し線からなる MKID アレイを形成した。 パターンの形成にはポジレジストを用いたフォトリソ グラフィーおよび Ar イオンミリング装置を用いた。

最後に、作製した MKID を ⁴He 冷凍機(最低到達温 度~3K)に設置し、ベクトルネットワークアナライザ を使用して共振特性を評価した。

3. 実験結果

電磁界解析の結果を Fig.2 に示す。共振器部の線間 隔 s を固定 (10 μ m) のもとで線幅 w を変化 (40 \rightarrow 10 μ m) した時の共振周波数は約 9%低周波数領域へシフ ト (5.33 \rightarrow 4.83 GHz) し、透過強度 (S₂₁) は 0.74 倍、 負荷 Q 値 (Q_L) は 4.8 倍となった。一方、w を固定 (10 μ m) のもと s を変化 (40 \rightarrow 10 μ m) したときの S₂₁ は 0.71 倍、Q_L は 6.3 倍となることがわかった。

また、基板上に成膜した 200 nm 厚の YBCO 薄膜に 対して、4 端子法を用いて抵抗-温度曲線を取得した ところ、*T*_cは約 84 K という比較的良好な値を示した。

最後に、作製した MKID アレイ (w, s = 10 μ m) を約 10 K で冷却評価した結果、25 画素平均で負荷 Q 値 1200 (σ = 490)、 透過強度 (S₂₁) 9 dB (σ = 3 dB) となり、 共に解析結果の約 1/3 の値を示した。



Fig.1. Analysis model of a rewound type resonator



Fig.2. Dependences of S₂₁ and Q_L on line width and space of rewound type resonators

4. まとめ

本研究では、Rewound 型の共振器形状に着目し、 YBCO 製 MKID の電磁界解析を行った。その結果、 MKID の線幅・線間隔の変化による負荷 Q 値と透過強 度の依存性を明らかにした。

作製した YBCO 製 MKID の温度依存性や解析結果 との比較の詳細は講演にて報告する。

参考文献

[1] P. K. Day, et al. Nature 425 (2003), 817.

[2] J. R. Delayen, et al. IEEE Trans. Magn. 27 (1991), 1532.

— 40 —

NMR 装置のための結合共振器を用いた 超伝導ピックアップコイルの開発 Development of high temperature superconducting pickup coil constructed with coupled resonators for NMR

藤田 貴紀, 關谷 尚人(山梨大);豊島 克幸, 田中 良二(株式会社 JEOL RESONANCE);大嶋 重利(山形大)
 FUJITA Takanori, SEKIYA Naoto (University of Yamanashi); TOSHIMA Katsuyuki, TANAKA Ryoji (JEOL RESONANCE Inc.);
 OSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)
 E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

man: nsekiya@yamanasm.ac

1. はじめに

現在,高い SN 比をもつ NMR 装置が要求されている. その改善方法の一つに高温超伝導体を用いてピックアッ プコイルを作製する方法がある. ピックアップコイルに は高い無負荷 Q 値 (Q₀) とサンプル領域(測定対象とす る空間)において均一な RF 磁場が要求される. 過去に 我々のグループは Fig. 1(a)に示す 1 ターンコイルを対面さ せて配置したヘルムホルツコイルを提案し, 10,000 を超 える Q₀を実現した[1]. しかし,電流が共振器の上部に集 中するため RF 磁場に偏りが生じ,サンプル領域で RF 磁 場を均一にすることができなかった. そこで,本研究で は Fig. 1(b)に示すように 2 つの半波長共振器を結合させた 共振器を対面させてヘルムホルツコイルとすることで, サンプル領域において均一な RF 磁場を実現したので報告 する.

2. 提案するピックアップコイルの設計

提案するピックアップコイルは 2 つの半波長共振器を 結合させ、それを対面させて用いるため、計 4 つの共振 器から構成される.4つの共振器を結合させると4つの共 振モードが発生することを確認した.また各共振器を流 れる電流の方向が各モードで異なるため、サンプル領域 でRF磁場が均一となるモードを選択しなければならない. 設計には3次元電磁界シミュレータを使用し、各モード の磁界分布を解析することで、サンプル領域でRF磁場が 均一になるモードを選択した.今回は最も低周波なモー ドで均一なRF磁場が発生した.最終的に設計した結合共 振器をFig.2(a)に示す.詳しい設計方法は当日述べる.

3. 提案するピックアップコイルの作製・評価

Fig. 2(a)に示す結合共振器をフォトリソグラフィとイオ ンミリングを用いて二つ作製し,それらを対面させるこ とでヘルムホルツコイルとした.厚さ0.5 mmのサファイ ア基板上に,超伝導薄膜(YBa2Cu3Oy)を成膜した.そ の後,反射特性と Z 軸方向の RF 磁場分布を測定した. Fig. 2(b)の反射特性から算出された無負荷 Q 値は約 30,000 であった.Fig. 3 に従来構造と提案する結合共振器を用い たヘルムホルツコイルの Z 軸方向における RF 磁場分布を 示す.Fig. 3 より,結合共振器を用いることでサンプル領 域における RF 磁場の均一度が従来構造に比べ大幅に向上 し,サンプル領域で目標とする 15 %以内の変動に抑える ことを達成した.

4. まとめ

結合共振器を用いてヘルムホルツコイルを開発することで高Q値かつ高いRF磁場の均一度を有するピックアップコイルを実現した.今後は開発したコイルを使用し,実際に試料のNMR測定を行う.

参考文献

 K. Koshita, et al IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 3, 1500104, 2016.



Fig.1 Schematic of (a) One-turn coil and (b) square coupled resonator







Fig.3 Measured RF magnetic field profile along z axis at center of Helmholtz coil with coupled resonators and with one- turn coils

局地磁束バイアスを用いた単一磁束量子メモリシステムの設計と動作検証

Design and operation verification of single flux quantum memory system by using local magnetic flux bias technique

<u>浅田 峻汰</u>, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国立大学) <u>ASADA Shunta</u>, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Natl. Univ.) E-mail: asada-shunta-sw@ynu.jp

1. はじめに

超伝導回路を高性能化する手段のひとつに超伝導位相 シフタを用いることが挙げられる。超伝導位相シフタとは超伝 導体中の巨視的波動関数の位相をシフトする素子である。こ の素子を超伝導回路に導入することで回路動作の安定化や 位相シフトによる省面積化、バイアス電流の削減といった効果 が期待できる[1]。先行研究では位相シフタとして π-ジョセフ ソン接合[2]や磁性体パタン[3]、位相バッテリー[4]、受動位相 シフタ[5]を用いた研究が行われている。π-ジョセフソン接合 や磁性体パタン、位相バッテリーは回路作製が困難という問 題がある。また、受動位相シフタは回路冷却中に回路内部に 電流を流す必要がある。本研究では磁束量子を蓄えるストレ ージループに磁束を印加することによって位相シフトを実現 する局地磁束バイアスという方法を用いた。この方法は回路 作製プロセスの変更や、回路冷却時の操作をすることなくチッ プ上に配置された 1 本の磁束バイアス線に電流を流すこと によって、チップ上のあらゆる回路部で位相シフトをすること ができる。本研究では、局地磁束バイアスを用いた単一磁束 量子相補出力 Non Destructive Read-Out (NDROC) を用い てデコーダを構成しメモリシステムの省面積化、低消費電力 化を図った。

2. 局地磁束バイアスを用いた NDROC

本研究では、局地磁東バイアスを用いた NDROC を設計 し正常動作を確認している。Fig. 1 に局地磁東バイアスを用 いた NDROC の顕微鏡写真を示す。回路作製プロセスは産 業総合研究所の 10 kA/cm² Nb HSTP プロセスである。局地 磁東バイアスを用いた NDROC のジョセフソン接合数は 15 個、回路面積は 40 × 120 μ m²、静的消費電力は 2.3 μ W である。局地磁東バイアスを用いた NDROC は従来の NDROC に対して回路面積を約 67%、静的消費電力を約 74% 削減することができる。デコーダを構成する際、局地磁東バイ アスを用いた NDROC を縦に並べることを想定して磁東バイ アス線の入力と出力の位置を調節してある。実験での設計値 (2.5 mV)で規格化した電源電圧マージンは 69%—129% で あった。

3. 局地磁束バイアスを用いたメモリシステム

メモリシステムデータを保存する役割を持つメモリと任意 のメモリにアクセスするために用いられるデコーダの 2 つの 要素から構成される。単一磁束量子回路を用いて 8-bit × 32 word のメモリシステムの動作報告がある[6]。デコーダは NDROC を用いて構成しており、メモリシステムにおけるデコ ーダが占める面積と消費電力の割合はそれぞれ 32%、35% である[6]。Fig.2 に局地磁束バイアスを用いた 8-bit メモリシ ステムのレイアウトマスクを示す。Fig.2 の赤線で囲まれた部分 が局地磁束バイアスを用いた NDROC で構成したデコーダ である。赤線枠内の黄色の部分が局地磁束バイアスを用いた NDROC である。一本の磁束バイアス線ですべての NDROC の位相をシフトしており、局地磁束バイアスの利点を生かした レイアウトである。回路面積は 1.20 × 1.08 mm²、ジョセフソ ン接合数は 1208 個、消費電力は 390 µW である。測定の 詳細については当日発表する。



Fig. 1 Microphotograph of the NDROC by using the local magnetic flux bias. The input port and the output port of the flux bias line are adjusted to place the NDROC vertically.



Fig. 2 Layout mask of the 8-bit memory system by using the local magnetic flux bias. Only one flux bias line was used to shift the phase of each NDROCs.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04280 および JSPS 科研 費 JP19H05614 の助成を受けたものである。本研究に使用 された回路は、産業技術総合研究所の超伝導クリーンルーム において作製された。

参考文献

- 1. T. Ortlepp, et al., *IEEE TAS.*, 17 (2007) 659–664.
- 2. A. K. Feofanov et al., *Nature Phys.*, 6 (2010) 593–597.
- 3. S. Taniguchi et al., IEEE TAS., 27 (2017) 1501204.
- E. Strambini et al., Nature Nanotechnol., 15 (2020) 656-660.
- 5. D. Balashov, et al., IEEE TAS., 17 (2007) 142-145.
- 6. M. Tanaka et al., *IEEE TAS.*, 26 (2016) 1301005.

— 42 —

直流電流の印加による再構成が可能な 単一磁束量子ルックアップテーブルの小型化と動作実証 Miniaturization and demonstration of single flux quantum look-up table

innaturization and demonstration of single flux quantum look-up tabl

reconfigured by applying dc control currents

細谷 岳哉, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国立大)
HOSOYA Takuya, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama National University)
E-mail: hoshoya-takuya-bx@ynu.jp

1. はじめに

Josephson 接合 (Josephson junction: JJ) を用いた超伝導 単一磁束量子 (single flux quantum: SFQ) 回路は高速動作 性、低消費電力性といった特徴を持ち次世代の集積回路技 術として注目されているが、集積度が低いという課題がある。 SFQ 回路を用いたルックアップテーブル (look-up table: LUT)^[1]の設計ではメモリ部分の内部配線は複雑となる。SFQ 回路における信号伝搬には Josephson 伝送路(Josephson transmission line; JTL) あるいは受動伝送線路(passive transmission line; PTL) と呼ばれる専用の伝送線路が必要と なり、配線コストが高い。LUT のような内部配線が複雑な回路 では配線面積や接合数といったハードウェアコストが高くなる。 そこで本研究では、外部からの電流を印加することによってメ モリの内部状態の制御が可能な、磁気結合入力機構を持つ メモリセルを提案する。これによりメモリのデータを書き換える ための JTL や PTL を用いた配線を削減することが可能となり LUT の小面積化を行うことができる。本発表では、メモリセル 単体の小型化とそのメモリセルによって構成される 4-bit LUT の設計と、動作実証実験の結果について述べる。

2. 直流電流の印加によって内部状態を制御できるメモリセル

本研究で提案するメモリセルは、直流電流の流れる配線が 従来のメモリセルの内部に磁気結合した構造を持つ。直流電 流の入力は磁気結合型 DC/SFQ 変換器 (magnetically coupled DC/SFQ; MC-DC/SFQ)^[2]を介して SFQ パルス入力 に変換される。メモリのデータ書き込み・リセットを直流電流に よって行うことによって、これまで必要だった受動配線を削減 し集積度の向上を図っている。SFQ 信号ではなく直流電流を 用いるため書き込み速度は遅くなるが、メモリセルのデータ読 出しは SFQ 信号による高速読出しが可能である。

これまでに提案したメモリセルにおいて、直流電流線を MC-DC/SFQ を介さずメモリセルの磁束保持ループに直接 結合させることで、メモリセルの構造を簡略化し接合数を削減 できる。この構造が簡略化されたメモリセルの設計^[3]を行い、メ モリセルの面積は 60×40 µm² となり現行のセルに比べて 25%面積を削減できる。この小型化されたメモリセル単体での 動作実証を行った。

3. 本研究で提案する LUT

Fig.1 は本研究で提案する4-bit LUTである。書き込みを行うメモリセルの行と列に対応する *Ixo*, *Ix1*, *Iy0*, *Iy1*を選択し、そこへ同時に直流電流を印加することでメモリへの書き込みができる。データのリセットは全てのメモリに磁気結合した *Ireset* に直流電流を印加すると一度に全てのメモリのデータをリセットすることができる。現行のセルを用いた 4-bit LUT は、これまでに低速測定において正常動作が確認された^[4]。Fig.2 は小型化されたメモリセルによって構成される LUT の顕微鏡写真である。このLUT の低速試験の結果、*Ix0*, *Ix1*, *Iy0*, *Iy1* はそれぞれ設計値の 63%以上の値での正常動作を確認した。バイアス電圧の動作余裕度は 83-112%であった。発表では設計、低速試験の結果と評価についてより詳細に述べる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04280およびJP19H05614 の助成を受けたものである。本研究に使用された回路は、 産業技術総合研究所の超伝導クリーンルームにおいて作 製された。

参考文献

- M. Araki et al.: Proceedings of Supercond. SFQ VLSI Workshop, Vol. 11 (2018) pp. 83-86.
- H. Terai et al., Opt. Express, vol. 20 (2012) pp. 20115-20123.
- 3. T. Hosoya et al., Abstracts of Japan Society of Applied Physics autumn meeting, Vol. 81 (2020).
- 4. T. Hosoya et al., Abstracts of Japan Society of Applied Physics spring meeting, Vol. 67 (2020).



: wirings of dc control currents

Fig.1 Block diagram of 4-bit LUT composed of memory cells proposed in this research.





単一磁束量子を用いた FPGA の実装に向けたシフトレジスタデータリンク FPGA の 面積比較

Area comparison of FPGA using a Single-Flux-Quantum Shift-Register Data Link

<u>和田 洋明</u>,山梨 裕希,吉川信行(横浜国大)

WADA Hiroaki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ)

E-mail: wada-hiroaki-sj@ynu.jp

1. はじめに

現在の情報処理において FPGA (Field Programmable Gate Array)が製品開発において広く注目されており、様々な電子機器で使用されている。FPGA では論理回路の組み合わせや接続を任意に設計でき、製品として作成後に再設計が可能であるため、コストや開発時間など様々な面において利点が存在する。

現在では FPGA は、半導体集積回路を用いて作られてい るが、微細化の限界、消費電力、発熱量などの問題が存在し ている。一方、半導体集積回路に代わる新たなデバイスとして 単一磁束量子回路(Single Flux Quantum: SFQ)回路が注目さ れている。SFQ 回路は数十 GHz での動作が可能であり、消 費電力が半導体回路に比べ 3 桁程度低く動作することが特 徴である[1]。我々はこの SFQ 回路を用いて FPGA を作成す る研究を行っている。従来の設計では、FPGA の配線を担う Switch Box、Connection Block のハードウェアコストがシステム 全体の大きな割合を占めていた。そこで、これらの代わりに配 線コストが小さく、ハイスループットのシフトレジスタを用いたデ ータリンクを検討している。その全体構成をFig1 に示す。本研 究では新たな FPGA アーキテクチャの提案に向けて、2-input Logic Block 用の SFQ シフトレジスタデータリンクの設計およ び従来回路との面積比較を行った。

2. シフトレジスタデータリンクを用いた入出力回路の構成

設計したシフトレジスタデータリンクの回路構成を Fig2 に 示した。この回路に使用されている Logic Block は先行研究 で設計された 2-input Logic Block を使用している[2]。設計し たシフトレジスタデータリンクの回路は「入出力伝搬用のシフト レジスタ」、「入力制御用のシフトレジスタ」、「出力制御用のシ フトレジスタ」から構成されている。「入出力伝搬用のシフトレ ジスタ」から流れてきたデータは Fig2 の NDRO に分岐され、 「入力制御用のシフトレジスタ」に保持されているデータによっ て、2-input Logic Block で演算された出力データは FIFO Buffer に一時保存され、「出力制御用のシフトレジスタ」に保持され たデータによって出力データを「入出力伝搬用のシフトレジス タ」に入力するかを決定する。

3. シフトレジスタデータリンクの比較

今回設計したシフトレジスタデータリンクを用いた FPGA と 先行研究で設計されていた FPGA を 1block あたりの面積で 比較をした。Table. I に 1block あたりの FPGA の接合数の比 較を載せた。シフトレジスタデータリンクを用いた設計と従来 の FPGA の回路面積を比べた時に、接合数の値が近い値と なった。これはシフトレジスタデータリンクの「入力制御用のシ フトレジスタ」、「出力制御用のシフトレジスタ」、部分の配線コ ストが大きく、結果として、従来手法とほとんど変わらない配線 コストとなったことによる。今後はビットシリアルでの演算処理 を想定して、制御用のシフトレジスタのビット数が小さくなる方 向でシフトレジスタデータリンク FPGA の面積を小さくするアプ ローチを行いたいと考えている。



Fig.1 Block diagram of an SFQ FPGA using a shift-register data link.



Fig.2 A schematic of Shift-Register Data Link



Fig.3 A schematic of 2-input Logic Block

Table. I	A comp	arison	of the	number	of Jo	osephson	junctions
between	previous	and Pr	oposed	l FPGAs	3		

	Previous FPGA	Proposed (shift-register data link) FPGA
JJs	1606	1548

参考文献

[1] K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.1(1991), pp.1–28.

[2] 荒木美佳,山梨裕希,吉川信行,"単一磁束量子回路を 用いた FPGA の実装に向けた 4-input Logic Block と switch アーキテクチャの設計及び評価"電気学会金属・セラミックス /超電導機器合同研究会,つくば,2017年12月.

— 44 —

省電力4K-GM 冷凍機の開発

Development of a low power consumption 4 K-GM cryocooler

竹塚 幸輝, 関光 正輝, 増山 新二 (大島商船高専) <u>TAKETSUKA Koki</u>, SEKIMITSU Masaki, MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College) E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

近年の4K小型冷凍機は入力電力6~7kWで,冷凍能力 1.0~1.5Wほどが一般的であり、この冷凍能力を改善するた めに、各方面で研究が行われている.われわれも蓄冷器構造 の改良などから、従来よりも効率の高い冷凍機の開発に成功 している.[1]

このような状況下で、極低温冷凍機が組み込まれるシステムの再検討をしたとき、消費電力を可能な限り小さくし、かつ冷凍能力も大きく下がらない冷凍機が開発されれば、その応用範囲は拡大されるのではないかと考えられる.さらに、省エネルギー化や新規システムの実現などにつながることも予想される.そこで本研究では、省電力かつ高効率の4 K-GM 冷凍機の研究を進めている.

2. GM 冷凍機と圧縮機

実験に使用した2段GM冷凍機はRDK-408D2(SHI)(1W at 4.2Kモデル)である.その中の2段目蓄冷器には,Pb, HoCu₂, Gd₂O₂S球が充填されている.省電力用の圧縮機とし て,水冷式 F40(SHI),空冷式 SA115(ULVAC CRYO-GENICS)を準備した.なお,カタログより60Hz運転時の定格 電力は,F40が5.0kW,SA115が1.9kW程度である.GM冷 凍機と圧縮機の外観写真をFig.1に示す.実験では,インバ ータを用いてディスプレーサの運転速度を制御しながら,冷凍 能力を測定した.同時に,圧縮機の消費電力,室温部のヘリ ウム高低圧力を測定した.

3. 冷凍能力試験結果

冷凍能力試験は,電気ヒータで2段目ステージを4.2Kに 保ち,1段目ステージの温度を25K(最低到達温度)~85K 程度まで変化させた.Fig.2に4.2Kでの冷凍能力結果を示 す.F40を接続した場合,ディスプレーサの運転速度が60 rpm より72 rpmの方が高い冷凍能力を示し,最大で1.3Wが得ら れた.%カルノーを算出すると1.9%であった.

一方, SA115を接続した場合 72 rpm での到達温度は 4.9 K であった. これは 2 段目ステージの膨張空間に十分なガスが 送られていないことが原因であると考えられる. そこで, ディス プレーサを低速運転することで, 1 サイクル当たりの流量の増 加を試みた. その結果, 60 rpm から低速では 4.2 K で能力を 発揮できている. もっとも大きな冷凍能力を示したのは 36 rpm のときであり, その最大値は 0.68 W であった. このとき圧縮機 の消費電力は 1.86 kW であり, %カルノーは 2.6%となった.

Fig.3は1段目ステージの冷凍能力結果を示す. F40では, 50 K で約 50 W 程度の能力が発揮できているものの, SA115 では, 50 K で 10 W 程度の小さい値となった. これは低速運転 により, 1段目ステージの膨張仕事が低下したためであり、本 研究の課題の一つである.

4. まとめ

省電力 4 K-GM 冷凍機の開発を目指し, 消費電力の異な る二台の圧縮機を同一のコールドヘッドへそれぞれ接続し, 運転速度による能力の特性を調査した. 1 W at 4.2 K のスペッ クを持つコールドヘッドに消費電力 1.9 kW という小さな圧縮 機を接続しても, 低速運転をすることで 4.2 K において冷凍能 力を発揮でき, 高い%カルノー効率が得られることが実証され た. これより, 省電力 4 K-GM 冷凍機の開発に一歩踏み出せ たと思う.



Fig. 1. Photographs of two-stage GM cryocooler and two types of compressors.



Fig. 2. Experimental results of the cooling capacity at 4.2 K as a function of first stage temperature.



Fig. 3. Experimental results of the first stage cooling capacity.

1. S. Masuyama, K. Matsumoto, T. Numazawa, IOP Conference Series (to be published)

液化水素用高効率 1 段 GM 冷凍機

A high performance single stage GM cryocooler for liquefied hydrogen

<u>関光 正輝</u>,竹塚 幸輝,増山 新二 (大島商船高専);沼澤 健則 (NIMS) <u>SEKIMITSU Masaki</u>, TAKETSUKA Koki, MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College); NUMAZAWA Takenori (NIMS) E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

液化水素は気体水素の 1/800 の体積で,大量輸送,大量 貯蔵,省スペース等の特徴があり,水素エネルギーの普及に 欠かすことができない.しかし,液化点が 20 K であるため,液 化には相応のエネルギー投入が必要であることや,貯蔵・輸 送時の蒸発 (ボイルオフ)の発生が避けられないことが課題 の一つである.この問題を解決するべく,JSTの未来社会創造 事業で採択されたプロジェクトにおいて液化水素システムの 開発が始まった.以下に本プロジェクトで開発する GM 冷凍機 の概要と試験結果を述べる.

2. ゼロボイル用冷凍機

ゼロボイル用冷凍機の概略を Fig. 1 に示す.液化水素用の 冷凍システムは、磁気冷凍機 (AMR) と GM 冷凍機のハイブ リッド構造である. GM 冷凍機が 300~約40 K, AMR が約40 ~20 K の温度領域を担当する.そこで,われわれは目標温度 を 40 K とした液化水素用の高効率 GM 冷凍機の研究を開始 した.第一段階の目標値として,2021 年度までに 40 K での冷 凍能力 32 W, カルノー効率 17%を目指している.

3. GM 冷凍機と圧縮機

今回ベースモデルとして使用された 1 段型 GM 冷凍機は RD-125D (SHI) (30W at 77 K), 圧縮機は SA-115 (ULVAC CRYOGENICS) 1.9 kW at 60 Hz 空冷型である. 冷凍機の蓄 冷材として, (1) 銅系金属メッシュのみ, (2) 銅系金属メッシュ と低温側に鉛球を充填したもの, の二種類を用意した.

今回の実験ではインバータを使用して、ディスプレーサの 動作スピードを 72,84,102 rpm と変化させて冷凍能力測定を 行った.あわせて、室温部のヘリウム圧力と流量、圧縮機の電 力を測定した.

4. 冷凍能力試験結果

冷凍能力試験は、電気ヒータで冷却ステージに一定電圧 を加え、その電圧から冷凍能力を算出する方法とした.メ ッシュのみの蓄冷器は三種類の動作スピード、鉛球を低温 側に充填した蓄冷器は102 rpm で実験を行った.それらの 結果を Fig. 2 に示す.メッシュの場合、到達温度はどれも 21 K であった.40 K の冷凍能力は 72 rpm で 37 W, 102 rpm で 43 W を発揮し、動作スピードが速いほど冷凍能力 が高いという結果が得られた.鉛球の場合、到達温度は 19 K、40 K の冷凍能力は 43 W を発揮した.二種類の蓄冷器 を比較すると、到達温度に差はあるものの、40 K の冷凍 能力に差異は見られなかった.

つぎに、カルノー効率の算出結果を Fig.3 に示す.本結 果も同様に、動作スピードが速くなるにつれて効率が改善 されており、40 K でのカルノー効率 13%を発揮している. これは、動作スピードが速くなることで圧縮機の動作電力、 ならびに高低圧力差が小さくなり、流量が増加するという 関係に起因している.

5. まとめ

液化水素用冷凍機開発を目指して、1 段 GM 冷凍機の高 効率化の開発を進めた.ディスプレーサの動作スピードが速く なるにつれて冷凍能力が改善する結果が得られた.また、金 属メッシュのみの蓄冷器と, 鉛球と低温側に充填した蓄冷器 での40K冷凍能力に差異は見られなかった.2021年度の目 標である冷凍能力を満たすことが実証されたものの, さら なる効率改善が必要である.



Fig. 1. Schematic of the single stage GM cryocooler and AMR







Fig. 3. Reciprocating speed dependence of %Carnot of the single stage GM cryocooler

謝辞

本研究は, JST 未来社会創造事業,「未来社会に必要な革 新的水素液化技術」により実施された.

液体水素タンク内部圧力の時間変化に関する研究

Study on time variation of pressure inside liquid hydrogen tank

<u>水廣 衛</u>,中山郁夢,岩佐太陽,松田竜之介,武田 実,前川一真(神戸大);高橋 和彦(トヨタ自動車) <u>NAGAHIRO Mamoru</u>, NAKAYAMA Ikumu, IWASA Taiyo, MATSUDA Ryunosuke, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.); TAKAHASI Kazuhiko (Toyota Motor) E-mail: m.nagahiro628@gmail.com

1. はじめに

近年、地球温暖化や環境汚染などの環境問題が注目を浴 びているが、その解決に向けて、世界的に脱炭素化の流れが 急速に進みつつある。持続可能で安全かつクリーンな次世代 のエネルギー資源として、水素が脚光を浴びている。水素は 地球上に無尽蔵に存在し、利用段階で CO₂を排出しない。ま た液化することでガス状態の体積の 800 分の1にまで凝縮可 能なので、貯蔵・輸送の点で有利である。車載用液体水素タ ンクの研究開発において、自然入熱や振動によるスロッシン グ(液面揺動)などに伴う、タンク内部での水素の熱流動現象 を十分に把握することは極めて重要である。

これまでの研究では、液体水素の充填・貯蔵における液体 水素タンク内部の観察を行った[1]。しかし、貯蔵時の圧力上 昇に着目した詳しい研究は、まだ行われていなかった。そこ で、本研究では液体水素タンク内部の時間経過による液面・ 温度・圧力挙動の詳細を明らかにすることを目的とする。また、 初期充填量がごく少量の場合の温度・圧力挙動についても調 べたので報告する。

2. 実験装置

Fig.1 に実験装置配置図を示す。本実験では液体水素用 光学クライオスタット、防爆型圧力トランスミッタ、CCS 温度計(T1~T6)を使用した。光学クライオスタットは全高 1327 mm、液体水素槽(約 20 L)、液体窒素槽(約 15 L)、断 熱真空槽で構成された保存容器である。液体窒素槽より 下には 77K アルミシールドが取り付けられているため液 体水素槽への熱侵入を防ぐことができる。クライオスタ ットには底面のものも合わせて 5 ヶ所に観測窓が取り付 けられており、内部の観察が可能である。

3. 実験方法

光学クライオスタットの液体窒素槽に液体窒素を充填後、 液体水素槽に液体水素を液面高さ150mm まで充填した。充 填する際、400L 液体水素タンクとクライオスタットをトランスフ ァーチューブで接続し、液体水素の移送を行った。完了後、 しばらくしてバルブを閉め密閉し、蓄圧試験を開始した。蓄圧 時の実験条件は、液体状態の違いによる圧力上昇の比較と、 蓄圧上限の違いによる再現性の有無を確認するために、次 のように設定した。(1)液体状態は飽和状態(温度均一)と成層 状態(温度分布が存在)の2種類、(2)蓄圧上限は、0.4 MPaG と 0.2 MPaG に設定した。また、「液面高さの違いによる圧力 変化の予測結果」において、「低い液面高さからの蓄圧時に、 容器内部の液体水素がすべて蒸発した時(Inflection Point:



Fig.1 Schematic diagram of experimental setup.

変曲点)に圧力上昇率が高くなる」現象についての評価試験 を行った。この試験では、充填量は液体水素槽底面の観測 窓にわずかに液体水素が溜まる程度に設定し、蓄圧を開始し た。

4. 実験結果と考察

飽和状態での液内温度は全体的に、0.2 MPaG、0.4 MPaG の両条件とも飽和温度に沿って上昇した。圧力上昇曲線 は二次関数的に上昇していき、蓄圧上限が同条件の試験 では蓄圧完了時間が近く、高い再現性が確認された。これ は液内が飽和温度に沿って均一に加熱されるので試験ご との液内温度の差が少なく、そのため液体水素の蒸発量 も差が出にくいためと考えられる。

成層状態での液内温度は蓄圧開始時には液内全体が均 ーな温度であったが、圧力上昇に従って温度層を形成し た。圧力上昇曲線は二次関数的に上昇したが、飽和状態と 比較すると不安定さが見られた。要因としては、観測窓を 通したライトでの加熱の不安定さ、または試験ごとのク ライオスタット内の初期温度分布の違いなどが挙げられ る。

一方、ごく少量の充填量から蓄圧した評価試験結果を Fig.2 に示す。図中の変曲点(赤丸で示す)以後において、 予測と違って傾きが小さくなり、圧力上昇率は低く変化 した。圧力上昇曲線は初め二次関数的に上昇したが、変曲 点以前の曲線は液面高さ 150 mm からの圧力上昇曲線と 違い、上に凸の形となった。この理由は考察中である。 5. まとめ

液体水素の蓄圧試験において、液体状態と蓄圧上限を 実験条件とし、主にクライオスタット内部の温度、圧力変 化を調べた。またごく少量の充填量からの観測も行った。 結果として圧力上昇曲線は二次関数的に上昇し、成層状 態よりも飽和状態の方が高い再現性を持つこと、また液 体水素がすべて蒸発した後は圧力上昇率が低下する事が 確認された。今後の課題は、蓄圧開始時のクライオスタッ ト内部の温度分布により焦点を当て、充填量の違いによ る圧力挙動の違いを詳しく調べることである。

参考文献



Fig.2 Experimental result of time variation of both temperature and pressure for very small LH₂ sample.

1. K. Akamatsu *et al.*: Abstracts of JIME Conference, Vol. 88 (2018) pp.71-72

液体水素用外部加熱型 MgB₂ 長尺液面センサーの研究開発 Research and Development of External-heating-type MgB₂ Long Level Sensor for Liquid Hydrogen

<u>福本 祥一</u>,高田 芳宏, 荘林 純一,山本 博和(山本電機製作所);武田 実,前川 一真(神戸大); 熊倉 浩明(NIMS) <u>FUKUMOTO Shoichi</u>, TAKADA Yoshihiro, SHOBAYASHI Junichi, YAMAMOTO Hirokazu (Yamamoto Electric Works); TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS) E-mail: s.fukumoto@manostar.co.jp

1. はじめに

化石燃料や原子力に替わるクリーンなエネルギーとし て、近年水素が注目されている。水素エネルギー社会実 現のためには水素を大量に輸送・貯蔵する必要があり、 これには気体水素の800倍の密度となる液体水素(沸点20 K)が適している。しかし現在、液体水素用に開発された 長尺液面センサーはなく、測定精度や応答性に優れた液 面センサーが求められている。そこで弊社では、神戸大 学が以前から開発を行ってきた外部加熱型超伝導MgB₂(二 ホウ化マグネシウム)液面センサーに着目し、神戸大学、 物質・材料研究機構(NIMS)、岩谷産業株式会社の協力を 得て大型タンク用液面センサーを目指した研究開発を行 ってきたので報告する。

2. 超伝導 MgB2液面センサー

外部加熱型超伝導 MgB₂ 液面センサーの原理は、以下の 通りである。液体水素中の MgB₂ 線材は超伝導状態となり 電気抵抗がゼロになる。一方で、液面より上部は常伝導 状態のため任意の抵抗値を示す。よって液面の高さによ りセンサー全体の抵抗値が変化し、液面位置の測定が可 能となる。特に外部加熱型では、蒸発ガスによる気相部 の温度低下を防ぐために MgB₂ 線材にヒーター線を巻き付 けてセンサーを加熱している。

3. 長尺 MgB2線材作製

本研究で作製した MgB₂線材の組成と作製条件を Table 1 に示す。線材は直径 0.3 mm、Powder-in-tube 法で作製し、 数十 m に伸線した。超伝導転移温度 Tc を下げるための添 加物として SiC を添加、もしくは C doped B を用いて C を添加した。シース材には Cu-Ni 合金(7:3)を使用した。 線材 E の伸線後の各位置の断面写真を Fig.1 に示す。こ の写真から非常に均一に伸線されていることがわかる。 さらに各条件で作製した線材から 20 mm のショートサン プルを切り出し、超伝導特性試験を行った。結果を Fig.2 に示す。センサーの Tc は線材作製条件にかかわらず、約 36.5 K であることがわかった。

4. 静的液面検知特性

今回作製した線材から代表として線材 AとEを用いて液面 センサーを試作した。センサー長は 500 mm、ヒーター線を 2 mm 間隔で巻き付けた。これを用いて神戸大学が行ってきた 以下の方法[1]で静的液面検知特性を調べた。センサーをガ ラスデュワー内に取り付け、液体水素を移送後、測定電流 10 mAを流し、4端子法で電圧を測定した。液面が 500 mm から0 mm になるまでセンサー出力電圧を測定することで特性試験 を行った。ヒーター入力値 9 W の結果を Fig. 3 に示す。

Fig.3 からわかるように、センサーの直線性を示す直線近似の相関係数はいずれも 0.999 以上と非常に高い。一方で、液面 0 mm 時の出力電圧は最大約 1 mV の差があった。

5. まとめと今後の課題

これまでの研究開発で非常に均一な長尺 MgB₂線材の作製 と良好な性能の液面センサーを試作することに成功した。今 後は量産に向けての検討を行いながら、大型タンクに設置し 実用試験を実施する予定である。

Table.1 Composition and fabrication conditions.

Series	А	В	С	D	Е	F
Additive		Si	C doped B			
Addition amount [%]	2.5	10	10	10		
Heat treatment temp [°C]	600	600	620	650	600	600
Wire drawing length [m]	80		100	60		



Fig.1 Cross section of MgB₂ wire.



Fig.2 Relationship between resistances per unit length and temperature of the 20- mm-long MgB₂ wires.



Fig.3 Relationship between output voltage and level read from scale of the 500-mm-long MgB_2 sensors at a heater input of 9 W under atmospheric pressure.

参考文献

1. K. Maekawa, et al.: Journal of the JIME Vol. 51, No. 3 (2016) p.125

極低温下でのパルス強磁場印加による銅細線束発熱Ⅱ

Heat generation of copper wire bundle under pulsed high magnetic field at 4.2 K II

<u>中川 豪</u>, 松山 友樹, 土田 稜, 野口 悟(大阪府大理);鳴海 康雄, 萩原 政幸(阪大先端強磁場) NAKAGAWA Takeshi, MATSUYAMA Tomoki, TSUCHIDA Ryo, NOGUCHI Satoru (Grad. Sch. Sci., Osaka Pref. Univ.); NARUMI Yasuo, HAGIWARA Masayuki (AHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ.) E-mail: s_t.nakagawa@p.s.osakafu-u.ac.jp

1. はじめに

我々はパルス強磁場と断熱消磁を組み合わせた強磁場 極低温の複合極限環境の実現を目指している。そのため にはパルスマグネットと断熱消磁部が磁気的に干渉しな いように距離(~300 mm)を取り、その間の熱伝導を十 分大きく取る必要がある。この熱伝達物質として30 μmの 被覆銅細線束を約2800本束ねたものを検討し、ゼロ磁場 中で0.3 Kまで速やかな熱伝達を確認した。しかしながら、 パルス強磁場印加に伴う渦電流発熱を評価しなければな らない。前回は、大阪大学の先端強磁場科学研究センター にて被覆銅細線束を実際のパルス強磁場中に挿入し、そ の渦電流発熱による温度上昇の評価を行った実験の詳細 について発表した[1]。今回、熱モデルを用いて詳細な解析 を行った結果について報告する。

2. パルス強磁場印加による渦電流発熱

パルス強磁場波形は、Fig.1 に示すように正弦波的に 12.5ms で最高磁場に達し、下りは緩やかに 30ms 後にほぼ ゼロになる。充電電圧に比例して最高磁場が変化するが、 磁場波形は変わらない。磁場波形の時間微分は磁場中に ある金属に誘起される誘導電圧に比例する。誘導電圧の 2 乗が渦電流発熱のパワーに比例し、図 1 の黒線で示すよ うに、そのパワーの時間変化を得ることができる。ただし、 その絶対値は金属の大きさや形状、電気抵抗に依存する。



Fig.1 Waveform of pulsed magnetic field

3. 熱モデル

温度上昇の大きさと時間変化について Fig.2 に示す熱モ デルを用いて温度計と銅の熱伝導率と熱容量を考慮した 定量的な解析を行った。ここで、C は熱容量、T は温度、 κ は熱伝導率、Q は流入熱量である。熱は渦電流によるた め、Fig.1 に示す磁場波形の($d\mu_0H/dt$)²を時間に対してプロ ットした曲線が熱流入パワーに比例する。

このモデルを基に熱量の式をそれぞれ考えると以下のよ うになる。

$$P - \kappa_1 (T - T_0) - \kappa_3 (T - T_{Cu}) = C_s \dot{T}$$

$$kP - \kappa_2 (T_{Cu} - T_0) + \kappa_3 (T - T_{Cu}) = C_{Cu} \dot{T}_{Cu}$$

この式において P、 κ 、Cを定数倍しても温度上昇は変わらない。そこで、Pを $(d\mu_0 H/dt)^2$ に固定して κ 、Cをパラ



Fig.2 Thermal flow model: κ denotes thermal conductivity. *C* denotes heat capacity. *Q* denotes heat input.



Fig.3 Measurement data of quartz glass rod and Cu-wire bundle and fitting curve of them

メーターフィッティングを行った。ここで、kが銅細線束 に誘起される熱量を与えるパラメータである。結果の一 例をFig.3に示す。フィッティング曲線は y 軸正の方向に 0.2だけシフトさせている。実験データは銅細線束を入れ た時と銅細線束の替りに石英棒を入れた時についてそれ ぞれ、充電電圧が 1kV,3kV,5kVの3通りある。この例で は k = 1.5 となり、温度計自身が受け取る1.5倍の熱量が 銅線束に発生していることになる。さらにほかの充電電 圧データについてもフィッティングをしているところで ある。ここで、パラメータは入力電力Pに対する相対値で あり、 κ_1 , κ_2 , κ_3 ,Csは石英ガラス棒と銅細線束で同じ設 定をした。また、石英ガラス棒と銅細線束のパラメータ Ccuの違いは熱容量の違いを反映させている。石英ガラス では渦電流発熱がないため、石英ガラス棒のkはゼロであ る。

1. T.Nakagawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.68

過熱液体の突沸現象を応用した高温超伝導機器の局所温度上昇検出 ~検出原理の理解

Applying a vapor explosion in superheated liquids to detection of local temperature rise for high-temperature superconducting applications - Understanding of detection principle

> <u>高畑 一也</u>(NIFS) <u>TAKAHATA Kazuya</u>(NIFS) E-mail: takahata@nifs.ac.jp

1. はじめに

細管に液体を封入し外部から加熱すると,液体が沸点に達 しても沸騰せず液相を保ち,準安定な過熱状態になることが 知られている。さらに温度を上げるとある温度で急激な沸騰 (突沸)を起こす。液体窒素の場合は110K近傍で突沸が起こ る[1]。前回の発表では,長さ16 mの細管の一部を加熱する ことにより,突沸現象を再現し,端部の圧力計で急激な圧力 上昇を観測できることを報告した。また、この細管内の突沸現 象を応用することにより,超伝導機器における局所温度上昇 を圧力計1個で検出できることを提案した。今回は,実験デー タをさらに精査し,検出の原理を理解することを試みた。

2. 実験方法

図1に実験装置の模式図を示した。外径1/16インチ(1.59 mm), 内径 0.99 mm, 長さ 200 mm のステンレス配管の中央部 に長さ 20 mm にわたりニクロムヒーター線を巻き付けたヒータ ーユニットを製作した。そして、(A)ヒーターユニットに直接圧 力計を付けた配置, (B)ヒーターユニットと圧力計の間に長さ 16 mのコイル状ステンレス配管(上記と同じ断面寸法)を挿入 した配置, (C)ヒーターユニットの先に 16 m のコイル状配管を 追加した配置、と3つの実験配置を準備した。配管の一端は 閉止してあり、もう一端は室温空間にあるデジタル圧力計に2 mの配管で接続した。配管内を真空にした後,圧力調整器で 0.2 MPaの窒素ガスを導入した。配管部をデュワーに挿入し, 飽和液体窒素で浸漬冷却した。配管内の窒素ガスが液化し, 圧力が一定となった後、ガス導入バルブを閉め、配管内部を 封止した。ヒーターによりステップ状に加熱し、ヒーターと配管 の間に挿入した銅コンスタンタン熱電対で温度を測定するとと もに、圧力計により圧力変化を観測した。

3. 実験結果と考察

図 2 に測定結果の一例を示す。いずれの配置でも, ヒータ ー加熱を開始してから約 11 秒後に 109 K に達し, 圧力計の 指示が 0.2 MPa から約 0.3 MPa までステップ状に変化した。 0.2 MPa における沸点は 84 K であり, 109 K で起こる圧力上 昇は過熱液体の突沸現象によるものと考えられる。以下では, 圧力上昇が開始した時点のヒーター直下の温度計の指示値 を突沸温度と呼ぶ。

図3に、加熱パワーを変えた場合の、突沸温度の全デー タを示す。ヒーター配置による突沸温度の違いは同じ加熱条 件であれば1K以下であった。一方、加熱パワー増加により 突沸温度が減少することが分かった。この原因を調べるため に、有限要素法による熱伝導解析を行った。その結果、加熱 パワーが大きい場合には、壁面と中心部のヘリウムの温度勾 配が無視できないことがわかった。今回最大の5.7Wの加熱 では、突沸時点で、壁面で107Kにもかかわらず中心では93 Kまでしか上昇していない計算結果となった。従って、気泡核 生成が壁面で起こり、突沸温度が減少した可能性がある。

突沸後の圧力上昇を調べることで,蒸発によって発生した 気相部の長さを推定することができる。計算の結果,低加熱 パワーでは約40mmであり,加熱パワーを上げるとヒーター長



Fig. 1 Schematic experimental set-up.



Fig. 2 Temperature and pressure evolution for three configurations.



Fig. 3 Explosion temperature vs. heater power.

と同じ 20 mm に近付くことがわかった。このことから, 圧力の変 化量は加熱部の長さから推定可能であることが分かった。

4. まとめ

サブクール窒素を封入した直径1mm 程度の配管を超伝導 機器に組み込むことで,局所的な温度上昇を室温空間にある 圧力計のみで検出できる可能性を見出した。

謝辞 本研究は,科学研究費補助金(19K04340)の助成を 受けたものである。

参考文献

1. K. Nishigaki, Y. Saji, Jpn J. Appl. Phys. 20 (1981) 849.

垂直加熱管内を流れるサブクール液体水素中の膜沸騰熱伝達

Film boiling heat transfer of subcooled liquid hydrogen flowing upward in a vertical pipe

<u>塩津 正博</u>、白井 康之、石見 佳紀、原 真太郎(京大); 小林 弘明、野中 聡、成尾 芳博、稲谷 芳史(JAXA) <u>SHIOTSU Masahiro</u>, SHIRAI Yasuyuki, IWAMI Yoshiki, HARA Shintaro (Kyoto Univ.); KOBAYASHI Hiroaki, NONAKA Satoshi, NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi (JAXA) Email: shiotsu@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. 序論

液体水素強制対流冷却超電導マグネットの安全設計には、 クエンチ以後の液体水素熱伝達特性の知識が重要である。 筆者等は飽和沸騰の場合について既に報告した{1,2}。本報 では、液がサブクールされている場合について報告する。

2. 試験内容

発熱体として、内径 6 mmm, 加熱長さ 100 mm の SUS310S 製パイプを用いた。これを FRP 製ボディで断熱し垂直に固定 している.

この供試体を垂直に支持し、上向きにサブクール液体水素 をある流速で流し、試験部を指数関数状の発熱率で300K付 近まで加熱した後、同じ時定数で発熱率を減少させ、最小熱 流束まで膜沸騰熱伝達特性を測定した。

3. 実験結果

代表的実験結果として圧力 400 kPa、サブクール度 5 K、 初期質量流量 230kgm⁻²s⁻¹の実験結果における熱流束 qと発 熱体表面温度の入り口液温からの上昇分 ΔT_L の関係を Fig.1 に示す。発熱率を指数関数状 ($Q = Q_0 e^{i\tau}$) に $\tau = 5.0s$ で DNB 熱流束を超え発熱体温度 300 K 近傍(A 点)まで上昇さ せ、以後 $\tau = -5.0s$ で減少させて極小熱流束 q_{\min} (B 点)まで の膜沸騰熱伝達を測定した。



Fig.1 Boiling curve with $G_{ini} \approx 230 \text{ kg/m}^2 \text{s}$ at P = 400 kPa and $\Delta T_{sub} = 5 \text{ K}$.

Fig.2 は Fig.1 と同じ実験結果における発熱体平均過熱度 (ΔT_{sat}), 質量流量 G, 流路出口クオリティ($x_{eq,exit}$)の関係を 示す。縦軸は ΔT_{sat} , G, $x_{qq,exit}$ を示し, 横軸は入熱開始後 の時間を示す。 ΔT_{sat} は、最初ゆっくりと増加し 18 秒の時点で q_{DNB} 点、その後 24 秒時点で 350K の ΔT_{sat} まで急速に増加す る。 $x_{eq,exit}$ は負の値(この場合は約-0.2)から増加し約 21 秒 でゼロに達し、温度ピークとほぼ同時にピーク値が約 0.6 にな る。図には、出口がサブクール状態である領域が前と後ろに 見られます。

質量流量 Gは、DNB ポイントの少し前の 16 秒頃に減少し 始めサブクール状態から飽和状態にわたって大幅に減少し、 その後元の値まで大幅に増加することに注意を要する。質量 流量 G は、飽和領域でしばらく下限値を維持する。 ΔT_{sat} は 飽和領域終了時にピーク値の約半分に減少する。最初のサ ブクール領域終了時の G の値は、初期値よりも 18%低く、下 部の Gの値は 82%低くなっている。その後 ΔT_{sat} の減少に伴 い31秒から増加し2番目のサブクール領域で一度振動してから初期値に向かって増加する。





Fig.3 は、圧力とサブクール度が同じで、G=400 kgm⁻²s⁻¹ の場合です。 $x_{eq,exit}$ のピーク値は Fig.2 よりもわずかに低 い。G の値は、最初のサブクール領域で約 40%減少し、 飽和領域でさらに 35%減少した。その後、G はしばらく の間値一定値を維持し、30 秒から初期値に向かってスム ースに増加する。



Fig.3 Relation between G, ΔT_{sat} and $x_{eq,exit}$ with $G_{ini} \cong 400 \text{ kg/m}^2 \text{s}$ at P = 400 kPa, $\Delta T_{sub} = 5 \text{ K}$.

Fig.4は圧力 700 kPa、サブクール度8Kにおける、様々な 初期質量流量での熱伝達率を示す。過熱度が大きいと質量 流量は小さくなるが、膜沸騰熱伝達率が高くなっていることが 分かる。サブクール域のG減少機構については検討中。



Fig.4 Film boiling heat transfer coefficients for P=700 kPa under subcooling of 8 K with G_{ini} as a parameter

参考文献

Y Iwami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.37
 M Shiotsu, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019)p.38

飽和超流動ヘリウム中の急縮小流路で起こる間欠沸騰現象における液頭圧依存性 Dependence of the geysering phenomena on hydrostatic pressure with an abrupt contraction pipe in saturated superfluid helium

<u>高田</u>卓(核融合研);岡村 崇弘(KEK); 濱口 真司(核融合研) <u>TAKADA Suguru</u> (NIFS); OKAMURA Takahiro (KEK); HAMAGUCHI Shinji (NIFS) E-mail: takada.suguru@nifs.ac.jp

1. 研究背景

飽和超流動ヘリウム(HeII)は超伝導加速空洞の冷却 等発熱源のある場所から蒸発界面をもつ場所の間をチャ ネルで繋ぐようなケースで使用される場合がある。HeII の実効的熱伝導率計測においてしばしば用いられる加熱 部に対してチャネルが縮小流路となっているチャネルが 形成されているのと同様の環境となる場合があるのであ る。

先報[1]においてこうした系において特徴的な間欠沸騰 が見られることを報告したが、試験流路と液面の関係の 詳細について調査できていなかった。本報告では追加実 験によって明らかになった間欠沸騰現象における液頭圧 の影響、飽和蒸気圧曲線との関係について発表する。

2. 実験装置

前回発表[1]と同様のセットアップを用いた。Fig.1で 示したような急縮小流路をGFRPで構成し、ガラスデュワー 中に設置した。縮小路が内径5 mm 長さ50 mm、ヒータの 備えられた内径40 mm 長さ20 mm となっている。ガラス デュワーは大型ロータリーポンプに接続されており、バル ブ制御により飽和蒸気圧を制御することでHeII温度を制御 している。

液頭圧の効果についてはガラスデュワーにあるスリット を通じて外部から目視観測によって液面から流路出口まで の長さを計測している。熱流印加は一定電流を印加する定 常発熱モードと三角波を印加した準定常発熱モードの2種の 発熱モードで試験をしている。



Fig.1 Schematic illustration of abrupt contraction channel

3. 実験結果

沸騰を起こさない低熱流束域では 0.533 mA/s,沸騰限界 近辺から 0.133 mA/s の電流増加率でスイープした電流を 流し、あるピークから電流を同じレートで減衰させて実 験を行った際の準定常状態の実験を行った。結果が Fig.2 である。Tin, Tout の温度変化に注目するとある熱流束域に 限定して特徴的な温度振動が現れていることがわかる。 この部分が間欠沸騰領域である。Fig.2中のTsat_outlet, Tsat_inlet, Tsat_heater はそれぞれ急縮小流路の出口、入口、ヒータ部に おける液頭圧(pgh)を考慮した飽和温度を示している。今 回のセットアップでは逐次的に液面を計測できておらず、 通電直前、通電直後の液面のみが計測されている。一度 の通電で約 10 mm 液面が低下してしまうため、ここでの 計算では通電前後の中央値を代表液面高さとして使用し ている。現実には中央を固定してごく僅か右回りに回転 させたものが飽和温度と考えられる。

ここから分かることは、間欠沸騰はおおよそヒータ表

面が飽和温度よりわずかに高い温度に達した際に発現し、 その温度振幅はヒータ表面と流路出口の飽和温度の間を 振動するものである。そして、間欠沸騰から定常沸騰に 遷移するとおおよそ流路出入り口の間の飽和温度に落ち 着くことが分かる。このような関係は他の温度、液面高 さでも共通して現れる。



Fig.2 Time variation of temperature on heat input of triangle shape

Fig.2 から特定できる間欠沸騰の始まる熱流量(Qerl)、 間欠沸騰から定常沸騰へ移行する臨界熱流量(Qerl)の液 面高さ依存性をプロットしたものが Fig.3 である。どちら も液面高さと正の相関を持っているがその傾きは異なり、 液面が高いほど間欠沸騰の熱流束域が拡大することが分 かる。そして、間欠沸騰の周期も非常に強く液面高さの 影響を受けるが、温度上昇の時間が変化するものであり、 温度下降時間は液面高さの影響を受けないことも分かっ た。温度下降時間はバス温度依存性があり、低温程温度 下降時間が長いことが判った。



Fig.3 Dependence of critical heat input on Immersion depth

当日はこれらの特徴に関する物理的考察について、間 欠沸騰中に現れる気泡の様子をとらえた可視化結果も踏 まえて議論する予定である。

参考文献

 S. Takada, T. Okamura and S. Hamaguchi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.72

Pilot GAMMA PDX SC 用超伝導コイルの製造 Production of superconducting magnet for Pilot GAMMA PDX SC

<u>今村</u>寿郎, 沖津 茂樹, 古閑 康則, 木戸 修一(日立製作所); 南 龍太郎, 假家 強, 坂本 瑞樹(筑波大学プラズマ研究センター) <u>TOSHIRO Imamura</u>, SHIGEKI Okitsu, YASUNORI Koga, SHUICHI Kido (Hitachi, Ltd.); RYUTARO Minami, TSUYOSHI Kariya, MIZUKI Sakamoto (Plasma Research Center, Univ.Tsukuba) E-mail: toshiro.imamura.hs@hitachi.com

1. はじめに

筑波大学プラズマ研究センターでは、核融合原型炉へ向 けた研究として、ダイバータプラズマ模擬実験を含む境界プラ ズマ研究の質的向上・高度化のため、高密度・定常運転可能 なパイロット装置を建設している。本超伝導コイルはその基幹 となる機器である。本コイルでは、液体ヘリウムなどの冷媒を 必要としない極低温冷凍機1台による伝導冷却方式を採用し ており、定格運転時にコイル中心で1.5Tの磁場を発生可能 である。また、日立における伝導冷却コイルとしては最大級 (室温ボア径 ∮ 900mm)であるため、コイル全体を効率よく冷 却するなどの課題があったが、熱伝導材の選定や伝熱構造 を工夫し、運転に十分な冷却を達成した。

本報では、本超伝導コイルの設計・製作及び試験結果に ついて報告する。

2. 装置概要

本コイルの仕様と外観をそれぞれ Table1, Fig.1に示す。コ イル巻線部は,外径 φ 1.2m,内径 φ 1.0m,高さ 0.3m のソレノ イド形状であり, NbTi 超伝導線材を使用している。コイルは, 効率的な冷却を目的として設置した高純度アルミニウム製の 伝熱パスを介して,小型冷凍機により冷却される。コイルへの 輻射入熱量を低減するために、コイルの周囲に熱輻射シー ルドを設置し、コイル表面及び熱輻射シールド表面に多層断 熱材を設置している。また,低温系への伝導入熱量を低減す るために、コイル及び熱輻射シールドは,熱伝導率の低い繊 維強化プラスチックにより支持している。なお、本コイルは電 源が常時接続される電源駆動方式を採用しているため、電流 導入部においては、高温超伝導電流リードをコイル温度系と 熱輻射シールド温度系との間に設けており、ジュール発熱に よる低温系への熱負荷の低減を図っている。

3. クエンチ保護

本コイルでは、クエンチ保護のために、コールドダイオード とコイルを並列接続している。コイルの一部に常伝導転移領 域が生じて電圧が発生すると、コールドダイオードがターンオ ンし、コイルとコールドダイオード間で閉回路が形成される。こ れにより、蓄積エネルギーをコイル全体の熱容量で消費し、コ イルの局所的な温度上昇を避けることで、コイルを保護する。

4. 試験結果

長時間定格通電時における温度測定結果を Fig.2 に示す。 長時間定格通電時におけるコイル系の温度は、約 3.3K であ り、運転に十分な余裕を持って冷却できていることを確認した。 なお、冷凍機の各冷却ステージの温度と熱交換量の推定値 は、それぞれ 1st stage が約 44K, 35W, 2nd stage が約 3.2K, 0.9W である。

定格通電時におけるコイル中心軸上の磁場測定では、コ イル中心から750mmの範囲において、測定値と計算値との偏 差が1%未満であり、良好な一致を示すことを確認した。

5. まとめ

筑波大学プラズマ研究センターの次期装置向けに, NbTi 超伝導線を使用した伝導冷却方式の超伝導コイルを設計・製 作した。長時間定格通電試験結果から,運転に十分な冷却を 達成したことを確認した。また,コイル中心軸上の磁場測定か ら,測定値と計算値との偏差が1%未満であり,良好な一致を 示すことを確認した。

Table1 Parameters of the superconducting magnet.

Superconducting wire type	Monolithic,NbTi/Cu
Cu/NbTi ratio	4.3
Dimensions(insulated)	$1.7~\mathrm{mm}$ $ imes$ $1.1~\mathrm{mm}$
Magnet	
Number of Turns	5,854
Rated current	236.3 A
Central magnetic field	1.5 T
Maximum field in winding	3.6 T
Stored energy	1.4 MJ
Inductance	50.1 H
Total wight	1.9 t





Fig.2 Temperatures at long-time excitation.

薄板近似を用いた REBCO コイルの三次元電磁界・熱伝導場連成解析 Three-Dimensional Electromagnetic and Thermal Field Coupled Analysis of

Superconducting REBCO Coils using Thin Plate Approximation

<u>銭</u>可楨,寺尾悠,大崎博之(東大) <u>QIAN Kezhen</u>, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo) E-mail: qiankezhen@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、REBCO線材は優れた臨界電流特性、比較的に高い 運転温度、また、設計と製造における高い柔軟性を持つこと から、NMR(核磁気共鳴装置)や SFCL(超電導限流器)等の コイルへの応用が広く期待されている。しかし、実用化にあた って、REBCO線材の臨界電流密度(*J*₀)の不均一性や熱的擾 乱などに起因するホットスポット問題が課題としてあげられる。 本研究では、REBCOコイルを対象とし、有限要素法を用いた 三次元電磁界・熱伝導場連成解析ツールを開発した。本解析 ツールを用い、過電流が流れる際(SFCL応用を想定)と熱的 擾乱が発生する際(マグネット応用を想定)の REBCOコイル の過渡的な電磁界・熱的振る舞いを考察する。

2. 数値解析手法と解析結果

超電導特性の強い温度依存性を考慮し、本研究では電磁 界・熱伝導場連成解析を適用した[1]。電磁界解析において は、薄板近似と **T**-**Q**法に基づき、直交曲線座標系への座標 変換を用いて支配方程式を作成した。なお、超電導体の E-J 特性はn値モデルにより近似し、J_cの温度依存性も考慮した。 一方、熱伝導場解析においては、熱伝導率や比熱の温度依 存性を考慮し、液体窒素冷却や REBCO 線材のジュール発熱 は境界条件で表現した。

本解析ツールを用い、電流リード付きのソレノイド型 REBCO コイルをモデル化した。先ず、SFCL 応用を想定し、 過電流(*I*_c456 A に対し想定ピーク電流 2000 A)を流し、*J*_c 分布が均一である場合の電流密度、発熱密度分布を Fig. 1 に示した。電流リード接続部分に線材幅方向の電流密度 分布が偏り、発熱が最も高いことがわかった。本モデルに *J*_cの磁場依存性を考慮していないことから、この電流分布 の偏りは電流リードが発生する磁場による影響だと考える。

次に、マグネット応用を想定し、60%*I*cの運転電流が流 れる際に熱的擾乱を 100 ms 間与え、擾乱のエネルギーと 面積が異なる 3 つのケースを想定した: Case A (8.68 J@Fig. 2(b))、Case B (1.74 J@Fig. 2(b))、Case C (8.68 J@Fig. 2(a))。その結果を Fig. 3 に示す。同じ擾乱エネルギー (Case A)とエネルギー密度(Case B)でも、面積が小さいほ どクエンチ発生の可能性が低くなることを示し、クエンチ検 出を検討する際にこの擾乱面積の重要性も示唆した。





Fig. 1 Current density distribution of the whole SFCL REBCO coil, and current density, temperature distribution, and Joule heat density in the tape width direction at the bottom end and in the middle of the REBCO coil with uniform J_C distribution at the peak current (1.1 ms)



Fig. 2 Cases of different heat input area: (a) 11 mm \times 4 mm (full tape width); (b) 11 mm \times 0.8 mm (1/5 tape width).



Fig. 3 Transient maximum temperature and entire voltage of the REBCO coil in Case A, B, and C. Moreover, transient current density distribution and transient temperature distribution of Case A in the tape width direction in the heated area.

参考文献

 3. 銭可楨ら:第 99 回 2020 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集 1P-p24
HTS コイルのクエンチ保護に向けた金属-絶縁体転移酸化物薄膜の作製 Fabrication of Metal-Insulator Transition Oxside Films for Quench Protection of HTS Coils

山田 寬之, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大); 一野 祐亮(愛工大)

YAMADA Hiroyuki, TSUCHIYA Yuji, YOSHIDA Yutaka (Nagoya University); ICHINO Yusuke (Aichi Institute of Technology) E-mail: yamada.hiroyuki@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

HTS コイルのクエンチ保護のために、ターン間を絶縁しな い NI コイルが提案されている。しかし、NI コイルには充電遅 延の課題が存在する[1]。そのためクエンチ保護と充電遅延の 緩和の双方を併せ持つHTSコイルが必要である。今回、我々 は NI コイルの磁場安定性向上のため金属-絶縁体(Metal-Insulator: M-I)転移酸化物によりターン間を絶縁するM-I 絶縁 コイルを提案する。M-I 転移酸化物は低温領域では抵抗率が 高いが、温度上昇に伴い抵抗率が急激に低下する性質を示 す[2]。M-I 転移酸化物をHTSコイルのターン間絶縁材料とし て用いることで、発熱がなく温度が低い際は M-I 転移酸化物 の抵抗値は高くターン間は絶縁されるが、クエンチが発生し て温度が上昇した際は M-I 転移酸化物の抵抗値が低下して ターン間転流が期待される。M-I 絶縁コイルは NI コイルのも つクエンチ保護と絶縁コイルのもつ充電遅延の抑制という二 つの性質の両立が期待される。

M-I コイルの実現のためには REBCO 線材と PYCCO 薄膜 を共巻きする必要がある。そこで、本研究では M-I 絶縁コイル の実現に向け、 PYCCO バルクの示すような M-I 特性の発現 を目標として、 PLD 法により M-I 転移酸化物の一つである (Pr_{1-x}Y_x)_{1-y}Ca_yCoO₃(PYCCO)薄膜を各種基板上に成膜し、 M-I 特性の評価を行った。

2. 実験方法

KrF エキシマレーザーを用いた PLD 法により、酸素分圧 0.5 Torr、成膜基板温度 600 °C、レーザー繰り返し周波数 20 Hz で PYCCO 薄膜を作製した。ターゲットには PYCCO(x = 0.1, y = 0.3)を使用した。成膜基板として石英基板を用いた。

作製した PYCCO 薄膜の結晶構造について、X 線回折を 用いて評価した。また、表面構造について、走査型電子顕微 鏡(SEM)を用いて観察した。組成比について、エネルギー分 散型 X 線分光分析装置(EDX)を用いて分析した。PYCCO バルク及び PYCCO 薄膜の抵抗値について、Quantum Design 社製の PPMS を用いた直流四端子法で測定した。以 下バルク、薄膜と呼ぶ。試料を10 K/min の速度で 300 K から 10 K まで降温した後、300 K まで昇温して抵抗率の温度依存 性を測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1に(a)バルク及び(b)薄膜の 2θ-θ 回折パターンを示す。 バルクでは PYCCO の(121)、(202)、(123)、(242)面の回折ピ ークが観測され、多結晶であることが確認された。一方、薄膜 では(121)面のピークのみが観測された。また、薄膜の SEM 像では数 μm 以上の PYCCO の粒は観測されなかった。一方、 EDX からバルクの組成と薄膜の組成の誤差は 8%程度であっ た。これらの結果から、薄膜では数 μm 以下の PYCCO 結晶 が形成されていると考えられる。

Fig. 2にバルク及び薄膜の電気抵抗率ρの温度依存性を示 す。バルクでは約80 K以下でρが増加し始め、80 Kから10 Kに おいての約4桁のρの急峻な増加が観測された。約75 Kにてρ の温度に対する増加の傾きが最大になり、さらにヒステリシス が観測された。一方、薄膜では80 Kから10 Kにおいての約3 桁のρの増加が観測された。しかし、PYCCO薄膜ではバルク が示すような急峻なρの増加は観測されず、さらにヒステリシス を示さなかった。バルクのρの温度ヒステリシスは、PYCCOの ペロブスカイト構造の歪みによるM-I転移に伴う構造相転移が 原因であると考えられている[3]。本研究で薄膜がρの温度ヒス テリシスを示さなかった原因としては、PYCCOと石英基板の 基板界面における面内応力が働いたためであると考えられる。 同様のρ-Tの挙動は単結晶基板上にエピタキシャル成長させ たPYCCO薄膜でも報告されている[2]。

これらの結果から、M-I 絶縁コイルへの応用のためには応 力が働かなく薄膜ではなくバルクを用いる必要があると考える。 当日は石英基板以外の異なる基板上に作製されたPYCCO 薄膜の特性についても報告する予定である。



Fig. 1 X-ray diffraction spectra of the PYCCO(x = 0.1, y = 0.3) (a) bulk and (b) the film.



Fig. 1 Temperature dependence of the resistivity in the PYCCO(x = 0.1, y = 0.3) bulk and the film.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19K22154、 20K15217、20H02682)、JST-A-STEP、NEDOからの助成を受けて実施しました。本研究では岩手大学藤代博之先生、内藤 智之先生よりPYCCOバルク作製に関して御協力をいただきました。

- 1. X. Wang *et al.*; Supercond. Sci. Technol. **26**, 035012 (2013).
- 2. H. Fujishiro et al.; J. Appl. Phys. 121, 115104 (2017).
- 3. S. Tsubouchi et al.; Phys Rev. B66, 052418 (2002).

無絶縁高温超電導コイルの反復窒素冷却による 巻線間接触抵抗測定に関する検討 Study on the turn-to-turn contact resistance measurement of no-insulation HTS coils

with repeated liquid nitrogen cooling

<u>宮本</u>康平,小林 大剛,西川 大亮,井上 良太,植田 浩史,金 錫範(岡山大学);野口 聡(北海道大学) <u>MIYAMOTO Kohei</u>, KOBAYASHI Hirotaka, NISHIKAWA Daisuke, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama University); NOGUCHI So (Hokkaido University) E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導コイルは、無絶縁巻線技術により高い熱的安 定性が得られることが明らかになり、多くの高磁場発生用超電 導マグネットにこの巻線技術の採用が検討されている。しかし、 無絶縁高温超電導コイルの高熱的安定性を実現するには、 ターン間接触抵抗とインダクタンスのバランスが重要であるこ とが明らかになっており、ターン間接触抵抗をより正確に計測 する必要がある。そこで、我々は、交流通電による無絶縁高 温超電導コイルのターン間接触抵を測定する方法を提案し、 その有効性について検討して来た[1]。本研究では、REBCO 無絶縁試験コイルを用いて、液体窒素で繰り返し冷却させる ことによるコイルの熱収縮と熱膨張に伴うターン間接触抵抗の 変化について提案した交流通電法を用いて計測したので、そ の結果を報告する。

2. 実験方法

20ターン無絶縁高温超電導試験コイルの概要図をFig.1に示す。試験コイルの巻線は、REBCO線材を使用した。電圧測定用のタップを1層目と20層目に取り付けた。試験コイルの中心には、自己磁場を測定するためにホール素子を設置した。実験手順としては、まず初めに、試験コイルを液体窒素浸漬冷却し、超電導状態になってから、直流電流をスイープすることで、試験コイルのIcを測定した。次に、周波数を0.01Hzから100Hzまで変化させながら交流通電を行い、試験コイルの自己磁場、インダクタンス、および、接触抵抗の測定を行った。交流通電電流の振幅は、12A,24A,40Aと3パターンで行った。試験コイルの接触抵抗およびインダクタンスは、ロゴスキーコイルを用いることで電流の位相を検知し、その位相を基準として、試験コイルの全電圧をロックインアンプを用いて測定した。その後、試験コイルを常温の状態まで昇温させた後また冷却させて、接触抵抗の値の変化を測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig.2 には、1 回目の冷却時における各周波数における試 験コイルの接触抵抗の測定の値を示し、Fig.3 には、直流通 電時と、交流通電時における試験コイルの自己磁場を示す。 Fig.2 および、Fig.3 より、周波数が0.1 Hz以下において、接触 抵抗は、10 μΩ 以下となり、また、コイルの自己磁場は、直流 通電時とほぼ同様となった。これは、周方向電流が支配的で あるためと考えられる。0.1 Hzから10 Hzまでは周方向に流れ ていた電流が径方向に流れるようになり、10 Hz以上において は、ほとんどの電流は径方向に流れていると考えられる。また、 さらに周波数を上げると、接触抵抗は大きくなることが確認さ れた。これは、周波数の増加に伴い、電流経路の面積が小さ くなったことによって接触抵抗が増加したと予測している。 Fig.4に24Aの交流電流を通電した際の1回目と2回目の接 触抵抗の値を比較したものを示す。Fig.4 より、2 回目の接触 抵抗の値は、予想と反して1回目の測定結果に比べて小さく なった。そのため、今後は、原因について研究する予定であ る。



Fig.1 Schematic drawing of 20 turns NI test coil wound with REBCO wire



Fig.2 Measured the contact resistance of test coil as a function of frequency at the first cooling



Fig.3 Measured the magnetic field of test coil as functions of current and frequency at the first cooling



Fig.4 Measured the contact resistance of test coil when the 1st and 2nd cooling as a function of frequency

参考文献

 S. Noguchi, R. Miyao, H. Okusa, T. Tatsuta, H. Ueda, and S. Kim, "Turn-to-turn contact resistance measurement of no-insulation REBCO pancake coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 4601605.

コイル最外層に金属リングを施した無絶縁高温超電導コイルの 熱的安定性に関する研究 Study on the thermal stability of non-insulated HTS coil with a metal ring

on the outermost layer

<u>西川 大亮,</u>小林 大剛, 宮本 康平, 井上 良太, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大) <u>NISHIKAWA Daisuke</u>, KOBAYASHI Hirotaka, MIYAMOTO Kohei, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama University) E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

無絶縁巻線方式によって高温超電導コイルは高い熱的安 定性を得られるようになった。そこで我々は、これまで無絶縁 高温超電導コイル内に生じる局所的な熱擾乱に対する熱的 安定性について実験的な検証を行ってきた。しかし、コイルの 最外巻線に生じた熱擾乱にはその有効性が保証されないこと に加え、コイルの冷却と昇温に伴う機械的変形によって無絶 縁コイルのターン間の接触抵抗が変化し、分流特性に悪影響 を及ぼすおそれが確認された。これらの問題に対し、我々は 保護用の金属リングをコイルの最外層に設置することを提案 している。本検討では、保護リングとして、銅リングをコイルに 施し、コイルの熱的及び機械的安定性への影響を実験的に 検証した。

2. 実験内容

Fig.1に、作製した37ターン無絶縁 REBCO 高温超電導コ イルの概略図を示す。コイル内部には熱擾乱を投入するため のヒータを3つ挿入した。ヒータは1 kΩのひずみゲージを用 いており、10 W まで可変できる。また、コイルのひずみを測定 するために、コイル内の3か所と、銅リングの1か所に120 Ω のひずみゲージを挿入した。電圧測定用のタップはコイルに 16 か所、銅リングに 4 か所取り付けた。また、コイル中心には コイルの自己磁場を測定するためのホール素子を取り付けた。 試験コイルに 50 A の直流電流を通電し、各ヒータから熱擾乱 を投入した際の各ターン間電圧、及びコイル中心の自己磁場 を測定し、分流特性について検証した。また、同様の実験を 複数回行い、金属リングの有無による分流特性、及びコイル に生じるひずみの変化を測定することで、提案する金属リング の有効性について検証を行った。なお、1度目と2度目の実 験では銅リングを装着せず、3 度目以降の実験で銅リングを 装着している。

3. 実験結果及び考察

Fig.2に、試験コイルに50Aの直流電流を通電し、ヒータ3 から8.1Wの熱擾乱を時刻3sから10秒間投入した時のコイ ルの各ターン間電圧及びコイル中心の自己磁場の測定結果 を示す。なお、(a)から(c)は1度目、2度目、3度目の測定結果 を示している。1度目の実験結果(a)より、時刻8.45 s でコイル の両端電圧(V1-all)と磁場の値が一定に落ち着いていることが 確認された。一方で、2 度目の実験結果(b)より、ヒータから熱 擾乱を投入している間は、コイルの両端電圧と中心磁場が変 化し続けているため、1度目の実験に比べて線間方向への通 電電流の分流が、ゆるやかに発生し続けていることが確認さ れた。したがって、1 度目の実験の後、コイルを室温に昇温し たことで巻線間の接触抵抗が増加していることが確認できる。 しかし、銅リングを取り付けた3度目の実験結果(c)より、コイル の両端電圧及び中心磁場は8.52 s以降一定に落ち着いてい ることが確認された。したがって、巻線間の接触抵抗は2度目 の実験結果に比べて低下しており、巻線間の接触状態が回 復され、コイル内の電流分流が速やかに行われていると考えられる。以上の結果より、金属リングを施すことで、コイルの冷却と昇温に伴う巻線間の接触抵抗の変化を抑制することが可能となり、金属リングがコイルの機械的変形の防止に有効であることが確認された。







Fig. 2 Measured the voltage and self-magnetic field when the heat input is 8.1 W by Heater 3 for 10 seconds with an operating current of 50 A.

磁気顕微法を用いた Coドープ BaFe₂As₂ 薄膜 J₆-T₆分布の相関性 及び統計的挙動の議論 A Discussion about Correlation between J₆ & T₆ Distributions and their Statistical Behaviours of a Co-doped BaFe2As2 Film Based on

Low Temperature Scanning Hall Probe Microscopy

<u>呉 澤宇</u>, 東川 甲平 (九大); 徐 中堂, 馬 衍偉 (中国科学院電工研); 木須 隆暢 (九大) <u>WU Zeyu</u>, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu Univ.); Xu Zhongtang, MA Yanwei (IEE CAS); KISS Takanobu (Kyushu Univ.) E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

122系鉄系超伝導PIT線材は、実用的な磁場中Jcを示して いる[1]。同じくBa122超伝導薄膜に比べて未だ低く、更なるプ ロセス改良が求められている。その際に、電流制限因子やイ ントリンシックな材料特性を調べるためには、多結晶の 線材より単結晶薄膜が適しておる。しかし問題は、SQUID磁 化法などマクロな特性評価では膜の空間情報を十分に取得 できなく、上記目的を果たせるには致命的である。そこで本 研究では、単結晶基板上で成膜したCoドープBaFe2As2薄 膜試料を対象に、空間情報取得できる磁気顕微法に基づ いて面内臨界電流密度(J₆)ならびに臨界温度(T₆)の分布を 評価し、その統計分布や両者の関連性を議論した。

2. 実験方法

低温走査型ホール素子磁気顕微鏡(LT-SHPM)を用いて、 試料直上の磁場分布(B_2)を測定した。測定対象は、 CaF_2 単 結晶基板上に成膜したBa-122:Co薄膜である。そのサイズ は5 mm×5 mmである。ヒーターで温度を調節し、 B_z の温 度依存性も調べた。

3. 結果と考察

測定できた5,7,10,12,14,16 Kにおける磁場分布を用いて、Biot-Savart則の逆問題を解くことで対応するJ。分布を評価した、Fig.1(a)に5 Kの評価結果だけを示した。さらに、J。分布の温度依存性をもとに、各座標位置におけるT。と温度が極限の0 KにおけるJ。を導出する。その際に、局所T。の導出において、null-line、電流方向が急速に変化する箇所ならびに欠陥位置の影響を考慮し除外している。結果、Fig.1(b)に示すようなT。分布を取得できた。

次に、同位置における局所よ(0K)とT。をプロットし、その相関関係を検討した。Fig.2に示すように、おおよそ20K を境に異なる相関関係を見受けられ、プラトー的な依存性から右上がりの挙動に分けられる。異なる相関関係を持つ場所 を特定すると、プラトー依存性の部分は薄膜周辺に位置し、 右上がり依存性の部分は膜中心部に集中することが分かった。 また、膜周辺部と中心部よ分布の分布関数も異なるワイブル 関数にスケールし、異なる特性を持つことを示唆する[2]。

4. まとめ

磁気顕微法によってマクロな評価法では得られない面内J。 とT。空間分布を評価でき、両者の統計分布ならびに空間分 布的相関について明らかとした。

謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会と中国科学院 (CAS)との二国間交流事業(共同研究)による支援を得た。

参考文献

- H. Huang et al., Supercond. Sci. Technol. 31 (2018) 015017.
- [2] T. Kiss et al., Cryogenics 80 (2016) 221-228.



(a) Critical current density J_c (MA/cm²)

Fig. 1 (a) Critical current density J_c distribution at 5 K corresponding to magnetic field B_z distribution measured by SHPM. (b) Critical temperature T_c distribution excluding null-line, diagonal and local obstacle region.



Fig. 2. Correlation diagram of local J_c and T_c at the same position based on J_c distribution at 0 K and T_c distribution, both derived from the local temperature dependence of J_c distributions. Guide lines are drawn to indicates different correlation behaviors at the boundary ~20 K.

長尺高温超伝導線材の臨界電流評価手法の比較検討 Comparison among characterization techniques for long length HTS tapes

<u>鬼塚 雄大</u>, 呉 澤宇, 東川 甲平, 木須 隆暢(九州大学) 町 敬人, 衣斐 顕, 和泉 輝郎(産総研) <u>ONITSUKA Yudai</u>, WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu University) MACHI Takato, IBI Akira, IZUMI Teruo (AIST) E-mail: y.onitsuka@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の実応用において、臨界電流の長手方向 均一性は重要な性能指標の一つであり、応用機器の信頼性 向上の鍵を握る。典型的な測定法として磁化した線材の表面 磁界分布を連続的に測定する磁気的手法と四端子法による 通電法を適用して尺取り方式で各区間の FV 特性を測定す る手法があげられる。前者は高解像度ではあるが、直接的な 通電法による Lや n値との対応は不明確である。後者は実用 環境に近い計測により L のみならず n 値の情報を得ることが 出来るが、分解能はメートルオーダーであり微小欠陥の検出 は困難である。この様に、長尺線材の臨界電流評価は、実用 材料の基礎的評価手法であるにもかかわらず、これらの手法 による測定結果の定量的な関係は未だ明確化されていない。 前回の報告では、短尺モデル試料を用いて Tapestar[™] 方式 の解析による I。導出時の留意点を報告した[1]。本研究では、 さらに実際の長尺線材について、Tapestar™ ならびに RTR-SHPM による測定を実施し、その結果について比較検討を行 った。更に、尺取り式四端子測定を行い、RTR-SHPM によっ て導出される 1。値の長手変化との関係について検討した。

2. 実験·解析方法

本研究では、全長約 50 m、幅 10 mm の線材を対象とし、 測定を行った。まず、リール式ホール素子磁気顕微鏡(RTR-SHPM)を用い、77K で着磁した REBCO 線材の長手方向分 解能 830 μ m、幅方向分解能 40 μ m の残留磁界分布を取得し た。2 次元残留磁界分布に対しビオ・サバール則の逆問題に よって磁化電流のシート電流密度のベクトル成分(J_x , J_y)を導 出し、そのベクトル和によって磁化電流密度(*J*)を決定し、さら に幅方向に積分することによって Lを得た。また、同線材に対 し TapestarTMによる測定(長手方向分解能約 800 μ m、リフトオ フ距離約 1 mm)を行い、Lを導出した。さらに尺取り式 4 端子 測定を同一線材で行い、端子間距離 60 cmごとの L(電解基 準 10⁻⁴ V/m)および*n*値の長手方向分布を導出した。

3. 結果と考察

Fig. 1, Fig. 3 に今回の実用線材を RTR-SHPM で評価した 際に欠陥がみられたシート電流密度分布を示す。Fig. 1 には リフトオフ距離より大きい約 3 mmの欠陥、Fig. 3 にはリフトオフ 距離と同等の大きさである約 1 mmの欠陥がみられる。Fig. 2、 Fig. 4 に TapestarTMと RTR-SHPM での測定により導出した局 所 L分布を示す。両者の測定における電界基準が異なるため、 比較には平均値で規格化した値を用いた。約 3 mmの欠陥が みられる Fig. 2 では TapestarTMで評価する L値に誤差が生じ ており、欠陥の中心部で盛り上がるような分布がみられ、前報 の結果をよく再現している [1]。また、Fig. 4 では欠陥部にお いて両者ともにほとんど一致する分布が得られた。

以上の結果から、実用線材においても定量性の担保には 欠陥サイズと同等のリフトオフ距離での測定が必要であり、 Tapestar[™]での測定を1 mmのリフトオフ距離で行うとすると、 1 mm以上の欠陥(10 mm幅線材の場合は約 10 %、5 mm幅線材 の場合は約 20 %以上低下する ℓ値)には注意が必要であるこ とが分かった。当日は尺取り式 4 端子法で測定した分布と RTR-SHPM で測定した分布の比較結果もあわせて報告する。



Fig. 1 Sheet current density of magnetization current (Defect size is 3mm) obtained from Scanning Hall probe microscopy.



Fig. 2 Longitudinal distributions of local critical current normalized by the average I_c (Defect size is 3mm).



Fig. 3 Sheet current density of magnetization current (Defect size is 1mm) obtained from Scanning Hall probe microscopy.



Fig. 4 Longitudinal distributions of local critical current normalized by the average I_c (Defect size is 1mm)

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]鬼塚ら:2020年度春季低温工学・超電導学会, 2P-p11.

塗布熱分解法で作製された REBCO 薄膜線材の 臨界電流密度分布と磁場中臨界電流特性

Jc distribution and in-field critical current of REBCO coated conductor fabricated by TFA-MOD process

<u>田中 祥貴</u>,酒井 秀哉(福岡工大); 寺西 亮(九大); 井上 昌睦(福岡工大)

TANAKA Yoshiki, SAKAI Shuya (Fukuoka Inst. Tech.); TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.) E-mail: s1751027@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

塗布熱分解法は低コストな超伝導線材作製法として開発 が進められており、磁場中臨界電流特性向上のための人工 ピン導入も図られている。本研究では、人工ピンを導入した塗 布熱分解法で作製された希土類系高温超伝導(REBCO)線 材の面内臨界電流密度(Jc)分布を測定し、異なる Jc 領域の 磁場中臨界電流特性について、物性特性測定システム (PPMS)による磁場中 Jc 測定とエネルギー分散型 X線分光 器搭載走査型電子顕微鏡(SEM-EDS)による結晶構造の観 察を行った。

2. 実験方法

CeO₂/LaMnO₃/MgO/Y₂O₃/Gd₂Zr₂O₇/Hastelloy 基板上に塗 布熱分解法により YBaCuO_y 膜を形成した。仮焼は温度 430℃、酸素濃度 100%、本焼は温度 780℃、酸素濃度 1,000ppm の条件下で行った。線材のサイズは 10mm 角であり、 最終膜厚は 600nm 程度であった。

この線材の捕捉磁場分布を走査型ホール素子磁気顕微 鏡(SHPM)システムにより計測した。得られた磁場分布を基に J_c 分布を求めた。その後、高 J_c 部と低 J_c 部の領域について、 PPMS による T_c 測定及び J_c-B 測定と、SEM-EDS による組 織観察^[1]を行った。

3. 結果及び考察

SHPM システムにより得られた捕捉磁場分布から求めた J。 分布を Fig. 1 に示す。試料は破線の位置と対応している。同 図より、試料の右半面には大局的な電流が流れているものの、 左半面にはほぼ電流が流れていないように見える。

そこで、高 *J*。部と低 *J*。部とを切り出し、磁場感度が高い PPMS(カンタムデザイン Versa Lab)による磁化測定を実施し た。切り出した箇所は Fig. 1 の(I)、(II)で、大きさはそれぞれ 4mm 角である。*T*。測定の結果、オンセット *T*。はそれぞれ 90.4K と 87.5K であった。Fig. 2 に *J*。-*B* 特性を示す。縦軸は 77K、自己磁場の*J*。で規格化している。低 *J*。部の *J*。値は高 *J*。 部の 1/100 程度しかなく、このことは Fig. 1 の *J*。分布において ほぼ電流が流れていないように見えたことと対応している。ま た、*J*。の磁場依存性も高 *J*。部と比べて大きい。

高 J。部と低 J。部の SEM-EDS 観察を行い、結晶構造の比較を行った。どちらの領域でも、Y123から成る超伝導相と、Ba 濃度が極端に低い非超伝導相とが混在している様子が観察された。高 J。部では超伝導相が支配的で、それらの結晶粒が物理的につながっており、これが大局的な J。分布が得られた要因だと考えられる。一方、低 J。部では局所的に超伝導相の確認はできたものの、それらを取り囲むようにして非超伝導層が存在していた。これが原因で、大局的な J。分布が得られなかったのだと考えられる。



Fig. 1 Critical current density distribution measured by SHPM



Fig. 2 Jc-B characteristic at 65K and 77K

参考文献

[1] M. Inoue et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.99(2020) p.84

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 JP18H01928 の結果得られたものである。 <u>篠倉 大輝</u>, 江藤 大登, 酒井 秀哉, 田中 祥貴, 井上 昌睦(福岡工業大学) <u>SASAKURA Taiki</u>, ETO Daito, SAKAI Shuya, TANAKA Yoshiki, INOUE Masayoshi (FIT) E-mail: s1752023@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

1P-p09

市販の REBCO 線材には臨界電流の長手分布が仕様とし て添付されるが、線材幅方向の J_c 分布に関する情報はなく、 磁場中臨界電流特性に対する寄与も明らかではない。そのた め、細線化の可否や磁場中 I_c の保証値をどこに見込むかとい った実用上の検討を十分に行うことができない。本研究では、 長手方向に臨界電流分布を有する市販の REBCO 線材の面 内 J_c 分布を走査型ホール素子磁気顕微鏡(Scanning Hall-probe microscopy, SHPM)で測定するとともに、 J_c 値の異 なる領域の磁場中 J_c 特性について調べた。

2. 試料諸元

線材メーカーから長手方向に臨界電流(L)分布を有する 4mm 幅の REBCO 線材を入手した。その線材の L。分布を Fig. 1 に示す。同線材の高 L。部と低 L 部から長さ 30mm 程度 切り出して測定用試料とした。切り出した箇所は Fig. 1 の(I)及 び(II)である。

3. 面内 J。分布

SHPM によって試料長 30mm の線材の捕捉磁場分布を計 測した。試料を銅板に固定し液体窒素で冷却した後、永久磁 石を用いて磁化させた。測定時の空間分解能は、線材長手 方向、幅方向ともに 250µm とした。磁場分布からビオ・サバー ルの逆変換を適用して J。分布を求めた。さらに高 L。部と低 L。 部を特定し、それぞれ 4mm 角に切り出し、改めてJ。分布を測 定した。その結果を Fig. 2 に示す。J。分布を比較すると、高J。 部の最大 J。値は低 J。部の最大 J。値より約 40%高い値であ った。さらに、高 J。線材は面内 J。分布がほぼ均一である様子 が確認された。

4. 磁場中 J。特性

物理特性測定システム(PPMS)を用いて測定した 65K と 77K における J_c -B 特性を Fig. 3 に示す。高 J_c 線材の自己磁 場中における J_c 値は 77K で 1.90×10¹⁰ A/m²であった。低 J_c 線材の自己磁場中の J_c 値は 77K で 1.37×10¹⁰ A/m²で、高 J_c 線材の J_c 値と比較すると、その差は約 40%であった。この差 は SHPM で測定した J_c 値の差とほぼ同じである。次に、温度 依存性に注目し、65K と 77K の自己磁場中の J_c 値の比を求 めたところ、両線材とも 2.6 であった。さらに、 J_c -B 特性を規格 化したところ 2 つの線材はスケールすることが確認された。つ まり、測定したこれら J_c 値の異なる部位の磁場中臨界電流特 性は温度依存性を含めて等しいということが確認できた。この 結果より、これらの J_c 分布の差は、線材内部の有効断面積の 違いが原因だと考えられる。

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 JP18H01928 の結果得られたものである。





Fig. 2 J_c distribution at 77K for (I) and (II) in Fig. 1.



Fig. 3 J_c-B characteristics at 65K and 77K for a REBCO CC.

高分解能 X 線 CT を用いた超伝導線材接合部の非破壊評価 Non-destructive observation in superconducting joint by use of micro-XCT

<u>森脇</u> 怜也, 福原 大貴, 太田 真揮人(福岡工業大学);寺西 亮(九州大学);井上 昌睦(福岡工業大学) MORIWAKI Reiya, HUKUHARA Daiki, OTA Makito (FIT); TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.); INOUE Masayoshi (FIT) E-mail: s1752048@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

超伝導線材を用いた大型機器の開発においては、線材の 接合や結合が必須となるため、接続方法の研究開発が進め られている。接合部の開発では広く電気的な性能評価が行わ れているが、そもそもの物理的な接触、接合が得られているの かを把握することが重要である。そこで我々は、超伝導線材 の接合部の空隙構造をX線CTにて評価する取り組みを行っ ている。しかしながら空隙領域の三次元構造解析においては、 試料形状にともなう明度分布により、単純な二値化手法では 空隙領域の抽出が困難であった。本研究ではX線CTにより 得られた画像の統計処理を行い、空隙部の情報を整理し最 適な二値化手法の検討を行った。

2. 測定及び解析方法

試料は、追加堆積した前駆体膜を介して REBCO 層同士 を接合させる手法により作製された接合線材である^[1]。接合 端部から 3.8 mm 程度の距離にわたり X 線 CT による内部構 造観察を行った (Fig. 1)。

X線CT画像の解析はプログラミング言語Python上でプロ グラムを作成し実施した。

3. 結果

Fig. 2 は接合端部から 447 µm と 1,340 µm における横断面 CT 像である。接合部の空隙の有無を確認したいが、線材中 央部の輝度が低く、目視による空隙の確認は困難である。そ こで我々はこれらの画像の統計処理を行い、線材内部の輝 度値情報を確認した。Fig. 3 はFig. 2 の赤線で示す 75×3pixel の領域の輝度値のヒストグラムである。Fig. 2 (I) と (II)、(III) と (IV)で確認できる背景の明度の分布は、Fig. 3 (I) と (II)、(III) と (IV)のように輝度分布のシフトとして確認できることが分かる。また 図中の丸で囲んでいる領域で小さなピークが存在していることが 分かる。空隙は観察している領域内で一番低い輝度値を持ってい ると考えられるため、このような分布が見られた場合に空隙が存在 していることとなる。この結果より、目視では確認することができな かった空隙の有無は、輝度値のヒストグラムの形状から判断できる ことが分かった。

ヒストグラムより空隙部の有無を確認できたので、空隙部抽 出のため二値化を行った。単一の閾値で二値化を行う単純 二値化は画像中の輝度分布のシフトに対応できない為、空隙 部の抽出法として不十分であると考えられる。例えば、Fig. 3 (I)に見られる低輝度ピークを分離する輝度値として19を閾値 に設定して単純二値化処理を行うとFig. 4のような結果となる。 すなわち、黒色で表す空隙部が線材の端まで達しておらず、さら には本来接合部のみに存在しているはずの空隙が接合部上下の 領域にも表される結果となった。そこで我々は、より最適な処理法 として閾値を固定しない適応二値化処理が適当ではないかと考え た。同手法は指定した近傍領域の平均値を基準に、その前後の値 で閾値を決定する手法で、輝度分布にシフトが生じている画像の 二値化に適している。Fig.5は近傍領域を75×3 pixel、引数10にて それぞれ適応二値化処理を行ったものである。Fig. 4 (a)では不十 分であった線材両端までの空隙検出が Fig. 5 (a)では再現できて いることが分かる。また Fig. 5 (b)では(IV)に対応する線材中に存 在する小さな空隙も検出できており、これら適応二値化処理の結 果は輝度分布のシフトに対応できていると考えられる。当日は処 理条件等の詳細についても報告する。



 $I = 447 \,\mu\text{m}$





Fig. 3 Histogram of brightness distribution for I to IV in Fig. 2

(a) $x = 447 \ \mu m$	
(b) $x = 1.340 \mu\text{m}$	

Fig. 4 Binarized image by global threshold. Threshold value is 19.





謝辞

本研究の成果は、JSPS 科研費 JP18H01928、JP19H05617 の助成により得られた。

参考文献

 R. Teranishi, *et al.*: IEEE Trans. on Appl. Supercond. 29 (2019) 6602904

基板自己加熱方式による Pulsed Laser Deposition 法を用いた YBa2Cu3Oy+BaHfO3 厚膜線材の作製と評価 Fabrication and evaluation of YBa2Cu3Oy + BaHfO3 thick coated conductors using self-heating system in Pulsed Laser Deposition method

<u>一野 祐亮</u>, (愛工大); 佐藤 航, 中村 祐介, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大)

ICHINO Yusuke, (Aichi Inst. Technol.); SATO Wataru, NAKAMURA Yusuke, TSUCHIYA Yuji, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.) E-mail:y.ichino@aitech.ac.jp

1. はじめに

近年では REBa₂Cu₃O_v (REBCO) 線材の実用化に向けて、 「磁場中においても高い臨界電流 L。を持つ線材」が求めら れている。BaMO₃(M: Zr, Sn, Hf, etc.) ナノロッドを REBCO 膜内へ導入する方法は、REBCO線材における B//c 方向の 磁場中 L を向上できる有効な方法である[1]。一方、L を向 上させるためには、臨界電流密度 Jc を維持した膜厚増加 が必要不可欠である。しかし、膜厚増加に伴い、a 軸配向 粒が発生し、J。は低下する[2]。a軸配向粒発生は成膜時に おける膜表面温度の低下に起因するため、様々な基板加熱 方法が提案されている。加熱方法の1つとして基板自己加 熱方式がある[3]。基板自己加熱方式とは金属基板に通電 することで、ジュール熱によって基板が発熱する方式であ る。基板自己加熱方式は、ヒーターで基板を加熱する従来 の加熱方式に対して、高速な熱応答をし、高い熱効率を持 つ[3]。よって、膜表面温度が低下した際は、瞬時に基板温 度T_sを上昇させて、膜表面温度を一定にできることから、 膜厚が増加しても表面温度などの成膜条件を維持するこ とが可能となり、厚膜化における a 軸配向粒生成の抑制が 期待される。

本研究では、REBCO 線材の *I*。向上かつ磁場中特性向上 を研究目的として、成膜時における *T*sのフィードバック 制御(FBC)を行った無添加及び 3.0 – 9.0 vol.%BaHfO3 (BHO) 添加 YBa₂Cu₃O₂ (YBCO) 線材を作製し、膜厚に対 する結晶性や超伝導特性を評価した。

2. 実験方法

基板自己加熱方式で加熱した IBAD-MgO 基板上に Pulsed Laser Deposition (PLD)法を用いて無添加及び BHO 添加 YBCO 厚膜を作製した。成膜時は熱電対及び放射温 度計を用いて、 T_s の FBC 制御を行った。比較のために FBC 制御なしでも成膜を行った。 $T_s = 843$ 及び 850°C、酸素分 圧 $P_{02}=27$ 及び 200 Pa、ターゲット表面のレーザーエネル ギー密度 E = 1.5 J/cm²の条件下で、膜厚が 0.9 - 8.6 µm の 線材を作製した。電気特性を測定する直前に、400°Cで酸 素アニールを行った。薄膜の結晶配向性評価には X 線回 折法、膜厚の算出には高周波誘導結合プラズマ発光分光分 析法を用いた。 I_c は直流四端子法を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1に異なる膜厚で作製した無添加 YBCO 厚膜線材の I_c (77 K, s.f.)を示す。Without FBC は、基板に一定電流を流 しつづけるだけで FBC していないことを示す。この結果 から、熱電対の FBC によって、無添加 YBCO 線材の I_c は 膜厚 4.9 µm まで単調増加し、最高で I_c = 1080 A/cm-w (77 K, s.f.)、平均で I_c = 845 A/cm-w (77 K, s.f.)の特性を得た。 また、放射温度計を用いて FBC をすることにより、 I_c は 膜厚 3.0 µm まで単調増加し、最高で I_c = 387 A/cm-w (77 K, s.f.) の特性を得た。

Fig.2に放射温度計を用いてFBCを行った膜厚が3.0 µm の無添加及び3.0 – 9.0 vol.%BHO 添加 YBCO 線材における*L-B* 曲線を示す。YBCO 線材はBHO の添加量によって磁場中特性が変化することが確認できた。本研究において

は、3.0 vol.%の BHO を添加することで最も YBCO 線材の 磁場中特性が向上した。77 K, 1 T では、BHO を添加する ことによって *I*_c が 121 A/cm-w から 125 A/cm-w(77 K, 1 T) に向上した。



Fig. 1 Thickness dependence of I_c (77 K, s.f.) in the YBCO films without BHO.



Fig. 2 Magnetic field dependence of I_c in the 3.0 μ m thick BHOdoped YBCO fil006Ds.

謝辞

本研究の一部は、JSPS (19K22154, 20H02682, 20K15217)、 JST-ALCA、JST-A-STEP 及び NEDO からの助成を受けて 実施したものである。IBAD-MgO テープに関して、産総研 和泉輝郎様、衣斐顕様および町敬人様、また、(株)フジク ラ 飯島 康裕様の御協力を得た。

- S. Miura, et al.: Supercond. Sci. Technol. 28, 065013-065021(2015).
- [2] A. Ibi, et al.: Physica C 445–448, 525–528 (2006).
- [3] G. Majkic, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. 25, 6605304-6605308 (2015).

表面レーザー加熱法を用いて作製した厚膜 YBa₂Cu₃O_y線材の磁場中超伝導特性 Superconducting properties of thick YBa₂Cu₃O_y coated conductors by the surface laser heating

土屋 雄司, 松坂 陣(名大); 一野 祐亮(愛工大); 吉田 隆(名大); 岡田 達典, 淡路 智(東北大) <u>TSUCHIYA Yuji</u>, MATSUZAKA Jin (Nagoya University); ICHINO Yusuke (Aichi Inst. Technol.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya University); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku University)

E-mail: tsuchiysa@nuee.nagoya-u.ac.jp

1.はじめに

REBa₂Cu₃O_v(REBCO)高温超伝導線材は高い臨界温度T_c と高い磁場中臨界電流密度Leを持つため、様々な機器への 応用が期待されている。しかし、従来の低温超伝導線材より 高い線材コストが課題である。本研究では、作製プロセスコスト の削減を試みた。その方法として、臨界電流ル向上による必 要線材長の短縮に着目した。超伝導線材は、主に磁場発生用 途に用いられており、所定の磁場を発生させるためにはLを 向上することで磁場発生に必要な巻き数が低減されるため、 作製プロセスを短縮でき、結果として作製プロセスコストを削 減できる。高L化の手法として、REBCO層の厚膜化が挙げら れる。しかし、現在線材作製手法として広く用いられている Cold wall 法では、一般的な線材の厚さである 1-2 µm 以上 の厚膜化をするとα軸配向粒が発生し、それが電流を阻害す ることで超伝導特性が低下してしまう[1]。そこで、我々の研究 グループでは新たな線材作製手法として表面レーザー加熱 法を開発し、高Lを持つ厚膜REBCO線材の作製とその超伝 導特性の評価を行うことで表面レーザー加熱法の有効性に ついて検討した。

2.実験方法

表面レーザー加熱法を用いて YBa₂Cu₃O₃(YBCO)線材を IBAD-MgO 基板上に作製した。表面レーザー加熱法には、 浜松ホトニクス社製の溶着用光源 SPOLD(波長 915 nm、連 続波)を用い、SiC ヒーターによる基板裏面からの加熱を併用 した。膜厚の増加による REBCO 表面温度の低下を考慮し、 膜厚ごとにレーザー出力を1 Wから5 Wまで変化させて線材 の作製を行った。結晶配向性は X 線回折法、超伝導特性は 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 ターにおいて温度 65 K-77 K、磁場 0-15 Tにおいて直流四 端子法を用いて評価した。

3.実験結果及び考察

Fig. 1 に Cold wall 法及び表面レーザー加熱法を用いて異 なる膜厚で作製したYBCO線材の α軸配向粒混在率を示す。 この結果から、表面加熱レーザー法を用いることで、厚膜時 のα軸配向粒発生は大幅に抑制されることが示された。表 面加熱レーザー法を用いて作製した8 µm厚のYBCO線材で は、77 K、自己磁場下において1,500 A/cm-widthを超える 臨界電流Icが確認された。現在市販されているREBCO線材 のkは500-1000 A/cm-width 程度[2]であるため、本研究手 法により市販品より高い Icを得られることが示された。Fig. 2 に 表面レーザー加熱法を用いて作製したYBCO線材の臨界電 流Lcの印加磁場依存性を示す。この結果から、5 µm, 8 µmの 厚膜線材は 70 K, 65 K などの 77 K より低い温度において 高い磁場中んを持っていることが確認された。特に、航空機 などでの応用が期待される 70 K, 2 T においては 5 µm 線材 で 456 A/cm-width、8 µm 線材で 824 A/cm-width のIc を示 した。また、本実験において最も磁場中特性の高かった 65 K では、9 T において 5 µm 線材で 157 A/cm-width、8 µm 線材で 166 A/cm-width、15 T において 5 µm 線材で 20 A/cm-width のIcが確認された。以上の結果から、表面レー ザー加熱法を用いることで高Icを持つ厚膜 YBCO線材を作

製可能であることが示された。



Fig. 1 Film thickness dependence of the ratio of *a*-axis oriented grains in the "Cold wall" and "the surface laser heating".



Fig. 2 Magnetic field dependence of the I_c for YBCO coated conductors by the surface laser heating at 77 K, 70 K, and 65 K with B//c.

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費(19K22154, 20K15217, 20H02682)とJST-ALCA、JST-A-STEP、NEDO、天田財団及 び名大-産総研アライアンス事業からの助成を受けて実施し たものである。また、本研究では、株式会社フジクラ飯島康裕 様より金属テープに関して御協力を得た。

- [1] K. Takahashi, et al., Supercond. Sci. Technol. 19, 924-929 (2006).
- [2] Y. Shiohara, et al., J. Japan Inst. Met. Matter. 80, 406-419 (2016).

直線形状高温超伝導 WISE 導体における 1kA 級通電実験

Experiment on linear high-temperature superconducting WISE conductor

<u>成嶋 吉朗</u>(核融合研);松永 信之介(総研大);宮澤 順一(核融合研) <u>NARUSHIMA Yoshiro</u> (NIFS); MATSUNAGA Shinnosuke (SOKENDAI); MIYAZAWA Junichi (NIFS) E-mail: Narushima.yoshiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体(HTS)は、磁場閉じ込め核融合炉の性能を 向上させるための重要な材料の一つと考えられている。HTS の臨界温度と臨界磁場は低温超伝導体に比べて高く、核融 合プラズマのエネルギー閉じ込め時間は磁場強度と共に増 加するため、HTS を用いて高磁場を安定に生成することがで きれば、プラズマ性能の向上に資すると考えられる。本研究で はHTSテープ線材のヘリカル核融合炉への適用を視野に[1]、 WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic Tape)[2]という 概念で製造された導体の開発に向けた基礎特性の解明に向 けた実験を行った。

2. WISE 導体の作製

幅 4mm の REBCO テープを 22 枚積層し、さらに両面から BSCCO テープで挟んだものを金属フレキシブルチューブで 束ね、全長 90cm、内径 13.3mm のアルミパイプに挿入し、低 融点金属 U-ALLOY60 で含侵して無絶縁直線状 WISE 導体 を作製した(Fig.1)。アルミパイプ両端に接続した無酸素銅製 の電流導入導体と HTS テープ線材との間は含侵した低融点 金属を通して電流が流れる構造とした。これにより、HTS テー プ線材毎にインジウム箔を挟みこむ構造を廃し、電流導入部 の構造を簡単化した。

3. 通電実験結果

WISE 導体を液体窒素で冷却し、10A/s の速度で電流を増価させて最大 2kA まで通電した結果を Fig.2 に示す。 $I_{ps} < 500A$ の通電初期から電圧が観測されており、電流値の増加に伴い電圧も増加し、1kA で0.1mV/mを示すが、その後電流値を増価させて 2kA に到達してもクエンチには至らなかった。 臨界電流値の冷却サイクル依存性は、Fig.3 に示すように6回の冷却サイクルの中では深刻な劣化は見られなかった。

4. 臨界電流値を越える定常通電

一方で、2kA を定常的に通電した際、3回目の冷却サイク ルでは通電開始から40秒経過後にクエンチが観測された。 冷却サイクルを経るに従いクエンチが発生するまでに要する 時間は延び、6回目の冷却サイクルでは約600秒間通電して も0.23mV/mの電圧が観測されるものの、クエンチは観測され なくなった(Fig.4)。

5. まとめ

HTS 導体を用いた直状無絶縁 WISE 導体の基礎特性を 調べた。臨界電流値は 1kA で、顕著な冷却サイクルによる劣 化は観測されなかった。臨界電流値を越える 2kA 定常通電 の結果、0.23mV/m の電圧が観測されたが、約 600 秒間の通 電ではクエンチに至ることはなかった。

- N. Narushima, et al.: Plasma Fusion Research, Vol. 15 (2020) 1405076
- 2. 宮澤順一他 特許第6749541 号 令和2年8月14日登録



Fig.1 Overview of straight WISE conductor



Fig.3 Critical current dependence on cooling cycle



Fig.4 Critical current dependence on cooling cycle

様々な磁界方向における超電導線材中の3次元量子磁束構造のシミュレーション

Simulation of three-dimensional quantized magnetic flux structure in superconducting wire in

various magnetic field directions

1. はじめに

第2種超電導体の臨界電流密度 J_c は磁界の方向に大き く依存することが実験で確認されている^[1]。その上、超電導体 内の磁束線を留めるピンについての様々な条件の違いよって 臨界電流密度 J_c が変化することが知られている。しかし、理論 的に確認したケースが少ない。そこで、本研究では3次元の Time-Dependent Ginzburg-Landau 方程式(TDGL 方程式)を 数値的に解くことで、様々な磁界下での超電導体内の量子化 磁束線の動きを可視化し、これを用いて様々な条件のピンに おける規格化臨界電流密度 J_c の磁界の角度依存性の調査を 行った。

2. 計算手法

本研究では 3 次元の TDGL 方程式を用いた計算を行った。真空中の超電導細線はコヒーレンス長ξで規格化したサイズにおいて、辺の長さが10,10,000直方体を仮定する。結晶構造上の*a,b,c*軸を,シミュレーション上の*x,y,z*軸とする。また、ピン内部では強制的に超電導電子密度が 0 となるようにした。

計算する超電導体の条件を Fig. 1 に示す。電流をy軸と 平行に流し、磁界をz軸からx軸に回転する。ここでは外部規 格化磁界B = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6、磁界角度 $\theta = 0^{\circ}, 30^{\circ},$ 45°, 60°, 90°で計算を行った。なお、磁界がz軸方向になって いる状態を $\theta_{\rm B} = 0^{\circ}$ と定義した。Fig. 2に示すように様々なピン の配置条件毎の、磁界方向の違いによる J_c の変化を調べる。

3. 結果

様々なピンの形状に対する J_c の角度依存性の調査はB = 0.2で行った。面ピンの場合、角度が大きくなるにつれて J_c が減少、 θ が0°から70°の間、すべてのピンの条件下で最も高い J_c を示している。球状ピン、z軸柱状ピン、y軸柱状ピンおよびピンがない状態の場合、 $\theta_B = 0^\circ, 90^\circ$ が最も大きな J_c を示している。これは超電導体と真空の境界面によるピンの影響と考えられる。 θ が 0°から20°および60°から90°の間、球状ピンでは一番高い J_c を示している。これはピンの体積の影響と考えられる。そして θ が20°から60°の間y軸柱状では一番高い J_c を示している。これは磁場が回転すると、超電導体と真空の境界面によるピンの影響が弱くなり、超電導体内のピンの

影響が強くなると考えられる。計算領域を40×10×40に広 げた場合の計算については当日発表する。



Fig. 1: Superconducting cube with different angle of applied fields.

Fig. 2 Small superconducting cubes with different pins (a) spherical pin, (b) plainer pin,(c) Z cylinder pin, (d) Y cylinder pin.



Fig. 3 Angular dependence of J_c at B = 0.2

謝辞

この研究は科研費(19H00771)の助成を受けている。

参考文献

 L. Civale, B. Maiorov, A. Serquis, J. O. Willis, J. Y. Coulter, H. Wang, Q. X. Jia, P. N. Arendt, J. L. MacManus-Driscoll, M. P. Maley, and S. R. Foltyn (2004) Applied Physics Letters 84:12, 2121–2123

— 66 —

遺伝的アルゴリズムを用いたコイル形状の最適化シミュレーション: 基板型 HTS アンテナによる次世代極低温固体 NMR プローブの開発

Simulation for Improvement of RF coil with the Genetic Algorithm: the development of Next Generation Cryogenic Solid-state NMR Probe Using Substrate-type HTS Antennas

TRITRAKARN Techit, 岩佐 崇, 田口 春華, 岡村 哲至 (東工大); 高橋 雅人 (理研); 小田 翔平, 齊藤 敦 (山形大); 山田 和彦 (高知大)

<u>TRITRAKARN Techit</u>, IWASA Takashi, TAGUCHI Haruka, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); TAKAHASHI Masato (RIKEN); ODA Shohei, SAITO Atsushi (Yamagata Univ.); YAMADA Kazuhiko (Kochi Univ.)

E-mail: tritrakarn.t.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

核磁気共鳴(NMR)は、材料科学の分野で広く適用され ている強力な分析技術であり、他の測定装置では測定不可 能なアモルファス状態でも着目原子核から情報を得ることが 可能である。ただし、NMRの測定感度は原理上低いため、 NMR測定が最も困難な四極子核の1つである硫黄が関係す るもの、たとえばゴム中の架橋構造は未だに未解明である[1]。 この問題を解決するにはNMRの測定感度を飛躍的に向上す る必要があり、電気抵抗が非常に小さい(超高Q値)高温超 伝導(HTS)RF コイル(アンテナ)および磁場掃引型磁石を組 み合わせた測定法を導入した[2]。

2. アンテナの設計とNMR 用電磁界シミュレーション

HTS アンテナの形状はソレノイドコイルのように形成する のは困難であり、サファイア基板上にパターンを形成する制 約がある。また、HTS アンテナに直接強力な励起パルスを印 加することができないため、従来の送受信が一体アンテナと は異なる、送受信分離型アンテナを提案した(Fig. 1)。送信 部は銅アンテナで、受信部は HTS アンテナとする。



Fig.1 送受信分離型アンテナのイメージ

これは非常に新しい設計コンセプトであるため、C++を使 用した NMR 原理に基づく電磁界シミュレーションを開発した。 シミュレーションの基本的な流れは、送受信アンテナ形状や シミュレーション条件を設定し、送受信アンテナによる各部の 磁場強度(B1)を計算する。ブロッホ方程式を用いてその磁場 によるスピンの倒れ角を計算し、倒れたスピンから受信アンテ ナが受信する NMR 信号および信号を最大にする励起パルス 長(90 度パルス長)を取得する。

測定試料量によって NMR 信号強度は変わるため、同量の測定試料で最も効率よく NMR 信号を取得できるアスペクト

比を持つソレノイドコイル[3]を基準に評価を行った。設計した アンテナが同試料量の最高性能のソレノイドコイルに対してど れぐらいの信号強度(大きいほど良い)と 90 度パルス長(小さ いほど良い)かを調べた。

3. 遺伝的アルゴリズム(GA)による最適設計

HTS アンテナに対して最適な送信アンテナ形状を決定 するために、遺伝的アルゴリズム(GA)を導入した。GAは遺伝 的操作(選択、交叉、突然変異)で非常に多数の組み合わせ から評価関数に対して効率的に最適解を探索するアルゴリズ ムである。

送信アンテナの形状は上下の線電流の組み合わせから 成り立つと仮定でき、かつ測定試料のあり/なしの設定がある。 したがって、試料あり(00)、上電流(01)、下電流(10)、試料な し(11)のように二進数のビット遺伝子を構成する。また、GAの 評価関数は NMR 信号などに設定し遺伝的操作を行うと、最 大の NMR 信号をとる線電流の組み合わせが得られる。

4. 結果及び考察

送信アンテナの上下(④〇)の線電流は全空間に配置し、 評価関数として対ソレノイドの NMR 信号(T2 緩和は800µS) を設定した GA の結果(1/4 空間)を以下の図に示す(Fig. 2)。 細線矢印は送信アンテナによる磁場であり、破線矢印は受信 アンテナによる磁場であり、太線矢印は GA によるスピンと測 定試料の最適な空間である。



当日の発表では、製作可能でかつHTSアンテナのQ値 への影響が少ないコイル形状の探索についての結果も含め て報告する予定である。

- 1. K.Yamada, et al.: Chem. Phys. Lett., 618 (2015) 20
- M. Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, 95 (2017) 94, 95
- C-N. Chen, et al.: Biomedical Magnetic Resonance Technology, (1995), 125

超伝導体の複素伝導率・対破壊電流・非線形力学インダクタンスのミクロな理論 及びサブギャップ状態密度の影響

Microscopic theory of complex conductivity, depairing current, and nonlinear kinetic inductance of superconductors and the effects of subgap states

> <u>久保 毅幸</u>(KEK) <u>KUBO Takayuki</u>(KEK) E-mail: kubotaka@post.kek.jp

1. はじめに

超伝導加速空洞、超伝導単一光子検出器、超伝導力学イ ンダクタンス検出器、量子コンピュータ等の超伝導デバイスの 研究が急速に発展するなか、デバイス環境下での超伝導の 物理の理解が益々重要になっている。本講演では、対破壊 電流・力学インダクタンス・複素伝導率における、温度・バイア ス電流・サブギャップ状態密度の影響を議論する。計算は BCS 理論に基づき、全温度領域及び対破壊電流以下の全電 流値に対して行う[1,2]。

まず始めに、上に挙げた物理量を定量的に計算するには、 最低でもBCS理論が必要であることを強調しておく。最も初等 的な理論、London 理論は、電流による対破壊効果を含まず、 対破壊電流密度 j_d の評価は不可能であるし、 j_d に匹敵するよ うな電流が流れている場合には電流・磁場分布の計算も正し くなくなる(非線形マイスナー効果)。Ginzburg-Landau 理論 (GL)は、電流による対破壊効果を含んでおり、 j_d の評価や電 流による対破壊効果を含めた電流・磁場分布の計算が可能 である。しかし GL は温度 T が転移温度 T_cと同程度(T~T_c)の 場合しか正しくない。上記デバイスはT_cよりも十分に低い温度 (T<<T_d)で用いられるため、デバイス環境下の物理を定量的に 理解するという目的においては GL もやはり役に立たない。全 温度領域(0<T<T_d)、全電流値(0≤ j_a ≤ j_d)において妥当な理論、 すなわち、BCS 理論を使う必要がある。

以下、平均自由行程がコヒーレンス長より短い場合を考え、 我々が持つ最良の道具、BCS 理論の準古典 Green 関数によ る定式化、Eilenberger-Usadel-Larkin-Ovchinnikov formalism を用いる(理論の解説は例えば[3]に詳しい)。

2. 結果

[対破壊電流密度] 対破壊電流密度 ja は温度 Tと Dynes の Γ 値のみに依存する。ここで、 Γ はサブギャップ状態密度 に対応するパラメータである(例えば[2]の図1参照)。Γが大き くなると対破壊が進み、Γ=1/2 で超伝導は消失する。結果の 概要は以下の通り。Γ=0 かつ T=0 では、既知の結果、 j_d=0.595H_{c0}/λoを再現する。H_{c0}とλoは T=0 かつ j_s =0 にお ける理想的な BCS 超伝導体(Γ=0)の熱力学的臨界磁場と磁 場侵入長である。また、T≃T。では GL 対破壊電流、 i=0.544H。/ λを再現する(Heとんは T=Teかつ is =0 における 熱力学的臨界磁場と磁場侵入長である)。 Γ=0 では全温度領 域(0<T<T_c)で、確立した理論(Kupriyanov-Lukichev-Maki)と 無矛盾であることが分かる。その上で、サブギャップ状態密度 のj_dへの影響を明らかにした([1]の図4及び[2]の図5,6,7,8)。 加えて、Γが小さいときに使える ja の公式も得られた([2]の式 33-39)。これらの結果は、jaの測定とトンネル分光を使った DOS 測定を組み合わせることで検証が可能である。また、Γ の値は表面処理の方法に依存するので、表面処理によって 上手くΓを小さくすることができれば、jaの改善が可能であり、 理想値 j_d=0.595H_{c0}/ λ_0 に近づけられるだろう。

[*力学インダクタンス*] 力学インダクティビティ L_k は電流 j_s、 Dynes の Γ 、温度 T に依存する。すなわち、L_k= L_k(j_s, Γ , T)で ある。対破壊効果が無視できる程に小さな電流しか流れてい ない場合には、L_k(0, Γ , T)の解析的な公式が得られる([2]の式 44と図 9)。この式は Γ =0 で理想的な BCS 超伝導体の既知の 式を再現する。次に有限の電流密度 j_s ($0 \le j_s \le j_d$)を考える。この 場合、L_k は j_s, Γ , Γ の単調増加関数となる([2]の図 10,11,12,13)。また、j_sが j_dと比べて小さいとき、L_kを j_sの二次 関数の形に展開でき、便利な式が得られる:L_k(j_s)=L_k(j_s=0)× [1+C(j_s/j_d)²]。同様の式はしばしば現象論的に与えられるが、 論文[2]では係数 C を BCS 理論から解析的に決定しているこ とに注意([2]の式50,51,57,58)。これらの結果は、L_kの測定とト ンネル分光による DOS 測定を組み合わせることで検証が可 能である。

[複素伝導率] 複素伝導率の実部 σ」は超伝導体のマイク ロ波損失を生む。その値は DOS の形状に敏感である。 Mattis-Bardeen (MB) 理論は、電磁場が弱い極限かつ理想 的なBCS 準粒子状態密度(Γ=0)を持つ超伝導体に対しての み適用可能であり、考えられる限り最も簡単な場合にしか適 用できない。サブギャップ状態密度の影響や電流による対破 壊効果を含めるにはBCS 理論に戻って計算する必要がある。 2020 年春季学会では、表面の薄い常伝導層や磁性不純物 等の対破壊因子の影響[4]、強いマイクロ波下における非線 形表面抵抗[5]について紹介した。対破壊因子とマイクロ波電 流による対破壊効果により、DOS ピークが適度に広がってい るときに σ1 が最小化されることが示された。今回は、有限の Γを持つ超伝導体に対破壊電流以下の任意のバイアス電流 (0≤i,≤i,)が印加されている場合のσ」を考える[1]。 DOSの形状 はΓとi,に依存するため、Γとi,の適切な組み合わせが DOS ピークを適度に広げ([1]の図 5)、σ1 が最小化される([1]の図 6,7)。共振器材料のトンネル測定によりΓを特定することで、 最適バイアス電流が分かる。超伝導デバイスのマイクロ波損 失低減に役立つだろう。

参考文献

- 1. T. Kubo: Weak-field dissipative conductivity of a dirty superconductor with Dynes subgap states under a dc bias current up to the depairing current density, Physical Review Research **2**, 013302 (2020).
- T. Kubo: Superfluid flow in disordered superconductors with Dynes pair-breaking scattering: Depairing current, kinetic inductance, and superheating field, Physical Review Research 2, 033203 (2020).
- J. Rammer and H. Smith: Quantum field-theoretical methods in transport theory of metals, Reviews of Modern Physics, 58, 323 (1986).
- A. Gurevich and T. Kubo: Surface impedance and optimum surface resistance of a superconductor with an imperfect surface, Physical Review B 96, 184515 (2017).
- T. Kubo and A. Gurevich: Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surface nanostructuring in superconductors, Physical Review B 100, 064522 (2019).

— 68 —

低温下における GFRP 管内圧力変化に伴うひずみの測定 Measurement of strain due to pressure change inside GFRP pipe at low temperature

<u>佐藤</u>更,武田実,前川一真(神戸大) <u>SATO Sara</u>, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.) E-mail: takeda@maritime.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

今日、地球温暖化をはじめとする環境問題や化石燃料の 枯渇が懸念されている中、代替エネルギーとして水素エネル ギーが注目されている。燃料となる水素を大量輸送する場合、 気体の状態ではなく液体水素(沸点 20 K)の状態で、大型タ ンクを用いて海上輸送するのが効率的である。水素を媒体と するエネルギー社会に向けて、国際水素サプライチェーン(1) を構築するためには、液体水素の海上輸送技術のみならず、 荷役技術を確立しなければならない。そのため、液体水素の 温度でも使用可能な流量計の開発が必要である。そこで、新 たな液体水素用流量計として、ひずみゲージを用いた流量計 を考案した。原理としては、ヘリカル流の液体を通す配管の 表面にひずみゲージを取り付け、液体を通した際の管内の圧 力の変化により生じる配管のひずみ(2)を検知すれば、その大 きさから管内の圧力を測定し、流量を算出することができると いうものである。この仕組みを応用し、新たな液体水素用流量 計を開発するために、まず低温用箔ひずみゲージの温度特 性を調べた⁽³⁾。引き続き本研究では、GFRP 管に貼り付けたひ ずみゲージの低温下での圧力応答性を調べるために、室温 及び液体窒素温度で実験を行った。

2. 実験装置と実験方法

本実験において低温用箔ひずみゲージ(以下、ひずみゲ ージ)には、共和電業 KFL-5-120-C1-11F3M3 を使用した。

加圧実験システムを Fig. 1 に示す。加圧実験システムは、 ヘリウムガスボンベ、圧力計、クライオスタット、真空ポンプ、銅 管、加圧試験ホルダー部、魔法瓶で構成されている。加圧試 験ホルダー部の中には低温試験部が設置されている。

低温試験部の写真を Fig. 2 に示す。低温試験部は、外径 26 mm、厚さ1 mm の GFRP 管の両端を真鍮キャップで封を したものであり、GFRP 部分には直交させるように二枚のひず みゲージが、真鍮キャップ部分には白金抵抗温度計が取り付 けられている。また、片方の真鍮キャップには銅管を差し込ん だ加圧孔がある。低温試験部の冷却には液体窒素を、加圧 にはヘリウムガスを使った。ひずみの測定は 2 アクティブゲー







Fig. 2 Photograph of a test sample.



Fig. 3 Relationship between pressure and strain.

ジ法(直交配置法)を用いて行った。計測用ソフトウェアとして、 温度計測と圧力計測には LabVIEW、ひずみ計測には共和 電業ダイナミックデータ集録ソフトウェア DCS-100A を使用し た。

3. 実験結果と考察

Fig. 3 は、管内圧力変化によるひずみの測定結果である。 圧力とひずみの関係において、室温と液体窒素温度の両方 で直線的な変化が見られた。また、室温に比べて液体窒素温 度での傾きが小さくなった。これは低温になったことにより GFRP のヤング率が上昇したからであると推測できる。更に、 温度毎のデータ解析により、実験結果の再現性は高いことが 分かった。

この結果を基に、低温試験部を薄肉円筒容器だと仮定し、 実験で得られた圧力とひずみの関係からGFRP管のヤング率 の見積もりを行った。その結果、室温と液体窒素温度のヤン グ率には、約5GPaの差があった。金属等のヤング率は温度 によって直線的に変化するため、それに倣って直線近似を適 用すると、液体水素温度におけるGFRP管のヤング率は30 GPa程になると予想された。

- (1) S. Kamiya, M. Nishimura and E. Harada: "Study on Introduction of CO₂ Free Energy to Japan with Liquid Hydrogen," Physics Procedia 67 (2015) 11-19
- (2)前川晃 / 辻峰史 / 高橋常夫 / 加藤稔:配管表面ひずみを用いた管内圧力脈動の測定方法の考察, INSS JOURNAL Vol. 20 NT-3 (2013)
- (3) S.Sato *et al.* : Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) P. 71

磁気遮蔽方式による磁気冷凍の可能性に関する研究

Research on the Possibility of Magnetic Cooling Technology using Magnetic Shields

<u>平野</u>直樹,小野寺 優太,三戸 利行(NIFS);大辻 槙(東大);永井 せつら,岡崎 陽大,岡村 哲至(東工大) <u>HIRANO Naoki</u>, ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki (NIFS); OTSUJI Maki (Tokyo Univ.) NAGAI Setsura, OKAZAKI Yodai, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech) E-mail: hirano.naoki@nifs.ac.jp

1. はじめに

近年、ヘリウムを安定的に入手することが困難となることが 危惧されている。超伝導の利用を考えた場合、現状ではヘリ ウムでの冷却が大半であるが、高温超伝導材料の研究開発 の進展もあり、ヘリウムに頼らなくとも極低温を維持できるシス テムの開発に着手した。その一方式として、高温超伝導コイ ルの冷却に、発生する磁場と磁気冷凍技術を組合わせること で冷却をアシストする技術の研究を開始し、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っ た[1]。従来の磁気遮蔽体で十分な遮蔽効果を得るためには 磁気遮蔽体の体積が必要であることが確認されており、軽量・ コンパクトな遮蔽体として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たので報告する。

2. 磁気冷凍による冷却アシスト技術

磁気熱量効果により温度変化を得るためには、磁気作業 物質に磁場の変化を与える必要がある。従来の磁気冷凍で は、磁場発生源と磁気作業物質との距離を変化させる方法や、 電磁石などの電源を制御して磁場変化を得る方法が用いら れているが、駆動電力や損失のため、全体的な効率が低下し てしまう。これを解決する手法として、磁場発生源と磁気作業 物質の隙間に磁気遮蔽体を繰り返し挿抜することで磁場変化 を得る方式を検討している。磁気遮蔽体による磁気冷凍を利 用した超伝導コイル冷却アシスト技術の概念を Fig.1 に示す。

3. 超伝導体の磁気遮蔽効果の検討

3 種類の材料(純鉄、パーマロイ、電磁鋼板(ESS))を用いた 原理検証試験の結果を報告した[1]。また、材料の磁気特性 や形状を変えることで遮蔽効果が改善されるか検討した結果、 十分な遮蔽効果を得るためには遮蔽体を大きくする必要があ ることが分かった。磁気冷凍システムに組み込むためには、 小型・軽量な遮蔽体が不可欠であり、超伝導体の磁気遮蔽と しての可能性について検討した。

NbTi 多層膜により 1 テスラ以上の無磁界空間を形成す ることが可能であるとの報告[2]がある。この結果をもと に、VBCO 膜に期待される磁気シールド能力特性を、臨界 電流特性の違いと膜厚の違いを考慮して、NbTi 多層膜の 磁気シールド能力[2]から計算した(Fig. 2)。この特性を 利用して、VBCO 薄膜の多層による磁気シールドの可能性 を計算した結果をFig. 3 に示す。3T の磁場に 5 µ m の YBCO 膜を 1 つずつ挿入したときの積層膜のすぐ後ろの磁場を 推定したものである。ほとんどの磁場は約 410 枚の積層 で遮蔽できると計算された。

4. まとめ

磁気遮蔽体により磁気熱量効果を制御できることを確認した。しかし、鉄系の磁気遮蔽体では、十分な遮蔽効果を得るために大型な遮蔽体が必要となるため、超伝導体を磁気遮蔽体として使用できるか検討し、高温超伝導薄膜を多数枚積層することで数テスラの遮蔽ができる可能性を確認した。

今後は、高温超伝導薄膜の磁気遮蔽効果を検証する実験 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 の実現を目指す。



Fig.1 Concept of coil cooling assist using magnetic refrigeration technology by magnetic shielding.



Fig.2 Magnetic shielding effect ΔB on external magnetic field B0 expected for YBCO film.



Fig.3 Magnetic shielding effect due to multiple layers of YBCO film.

謝辞

本研究の一部は、NIFS核融合工学プロジェクト(UFAA018)の支援を受けて行ったものである。

- [1] N. Hirano, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.99 (2020) p.76
- [2] S. Okada, et al.: Proc. ICEC-11, (1986) p.484-488.

加速器用 HTS マグネットの開発(8-1) 一全体概要— Development of HTS Accelerator magnet (8-1) -Overview of the present progress-

<u>土屋清澄</u>、王 旭東、寺島昭男、大内徳人、有本 靖、植木竜一、川井正徳、宗 占国、山岡 広、 多和田正文、増澤美佳(KEK);菊池章弘(NIMS);町敬人(産総研);一瀬 中(電中研);藤田真司(フジクラ) <u>TSUCHIYA Kiyosumi</u>, WANG Xudong (KEK), TERASHIMA Akio, OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, UEKI Ryuichi, KAWAI Masanori, ZONG Zhanguo, YAMAOKA Hiroshi, TAWADA Masafumi, MASUZAWA Mika (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); MACHI Takato (AIST); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.) E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

我々は加速器用 HTS マグネットの基礎開発として 1) 加速器用 HTS マグネットの製作経験の蓄積とその特性調 査、2) 高磁場マグネット設計のための基礎的データの収 集を目的として低温、高磁場下における REBCO 線材の 特性調査、の2つに焦点を絞って研究を進めている。本報 ではその概略について報告する。

2. REBCO 六極マグネットの開発

SuperKEKB のルミノシテイー向上用特殊六極マグネ ット(ノーマル六極とスキュー六極の磁場強度を独立に 調節できるマグネット) を目標に REBCO 線材を用いた マグネット開発を進めている[1]。これまでに、ノーマル 六極マグネットの試作(Fig. 1(a)参照)、LN2 及び LHe 温度での通電試験と磁場測定を終了し[2],[3]、現在はノー マル六極マグネットに組み込むスキュー六極コイルの設 計・製作を進めている。このコイル設計では1)ノーマル 六極コイルの製作技術を可能な限り採用する、2) REBCO 線材と銅テープを交互に巻く2層構造のコイル とする、などの考えを基に、多極磁場成分を104オーダー 以下に抑えるコイル形状、配置を求めた。Table 1 にこの スキュ-六極コイルの主要諸元を、Fig. 1(b)にはノーマル コイルとスキューコイルを組み合わせた特殊六極マグネ ットの概観図を示す。その他、この六極コイルのクエンチ 保護設計の最終確認として予備のノーマルコイルを用い たクエンチ試験・解析も行った。そこでは六極磁石の設計 電流の 1.2 倍の電流 (300 A)においてもコイルの特性劣 化は生じないことを確認した。このクエンチ実験及び解 析の詳細については発表 2A-a02 矩形 REBCO コイルの クエンチ実験、2A-a03 矩形 REBCO コイルのクエンチ解 析で報告する。

3. 4.2 K、高磁場における REBCO-APC 線材の特性調査 マグネット設計には線材の臨界電流特性のデータは不 可欠である。我々は REBCO 高磁場マグネットの検討の ための基礎データを得るために 1 kA 級 Ic 測定ホールダ ーを用いて、4 mm 幅の市販 REBCO 線材の臨界電流特

Table 1 Design parameters of the skew sextupole coil

Parameter	Value
Coil inner radius	115.1 mm
Skew sextupole field gradient	23.5 T/m2
Design current	246.4 A
Coil length	200 mm
Yoke radius(inner, outer), length	150.5, 195 mm, 200 mm
Skew sextupole coil	Double pancake coil
Coil width (inner, outer), height	73.2, 102.0 mm, 8.8 mm
Number of turns	36 x 2 turns
Max B// on the conductor	0.708 T
Max $B\perp$ on the conductor	0.549 T
Stored energy	329 J



Fig. 1 Photographs of the normal sextupole magnet before assembling the iron yoke (a) and the schematic drawing of the assembled special sextupole magnet (b).

性を調べている[4]。最近、市販の REBCO-APC 線材が出 現してきたので、その特性調査も進めている。Fig. 2 に I。 値から求めた各種 REBCO-APC 線材と Low T。超伝導線 材の non-Cu J。値の比較図を示す。測定およびその結果の 詳細は HTS 線材 特性(1)のセッションの 1B-a02 市販 REBCO-APC 線材の臨界電流特性 で報告する。



Fig. 2 Non-Cu Jc of commercial REBCO-APC conductors and typical low Tc conductors.

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。

- 1. K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 26 (2016) 4100904.
- 2. K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 29 (2019) 4002604.
- 3. X. Wang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 30 (2020) 4600304.
- 4. K. Tsuchiya et al., Cryogenics 85 (2017) 1-7.

加速器用 HTS マグネットの開発(8-2) 一矩形 REBCO コイルのクエンチ実験-Development of HTS Accelerator Magnet (8-2)

- Quench Experiments of Rectangular REBCO Coil -

藤田 真司, 武藤 翔吾, 土屋 光揮(フジクラ); 王 旭東, 寺島 照男, 土屋 清澄(KEK) <u>FUJITA Shinji</u>, 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 では高いルミノシテイーを達成するために、ノ ーマルとスキューの六極磁場を同時に発生する特殊な六極 マグネットによる色収差補正が検討されている[1].この六極マ グネットには小型冷凍機冷却の REBCO マグネットを想定して おり、これまでに小型コイルを用いたクエンチ実験・解析[2,3] や、実機サイズの REBCO 六極モデルマグネットの試作・評価 [1,4,5]を行ってきた.今回、エポキシ含浸した実機サイズの矩 形 REBCO コイルを用いて、ヒーターによる強制クエンチ実験 を行ったので、その結果について報告する.

2. 実験方法

試験コイルはノーマル六極モデルマグネットに使用した矩 形レーストラックコイル[4]と同様のものである. 使用した REBCO線材は4mm幅のフジクラ製FYSC-SCH04(4mm幅, 75 µm 厚基板, 人工ピンなし GdBCO, 20 µm 厚 Cu めっき) で あり、外周にフッ素コートポリイミドと通常のポリイミドテープの2 重ラップ巻き絶縁したものである. コイルは110ターン×2層の パンケーキコイルであり、エポキシ樹脂で真空加圧含浸した. コイルをアルミ製の試験治具に取付け,コイルの長辺側をサ ポートバーで押え,短辺の一方に電極を半田付けし,電極と 逆側の短辺の上側パンケーキコイル外周に NiCr ヒーターを 貼り付けた(Fig. 1). 冷却は GM 冷凍機による伝導冷却であり, 2nd ステージのヒーターで温調した. コイル温度 30~50 K で 負荷率が 90%程度になるように 200~300 A 通電した状態で NiCrヒーターに 0.7 A の電流を 1.5~2.5 s 通電しコイルをクエ ンチさせた.クエンチは上下のパンケーキコイルのバランス電 圧で検出し、検出電圧 Vop は 80 mV に固定し、検出時間 top を10~50 ms で変化させた. クエンチ検出後, ブレーカーによ りコイルを電源から切り離し、コイルに並列に接続した 0.1 Ωの 保護抵抗で電流を減衰させた. クエンチ部の温度は, あらか じめ冷却時に測定した NiCr ヒーター部の線材の抵抗の温度 依存性を用いて、クエンチ部の電圧から温度に換算した.

3. 実験結果と考察

Fig. 2 にコイル *I* の温度依存性を測定した結果を示す. こ れをもとに,試験条件を 50 K で 200 A, 40 K で 250 A, 30 K で 300 A とした. Fig. 3 にクエンチ実験の結果を示す. 縦軸は クエンチさせたヒーター部の最大到達温度であり,横軸はクエ ンチ検出時間 *t*op である. 今回の試験では 30 K, 300 A, 80 ms 条件で,最大到達温度が 359 K まで上昇したが,一連 の試験後のコイルに劣化は見られなかった. *t*op は検出器の 設定値であるが,今回使用した検出器の精度が悪く,*V*op に 達してから検出器が検出するまで 10~50 ms 程度,検出後に ブレーカーが開くまで 30 ms 程度の遅延があった. そのため, 実際の横軸の値はこれより 40~80 ms 程度大きな値である. 実機では遅延は~1 ms であり,より安全側になると考えられる. 従って実機マグネットにおいてもバランス電圧検出で十分に コイル保護が可能であると考えられる.

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。



Fig. 1 Appearance of the quench test coil.



Fig. 2 Temperature dependence of I_c for the quench test coil.



Fig. 3 Detection time dependence of the maximum temperature at a quench part in the quench tests.

- [1] K. Tsuchiya et.al., IEEE TAS, 29 (2019) 4002604.
- [2] S. Fujita et.al., Abstracts of CSJ Conference, 92 (2015) p.195.
- [3] X. Wang et.al., IEEE TAS, 27 (2017) 4700105.
- [4] S. Fujita et.al., Abstracts of CSJ Conference, 95 (2017) p.19.
- [5] S. Fujita et.al., Abstracts of CSJ Conference, 96 (2014) p.19.[5] S. Fujita et.al., Abstracts of CSJ Conference, 96 (2018) p.49.

加速器用 HTS マグネットの開発(8-3) 一矩形 REBCO コイルのクエンチ解析-Development of HTS Accelerator Magnet (8-3) -Quench Simulation of a Rectangular REBCO Coil-

王 旭東, 土屋 清澄 (KEK); 武藤 翔吾, 土屋 光輝, 藤田 真司 (フジクラ)

WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); MUTO Shogo, TSUCHIYA Koki, FUJITA Shinji (Fujikura Ltd.)

E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

我々は SuperKEKB 加速器の補正用六極磁石をターゲット に、小型冷凍機冷却による REBCO 六極マグネットの開発を 行ってきた。これまでに、REBCO 線材の基礎特性と円型コイ ルのクエンチ特性を調査し、REBCO 六極マグネットの設計・ 試作・特性評価を行ってきた[1-5]。今回は、実機サイズの矩 形 REBCO コイルを用いたクエンチ実験に対して、解析モデ ルの開発と REBCO 六極マグネットのクエンチ保護設計を検 討したので、その結果について報告する。

2. 解析モデル

クエンチ実験に用いた矩形 REBCO コイルは、パンケーキ 巻線の2層構造であり、1層目の最外周表面にヒーターが貼り 付けられている。実験結果より、ヒーター近傍のみに常伝導電 圧が発生したことから、解析は1層目再外周を有限要素法で モデル化した。またコイル周方向は 1/2 モデルを採用し、長 手断面を対称境界とした。超伝導特性は、実測した Leh 値を 用いた n 値モデルを採用した。各材料の物性値は温度依存 性を考慮した。解析手法は、先行研究[2]と同様に有限要素 法による電界と熱計算に加えて、保護抵抗とコイルインダクタ ンスを回路モデルで連成した。

3. 実験と解析の比較

クエンチ実験のヒーター加熱を模擬して、各検出電圧 (V_{QD})と検出時間(t_{QD})に対する解析を行った。V_{QD}=80 mV と t_{QD}=50 ms において、REBCO 六極マグネットの設計電流であ る250Aの実験と解析結果を図1に示す。図1の横軸0sは、 実験で検出器からクエンチ発報があった時刻である。解析は、 実験の検出遅れ 23 ms と遮断遅れ 29 ms を考慮して遮断開 始のタイミングを調整している。バランス電圧(V_B)は、検出器 の入力信号である2層のコイル間電圧差、つまりヒーター加熱 によって発生した常伝導電圧である。クエンチ温度(T₀)は、 電流とヒーター区間電圧(V_H)から抵抗を計算し、コイル冷却 時に測定した該当区間の抵抗温度依存性を用いて 90 K 以 上で換算した平均温度である。解析のホットスポット温度(T_{HS}) は、ヒーター区間中心部の最大温度である。図 1 より、クエン チ発生後の Viaは 150 mV 付近まで Viaと一致しており、ヒータ ー区間内部のみが常伝導転移して、局所的に温度上昇して いることがわかる。T_Qは最大 290 K 弱で、T_{HS}は最大 342 K と なった。TQ はヒーター区間の平均温度であるため、THS より低 く見積もられる。図1の結果から遮断開始までのTQに着目し、 V_{op} と t_{op} との関係を図2に示す。各 V_{op} に対する T_o は t_{op} と ほぼ比例関係にあることがわかる。これらの結果から、解析は 実験とよく一致しており、モデルの妥当性を確認できた。

4. REBCO 六極マグネットのクエンチ保護設計

従来の加速器用超伝導磁石と同様にクエンチ検出器と外 部保護抵抗を用いて、REBCO 六極マグネットの保護設計が 可能かどうかについて検証した。外部保護抵抗は、定格 250 Aと耐電圧 200 Vを考慮して 0.75 Ωとした。保護回路を 含めた解析結果から、Vqpとtqp に対する THSの最大温度を図 3 に示す。ただし、実機の Von と top の閾値下限はそれぞれ 20 mV と 20 ms となる。コイルの劣化や焼損を防ぐ観点では、 最大温度が 300 K 以下であれば保護可能となる。図 3 より、

300 K 以下となる V (D と t (D は実機の設定可能範囲内にあるこ とから、REBCO 六極マグネットのクエンチ保護は従来手法で 達成可能となる。加速器運転への影響を考慮し、クエンチ発 生から再励磁までの時間を短縮できるように、我々は最大温 度が 150 K 以下となる検出条件を設けた。図 3 より、 VQD と tQD の閾値はそれぞれ 40 mV と 20 ms として、REBCO 六極マグ ネットの保護設計とした。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(19H01911)の助成により実施 したものである。



Fig. 2 Experimental and simulation results of T_{Q} at 250 A.



Fig. 3 Simulation results of maximum $T_{\rm HS}$ at 250 A.

- K. Tsuchiya, X. Wang, *et.al.*, *Cryogenics*, 85 (2017) 1-7.
 X. Wang, K. Tsuchiya, *et.al.*, *IEEE TAS*, 27 (2017) 4700105.
- [3] K. Tsuchiya, X. Wang, et.al., IEEE TAS, 26 (2016) 4100904.
- [4] K. Tsuchiya, X. Wang, et.al., IEEE TAS, 29 (2019) 4002604.
- [5] X. Wang, K. Tsuchiya, et.al., IEEE TAS, 30 (2020) 4600304.

繰り返し変動励磁下での小型高温超伝導二極マグネットの発生磁場の 実験及び解析による評価

Measurements and numerical analyses of time evolution of magnetic field of a small dipole magnet wound with coated conductors under repeated excitation

> <u>曽我部 友輔</u>, 若林 洗希, 雨宮 尚之(京大) <u>SOGABE Yusuke</u>, WAKABAYASHI Koki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University) E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は重粒子線がん治療装置に用いられる回転ガントリーに高温超伝導マグネットを使用するための研究を進めている[1]。回転ガントリー用マグネットは、励消磁を繰り返しかつ 消磁中に存在する電流が一定の時間に安定な磁界を発生す ることが求められる[2]今回は、小型高温超伝導二極マグネッ トを、回転ガントリーを意識した運転パターンで変動励磁した 場合の多極磁界成分への遮蔽電流磁界の影響を、実験と数 値電磁界解析の比較を通して評価した。

2. 測定対象のマグネット・測定方法・解析方法

シングルレーストラックコイルを片極に二個重ねた四個組 レーストラックコイルを対象とした。このマグネットの定格運転 温度は.30 K であり、150 A 通電した場合の設計二極磁界は 約 360 mT である。

磁界測定は回転ピックアップコイル法によって行った。磁 界が発生している領域でピックアップコイルを回転させること により発生する誘導電圧を測定し、この電圧を Fourier 級数展 開することによって発生磁界の多極成分を測定する。

数値電磁界解析では、上述のマグネットの三次元的形状 をモデル化し、マグネットを構成する超伝導線の導電特性を 定式化して解析に用いた。詳細は参考文献[3]に譲る。

3. マグネット運転パターン

回転ガントリー用マグネットを模擬した運転パターンとして、 Fig. 1 に示すような励消磁パターンを用いた。ここで、to.n は n 回目のサイクルの開始時刻、trr 及び tsはそれぞれフラットトッ プ及び電流ランプダウン中に設定されている電流が一定とな る時間(ステップ)の持続時間である。本研究では、trr は10秒 または60秒、tsは10秒とした。励消磁中の最高電流値は150 A、最低電流値は50Aまたは100Aとし、ステップは25A刻 みに設定した。ランプレートは5 A/sとし、このような励消磁サ イクルを6時間にわたって繰り返した。

4. 磁界測定結果

以下では、

Pattern 1. *t*_{FT}が 10 秒、最低電流値が 50 A の場合 Pattern 2. *t*_{FT}が 10 秒、最低電流値が 100 A の場合 Pattern 3. *t*_{FT}が 60 秒、最低電流値が 50 A の場合 の結果について比較、議論する。

電流が 100 A の各ステップにおける二極磁界成分の平均 値を、各ステップまでの経過時間に対してプロットした結果を Fig. 2 に、各ステップまでの経過励消磁繰り返し回数に対して プロットした結果を Fig. 3 に示す。Fig. 2 を見ると、励消磁を繰 り返すことによる二極磁界成分の再現性への影響は、運転パ ターンが異なると異なっているように見える。しかし、Fig. 3 を 見ると、運転パターンの影響はほとんど確認できず、各ステッ プまでの経過励消磁繰り返し回数に依存していることが分か る。この結果より、繰返し変動励磁下での多極磁界成分の再 現性は、繰返し回数に強く依存していることが示唆された。

発表では、数値電磁界解析との比較を行い、超伝導マグネット内部の電磁現象についても議論する。



Fig. 1 Typical one-cycle current profile for magnetic field measurements [1].



Fig. 2 Measured dipole and sextupole components of magnetic flux density plotted against time.



Fig. 3 Measured dipole and sextupole components of magnetic flux density plotted against number of repeated excitation.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16H02326、JP19K23513 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1. Y. Sogabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p. 110
- Y. Iwata, et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, Vol. 317 (2012) p. 793-797.
- 3. T. Mifune, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 32 (2019) 094002

— 74 —

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(14) -7 m 長実証機の製造

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (14) – Construction of 7 m-long prototype

<u>菅野未知央</u>, 中本建志, 鈴木研人, 木村誠宏, 池田博, 池本由希子,岡田尚起, 荻津透, 川又弘史, 寺島明男

(高エネ研) 堀越篤(日立製作所)

Andrea Musso and Ezio Todesco (CERN)

SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, SUZUKI Kento, KIMURA Nobuhiro, IKEDA Hiroshi, IKEMOTO Yukiko,

OKADA Naoki, OGITSU Toru, KAWAMATA Hiroshi, TERASHIMA Akio (KEK)

HORIKOSHI Atsushi (Hitachi, Ltd.)

MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail : michinaka.sugano@kek.jp

1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ルミノシティを現行 LHC の 10 倍以上である 3000 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。目標達成のためには ATLAS 及び CMS 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 この中で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。衝突点で小さな β^* を得る ために MBXF には 150 mm の大口径が必要であり、また 積分磁場として 35 Tm が要求されている。主双極磁場は 運転温度 1.9 K、定格運転電流 12 kA で 5.6 T であり、これ を Nb-Ti/Cu 超伝導コイルにより発生させる。

2014年から約5年間に渡ってKEK所内で進めてきた2 m長のモデル磁石の設計、製作、性能試験を終え、同じ磁 石断面で7m長の実証機および実機の製造の段階に入っ ている。本発表では、モデル磁石で得られた知見、明らか になった問題点と実証機への設計変更、製造の経過につい て報告する。

2.2 m モデル磁石で得られた知見

Fig.1にモデル磁石の各モデル磁石のトレーニングプト ットを示す。1号機(MBXFS1)ではコイル円周方向の予 備応力不足により不十分なトレーニング特性であったが、 予備応力を110~120 MPaまで増加させることで、格段に トレーニングが改善した。この結果から、大口径単層コイ ルにおいては、電磁力支持のための予備応力管理が非常に 重要であることが明らかになった。最後に製作した3号機

(MBXFS3)では、2回目のクエンチで定格電流(Inominal) に到達し、受け入れ基準電流(Iultimate)も達成した。また、 熱サイクル後のトレーニングメモリーも良好で、1回目の クエンチで受け入れ電流に到達した。

一方、磁場性能に関しては定量評価が可能となった

MBXFS2 および同じ磁場設計の MBXFS3 で 20 unit 程度 の大きな 6 極成分 (*b*₃) 確認され、実証機以降で改善が 必要であることがわかった。

3. 実証機に向けた設計変更

調査の結果、大きな b3 は予備応力を増やすために行っ た GFRP 製のコイル部品 (ウェッジ)の設計に原因がある ことが明らかになった。これを踏まえて、実証機では予備 応力と磁場性能の両方を同時に満足するウェッジ設計に 修正した。また、組み立て、励磁中のコイル変形や端部の 飽和の影響等も考慮に加えて、積分多極磁場が要求性能を 満たす磁場設計を行った。

モデル磁石では、電磁力によるコイル端部のケーブル変 形によりポリイミド絶縁の一部が損傷する問題が発生し た。実証機では、端部予備応力の増加や絶縁の機械的強化 による対策を施すことにした。

4. 実証機製造の現状と展望

2019年に実施された入札を経て、日立製作所が実証機、 実機製造を行うことが決定した。2020年10月に7m長の コイル巻線が開始され、これまでに1台目のコイルのキュ アリングまでが完了している。

磁石本体の完成後に一旦 KEK に納品され、常温磁場測 定や冷却、励磁試験が実施される。その後、熱交換器やビ ームチューブを含む端部溶接作業を経てコールドマスが 完成する。KEK では、コールドマス溶接に必要なアライ メント測定の方法確立の準備を進めている[1]。実証機は コールドマスの状態で CERN に輸送され、他の衝突点挿 入部用超伝導磁石と接続された状態での励磁試験(ストリ ング試験) に供される予定である。

参考文献

1. K. Suzuki et al, Abstract of CSJ Conference, Vol. 101, 2Aa06 (2020).



Fig. 1 Training plot of 2 m model magnets of MBXF. TC stands for thermal cycle.

— 75 —

LHC高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(15) 2 mモデル磁石3号機を用いた磁石座標系及び磁場分布の総合評価 Development of Superconducting Magnets for LHC Luminosity Upgrade (15)

- Evaluation of the mechanical and field coordinates using the 3rd model magnet

<u>鈴木 研人</u>、中本 建志、菅野 未知央、池本 由希子、池田 博、岡田 尚起、川又 弘史、有本 靖、植木 竜一、大内 徳人 (高エネ研) SUZUKI Kento, NAKAMOTO Tatsushi, SUGANO Michinaka, IKEMOTO Yukiko, IKEDA Hiroshi, OKADA Naoki, KAWAMATA Hiroshi, ARIMOTO Yasushi, UEKI Ryuichi, OHUCHI Norihito (KEK) E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

1 はじめに

KEK では LHC 高輝度化アップグレード計画において総入 れ替えが進められている最終収束部磁石群に属するビーム分 離双極超伝導磁石(D1)の開発、製造を担当している。直径 570mm、磁石長 7m にも及ぶ実証機及び実機は圧力容器の形 で CERN へ輸送される予定である。磁石を封入する圧力容器 の鏡板には、磁石の参照点を映し出すアラインメント用基準座 が設けられ (Fig 1)、これらをターゲットにし、磁石は LHC クライオスタットに組み込まれる。鏡板は、D1の機械構造か ら求めた座標系(以下、磁石座標系)に対して 0.5 mm 以内の 精度で設置される必要がある。磁石座標系はシェル外周部長 手方向8箇所 × 周方向4箇所=32箇所に設置されたターゲッ トを置く座「マーカー」を元に構築されるが、これらマーカー の位置はファインブランキング加工で成形しているリターン 鉄ヨークの外形から決定している。各長手位置の4点のマー カーが作る機械中心と磁石座標系の中心軸は長手方向に渡って 1 mm 以内に収まっている必要がある (Req.A)。また、ビー ム光学の要求から、磁石座標系と D1 が生み出す磁場分布と を正確に関連づける必要がある;磁石座標系の中心軸と磁場 中心の差±5 mm 以内とする (Req.B)。そのため、レーザー トラッカーを用いた磁石座標系の抽出及び磁場測定による関 連付けを行い、Req.A, Bの要求達成を確認する手順確立のた め、モデル磁石3号機を用いた総合評価を行なった。尚、本概 要執筆時は測量データ及び磁場測定データの測定・解析中で ある事を予め述べておく。

2 磁石座標系の構築:Req.A

Fig. 2上図にレーザートラッカーを用いた磁石座標系の構築(Fiducialization)の様子を載せた。ここではモデル磁石3号機のシェル外周部に設置した長手方向3箇所×周方向3箇 所=9箇所のマーカーをトラッカーで測量し、最小二乗Fitによって2平面(Fiducial planes)を算出し、これを磁石座標系として定義する。ここで2平面は直交条件が与えられ、以下の式で表される:

$$z = ax + by + c \tag{1}$$

$$y = dx + ez + f \tag{2}$$

$$e = ad - b \tag{3}$$

ここで、(x,y,z) は実際のマーカーの測量結果に対応する。まず は1つ目の平面(式1)の未知数(a,b,c)を最小二乗Fitによっ て求め、続いて、直交条件の式3を式2に代入し、再び最小 二乗Fitによって未知数(d,f)を求める。以上によりFidicial planesが求まる。図2下図に7m磁石のFit例を載せた。本発 表では、まずモデル磁石3号機の磁石座標系の構築し、Req.A の達成可否を調べたので、その結果を報告する。

3 磁石座標系における磁場分布評価: Req.B

磁場中心と磁石座標系の中心軸の関連付けを行うため、回 転コイルを用いた磁場測定を実施した。ここでは、回転コイ ル先端にターゲットを取り付け、レーザートラッカーの連続測 定を行う事で、ターゲットの回転軌道を抽出し、真円 Fit を行 う。こうして、各長手位置で求まる円の中心から回転コイル の軌道を再構成し、磁石座標系における回転コイルの位置を定 義する。その後、回転コイルによる磁場の多極展開測定から、 Feed down 補正を行う事で、磁石座標系における磁場中心の 抽出が可能となる。本発表ではモデル磁石3号機の磁場中心 を磁石座標系内で再構成し、Req.Bの達成可否を調べたので、 その結果について報告する。



Fig. 1: Top) D1 cold mass. Bottom) Reference points on an endcover of the cold mass.



Fig. 2: Top) Fiducialization via targets using a laser tracker. Bottom) Example of 3-dimensional planar fit.

二重電機子バルク超電導同期機に関する研究

Double armature HTS bulk synchronous machine

<u>武井 慎治</u>,和泉 充,山口 康太,井田 徹哉, SHAANIKA Erasmus (海洋大) <u>TAKEI Shinji</u>, IZUMI Mitsuru, YAMAGUCHI Kota, IDA Tetsuya, SHAANIKA Erasmus (TUMSAT) E-mail: s.takei1010@gmail.com

1. はじめに

国内に生産資源をもつ再生可能エネルギーのひとつとして 海洋エネルギーがある。環境への影響を考慮し,海洋生物へ の影響を抑制する一助とするため,海潮流タービン発電機の 小型化と効率化に注目している。その実現には,異速二重反 転タービンとそのトルクに整合した発電機が必要となる。この 課題の解決策として,2 基の相反転タービンに直結する二重 電機子構造を導入した超電導同期機を検討した[1,2]。

2. システム構成

二重反転タービンは異速反転のケースを想定した[1]。設計 例として定格流速は 2.5 m/s, 発電能力は 500 kw (発電機出 口出力), ロータ直径は 14.5 m とされている[3]。

3. 発電機基本構成

発電機設計仕様を Table 1 に示す。 2つのタービンからの 入力トルクは,前方,後方それぞれ 251 kNm, 188 kNm となり, 出力は合計 518 kW と与えられている[3]。 Fig. 1 は前回に示 した発電機の二重電機子と界磁部の配置断面を示す。2つの 回転電機子の間に固定子として超電導バルク磁石を界磁極 として配置している。今回は,界磁極を構成するバルク材を Fig. 1 の x-y 面内で傾斜させて配置した場合の発電機出力の トルクリップルとタービンからの入力機械トルクへの整合性を 検討した。設計と磁場解析は, 3D-CAD と磁場解析ソフト MagNet7により行った。

Table 1	Specification	of cor	ntra-rotating	bulk	HTS	
generator [2].						

Speed [min ⁻¹]	12.2 (Front) 9.1 (Rear)	
Generator diameter [m]	2	
	2	
Rotor	Armature winding (copper)	
States	HTS bulk (GdBa2Cu3O7-z)	
Stator	Permanent Magnet (Nd-Fe-B)	
Gap width of center [mm]	15	
Number of poles	16	
Teeth	M600 - 50A	



Fig.1 Design of the generator structure with the contra-rotating armatures and field poles of bulk HTS.

Table 2 Comparison of torque, output, and torque ripple between a model with the bulks arranged at a 5-degree angle of inclination in the x-y plane and a model without inclination [2]

	Outer armature		Inner armature	
	0° [2]	5°	0° [2]	5°
Maximum torque [kNm]	179	169	233	239
Maximum power [kW]	171	161	297	305
Maximum torque ripple [kNm]	52.6	28.6	33.0	41.6

Table 2 は, 超電導バルク磁石の Fig. 1 に示す前回示した 配置と x-y 面内で 5°傾斜させた今回の配置における外側, 内側の電機子における最大トルク,最大出力,最大トルクリッ プルについて示した。表に示すように外側の電機子の出力の 減少を押さえつつ,リップルの抑制が可能であることを得た。 内側の電機子におけるトルクリップルの増大は、その大きさに おいて外側の電機子におけるトルクリップルの減少分よりも小 さいことから、バルク材の傾斜配置は総体として有効と考えて いる。

4. 結論

500 kW 級の二重反転タービン方式潮流発電の2つのター ビン入力機械トルクに整合した二重電機子構造をもつ発電機 モデルを得た。さらに、外側の電機子のトルクリップルを改善 することが確認できた。HTS バルク材を界磁極とした場合の同 期運転下での捕捉磁束が安定的であることは、先行研究で 示されている[4]。着磁技術や冷却についての研究成果をふ まえて、発電機の縮小モデルの試作等によりシステムの成立 性を検証していく。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業による科学研究費 補助金(16H04597)により実施したことを付記し、超電導界磁 方式二重反転タービンの設計においてご共同とご協力をいた だいた国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上 技術安全研究所の上入佐光、白石耕一郎、右近良孝、工藤達 郎、九州大学の安東潤、金丸崇の各氏に厚く御礼申し上げる。

- S. Takei et al.: Abstracts of 10th ACAS/2nd Asian-ICMC/ CSSJ Joint Conference (Jan. 2020) 7p-59
- S. Takei et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.48
- 右近良孝,白石耕一郎,工藤達郎,金丸崇,安東潤,日本船舶海洋工学会講演論文集(令和2年日本船舶海洋)
- 4. E. Shaanika et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 30, No. 1 (Jan. 2020) pp6, Art. no. 5200106. DOI: 10.1109/TASC.2019.2927587, および博士学位論文 (March 2020,東京海洋大学).

50 kW 級全高温超伝導誘導同期モータの負荷試験とその定量解析

Load test of 50 kW class fully high temperature superconducting induction/synchronous motor and its quantitative analysis

<u>中村</u>武恒,奥野 誠也(京大);吉川 雅章,伊藤 佳孝,寺澤 俊久(イムラ材研) <u>NAKAMURA Taketsune</u>, OKUNO Masaya (Kyoto Univ.); YOSHIKAWA Masaaki, ITOH Yoshitaka, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL) E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、JST-ALCA プロジェクトとして、輸送機器への実用 を目指した高温超伝導誘導同期モータ(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の 研究開発を実施した。本プロジェクトは、2012 年度に開始され、 2019 年度で終了したが、HTS-ISM を基軸とした高温超伝導 モータシステムに関する先駆的成果を上げることができた[1-4]。現在は、上記成果をもとに、京都大学・オープンイノベー ション機構の支援を受けて、実用化を目指した検討を開始し ている。JST-ALCAプロジェクトにおける目玉成果物の一つは 50 kW 級全超伝導機であり、世界で唯一の全超伝導負荷試 験や可変速試験成功をはじめ、種々の特筆すべき実績を上 げている [5,6]。一方で、全超伝導機の実用設計のためには、 当然のことながらその回転特性を定量的に再現できるモデル の確立が不可欠である [6]。

本講演では、全超伝導モータシステムをモデルベースデザ インに適用可能な定量的回転特性解析技術の検討の一環と して、固定子交流損失の定量評価とその非線形抵抗としての 定式化、負荷試験結果の詳細、および非線形電圧方程式に よる定量解析結果について報告する。

2. 解析方法

Fig. 1には,検討対象とした50 kW級全超伝導HTS-ISMの 外観写真を示す [1-6]。本モータを用いた無負荷回転試験 結果および回転子拘束試験結果から電圧方程式を導いた。 なお,ビズマス系高温超伝導固定子巻線の非線形抵抗は交 流損失測定結果から,そしてビスマス系回転子巻線の非線形 抵抗は直流電界-電流密度特性からそれぞれ定式化した。 さらに,鉄心の非線形磁気特性に伴う非線形インダクタンスに ついては,2次元電磁界解析を援用して求めた。

3. 解析結果と考察

Fig. 2には、ビスマス系高温超伝導固定子巻線における三 相交流損失特性の実験結果を示す。なお、交流モータにお ける電気エネルギーから運動エネルギーへの変換は、回転 磁界による速度起電力によって実現されることから、単に単相 交流通電した際の交流損失では大きな誤差を伴う可能性が あるので注意が必要である [7]。この結果を利用してビスマス 系固定子巻線の非線形抵抗を導出し、非線形電圧方程式か ら得られた負荷特性をFig. 3に示す。同図に示すように、本解 析によって、全超伝導機の負荷特性を定量評価することに成 功した。なお、最終的なHTSモータ設計は、Maxwell方程式か ら一意性を保証する形で実現されなければならない。その場 合、Fig. 2の交流損失もHTS回転子巻線のように電界と電流 密度の構成関係から得られなければならず、現在はこの課題 にも挑戦している。詳細は、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は,(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト "H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術 開発(ALCA)"「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転 機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

 ALCA Breakthrough (JST), no. 3 (2018 年 3 月) (https://www.jst.go.jp/alca/pdf/result2017.pdf)

- 2. 日経産業新聞(2018年4月3日付,18面)
- 3. 日経エレクトロニクス 12 月号, pp. 39-41 (2019 年 11 月 20 日発行)
- 4. 日経ビジネス, テクノトレンド 107 pp. 77-78 (2020 年 2 月 17 日発行)
- T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, 5203005 (2019)
- 6. T. Nakamura, et al.: Physica C, vol. 578, 13536 (2020)
- 7. T. Nakamura, et al., unpublished



Fig. 1 Photograph of 50 kW class fully HTS-ISM [1-6].



Fig. 2 Three-phase AC loss measurement results (77 K)



Fig. 3 Experimental and analytical results of load chatacteristic (50 Hz, 110 V, 77 K).

マルチフィジックス解析に基づく全高温超伝導誘導同期回転システム の WLTC 解析

WLTC analysis of fully high temperature superconducting induction/synchronous motor system based on multidisciplinary analysis

奥野 誠也, <u>中村 武恒</u>, 松木 健次郎, COLLE Alexandre (京大) OKUNO Masaya, <u>NAKAMURA Taketsune</u>, MATSUKI Kenjiro, COLLE Alexandre (Kyoto Univ.) E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、高温超伝導誘導同期モータ(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)を 輸送機器に実用するための研究開発を推進している。特に、 最終目標としてバス・トラック・中型乗用車などの陸上輸送機 器をターゲットにしている。当該機器用モータは他輸送機器 に比較してその出力が小さいことから、相対的に冷却系のエ ネルギー的かつ体格的課題が大きくクローズアップされるが、 実現すれば市場が非常に大きい。従って、思い切ったテーマ を設定して検討を進めている。上記機器を志向した研究開発 を行う際には、限られた空間にシステムを搭載する必要がある ことから、HTS モータだけでなくインバータ系や冷却系などを 含めて検討する必要がある。

本講演では、50 kW 級全超伝導機[1]の回転特性を非線形 電圧方程式によって表現すると共に[2]、インバータ特性、運 動方程式、熱等価回路、および超伝導非線形抵抗の温度依 存性を連成したマルチフィジックス解析によって、中型乗用車 を想定した WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle)モード走行による電費評価を実施した。

2. 解析方法

Fig. 1には、マルチフィジックス連成解析のフローチャートを 示す。HTS-ISMへの入力条件を設定後、非線形電圧方程式 と運動方程式からトルクや損失を計算する。次に、損失を熱 負荷として与えて熱等価回路計算を行い、モータ各部の温度 分布を求める。そして、巻線部の温度から回転子巻線抵抗 (R)および固定子巻線抵抗(R)を計算し、次のタイムステップ の解析を進める。上記計算を、Fig. 2のWLTC走行モードに対 して実施した。なお、固定子の外周部を冷凍機伝導冷却し、 エアギャップを流れるガスの対流熱伝達によって回転子を冷 却する条件とした。

3. 解析結果と考察

Fig. 3には、マルチフィジックス解析によって得られた WLTC特性の一例を示す。例えば、HTSロータバーの温度に スパイク状の急激な変化が見られるが、これは磁束フロー状 態への遷移に伴う自律回転安定性[3]のエビデンスである。な お、本モデルでは固定子を伝導冷却していることから、その 温度は常に回転子よりも低く、かつ固定子および回転子内部 の温度分布は大きくない。本結果から電費を求めたところ、冷 凍機の消費電力を考慮しても10 km/kWhの優れた性能が得 られる可能性を初めて示すことができた。詳細は、講演当日 に報告する予定である。

謝辞

本研究は,(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト "H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術 開発(ALCA)"「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転 機システム」の一環として実施されたものである。

- T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, 5203005 (2019)
- 2. T. Nakamura, et al.: Physica C, vol. 578, 13536 (2020)
- 3. 特許第5753462号(2015年5月29日)



Fig. 1 Flowchart of multidisciplinary analysis.



Fig. 2 WLTC drive pattern.



Fig. 3 Example of multidisciplinary analysis results for WLTC drive mode.

50 kW 級高温超伝導誘導同期モータの負荷特性と効率マップの実験的検討

Experimental study of load characteristics and efficiency map of 50 kW class high temperature superconducting induction/synchronous motor

 COLLE Alexandre,
 中村
 武恒,
 松木
 健次郎,
 松浦
 潤,
 小笠
 卓郎(京大);

 吉川
 雅章,
 伊藤
 佳孝,
 寺澤
 俊久(イムラ材研)

 COLLE Alexandre,
 NAKAMURA Taketsune,
 MATSUKI Kenjiro,
 MATSUURA Jun,
 OGASA Takuro (Kyoto Univ.);

 YOSHIKAWA Masaaki,
 ITOH Yoshitaka,
 TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL)

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

1. はじめに

我々は、電動輸送機器への実用を目指した高出力高温超 伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を実施 している。これまで、固定子ならびに回転子巻線共にビスマス 系高温超伝導導体で構成する 50 kW 級全超伝機の研究開 発を通して、その優れたポテンシャルの実証に初めて成功し ている[1,2]。一方で、上記モータの固定子巻線には、磁性体 中における市販 HTS 線材の超伝導特性を少しでも向上させ るためにトロイダル巻線構造を採用しているが、一方で当該 構造では回転特性の低下を招くことが分かっている。

本講演では、銅巻線を用いた一般的分布巻固定子巻線を 開発し、既試作のビスマス系回転子[1]と組み合わせて回転 試験を実施したので、その結果を報告する。

2. 銅固定子 50 kW 級機の構造と試験方法

Fig. 1には、開発した銅固定子50 kW級機の外観写真を示 す。分布巻銅固定子巻線を設計・試作し、かつ文献[1]のビス マス系回転子と組み合わせた。試作機を液体窒素浸漬状態 として、PWMインバータで励磁するとともに、定格出力90 kW の永久磁石モータで負荷を印加した。なお、効率マップの取 得に際しては、駆動周波数を固定後、電圧を変化させながら 負荷試験を繰り返し、所定のトルク値における最大効率とした。 3. 実験結果と考察

Fig. 2には,入力線間電圧443 V,周波数35 Hzにおける典 型的な負荷試験結果(77 K)を示す。同図に示すように,50 kWの定格準同期トルクが実現されており、本研究の設計技 術の完成度を示すことができた。さらに、過負荷を印加しても すべり回転に移行して回転状態を維持できており, 64.7 kWの 過負荷最大出力を確認することに成功した。なお,最大出力 時のトルク値は700 Nmを超えており,非常に大きなトルクを伝 達する断熱シャフト技術も実証した。Fig. 3には,回転数1200 rpmの条件において, 効率-トルク特性を異なる入力線間電 圧に対してプロットした結果である。同図に示すように, 効率 は負荷トルクおよび入力電圧に依存して変化しており, またト ルク値に対しては電圧によらず250 Nm程度でピーク値を示し ている。Fig. 4には, Fig. 3から作成した最大効率マップを示 す。特に軽負荷領域では、大きな機械損を含んでいるにも関 わらず高効率を示しており、当該損失を除けば限りなく100% に近い値となった。現在は、99%台の効率について、小数点 以下の値を精密に得るためのダイナミックレンジの高い計測 法を検討中である。詳細は,講演当日に報告する。 謝辞

本研究は、(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト "H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術 開発(ALCA)"「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転 機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

- T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, 5203005 (2019)
- 2. T. Nakamura, et al.: Physica C, vol. 578, 13536 (2020)



Fig. 1 Photograph of 50 kW class HTS-ISM.



Fig. 2 Typical load test result (77 K, 443 V, 35 Hz).







Fig. 4 Tested results of maximum efficiency contour.

高温超伝導誘導同期モータの始動特性に与える熱的影響の解析的検討 Analytical study of thermal effect on starting characteristics of high-temperature superconducting induction/synchronous motor

奥野 誠也, <u>中村 武恒</u> (京大) OKUNO Masaya, <u>NAKAMURA Taketsune</u> (Kyoto Univ.) E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は,輸送機器への実用を目指した高温超伝導誘導同 期モータ (High Temperature Superconducting Induction /Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を実施している。 高温超伝導モータは,極低温度運転に伴って比熱が小さく熱 拡散が速いことから,可変速駆動時や始動時の過渡回転現 象に対して示強変数としての温度変化の影響が大きくなると 考えられる。

本講演では、50 kW 級全超伝導機を対象として[1], 最も急激な過渡発熱を伴う始動(ゼロ発進)特性について、その熱的影響をマルチフィジックス解析[2]に基づいて検討したので報告する。

2. 解析方法

Fig. 1には,検討対象とした50 kW級全超伝導HTS-ISMの 外観写真を示す[1]。本モータの試験結果から非線形電圧方 程式を導き,運動方程式および熱等価回路と連成する解析 プログラムを用いて始動特性を検討した。

3. 解析結果と考察

Fig. 2には,熱解析無しの場合の始動特性(10 s間で0→ 1200 rpmにランプ加速)を示す。同図(a)に示すように,熱的影 響を考慮しない場合には,始動後20 s経過してもロータバー 電流は臨界電流よりも大きくなっており,即ち磁束フロー状態 となっていることから,磁束捕捉が実現しない(すべり回転)。 一方で,同図(b)のように熱的影響を考慮した場合には,瞬間 的な温度上昇に伴って臨界電流が低下し(K 3 s),その後ロ ータバー電流が臨界電流未満となって磁束が捕捉されている (同期回転)。Fig. 3には, Fig. 2(b)の時の温度変化を示すが, HTSロータバーの温度が局所的かつ瞬間的に上昇しており, 始動のための熱スイッチのような役割を果たしていることが分 かった。Fig. 4には回転数変化を示すが,熱的影響を考慮し た場合には同期回転が実現されている。以上より,高温超伝 導モータの始動特性や過渡回転特性を検討する際には,そ の熱的影響を考慮する必要性があると考えられる。

謝辞

本研究は、(国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト "H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術 開発(ALCA)"「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転 機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1. T. Nakamura, et al.: Physica C, vol. 578, 13536 (2020)
- M. Okuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 100, 2A-p03 (2020)



Fig. 1 Photograph of 50 kW class fully HTS-ISM [1].



(b) With thermal effect

Fig. 2 Multiphysics analysis results of starting characteristics in 50 kW class fully HTS–ISM.



Fig. 3 Temperature change in the case of Fig. 2 (b).



Fig. 4 Rotation speed change corresponding to Fig. 2.

— 81 —

高温超伝導誘導同期モータにおける低損失かつトルク応答の速い始動法 に関する解析的検討

Analytical study on starting method with low loss and fast torque response in high-temperature

superconducting induction/synchronous motor

<u>松木 健次郎</u>, 中村 武恒, COLLE Alexandre(京大)

MATSUKI Kenjiro, NAKAMURA Taketsune, COLLE Alexandre (Kyoto Univ.)

E-mail: matsuki.kenjiro.47m@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モ ータ(High Temperature Superconducting Induction /Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を推進している[1]。同機は、高 効率同期回転や高安定可変速特性、履歴(ヒステリシス)特性 など、超伝導材料特有の非線形物理量である臨界電流を効 果的に利用した高性能回転特性を実現可能である。一方で、 同機の始動では、かご形回転子のHTS 巻線ループの磁気遮 蔽を破り、磁束を鎖交させる必要がある。そのため、定常電流 を大きく上回る始動電流が要求され、始動に要する時間を可 能な限り短縮する必要がある。車載応用等を志向する上での トルク応答の観点からも、始動時間短縮は検討すべきである。 本研究では、上記の要請に対して我々の提案した新たな HTS-ISM の始動法[2]に対する、より詳細な検討結果につい て報告する。

2. 提案する始動法と検討方法

本研究で提案する始動法では, Fig. 2に示すように振幅値 がパルス状に変化して,運転電圧へと移行するような入力電 圧制御を行う。本手法の検討は, Fig. 1に示す銅固定子を有 する20 kW級HTS-ISMの解析モデルを用いて実施した。解析 では,要求負荷10kW(定格出力(20kW)の50%の負荷),周波 数60 Hz,運転電圧80 Vrmsを固定条件として,入力パルス波 形の条件(パルス幅,パルス電圧,パルスの昇降時間)を変化 させて始動条件の検討を行った。

3. 試験結果と考察

Fig. 3には、パルス電圧 V_p が124 V、136 Vの時の結果を示 す。図に示すように、パルス電圧 V_p が124 Vの際には0.3 sの パルス幅で目標同期速度(1800 rpm)への到達に成功した。パ ルス電圧 V_p が136 Vの際には、同期速度に達した後に同期 外れが発生し、始動に失敗した。また、入力条件のパルス電 圧 V_p とパルス幅に対して始動の可否を調べたところ、Fig. 4 に示すように始動可能範囲が存在することが判明した。具体 的な解析方法など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト"H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA)"「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機シ ステム」の一環として実施されたものである。

参考文献

- T. Nakamura, *et al.*: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015.06) 5202304.
- K. Matsuki, *et al.*: 33rd Int. Symp. on Supercond. (2020.12) abstract submitted.



Fig. 1 Photograph of 20 kW class BSCCO rotor [1]



Fig. 2 Input rms voltage pattern of proposed starting method $% \left({{{\rm{T}}_{{\rm{s}}}}} \right)$



Fig. 3 Analytical result of rotational speed in which voltage pulse has 0.3 s pulse width and $V_{\rm P} = 124$ V, 136 V



starting

輸送機器用高温超伝導誘導同期モータの実用的冷却構造に関する解析的検討

Analytical study on practical cooling structure of high-temperature superconducting induction/synchronous motors for transportation equipment

<u>COLLE Alexandre</u>, 中村 武恒 (京大) <u>COLLE Alexandre</u>, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.) E-mail: colle.alexandre.2r@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への実用を目指した高温超伝導誘導同 期モータ(High Temperature Superconducting Induction /Synchronous Motor: HTS-ISM)の研究開発を実施している [1,2]。これまで、JST-ALCAプロジェクトを中心とした活動を通 して基盤技術を確立できたことから、今年度より実用を目指し た研究開発も並行して行っている。輸送機器用超伝導モータ では、限られた空間にシステムを実現し、かつ断熱性能に優 れた冷却構造ならびに方式の実現が不可欠である。そこで本 講演では、これまでの知見に基づいて、固定子固体伝導冷 却でかつ回転子ガス冷却を想定した実用的冷却構造を解析 的に検討したので報告する。

2. 冷却構造と解析方法

Fig. 1には、被冷却対象の50 kW級全高温超伝導誘導同 期モータの外観写真を示す[1,2]。また、Fig. 2には検討対象 とした冷却構造を示す。HTS固定子は、冷凍機による固体伝 導冷却とし、回転子は固定子ー回転子間のギャップを通るガ ス流による冷却とした。上記モデルについて、2次元CFD (Computational Fluid Dynamics)解析と熱解析を連成し、その 冷却特性を検討した。Fig. 3には、CFD解析モデルを示すが、 上部から1 g/sのガスを流入し、下部から排出する構造とした。

3. 解析結果と考察

Fig. 4には、CFD解析結果の一例を示す。まず回転子が 静止している条件(Fig. 4(a))では、流入されたガスは層流とな って回転子ギャップ部に導かれており、ギャップ部を通過する ガス流速は2 m/s程度であった。一方で、回転子が188 rad/s で回転している条件(Fig. 4(b))では、流入されたガスは上部の 空間で渦を作っており、ギャップ部を通過するガス流速は18 m/s程度と高くなっていた。そこで、本結果をもとに回転子冷 却特性を改善する検討を進めている。熱解析と連成した結果 や、あるいは冷却特性を改善する構造などについては、講演 当日に報告する。

謝辞

本研究は, (国研)科学技術振興機構(JST)のプロジェクト "H24 年度戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術 開発(ALCA)"「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転 機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1. T. Nakamura, et al.: Physica C, vol. 578, 13536 (2020)
- T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 100, 2A-p02 (2020)



Fig. 1 Photograph of 50 kW class fully HTS-ISM [1,2].



Fig. 2 Cooling structure of HTS-ISM.





(a) Case where the rotor is stationary



(b) Case where the rotor is rotating (Ω= 188 rad/s) Fig. 4 CFD analysis results.

希土類系超伝導固定子を有する全高温超伝導誘導同期発電機の負荷回転特性

Load rotation characteristics of fully high-temperature superconducting induction/synchronous generator with rare-earth system superconducting stator

<u>中村 武恒</u>, 松浦 潤, 小笠 卓郎 (京大)

<u>NAKAMURA Taketsune</u>, MATSUURA Jun, OGASA Takuro (Kyoto Univ.) E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

京都大学では、高温超伝導誘導同期回転機(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)の発電特性[1]や回生特性[2]に関する研究を実施 している。特に低速回転時の発電動作においては、全損失に 占める Joule 損失の割合が相対的に大きくなることから、回転 子巻線だけでなく固定子巻線も超伝導化して効率改善を検 討する必要がある。さらに、例えば電気自動車駆動モータの 回生特性も本研究のターゲットに入るが、小形化が重要であ る当該モータにおいて、許容曲げ径を小さくできる希土類系 HTS 線材を用いた回転機の回生特性を明確にしておくことも 重要である。

本講演では、希土類系 HTS 線材を用いた曲げ直径 20 mm 程度の固定子巻線を開発し、ビスマス系 HTS かご形回転子と 組み合わせた発電試験を実施したので報告する。

2. 試作と試験方法

Fig. 1には, 試作した希土類系HTS固定子の外観写真を示 す。SuperPower社(米国)製の希土類系HTS線材を使用して おり,巻線構成としては,3相4極Y結線の集中巻とした。同挿 入図に示すように、巻数12のパンケーキコイルにて毎極毎相 巻線(ポリイミド絶縁)を構成したが, 最も小さな曲げ直径は20 mm未満であった。なお, 試作した固定子巻線コイル(12個)の 鉄心内臨界電流を測定したところ, 91 A~98 A (77 K)であっ た。上記HTS固定子をビスマス系HTSかご形回転子と組み合 わせ,液体窒素浸漬条件下における全超伝導発電試験を実 施した。発電試験に際しては、まず機械入力用モータを専用 のPWM (Pulse Width Modulation) インバータで駆動して, 所 定の回転数で回転させる。その後,試作機を汎用PWMインバ ータによって上記回転数と同期する周波数によって励磁する。 そして,汎用インバータの励磁周波数を少しずつ下げることに よって発電特性を測定した。本研究では定常特性のみを対 象としている。Fig. 2には、試料ホルダの外観写真を示す。

3. 試験結果と考察

Fig. 3には,発電特性の試験結果例を示す。本結果は,駆動周波数を10 Hz~40 Hz (同期周波数: 300 rpm~1200 rpm) の範囲で変化させ,また励磁電流が10 Aと30 Aの場合につい て得られた特性である。同図に示すように,安定した全超伝 導発電試験に成功した。重要な特性としては,ある閾値となる 機械入力を超えて初めて発電動作が開始され,当該閾値は 駆動周波数あるいは励磁電流が大きくなるほど高くなるという 傾向を示している。なお,本試験は複数回室温に昇温した後 繰り返し実施しているが,HTS固定子巻線の特性劣化などの 事象は観測されていない。即ち,小さな曲げ直径を有する希 土類系HTS固定子巻線の可能性が示されたと考えられる。 謝辞

本研究は,科学研究費補助金(基盤研究(B), 17H03218)の 支援を受けて実施された。

- T. Nakamura, et al.: TEION KOGAKU, vol. 44, no. 3, 112-119 (2009)
- T. Karashima, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, 5202605 (2017)



Fig. 1 Photograph of rare-earth system HTS stator.



Fig. 2 Photograph of sample holder.



Fig. 3 Tested results of generation characteristics.

内部スズ法構造 Nb₃Sn 拡散対への Zn 添加量が Nb₃Sn 微細組織や超伝導特性に与える影響 The effect of the amount of the Zn to internal tin Nb₃Sn diffusion couple on Nb₃Sn microstructure and superconducting characteristics

<u>森田 太郎</u>(上智大学、NIMS); 谷貝 剛(上智大学); 伴野 信哉(NIMS) <u>MORITA Taro</u> (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); BANNO Nobuya (NIMS) E-mail: morita0079@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn超伝導線材は次世代粒子加速器(FCC)用マグ ネットの最有力候補の一つであるが、その要求性能はJ。 > 1500 A/mm²と非常に高く、更なる特性向上が不可欠 である。近年の研究では Nb₃Sn 線材の超伝導特性は結 晶粒径などの微細組織に強く依存しており、J₆向上には 微細組織制御が重要であることが改めて示されている。 NHFML の最新の研究では Nb-Ta 芯に Hf 添加すること によってNb₃Sn結晶粒径が微細化され、大幅にJ₆が 向上することが報告されている [1]。

一方で、我々はこれまでに内部スズ法線材における Cu 母材側に元素添加を行うことで結晶組織を制御し、J。の向 上を試みてきた。Zn は代表的な添加元素一つであり、こ れまでにカーケンドールボイド生成の抑制、Nb₃Sn 層生 成促進などの効果があることが明らかになっている [2, 3]。その他、Ti は古くから Nb₃Sn 線材の B₂や J。を向上 させる添加元素として知られており、特に Cu 母材側に Ti 添加した場合に結晶粒が微細化され、さらに等軸結晶領 域が増加することが明らかになっている [4]。

以上のような背景から我々は, Ti と Zn の効果を同時 に取り入れるために, Nb/Cu-Ti/Sn-Zn 構造を有した内部 スズ法線材の開発を行った。Zn と Ti の効果によって微 細組織が改善され、J。特性が向上した。一方で、Zn 添加 量と Nb₃Sn 微細組織の関係については詳しく調べられて こなかった。多芯線では加工性、カーケンドールボイド生 成など様々な現象が複雑に起こるため、現象の理解が困 難である。そこで本研究では、Nb/Cu-Ti/Sn-Zn 構造を有 した単純な拡散対試料を作製し、Nb₃Sn 生成熱処理後の 微細組織とJ。特性の関係について詳しく調べた。

2. 実験方法

本研究では(1) Zn 添加試料(S20Z)、(2) Zn 無添 加試料(S0Z)の2 種類の拡散対試料を用意した。S20Z、 S0Z の Sn 芯組成はそれぞれ Sn-20wt%Zn、Sn-0wt%Zn である。試料は前駆体作製後にスエージングと冷間引抜 加工によって ϕ 0.6 mm まで伸線された。伸線後にまず 500°C/100 時間で Cu/Sn 混合熱処理を行い、その後に Nb₃Sn 生成熱処理として 685°C/100 時間で熱処理を行 った。試料の微細組織観察は FE-SEM、EDX、EBSD を用 いて行った。また 10 ~ 18 T の外部印可磁場下において 4 端子法によって I_e 測定を行った。I_e の電界基準は 1 μ V/cm とした。

3. 結果と考察

図 1 に EBSD 分析によって求められた S20Z、S0Z そ れぞれの Nb₃Sn 平均結晶粒径を示す。S20Z の Nb₃Sn 平 均結晶粒径は S0Z に比べて小さかった。Zn 添加によって Nb₃Sn 核生成が促進されたために結晶粒が微細化された と考えられる。図 2 に S20Z、S0Z の J₆-B 特性を示す。 高磁界側では S20Z の特性は S0Z よりも僅かに小さい。 これは S20Z では Sn 芯への Zn 添加によって Sn 量が減 少したことに起因すると考えられる。一方で、低磁界側で は S20Z の特性は S0Z と比べて大幅に大きい。S20Z では Zn 添加によって Nb₃Sn 結晶粒が微細化されたために低 磁界側の特性が大幅に向上した。その他、Nb₃Sn 微細組 織と J。特性の相関については当日に発表する予定である。

本研究の一部は<u>JSPS 科研費 JP18K04249</u>の助成を受け たものです。

参考文献

- 1. S. Balachandran, C. Tarantini, P. Lee et al., SuST (2019)
- 2. T. Taro, T. Yagai, N. Banno, JALCOM (2020)
- 3. N. Banno, Y. Miyamoto, and K. Tachikawa Phisica C (2018)
- 4. E. Popova, I. Deryagina, and E. G. Valova-Zaharevskaya, Cryogenics (2014)



 \boxtimes 1 The correlation between Zn content and the average Nb_3Sn grain size after $685^\circ\text{C}/100$ h heat treatment



 \boxtimes 2 Layer J_c vs B characteristic for S20Z and S0Z.

Mo 添加 Nb₃Sn 超伝導線材の Sn 拡散挙動 Sn diffusion behavior of Mo-added Nb₃Sn superconducting wire

<u>肥村 康治</u>, 永澤 諒紀, 小黒 英俊 (東海大) <u>HIMURA Koji</u>, NAGASAWA Masaki, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.) E-mail: 9bajm038@mail.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 超伝導線材は、実用超伝導線材として 10 T 以上 の超伝導マグネットに利用されている。この Nb₃Sn は、わずか なひずみでも超伝導特性が劣化してしまう性質を持っている [1]。ところで、Nb₃Sn への第 3 元素添加によって、その超伝 導特性が大きく変わる事が知られている[2]。このことは、第 3 元素添加によって Nb₃Sn 線材の超伝導特性に与えるひずみ 効果を変える事ができる可能性を示唆している。

本研究では、Nb₃Sn 線材への第3元素添加によるひずみ 効果の緩和と、第3元素の添加効果のメカニズム解明を目 的とし、Nb₃Sn 線材の作製と超伝導特性の評価、および、 Nb₃Sn 線材断面の組織観察を行った。本報告では、Moを添 加した Nb₃Sn 線材を作製し、作製条件の異なる試料を比較 した結果を報告する。

2. 実験方法

Nb₃Sn 線材は、Powder in tube 法を用いて作製した。一 方に蓋をした外径 8 mm、内径 5 mmの銅管に、外径 5 mm、 内径 4 mmの Nb 管を挿入した。Sn と Cu と Moの混合粉末 を Nb 管に詰めた。Sn の量を Cu の mol 数に対し、Sn : Cu = 0.91 : 99.09 とした。これは、Cu-Sn の化合物を作らないよう、 Cu に対する Sn 固溶限度を超えないように作製する狙いがあ る。本研究では添加する第 3 元素を Mo とし、Mo は Sn の mol 数に対して 0.5mol%、1.0mol%、5.0mol%として加えた。作 製した線材は 800℃ x 100 hの熱処理を行なった。

添加元素の状態を調べるため、作製した線材に対して電 子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて、線材断面の組成 分析を行った。線材の断面は、Fig. 1のように単芯線材として いる。

3. 結果と考察

Fig. 2 に、熱処理をした無添加の Nb₃Sn 線材と、Mo を 0.5mol%、1.0mol%、5.0mol%添加した Nb₃Sn 線材の、後方散 乱電子像を示した。この画像から、Nb₃Sn の生成量を評価す ると、無添加は Nb₃Sn の肉厚の平均が約 36 µm、Mo0.5mol% 添加は Nb₃Sn の肉厚の平均が約 30 µm、Mo1.0mol%添加は Nb₃Sn の肉厚の平均が約 10 µm、Mo5.0mol%添加は Nb₃Sn の肉厚の平均が約 28 µm 程度観察できた。この結果から、 Mo を添加すると、Nb₃Sn の生成量が減少するが、濃度によっ て生成に対する効果が変化することが分かった。

Fig. 3 に、Fig. 2 で示した Mo を 0.5mol%、1.0mol%、5.0mol%添加した Nb₃Sn 線材中の Mo 分布を示した。0.5mol% は添加量が少なく、ノイズもみられるため正確な分布はわからなかったが、1.0mol%と 5.0mol%が局所的に析出しているように見える。Cu-Mo の状態図より、Cu と Mo は 800°C 以下では反応せず、Mo と Sn も反応が見られないことから、Mo 単体が局所的に析出し、Nb₃Sn に取り込まれていない可能性があることがわかった。

謝辞

本研究は、高度物性評価施設の支援を受け、実施したものである。また、核融合科学研究所一般共同研究 (NIFS19KECF027)の支援を受けた。

参考文献

1. E. W. Ekin, Cryogenics, Vol. 20 (1980) 611-624

2. M. Suenaga et al., J. Appl. Phys., Vol. 59 (1986) 840-853



Fig. 1 Cross sectional view of Nb_3Sn wires.



Fig. 2 Back-scattered electron image of the cross section of binary, 0.5mol%Mo doped, 1.0mol%Mo doped and 5.0mol%Mo doped Nb₃Sn wires.



Fig. 3 Mo distribution of Nb_3Sn wires with 0.5mol%Mo, 1.0mol%Mo and 5.0mol%Mo addition.

Nb-Ta-Hf/Cu-Sn 拡散反応における Nb₃Sn 結晶粒微細化メカニズムに 関する基礎的研究 Fundamental study on the mechanism of Nb3Sn grain refinement

in Nb-Ta-Hf/Cu-Sn diffusion reaction

<u>伴野信哉</u>(物材機構); 森田太郎(上智大,物材機構); 谷貝剛(上智大) <u>BANNO Nobuya</u> (NIMS); MORITA Taro (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.) E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. 緒言

Nb₃Snの主要な磁東ピンニングセンターは結晶粒界であ り、Nb₃Sn 結晶粒の微細化に関する研究が現在活発化して いる。中でも Nb-Ta-Hf 母材芯を用いた方法は、Nb 芯の微 量内部酸化なしに Nb₃Sn 結晶粒径を微細化でき、既存の伸 線工程への適用性の点から注目を集めている。しかしな がら結晶粒微細化のメカニズムは明らかにされていない。

本研究では、あらかじめ Nb-Ta-Hf 母材芯を組織制御さ せてから Nb₃Sn 層を生成する手法により、Nb₃Sn 層の結晶 組織に与える Nb-Ta-Hf 母材芯の結晶組織の影響を、SEM、 EBSD 等を用いて調べた。これにより、結晶粒微細化メカ ニズムに関わる興味深い結果を得たので報告したい。

2. 実験方法

アーク溶解により作製した Nb-4at%Ta-1at%Hf 合金をス エージングおよび平ロールで、幅 3.35mm、厚さ 0.2mm の テープに加工した。このテープ材に 800℃から 1200℃の 焼鈍を施し、各試料の EBSD マップを測定した。合わせて ビッカース硬さの温度依存性も測定し、Nb-Ta-Hf の回復、 再結晶、粒成長温度を明らかにした。

次に、一つのサンプルに、1200 C×3h の焼鈍を施した 後、未熱処理のテープ材と1200 C焼鈍のテープ材にCuお よびSn 電気メッキを施した。CuおよびSn メッキ層の厚 さはそれぞれ約 $10\mu m$ 、 $20\mu m$ であり、Cu、Sn 原子量比はそ れぞれ約50at%、50at%である。その後、550 C×50h+685 C ×100hの熱処理を施し、Nb-Ta-Hf 界面にNb₃Sn 層を生成 させ、破断面をSEM により観察した。試料作製手順をFig. 1 に示す。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に、EBSD 解析により測定された Nb-4at%Ta-1at%Hf 組織の焼鈍温度依存性を示す。ビッカース硬さは約 800℃ 付近から減少を始めており、1000℃で最小となった後、そ のまま低い値を示す。EBSD の結果と合わせると、Nb-Ta-Hf の回復は約 750℃付近から開始され、850℃付近から再 結晶を始め、1000℃付近から粒成長を起こすことが示唆 される。

Fig. 3 は、加工まま材の Nb-Ta-Hf および 1200℃で粒成長 させた Nb-Ta-Hf テープ基板上に、Nb₃Sn 層を生成させたとき のそれぞれの Nb₃Sn 結晶組織を比較したものである。1200℃ で粒成長させた Nb-Ta-Hf テープ基板上に Nb₃Sn 層を生成 させた場合に、Nb₃Sn 結晶組織が粗大化し、Hf 添加の効果が 消失することがわかった。 本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04249 の助成を受けたものです。



Fig.1. Diagram for sample preparation procedure to examine the influence of Nb-Ta-Hf microstructure on Nb₃Sn grain morphology.



Fig.2. EBSD orientation maps and pole figures of Nb-4Ta-1Hf with respect to annealing temperature.



Fig.3. Nb₃Sn grain morphology (a) formed on as-rolled Nb-Ta-Hf tape and (b) formed on Nb-Ta-Hf tape heat-treated at 1200°C x 3h (grain growth temperature). The Nb₃Sn microstructure strongly depends on the Nb-Ta-Hf tape microstructure.

強磁場応用を目指した CuNb 補強 Nb₃Sn 導体の高強度化 Strengthening CuNb reinforced Nb₃Sn conductors for high field application

<u>淡路 智</u>、鈴木 匠(東北大金研);小黒英俊(東海大);杉本昌弘、浅見大亮、福島弘之、坪内宏和(古河電工) <u>AWAJI Satoshi</u>, SUZUKI Takumi (Tohoku Univ.); OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); SUGIMOTO Masahiro, ASAMI Daisuke, FUKUSHIMA Hiroyuki, TSUBOUCHI Hirokazu (Furukawa co ltd.) E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

強磁場超伝導マグネット開発において、用いる超伝導 線材の磁場中臨界電流とともに、巨大な電磁力に耐えう る機械特性の向上が重要である。特に大口径超伝導マグ ネットに用いられる Nb₃Sn 線材は、機械的に脆く補強が 重要となる。我々は強磁場無冷媒超伝導マグネット開発 の一環として、250 MPa の高電磁力下で用いることのでき る高強度 Nb₃Sn 素線及び導体の開発に成功した[1]。これ を用いた 25T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)では、事 前曲げ(pre-bend)を用いて臨界電流と機械特性を向上させ た CuNb 補強 Nb₃Sn コイルを、250MPa の大電磁力下で3 年以上の安定運転を継続して行い、その有効性を実証し ている[2, 3]。現在は、2020 年度文部科学省ロードマップ に採択された強磁場コラボラトリー計画において、33T 無 冷媒超伝導マグネット開発を計画している[4]。これには、 これまで以上の Nb₃Sn 導体の高強度化が必要であり、 300MPa で利用可能な高強度 Nb₃Sn 素線及びラザフォー ド導体の開発を行って来た。本報告では、さらなる高強度 化を行った CuNb 補強 Nb₃Sn 線材について、臨界電流特 性及びその引っ張り応力特性について報告する。

2. 高強度 CuNb/Nb₃Sn 線材の高強度化

33T 無冷媒超伝導マグネットでは、大口径のため臨界電 流よりも応力によりコイル性能が制限されるため、高強 度化に重点を置いた線材設計とした。表1に今回作製し たCuNb/Nb₃Sn と 25T-CSM 用線材の比較を示す。今回は、 高強度化のため CuNb の Nb 量を増やすとともに、CuNb の体積分率も増加させた。これにより高度の向上を行っ た。一方で、ブロンズの Sn 濃度を向上させるととともに、 熱処理の条件を変更して non-Cu J_cの向上を行った。これ らにより線材の L_cの低下を抑えて高強度化を行うことを 狙った。また、25T-CSM と同様、熱処理後に繰り返し曲 げ(事前曲げ(Pre-bend))を行い、臨界電流と機械特性の 向上を行った。

3. 実験結果

図1に作製した線材の臨界電流の応力特性を示す。*I*。は 事前曲げを加えることで大きく向上し、ピークとなる応 力は低応力側へのシフトが見られる。これは、事前曲げに

|--|

Wire-ID	This work	25T-CSM	
Wire size	φ0.8 mm		
Cu / Cu-Nb / non-Cu	20 / 45 / 35	20 / 35 / 45	
Nb vol% in Cu-Nb	30%	20%	
Tin diffusion barrier	Ta/Nb	Ta	
Bronze	Cu-15.7wt%Sn- 0.3wt%Ti	Cu-14.0wt%Sn- 0.2wt%Ti	
Filament diameter	3.2 µm	3.3 µm	
Heat treatment	575°C×100 h + 670°C×50 h	670°C x 96 h	

よる長手方向の残留ひずみ緩和の影響である[5]。また、 3次元ひずみの緩和によりピークの *I*。自身も向上してい る[6]。25T-CSM 用素線と比較すると、応力特性が大きく 改善している。一方で、超伝導部分の体積(non-Cu)が約 20%減少したにも関わらず *I*。の低下が小さい。これは、 高 Sn ブロンズと熱処理の改善によるものである。これら のことから、新しく開発した高強度 Nb₃Sn 線材が 300 MPa の高電磁力下で利用できることが分かる。

4. まとめ

現在 250 MPa の電磁力下で利用している高強度 CuNb/Nb₃Sn のさらなる高強度化を行った。CuNb の高強 度化と増量、ブロンズの Sn 濃度の向上と熱処理に見直し により、*I*。の低下なく高強度が可能となり、目標である 300 MPa 対応の高強度 Nb₃Sn 線材の開発に成功した。今 後は、ラザフォード導体化及びコイル試験を実施する予 定である。

- M. Sugimoto *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., 25 (2015) 6000605.
- H. Oguro *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 084004.
- S. Awaji *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 065001.
- 4. https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/t oushin/1388523_00001.htm
- S. Awaji *et al.*: Supercond. Sci. Technol. vol. 16 (2003) 733.
- 6. H. Oguro et al.: J. Appl. Phys., 101 (2007) 103913.



Fig.1 Stress dependence of I_c (a) and normalized I_c (b) for CuNb/Nb₃Sn

伝導冷却超電導応用機器に向けた柔軟性極細 Nb₃AI 超電導線材の臨界特性測定

Measurement of the critical properties of very small diameter and flexible Nb₃Al wires for the conduction-cooled superconducting applications

<u>木村</u> 諒, 福田 響,井上 良太,植田 浩史,金 錫範(岡山大);菊池 章弘,飯嶋 安男(NIMS) <u>KIMURA Ryo</u>, HUKUDA Hibiki, INOUE Ryota, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama University); KIKUCHI Akihiro IJIMA Yasuo (NIMS) E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn や Nb₃Al などの A15 型化合物超電導線材の臨界 温度は,約18.3 K と NbTi より高く,冷凍機による伝導冷却で の運転が有望である.しかしながら、Nb₃Sn より耐ひずみ特性 に優れた Nb₃Al は,線材加工方法が難しく,未だ実用化に至 っていないのが現状である.そこで,国立研究開発法人物 質・材料研究機構の研究グループは,Nb₃Al線の極細化を図 ることでリアクト&ワインド法が使用可能な Nb₃Al線材の研究 開発を行っている.そこで,我々は,開発中の極細 Nb₃Al線 材を用いて液体へリウムを使用しない冷凍機伝導冷却方式に よる超電導コイルの開発を目指した研究を行っている.本研 究では,開発中の極細 Nb₃Al線材の臨界温度や臨界電流な どの臨界特性について GM 冷凍機を用いた伝導冷却装置と SQUID を用いた磁化法などで検討したので,その結果につ いて報告する.

2. 試料線材と実験方法

本研究では、素線の直径が 67 µm と 81 µm の Nb3Al 単線 線材と、それぞれ単線線材を7本撚線にした試料を用いた. 試料線材を取付けたサンプルホルダの写真を Fig.1 に示す. 冷却装置には 4 K 級の GM 冷凍機が装着されており、超電 導マグネットの中にサンプルホルダを挿入させるため、L 字型 で作製されている. 試料線材は、伝導冷却装置の先端部にあ るサンプルホルダに取付けており、絶縁体で極低温でも熱伝 導性が優れた窒化アルミニウムブロックを挟んで電流リード用 の銅ブロックに電気的に接続されている. また、臨界電流測 定時に試料線材がジュール発熱で断線することを防ぐために、 試料線材は直径 1 mm の銅線にはんだ付けしており、温度計 は試料線材に直接取付けた.

3. 実験結果·考察

線径 67 µmと81 µmの Nb₃Al 単線を7本撚線にした Nb₃Al 線材について磁化法(SQUID)により測定した臨界温度の測 定結果を Fig.2 に示す.超電導転移温度はそれぞれ 15.3 K と 15.5 K であり,線径の違いによる臨界温度の差はほとんど 見られない.また,伝導冷却装置を用いて測定した単線線径 が 81 µmの7本撚線 Nb₃Al線材の臨界温度測定結果を Fig.3 に示す.Fig.3 は,伝導冷却装置による冷却過程と昇温過程 で試料線材の臨界温度を測定したものであり、臨界温度は両 方とも 15.4 K であった.Fig.2 と Fig.3 の結果より,磁化法と伝 導冷却装置での臨界温度がほぼ同じであったため,本研究 で用いた伝導冷却装置を用いて開発する Nb₃Al線材の臨界 特性が正確に評価できると判断している。そして,試料線材の 臨界電流測定結果等については当日報告する.



Nb₃Al and Cu wire Cernox thermometer





Fig.2 The measured Tc curves of 7 stranded Nb₃Al wires by SQUID, and the diameter of each single wire is 67 μ m and 81 μ m.





超極細 Nb₃Al 単芯線及び撚線

The ultra-fine Nb₃Al monofilament strands and round cables

<u>菊池 章弘</u>, 飯嶋 安男, 平田 和人, 二森 茂樹, 西島 元, 北口 仁, 瀧川 博幸, 土谷 悦子 (NIMS); 山本 優, 河野 雅俊,木村 基良 (明興双葉); 今仁 順也, 永松 純, 大坪 正人 (由紀精密); 一瀬 中 (電中研); 大内 徳人, 有本 靖, 王 旭東, 宗 占國, 土屋 清澄, 青木 和之, 川井 正徳 (KEK); 金 錫範, 植田 浩史, 井上 良太 (岡山大); 木原 工 (東北大); 中村 武恒 (京大)

<u>KIKUCHI Akihiro</u>, IIJIMA Yasuo, HIRATA Kazuto, NIMORI Shigeki, NISHIJIMA Gen, KITAGUCHI Hitoshi, TAKIGAWA Hiroyuki, TSUCHIYA Etsuko (NIMS) ; YAMAMOTO Masaru, KAWANO Masatoshi, KIMURA Motoyoshi (Meiko Futaba, Co., Ltd.) ; IMANI Junya, NAGAMATSU Jun, OTSUBO Masato (Yuki Precision, Co., Ltd.) ; ICHINOSE Ataru (CRIEPI) ; OUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, Wang Xudong, ZONG Zanguo, TSUCHIYA Kiyosumni, AOKI Kazunori, KAWAI Masanori (KEK) ; KIM SeokBeom, UEDA Hiroshi, INOUE Ryota (Okayama University) ; KIHARA Takumi (Tohoku University) ; NAKAMURA Taketsune (Kyoto University) E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

実用 Nb-Ti 合金線は、上部臨界磁場の制約から 4.2 K で は 10T 程度の磁場までしか発生させることができない。このた め、臨界磁場の高い Nb₃Sn や Nb₃Al といった A15 型化合物 超伝導線を用いる必要があるが、Nb-Ti 合金とは大きく異なる 固く脆い機械的性質のために、まずは複数の純金属あるいは 合金を複合加工した前駆体線材を作成し、その後の反応熱 処理(650-850℃程度)で超伝導相を生成させる。Fig. 1 は米 国 NIST の Ekin により報告された有名な図であるが、これによ ると、熱処理後の超伝導線の超伝導特性が歪に対して極め て敏感であり、Nb₃Sn では 0.15 %程度から、Nb₃Al では 0.4%程 度から超伝導特性の劣化がはじまる。このため、熱処理後の 線材が許容できる変形は小さく、一般的に用いられる外径 1.0mm 径程度の超伝導線では、熱処理後にコイル状に巻く 加工は極めて困難である。それ故に、線材に、まずはガラス やアルミナ等の高温に耐える素材の絶縁を施して、コイルに 巻いた状態で熱処理を行っている(Wind & React 法)が、精 密磁場実現のための寸法精度の管理が容易でないとともに、 熱処理による絶縁破壊の発生といった問題が避けられない。 もし、熱処理を行ってからコイルに巻くこと(React & Wind 法) ができれば、巻線精度を確保しやすく、絶縁材料も NbTi 線の 場合と同様に幅広い材料から選択できる。また、コイル製作の 歩留まりも向上し、製造コストの大幅な抑制も期待できる。固く 脆い金属間化合物の高磁場用超伝導線材に NbTi 線と同様 なハンドリングを保たせようとすることが我々の取り組みである。



Fig. 1 Strain effects on A15 typed superconductors.



Fig. 2 Comparison of Nb/Al wire and a human hair.

2. 超極細 Nb₃AI 単芯線のデモンストレーション

NIMS では Nb₃Al 線のためのジェリーロール法ビレットをイン ハウス製造している。外径 0.6mm まで伸線加工(無焼鈍)し、 その後に明興双葉で外径 0.05mm まで伸線加工する。さらに その一部は外径 0.03mm までの加工に成功した。人の頭髪 (外径 80-100 ミクロン)と比較した写真が Fig. 2 であり、断面 写真が Fig. 3(左は横断面、右は縦断面)である。右図をみる と、線材の長手方向にニオブ箔とアルミ箔が竹の繊維状に細 かく複合されていることがわかる。この0.03mmの線材を850℃ で 10h 熱処理するとニオブ箔とアルミ箔が反応して Nb₃Al が 生成され、約15.5Kの臨界温度を示す。現在のところ、この線 が、安定化銅がきちんと付与されて実用的な断面と一定の長 さをもつ、世界で最細の Nb₃Al 超伝導線であろう。Fig. 4 は、 曲げひずみと曲げ半径の関係を線材外径ごとに比較したもの である。Ekin の結果に従えば、今回の外径 0.05mm の Nb₃Al 線材は、半径 6.0mm の小さな円弧に曲げても特性劣化はな いと期待できる。一方、Nb₃Sn線材を同様に曲げるには、線材 外径を0.02mm 以下にしなければならない。 今後、Nb3Al だけ でなく、Nb₃Sn や MgB₂等の他の化合物系線材についても超 極細化に取り組む。

3. 様々な応用開拓の期待

我々が提案する化合物超伝導線の超極細化は、これまで の高磁場磁石応用に新風を吹き込む他、極小径コイルや複 雑な磁場空間をアレンジできるコイル、熱侵入が極少の高磁 場リード線など新規応用の開拓にもつながることが期待される。



Fig. 3 Cross-sections of 30 microns Nb/Al wire.



Fig. 4 Relationship between bending strain and radius.
MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(IV-1) ~ 1/2 サイズアクティブシールド型3Tマグネットの開発 ~

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (IV-1)

-Development status of a half-size 3T REBCO magnet -

<u>服部 泰佑</u>, 三浦 英明, 殿岡 俊, 松田 哲也, 江口 諒, 森田 友輔, 大竹 俊輔, 井上 達也, 田邉 肇, 佐藤 伸治 (三菱電機)

 $\underline{HATTORI\,Taisuke}, MIURA\,Hideaki, TONOOKA\,Shun, MATSUDA\,Tetsuya, EGUCHI\,Ryo, MORITA\,Yusuke, OTAKE\,Shunsuke, MIURA\,Hideaki, TONOOKA\,Shun, MATSUDA\,Tetsuya, EGUCHI, Maximum Matsuke, MIURA\,Hideaki, TONOOKA, Shun, MATSUDA, Tetsuya, EGUCHI, Maximum Matsuke, MIURA\,Hideaki, TONOOKA, Shun, MATSUDA, Tetsuya, EGUCHI, Maximum Matsuke, MIURA, MIU$

INOUE Tatsuya, TANABE Hajime, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Hattori.Taisuke@ab.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体ヘリウムレスの医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を平成28 年度より NEDO プロジェクトとして実施してきた [1-3]。近年の He 価格の高騰を受けた、液体ヘリウムレスの MRI 需要の高まりを背景に、高温超電導線材を用いることで、小型・軽量化を可能にしつつ、高磁場での MRI 実現を目指した開発を行っている。2020 年度は、これまでも報告してきた 1/2 サイズア クティブシールド型 3T マグネットの開発を進めると同時に、小型・軽量の全身撮影用3T高温超電導マグネットの開発に必要となる最大経験磁場 7T を実証するための高磁場高電流密度コイルの試作を進めている。本発表では 1/2 サイズアクティブシールド型3T マグネットの開発進展について報告する。

2. 1/2サイズアクティブシールド型マグネットについて

これまでに 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットの設計、 製作を実施し、開発状況を報告してきた [4-7]。製作したマグネッ トの設計諸元を Table. 1 に示す。主に磁場を発生するメインコイル は、センター・ミドル・サイドの3対から形成されており、その外側に 漏れ磁場低減のためのアクティブシールドコイル1対が配備される。 これらのコイル群は、シングルパンケーキコイル総数 220 からなっ ている。コイル寸法は、内直径 560mm、外直径 1200mm、軸長 980mm の設計であり、定格中心磁場が 2.9 T、最大経験磁場が 4.2 Tとなる。使用した超電導線材は、4mm 幅の銅メッキ REBCO 線で、 総線材長は約70kmに達する。なお、磁場均一度を出すためパン ケーキコイルの巻線精度は径方向 0.1mm 以下、コイル組立精度 0.5mm 以下で製作を行った。

Table.1 Specifications of the half-scale 3T r	magnet
---	--------

Item	Specification
Innner diameter	560 mm
Outer diameter	1200 mm
Axial Length	980 mm
total length of REBCO	70 km
Total number of coils	220 single pancake
Inductance	145 H
Rated Current Density	120 A/mm2
Stored Energy	1.58 MJ
Central Magnetic Field	2.9 T
Maximum Magnetic Field	4.2 T
Magnetic Field Homogeneity	1.7 ppm (250 mmDSV)

3. 現在の開発状況について

これまでの発表でマグネットを製作し、初期冷却を試みたことを 報告してきた [6,7]。本マグネットの冷却に関しては、冷却経路の 最適化を行う熱スイッチを用いている。これにより、初期冷却にか かる時間が約19日となるまで短縮できることを確認した。しかし、冷 却後の初期励磁において、一部コイルで抵抗が発現したため、抵 抗の要因特定・改善のために各コイル群に分解した。分解後、液 体窒素を用いた各コイル群の健全性試験を行い、抵抗が出現した コイル間接続部の改修を実施した。改修後に再度マグネット組立を 実施し、再度の冷却・励磁試験を行った。

4. 超電導特性の劣化について

高温超電導線を用いた 1/2 サイズ 3T アクティブマグネットの製作において、超電導特性の劣化が大きな課題となっている。第一 に、各コイル製作における健全コイルの歩留まりが 82 % 程度にと どまっていることがあげられる [8]。これまでに、出現する抵抗の大 きさから、劣化長の見積もりや、磁気像の取得などから検討を進め てきた。今回、小型の 7T 検証コイルの製作も行い、その健全性試 験において歩留まりの確認を行ったため、その比較検討を進めて いる。また、劣化について第二の課題として、各コイルを接続し、マ グネットを製作する段階における、接続部があげられる [7]。接続 箇所に働くせん断応力を低減すべく、各コイル間の接続方法を検 討してきた。

5. まとめ

発表当日は、1/2 サイズアクティブシールド型マグネット開発状況を報告するとともに、現状見られているマグネットの劣化状況について整理し、超電導特性の劣化要因について、現在進めている検討を報告する。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発 機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超 電導高安定磁場マグネットシステム開発」により助成を受け実施し たものである。

- 1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.76.
- 2. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.1.
- 3. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.131.
- 4. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.90.
- 5. H. Miura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.132. 6. S. Yokoyama, et al.: IEEE trans. Appl. Supercond., vol. 30 (2020)
- 4400904.
- 7. H. Miura, et al.: Abstracts of 10th ACASC Conference, 7A1-3 (2020) p. 66.
- 8. H. Miura, et al.: J. Phys: Conf. Ser. 1559 (2020) 012125.

MRI用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(IV-2) ~高磁場高電流密度コイルの開発~

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (IV-2) -Development status of a high-field and high-current-density REBCO coil-

> <u>三浦 英明</u>, 服部 泰佑, 殿岡 俊, 松田 哲也, 江口 諒, 森田 友輔, 大竹 俊輔, 井上 達也, 田邉 肇, 佐藤 伸治(三菱電機)

MIURA Hideaki, HATTORI Taisuke, TONOOKA Shun, MATSUDA Tetsuya, EGUCHI Ryo, MORITA Yusuke, OTAKE Shunsuke, INOUE Tatsuya, TANABE Hajime, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Miura.Hideaki@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

我々は NEDO プロジェクトにて、高温超電導体(HTS:High Temperature Superconductor)を応用し、液体ヘリウムレスか つ小型・軽量の全身撮影用 MRI 超電導マグネットを実用化す るための研究開発を実施している[1]。開発ターゲットは、現行 1.5T-低温超電導(LTS:Low Temperature Superconductor)マ グネットと同等の重量で、中心磁場 3Tを生成できる HTS マグ ネットである。この HTS マグネットを実現するためには、現行 1.5T-LTS マグネットと比較して、コイル部の電流密度の向上と、 高磁場中の通電性能の向上が必要である。要求されるコイル 電流密度は200A/mm²以上、線材の最大経験磁場は約7Tで あることから、これらの条件における HTS コイルの振る舞いを 検証するため、高磁場高電流密度コイルを開発している。本 報では、高磁場高電流密度コイルの設計方針および検討状 況について報告する。

2. 高磁場高電流密度コイルの設計

NEDO プロジェクトにて製作した 1/2 サイズアクティブシー ルド型 3T マグネットは、人工ピン未導入かつ基板厚 75µm の REBCO 線材を用いて製作し、定格運転時のコイル電流密度 は 120A/mm²、最大経験磁場は 4.2T であった[1]。今回の高 磁場高電流密度コイルには、従来のマグネットよりも高い電流 密度を実現するために基板厚が 50µm に薄肉化され、高磁場 中での臨界電流特性を向上できる人工ピンが導入された銅メ ッキ REBCO 線材を適用した。

設計した高磁場高電流密度コイルの諸元を Table 1 に示す。 本コイルは、シングルパンケーキコイルを 24 枚積層した構造 であり、最大経験磁場を 7T としたときのコイル電流密度は 250A/mm²となる(この状態を定格運転とする)。

コイル形状や線材諸元は異なるが、軸方向圧縮応力が 100MPa以上で不可逆な超電導特性の劣化が確認されている [2]。高磁場高電流密度コイルの定格運転時の軸方向圧縮応 力を計算したところ、最大 17MPa であり、不可逆な超電導特 性の劣化は生じないと考えられる。

冷却は小型冷凍機を用いた伝導冷却を予定している。運転温度 30K における、線材の臨界電流に対する定格電流の 割合は 80%以下であり、30K で運転可能な設計である。

3. 高磁場高電流密度コイルの試作

製作したシングルパンケーキコイルの外観を Fig.1 に示す。 ハンドリングをしやすくするため、シングルパンケーキコイルご とに樹脂による真空含浸を施した。REBCO線材には、絶縁フ ィルムを2層巻き、うち1層には冷却時の熱応力対策として、 樹脂との接着性に乏しいフッ素コーティングが施された絶縁フ ィルムを用いた。

今後、製作した全シングルパンケーキコイルの超電導特性 を液体窒素中で評価することで、異常コイルのスクリーニング を行い、その後積層作業を実施する予定である。

4. まとめ

小型・軽量の全身撮影用 3T-高温超電導マグネットの実現 に向け、コイル電流密度 200A/mm² 以上、最大経験磁場 7T の高磁場高電流密度コイルを設計し、製作している。発表に て詳細を報告する。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合 開発機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」の うち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」に より助成を受け実施したものである。

Table 1 Specifications of a high-field and high-current-density coil

Wire	REBCO
WIIC	(with artificial pinning)
Current density of a coil	250 A/mm ²
Operating current	170 A
Center magnetic field	5.8 T
Maximum experience magnetic field	7.0 T
Inductance	3.6 H
Inner diameter of a coil	130 mm
Outer diameter of a coil	210 mm
The number of coils	24 single-pancake coils
Total wire length	3.0 km



Fig. 1 Appearance of a single-pancake coil for a high-field and high-current-density coil

参考文献

- S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 97 (2018) p.90
- Y. Nagasaki, et al.: Applied Superconductivity Conference, Wk1MPo1D-07, 2020

— 92 —

MRI 用高温超電導コイルの再励磁時における磁場安定化に適した励磁方法 Excitation method for highly stabilized magnetic field in re-magnetization of HTS coil for MRI

<u>西山</u>花名子, 旦尾 一樹, 長崎 陽, 津田 理(東北大学); 三浦 英明(三菱電機) <u>NISHIYAMA Kanako</u>, ASAO Kazuki, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ); MIURA Hideaki (Mitsubishi Electric Corp)

Email: kanako.nishiyama.t7@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在,液体窒素での運用が可能な高温超電導(HTS)コイ ルの MRI への適用が期待されている。しかし,HTS コイルに 通電すると,遮蔽電流の影響によりコイルの磁場が時間変動 するため,MRI の高解像度撮像には,コイルの磁場変動を抑 制する必要がある。先行研究では,この磁場変動抑制手法と して,繰り返しオーバーシュート法(OS 法)と高温励磁法 (HTM 法)の併用が有効であることを確認した[1]。しかしなが ら,先行研究ではコイルの初回励磁時のみを検討していたの に対し,実際の MRI 運用では,コイルの消磁と再励磁を行う 必要があり,再励磁時には高温励磁法を適用する際に長時 間かかるという問題がある。そこで,本研究では,HTS コイル の再励磁時における,高温励磁法の適用に必要な時間を減 少させるために,適切な励磁方法を確立することを目的に検 討した。

2. 実験

Table. 1 に、本実験に使用した積層型 2T HTS マグネットの 諸元を示す。実験に使用した HTS マグネットは、5 種類 10 個 のダブルパンケーキコイルで構成されており、NMR プローブ を用いてマグネットの中心磁場を測定した。

まず,繰り返しOS法とHTM法の併用法を用いて初回励磁 を行い,マグネット電流をゼロにした。次に,再励磁時の HTM 法において,磁場変動抑制可能な最小な温度変化量を明ら かにするために, Fig.1 に示すような方法でマグネットを励磁し た。まず、マグネットを20KからΔT(K)だけ昇温してから繰り返 し OS 法により磁場変動率 Ecenter を 5, 10, 15 ppm/h. まで抑 制し、マグネット温度を 20 K まで冷却してからマグネット中心 部の磁場変動率を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。 $\varepsilon_{center} > 5ppm/h.$ の場合に1 ppm/h.を実現するには $\Delta T \ge 5$ とする必要があるのに対して, $\varepsilon_{center} \leq 5ppm/h.$ の場合は $\Delta T = 3$ で1 ppm/h. を達成できることがわかった。また, OS 法では、 ε_{center} を小さくするにつれて磁場変動率の測定時間 が指数関数的に増加するのに対して, HTM 法では, 温度変 化量が増えるにつれて、マグネットの昇降温に要する時間が 指数関数的に増加することが確認された。併用法全体に要す る時間を考えると、今回の実験に使用した HTS マグネットでは、 初回励磁時のΔT が 5 K であるのに対して,再励磁時は,マ グネットを 20 K から 23 K に昇温してから繰り返し OS 法で磁 場変動率を5 ppm/h.以下にし、その後でマグネットを 20 K ま

で冷却した時に再励磁時間が最小となった。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総 合開発機構(NEDO)「高温超電導実用化促進技術/高温超 電導高安定磁場マグネットシステム技術開発(コイル開発)」 により委託・支援を受け実施したものである。

Table. 1 Specifications of HTS coils.

Critical current [A]	511(@20 K)
Inner diameter [mm]	130
Number of turns	62, 68, 85, 165, 165
Height [mm]	10.2



Fig. 1 Current and temperature waveforms at overshoot method

+ high temperature excitation method.



Fig. 2 Dependence of temperature change on magnetic field fluctuation rate after applying HTM method.

参考文献

[1] Yoh Nagasaki, et al.: Influence of Preexcitation, High Temperature Magnetization and Combined Excitation Method on Screening Current Attenuation in Conduction-Cooled REBCO Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 5 (2020), pp. 1-6

— 93 —

アクティブシールドを有する3Tホールボディ高温超電導 MRI マグネット の5ガウスライン最小化と磁場均一度を両立する最適化設計

Optimized design that balances 5 gauss line minimization and magnetic field uniformity

for 3 T-whole body HTS-MRI magnet with active shield

<u>木戸 勇志</u>,魏 亮亮,山田 祥子,中村 武恒 (京大);松田 哲也,三浦 英明,服部 泰佑 (三菱電機) <u>KIDO Yushi</u>, WEI Liangliang, YAMADA Shoko, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.);

MATSUDA Tetsuya, MIURA Hideaki, HATTORI Taisuke (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: kido.yushi.52n@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム の研究開発[1]の一環として、全身 3T-MRI 用高温超電導コイ ルの最適化設計に関する研究開発を実施している。これまで、 線電流近似と免疫遺伝アルゴリズムを利用して、コイルボア内 磁場均一度の高いコイル設計が可能になった。現状では、線 電流近似の磁場均一度 2.03 ppm が得られており、また 3 次 元有限要素法解析では 15.34 ppm が得られている[2]。

一方で, MRI の実用化を目指す際には, 漏洩磁場抑制の ためにシムコイルの導入を検討する必要がある。我々は, シム コイルが作る磁場によって, コイルボア内磁場分布や漏洩磁 場が受ける影響を検討した。検討に基づき, 漏洩磁場抑制を 考慮したコイル設計を行ったので報告する。

2. 解析方法

前報[2]で設計した主コイルと補正コイルの形状は固定し、 シムコイルの巻数や配置を変数として、線電流近似を用いた 最適化設計を実施した。その際に使用した免疫遺伝アルゴリ ズムにおいて、2つの目的関数を設定した。即ち、コイルボア 内磁場均一度の関数(F₁)と漏洩磁場の関数(F₂)であり、重み 係数をkとして、

$F = k \times F_1 + (1 - k) \times F_2$

を目的関数とし,重み係数が結果に与える影響を評価した。 ここで,漏洩磁場の評価基準としては5ガウスラインを採用した。

また,主コイルや補正コイルの形状も変数とすることで,コイ ルボア内磁場均一度と5ガウスライン狭小化の両者を満たす 設計に取り組んだ。

3. 解析結果と考察

Table. 1に重み係数kを変化させた場合の最適化設計結果 を示す。この際,主コイルと補正コイルは中心から500 mmに, シムコイルは中心から1000 mmに位置しており、シムコイルの 巻数を変数とした。同表から、kの変化に伴って磁場均一度と 5ガウスラインはトレードオフの関係となっていることが分かる。 即ち,kの値が1に近づくと磁場均一度が改善するが5ガウスラ インは広がり、kの値が小さくなるにつれて磁場均一度が低下 するが5ガウスラインが狭まるという結果となった。この結果に 基づき、以降の設計ではk = 0.9を採用している。

主コイルや補正コイルの形状を変数とした最適化設計結果 の一例をFig.1に示す。同図のコイルボア内磁場均一度は平 均で5.85 ppmであった。さらに、同設計結果の5ガウスラインを Fig.2に示しており、3.4 m×3.8 mであった。この結果に関して は、より高い精度の解析が可能な有限要素法で再確認する 必要があるが、磁場均一性ならびに漏洩磁場抑制を同時に 達成する試設計に成功した。

最適化設計の方法や結果,シムコイルがコイルボア内空間 磁場分布と漏洩磁場に与える影響の検討,並びに有限要素 法による解析結果など,詳細は講演当日に報告する。 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総 合開発機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」の うち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により 委託・支援を受け実施したものである。

Table.	1	Effect	of weight	factor	on	magnetic	field	uniformity
			0.12	d E Ca	lir			

and 5 GS line.						
Weight	k = 0.4	k = 0.8	k = 0.94	k = 0.98		
factor						
Global						
average	2374.2	30.039	28.948	16.390		
ppm						
5 Gs line	1.2 m	3.4 m	3.3 m	8.1 m		
$(R \times Z)$	×	×	×	×		
	4.6 m	3.9 m	3.9 m	10.2 m		







Fig. 2 Leakage magnetic field (5 Gs line) of optimized design.

参考文献

- S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol.98, 3A-a05 (2019)
- L. Wei, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 3Aa08 (2019)

— 94 —

軸方向圧縮応力低減のための MRI 用積層型高温超電導コイルの構成方法 Configuration method of stacked HTS coil for reduction of axial compressive stress for MRI

<u>板橋 幸也</u>, 佐々木 哲史, 長崎 陽, 津田 理(東北大);三浦 英明(三菱電機) <u>ITAHASHI Koya</u>, SASAKI Satoshi, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); MIURA Hideaki (Mitsubishi Electric Corp.) E-mail: itahashi.koya.p8@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, ヘリウム不足の深刻化に伴い, 冷媒にヘリウムを必要 としない高温超電導マグネットの MRI への導入が期待されて いる. MRI用高温超電導マグネットは, 均一な磁場を得るため に複数のコイルを積層した構造を持つ.また, 近年は, 画像の 高解像度化のため, マグネットの高磁場化が検討されている [1]. マグネット励磁中に, 電磁力により積層型コイルが軸方向 に圧縮され, 積層面には大きな圧縮応力が印加される.その ため, マグネットの高磁場化が進むと, 軸方向圧縮応力が大 きくなり, 高温超電導コイルの通電特性が低下してクエンチに 至る可能性がある.そこで, 本研究では, 軸方向圧縮応力が 積層型高温超電導コイルの通電特性に与える影響を明らか にし, MRI 用高温超電導コイルにかかる軸方向圧縮応力を低 減するためのコイル構成について検討を行った.

2. 軸方向圧縮応力が積層型高温超電導コイルに与える影響

軸方向圧縮応力が,積層型高温超電導コイルの通電特性 に与える影響を,油圧式ロードセルを用いて実験的に確認し た.作製した積層型高温超電導コイルの諸元をTable1に示す. 冷却方法は,液体窒素(77K)浸漬冷却とした.作製したコイル の I_cは144.5 A であった. Fig. 1 に軸方向圧縮応力印加時と 印加後の臨界電流特性を示す.ここで,縦軸は I_p/I_cもしくは I_o/I_cを表す(I_p:軸方向圧縮応力印加時の臨界電流, I_o:軸方 向圧縮応力印加後の臨界電流).これより,105 MPa を超える と通電特性の可逆性がなくなり,コイルの劣化が見られた.ま た,コイルが劣化する前では,軸方向圧縮応力によりコイルが 最大で2 割程度の可逆的な臨界電流の低下現象を示すこと が分かった.このため,MRI マグネットのように軸方向にコイル を積層する場合は,軸方向圧縮応力による臨界電流の低減 を考慮して通電条件を選定する必要がある.

3. 積層型超電導コイルの軸方向圧縮応力の伝達特性と低減 方法

Table 2 に MRI 用高温超電導モデルコイルの諸元を示す. また, Fig.2 (a)に#1~#5 コイルの断面図を示す. #6~#10 は z=0 平面に対して#1~#5 と対象に配置されている. マグネット励磁 時の軸方向圧縮応力の分布を COMSOL AB 社製の COMSOL Multiphysics を用いて解析した. Fig. 2(a)(b)に軸方 向圧縮応力低減対策を行う前と後における,中心磁場 3T 時 の応力分布をそれぞれ示す. Fig. 2(a)より, 軸方向圧縮応力 は GFRP と接触している#2 の右上端に最も強く印加され, 最 大で 100 MPa を超えることが確認された. これは、コイルと GFRP の径の不一致とGFRP の歪みが原因であると考えられ, 軸方向圧縮応力を低減するには、これらを改善する必要があ る. そこで, Fig.2(b)のようにコイルと接触する面のGFRPの径 をコイルと合わせ、さらに補強材を導入をした.これにより、最 大軸方向圧縮応力を10MPa程まで低減することができた.以 上より, 径の異なる積層型高温超電導コイルにおいて, 軸方 向圧縮応力による臨界電流の低下を抑制するには、GFRP な どのスペーサーととコイルの径を揃える,補強材を導入するこ とが有効であることがわかった.

Table 1 Specifications of HTS coil



Table 2 Specification of HTS coil and GFRP

		#1, 2,6,7	#3,4,5,8,9	GFRP
		コイル	,10 コイル	
Shape of	f coil	Double	Double	
		pancake	pancake	
Inner diame	ter [mm]	65	65	65
Outer diameter [mm]		78.64	83.70	101.30
Number of turns		62	113	
z 🔸		z 🔸		20.4 × 106(0-1
#5 コイル				20.4 × 10-[Pa]
#4 コイル				15
#3 1 1 12				- 5
GFRP				0
				-5
				-15
#2 コイル				-20
#1 コイル GERP	—			-25
0	r	0	r	-115 ~ 10-[Fa]
	(a)	(b))	

Fig.2 Distribution of compressive stress when central selfmagnetic field is 3 T(a) Original structure (b) Proposed structure to reduce compressive stress

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総 合開発機構(NEDO)「高温超電導実用化促進技術/高温超 電導高安定磁場マグネットシステム技術開発(コイル開発)」に より委託・支援を受け実施したものである.

参考文献

 S. Yokoyama et al Abstracts of CSSJ Conference, vol 94 (2017)p.76

永久電流 1.3 GHz (30.5 T) NMR マグネットの技術開発 Technical development for a persistent-mode 1.3 GHz (30.5 T) NMR magnet

柳澤 吉紀, 朴 任中, 武田 泰明, 山崎 俊夫 (理研); 末富 佑 (千葉大);

濱田 衞, 斉藤 一功 (JASTEC); 西島 元, 北口 仁 (NIMS); 植田 浩史 (岡山大);

山口 高史, 大木 康太郎, 永石 竜起 (住電); 下山 淳一 (青学大); 前田 秀明 (JST)

YANAGISAWA Yoshinori, PIAO Renzhong, TAKEDA Yasuaki, YAMAZAKI Toshio (RIKEN); SUETOMI Yu (Chiba Univ.);

HAMADA Mamoru, SAITO Kazuyoshi (JASTEC) ; NISHIJIMA Gen, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS) ;

UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); YAMAGUCHI Takashi, OHKI Kotaro, NAGAISHI Tatsuoki (SEI);

SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); MAEDA Hideaki (JST)

E-mail: yoshinori.yanagisawa@riken.jp

1. はじめに

我々は、JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「高 温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への 社会実装」において、アルツハイマー病に関わるタンパク質の 強力な解析手段となる永久電流 1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS NMR の開発実証を目指している[1]。2017-2020 年度に要素 技術開発とマグネット概念設計を終え、2024 年度のマグネット 開発完了を目指す。本報では、マグネット設計と技術開発状 況の概略を示し、次報[2]では主要な技術検証の一つである 永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi-2223 NMR マグネット開 発について報告する。

2. マグネット設計と永久電流回路

Table 1 に、現状の 1.3 GHz NMR マグネット設計の主要パ ラメータを示す。調達可能な単長の HTS 線材と、コスト最適化 を図り、プロジェクト開始時の設計案[1]と比べ、HTS 内層コイ ルの分担する磁場配分を小さくした。LTS/Bi2223/REBCO コ イルの直列運転とし、自己インダクタンスは 961 H である。 NMR マグネットに要求される0.01 ppm/hの磁場減衰率を得る には、合計回路抵抗を<2.7×10⁹Ωに抑える必要がある。

HTS 線材を含む接合としては REBCO-REBCO (RR), Bi2223-Bi2223 (BB), REBCO-NbTi (RL), Bi2223-NbTi (BL) の4種類が必要となり、これらをコイル上部の外部磁場<1 Tの 空間に配置する(Fig. 1 参照)。入手できる HTS 線材の一条 長さは数百メートルに限られるため、Table 2 に示すように RR/BB 接合はそれぞれ数十箇所と数が多く、接合1箇所あた $0<10^{-12}$ Ωの超電導接合が必要である。一方、RL/BL 接合の 数は保護回路設計に依存するものの数箇所で済むため、1 箇所あたり 10^{-10} Ωの低抵抗接合が許容される。

これまでに接合特性の検証として、iGS[®]法による RR 接 合 [3]を用いた永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR の開発に成功している[4]。約2年間の永久電流運転で の磁場ドリフト率は 3 × 10⁻⁵ ppm/h と極めて小さく、接合が 2 年間にわたり特性劣化せずに機能することを実証している。 通常の LTS-NMR では 1×10⁻² ppm/h 程度の磁場ドリフトが仕 様となるが、今回の値はこれより 2 桁以上安定である。Bi2223 厚膜を用いた BB 接合[5]についても、同種の開発・実証を進 めており、次報[2]で報告する。また、RL/BL 接合については、 実効的なラップ長を大きく取る手法[6]を開発し、それぞれ 10⁻¹⁰ Ω の低抵抗(常電導接合)を見込める状況にある。

3. HTS コイルの技術開発・検証

LTS/Bi-2223/REBCO コイルを用いた 30.5 T 超高磁場マグ ネットを実現するには、永久電流回路以外にも、REBCO 内層 コイルの電磁力対策、REBCO/Bi2223 内層コイルの遮蔽電流 磁場解析、クエンチ保護といった HTS コイル関わる技術開発 が必須で、進めている。当日はこれらについても言及する。

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ある。

Table 1 Key parameters of a 1.3 GHz (30.5 T) NMR magnet design with LTS/Bi-2223/REBCO coils.

Operating temperature (K)	4.2 (LHe)	
Operating current (A)		231
Self-inductance (H)		961
Stored energy (MJ)	25.7	
Total weight of superconductors (to	3.7	
Radial distance of 5 G line (m)	9.82	
HTS inner coils REBCO Bi-2223		Intra-Layer No-insulation (LNI)* Insulated layer-winding
Overall current density (A/mm ²)	REBCO / Bi-2223	205 / 1 37
Field contribution (T)	HTS (REBCO+Bi-2223) LTS	15.7 (8.7+7.0) 15.1
Conductor length for winding (km) REBCO / Bi-2223 / LTS		5.5 / 11.0 / 151
Number of joints	RR / BB RL / BL	16-32 / 30-45 several / several



Fig. 1 Schematic diagrams of the main coil circuit (left) and the coil cross section (right).

Table 2 Components of the main coil circuit resista	ance
---	------

Joint	Number of joints	Resistance per joint	Туре	Total resistance
RR	<32	<10 ⁻¹² O	Superconducting	<3.2 x 10 ⁻¹¹ O
BB	<45	<10 ⁻¹² O	Superconducting	<4.5 x 10 ⁻¹¹ O
RL	Several*	<10 ⁻¹⁰ O	Low resistance	<2 x 10 ⁻¹⁰ O
BL	Several*	<10 ⁻¹⁰ O	Low resistance	<6 x 10 ⁻¹⁰ O
LL	~50	<10 ⁻¹² O	Superconducting	<5 x 10 ⁻¹¹ O
Coil (c	conductor)			Total resistance
REBCO				<10 ⁻¹⁰ O
Bi-222	<10 ⁻¹⁰ O			
LTS				<10 ⁻¹¹ O

*Depending on protection circuit design

- 1. H. Maeda et al., IEEE TAS 29 (2019) 4602409.
- 2. Y. Takeda et al., Abstracts of CSSJ Conf. 2B-p07.
- 3. K. Ohki et al., SuST 30 (2017) 115017.
- 4. Y. Yanagisawa *et al.*, To be submitted.
- 5. Y. Takeda *et al.*, *APEX* **12** (2019) 023003.

永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi2223 NMR の開発 (1) ~ 概要と高強度 Bi2223 線材間の超伝導接合 ~ Development of a persistent current 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi2223 NMR (1) - outline and superconducting joints between high-strength Bi2223 tapes -

<u>武田 泰明</u> (理研); 松竹 優一, 谷貝 剛 (上智大); 末富 佑 (千葉大); 朴 任中, 柳澤 吉紀 (理研); 中井 優亨, 岩見 壮徒, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 濱田 衞, 斉藤 一功 (JASTEC) <u>TAKEDA Yasuaki</u> (RIKEN); MATSUTAKE Yuichi, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); SUETOMI Yu (Chiba Univ.); PIAO Renzhong, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); NAKAI Ukyo, IWAMI Taketo, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); HAMADA Mamoru, SAITO Kazuyoshi (JASTEC) E-mail: yasuaki.takeda@riken.jp

1. はじめに

我々は、JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「高 温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への 社会実装」において、永久電流 1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS (REBCO-Bi2223) NMR の開発実証を目指している[1]。最大 の挑戦は、永久電流運転を実現するための超伝導接合の開 発とコイル実装であり、特に単長が比較的短いHTS線材同士 の接合は数十か所が必要になる。

我々はこれまでに、REBCO 線材同士の超伝導接合[2]を 用いた永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR の開 発に成功している[1,3,4]。約2年間の永久電流運転での磁場 ドリフト率は3×10⁻⁵ ppm h⁻¹と極めて小さく、HTS線材間の超 伝導接合が NMR という磁石システムの中で有効に動作する ことを実証した。

次の重要な技術開発として、我々は、これまでに本学会で 報告してきた Bi2223 線材間の超伝導接合[5-7]を使った Bi2223 内層コイルによる、世界初となる永久電流 400 MHz LTS/Bi2223 NMR の実現を目指している。本講演では、本マ グネットの構成や技術課題などを含む概要と、コア技術となる 高強度 Bi2223 線材 (住友電工社製 DI-BSCCO Type HT-NX [8]) 間の超伝導接合技術について報告する。

2. 永久電流 400 MHz LTS/Bi2223 NMR 磁石開発の概要

1.3 GHz NMR では LTS-HTS コイルの直列運転を想定して いるが、今回の 400 MHz NMR では Bi2223 線材間の超伝導 接合の実装と評価に特化するため、Bi2223 内層コイルと LTS 外層コイルを個別に永久電流運転する。Table 1 に 400 MHz NMR コイルの諸元を示す。Bi2223 内層コイルは 1 本の線材 でレイヤー巻線し、その端末線と Bi2223 PCS とを接合するた め、接合箇所は 2 か所である。要素技術開発として、Type HT-NX線材間の接合技術の開発、接合部および PCSを含む Bi2223 内層コイルの端末線構造を模した「Bi2223 内層モデ ルコイル」の作製と評価、Bi2223 内層コイルにおける端末線 の接合および単体永久電流試験を進めている。

3. Type HT-NX 線材間の超伝導接合技術の開発

補強材料を除去した~10 cm 長の短尺 Type HT-NX 線材 [7]に対して、補強なしの Type H線材と同様の接合処理[5]を 行うことで、短尺接合試料を作製した。Fig. 1 に Type H線材 間[6]および Type HT-NX 線材間の短尺接合試料の 77 K で の通電特性を示す。Type HT-NX 線材間でも超伝導接合が 可能であり、補強材料の除去過程を含めた接合条件の最適 化により、現在までにゼロ抵抗 I₆~40 A を実現している。一方、 この値は同条件下で作製した Type H線材間の接合 I₆に比べ て低く、接合プロセスのさらなる改善が必要である。当日は、 接合 L 抑制因子の考察や高 L 化に向けた試みも報告する。 Bi2223 内層モデルコイルでは、短尺線材の接合プロセスを 端末線に対して適用し、超伝導接合を確認している。77 K で の永久電流試験も実施しており、当日はその詳細に加え、 400 MHz NMR 用 Bi2223 内層コイル開発の進捗も報告する。

Table 1 Parameters of the Bi2223 inner coil and LTS outer coils for a 400 MHz LTS/Bi2223 NMR magnet.

	Bi2223	LTS
	inner coil	outer coils
	DI-BSCCO	
Conductor	Type HT-NX	Nb-Ti, Nb ₃ Sn
	(SEI)	
Conductor	1 5/0 3	
width/thickness [mm]	4.5/0.5	-
Conductor Ic (77 K)	- 200	
before joint [A]	~ 200	-
ID/OD/Height [mm]	99.7/105.3/345	132.8/33.8/547.2
Total turns	608	32770
Number of layers	8	134
Self-inductance [H]	0.0104	70.0
Operating current [A]	50	134.7
Field [T/MHz]	0.11/5	9.28/395



Fig. 1 V - I curves for short Bi2223 joint samples at 77 K.

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。

- 1. H. Maeda et al., IEEE TAS 29 (2019) 4602409.
- 2. K. Ohki et al., SuST **30** (2017) 115017.
- 3. Y. Yanagisawa et al., to be submitted.
- 4. Y. Yanagisawa et al., Abstracts of CSSJ Conf. 97 (2018) 11.
- 5. Y. Takeda et al., APEX 12 (2019) 023003.
- 6. Y. Takeda et al., Abstracts of CSSJ Conf. 98 (2019) 137.
- 7. Y. Takeda et al., Abstracts of CSSJ Conf. 99 (2020) 103.
- 8. T. Nakashima et al., IEEE TAS 25 (2015) 6400705.

1.3GHzNMRの超伝導プローブ利用の可能性 Possibility of superconducting probe application for 1.3GHz NMR

<u>大嶋 重利</u>(山形大) <u>OHSHIMA Shigetoshi</u> (Yamagata Univ.) E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

NMR の感度向上は、測定時間の短縮、測定試料の軽量化 等において重要な課題である。そのため、NMR の検出プロー ブの高感度化、高磁場化が研究されている。我々は 800MHz NMR の超伝導プローブを開発し、超伝導プローブが NMR の 高感度化に有効であることを実証した¹⁾。また高磁場 NMR に よる高感度化を目指し、1.3GHzNMR 開発プロジェクトが現在 進行している。そのプロジェクトでは残念ながら超伝導プロー ブの開発は検討されていない。しかし 1.3GHz NMR におい ても超伝導プローブの使用が可能ならば、さらなる高感度化 が期待できる。従って、我々は 1.3GHzNMR の超伝導プロー ブの可能性を検討した。

2. 超伝導プローブの概要

図1に、我々が開発した800MHzNMR の超伝導プローブ の概観を示す。平面型の超伝導1ターンコイルを1組配置した 構造である1.3GHz NMRでは30.5Tの磁場(B₀)が印加される。 そのような大きな磁場が印加されたときの YBCO 膜の表面抵 抗(Rs)がどのくらいになるかを検討することが、1.3GHzNMRの 超伝導プローブの可能性を評価するうえで重要である。



 DC magnetic field, B_0

Fig.1 Schematic picture of superconducting NMR pickup coil

3. 高磁場中の YBCO 薄膜の表面抵抗

我々は、12T までの磁場中でYBCO膜の表面抵抗(Rs)を測 定し1GHzの周波数帯で銅のRsよりも3,000分の1以下であ ることを実証している。30T以上の磁場下でのRsは、残念な がら実測していないが、下記の式を用いて30T以上の磁場下 でのRsを推定することができる。式で示されるように、RsはJc に反比例するので²⁾、Jc値から30T以上の磁場下でのRsを 推定した。ここで、μ0, ω, σ, κ Jedepair, Φ0, λ, ξ, はそれぞれ

$$\begin{split} R_{s}(0) &= \frac{\mu_{0}\omega_{0}^{2}\sigma\lambda^{3}}{2} = \frac{\mu_{0}\omega_{0}^{2}\sigma}{2}\frac{\kappa\Phi_{0}}{2\sqrt{2}\pi J_{depair}(0)} \\ &= \frac{\sqrt{2}\pi}{2}\mu_{0}(\frac{\omega_{0}}{2\pi})^{2}\sigma\kappa\Phi_{0}\frac{1}{J_{depair}(0)} \simeq C\frac{1}{J_{c}}, \end{split}$$
(1)

真空の透磁率、角周波数、超伝導体の常伝導導電率、GLパ ラメータ、ペアーブレイク臨界電流、磁束量子、磁場侵入長、 コヒーレンス長、である。(1)式が成立するかどうかを検証する ために、Rs と Jc の関係を求めた。図2に、0~5Tの磁場で測 定した Rs と Jc の関係を示す³⁾。ここでは DBCO 膜の結果で あるが、YBCO 膜も同様な傾向を示し、Rs と Jc は反比例する





YBCO 薄膜の磁場中の Jc より YBCO 薄膜の高磁場中で のRsを推定した。その結果を図3に示す。ここでRs(90), Rs(0) はそれぞれ膜面に垂直、平行に磁場が印加された時の Rs で ある。その結果、1.3GHzNMR の動作下において YBCO 薄膜 のRs は 3 μ Ω以下となり、銅の Rs の約 1000 分の1である。す なわち、YBCO 膜で 1.3GHz 用超伝導プローブを作製した場 合、高感度のプローブが実現できる。



Fig.3 Magnetic field dependence of surface resistance of YBCO and Cu films at 1.3 GHz, 20K

4. まとめ

YBCO 薄膜の高磁場中での表面抵抗を推定した結果, 1.3 GHzNMR においても超伝導プローブは十分機能し、かつ銅 プローブよりも高感度が期待できることが分かった。したがっ て、NMR の感度をより向上させるためには、1.3GHz NMR に おいても超伝導プローブが有効である。

- 1. S. Ohshima et al, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.29, (2019), **DOI:** 10.1109/TASC.2019.2899855
- 2. S. Ohshima et.al, Physica C 372-376 (2002) p.671
- A.Saito et al, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.15 (2005) p.3696

BaZrO₃ ナノ粒子導入による BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ 薄膜の磁場中超伝導特性向上 Enhanced in-field properties in BaZrO₃ nanoparticles doped BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ films

<u>原田 工夢</u>, 土屋 豪, 三浦 正志(成蹊大); 木内 勝, 松下 照男(九工大) <u>HARADA Takumu</u>, TSUCHIYA Go, MIURA Masashi (Seikei University); KIUCHI Masaru, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Institute of Technology) E-mail : dm206316@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

Pulsed Laser Deposition(PLD)法で作製した鉄系超伝導体 BaFe2(As0.66P0.33)2 (Ba122:P)薄膜は液体水素温度 20K を超 える臨界温度(Tc)を持つ。そのため、液体水素温度下での超 伝導応用に向けて高い磁場中臨界電流密度(Jc)を有する Ba122:P 薄膜が求められている。これまでに我々は磁束ピン ニング点として母相に対してインコヒーレント界面を有する BaZrO₃(BZO)ナノ粒子を導入しBa122:P 薄膜の磁場中 J。特 性を向上させることに成功した[1]。さらに、PLD法における薄 膜成膜条件の最適化により更なる磁場中 J。特性向上を報告 してきた[2]。また Bal22:P 薄膜に限らず、我々は REBa₂Cu₃O_y (REBCO)線材においても BaHfO₃(BHO)や BZOナノ粒子導入によるJ。特性の向上を確認してきた[3]。こ れらの実験で得られた磁場中特性を理解し更なる特性向上 に向けて、ナノ粒子をピンニング点として導入した超伝導材 料の磁束クリープを考慮したJ。解析モデルを我々は提案して きた[2,3]。

本研究では、PLD 法における成膜条件を最適化した BZO ナノ粒子導入 Ba122:P を作製し、BZO ナノ粒子が磁場中 J。 特性に及ぼす影響を検討した。また、J。解析モデルを用いて、 Ba122:P+BZO 薄膜における磁場中 J。特性を理論的に解析 した。

2. 実験方法

本研究では、PLD 法を用いて MgO 単結晶基板上に成膜 条件(基板温度や成長速度)を最適化した Ba122:P, Ba122:P+1mol%BZO, Ba122:P+3mol%BZO を作製した。超 伝導膜厚は 80nm である。作製した Ba122:P+BZO 薄膜は結 晶性を X線回折(XRD)法、超伝導特性を四端子法、微細構 造を透過型電子顕微鏡(TEM)及びエネルギー分散型 X線 分析(EDS)で評価した。

3. 実験結果

Fig.1(a)に Ba122:P、1mol%BZO 及び 3mol%BZO を導入 した Ba122:P 薄膜の J_c ($B = 1T, B \parallel c$)の温度依存性を示す。 図より高密度な BZO を導入した Ba122:P+3BZO 薄膜がいず れの温度においても高い J_c を示すことが分かる。Fig.1(b)に 4 K, 1 T における J_c の磁場印加角度依存性を示す。図より Ba122:P+3BZO 薄膜は等方的で最も高い J_c 特性($J_{c,min} = 5$ MA/cm²)を示した。Fig.1(a)および(b)に示す実線および破線 は、磁束クリープの実験値[2,4]と理論的ピンニング力より求 めたクリープフリー J_c をもとに構築した J_c 解析モデルによる計 算値である。これらは導入量の異なる Ba122:P+1BZO 及び Ba122:P+3BZO 薄膜の $J_c(T)$ および J_c (θ)の実験値に近い計 算値を示した。

当日は、詳細な実験結果及び J。解析モデルに関しても報告する予定である。



Fig.1 (a) Temperature dependence of the experimental J_c (symbols) and theoretical J_c (lines) for Ba122:P and Ba122:P+BZO films at B||c and B=1T. (b) Angle dependence of experimental J_c (symbols) and theoretical J_c (lines) for Ba122:P and Ba122:P+BZO films at 4 K, 1 T [2].

謝辞

本研究は日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興 資金、JSPS 科研費(18KK0414 及び 20H02184)、加藤科学振 興会及びフジクラ財団の助成を受け実施したものである。

- [1] M. Miura et al., Nature Communications 4 (2013) 2499.
- [2] M. Miura et al., Supercond. Sci. Technol. 32 (2019) 064005.
- [3] M. Miura et al., NPG Asia Materials 9 (2017) e447.
- [4] S. Eley, M. Miura et al., Nature Materials 16 (2017) 409.

Ag/(Ba, K) Fe₂As₂テープの臨界電流密度異方性及びスケーリング Critical current density anisotropy and scaling of Ag/(Ba, K)Fe₂As₂ tapes

<u>羅 珺怡</u>, 岡田 達典, 鈴木 匠, 淡路 智(東北大);黄 河, 張 現平, 馬 衍偉(IEECAS) LUO Junyi, OKADA Tatsunori, SUZUKI Takumi, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.);

HUANG He, ZHANG Xianping, MA Yanwei (IEECAS)

E-mail: rakun@imr.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Iron-based superconductors (AE, K)Fe₂As₂ ("(AE, K)122", AE = alkaline earth) tapes ($T_c \approx 38$ K), with the critical current density (J_c) achieving the order of 10^5 A/cm² at 10 T and 4.2 K [1], reach the level for practical high-field applications and have potential in superconducting applications. (AE, K)Fe₂As₂ tapes are fabricated by the powder-in-tube (PIT) method. During the fabrication process, flat-rolling or hot-pressing methods are applied to improve J_c through increasing the superconducting core density [2, 3]. The pressure perpendicular to the tape surface also leads to an enhancement of the *c*-axis orientation [2].

Anomalous J_c anisotropy that J_c for $B \parallel c$ were higher than J_c for $B \parallel ab$ was observed in hot-pressed (Sr, K)122 tapes at high temperature and/or low magnetic field, which was inverse in the cases of flat-rolled (Sr, K)122 tapes [4]. Similar phenomenon in hot-pressed (Ba, K)122 tapes was reported at 10 T and 4.2 K [1]. Our study on the flat-rolled (Ba, K)122 tapes also observed the anomalous J_c anisotropy. In order to understand the J_c anisotropy and pinning mechanisms of Ag-sheath flat-rolled (Ba, K)122 tapes, we adopted an anisotropic Ginzburg-Landau (GL) effective mass scaling [5] on them.

2. Results and discussions

The magnetic field and angular dependences of J_c were measured at 4.2 K and at high-temperatures over 30 K for the tapes. Anomalous J_c anisotropy was observed at low field below the crossover field B_{co} , where $J_c(B_{co} \parallel ab)$ equals to $J_c(B_{co} \parallel c)$. As shown in Fig. 1, broad peak appears around 45° and a minimum appears around $B \parallel ab$ instead of $B \parallel c$ below 1 T. $J_c(B \parallel ab)$ turns to be larger than $J_c(B \parallel c)$ with the magnetic field increasing.



Fig.1 Angular dependence of J_c at 35 K and various magnetic fields.

The magnetic field angular dependence of J_c was scaled by using the effective magnetic field $B_{\rm eff} = B \varepsilon (\gamma, \theta)$, where $\varepsilon (\gamma, \theta) = (\cos^2 \theta + \gamma^{-2} \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$ and γ is an effective anisotropic parameter. The results in Fig. 2 show well scaling behavior for each temperature with a temperature dependent parameter γ above $B_{co} = 1$ T since all the data over 1 T collapse onto the same black line. It indicates that the J_c anisotropy is dominated by the effective-mass anisotropy and the pinning mechanism is isotropic. However, J_c can't be scaled below 1 T, which indicates an additional pinning mechanism.



Fig.2 Scaling plot of $J_c(B, \theta)$ at various temperatures with the effective-mass model. The black lines represent the magnetic field dependence of $J_c(B \parallel c)$ at the same temperatures.

Similar angular dependence of J_c with the minimum at $B \parallel ab$ can be observed in REBa₂Cu₃O_y (RE = rare earth and Y) coated conductor with artificially added BaHfO₃ nanoparticles at $B \leq 1$ T [6]. By comparing to the cases of REBa₂Cu₃O_y, the J_c anisotropy at low field leads to a consideration that the nanoparticles may be the additional pinning existing in (Ba, K)122 tapes as well.

References

- H. Huang et al.: High transport current superconductivity in powder-in-tube Ba_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ tapes at 27 T, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 31 (2018) no. 015017
- C. Yao et al.: Microstructure and transport critical current in Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ superconducting tapes prepared by cold pressing, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 26 (2013) no. 075003
- H. Lin et al.: Hot pressing to enhance the transport J_c of Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ superconducting tapes, Sci. Rep., Vol. 4 (2014) no. 6944
- S. Awaji et al.: Anomalous anisotropy of critical currents in (Sr, K)Fe₂As₂ tapes, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 30 (2017) no. 035018
- M. Kidszun et al.: Critical current scaling and anisotropy in oxypnictide superconductors, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 106 (2011) no. 137001
- T. Okada et al.: Longitudinal magnetic field effects on (Y,Gd)Ba₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor with BaHfO₃ nanoparticles fabricated by UTOC-MOD method, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29 (2019) no. 8002705

Ba_{1-x}K_xFe₂As₂テープ線材における臨界電流密度のヒステリシス特性 Hysteresis properties of critical current density in Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ tapes

<u>鈴木匠</u>,羅珺怡,岡田達典,淡路智(東北大);姚超,馬衍偉(中国科学院) <u>SUZUKI Takumi</u>, LUO Junyi, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); YAO Chao, MA Yanwei (CAS) E-mail: t.suzuki@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Ba_{1-x}K_xFe₂As₂(Ba122)テープ線材は優れた磁場中臨界電 流密度(*J*_c)特性と高い不可逆磁場を持つことから、高磁場応 用が期待されている。この線材は Powder-in-tube(PIT)法で作 製され、シース材として一般的に Ag が用いられている。最近 では Ag に加えて Cu やステンレス鋼等を複合して高強度化 が行われておりマグネット応用に向けた開発が進んでいる。 一方、*J*_cの磁場依存性にヒステリシスを持つことが知られ ており[1]、磁場の上昇時と減少時に *J*_cが大きく異なるが 詳細についてはまだ十分に理解されていない。本研究で は Ba122 テープ線材のシース材が異なる線材の *J*_cの磁場 依存性を測定し、ヒステリシス特性について考察を行っ た。

2. 実験方法

試料は PIT 法により作製された Ba122 テープ線材でシース材は Ag/Cu、及び Ag を用いている。Ag/Cu 線材は hot isostatic press (HIP)法、Ag のみの線材は Flat roll で作製されている。臨界電流密度の測定は東北大学、強磁場センターの18T-SM、及び28T-HMを用いてテープ面方向に平行に磁場を印加し、直流四端子法により測定を行った。線材長は約3 cm、電圧端子間距離は1 cm とした。

3. 実験結果、考察

Fig. 1 に銀シースのみの Ba122 テープ線材の臨界電流の 磁場依存性を示す。磁場上昇時に磁場の上昇に伴い低磁 場から数 T にかけて J_c が上昇する振る舞いが見られ、磁 場減少時には磁場の減少に伴い単調に J_c が上昇するヒス テリシス特性となった。一方、Fig. 2 に示すように、Ag/Cu シース材の Ba122 テープ線材の臨界電流の磁場依存性は、 磁場減少時に Ag シース材と同様に磁場の減少に伴い単 調に J_c が上昇していくが、磁場上昇時には、低磁場で一 度大きく J_c が減少した後に上昇するような異なる振る舞 いとなった。

Fig. 3 に Ag/Cu シース材の Ba122 テープ線材の n 値の 磁場依存性を示す。n 値はヒステリシスの小さい高磁場は同 程度の値となっているが、低磁場で絶対値は異なるが一度減 少してから増加する同様の振る舞いとなっている。磁場減少 時は単調に J_e が上昇するが n 値は異なる磁場依存性となる 事が分かった。臨界電流密度のヒステリシス特性について は、鉄系以外に Bi 系等の銅酸化物高温超伝導体でも報告 されており結晶粒界の Weak-link の影響により起こると考 えられている[2]。しかし、J_e が数 T まで磁場の上昇に伴 い増加していく振る舞いの報告はほとんどなく、これまで 考えられていた Weak-link の影響のみでは理解できないと考 えられる。当日はパーコレション的な J_e 分布や組織等の観点 からヒステリシスの要因について議論する。

- 1. M. Bonura, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 33 (2020) 095008
- 2. A. Matsumoto, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. Vol. 25 (2012) 125010



Fig. 1 Magnetic field dependence of J_c for Ag//Ba122 at 4.2 K.



Fig. 2 Magnetic field dependence of *J*_c for Ag/Cu/Ba122 tape at 4.2 K.



Fig. 3 Magnetic field dependence of *n*-value for Ag/Cu/Ba122 tape at 4.2 K.

室温および低温における超電導線材の引張試験方法の標準化の現状 Present status of standardization on the tensile test at RT and low temperature for industrial SC wires

山田雄一(住友電気工業);小黒英俊(東海大学);<u>長村光造</u>(応用科学研究所);中井昭暢(日本電線工業会) Yuichi Yamada (SEI); Hidetoshi Oguro (Tokai Univ.); Kozo Osamura (RIAS); Akinobu Nakai (JEWIA)

1. はじめに

現状では Nb-Ti, A15, BSCCO, REBCO および MgB2系 の5系統の複合超電導線材が IEC および JIS において工 業的実用線材として定められている。これらの線材につい て臨界電流、機械特性等の測定方法についての国際規格、 JIS 規格が国際 IEC-TC90 委員会、国内 TC90 委員会にお いて審議されている。本講演ではとくに5系統の工業的実 用線材についての室温および低温における引張試験方法 および引張荷重下における臨界電流測定方法の標準化の ための審議過程の現状と今後の展望について紹介したい。

2. TC90-WG5 の活動内容

WG5 の現在までの活動については Table 1 にまとめて いる。これまでに4 系統の線材について室温引張試験方法 の国際標準(IS)が発行されている。数字(1),(2),(3)で示す 事項については現在国際ワーキンググループで審議が行 われている。

Table 1 Overview of TC90-WG5 activity

Category	Temp	Nb -Ti	Nb ₃ Sn	BSCCO	REBCO	MgB_2
	R.T.	IS	IS	IS	IS	(2)
Tensile	77 K			(1)	(1)	
Test	4.2 K					
Tensile	77 K			(3)	(3)	
Ic	4.2 K					

REBCO テープの室温における引張特性の国際 RRT と国 際標準の制定

まず REBCO テープの国際ワーキンググループの活動 内容と国際標準制定過程を説明する。ドイツ、米国、中国、 韓国、日本から参加した7研究機関で商用化されている4 種類のテープの引張試験を行った。Fig.1はAndong Univ から報告された結果で、図に示すように Nyilas の歪計を 用いた配置で引張試験を同じメーカーのテープについて 5回の試験を実施している。







Fig. 2 Typical mechanical parameters on the R vs A curve

引張試験より得られた機械特性を代表する値としてFig.2 に示すようにヤング率と 0.2%耐力の評価を行った。これ らのパラメータについては Fig. 1 に示すように5回のデ ータがあり、参加した7機関を併せると35のデータが集 まる。これらより標準偏差、不確かさのパラメータを評価 して、どのような測定方法が最も信頼性が高いかを判定す る。このような考察、議論を経て、REBCOテープ材に対 する引張試験の国際標準を制定する。現在までに Table 1 に示すように4 種類の線材について国際標準が制定され てきた。

4. 審議過程にある試験方法の現状

Table 1 に数字で示してあるが、(1)は高温超電導テープ 材の液体窒素温度での引張試験方法であり、各国の6研究 機関が参加して5種類のテープについて本報告3.項と同 様のRRT 試験を完了したところで、現在試験結果の解析 と試験方法の標準化の審議が行われている。(2)項のMgB₂ 線材の室温引張試験については、試験試料として4種類の 商用化された線材が選ばれて、国際RRTへの参加機関の 調整がおこなわれているとろである。(3)項は高温超電導 テープの引張荷重下での臨界電流測定の試験方法で、代表 機関で予備的な試験を実施した。引張荷重の依存性につい ては引張応力(R)と臨界電流(L)の関係、引張歪(A)とLの 関係の2通りの依存性の表示がある。検討の結果、R - Lの関係表示のみを試験方法の国際標準に定めてはどうか という議論がなされている。

5. まとめ

標準化という地味な活動であるが、学問的成果の実用化 過程の一端を担うものであり、ここではそのごく一部の活 動を報告した。

謝辞

本報告でデータの引用を了解して頂きました Prof. H-S Shin に感謝申し上げます。

<u>寺嶋 健成</u>, Baptista de Castro Pedro,山本貴史,竹屋浩幸,高野義彦(物材機構); Hou Zhufeng(中国科学院);岩崎秀 (北大) <u>TERASHIMA Kensei</u>, BAPTISTA de CASTRO Pedro, YAMAMOTO D Takafumi, TAKEYA Hiroyuki, TAKANO Yoshihiko (NIMS); HOU Zhufeng (CAS); IWASAKI Suguru (Hokkaido Univ.) E-mail: TERASHIMA.Kensei@nims.go.jp

1. はじめに

磁気冷凍は、磁性体が示す磁気熱量効果を用いた熱サ イクルによる冷却法で、気体冷凍の代替として期待され ている。とりわけ近年、水素社会の一端を担うとされる液 化水素への適用が検討されている。このためには、液体窒 素温度以下、または水素液化温度(~20.3 K)近傍で高いエ ントロピー変化(ΔS_M)を示す磁性体が必要である。我々は、 すでに磁場印加時の $|\Delta S_M|$ が報告されている物質群に対 する機械学習モデルを用い、 $|\Delta S_M|$ が未報告の磁性体の予 測結果を指針として磁気冷凍材料探索を行った[1]。 2. 方法

磁性体のデータは、磁気冷凍材料に関するレビュー論 $\chi[2]$ と、磁性体のテキストマイニングデータ[3]中の論文 名から磁気熱量効果に関するものを手作業で収集した。 集めた 1644の組成と $|\Delta S_M|$ のセットの8割は機械学習の 教師データとして、2割はモデル評価の検証データに用 い、分割は scikit-learn にて行った。学習に用いる特徴量 には XenonPy [4]を用いて組成ベースの物理量の組み合 わせと印加磁場を用い、 $|\Delta S_M|$ を目的変数とした。機械学 習には XGboost [5]を用い、ハイパーパラメータは HyperOpt [6]を用いて教師データの交差検証で平均絶対 誤差(MAE)を最小とするように決定した。次に上記のテ キストマイニングデータのうち教師・検証データではな い($|\Delta S_M|$ の報告がない)物質に対して学習モデルによる磁 場 5T の際の $|\Delta S_M|$ の予測を行い、2元系で最も高い予測 値を示した HoB_2 を合成候補物質として選定した。

 HoB_2 多結晶はアーク溶解により合成した。試料の純度 は粉末 X 線回折で評価した。試料の磁化と磁場下での $|\Delta S_M|$ は SQUID を用いて評価した。また PPMS を用いた 比熱測定からも $|\Delta S_M|$ を求めた。合成した複数の HoB_2 多 結晶試料に対して、磁化や $|\Delta S_M|$ などの再現性を確認した。 3. 結果

図 1 に、作成した機械学習モデルによる検証データに 対する $|\Delta S_M|$ 予測値と、実験値との比較を示す。図中破線 は両者が完全一致する場合に対応し、破線と各データ点 の縦方向のずれの平均が MAE を与える。得られたモデル の MAE は約 1.8 (J kg⁻¹ K⁻¹)であり、このモデルを用いる ことで磁性体の組成からある程度の精度で $|\Delta S_M|$ の予測 が可能であることを示している。

図2に、合成した HoB₂の磁化測定から見積もった、磁 場変化 5 T までの $|\Delta S_M|$ を示す。強磁性転移温度である 15 K の近傍で、5 T の場合約 40 (J kg⁻¹ K⁻¹), 0.35 (J cm⁻³ K⁻¹)と非常に大きな $|\Delta S_M|$ を観測した。この転移は、磁化等 の振る舞いから2次転移と考えられる。また 11 K 近傍に も磁気転移が存在し、 $|\Delta S_M|$ にも肩構造を観測した。2つ の転移が近い温度域でそれぞれ $|\Delta S_M|$ に寄与しており、結 果 $|\Delta S_M|$ ピーク値が大きいだけでなく幅広い温度域で大 きな $|\Delta S_M|$ を示すことを見出した。

現状の機械学習モデルは、まだ必ずしも完璧・正確な予 測を与えるわけではないが、探索指針としては非常に有 用と考えられる。



Fig. 1 Comparison between $|\Delta S_{\mbox{\tiny M}}|$ values predicted by machine-learned model and reported ones



Fig. 2 $|\Delta S_{M}|$ of HoB_{2} evaluated from magnetization curves.

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJMI18A3 の支援 を受けたものである。

- 参考文献
- 1. P. B. Castro, et al.: NPG Asia Materials 12:35, (2020).
- 2. V. Franco et al.: Prog. Mater. Sci. 93, 112 (2018).
- 3. C. J. Court and J. M. Cole, Sci. Data 5,180111(2018).
- 4. H. Yamada et al., ACS Cent. Sci. 5, 1717 (2019).
- 5. T. Chen and C. Guestrin, in proceedings of KDD'16 785 (2016).
- J. Bergstra *et al.*, Comput. Sci. Discov. **8**, 014008 (2015).

冷凍機

新規ボライド系水素液化用磁気冷凍材料のアトマイズ粒の作製 Gas Atomization for New Hydrogen Liquefaction Materials in Diborides

竹屋 浩幸,山本 貴史, Pedro Baptista de CASTRO, 寺嶋 健成, 沼澤 健則, 高野 義彦(物質・材料研究機構) TAKEYA Hiroyuki, YAMAMOTO D. Takafuni, Pedro Baptista de CASTRO, TERASHIMA Kensei, NUMAZAWA Takenori,

TAKANO Yoshihiko (NIMS)

E-mail: takeya.hiroyuki@nims.go.jp

1. はじめに

磁気冷凍による水素液化の研究は、1980年以降米国の DOE、日本の東工大・東芝を中心に盛んに行われるようにな ったが、それぞれの物質・AMR(Active Magnetic Refrigeration)システムに対応した磁気冷凍作用体の選択及 びその形状に関する研究が充分に研究されつくしたとは言え ない。2011年の福島原発事故以降、原子力発電に頼ることは できない状況下、環境負荷の小さい水素をエネルギー媒体と した車両や水素発電を利用した社会へシフトすることが目指 されている。その水素を効率的に運搬利用するための高効率 液化技術が必要とされている。我々のプロジェクトでは、AMR 磁気冷凍システムに搭載する球状化した磁気冷凍材料を開 発し、実機での磁気冷凍性能の評価及び水素液化を実証す る。水素液化温度で動作する磁気冷凍材料として、最近発見 した世界最高エントロピー変化を示す HoB2[1]の球状化処理 過程を研究し、実機搭載によりAMR磁気冷凍システムの高性 能化(50%効率)を達成することを目指している。

2. 実験方法

アトマイズについては、現有の小型アトマイズ装置を用いた。 HoB2 は、2200℃で分解溶融(HoB4+Ho)し、2350℃で完全 溶融する物質であるが、加熱方式及びアトマイズプロセスを 工夫することにより 212~500 µm を分布の中心とした球状粉 を作製した。SEM 等の形状観察により、area, circularity, roundness の分布を Image-Jを用いて解析した。研磨試料の 内部組織観察、アトマイズ粉の磁化、エントロピー変化を SQUID(磁化)、PPMS(比熱)を用いて評価した。

3. 結果と考察

HoB2は、包晶系であること、完全融解温度が2350℃と高温 であること、試料の発火性や脆さなど、アトマイズする材料とし ては、様々な点で難しい。本研究では、アトマイズ装置を使用 して、AMR 用球形紛 212~500 µm の試料を作製したので報 告する。

図1は、Ho-Bの平衡状態図に今回行ったアトマイズ原料組 成を書き入れたものである。Ho-rich 側の組成を原料とするこ とにより、融点を下げ容易に溶解することができる。結果、アト マイズ粉は HoB2+Ho になり、B-rich 側では HoB2+HoB4 にな った。それぞれの原料組成とアトマイズ粉の組成を XRD 分析 により量的組成関係とアトマイズ粉内部組織を観察した。内部 組織では、Ho-rich 組成である HoB で HoB2 の hexagonal-Boron ネットワークを反映した層状構造が顕著に発 達しながら凝固したことが観察された。ストイキオメトリー組成 である HoB2 ではアトマイズ粉もほぼ HoB2 単相で図2のよう な球状粉が得られた。アトマイズ粉の真円度(Circularrity, Roundness)は ImageJ によって分析し、同様の方法でアトマイ ズした HoAl2 と同じレベルの Roundness>0.87 が得られた。

HoB2 のアトマイズ粉の磁場5T=>0T のエントロピー変化 を図3に示した。アーク溶解多結晶と同じくらいの値~90%の 値を示した。講演では、アトマイズ粉の内部組織、物性につい ても言及する予定である。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJMI18A3 の支援を 受けたものである。



Fig.1 Phase diagram of Ho-B and feeding rod composition. (1990 Liao P.K.)



Fig.2 Atomized particles of HoB2 in the size between $355\text{--}500\mu\text{m}$ and HoB2 (P6/mmm) structure.



Fig.3 Temperature dependence of entropy change from 5 T to 0 T in each size of the atomized HoB2.

参考文献

 Pedro Baptista de Castro, Kensei Terashima, et al., NPG Asia Materials (2020) 12:35, https://doi.org/10.1038/s41427-020-0214-y

— 104 —

多層充填ランタン系合金を用いた室温磁気冷凍機の性能 Performance of Room Temperature Magnetic Refrigeration using Multi Layered Lanthanum(La)-based Alloys

<u>荒木 快生</u>, 岡村 哲至(東工大); 裵相哲(サンデン AT) <u>ARAKI Kaisei</u>, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (SANDEN AT) E-mail: araki.k.am@m.titech.ac.jp

1. はじめに

フロンガスを使用しない冷凍装置の実現のため、磁性材料 の磁気熱量効果を利用した室温磁気冷凍機の研究が行われ ている。先行研究では、磁気冷凍機の最大温度スパンは、 AMR (active magnetic regenerator)にキュリー温度が異なる材 料を階層状に充填することで拡張されることが明らかになって いる[1,2]。本研究は、ランタン(La)ベースの合金を階層状に 充填した AMR について、冷凍性能を 1 次元数値解析と実験 により評価した。

2. 冷凍能力実験

図1に実験装置の概略を示す。磁性体を充填した2本1 対のダクトに対して、磁場を交互に印加しながら熱輸送媒体 の水を流す実験装置を用いた。磁場が印加されているダクト は磁性材料の温度が上昇しており、熱交換媒体を低温側から 高温側へ流し、恒温槽で排熱を行う。磁場が印加されていな いダクトは磁性材料の温度が低下しており、熱交換媒体を高 温側から低温側へ向かって流すことで、冷却ステージの温度 が下がる。配管を通る水は、ダクト出口付近に取り付けられた バルブによって常に1方向の流れとなるようにした。ダクト寸法 は内径 21mm、長さ 120mm とし、磁性材料は平均粒度 0.45mm、球形状でキュリー温度が 0.6℃~23.7℃の範囲のも のを 12 種類等間隔に充填した。となり合う磁性材料のキュリ ー温度間隔は約2℃となっている。磁場を印加する周波数は 1.5Hz、水の流量は0.3, 0.5, 0.7L / minの3条件とし、排熱温 度は 24℃に拘束した。ヒーターで冷却ステージにかけた熱負 荷を冷凍能力と定義した。また、消磁ダクトの低温側と励磁ダ クトの高温側の温度差をダクト温度スパンと定義し、計3条件 についてダクト温度スパンに対する冷凍能力を評価した。



3. 冷凍能力解析

冷凍能力解析では、実験装置を模擬し、ダクト、ダクト内に おいて磁性材料を充填しないデッドボリューム、配管につい て解析モデルを構築し、水と磁性材料の間の熱交換につい て1次元伝熱数値解析を解いた。検査体積である磁性材料 充填部、デッドボリューム、配管を長さ方向へ幅dxで分割し、 微小長さについて以下のエネルギー保存方程式を解いた。

$$\begin{split} \text{Fluid}: \qquad & \rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{-q_{ex}}{V_f} + k_{eff,f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \\ \text{Material}: \qquad & \rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = k_{eff,m} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{q_{ex}}{V_m} \end{split}$$

qex は水と磁性材料間の熱交換量である。図 2 に実験装置を 模擬した 1 次元伝熱数値解析のモデルを示す。配管及びデ ッドボリュームについては磁性材料が充填されていないため 熱交換媒体のみ解析した。有効熱伝達係数は、ランツ式と磁 性材料のビオ数を使用して計算した[3,4]。また、磁性材料の 断熱温度変化を時間に伴って変化させることで、磁場を印加 する磁石の移動を表現した。



Fig2. 1 dimensional analysis model

4. 冷凍能力実験及び解析結果

図3に磁場を印加する周波数を1.5Hzに拘束したときの ダクト温度スパン-冷凍能力の結果を示す。熱負荷0Wでの温 度スパンは解析値と実験値で10%以内の誤差で一致した。ま た、温度スパン5℃以下の冷凍能力についても解析値が15% 以内の誤差で実験値と一致するに至った。しかし、温度スパ ン5℃以上の冷凍能力については、実験値と解析値の曲線 の傾向に差異があり、流量0.3L/minの条件においては最大 誤差約200%となった。



Fig3. Analysis and experimental results of cooling power

参考文献

- M.A. Richard, et al.: Journal of Applid Physics, Vol.95(2004)p.2146-2150
- C. Zimm, et al.:International Journal of Refgigeration, Vol29(2006)p.1302-1306
- W.E. Ranz, et al.: Chemical Engineering Progress, Vol.43(1952)p.141-146
- K.L. Engelbercht, et al.: Journal of Heat Transfer, Vol.128(2006)p.1060-1069

— 105 —

室温磁気冷凍システムにおける熱交換器の小型高性能化に関する研究

Research on miniaturization and high performance of heat exchangers

in room temperature magnetic refrigeration system

<u>安部 勇汰</u>, 岡村 哲至(東工大); 裵 相哲(サンデン AT) <u>ABE Yuta</u>, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (Sanden AT) E-mail: abe.y.aq@m.titech.ac.jp

1. はじめに

冷凍空調機器のノンフロン化を実現するため,磁性材料 の持つ磁気熱量効果を利用した室温磁気冷凍機の研究が行 われている.先行研究より、磁気再生器(Active Magnetic Regenerator; AMR)内にキュリー温度の異なる複数の磁性材 料を階層状に充填することによって,磁気冷凍機の最大温度 スパンが拡大することが明らかにされている[1,2].本研究は, 磁気冷凍システムを構成する要素機器のうち,清涼飲料水用 のケースで言えば、庫内にあたる部分の熱交換器に注目した. Fig.1 のように冷却室内の空気とAMR から流出する低温の水 が熱交換する熱交換器を設計し、その性能について考察す る. 室温磁気冷凍機を運転するとき,1T の磁場変化で AMR 内の磁性材料の断熱温度変化量は約2Kである.もし,AMR から流出した水が冷却側の熱交換器内を流れ再びAMRに入 るとき, その温度が AMR を出たときに対し, 2K より高くなりす ぎると、AMR 内の温度分布が定常に保てなくなる可能性があ る. すなわち, AMR と熱交換器内を出入りする水の温度差が 2K 以下となるような熱交換器が必要となる. また, 実際に磁 気冷凍システムに熱交換器を用いる場合は,小型で高性能 であることが望ましい. 考察する熱交換器は, フィン・チュ ーブ型とマイクロチャンネル型熱交換器とする.



Fig.1 Schematic diagram of magnetic refrigeration system

2. 熱交換器冷凍能力等計算条件

フィン・チューブ型とマイクロチャンネル型両方で共通する 拘束条件としては、磁気冷凍機の運転条件などを考慮し、水 の体積流量 4.5L/min,空気の流速 2.8m/sを用いる.開口部 は、幅×高さとし、奥行×高さは、200mm×50mm で固定とす る.

フィン・チューブ型の上記以外の拘束条件は、水配配管径 8mm,配管厚み1mm,フィン厚み1mmとする.これらの値は一 般に存在するものから選んだ.また、Fig.2のようにフィン・チュ ーブ型の熱交換器は、AMRから全体の半分のチューブに流 れた水がプールで合流し、残りの半分のチューブを通って AMRに戻る2パス構造を想定した.風は、水の出口側から当 てる.Fig.3は、3行×12列の側面図である.

マイクロチャンネル型の上記以外の拘束条件は、フィン・チューブ型熱交換器の管径の 1/10 となるように水配配管径 0.8mm,配管厚み 0.1mm とする.また、マイクロチャンネル型の熱交換器は、フィン・チューブ型の熱交換器とは違い、

Fig.4 のように水は一方向のみに流れるものとする. Fig.5 は, 12 行×30 列の側面図である.

パラメーターは,熱交換器の幅,チューブの行数,列数,チ ューブピッチとする.各場合において,冷凍能力,ファン動力, ポンプ動力の変化を考察する.冷凍性能は,熱交換器の冷 凍能力を計算するうえで従来から用いられている ε-NTU 法 を用いて計算する[3].



Fig.2 Schematic of tube • fin heat exchanger



Fig.3 Side view of tube \cdot fin heat exchanger(3 lines $\times 12$ rows)





- M. A. Richard, et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 95 (2004) p.2146-2150
- C. Zimm, et al.: International Journal of Refrigeration, Vol.29 (2006) p.1302–1306
- R.S.Calomeno, et al., INFLUENCE OF THE HEAT EXCHANGERS THERMAL CONDUCCATANCE ON THE THERMODYNAMIC PERFORMANCE OF A MAGNETIC REFRIGERATOR, Torino, Italy(2016), pp123-126.

人工衛星搭載用 5W パルス管冷凍機の開発

Development of 5W class pulse tube cooler for space use

<u>平塚 善勝</u>, 大塚 清見, 恒松 正二, 金尾 憲一, 楢崎 勝弘(住重) <u>HIRATSUKA Yoshikatsu</u>,

OTSUKA Kiyomi, TSUNEMATSU Shoji, KANAO Kenichi, NARASAKI Katsuhiro (SHI) E-mail: yoshikatsu.hiratsuka@shi-g.com

1. はじめに

住友重機械工業株式会社(SHI)は、地球観測衛星「しきさい」、「HISUI」、科学衛星「すざく」、「かぐや」、「あかつき」、「ひとみ/軟X線撮像検出器(SXI)」の検出器やシールド用冷 凍機として単段スターリング冷凍機を供給し、さらに超伝導サ ブミリ波リムエミッションサウンダ(SMILES)やX線科学衛星 「ひとみ/軟X線分光像検出器(SXS)」には、2段スターリング 冷凍機とJT冷凍機からなる4K冷凍機を供給してきた。

昨今、観測能力を向上させるためにセンサを大型化すること が計画されており、これに伴い冷凍機の冷却能力を上げる必 要性がある。パルス管冷凍機の膨脹器は可動部がないため、 信頼性で有利な上に、膨脹機の振動を抑制するためのアクテ ィブバランサが不要になる可能性もある。本報告では、新規圧 縮機を含めて77Kで5Wの冷却能力を持つ単段パルス管冷 凍機の試作機開発を行ったので、その性能試験結果につい て報告する。

2. 圧縮機性能評価

冷却能力を上げるために圧縮機への投入電力が増加し、 大幅にサイズが大きくなることが懸念される。モータの可動方 式をコイル可動型からエネルギ密度の高い磁石稼働型に変 更することで、圧縮機の効率を改善し現行機とほぼ同等サイ ズになることを目論んだ[1]。表1には、単段スターリング冷凍 機の同じ膨張機を使った時の新規圧縮機と現行機との性能 が比較されている。同表から、幾何形状、重量などは現行圧 縮機とほぼ同等で、電気入力 50W 時の圧縮機効率が向上し、 冷凍能力ならびに冷却効率も改善している事が分かる。

3. パルス管膨張器の性能評価

パルス管冷凍機の性能は、蓄冷器からパルス管へのガス流 出入における整流効果に大きく起因する。インライン膨張器 は、各々の構成部品が同軸上に配置されるので、パルス管部 におけるガスの乱れによる影響は小さい。また同軸型膨張器 は、蓄冷器がパルス管の周りに円環上に配置され、相互の温 度分布の違いによる干渉や蓄冷材のバイパス量の増加による 性能低下が懸念される。同軸型膨張器を製作するに先立ち、 開発の容易性からインライン型、U型膨張器の順に設計製作 を行った。図1には、試作同軸型パルス管冷凍機の写真、そ して図 2 には、各々の膨張器形態における冷凍性能の比較 が示されている。同軸型膨張器の冷凍性能は、電気入力 120 Wで、冷凍能力 5.2 W at 77 Kが得られている。また U型膨 張器は、蓄冷器とパルス管容器の剛性問題からインライン型、 同軸型よりも管の肉厚が厚くなり、到達温度ならびに冷凍性 能が他の形状に比べて悪くなっている事が分かる。

4. 振動測定

人工衛星に冷凍機を搭載するに際し、冷凍機の振動がセン サヘ与える影響を極力減らす必要がある。スターリング冷凍 機はアクティブバランサを制御し振動を低減している。冷却温 度 77K における膨張器低温端の振動振幅を真空容器にガラ ス窓を設け、レーザドップラにより測定した。その結果、軸方 向に 1.5 μ mp-p、軸直交に 0.5 μ mp-p の変位振動があること が分かった。

5. まとめと今後の展望

冷凍能力増加に対応するためパルス管冷凍機の試作機 を設計製作し、性能評価試験を行った。その結果、現行の圧 縮機サイズ・重量と同程度の形状で、電気入力120Wで、冷 凍能力5Wat77Kが得られた。また、振動測定を行いアクテ ィブバランサの制御なしで低振動化が確認された。今後は、 衛星搭載の2段冷凍機予冷用機への適用、さらに本結果を 応用し2段パルス管冷凍機の開発を目指す。

参考文献

1 K. Yumoto, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.66

Table.1 Performance evaluation of compressor using Stirling expander (Electrical input power 50 W).

Item	This model	Original model
Compressor efficiency	80.7%	55.7%
Size	φ110mm	ϕ 98mm
Size	L210mm	L238mm
Weight	3.7 kg	3.3 kg
Cooling capacity at 77K	3.12W	2.17W



Fig.1 Photograph of the coaxial pulse tube cryocooler.



Fig.2 Comparison of cooling performance depending on the form of the pulse tube expander.

極低温冷媒循環方式による HTS コイルの冷却システムに関する研究 Investigation of cryogenic refrigerant circulation system for cooling HTS coil

<u>永井 せつら</u>, 野口 正純, 岡村 哲至(東工大); 平野 直樹(NIFS) <u>NAGAI Setsura</u>, NOGUCHI Masazumi, OKAMURA Tetsuji (T. I. Tech); HIRANO Naoki (NIFS) E-mail: nagai.s.ai@m.titech.ac.jp

1. 緒 言

超電導コイルを応用した機器を生産現場に導入すること を考えると、スペースの関係からコイル冷却用の冷凍機と コイルの距離を離さなければならない場合、伝導冷却では 十分な冷却ができない. その際、循環冷却あればコイルと 冷凍機の距離が離れても効率を落とさずに冷却できると考 えられる. 本研究では、極低温冷媒の循環による冷却シス テムについて実験および解析をおこなう.

2. 極低温冷媒循環冷却システム実験

本実験における実験装置の概略図をFig.1に示す.真空 断熱容器と多層断熱材を用いることで熱侵入を防いだ. 冷媒となるヘリウムガスを断熱容器外に設置したコンプ レッサによって、断熱容器内にある予冷熱交換器,GM 冷凍機,ヒータを取り付けた銅ブロックを経由して循環 させることで、熱源である高温超電導コイルを模した銅 ブロックを冷却し、その時の各場所での温度を計測する. 流量の調整はコンプレッサ付近の三つのバルブを用いて 行う.



Fig.1 Outline of refrigerant circulation cooling system

3. 解析および実験の結果と考察

Fig.2 に冷媒循環システムの入熱に対するコイル温度の解 析結果を示す. Fig.2を見ると,熱負荷によってコイル温度 が最も低くなる流量が変化しており,その値は熱負荷の値 が大きくなるほど大きくなっていくことがわかる.

Fig.3 に実験の結果と、それと同じ条件での解析結果を示 す. Fig.3 をみると、解析結果と実験結果では温度域に違い はあるが、似た傾向の冷凍特性を示している.







4. 極低温循環ファン(クライオファン)使用の検討 Fig.1 の実験装置では、室温で真空断熱容器内に入ってく る冷媒を予冷するために60mの銅の二重管を熱交換器として 使用しており、これが真空断熱容器内の冷媒流路のほとん どを占めている. そのため、冷媒を室温に戻さずに循環さ せることができるクライオファンを使うことで装置の大幅 な小型化が狙えると考えられる. クライオファンを用いた 時の冷却性能を解析した結果をFig.4に示す. ただしクライ オファンは CRYOZONE 社の Cierzo という機種の性能を用い て解析し、同じ流量、圧力での既存のコンプレッサによる 解析結果と比較した. Fig.4 を見ると、クライオファンを使 用することで、室温コンプレッサを使用する場合に比べ、 冷却性能が向上することがわかる. さらに、消費電力の面 でも既存のコンプレッサが数 kW であるのに対し、本解析に 用いたクライオファンは 12W と大幅に低減できる.



Fig.4 Cooling performance when using a cryogenic circulation fan

5. まとめ

- (1)数値解析より、冷媒循環冷却システムの様々な条件での 冷凍特性が明らかになった。
- (2) 冷媒循環冷却システムの実験と解析の比較より,解析が 信頼できるものであることが示唆され、冷媒循環冷却シ ステムによる超電導コイルの冷却が可能であることが示 された.
- (3)解析により、低温循環ファンを使用することで、冷却性 能の向上、消費電力の低減、小型化が可能であることが 示唆された.

ガスアトマイズ法による HoAl2 球状磁気冷凍材料の作製

Fabrication of spherical HoAl₂ magnetic refrigerants by a gas-atomization process

山本 貴史、竹屋 浩幸、齋藤 明子、寺嶋 健成、Baptista de CASTRO Pedro、沼澤 健則、高野 義彦 (物材機構) <u>YAMAMOTO. D. Takafumi</u>, TAKEYA Hiryoyuki, SAITO T. Akiko, TERASHIMA Kensei,

Baptista de CASTRO Pedro, NUMAZAWA Takenori, TAKANO Yoshihiko (NIMS)

E-mail: yamamoto.takafumi@nims.go.jp

1. はじめに

水素をエネルギー媒体とする水素社会実現への気運が高 まりつつある中で、磁気冷凍を用いた高効率な水素液化技術 が注目されている。実用的な冷凍システムとして、AMR(Active magnetic regenerator)方式による磁気冷凍機がある。このAM Rシステムにおいて高い冷凍効率を得るには、大きな磁気熱 量効果を示す磁性材料をサブミリオーダーの球の形で磁気冷 媒として利用するのが良いとされている。こうした中で、我々は ガスアトマイズ法による球状磁気冷凍材料の作製に取り組ん でいる。本研究において有望材料の一つであるHoAl₂[1]の球 状化に成功したので、分析・特性評価に関して報告する。

2. 実験方法

現有のガスアトマイズ装置を用いて、212-355 μmを中心と した粒径分布を持つ HoAl₂ アトマイズ試料を作製した。得られ た試料について、X線回折実験、SEM 観察、物性測定(磁化、 比熱)を行い、結晶構造、モルフォロジー、磁気熱量特性の観 点から評価するとともに、HoAl₂バルク原料との比較を行った。

3. 結果と考察

Figure 1 は、HoAl₂アトマイズ試料(直径 212-355 μm)の(a) 表面および(b)断面の SEM 像である。異形や表面に穴のある 試料が見られるものの、多くの球状試料が得られている。ガス アトマイズ法では試料内部に空孔が生じることが問題とされて きたが、我々が作製した球状試料ではそうした空孔が少ない (Fig. 1(b))。これは、本研究でアトマイズに用いた Ar ガスの圧 力が、従来のものと比べて低いことに由来すると考えている。

Figure 2 にいくつかの磁場変化 B→0 T に応じた磁気エント ロピー変化 ΔS_M の温度依存性を示す。HoAl₂ アトマイズ試料 は、HoAl₂ バルク原料とほぼ同じ $\Delta S_M を示し、その大きさは、$ 磁場変化 5→0 T の時、最大で約 25 J/kg K (0.15 J/cm³ K)である。講演では、結晶構造や物性の話も交えつつ、本研究におけるアトマイズプロセスについて詳しく説明する。

謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI18A3 の支援を 受けたものである。



Figure 1: SEM images of (a) surface and (b) cross section of HoAl₂ particles with 212–355 μ m diameter.



Figure 2: Magnetic entropy change of HoAl_2 bulk and HoAl_2 particles with 212–355 $\,\mu$ m diameter.

T. Hashimoto et al.: Adv. Cryog. Eng. Mater. 32 (1986) 279.

断熱多層膜スペーサの熱伝達率の重量依存性

Heat Transfer's weight dependence of Multi-layer insulation (MLI)

山口 作太郎,神田 昌枝(中部大学);松本 一昭(栃木カネカ)

YAMAGUCHI Satarou, KANDA Masae (Chubu University); MATSUMOTO Kazuaki (Tochigi KANEKA)

E-mail: yamax@isc.chubu.acjp

1. はじめに

断熱多層膜(MLI)は低温への熱侵入を低減するための最 も基本的な部材である。MLIの最適化を目指して、複数の実 験とその解析を行ってきた[1,2,3,4,5]。特に、超伝導直流送 電(SCDC)では、熱負荷の大部分が外部環境からの熱侵入と なるため、MLI断熱性能の向上はSCDCの成否を左右する。 MLIは2つの部材からなる。一つは両面にアルミ蒸着したプラ スチック膜(ACTF)であり、もう一つはACTFの間に挟むスペ ーサである。常温(~300K)では輻射が最も強くなる波長は 10µm ほどであり、温度が下がると順次赤外領域にシフトする。 赤外領域ではACTFの反射率は極めて高くなり、色々な方法 での測定によって反射率が95%以上(輻射率は5%以下)あ り、ほぼ限界に達していると思われる。

一方、スペーサの役割は ACTF が互いに直接接触しない ようにするための部材であり、赤外線の吸収が少なく、熱伝導 率が低い材料を選択し、形状としてはできる限り熱伝達率が 低くなるような設計が行われている。同時に真空中に設置す るために outgas 率が低いことも必要である。

さて、クライオスタット中では低温になる機器を保持するた めに、支持材が必要になるが、構造的には MLI 自身が支持 材として利用される場合がある。また、ACTF 間の接触熱伝導 率を低くするためにはできる限り MLI 自重も軽く作る必要があ る。このため、色々なスペーサや MLI 構造が模索されてきた。 しかし、現時点ではどのような材料で構成にするかについて 決まった方法がある状況ではなく、最適化についての模索が 行われている段階である。特に、計算機実験が適用しにくく、 実験的に再現性が良くないため注意深い実験が求められて きた。今回、異なった2つスペーサを用いて、ACTF とスペー サをそれぞれ一層にして、それに重りを乗せて熱侵入量がど のように変化をするかを、温度測定を小型実験装置で行い、 解析によって熱侵入量を求めることにした。

2. 実験装置

図 1 に実験装置を示す。温度制御しているクライオヘッドの上にスペーサとACTFを置く。重量を変えるために、交換可能な薄いステンレス板の両面に ACTF を貼り付け、それに熱電対を取り付け、温度計測を行う。光学的に平行平板モデルが使えるように、図に示すように横側から輻射光が入ってこないように MLI をクライオヘッドに巻いた。そして、ステンレス板の枚数を変えながら温度計測を行った。



Fig.1 Schematic Drawing of the experimental setup

3. 実験結果とその解析

実験結果を図2に示す。縦軸は環境温度とACTF 温度の 差を示している。横軸はスペーサの上にある重量である。スペ ーサは9B12, Net の2種類に対して行った。これから、重量 が増すと、温度差は増大し、結果として熱侵入量が増えること が実験的にも実証された。また、スペーサによって重量依存 性が異なり、Net は重量が増しても、熱侵入量がそれほど増加 しないことが分かった。

尚、21 層 MLIの自重は重量にして図2の横軸0.5~0.6 [g] に対応する。



Fig. 2 Experimental results of the weight and the temperature difference between the ambient and ACTF temperatures

この実験から、重量ゼロの時は熱輸送が輻射のみで決ま る温度差に対応し、重量が増すことによってスペーサの熱伝 導による熱侵入量が求めることができる。結果として 9B12 は Net に比べて熱伝導による熱侵入量が多いことが平行平板モ デルを用いた結果から得られた。講演ではこの結果も報告す る。

- 山口他、「石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析 -1」第95回2017年度秋期 低温工学・超電導学会 講演概要集3B-a03, p. 161
- 山口他、「石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析 -2」第96回2018年度春期 低温工学・超電導学会 講演概要集2P-p13, p. 133
- 山口他、「石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析 -3」第 97 回 2018 年度秋期 低温工学・超電導学会講 演概要集 1D-a03, p. 49
- 山口他、「石狩超電導直流ケーブルの断熱性能解析 -4」第98回2019年度春期 低温工学・超電導学会講 演概要集 2P-p01, p. 101
- M. KANDA et al, "Heat transfer through multi-layer insulation (MLI)". Submitted to Physica C

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特性の測定 Measurement of AC loss characteristics of HTS sample coil under the conditions assumed to be

used in power electronics devices

<u>船越 湧</u>, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大) <u>FUNAKOSHI Waku</u>, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University) E-mail: k7861864@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(HTS)に置 き換えたときの特性把握など,産業応用分野への超伝導技術 の適用可能性を検討することは重要である。搬送や輸送など 様々な用途で用いられているパワーエレクトロニクス機器では, その駆動回路にインバータなどを用いることから,駆動電流に は高調波成分が含まれている。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,基本波に高調波成分を重畳させた 種々の条件下でHTSサンプルコイルの交流損失特性を測定 し,高調波成分による交流損失への影響について調べたの で,その結果について報告する。

2. 液体窒素蒸発法による交流損失測定方法

交流損失測定は液体窒素蒸発法を用いて行った。Fig.1 に 蒸発法による交流損失測定システムの概略図を示す。本測 定では HTS サンプルコイルの発熱により蒸発した窒素ガス流 量をガスメータで測定し,発熱量へ換算して損失値とした。測 定値は校正用ヒータの入熱に対する窒素ガス蒸発量の測定 結果を用いて校正した。

3. HTS サンプルコイルと交流損失測定条件

HTS サンプルコイルは内径 40 mm, 3 ターン 30 層ソレノイド コイルで,総線材長は 15.3 m で作製した。このコイルの巻線 には臨界電流 56 A (@ 77 K, s.f.),線材幅 2.9 mm,厚さ 0.36 mm の Bi-2223 テープ線材を使用した。Fig. 2 はサンプルコイ ルへの通電電流波形の一例であり,台形波にパワーエレクト ロニクス回路により高調波を重畳させたものである。基本波の 周波数 100 Hz,高調波の波形は三角波で,周波数を 5~21 kHz,振幅を1.0~2.4 A の範囲で変化させた。このときのHTS サンプルコイルの交流損失の高調波成分による影響につい て調べた。

4. 測定結果

Fig. 3 に交流損失の測定結果を示す。横軸は基本波の電流振幅,縦軸は交流損失の測定値である。図中の△印のプロットは高調波成分を含まない基本波のみの場合の測定値で、それ以外のプロットは電流振幅の異なる 10 kHz の高調波を重畳した場合の測定値である。同図には,楕円断面超伝導線材の斜め磁界損失特性²⁾で求めた磁化損失, Norrisの式で求めた通電損失,接続部のジュール損失、全交流損失の計算値も示した。基本波での交流損失の測定値は計算値とよい一致を示しており,精度よく測定できていることがわかる。

一方,基本波に高調波電流成分が重畳されると,その振幅 の大きさに伴い交流損失は増加する結果が得られた。高調波 電流の周波数を一定にしたときの交流損失の増加分の電流 振幅依存性,ならびに電流振幅を一定にしたときの交流損失 の増加分の周波数依存性の測定結果ならびにその検討結果 については,当日報告する。



Fig. 1. Schematic view of AC loss measurement system using liquid nitrogen boil-off method.



Fig. 3. Measured AC loss characteristics.

- R. Nishio, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.142.
- K. Kajikawa, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 39, No.7 (2004) pp. 328–333.

回転磁界中の MgB2 超電導コイルの交流損失特性評価

AC loss evaluation of a MgB₂ superconducting coil in a rotating magnetic field

岩田 遥介, 寺尾 悠, 淵野 修一郎, 大崎 博之 (東大)

IWATA Yosuke, TERAO Yutaka, FUCHINO Syuichiro and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: iwata-yosuke@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

将来の電動航空機等の研究において、高出力密度化の観 点から全超電導回転機を用いることが検討されている[1]。全 超電導モータの効率を算出するためには、回転磁界中での 超電導体の交流損失を把握する必要がある。RE 系超電導体 に関しては、回転磁界を印加した場合の交流損失報告例は あるものの、MgB2 超電導体に回転磁界を印加した際の交流 損失の報告例は少ない[2]。そこで本発表では、MgB2 超電 導コイルに回転磁界を印加した場合の交流損失について、 有限要素法による電磁界解析と測定装置の検討を行った結 果を報告する。

2. 有限要素法による電磁界解析

MgB2 超電導コイルに発生する損失を見積もるために、コイル部分に発生する回転磁界の解析を JMAG-Designer®を用いて行った。一般に、コイルに発生するヒステリシス損失と結合損失は Bean モデルで近似した場合、以下のようになる。

$$W_{h} = \frac{16}{3\pi} r_{0} J_{c} \mu_{0} H_{m} f N_{1} N_{2} V$$
(1)
$$W_{c} = 2\pi \left(\frac{r_{b}}{r_{w}}\right)^{2} \mu_{0} H_{m}^{2} \frac{\omega \tau_{s}}{1 + (\omega \tau_{s})^{2}} f N_{2} V$$
(2)

W_h、W_cは横磁界ヒステリシス損失、結合損失である。roはフ ィラメント半径、r_bはフィラメント領域の半径、r_wは多芯線の半 径、N₁はフィラメント数、N₂はコイルのターン数、V はコイル 1 回巻きあたりの体積を表す。J_cは臨界電流密度、H_mは回転磁 界の振幅、fは周波数 τ_{se}は結合時定数、ωは角周波数である。 実験に用いたレーストラック形の MgB₂超電導コイルの諸元を Table 1 に示す。

次に、式(1)、(2)用いて計算した交流損失を Fig. 1 に示す。 冷却温度 20 K、周波数 5 Hz から 100 Hz で、0.15 T の磁界 を印加した場合の結合損失とヒステリシス損失の和を示してい る。実験で使用した MgB₂ 多芯線はツイストピッチが比較的長 いため、結合損失による寄与が大きくなった。

3. 測定装置

MgB2 超電導コイルに回転磁界を印加するハルバッハ配列 の6極永久磁石回転子について、有限要素解析を行った。そ の解析結果をもとに、測定装置を設計、製作した。Fig. 2 に 装置概観を示す。回転子を 2000 rpm まで回転させることが 可能で、クライオスタット内部の MgB2 超電導コイルに 100 Hz までの回転磁界を加えることができる。また、コイルのターン数 が1、21、45の箇所について温度を測定したところ、最低到達 温度は Table 2 のようになった。コイル全体は超電導状態であ るものの、ボビン側と外側の温度に比べてコイルの中間層は 温度が高いことが分かった。冷凍機による伝導冷却であるた め、このような温度差が生じてしまったと考えられる。

次に、製作した装置で測定した磁束密度分布を Fig. 3 に 示す。ホールセンサにより、回転子外径表面から 30 mm の位 置のレーストラックコイルの中心軸上の点で、r 方向と z 方向 の磁束密度を測定した。測定結果から、振幅 0.16 T 程度の 正弦波状の磁束密度がコイルに印加されていることが確認で きた。そして、このような回転磁界を超電導状態のコイルに印 加し、発生する交流損失を測定する。

4. まとめと今後の予定

有限要素法による電磁界解析を行い、回転磁界印加時の MgB₂超電導コイルに発生する交流損失を見積もった。また、 製作した測定装置についての検討を行い、冷却試験と回転 磁界の測定を行った。今後は、コイルに回転磁界を印加した 時の交流損失を測定予定である。

- Y. Terao, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (2018) 5208005
- F. Weng, et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) 104002

104002		
Table 1. Coi	l dimensions	
Number of filaments	36	
Number of coil turns	45	
Coil size (racetrack)	150×100 mm	
Bending diameter	100 mm	
Table 2. Coil	temperature	
1st roll	7.4 K	
21th roll	16.5 K	
45th roll	6.5 K	
Fig. 2 Overview of the r	10 100 rency [Hz] AC loss at 20 K PM rotor PM rotor reasurement equipment A	
0.00 0.04 0.04 -0.04 -0.04 -0.08 -0.12 -0.16		
0 2 4	6 8 10	



数値解析による無限長スパイラル薄膜線材ケーブルの交流損失評価 Numerical analyses of AC losses in spiral-coated-conductor cables

李 陽,曽我部 友輔,豊本 竜希,雨宮 尚之(京大)

LI Yang, SOGABE Yusuke, TOYOMOTO Ryuki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

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

1. Background

Single coated conductor (CC) has limited bending angle due to its tape shape, which requires special coil design and special winding machine to wind compared to traditional round cable. One approach to solve this problem is winding CCs spirally on round metal core, which is provided commercially as CORC (Conductor on Round Core) cable or wire [1]. With limited previous researches conducted on the AC loss of spiral CC cable, we investigated the AC loss property of spiral CC cable by experiments and analyses.

2. Measurement conditions

We measured ac losses of 155 mm-long spiral CC cable at 77 K by the method mentioned in [2]. Samples were placed in sinusoidal transvers magnetic field and/or carrying sinusoidal currents at various frequencies and amplitude. The measured sample consists of a copper core whose diameter is 2.5 mm and 3 layers of CCs wound around the copper core. Each layer of CCs contain two 2 mm-width CC tapes with critical current ($I_{c,tape}$) of 68 A in self-field at 77 K. The measurements in 65.44 Hz transverse magnetic field were conducted on four additional samples: sample with 2 layer and 2 CCs per layer (2L-2T), 1L-2T, 1L-1T, and copper core (Cu core). Those samples were made by rip off the outermost CCs from the original 3L-2T sample by order.

3. Analyses method

We conducted numerical analyses to simulate previous experiments. The influence of copper core was not considered and periodic boundary condition was adapted in the analyses model, which is shown in Fig. 1.

The electric field-current density (E-J) characteristic of the CC for the analyses was described by power law model whose n-value and critical current is dependent on the external magnetic field. Parameters of the E-J characteristic were assumed by two steps. Parameters that affect the dependency to magnetic field were defined the same as corresponding parameters of similar CC. Then, parameters that determine the critical current of the CC were adjusted so that it shows same critical current as the measured critical current under self-field.

Because currents in each layer were not measured during experiments and they may carry different amount of current, distribution of currents among layers need to be assumed for the analyses. We considered several possible distribution patterns and examined their validity by comparing corresponding analyses results with the measurement results. The pattern that reproduces the measurement result best was chosen for the analyses, in which we conducted simple circuit calculation with assumed parameters to obtain currents in each layer.

4. Measurements results and expectations

Magnetization measurement results are shown in Fig. 2. The shielding effect of outermost layer can be observed in Fig. 2, as more layer lower the magnetization loss per strand under small magnetic field, and samples have smaller magnetization losses than copper core. Though corresponding numerical analyses is under the progress, it should reveal the spatial distribution and temporal evolution of AC loss in spiral CC cable, which is very helpful for understanding the mechanism of AC loss in spiral CC cable.



Fig. 1 Analysis model of 3T-2L cable. Only one turn in each layer is analyzed with periodic boundary condition.



Fig. 2 Measured magnetization losses of CORC samples per unit length per strand at 65.44 Hz. Measurement results are compared with magnetization losses predicted by Brandt's equation [3] at various critical current (I_c).

Acknowledgement

This work was supported in part by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1, Japan.

References

- 1. J. D. Weiss, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 30 (2016) Art. no. 014002.
- Z. Jiang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 17 (2004) pp. 371-379.
- E. H. Brandt, et al.: Phys. Rev. B., vol. 48 (1993) pp. 12893-12906.

銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のクエンチ解析手法の検討 Examination of quench analysis methods for copper-plated scribed coated conductor

<u>曽我部 友輔</u>, 若林 洸希, 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke, WAKABAYASHI Koki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University) E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線は、これをスパイラル化することによって、高温超伝導線の安定化と 低損失化の両立を実現できる可能性のある技術である。しか し、この線がクエンチした場合の熱的・電磁気的振舞いは明ら かになっておらず、数値解析による評価が求められる。我々 は、銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のク エンチ解析に向けた検討を行ったので、これを報告する。

銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の構造とクエンチ現象

マルチフィラメント薄膜高温超伝導線は、従来のモノフィラ メント薄膜高温超伝導線の高温超伝導層を幅方向に分割す ることによって構成される。このマルチフィラメント薄膜高温超 伝導線に、各フィラメントをまたぐ形で銅分流層を複合するこ とで、Fig. 1 に示すような銅分流層複合マルチフィラメント線と なる。

クエンチが発生していない場合、銅分流層複合マルチフィ ラメント線の各フィラメントには同じ電流が流れていると仮定す る。このとき、あるフィラメントの一部がなんらかの要因により常 伝導転移した場合、そのフィラメントに流れていた電流は銅分 流層に分流するか、銅分流層を介して隣接するフィラメントに 分流する。もしフィラメント間の分流ができなければ、常伝導 転移したフィラメントにおけるジュール発熱は回避できず、焼 損につながる可能性が高い。

3. 銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のクエ ンチ解析において考慮すべき要素

銅分流層複合マルチフィラメント線のクエンチ解析では、フ ィラメント間の分流、ひいては幅方向電流成分を考慮できるこ とが重要であり、高温超伝導線の幅および長手方向の温度 分布、電流分布を考慮する必要がある。そのため、クエンチ 解析においては、幅方向・長手方向の二次元解析か、三次 元解析とする必要がある。しかし、薄膜高温超伝導線は厚さ 数μmの超伝導層をはじめ、幅・長手方向のスケールと比較 すると十分薄い、種々の異なる材質の層から構成されており、 厚さ方向の温度分布はほぼ均一であるとみなせる[1]。そのた め、幅方向・長手方向の二次元クエンチ解析が適切であると 判断した。この場合、層間の熱・電気抵抗は考慮されないこと に注意を要する。

二次元熱解析では、以下の式を解く。 $c(x,y,t)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(x,y,t)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa(x,y,t)\frac{\partial T}{\partial y}\right)$ + G(x,y,t) + Q(x,y,t) + D(x,y,t)

ここで、c は熱容量、Kは熱伝導率、G はジュール発熱、Q は 冷媒による冷却、D は外部じょう乱である。厚さ方向には温度 依存物性値を平均して用いることが必要となる。厚さ方向の 各層において異なる温度依存物性値としては、c・K・抵抗率p がある。pには超伝導層の非線形な E-J 特性を含むことが必 要であり、厳密に解くためには非線形方程式を解く必要があ るが、一時刻前の温度を使って抵抗率を計算することによりこ れを回避する方法が考えられる。

このようにして、銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温 超伝導線を幅・長手方向に空間分割し、各時刻での抵抗率 を計算することにより、Fig. 2 に示すように銅分流層複合マル チフィラメント薄膜高温超伝導線を二次元回路網によってモ デル化できる。これを解くことにより、各時刻における銅分流 層複合マルチフィラメント高温超伝導線各部の発熱および電 流の分流現象が表現できる。



Fig. 1 Conceptual view of copper-plated scribed coated conductor and parameters which can influence on quench characteristics.



謝辞

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

参考文献

1. Y. Sogabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) 5603005

NbTi-Bi2223 線の超伝導はんだ接合と電気抵抗測定

Superconducting Solder Joint and Electrical Resistance Measurement of NbTi-Bi2223 Wires

<u>渋谷直哉</u>,小林賢介,井上和朗,松本凌,内田公,西島元,竹屋浩幸,高野義彦,北口仁(NIMS) <u>SHIBUYA Masachika</u>, KOBAYASHI Kensuke, INOUE Kazuo, MATSUMOTO Ryo, UCHIDA Akira, NISHIJIMA Gen, TAKEYA Hiroyuki, TAKANO Yoshihiko, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS) E-mail: SHIBUYA.Masachika@nims.go.jp

1. はじめに

1020 MHz (24 T)級の核磁気共鳴装置(NMR)が開発され たが、NbTi(LTS)-Bi2223 間などの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[1]。さらに、1.3 GHz (30.5 T)級の次世代 NMR も計画されており、永久電流モー ドを実現するための解決策の一つとして、LTS-Bi2223 間の 超伝導接合が必要である。本研究では、超伝導はんだ(Pb-Sn-Bi)を用いた in-situ シース溶融法[2]による NbTi-Bi2223 線 の接合をおこなってきた。今回は、BiPb で覆われた NbTi 線と BiPbSn で覆われた Bi2223 線を、互いのはんだ(BiPb と BiPbSn)同士で接続することによって、NbTi-Bi2223 線の超電 導接続を試みた。接合抵抗評価は、改良した装置を用いた 減衰法[3]によっておこなった。さらに、接続状態を調べるため に、各接続端の I-V 特性評価や接合断面を分析した。

2. 実験方法

超伝導はんだは、NbTi線((株)Jastec)側 Bi/Pb=50/50 と Bi2223線((type -NX, (株)住友電工)側 Bi/Pb/Sn=40/50/10の 金属材料を、真空下の石英管中での加熱溶融によって合成 した。接合は、NbTi線を Cuシース除去後に固定した Bi-Pb はんだと Bi2223線材を固定した Bi-Pb-Sn はんだとを溶融接 続することによっておこなった。二つの接合を持つループ状 2 回巻き試料の電気抵抗評価は、減衰法によって 4.2 K で誘導 コイル電流を変えることで初期誘導電流を変化させておこな った。さらに、接合状態を確認するために、各接合試料の I-V 測定を 4.2 K で、4 端子法による自己磁場下でおこなった。 接合試料のはんだ接合部は、SEM/EDS による断面観察/分 析をおこなった。

3. 結果と考察

Fig. 1 に接合した NbTi 線と Bi2223 線の断面 SEM 写真 を示している。NbTi 線は、Cu シース材が完全に除去され、 BiPb はんだで覆われていることがわかる。Bi2223 線は 573 K で固定したために、ほとんど Pb-Sn-Bi はんだに覆われている が、中央部に Ag シース材が残留しているのがわかる。Fig.2 に、4.2 K・自己磁場での誘導電流 0.02 A における減衰測定 の結果を示した。図に示した以外にも、0.02-1.00 A の誘導電 流で減衰がみられた。自己インダクタンス $L = 1.0 \mu$ H を用いて $V_{\text{Hall}}(t) = A + Bexp{-t/(L/R)}のフィッティングから得られた抵抗$ は、誘導電流 0.02、0.05、0.10 A の平均で 1.47 nΩだった。以上の結果、接合 1 個あたりの接合抵抗は約 0.73 nΩと見積もられた。接合状態の分析結果の詳細については当日報告する。



Fig. 1 SEM photographs of cross section of NbTi and Bi2223 wires before joint.



Fig. 2 Decay curves of induction current of 0.02A at 4.2 K.

謝辞

本成果は, JST 未来社会創造事業[JPMJMI17A2]によっ て得られたものです。

- [1] K. Hashi et al., J. Magn. Reson., 256, (2017) p.30.
- [2] R. Matsumoto *et al.*, *APEX* **10**, (2017) p.093102.
- [3] K. Kobayashi et al., IEEE TAS 30, (2020) p.9000204.

Bi-Pb はんだを利用した Bi2223 線材と NbTi 線材の低抵抗接合 Low resistance joints between Bi2223 and NbTi wires using Bi-Pb solder

<u>井上和朗</u>, 渋谷 直哉, 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) <u>INOUE Kazuo</u>, SHIBUYA Masachika, 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 Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ (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接合の 超伝導化は、実現が難しい。

今回,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,その低抵抗化を図る目的で,接 合処理温度の最適化及び接合長の伸長化を実施した。

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。Bi-Pb はんだと 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 130~300℃, 1h, 加熱溶融し接合処理を行った。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。また, はんだ接合部を研磨し SEM による接合界面の断面 観察を行った。

3. 結果と考察

Fig.1に接合処理温度を変えて接合した試料の電流-電圧 特性を示す。300℃で接合処理した試料では、高い非オーム 的な抵抗を示すが、接合温度を下げるにつれて低抵抗化し、 175℃以下で接合処理した試料は、ほぼ同じ抵抗値 2.6nΩと なり、オーミックな抵抗を示した。

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。Fig.2 に 300℃ 及び 150℃の接合温度で作製した試料の接合界面の SEM 像 を示す。接合温度 300℃の試料では、中央付近の Bi2223 周 辺では Ag シースが残存しているが、外縁部では、溶融除去 され Bi2223 とはんだが直接的に接合している。一方、接合温 度 150℃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 ている。電流-電圧特性と 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-Ag-はんだ間の接合抵抗がオーミックになり、低抵抗 化することができることが分かった。

また,接合抵抗は,接合長(接合面積)と逆比例関係にあ るため,さらなる低抵抗化を図るために,接合長の伸長化を 行ったので、発表当日に合わせて報告する。

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 Current-voltage curves of the samples jointed at several temperatures



Fig.2 SEM images of cross-section in Bi2223 tapes joined at (a) 300° C and (b) 150° C with Bi-Pb solder

- H. Maeda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) p.4602409
- R. Matsumoto, et al.: Appl. Phys. Express, Vol. 10 (2017) p.093102

永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi2223 NMR の開発 (2) ~ Bi2223 モデル内層コイルの作製と永久電流試験結果 ~ Development of a persistent current 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi2223 NMR (2) - fabrication and results of persistent-mode experiments of a Bi2223 model inner coil -

<u>松竹 優一</u> (上智大); 武田 泰明 (理研); 末富 佑 (千葉大); 谷貝 剛 (上智大); 朴 任中, 柳澤 吉紀 (理研); 中井 優亨, 岩見 壮徒, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 濱田 衛, 斉藤 一功 (JASTEC) <u>MATSUTAKE Yuichi</u> (Sophia Univ.); TAKEDA Yasuaki (RIKEN); SUETOMI Yu (Chiba Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); PIAO Renzhong, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); NAKAI Ukyo, IWAMI Taketo, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); HAMADA Mamoru, SAITO Kazuyoshi (JASTEC) E-mail: yuichi.matsutake@riken.jp

1. はじめに

我々は、JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「高 温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への 社会実装」において、永久電流 1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS (REBCO-Bi2223) NMR の開発実証を目指している[1]。最大 の挑戦は、永久電流運転を実現するための超伝導接合の開 発とコイル実装であり、特に単長が比較的短いHTS線材同士 の接合は数十か所が必要になる。

1.3 GHz NMR にむけた重要な技術開発として、我々は、これまでに本学会で報告してきた Bi2223 線材間の超伝導接合 [5-7]を使った Bi2223 内層コイルによる、世界初となる永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/Bi2223 NMR の実現を目指している。この 400 MHz NMR 開発の前段階として、2 箇所の接合部および PCS を含む、Bi2223 内層コイルの端末線構造を模擬した「Bi2223 内層モデルコイル」の作製と永久電流運転試験を進めており、本講演ではその詳細について報告する。

2. Bi2223 内層モデルコイルの概要

作製したモデルコイルの外観写真を Fig. 1 に、諸元を Table 1 に、それぞれ示す。本コイルは1本の線材でダブルパ ンケーキ巻線し、端末線と Bi2223 PCS とを接合するため、接 合箇所は 2 か所である。接合部近傍のみを液体窒素に浸漬 して四端子法で通電することにより調べた 77 K 自己磁場下に おける接合 *L* は、1 μV 基準で 20 A および 52 A であった。

3. 永久電流運転試験

Fig. 1 に示すように、測定感度の観点からコイル最外層の 線材の縁に配置したホール素子でコイルが発生する磁場を 観測することで、永久電流試験を行った。液体窒素浸漬下の 77 K 自己磁場下で行った永久電流運転試験結果の一例を Fig. 2 に示す。コイル端末の接合 I_c を大きく上回る 30 A まで 外部電源からコイルに電流を流すことで励磁を行った。PCS を on にし、外部電源の電流を遮断して永久電流運転を開始 した直後は、 I_c を上回る電流が接合部に流れ込むことで磁場 が急激に減衰した。約 33 h 経過後にはコイル電流が約 7.5 A に対応する磁場で減衰は緩やかになり、その後永久電流運 転を~90 h継続した後、PCSをOFF にし消磁した。t = 33-90 h の磁場減衰を使って $B_z(t) = B_z(0)\exp(-(R/L)t)$ により計算した 抵抗値は $R = 2.5 \times 10^{-12}$ Ωであった。

このように、NMR マグネットに用いるための実コイルと同じ 端末線構造を持つ模擬コイルについて、永久電流運転を実 証することができた。今後、同じ技術を用いて実コイルの端末 処理と試験を進めていく。発表当日は、今回の模擬コイルに ついて、より低い初期電流値で開始した試験結果や、通電測 定及び永久電流試験から得られた、~10⁻¹¹-10⁻⁶Vの広い領 域での電流ー電圧特性についても議論する。

Conductor	DI-BSCCO	
Conductor	Type HT-NX (SEI)	
Conductor width/thickness [mm]	4.5/0.3	
Conductor Ic (77 K) before joint [A]	~ 200	
ID/OD/Height [mm]	95/99/9.2	
Total turns	12	
Number of layers	2	
Self-inductance, $L [\mu H]$	30	
Number of joints	2	





at 77 K in self -field

謝辞

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

- 1. H. Maeda et al., IEEE TAS 29 (2019) 4602409.
- 2. K. Ohki et al., SuST 30 (2017) 115017.
- 3. Y. Yanagisawa et al., to be submitted.
- 4. Y. Yanagisawa et al., Abstracts of CSSJ Conf. 97 (2018) 11.
- 5. Y. Takeda et al., APEX 12 (2019) 023003.
- 6. Y. Takeda et al., Abstracts of CSSJ Conf. 98 (2019) 137.
- 7. Y. Takeda et al., Abstracts of CSSJ Conf. 99 (2020) 103.

多重単層型高温超伝導コイルの電流分布解析

Numerical analysis of current distribution in stacked single-layer HTS coils

尾花 哲浩(NIFS); 七戸 希(岡山理科大)

OBANA Tetsuhiro (NIFS); NANATO Nozomu(Okayama Univ. Sci.)

E-mail: obana.tetsuhiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合用超電導導体の通電試験を行うために、大電流通 電を可能にする小型でかつ軽量な電源の開発を進めている。 本電源は HTS コイルを使用した変圧器で構成されており、1 次コイルと2次コイルに Bi2223 テープを使用している[1,2]。1 次コイルは直径の異なる2つのコイル巻線からなり、2次コイル は垂直に積層した複数の単層コイル巻線からなる。本講演で は、集中定数回路でモデル化した2次コイルの電流分布解析 について発表する。

2. 多重単層型高温超伝導コイル

2次コイルは、10個の単層コイルを垂直に積み重ねた (Stacked single-layer:SSL)コイル形状であり、コイルの直径と 高さはそれぞれ90mmと93mmである。Fig.1にSSLコイル形 状の概略図を示す。各単層コイルには、絶縁処理を施した幅 4mmのBi2223テープ(住友電工DI-BSCCO Type H)を使用 した。各単層コイル巻線は、コイル巻線端部でBi2223テープ からなる電流リードにハンダ接続される。Fig.2に、2次コイル の回路図を示す。SSLコイル部は、10個の並列回路から構成 される。

3. 解析モデル

10個の単層コイル巻線からなる2次コイルの上下対称性を 考慮して、5個のコイル巻線で構成される解析モデルを作成 した。モデルの回路方程式を下記に示す。

$$\sum_{n=1}^{5} L_{m,n} \frac{di_m}{dt} + R_m \cdot i_m = V \qquad (1 \le m \le 5)$$

ここで、 i_m は単層コイル巻線 m での電流値、 R_m は単層コイル 巻線 m での電気抵抗、V は単層コイルの両端電圧、 $L_{m,n}$ は単 層コイル巻線 mと単層コイル巻線 nの間の相互インダクタン スである。ただし、単層コイル巻線 mが単層コイル巻線 nと同 じ位置である場合、 $L_{m,n}$ は自己インダクタンスである。単層コ イル巻線 mの電流値は次式を満たす。

$$\sum_{m=1}^{5} i_m = I_{total}$$

ここで、Itotal はコイル巻線部の全電流である。また、単層コイル巻線 m での電気抵抗は次の式で与えられる。

$$R_m = R_{t,m} + R_{sc,m}$$

ここで、 $R_{l,m}$ は単層コイル巻線 mの端部での接続抵抗、 $R_{sc,m}$ は超伝導特性を考慮した単層コイル巻線 mの電気抵抗である。

$$R_{sc,m} = \frac{1}{i_m} \cdot E_c \cdot l \cdot \left(\frac{i_m}{i_{c,m}}\right)^N$$

ここで、*E*_cは 10 μV/m で定義される電界基準、*I*は単層コイル 巻線長、*i*_cmは単層コイル巻線 m の *I*_c N は N 値である。

4. 解析結果

単層コイル巻線の $I_c \geq N$ 値を 160A と 17、コイル端部の接 続抵抗を 7.5 μ Qと設定した解析モデルを使用して、励磁時に おける2次コイルの発生電圧を求めた。 Fig.3 に、コイル両端 における発生電圧の実験結果と計算結果を示す。コイル電圧 は通電電流に対して線形に増加し、2次コイルの設計上の Ic である 1600A 付近を超えると急激に増加する結果となった。 計算結果は実験結果とよく一致しており、解析モデルの妥当 性を示すことができた。発表当日は、2次コイルの電流分布に ついて報告する。



Fig. 1 Schematic view of the SSL coil configuration.









謝辞

本研究は, NIFSの一般共同研究(NIFS19KECA072)の助成 を受けたものです。

- N. Nanato et al., Journal of Physics: Conf. Series 1054, 012070 (2018).
- N. Nanato et al., Journal of Physics: Conf. Series 1293, 012072 (2019).

超電導ケーブルの臨界電流測定に及ぼす冷却時間の影響 Effect of Cooling Period on Critical Current Measurement of Superconducting Cable

<u>向山 晋一</u>(古河電工);松下 照男,木内 勝(九工大);西島 元(NIMS); 増田 孝人(住友電工);

青木 裕治 (昭和電線); 中井 昭暢 (日本電線工業会)

MUKOYAMA S. (FEC); MATSUSHITA T., KIUCHI M. (Kyusyu Inst. Tech.); NISHIJIMA G. (NIMS); MASUDA T. (SEI);

AOKI Y. (SHOWA Cable S.); NAKAI A. (JCMA)

E-mail: shinichi.mukoyama@furukawaelectric.com

1. Introduction

In recent, the development of superconducting power cables has been actively carried out in each country, and field verification tests are also being conducted. In addition, during the progress of practical use of superconducting cables, the International Standards (IEC63075), regarding cable test methods. has been issued by the International Electrotechnical Commission. It is mentioned in the standard that the critical current test method of superconducting cables has to be standardized. We are considering the test method will be proposed from Japan, the secretariat of TC90. In the previous CSJ conference, we reported the effect of current transfer on the I_c measurements, which is required for studying the standard. This time, we investigated the effect of cooling as a measurement process.

2. Draft standard of I_c measurement method

The critical current of the superconducting cable is determined by measuring property of the voltage (U) and current (I), while the cable is cooled with liquid nitrogen under atmospheric pressure in an open container. In the draft standard, the single-core cable, the three-core cables, and three-phase concentric cable are handling, and in the case of single-core cables and three-core cables, the cable with or without the superconducting shield is dealt. A test sample is cut out with a predetermined length (1 m or more), and current terminals and voltage taps are constructed at both ends of the sample. Figure 1 shows the diagram of Ic measuring equipment, where the sample has the shield layer. The current terminals are connected to a DC power supply with a copper insulating cable. It is recommended that each voltage tap be soldered inside the current terminals and have enough distance from the current terminal to reduce the effects of current transfer. The critical current is defined by the current value when a predetermined electric field reference ($E_c = 1 \, \mu V/cm$) is reached.



Fig. 1 Diagram of I_c measurement equipment

3. Effect of cooling time

To cool the sample for I_c measurement, liquid nitrogen is filled the container containing the sample, and it is sure that the sample is completely immersed in liquid nitrogen. After the sample is completely immersed in liquid nitrogen, it must be held for a period time to cool it completely. I_c measurement of the cable sample is conducted to determine the time for maintaining cooling. The sample is manufactured using BSCCO tapes, produced by SEI, as the specifications shown in Table 1. Fig. 2 shows change of the I_c value of the conductor layer and the shield layer with the holding time after cooling with liquid nitrogen. Here, 0 minutes is the time when the sample is completely immersed in liquid nitrogen. From this result, it can be seen that the increase of I_c in the shield layer is saturated in 40 minutes, and the increase of I_c in the conductor layer is saturated in 90 minutes. Based on this result, the recommended standby time will be discussed other country's experts during making the standard.

Table 1 Specification of HTS cable sample

	N	Number	Winding		Diameter	Distance between
	Layer	Bi2223	direction	Pitch	(mm)	V-taps
		wires		(mm)		(mm)
Conductor	1 st	14	S	250	—	1 606
Conductor	2 nd	15	Z	320	—	1,090
Shield	Single	26	S	600	39.6	1,193



Fig. 2 HTS cable sample for I_c measurement

References

- 1. IEC63075:Superconducting AC power cables and their accessories for rated voltages from 6 kV to 500 kV Test methods and requirements
- MATSUSHITA T., et al: Abstracts of CSJ Conference, vol. 99 P7 (2020)

IPMSM の埋込磁石としてのバルク超電導体の電磁現象

Electromagnetic phenomena of bulk superconductors as interior permanent magnets in IPMSM

<u>三村 僚太郎</u>, 大崎 博之, 寺尾 悠(東大) <u>MIMURA Ryotaro</u>, OHSAKI Hiroyuki, TERAO Yutaka (Univ. of Tokyo) E-mail: r-mimura-9936@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

IPMSM(埋込磁石同期モータ)はその突極性により、マグネットトルクとリラクタンストルクの両方を利用できる。また、バルク超電導体は着磁により強力な磁石として利用できるほか、外部磁界に対し磁束保存する性質も併せ持っている。IPMSMの永久磁石部分をバルク超電導体に置き換えることで、永久磁石より強い界磁と異なる磁路での磁気抵抗差の増大により、マグネットトルクとリラクタンストルクの向上が期待される[1,2]。しかし、回転子中に埋め込まれたバルク超電導体の詳細な電磁現象は明らかにされたとは言い難い。

本発表では、回転子中のバルク超電導体の電磁的振る舞 いについて,有限要素法を用いた数値解析の結果を報告す る。

2. 解析モデルと解析条件

Fig. 1 に解析対象の超電導 IPMSM の二次元モデルを, Table 1. にモータの寸法を示す。超電導解析は有限要素法 ソフト COMSOL を用いて行う。COMSOL を用いることで,超 電導の特性を考慮したモデル(本研究では n 値モデル, Kim モデルを導入した)を電磁界方程式に組み込むことができる。 本研究の解析手法は以下のとおりである。まず固定子側を A 法によって解き,その解を境界条件として回転子側を H 法に よって解く。境界条件においては弱形式を用いている[3]。

バルク超電導体の挿入されていないリラクタンスモー タとバルク超電導体の挿入されたモータとでどのように 電磁界が異なるかを検証する。従ってバルク超電導体は ZFC (ゼロ磁場中冷却)を想定している。超電導解析はバ ルク超電導体に強い非線形性があることから、解析の安 定のため他の材料については線形を仮定している。固定 子側の電機子巻線は分布巻であり、相電流 10 A の三相交 流を流している。

3. 解析結果

解析はモータ内部の電磁界が定常状態になるまでの時間 で行った。Fig. 2 にバルク超電導体の磁束密度分布を, Fig. 3 に電流密度分布を示す。図に示される流線派を磁束線表し ている。超電導体内部を単に空気領域とした場合と比較する と,空気領域の場合最大 20 mT 程度の磁束密度の侵入が みられるが,超電導体の場合,ほとんどの領域で磁束の侵入 が見られない。電流密度について,電流の流れない空気領 域に対して,バルク超電導体の表面付近に電流が 60000 kA/m²程度流れることで,バルク超電導体内部への磁束侵入 を妨げている。Fig. 3 a)が示すコンター図で見られるのは主 に固定子の渦電流である。空気領域の場合と比較すると磁気 遮蔽の効果が確認できることから,バルク超電導体挿入時の 回転子の逆突極性がより強いと言える。

4. まとめと今後の課題

バルク超電導体を回転子内部に挿入したモータの電磁界 を解析した。磁路形成に関して,超電導体の磁気遮蔽効果 により,より強い逆突極性を得ることがわかった。今後はバル ク超電導体を着磁させた状態での解析,さらには着磁方法に ついて検討の余地がある。





Table 1. Motor dimensions		
Number of poles	6	
Rotor diameter	74.2 mm	
Stator diameter	115 mm	
Effective length	40 mm	
Thickness of bulks	5 mm	



Fig. 2 Flux density distribution



Fig. 3 Current density distribution

- Y. Terao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.154
- W. Akada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.136
- Brambilla, Roberto, et al. "A finite-element method framework for modeling rotating machines with superconducting windings," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.28 (2018) 5207511

パイプ状回転子を持つ高温超伝導誘導電動機の特性評価 The Property Evaluation of The Pipe Shape Rotors in The High Temperature Superconducting Induction Motor

<u>大石 竣介</u>、金丸 凌大、川越 明史 (鹿児島大学); 三浦 峻、岩熊 成卓 (九州大学); 和泉 輝郎 (産業総合研究所); 梅野 高裕 (大陽日酸) <u>SHUNSUKE Oishi</u>, RYOTA Kanemaru, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University); SHUN Miura, NARITADA Iwakuma (Kyusyu University); TERUO Waizumi (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology); TAKAHIRO Umeno (Taiyo Nippon Sanso Corporation) E-mail:k3101442@kadai.jp

1. はじめに

近年の航空機分野では CO2 削減や騒音が課題とされてい る。課題解決の一つの方法として、ジェットエンジンを電動機 に置き換えることが検討されている。巻線に超伝導線材を用 いることにより、軽量かつ高効率・高出力の電気推進システム の実現が可能であることから、航空機用全超伝導電気推進シ ステムの開発プロジェクトが進められている。本研究では、軽 量で作製の容易なHTS 誘導電動機を開発し[1]、航空機内の 様々なシステムの軽量化を目標としている。ここでは、回転子 をパイプ形状として空芯にすることを目指している。パイプ形 状回転子をもつ HTS 誘導電動機の開発のために、電磁的、 機械的、熱的基本特性を評価することが必要である。そこで、 有限要素法を用いた磁界解析によってパイプ形状回転子の 電磁特性の評価を行った。具体的には、回転磁界中におけ るパイプ状回転子のトルク特性を算出した。

2. 解析条件

電機子巻線には、REBCO線の使用を想定している。ターン数は500ターンで、コイルピッチ180°の集中巻のモデルを 作成した。この電機子巻線に定電流モードで振幅200Aの三 相交流を通電して回転磁界を生成し、回転子のトルクを解析 した。本解析は、有限要素法解析ソフトJMAGを用いて行った。

回転子は、厚み 5 mm、内径 150 mm、長さ 220 mm とした。 また、パイプ形状回転子の材質を銅、超伝導の二種類として 解析を行った。

銅パイプ型回転子では、回転子を止めた状態で電源周波 数を0.001 Hz~60 Hzと変化させることにより、すべり周波数ト ルク特性を算出した。銅の抵抗率は、室温中、液体窒素中の 2 条件とした。超伝導パイプ型回転子では、回転子の回転速 度に時刻依存性を持たせて、同期速度で回転している状態 の解析を行った。1150 rpm からスタートし、0.1 sec で 1200 rpm に到達させている。回転磁界の回転速度は 1200 rpm である。 すなわち、わずかにすべりが生じている状態から同期運転中 に移行した解析を行っている。超伝導パイプ型回転子には、n 値モデルの E-J 特性を考慮した。n 値は 16 とした。臨界電流 密度は 3×10⁸ [A/m²]として解析を行った。

3. 解析結果および考察

Fig.1に、銅パイプ型回転子のすべり周波数-トルク特性の 計算結果を示す。停動トルクは 450 Nm で、抵抗率の違いで 変化はない。これは誘導電動機の低動トルクの大きさは、二 次抵抗に依存しないというよく知られたものである。銅の抵抗 率を液体窒素中に変化させたとき、すべり周波数 1.2 Hz でト ルク 350Nm となった。電源周波数 60 Hz で運転したとすると、 出力は 129 kW であり、二次銅損は 2.6 kW となる。この時、冷 却ペナルティを 10 倍とすると回転子の損失は 28.6 kW 程度 である。抵抗率が室温中の場合、同トルクの出力が出るすべ り周波数 10 Hz のとき、出力 110 kW、二次銅損は 22 kW で ある。温度の差によって、出力に対する回転子損失の割合に は、大きな差がない。このことは、銅パイプ型回転子を冷媒中 に入れた応用にも実現可能性があることを示している。

Fig. 2に、超伝導パイプ回転子の時刻速度依存性および トルク特性を示す。同期回転時に270 Nmの平均トルクが 発生しており、同期運転が可能なことが分かる。しかし、 トルクリップルが大きい。これは、回転子位置付近の磁束 密度分布に高調波成分が含まれていることが原因と考え られる。電機子巻線を分布巻にするなど、磁束密度分布を 正弦波に近づけることにより、トルクリップルが軽減さ れると考えられる。

4. まとめ

直径150 mm程度のパイプ状回転子を持つ誘導電動機は、 銅パイプでも100 kW級の出力が可能であること、冷媒中に回 転子を入れても大きく効率が低下しないことを示した。また超 伝導回転子の同期運転が可能であること、トルクリップルが大 きいため、電機子巻線の施し方に工夫が必要であることを示 した。

参考文献

 K. Ozaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 30, No. 4 (2020) 8984315





Fig. 2 Superconductinmg pipe rotor time dependence and torque characteristics

Fig. 1 Rotor copper pipe slip frequency-torque characteristic

有限要素法によるマルチシード YBCO 超電導バルクと永久磁石との間の浮上力解析

Finite element method analysis of a levitation force between a multi-seeded YBCO bulk superconductor and a permanent magnet

<u>石田 裕亮</u>, 尾上 雄海, アフマドドア, 寺尾 悠, 大崎 博之, 桜井 雄基, 松村 知岳, 片山 伸彦 (東大) <u>ISHIDA Yusuke</u>, ONOUE Takemi, AHMAD Doa, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki, SAKURAI Yuki, MATSUMURA Tomotake, KATAYAMA Nobuhiko (Univ. of Tokyo) E-mail: ishida-yusuke537@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

希土類(RE)系高温超電導体は高い臨界温度と優れた臨 界電流密度特性を有するため、超電導線材やバルク超電導 体として応用研究が活発に行われている。バルク超電導体の 大型化にはマルチシード法が有効である。しかしながら、マル チシードバルクはドメイン間に存在する結晶粒界によって境 界部の臨界電流密度特性が悪化することが知られており、マ ルチシードバルクを用いる超電導磁気ベアリングの解析には この臨界電流密度分布を考慮することが必要である。筆者ら はマルチシードバルクの着磁特性を、ドメイン間に低臨界電 流密度の領域を設定することで有限要素法により解析し、実 験結果との比較を行った[1]。今回はマルチシードバルクと永 久磁石間の浮上力特性について解析を行った結果を報告す る。

2. 数值解析手法

超電導電磁界解析は、超電導体の持つ強い非線形性から安定性が低い。そこで、本研究では解析負荷の低減・安定性向上のため解析領域をFig. 1のように分け、複数の支配方程式を用い、複数回の有限要素法解析を行う[2]。解析は商用有限要素法解析ソフトウェアCOMSOL-Multiphysics® ver5.5を用いて行った。浮上力解析は以下の様に2ステップからなる。

- 1. 領域A+BでのΩ法による永久磁石が作り出す磁界を 解析する。
- 領域BでのH法による超電導電磁界解析(2a)と、A-V 法により領域A+Bに超電導電流が発生させる磁界の 解析(2b)を連成して解析する。(2a)の境界条件H_rとし て磁石が作り出す磁界H_{pM}と超電導電流の作る磁界 H_{self}の和を与える(式(1-2))。

$$H_{\Gamma} = H_{ext} + H_{self} \tag{1}$$

$$H_{ext} = T_t H_{PM} \tag{2}$$

ただし、 T_t は移動演算子である。

Fig. 2に解析に用いた永久磁石とマルチシードバルクの FEMモデルを示す。今回解析には69 mm×36 mm×18 mmの 3シードバルクを用い、臨界電流密度分布を考慮するために 幅1 mmの臨界電流密度の低い領域(以下接合部)を設定した。 解析に用いたパラメータをTable. 1に示す。それぞれの臨界 電流密度・Kimモデルパラメータは参考文献3を基にフィットを 行い決定した。初期ギャップ10 mmで磁場中冷却を行った場 合を想定し、永久磁石を3 mm降下させその後上昇させた場 合の浮上力を解析した。また、接合部に低効率1 ohm mを設 定、つまりマルチシードバルクを3つのシングルドメインのバル クに置き換えた場合についても同様に浮上力解析を行った。

Table	1.	Analytical	conditions
-------	----	------------	------------

Critical current density at the domains	$2.5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$
Conductivity at the junctions for the case 1	$7.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$
Kim model parameter	0.3 T
n-value	21
PM remanent flux density	1.2 T

3. 結果と今後の予定

浮上力の解析結果をFig. 3に示す。浮上力は全体的にマ ルチシードバルクが優れる結果となり、高さ7 mmでの浮上力 はマルチシードバルクがシングルドメイン×3に対し1.7倍強い 浮上力を発揮している。これは参考文献4の傾向とも一致して いる。今後は、実験的に本解析手法の妥当性を確かめ、マル チシードバルクを用いた超電導磁気ベアリングの解析に応用 する予定である。











- 1. Y. Ishida, et al., Abstracts of CSSJ Conference, 2020.
- 2. 榎田壽史,東京大学大学院電気系工学科修士論文.
- Z. Feng, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 22 6800110 (2012).
- Z. Feng, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 22 6800210 (2012).

クロス型ヨークの大きさがバルク磁石の捕捉磁場特性に及ぼす影響 Influence of the size of cross-shaped yoke on the trapped field performance of bulk magnet

<u>横山 和哉</u>(足利大);岡 徹雄(芝浦工大) <u>YOKOYAMA Kazuya</u>, (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT) E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石は、小型な装置で従来の永久磁石や電 磁石を超える強磁場を容易に発生させることができるため、 様々な応用が検討されている。その中で、大型風力発電用の 発電機や航空機用のモーター等への応用においては、機器 の小型・軽量化の観点から、バルク磁石の発生磁場の向上及 び着磁の簡略化が求められている。また、バルク磁石の応用 においては着磁も課題であり、冷却が必要等の構造的な制 約から、外部で着磁して組み込むことは難しく、オンサイトで の着磁が必要である。例えば、回転子をバルク磁石とする場 合、界磁用の鉄心コア付のコイルで、パルス着磁をすることと なる。鉄心は発電機やモーターとして使用する場合には、磁 気回路を形成する役割をなしている。また、着磁時において は、パルス幅を延ばして、着磁効率を向上する役割をなして いる。一方で、鉄心を増やすと機器全体の重量が増すことに なり、前述の通り、小型・軽量化においてはデメリットとなる。

著者らは、近年、鉄心が着磁特性に及ぼす影響を検討し ており、これまでに一般的な円柱型に比べて、クロス型ヨーク を用いることで着磁効率が向上することを明らかにした。本文 は、クロス型ヨークの大きさを、これまでの幅 15 mm から幅 10 mm に小さくした場合について、両者の着磁特性を比較する。

2. 実験方法

Fig.1に、本実験で用いた幅15mm及び幅10mmの純鉄 製のクロス型ヨークの外観写真を示す。高さは両者とも47 mm であり,重さはそれぞれ780g及び610gである。なお,クロス 型ヨークはバルク体の結晶成長領域(GSR)に配置した。φ60 ×20 mm の GdBCO バルク体(日本製鉄製)を,2 段 GM 冷凍機 (RM20, アルバック製)のコールドヘッドの先端に接続したサン プルステージに配置し、SI 及び真空チャンバを取り付けて真空 排気した後, 20~50 K に冷却する。各温度において 3.9~6.2 Tのパルス磁場(立上時間:10 ms, 全パルス幅:100 ms)を1 回印加し,着磁中の磁束密度及び温度の時間変化を,試料 表面の中央部に貼りつけたホールセンサ(BHT-921, F.W.BELL 製) 及びセルノックス抵抗温度計 (CX-1030-SD -HT-1.4L/J, Lakeshore 製)により測定した。磁場印加後, 着 磁コイルを取り外し、3D ホールセンサ(BH-703, F.W.BELL 製)を用いて磁極表面(試料表面から約4mm)の磁束密度分 布を測定した。また,実測データから総磁束量を算出した。

3. 結果及び考察

Fig. 2 に総磁束量の印加磁場依存性をそれぞれ示す。これらの結果から、両者にほとんど差はなく、小型のヨークでも 捕捉磁場が劣化しないことが分かった。Fig. 3 に単位重さ当たりの総磁束量の比較を示す。重さが約80%程度になったため、それらの値は約24%の向上を確認した。ヨークの量を減 らすと試料に長く磁場を曝す効果が小さくなり,捕捉磁場が減 少することが懸念されたが,幅10 mm に小さくしても問題がな いことが確認できた。

4. まとめ

本文は、従来使用してきた幅 15 mm のクロス型ヨークと、新 たに作製した幅 10 mm のヨークについて、パルス着磁による 捕捉磁場特性を評価した。その結果、ヨークを小型化しても 捕捉磁場は減少せず、単位重さ当たりの総磁束量を比較す ると約 27%の増大となった。今後、さらなる小型化の検討と、 さらに異なる形状等についても検討する予定である。



Fig. 2. Comparison of total magnetic flux between M- and S-size yoke.



Fig. 3. Comparison of total magnetic flux per unit weight between M- and S-size yoke.

— 123 —

Fig. 1. Photograph of cross-shaped yoke with different size

Twisted stacked-tape cable 導体の自己磁場測定 Self-field measurements of twisted stacked-tape cable conductor

尾花 哲浩, 柳長門, 力石浩孝, 濱口真司, 寺﨑義朗(NIFS); 高安真(MIT) OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, CHIKARAISHI Hirotaka, HAMAGUCHI Shinji, TERAZAKI Yoshiro(NIFS);

TAKAYASU Makoto(MIT)

E-mail: obana.tetsuhiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合用マグネットなどの大電流通電を必要とする超伝導 機器のために、REBCO テープを使用した様々な大電流用高 温超伝導導体が提案されている。その一つとして、マサチュ ーセッツ工科大学にて、Twisted stacked-tape cable (TSTC) 導体の開発が進められている[1,2]。TSTC 導体は、多数の REBCO テープから構成された積層撚線型ケーブルを、銅フ ォーマー内に埋め込んだ構造である。本講演では、直流通電 時における TSTC 導体の自己磁場測定と磁場計算について 発表する。

2. 導体サンプル

導体サンプルは G10 ホルダーで固定された 1 ターン形状 のTSTC 導体からなる。Fig.1 に導体サンプル内でのTSTC 導 体の3次元形状を示す。1ターンコイル形状を作製するために、 導体は180mmの半ツイストピッチごとに曲げ加工を行った。ま た、サンプル端部では TSTC と銅板をハンダで接続した。 TSTC 導体の断面を Fig.2 に示す。本導体では、48 枚の REBCOテープ(幅6mm)からなるTSTCを安定化材である銅フ ォーマー内に配置し、REBCO テープ間のギャップ、及び TSTC と銅フォーマー間のギャップにはハンダを使用した。ま た、TSTCと銅フォーマーは冷却チャネルに接触した状態で、 銅製 U 字型チャネル内に配置した。U 字型チャネル内のボイ ドはハンダで埋めている。



Fig. 1 Configuration of the TSTC conductor in the sample.



Fig. 2 Cross-section of the TSTC conductor.

3. 自己磁場の測定結果と計算結果の比較

導体サンプルへの直流通電は、NIFS の大口径高磁場試 験装置を使用して実施した[2]。磁場測定では、TSTC 導体か ら発生する y 方向の磁場を測定した。Fig.3 に、ホール素子の 配置と TSTC 断面の位置関係を示す。Fig.4 にサンプル温度 が34 K に制御された状態で、サンプルへ10 kA 通電した際 の自己磁場測定結果を示す。

TSTCを模擬した解析モデルを使用して、4つのホール素 子を配置した軸上における2次元磁場計算を行った。解析モ デルは、電流分布が均一なTSTC断面で構成されたモデルで ある。Fig.4に、通電電流値が10 kAの場合の計算結果を示す。 計算結果は測定結果とよく一致していることが分かった。その 結果、通電電流値が10 kAでサンプル温度が34 Kの場合、 TSTC断面内の電流分布が均一であると考えられる。







Fig. 4 Comparison between measurements and calculations for self-fields when the conductor current is 10 kA.

- 1. M. Takayasu, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol.25 (2012) 014011.
- 2. T. Obana, et al.: Cryogenics, Vol. 105 (2020) 103012.

高温超電導スケルトン・サイクロトロンにおける 非円形無絶縁 REBCO コイルの補強構造に関する検討 Numerical evaluation on Reinforced Structure for Noncircular No-Insulation REBCO coil

三宅 雄大, 仲井 悠貴, 井上 良太, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大学);野口 聡(北海道大学);
 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);福田 光宏(大阪大学);石山 敦士(早稲田大学)
 <u>MIYAKE Yuta</u>, NAKAI Yuki, INOUE Ryota, KIM Seokbeom, UEDA Hiroshi (Okayama University);
 NOGUCHI So (Hokkaido University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.);
 FUKUDA Mitsuhiro (Osaka University); ISHIYAMA Atsushi(Waseda University)
 E-mail: p0pr8zo3@s.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

我々はエネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高 温超電導空芯型サイクロトロン(スケルトン・サイクロト ロン)[1][2]の開発に取り組んでいる.このスケルトン・ サイクロトロンのコイルシステムは REBCO コイルから 構成されており,高磁場化や高電流密度化が可能となる が,その一方でコイルの経験する電磁力は著しく増加す る.よって,この電磁力に耐えうるコイルの高機械強度 化が課題となる.この解決策として YOROI 構造[3]による 補強が先行研究によって提案されており,本研究では非 円形無絶縁 REBCO コイルにおける YOROI 構造の有効性 を検討すべく,実証用小型モデルのコイルシステムを対 象に無絶縁コイルの電磁力および応力の評価を数値解析 により行ったので報告する.

2. 無絶縁高温超電導コイルと電磁力

スケルトン・サイクロトロン用マルチコイルシステム の高強度及び小型化を実現するためには、高温超電導コ イルの高電流密度化が必要不可欠である.しかし,一方 で運転時の電流密度を上げることは熱的安定性の低下を 招き、クエンチ、常伝導転移事故を引き起こす原因とな この高電流密度化と高熱的安定性の二律背反の関係 る. 、 を両立させる技術として無絶縁高温超電導コイル[4]がこ れまでに提案されており、マルチコイルシステムへの適 用を検討している. 無絶縁コイルは, 励磁・減磁時ある いはクエンチ発生時の電流分布が、従来の絶縁コイルと は異なり、巻線周方向だけでなく、ターン間方向にも電 流が流れる.従って電磁力も絶縁コイルの想定とは異な る挙動を示す. 今回は、まず実証用小型コイルシステム を対象に、無絶縁コイルの電流分布を集中定数回路[5]で 求め, 電磁力, 応力分布を評価した.

3. 解析条件 · 解析結果

スケルトン・サイクロトロン実証用小型モデルの非円形セク ターコイルを対象として電磁力及び応力の計算を数値解析プ ログラムを用いて行った. 通電電流は sweep rate=0.1 A/s で 540 A まで励磁するものとし, 運転温度は 30 K とした. 接触抵 抗は 70 mΩ/cm² としている. 一例として実証用モデルの非円 形コイルの断面に一様な周方向の電流密度を与えた場合に 計算された周方向の電磁応力分布を図 2 に示す.これは無 絶縁コイルの特徴である径方向への電流の流れは考慮され ておらず,周方向成分の電流のみを考慮して得られた解析結 果となっている.しかし,無絶縁高温超電導コイルでは周方向 電流だけでなく, 隣のターンへ径方向電流が生じる. 数値解 析プログラムにより算出した無絶縁高温超電導コイルである Main coil #1~#4とSector coil の電流分布を周方向電流分布, 径方向電流分布に分けてFig.3の(a)と(b)に示す. Fig.3より励 磁中に Main coil #4 において径方向に最大で 28 A 程分流し ている. Main coil #3 においても 20.4 A 程分流しており, 他の コイルではあまり径方向に分流が起きておらず,他のコイルで



Fig.1 Overview of the skeleton cyclotron demonstration model



Fig.2 Circumferential electromagnetic stress distribution of a non-circular coil in demonstration model



Fig.3 Numerical results of (a)circumferential current distribution (b) radial current distribution functions from time in main coil #1~#4, Sector coil

はこれらのコイルに比べてわずかな電流しか分流が起きてい なかった.このことから大口径コイルであるほど接触抵抗の影 響で径方向に分流しやすいことがわかる.径方向成分の電流 が大きくなるほど周方向成分の電磁力が大きくなり,かつ磁場 分布にも影響を及ぼすことから,周方向電流のみを考慮して いるモデルで想定している電磁力分布と比べてより複雑なも のになることが予想される.これらの要因から,YOROI 構造の 持つ本来の応力分担効果が発揮できない可能性がある.こ の電流分布に基づいた電磁力及び電磁応力は当日報告する.

- [1] H. Ueda ,et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4100205 (2013)
- [2] 2019 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p02 (2019)
- [3] X. Wang, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 9002005(2014)
- [4] Seungyong Hahn, Dong Keun Park, Juan Bascuñán, Yukikazu Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation,", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp.1592-1595, Jun. 2011.
- [5] S. Noguchi, et al., 低温工学 vol. 54 No. 2 (2019)

極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の破壊靭性値と オーステナイト相の安定度との相関

Correlation between the Fracture Toughness of Austenite Stainless Steel and Stability of the Austenite Phase in Cryogenic State

<u>櫻井 武尊</u>, 井口 将秀, 中平 昌隆, 小泉 徳潔(量研機構); 齊藤 徹(神戸工業試験場) <u>SAKURAI Takeru</u>, IGUCHI Masahide, NAKAHIRA Masataka, KOIZUMI Norikiyo (QST); SAITO Toru (KMTL) E-mail: sakurai.takeru@qst.go.jp

1. はじめに

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性に優れ極低温 でも靭性が低下しにくい面心立方格子を持つため、極低 温環境の液化天然ガスタンクや超伝導設備に使われてい る。ITER 向けトロイダル磁場(TF)コイルは、液体ヘリウ ム温度(4K)において巨大な電磁力が加わる。そのため、 構造材料として ITER 設計要求を満たすオーステナイト 系ステンレス鋼を製造する必要があり、その総量は約 5,000 トンという膨大な量になる。設計要求には、電磁力 に起因する不安定破壊防止の観点から、破壊靭性値が含 まれており、材料製造時にこれを満足する必要がある。4 K における破壊靭性値を実験的に得るには、試験片製作 及び試験実施に時間と費用がかかる。4Kの引張特性は、 室温の引張試験結果と化学成分から精度よく予測できる ことが知られており、構造材料製造時の品質管理にこの 手法を適用することで、合理的な材料調達に資している。 一方、破壊靭性値そのものを精度よく予測する手法は、 これまで実用段階のものがないのが実情である。そこで、 合理的な品質管理を実現するためには、破壊靭性値を推 定するための新たな指標の検討が必要となっている。

著者らは、実機大試作材及び複数の製造方法や化学組 成で製造された材料に対して、破壊靭性試験結果と新た な指標の相関を評価し、4Kでの破壊靭性値を簡易的に予 測する、新たな評価手法を確立することとした。本論文 では、これらの結果を報告する。

2. 極低温用材料の製作

供試材は窒素の固溶強化作用を利用して、極低温にお ける降伏応力を強化した 316LN 鋼及び JJ1 鋼 (12Cr-12Ni-10Mn-5Mo-0.2N)である。供試材の形状は実機 大の極厚(540mm)材、異形鍛造材、曲げ鍛造材など9種類 18 体とした。固溶化熱処理条件は 1283 K~1373 K とし、 板厚により保持時間は 4~14 時間とした。供試材は固溶 化熱処理後、水冷した。代表的な材料を Fig.1 に示す。

3. 極低温用材料試験

2 章で製作した材料に対し、以下の試験を実施した。 破壊靭性試験以外の項目は過去に破壊靭性値と相関があ ると報告されたパラメータを選択した。

a) 4 K 破壊靭性試験:試験は1インチのコンパクト・テンション(CT)試験片を用いて、JIS Z 2284 に則って実施した。除荷コンプライアンス法により弾塑性破壊靭性 J_{IC} を求め、平面ひずみ破壊靭性値 $K_{IC}(J)$ [MPam^{0.5}]を評価した。以後簡便のために、 $K_{IC}(J)$ を K_{IC} と記す。総試験数は76であり、全試験結果の平均は J_{IC} : 229 kJ/m², K_{IC} : 224 MPam^{0.5}であった。

b) 4 K 引張試験: 試験は直径 7 mm の丸棒試験片を用いて、 JIS Z 2277 に則って実施した。降伏応力、引張強さは、試 験片平行部にひずみゲージを貼り試験を実施した。総試 験数は 76 であり、降伏応力の平均は 1080 MPa, 引張強さ の平均は 1657 MPa であった。

c) シャルピー衝撃試験:試験はASTME23に則って実施

した。総試験数は 42、全試験結果の平均は 230 J であった。 d) 化学成分および結晶粒度分析:化学成分は ASTM A 751 に、結晶粒度は ASTM E 112 にそれぞれ則って分析した。

4. 極低温における破壊靭性値との相関検討

3 章で取得したデータを基に、破壊靭性値と相関があると されるパラメータについて、相関の強弱を線形回帰および二 次回帰から R²値を算出して評価した。

線形/二次回帰の R² 値は、1) 77 K シャルピー衝撃試験: 0.0003/0.16、2) 4 K 降伏応力: 0.02/0.02、3) 窒素量: 0.02/0.32、4) 結晶粒度: 0.24/0.25 といずれも弱い相関し かなかった。これらの原因を調査するため、試験後の破 壊靭性試験片の破面観察を行った。過去に極低温におけ る引張試験でオーステナイト系ステンレス鋼であっても 加工誘起マルテンサイト変態することが報告されており ¹⁾、相変態を調べるため後方散乱電子回折(EBSD)分析を行 った。採取位置および分析結果を Fig. 2 に示す。図中の緑 色部がオーステナイト相であり、赤色部がマルテンサイ ト相である。その結果、4 K においてき裂が進展した箇所 の先端 100 μm 程がマルテンサイト変態していることがわ かった。この破面観察結果より、4 K 破壊靭性試験とマル テンサイト変態の関連が示唆された。







Fig. 2 Sampling view for EBSD and results of EBSD.
より定量的な評価のため、4K破壊靭性値がそれぞれ低 靭性、中靭性、高靭性であった試験後破壊靭性試験片を 対象として、X線回折による相同定を行った。分析結果は、 極低温においては低靭性の材料ほど、多くマルテンサイ ト変態していた。加工誘起マルテンサイトは強加工等に より大きなエネルギーが与えられることで起こるが、4K 破壊靭性試験のように極低温において連続的に試験力を 与え、き裂を進展させる環境では、加工誘起マルテンサ イトと同様のメカニズムによってき裂先端で局所的にマ ルテンサイト変態が起こり、材料の靭性劣化に寄与して いると考えられる。

一方、低温での加工誘起マルテンサイト変態量は塑性 変形量とともに増加することが報告されており²⁾、緒形ら は加工誘起マルテンサイト量が多いと4K 引張強さが大 きくなることも報告している³⁾。そこで、4K破壊靭性値 と4K引張強さの相関を確認した。4K破壊靭性値を横軸 に、4K引張強さを縦軸にとった分布図をFig.3に示す。 4K引張強さが高いと、4K破壊靭性値が低くなる傾向が 見られた。R²値は線形回帰では 0.78、二次回帰で 0.81 と 既報パラメータと比較して非常に強い相関を示した。

しかし、より簡便な4 K破壊靭性値の予測のために、化 学成分といったより一般的な特性との相関を調査し、 Md30 [K]というパラメータに着目した。Md30とは、オース テナイト単相の試料に0.30の引張真ひずみを与えたとき 組織の50%がマルテンサイト相に変態する温度である4)。 本研究においてMd30は316LN鋼のような安定なオーステ ナイトも評価対象とするために、オーステナイト相の安 定度を示す指標として用いる。

$$Md_{30} = 824 - 462(C + N) - 9.2Si - 8.1Mn$$

-29.0(Ni + Cu) - 13.7Cr - 18.5Mo
-68.0Nb - 1.42(v - 8.0) (1)

供試材の化学成分と結晶粒度から求めた Md30 を横軸 に、それぞれの 4K 破壊靭性値を縦軸にとった相関をそ れぞれ Fig. 4 に示す。R²値は線形回帰で 0.87、二次回帰 で 0.88 と 4 K 引張強さよりも更に強い相関があった。4 K 破壊靭性値とMd30との線形回帰結果の近似式を(2)式に示 す。(2)式中で Md30 の値域は、本研究における実測値の最 大及び最小より 36≦*Md*₃₀≦146 とする。なお、標準偏差 σ は18 MPam^{0.5}であった。

> $K_{IC} = 378 - 1.44 \times Md_{30}$ (2)

5. 破壊靭性値予測式の妥当性確認

4 K破壊靭性値の予測式(2)の妥当性を確認するために、

任意の化学成分設計をした追加試作材(Additional formed forging) において、予測式から導き出される値と実測値が どれほどの誤差を持つか試作試験を行った。

化学成分は、KICが244 MPam^{0.5}を狙って、Table 1に示す ようにMd30が93 K前後になるように調整した。Md30以外の 製造方法及び形状は、Formed forging for trial (1) と同一と

した。Additional formed forging実測のMd30は86~87 Kとな り、この数値から破壊靭性値を予測すると実際の破壊靭 性値との誤差は1.3%、-2.1%であった。予測式を考慮して Md30を設定することで、ほぼ狙い通りの破壊靭性値を持 つ材料の製造に成功し、予測式の妥当性を確認した。

6. まとめ

4K における破壊靭性値を実験的に得るには、試験片 製作及び試験実施に労力がかかっていた。そこで、著者 らは、実機大材料を製作し、4Kの破壊靭性試験値を支配 する新たな指標を究明し、4K での破壊靭性値を簡易的に 予測する新たな評価手法の確立を試みた。

- 1. R.P. Reed et al.: Trans. Met. Soc. AIME 230 (1964) 1713-1720
- 2. T. Ogata et al.: TEION KOGAKU 42 (2007) 10-17
- T. Ogata et al.: TETSUTOHAGANE 71 (1985) 1647-1654 3.
- T. Angel: J. Iron Steel Inst., 177 (1954) 165 4.



 Fe-Mn-Cr long forging plate ▲ Hot rolled plate

Fig. 3 Correlation between the fracture toughness and results of 4 K tensile strength test.



Fig. 4 Correlation between the fracture toughness and Md30.

Table 1 Comparing value of <i>Masi</i> , predicted Kie and experimental Kie.						
Test sample		Md 30 [K]	Predicted K _{IC} using Formula (2) [MPam ^{0.5}]	Experimental K _{IC} [MPam ^{0.5}]	Error between predicted K_{IC} and experimental one [%]	
Formed forging	1/2t	129	192	181	6.2	
for trial (1)	1/4t	139	178	170	4.6	
Additional	1/2t	86	254	251	1.3	
formed forging	1/4t	87	253	258	-2.1	

Comparing value of Md_{30} , predicted K_{1C} and experimental K_{1C} Table 1

HTS コイルのクエンチ保護に向けた金属-絶縁体転移酸化物によるターン間絶縁の基礎検討

Fundamental Study of HTS Coils with Turn-to-Turn Insulation by Metal-Insulator Transition Oxsides for Quench Protection of HTS Coils

山田 寬之, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大); 一野 祐亮(愛工大)

<u>YAMADA Hiroyuki</u>, TSUCHIYA Yuji, YOSHIDA Yutaka (Nagoya University); ICHINO Yusuke (Aichi Institute of Technology) E-mail: yamada.hiroyuki@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

HTS コイルのクエンチ保護のためターン間を絶縁しな いNIコイルが提案されているが、充電遅延が発生すると いう課題が存在する[1]。そのためクエンチ保護と充電遅 延の緩和の双方を併せ持つ HTS コイルが必要となってい る。今回、我々は金属-絶縁体(Metal-Insulator: M-I)転移酸 化物によりターン間を絶縁する M-I 絶縁コイルを提案す る。M-I 転移酸化物は低温領域では抵抗率が高いが、温度 上昇に伴い抵抗率が急激に低下する性質を示す[2]。M-I 転 移酸化物を HTS コイルのターン間絶縁物質として用いる ことで、発熱がなく温度が低い部分では M-I 転移酸化物 の抵抗値は高くターン間は絶縁されるが、クエンチが発 生して温度が上昇した部分では M-I 転移酸化物の抵抗値 が低下してターン間転流が可能になるという挙動が期待 される。

そこで本研究では M-I 絶縁コイルの実現に向け、M-I 転移酸化物の一つである($Pr_{1-x}Y_x$)₁₋, Ca_yCoO_3 (PYCCO)バルクを用いて REBCO コイルのターン間絶縁を模擬した REBCO テープ間通電試験を検討した。

2. 実験方法

Fig. 1 に REBCO 線材と PYCCO バルクを用いた M-I 絶縁 試験の模式図を示す。PYCCO バルク抵抗値については Quantum Design 社製の PPMSを用いた直流四端子法で測定 した。試料を 10 K/min の速度で 300 K から 10 K まで降温し た後、300 K まで昇温して抵抗率の温度依存性を測定した。 PYCCO バルクを用いた M-I 絶縁試験については REBCO 市 販線材間に PYCCO バルクを挟んで接合し、PYCCO バルク が M-I 転移して抵抗値が増加するまで試料の温度を冷却し た。その後、クエンチによる発熱で温度が上昇し、ターン間で の転流が発生するという挙動を想定して、ターン間電流を模 擬した電流を印加した。REBCO 線材に印加する電流を 0.2 A/s の速度で増加させて REBCO 線材と PYCCO バルクの電 流-電圧特性を測定した。また、電流印加前の PYCCO バルク と REBCO 線材の初期温度 Tini を 70-90 K の範囲で変化させ て同様の測定を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に REBCO 市販線材と PYCCO バルクの T_{ini} = 70-90 K における電流-電圧特性を示す。内挿図に PYCCO バルク の電気抵抗率の温度依存性を示す。PYCCO バルクの M-I 転移温度 T_{M-I} は約 80 K であった。 T_{ini} = 80 K の時、電流が 80 mA まで増加するに従い電圧は直線的に増加し、80 mA 以上 になると減少した。これは PYCCO バルクが、発生したジュー ル熱で温度上昇し、M-I 転移したことで抵抗が低下したため であると考えられる。 T_{ini} を変化させると、 T_{ini} が低いほど電流 印加開始直後の電流-電圧特性の傾きが大きくなる傾向があ った。これは M-I 転移前の PYCCO バルクの抵抗が大きいことを示している。例えば直線近似により計算した PYCCO バル クの抵抗は、 T_{ini} = 90 K で 17.8 Ω 、 T_{ini} = 70 K で 72.7 Ω であ った。次に、 T_{ini} が低いほど電流を印加した際の電圧のピーク

値は大きくなった。これは TM-1と Tiniとの差が大きいため、TM-1 まで温度上昇するのに大きなジュール熱が必要となり、電圧 のピーク値が増加したと考えられる。

当日は、磁場中での PYCCO バルクを用いた HTS コイルの ターン間絶縁を模擬した REBCO テープ間通電試験、 REBCO 線材に印加する電流の増加速度を変化させた場 合の REBCO テープ間絶縁試験結果、及び別組成のバルク を用いたテープ間通電試験について報告する予定である。



Fig. 1 Experimental set-up to investigate metal-insulator insulation method with the PYCCO bulk between the two REBCO tapes.



Fig. 2 Current dependence of voltage of the PYCCO bulk between the REBCO tapes at a current rate of 0.2 A/s and at T_{inis} . The inset shows the temperature dependence of ρ in the PYCCO bulk.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19K22154、 20K15217、20H02682)、JST-A-STEP、NEDOからの助成を 受けて実施しました。本研究では岩手大学藤代博之先生、 内藤智之先生よりPYCCOバルク作製に関して御協力をい ただきました。

- 1. X. Wang et al.; Supercond. Sci. Technol. 26, 035012 (2013).
- 2. H. Fujishiro et al.; J. Appl. Phys. 121, 115104 (2017).

無絶縁巻線技術の適用による REBCO コイル内局所劣化発生時の 継続運転の可能性

Possibility of continuous operation when a local deterioration occurs in REBCO coil

by applying no-insulation winding technology

津吉 杏佳, 吉原 優花, 濵中 麻衣, 北村 真由, 根本 羽衣, 石山 敦士(早大);野口 聡(北大)

TSUYOSHI Kyoka, YOSHIHARA Yuka, HAMANAKA Mai, KITAMURA Mayu, NEMOTO Ui,

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

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、医療用加速器や高磁場全身用 MRI をターゲットと した超電導コイルシステムの開発を目指しており、本来二律背 反の関係にある高熱的安定化と高電流密度化を両立できる 手段として、無絶縁(NI)REBCO コイルの研究を行っている。

従来、超電導コイルでは常電導転移発生時にホットスポット の形成を回避するため、貯蔵エネルギーを速やかに回収する ことが求められてきた。これに対し、先行研究では NI 巻線技 術を適用することにより、コイル内に局所的劣化が発生しても 継続運転できる可能性が示唆されている[1][2]。そこで今回、 上述した機器への実応用を想定し、負荷率とNIコイル内の層 間電気抵抗をパラメータとして、数値解析に基づき継続運転 可能な条件について発熱量(転流に伴う発熱 QPASS/銅安定 化層での発熱 QMT/超電導層での発熱 QSC)と、コイル内温 度に注目し検討を行ったので報告する。

2. 解析方法

解析で用いたコイルの諸元および解析条件を Table.1 に示 す。上記の機器への応用を想定した条件のもと、シングルパ ンケーキ(SP)コイルの 25 ターン目に局所的常電導転移が生 じたとして解析を行った。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[3]。実際の運 転条件を想定し、負荷率が 60%と 70%の各場合について、層 間抵抗を 2.0×10⁻⁵ Ω ·cm² と 2.0×10⁻² Ω ·cm² の間で変化させ、0 ~ 5.0s までの一定時間についてコイル内で発生する発熱 QPASS、QMT、QSC)の割合、発熱量、コイル内温度を比較し た。なお、今回の解析で用いた冷凍機の冷凍性能は 30K で 64W である。

3. 解析結果と考察

負荷率 70%において層間抵抗 $2.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot cm^2$ のときの発 熱割合、層間抵抗 $2.0 \times 10^{-2} \Omega \cdot cm^2$ のときの発熱量をそれぞれ Fig.1、Fig.2 に示す。

負荷率が 60%、70%のどちらの場合においても、層間抵抗 が 2.0×10⁻³ Ω ·cm²以下では QPASS が支配的であり、コイルの 熱的安定性は保たれた (Fig.1)。層間抵抗が 2.0×10⁻² Ω ·cm² のとき QMT が支配的となったため発熱量、コイル内温度とも に上昇したが、発熱量は冷凍機の冷凍性能を大きく下回った ため熱暴走には至らなかった (Fig.2)。

以上より、上記の機器への応用を想定した今回の条件下に おいて、NIコイル内に局所的劣化が発生した場合、負荷率が 60%、70%のどちらの場合においても、比較的幅広い層間抵 抗で継続運転できる可能性があると考えられる。また、上記の 機器への応用を想定した今回の条件下において、層間抵抗 が小さいほど QPASS が支配的で熱的に安定であることが分 かった。

Table. I Specifications and assumed condition for analysis				
	Overall width[mm]	4.00		
REBCO	Copper stabilizer	20		
Conductor	Thickness[µm/side]	20		
	Ic@77K,self-field[A]	115		
	Inner diameter[mm]	500		
Coil	Height[mm]	10		
	Turns per pancake	50		
	Iop[A]	340/395		
Condition	Iop/Ic[%]	60/70		
	Operating temperature[K]	30		
	Cooling condition	conduction		
	Cooling condition	cooling		
	External magnetic field[T]			



Fig.1 Ratio of Heat Generation (70%, $2.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot cm^2$)



なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244)に依 った。

参考文献

- 1. S. Hahn et al., Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 105017
- Y.Kakimoto, A.Ishiyama et al., *IEEE Trans. on Appl.* Supercond. 29(2019) 4603005
- 3. T.Wang et al., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 25(2015) 4603409

無絶縁 REBCO パンケーキコイル内における局所的劣化発生時の過渡的振る舞い

Transient behavior in NI-REBCO pancake coil during local normal-state transition

<u>根本</u>羽衣,吉原 優花, 濵中 麻衣,津吉 杏佳,北村 真由,石山 敦士(早大);野口 聡(北大); <u>NEMOTO Ui</u>, YOSHIHARA Yuka, HAMANAKA Mai, TSUYOSHI Kyoka, KITAMURA Mayu, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は医療用加速器やヒト全身用 MRI への応用を目的と して無絶縁(NI)REBCO パンケーキコイルの研究を進めてきた。 この NI コイルは,局所的常電導転移が発生しても,電流がそ の部位を自動的に回避して流れることで継続運転できる可能 性が示唆されている[1][2]。そこで今回は,高負荷率における 継続運転の可能性について検討を行ったうえで,コイル内に 局所的線材劣化が生じた瞬間の過渡的振る舞いについて解 析を行ったので報告する。

2. 解析方法

2.1 高負荷率における継続運転の可能性の検証

まず高負荷率における継続運転の可能性を検証するため, 内径 500mm 50turn のダブルパンケーキコイル(以下 DP コイ ル)を解析対象とし,層間抵抗値を2.0×10⁻⁵,2.0×10⁻⁴,2.0×10⁻³, 2.0×10⁻²Ω・cm² と変化させた。また解析条件は運転温度 30K の伝導冷却条件下で外部磁場を 10T とし(高磁場 MRI を想 定),385A(負荷率 80%)の一定電流を通電中に 25turn 目の 1/8 周にわたって局所的劣化が発生した後の振る舞いを解析 した。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[3]。

2.2 劣化発生直後の短時間の振る舞いの検証

続けて、劣化発生直後における瞬間的な電磁的振る舞いを 検証するため内径 500mm 10turn のシングルパンケーキコイ ル(以下 SP コイル)を解析対象とし、層間抵抗値を 2.0×10⁻⁵、 2.0×10⁻⁴ Ω ・cm² と変化させて解析を行った。この際、PEEC モ デルの空間分割数は DP コイル解析時の 10 倍とした。また解 析条件は運転温度 30K の断熱条件で外部磁場を 10T とし、 455A(負荷率 80%)の一定電流を通電中に 5turn 目の 1/8 周 にわたって局所的劣化が発生した後の振る舞いを解析した。

3. 解析結果

3.1 高負荷率における継続運転の可能性の検証

DP コイルにおける解析結果のうち,縦軸に発生熱量[W]を 横軸に層間抵抗値[Ω・cm²]をとったグラフを Fig.1 に示す。 Fig.1 を見ると,層間抵抗値が高い場合だけではなく低すぎる 場合でも発熱量は時間が経つにつれて増加し,冷凍機の冷 凍性能である64Wを超えて熱暴走していることが分かる。また, 層間抵抗値が低い場合は劣化発生から0.02s後という短時間 で発熱量が急激に増加していることから,この場合の熱暴走 の原因を考察するためには劣化発生直後の瞬間的な振る舞 いについて検証する必要があることも分かる。

3.2 劣化発生直後の短時間の振る舞いの検証

SP コイルにおける解析結果のうち,局所的劣化発生から 0.001s 経過後の,局所的劣化が発生した層から隣接層に流 れる転流電流の絶対値を Fig.2, Fig.3 に示す。なおこのグラフ の横軸は,コイルの始点を 0[deg]とした際のコイル中心から見 た角度を示しており,0~45[deg]が局所的劣化発生部位に相 当する。Fig.2, Fig.3 を見ると,層間抵抗値が小さい場合は, 大きい場合と比較して局所的劣化の発生した部位の両端で 集中的に転流が起きていることが分かる。

4. まとめ

転流した電流は隣接層に流れ込むため,層間抵抗値が小さいと局所的劣化の発生直後には狭い範囲で隣接層に電流が 流れ込むことになる。そのため負荷率が高い場合はホットスポ ットが発生してコイルの熱暴走が引き起こされると考えられる。 よって負荷率が高い場合は熱的安定性が下がる要因として 劣化発生直後の瞬間的な振る舞いが重要となってくる可能性 がある。

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。







Fig.2 I_{pass} from the layer of local normal-state to the adjacent layer $(I_{op}/I_c=80\%, 2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot cm^2)$



Fig.3 I_{pass} from the layer of local normal-state to the adjacent layer $(I_{op}/I_c=80\%, 2.0\times10^{-4}\Omega \cdot \text{cm}^2)$

- [1] S.Hahn et al.: Superconduc., Sci., Technol.,
- Vol.29, No.10(2016)[2] K.Kakimoto, A.Ishiyama et al.: IEEE Trans. On Applied Supercond., Vol.29, No.5, 4603005 (2009)
- [3] T. Wang, S. Noguchi, et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., vol. 25, no. 3, 2015

超電導電力貯蔵装置を対象とした無絶縁 REBCO バンドル導体を巻線した パンケーキコイルの充放電実験

Charging and discharging experiments on Pancake Coil wound with No–Insulation Bundle REBCO conductor for SMES

<u>宮本 祐</u>, 大牟礼 将人, 石山 敦士 (早稲田大学) <u>MIYAMOTO Yu</u>, OMURE Masato, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.) E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置(SMES)は電気エネルギーを磁気エネ ルギーとして貯蔵する装置であり、高効率、長寿命で、繰り返 し運転に制限がない、大電力の瞬時応答が可能であるという 特長を持つ。しかし、他の電力貯蔵装置と比較して貯蔵密度 が極めて小さい。

無絶縁コイル(以下「NI コイル」)は、二律背反の関係にある 高電流密度化と高熱的安定化を両立できる巻線方式として 期待されている。このNIコイルをSMESに応用することができ れば、高電流密度化により高貯蔵密度化が可能になると考え られる。また、一般的にSMES用コイルは大電流、低インダク タンスで設計されるのが望ましく、無絶縁 REBCO線材を集合 導体化した導体を巻線したバンドルコイルのSMESへの適用 が考えられる。先行研究では、線材を集合導体化することに より、充放電動作への追従性が増し、貯蔵効率が向上するこ とが解析により調べられている⁽¹⁾。そこで今回は、2枚バンドル コイルを対象に充放電実験を行い、無絶縁バンドルコイルの SMESへの適用可能性を実験的に評価した。合わせて1本の 無絶縁 REBCO線材を密巻した場合との比較も行ったので報 告する。

2. 実験方法

実験に用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。ターン数は起磁力を同じ値にするために、密巻コイルは 50 ターン、バンドルコイルは25 ターンとした。液体窒素浸漬冷却下で通電電流最大値と最小値を、密巻コイルは40-50A、バンドルコイルは80-100Aとして充放電を行った。充放電周期は系統安定化用途を想定した3秒と負荷変動補償用途を想定した18秒の間で3秒ごとに変化させた。

3. 実験結果

Fig.1に結果の一例として充放電周期3秒のときの通電電流 (I_{op})、と両コイルにおける周方向電流(I_θ)の波形を示す。充 放電時には径方向電流が流れるため、周方向電流は通電電 流に対して遅れていることが分かり、バンドルコイルの方が周 方向電流の遅れが抑えられている。

Fig.2 に充放電周期を3 秒から18 秒の間で3 秒ごとに変 化させた時の各コイルの効率を示す。密巻コイルとバンドルコ イル共に充放電周期が長くなるにつれ貯蔵効率も高くなるこ とがわかった。また、密巻コイルとバンドルコイルを比較すると、 バンドルコイルの方がより高い貯蔵効率が得られることがわか った。これは、バンドル導体化することによりコイルのインダク タンスが低減し、充放電時の損失が小さくなったためであると 考えられる。これにより、NI コイルを SMES に応用する場合は、 バンドル導体化することにより貯蔵効率を向上できる可能性 があることが示された。

参考文献

1. M.Omure, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.98 (2019) P64

表1 コイルの諸元					
Table. Specification of Coils					
Parameters	NI Coil	Bundle Coil			
R	EBCO Conductor				
Width[mm]		4.0			
Cu thickness [mm]	20 per	each side			
Tape Ic@77K [A]	2	>80			
Coil					
Number of Tapes	1	2			
Turns per pancake	50	25			
Inner diameter [mm]	60	60			
Height [mm]	10.00	10.00			
Inductance [mH]	0.307	0.0765			
Contact Electircal Resistance [μΩ•cm2]	54.65	49.64			





層間接触不良のある無絶縁コイルの過渡安定性

Influence of Turn-to-Turn Electrically Non-Contact Area on Transient Stability of No-Insulation REBCO Pancake Coils

<u>北村</u>真由, 濵中 麻衣, 吉原 優花, 津吉 杏佳, 石山 敦士 (早稲田大学);野口 聡 (北海道大学) <u>KITAMURA Mayu</u>, HAMANAKA Mai, YOSHIHARA Yuka, TSUYOSHI Kyoka, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); NOGUCHI So (Hokkaido University)

OUCHI SO (Hokkaido University

Email: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

無絶縁コイル(NI コイル)は、本来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できる巻線技術として期待 されている。NIコイルは絶縁層が施されていないため、電流が 常電導転移部を避けて隣接ターンへ転流し、局所的な温度上 昇を避けることができる。我々が対象とする MRI や医療用加 速器ではm級大口径コイルを用いるので、NMR 用と比べ、転 流による発熱密度が小さくなるため、熱的安定性が高いと考え られる。しかし実際のコイル巻線では、線材表面は一様ではな く、層間接触不良部分が生じる。この場合、大口径コイルほど 接触不良部分の発生する割合が大きくなり、安定性が損なわ れる可能性がある。そこで今回は、層間接触不良部分をラン ダムに生じさせた NI コイルに局所的劣化が発生した場合の熱 的・電磁的挙動を評価し、コイル保護動作を行わずに継続運 転ができる可能性について検討したので報告する。

2. 解析方法

解析で用いたモデルコイルの諸元を Table.1 に示す。解析 は PEEC(部分要素等価回路)モデルによる電流分布解析と 2 次元 FEM による熱解析を連成して行った⁽¹⁾。今回は、次世代 の高磁場全身用 MRI 及び医療用サイクロトロンを想定し、10T の外部磁場があるものとした。冷却条件は 30K 断熱状態とし、 コイルの中央 25 ターン目の要素に局所的劣化(Ic=0)が発生し たとした。そして、負荷率(Iop/Ic)が 70%と 80%の場合におい て、層間接触不良部分の割合を 10%~50%と変化させた時の 挙動を解析し、比較・評価を行った。

3. 解析結果

解析結果例として、Fig.1とFig.2に、それぞれ負荷率を70% と 80%として、接触不良領域の割合を 10%~50%と変化させ た時の劣化発生1秒後のNIコイルにおける各発熱量(Qpass: 転流による発熱、Qsc:超電導層の発熱、Qmt:銅安定化層の 発熱)を示す。

負荷率 70%(Fig.1)では、全ての接触不良領域の割合において転流による発熱量 Qpass が支配的となり(発熱が広範囲に分散)、熱暴走に至らなかった。負荷率 80%(Fig.2)では、接触不良が 30%以上となると、いずれの発熱量も増加し熱暴走していることがわかる。従って、高負荷率 80%であっても、接触不良割合が 20%以下であると、局所的常電導転移部の周辺で接触不良領域が存在しても、接触部分で転流が起こることにより、発熱密度が小さく抑えられ、継続運転の可能性が期待出来ることが分かった。

Ovevrall width [mm] 4 REBCO REBCO	
REBCO CONTRACTOR CONTRACT	
Tape Copper stabilizer thickness [µm/side] 20	
$I_c @77K$, self-field[A] 115	
Inner diameter[mm] 500	
Turn-to-turn contact resistivity [Ω /cm ²] 20×10 ⁻⁶	
Number of turns 50	
Coil Cooling condition 30K-Adiabatic	
lop[A] 400, 450	
lop/Ic[%] 70, 80	
External magnetic field [T] 10	



Fig.1 Dependence of heat generation in NI coil 1 second after deterioration on the percentage of turn-to-turn electrically non-contact area $(I_{op}/I_c=70\%)$



Fig.2 Dependence of heat generation in NI coil 1 second after deterioration on the percentage of turn-to-turn electrically non-contact area $(I_{OP}/I_{C}=80\%)$

本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244)に依った。

参考文献

(1) T. Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 25,(2015), 4603409

intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの接触抵抗率に対する 温度サイクルと巻線張力の影響

Effects of thermal cycle and winding tension on contact resistivity of an intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO coil

<u>高橋 佳佑</u>, 吉田 大佐, 高尾 智明 (上智大); 末富 佑 (千葉大); 柳澤 吉紀 (理研); 前田 秀明 (JST) <u>TAKAHASHI Keisuke</u>, YOSHIDA Taisuke, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); SUETOMI Yu (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); MAEDA Hideaki (JST)

1. はじめに

No-Insulation (NI)法は高電流密度 REBCO コイルの熱暴 走からの保護手法として有効であるが、永久電流コイルに必 要なレイヤー巻方式と組み合わせると長い磁場遅れが発生 する欠点があった。我々はこれに対し、銅と絶縁材の複合シ ートを層間に挿入しながら絶縁無しの線材をレイヤー巻きして 層内をコイル軸方向に非絶縁とする intra-Layer No-Insulation (LNI)法を提案してきた。これにより、レイヤー巻コイ ルにおいても自己保護性を有しながら磁場遅れを劇的に短く することができる。

LNI コイルには、線材と銅シートの間に接触抵抗が存在する(Fig. 1 参照)。LNI-REBCO コイルの有効的な接触抵抗率 (単位面積当たりの接触抵抗)は、NIパンケーキ巻 REBCOコ イルにおけるターン間接触抵抗率に比べて 1-2 桁も大きいこ とが分かっているが、その原因は明らかでない[1]。また、この 大きな接触抵抗率(たとえば 10,000 µcm²)が、熱暴走時の局 所的な電流集中の発生を抑制し、コイル保護に有効に働くこ とが明らかになりつつある[2]。すなわち、接触抵抗率を予めよ く制御し、所望の高い値を得る技術が必要である。本研究で は、LNI-REBCO コイル内の接触抵抗率についての基礎的知 見を得るために、巻線時の張力と、サーマルサイクルが接触 抵抗率に与える影響を調査した。

2. 実験方法

SuperPower 社製の REBCO 線材(幅 4.0 mm、厚み 0.097 mm、 銅めっき、絶縁無し)を用いて、巻線張力 $F=2 \text{ kgf}(5 \text{ kgf/mm}^2)$ 、4 kgf (10 kgf/mm²)、6 kgf (15 kgf/mm²) で巻線し、3 種類の LNI-REBCO コイル(内径 50 mm, 10 ター ン×8 レイヤー)を製作した。これらの張力は 1 ターンあたりの 面圧換算で、それぞれ 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa に対応す る。レイヤー間には銅と絶縁物質の複合シート(厚さ 30 μ m) を挿入した。各コイルについて液体窒素中で電源遮断試験を 行い、中心磁場減衰波形を取得した。コイルを液体窒素から 取り出して室温に戻し、再度冷却するというサーマルサイクル を繰り返しながら、電源遮断試験を行った。また、LNIコイルの 等価回路の解析[1]によって中心磁場を計算し、解析結果の 中心磁場減衰波形が実験結果に一致するよう接触抵抗率を 推定した。

実験結果と考察

Fig. 2 は 3 種類の LNI コイルについて、サーマルサイクル 回数と接触抵抗率の関係を示す。0 回目は、最初の電源遮断 試験で得られた結果である。サーマルサイクルを繰り返すと、 接触抵抗率が大きく増加した後、飽和することが確認された。 巻線張力が大きいほど接触抵抗率は小さく、2 kgf の場合は 約 16,000 $\mu\Omega$ cm²、4 kgf の場合は約 6,500 $\mu\Omega$ cm²、6 kgf の 場合は約 2,500 $\mu\Omega$ cm²に落ち着いた。いずれの場合も、おお むね 10 倍程度接触抵抗率が上昇している。各コイルで、ゼロ 回目(冷却+励磁)から1回目(昇温+冷却+励磁)への移行 時に、接触抵抗率の増加が最も顕著であることは、昇温の過 程で層間の面圧が緩和され易いことを示している。冷却で生 じた面圧の緩和が昇温により元に戻らない様である。緩和は、



Fig.1 Contact resistivity for NI Pancake coil and LNI coil.



Fig.2 Contact resistivity versus number of thermal cycles for LNI-REBCO coils wound under winding tensions of 2 kgf, 4 kgf and 6 kgf.

サーマルサイクルの進展と共に飽和して落ち着くが、この現象は、層間に熱収縮の大きいポリマーを持つ LNI コイルの欠 点といえる。NI パンケーキコイルではこのような層間材が存在 しないため、この種の現象は起こらないと推察される。

4. まとめ

LNI-REBCO コイルでは、巻線張力を大きくするほど、小さ い接触抵抗率が得られる。また、サーマルサイクルを繰り返す ことで接触抵抗率が増加し、ある値に飽和する。これらの特性 は、目標とする高い接触抵抗率を得るための手法として活用 できるが、飽和に多数のサーマルサイクルを要するのは LNI 法の欠点といえる。また、励磁時の電磁力によっても層間の 面圧が変化するため、この効果も考慮に入れる必要がある。 現在、層間接触を模擬した要素実験を進めており、面圧や層 間材の表面状態が接触抵抗率に与える影響を系統的に理解 しようとしている。これらの知見をあわせて、所望の高い接触 抵抗率を安定して得る方法の構築を目指す。

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] Y. Suetomi *et al.*, *SuST*, *32*, 045003 (2019)

[2] Y. Suetomi et al., presented in ASC2020, Wk1LOr1A-03

無絶縁 REBCO 超電導コイルにおける磁場精度向上のための通電波形の提案

Proposal of exciting current waveform for improving magnetic field accuracy in no-insulation REBCO coil

<u>村上 将吾</u>,上田 聡美,石山 敦士(早稲田大); 植田 浩史(岡山大); 野口 聡(北海道大) <u>Shogo MURAKAMI</u>, Satomi UEDA, Atsushi ISHIYAMA (Waseda University); Hiroshi UEDA (Okayama University); So NOGUCHI (Hokkaido University) E-mail: pg.shogo26@moegi.waseda.jp

1. はじめに

REBCO線材は臨界温度が高く、高磁場下で大電流密度 を流せるため、超電導コイルに応用し様々な機器を小型化・ 高磁場化することが期待されている。この REBCO 超電導コイ ルの高電流密度化と高熱的安定化を両立するために No-Insulation(NI)巻線技術^[1]を適用する試みが増えている。しか し利点がある一方で欠点も存在し、REBCO線材はテープ形 状でありテープ面に磁場が垂直に印加されることで遮蔽電流 が誘導され、不整磁場(遮蔽電流磁場)が発生してしまうのに 加えて、NI 巻線技術を適用した場合、周方向だけでなく径方 向にも電流が流れるため励磁遅れが発生する。

我々はこれまで10T級無絶縁 REBCOコイルシステムを対象に励磁遅れを考慮した場合の遮蔽電流による磁場への影響について数値解析に基づき検討を行い^[2]オーバーシュート法による通電電流制御が磁場の時間安定度向上において有効であることを確認した。今回は、オーバーシュート法による減磁効果を生かすための新たな通電波形の検討を行った。

2. 解析対象および解析手法

解析対象は先行研究^[3]で試作・実験した 10T 級積層 REBCO コイルシステムであり、4mm 幅の REBCO 線材を240 ターン巻きした内径 50mm のパンケーキコイルを22 個積層し た。その諸元および概略図を Table 1 および Fig 1 に示す。解 析は Fig 1 の左側に示す NI コイル構造の等価回路と、有限 要素法,境界要素法と高速多重極法を適用した3 次元非線 形過渡電磁場解析プログラム^[4]を組み合わせて行った。全て のシングルパンケーキコイルに流れる *I*₀と*I*_rを同一と仮定し、 回路方程式を解くことで周方向電流 *I*₀と径方向電流 *I*_rを計算 する。得られた *I*₀を3 次元非線形過渡電磁場解析における通 電電流とみなすことで、無絶縁コイルの励磁遅れを模擬した 磁場解析を行った。

3. 通電波形の検討

先述のとおり、NI コイルの通電手法にオーバーシュート法 を適用すると、励磁遅れにより周方向電流が設定したピーク 値に届かないまま減磁されることで十分な減磁効果を得られ ないという問題が先行研究^[2]において確認されている。そこで、 励磁遅れによる周方向電流の遅れ分を一定時間待機するこ とにより、減磁効果を維持する通電波形の効果を調査した。

4. 解析結果

解析結果の例として、励磁速度 1A/s・オーバーシュート率 10%で励磁し、0s/50s/100s と一定時間ホールドさせた場合の 遮蔽電流磁場の振る舞いを Fig.2 に、この結果から算出した 磁場の時間安定度をFig.3 に示す。オーバーシュート後により 長時間ホールドさせた場合ほど、通電電流制御による減磁効 果が増大し時間安定度が改善される結果となった。本発表で はこの他にも、励磁速度を遅くし等価回路の時定数よりも長い 時間をかけて励磁することにより時間安定度を改善する手法 の効果なども報告する。



Fig. 3. Time stability in each waveform

謝辞

なお、本研究の一部は科研費基盤研 S(18H05224)に依ったことを付記する。

参考文献

S, Hahn, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 21, 5675111(2011)
 Z. Inagaki, 1P-p17 2018 年 秋季低温工学,超電導学会 講演概要集
 S. Iwai, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 26, 4302305 (2016)
 H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23, 4100805 (2013)

瞬時電圧低下補償用電力貯蔵システムの研究開発

Research and Development of SMES for bridging instantaneous voltage dips

長屋 重夫, 渡部 智則(中部電力);中村 亘, 河村 浩一(中部電力ミライズ) 石井 祐介, 岩谷 祐(東芝エネルギーシステムズ); <u>平野 直樹</u>(NIFS) NAGAYA Shigeo, WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co., Inc.) NAKAMURA Motomu, KAWAMURA Koichi (Chubu Electric Power Miraiz Co., Inc.) ISHII Yusuke, IWATANI Yu (Toshiba Energy Systems & Solutions) ; <u>HIRANO Naoki</u> (NIFS) E-mail: hirano.naoki@nifs.ac.jp

1. はじめに

超電導技術の応用の中で、磁気エネルギーとして電力 を蓄えるSMES (Superconducting Magnetic Energy Storage System) は、早くからその実現が期待されてき た電力貯蔵技術である。2003 年より瞬時電圧低下(以下、 瞬低という。)を補償する SMES を開発し、三重県亀山市 の液晶工場においてフィールド試験を経て、2007 年から 瞬低補償 SMES の商用運転を行い、本年3月31日に運転 を休止した。SMES の瞬低補償装置としての研究開発コン セプトと11万時間以上の連続運転実績について紹介する。

2. 瞬低補償 SMES の研究開発コンセプト

SMES の大きな特長は、他の電力貯蔵技術と比較し、繰 返しの充放電に対してもエネルギー貯蔵部である超電導 コイルは劣化することがない点と、短時間に大出力が求 められる用途に対し、過不足ない貯蔵部の容量を設計で きることからコンパクトなシステムが実現できる点が挙 げられる。この特長を生かし、1秒間最大で 10MW を出力 できるシステムを開発した。超電導コイルから出る漏洩 磁界も、クライオスタット表面から 1m 程度で 5Gauss と なるよう、4 つのコイルの隣り合う極性を変える配置を採 用した。また、超電導機器に不可欠な冷却設備を、小型 冷凍機の組合せで構成することで、高圧ガス保安法に関 わる法定管理者が不要なシステムとした。Fig.1 に貯蔵部 の構成鳥観図を示す。

3. 運転実績

3 基目となる商用 SMES は、それまでの 5 MVA, 10MVA-SMES で得られた多くの知見を元に、改良を重ね、 2007 年 7 月 1 日にサービスインし、2020 年 3 月 31 日に 運転休止となるまでの、11 万時間以上コイルを冷却し続 け、工場を瞬低の被害から守ることに大きく寄与した。 Table1 に主な仕様、Table2 に運転実績概要を示す。

瞬低補償回数は48回に上り、すべて補償は成功している。年平均で4回程度の瞬低を補償したことになる。

超電導機器の応用で重要となることに、信頼性が挙げ られる。年度ごとの点検等による SMES 停止時間と、停止 した件数を Fig. 2 に示す。設置して 5 年ほど経過するこ とで、停止時間やその件数も落ち着いてきたことが分か る。冷凍機は 1 年毎に定期点検を行い、健全性の維持に 努めた。冷凍機の定期点検や、臨時の点検で年間に数回 停止しているが、その停止時間を合算すると 672 時間と なり、設置後から休止までの総時間数に対する停止時間 を除いた稼働時間としてシステム稼働率を算定すると、 99.4%となった。きわめて高い稼働率を実現できた。

また、運転休止に伴い、コイル冷却に使用していた 7000 Lを超える液体ヘリウムを 4000 L ほど回収し、近隣の大 学や研究機関に配分することができた。貴重な資源の有 効活用にも寄与することができた。

4. まとめ

瞬低補償SMESが、実際の工場の重要負荷の瞬低補 償に11万時間以上の運転実績を残すことができた。本取 組が今後の超電導応用の参考となれば幸いである。



Fig.1 Superconducting coil and cooling system image of SMES for bridging instantaneous voltage dips.

Table 1 Main parameter of SMES for practical use

Rated capacity and compensation time	10MVA 1-sec.
Rated input-and-output alternating voltage	3φ-6600V, 60 Hz
Change over time	$1/4$ cycle $+\alpha$
Coil Configuration	4-pole coil arrangement
Rated Current	1400 A
Rated Voltage	DC 6 kV
Inductance	21.1 Н
Stored Energy	20.7 MJ
Maximum Field	4.4 T
Cooling Method	LHe pool boiling

Table 2 Main operating results of SMES for practical use

Service in date	1st July 2007
Operation suspension date	31st March 2020
Total operating time	111,768 hours
System downtime	672 hours
Operating efficiency	99.4%
Number of compensations	48 Times



Fig.2 SMES downtime and number of cases per year.

HTS コイルを用いた鉄道用非接触給電システムの 熱的安定性を考慮した運転条件の検討

Study on operating conditions considering thermal stability

of a wireless power transmission system for railway vehicles using HTS coils

<u>井上 良太</u>, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大);津田 理(東北大) <u>INOUE Ryota</u>, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama Univ.); TSUDA Makoto (Tohoku Univ.) E-mail: ryota.inoue@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 蓄電池車両の実用化に向けて, 非接触給電システムによる給電方式が検討されている。その一方で, 蓄電池電車は, 約 60 s 間の急速充電が必要となるため, 従来の銅コイルを用いた場合では, コイルの発熱が問題となり, 実用化が難しい。そこで, 我々は, HTS コイルに着目し, 熱的な安定性を考慮しない場合, 高効率で大電力伝送が可能になることを明らかにした[1]。しかし, これまでに1kHz以上の交流通電時において, HTS コイルが突発的に焼損する現象が発生した。そこで本検討では, 液体窒素冷却下における HTS コイルの 臨界電流の周波数依存性を明らかにした上で, kHz 帯における HTS コイルの発熱と冷媒間の伝熱特性が鉄道用非接触給電システムの運転条件に与える影響について検討した。

2. 解析条件

想定した2 両編成の蓄電池車両は,地上側および車両側 に8台のコイルと液体窒素を循環させる1台の冷凍機(冷凍 能力:1 kW@77 K, 冷凍機動力:10.8 kW)を設置している。ま た, 60 s 間給電に必要な電力は, コイル1台あたり 75 kW であ る(コイル1台あたりの許容発熱量:87.5 W)[1]。Fig.1 に HTS コイルの概念図を示し、Table.1にコイルの諸元を示す。ここで、 Type Aは、交流損失の低減のため、ターン間に約4mmの径 方向ギャップを設けた。また,コイル支持材の有無による熱 的安定性の影響を明らかにするために、TypeBは、TypeA の径方向ギャップに GFRP を挿入した。なお,本検討では, H法による電磁界解析(Jc(B,T)を考慮)により, HTS コイルの 通電電流および表面温度に対する交流損失を求め,その結 果を各ターンの発熱項として与えることによって, 伝熱解析を 行った。Table. 2 に伝熱解析の解析条件を示す。なお,初期 温度は77Kとし、冷媒とHTSコイルの間の熱伝達係数には、 液体窒素における沸騰熱伝達曲線を考慮した。

3. 結果および考察

Fig.2にHTSコイルにおける臨界電流の周波数依存性を示 す。Fig.2 より, HTS コイルの臨界電流は, 周波数の増加と共 に減少した。これは、周波数の上昇と共に、HTS コイルの表 面温度が上昇したためと考えられる。また, Type B は, Type A に比べて,臨界電流の低下が大きく,10 kHz 周辺では,直流 通電時の臨界電流値の約 40%まで低下した。これは、コイル 支持材の GFRP によって,冷却特性が悪化したためと考えら れる。以上より,熱的な安定動作を行うためには,10kHz以下 で低電流通電が求められることがわかった。Fig.3 に鉄道用 非接触給電システムにおける受電電力の共振周波数依存性 を示す。Fig. 3 より, 受電電力は動作周波数の上昇と共に増 加した。これは,動作周波数の上昇と共に通電電流が低下し, 交流損失が抑制されたためと考えられる。また, HTS コイルに 熱的安定性を考慮した場合は,熱的安定性を考慮しない 77 K 一定の場合に比べて, HTS コイルの温度上昇により, 交 流損失が増加することから,動作周波数を僅かに上昇させる 必要があることがわかった。なお, Type A (定常状態)および 給電開始から60s後のTypeBにおいて、目標電力を達成で きる動作条件は、ほぼ同様となった。これは、Type B において、 GFRP の熱伝導率は低いものの, 熱容量が大きいことから, 給 電開始から 60 s 間では温度上昇(最大 78.5 K@2 kHz)が少 ないためと考えられる。また, Type B は, 約 300 秒後に定常 状態(最大表面温度 79.4 K@2 kHz)となるが, Type B におけ る目標電力を達成できる動作条件は、Type A との差が少ない ことがわかった。以上より、HTS コイルに熱的安定性を考慮し

た場合,僅かに動作周波数を上昇させる必要があるものの, コイル支持材の有無に関わらず, 1.5~2 kHz 周辺の低周波領 域において,約 100 A 通電を行うことによって,60 s 給電に必 要な目標電力(75 kW)を達成できることがわかった。なお,本 研究は, JSPS 科研費(20K22414)の助成を受けたものである。



Table 1. Specifications of HTS coil for railway vehicle.

HTS layer (µm) Tape width (mm) 2 Tape width (mm) 5 Number of layers 80 n value 30 Critical current density J_{C0} (A/m ²) 3.0×10^{10} Gap between layers (mm) 4.4 Self-inductance (mH) 2.3 Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. $\frac{Cu}{Nass} density d (kg/m3)$ 8960 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (1/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (T7 K-100 K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (T7 K-100 K) $(W/m/K)$ 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 ($\frac{250}{100}$ $\frac{250}{100}$ $\frac{x}{100}$ $\frac{x}{100}$ $\frac{x}{100}$ $\frac{x}{100}$ $\frac{x}{100}$	Table 1. Specifica	mons of		for raily	vay venic	le.
Tape width (mm) 5 Number of layers 80 n value 30 Critical current density J_{C0} (A/m ²) 3.0×10^{10} Gap between layers (mm) 4.4 Self-inductance (mH) 2.3 Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Thickness (µm) 75 6 2 75 4400 Mass density d (kg/m ³) 8960 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (J/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (77 K-100 K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (Y7 K-100 K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 ($\frac{Q}{100}$ 250 x x x x $\frac{300}{100}$ x x x x x $\frac{300}{100}$ x x x x x $\frac{300}{100}$ x	HTS layer (µm)			i	2	
Number of layers 80 n value 30 Critical current density J_{C0} (A/m ²) 3.0×10^{10} Gap between layers (mm) 4.4 Self-inductance (mH) 2.3 Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. HTS wire Cu Ag Sc Sub GFRP Thickness (µm) 75 6 2 75 4400 Mass density d (kg/m ³) 8960 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (J/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (77 K-100 K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (77 K-100 K) $\sqrt{77}$ $$	Tape width (mm)				5	
n value Critical current density J_{C0} (A/m ²) Gap between layers (mm) Self-inductance (mH) Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Thickness (µm) Mass density d (kg/m ³) Heat capacity C (J/kg/K) Thermal conductivity k (W/m/K) Cu Ag SC Sub GFRP 75 6 2 75 4400 8900 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (J/kg/K) Thermal conductivity k (W/m/K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (77 K-100 K) V V V V V V V V	Number of layers				80	
Critical current density J_{C0} (A/m ²) 3.0×10^{10} Gap between layers (mm) 4.4 Self-inductance (mH) 2.3 Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Thickness (µm) 75 6 Thickness (µm) 75 6 Mass density d (kg/m ³) 8960 1000 R890 1600 Heat capacity C $(1/kg/K)$ $200-2555$ $145-168$ $80-120$ $200-350$ 100 x° x° x° $(1/kg/K)$ $200-255$ 1400 x° 150 x° x° 150 x° x° x° x° x°	n value				30	
Gap between layers (mm) 4.4 Self-inductance (mH) 2.3 Table 2. Analysis condition for heat transfer analysis. Thickness (µm) 75 6 2 75 4400 Mass density d (kg/m³) 8960 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (1/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (77 K-100 K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (V/m/K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 ($\overrightarrow{0}$ 200	Critical current density	$J_{\rm C0}$ (A/r	n ²)	i	3.0×10 ¹	0
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Gap between layers (m	im)	,	1	4.4	
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Self-inductance (mH)				2.3	
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Table 2. Analysis	s conditio	on for hea	at transfe	er analysi	s.
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$			HTS	wire		GERP
Thickness (µm) 75 6 2 75 4400 Mass density d (kg/m ³) 8960 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (J/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (77 K-100 K) Thermal conductivity k (W/m/K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (77 K-100 K) $\frac{300}{100}$ × $^{\circ}$ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		Cu	Ag	SC	Sub	OIN
Mass density d (kg/m ³) 8960 10490 5900 8890 1600 Heat capacity C (J/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (77 K-100 K) Thermal conductivity k (W/m/K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (77 K-100 K) 300 250 200	Thickness (µm)	75	6	2	75	4400
Heat capacity C (J/kg/K) 200-255 145-168 80-120 220-310 850 (77 K-100 K) Thermal conductivity k (W/m/K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (77 K-100 K) (77 K-1	Mass density d (kg/m ³)	8960	10490	5900	8890	1600
Thermal conductivity k (W/m/K) 620-490 480-465 4-3 7.5-8 0.35-0.4 (77 K-100 K) (77 K-10	Heat capacity C (J/kg/K) (77 K-100 K)	200-255	145-168	80-120	220-310	850
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Thermal conductivity k (W/m/K) (77 K-100 K)	620-490	480-465	4-3	7.5-8	0.35-0.4
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	300 -					
turne 250 x°	E					
turne \mathbb{P}° 200 \times°	250					
200 × o 150 DC × o 100 o Type A ×	(V III)		0			
Image: Solution of the second seco			×	0		
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$						
Type A × × ×	<u>5</u> S 120 =	DC		×		0
		Type A			××	
	i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	- / F D				
Ŭ = 50 È ^ Type B	Ŭ ∰ 50 ⊨ ^	туре в				
	Jo E					
	1 10	0	100	1000	100	00
Frequency (Hz)	1 1	Fre	equency	(Hz)	100	





Fig.3 Analytical results of receiving power as a function of resonance frequency.

参考文献

[1]R. Inoue, et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1, pp. 62-69, 2020

高周波用超伝導線材の開発と それを用いたワイヤレス電力伝送用高Q値コイルの開発

Development of high-temperature superconducting coated conductor tape for high frequency and development of high quality factor coil for wireless power transmission

<u>桶田 将弘</u>, 關谷 尚人(山梨大) OKEDA Masahiro, SEKIYA Naoto (University of Yamanashi) E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

我々は、高周波で低損失な REBCO 線材を実現するため に、商業化されている REBCO 線材(Fig1.(a)から銅安定化層 を取り除いた REBCO 線材(Fig1.(b))を 2 枚重ね合わせた新 規高周波用 REBCO 線材構造(Fig1.(c))を提案し, それを発 泡スチロールの支持材に埋め込み作製したコイルのQ値が, 銅コイルの約3.2倍になることを原理確認実験によって明らか にした[1]. しかし, 提案 REBCO 線材構造は, 支持材に埋め 込むことで2枚の REBCO 線材を一体化していたため,線材 の一体化に課題があった.また,支持材の誘電体損失によっ てコイルのQ値が劣化する課題があった. そこで本稿では,2 枚のREBCO線材を一体化するために,誘電体テープを使用 する構造(Fig1.(d))を提案する. 次に, 支持材によるQ値の劣 化を最小限に抑えるために,支持材を部分的に用いる構造を 提案する.加えて,銀保護膜の膜厚によるQ値の影響につい ても検討した. 最後にそれらの技術を組み合わせてコイルを 作製し、Q 値の測定を行った結果,前回報告[1]より飛躍的に Q 値を改善したので報告する.

2. 誘電体テープおよびコイル支持材の検討

誘電体テープの検討には、既に商用化されている REBCO 線材の絶縁に一般的に用いられるポリイミドと樹脂系材料の 中で、誘電体損失が最小クラスの PTFE を用いた. コイルの Q 値は誘電体テープの誘電体損失によって劣化するため、誘 電体テープの材質や厚さについて検討した. 2 種類の誘電体 が REBCO 線材を用いたコイルの Q 値に及ぼす影響につい て、3 次元電磁界シミュレータ(MW-Studio)を用いて解析した. 解析結果より、誘電体テープによる Q 値の劣化を最小限にす るためには、より小さい誘電体損失と、より薄い厚さのテープ が必要であることを明らかにした. 次に、支持材の誘電 体損失による Q 値の劣化を抑制するために、支持材を部分 的に使用する. REBCO 線材を誘電体テープで一体化した コイルの Q 値を支持材の幅を変えて検討した. 詳細は当日述 べる.

3. 提案技術を組み合わせたコイルのQ値の測定

Fig.2 に各線材で作製したコイルの Q 値を示す.挿入図に 示すコイルは,提案 REBCO 線材を誘電体テープで一体化し, それを発泡スチロールの支持材に埋め込み作製した.測定 結果から REBCO 線材を用いたコイルの Q 値が銅コイルの約 20 倍の Q 値(19617)となることを明らかにした.銀保護膜がコ イルの Q 値に与える影響については当日述べる.

4. まとめ

本稿では,提案 REBCO線材を構成する2枚の REBCO線 材を一体化する方法として,誘電体テープを使用することを 提案した.次に,コイルのQ値の劣化を最小限に抑えるため に,支持材構造と銀保護膜の膜厚について検討した.最後に, これまで提案してきた技術を組み合わせることで提案 REBCO 線材を用いたコイルの測定Q値が,銅コイルと比較して約20 倍(Q値: 19617)となることを実証実験より明らかにした.

謝辞

本研究は総務省 SCOPE(181603014)の委託を受けて実施 した.

参考文献

[1] N. Sekiya, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) 1A-p06







Fig.2 Measured quality factor of each wire type and fabricated coil

抵抗型超電導限流器を目的とした加圧液体窒素冷却下における GdBCO 無誘導巻コイルの復帰特性向上に関する検討 Recovery Characteristics of GdBCO Series-connected Non-inductive Coil in Pressurized Liquid Nitrogen for a Resistive SFCL

<u>松下直也</u>,柳井 創太,白井 康之,塩津 正博(京大) <u>MATSUSHITA Naoya</u>, YANAI Sota, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro (Kyoto University) E-mail: matsushita@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

抵抗型超電導限流器の実用化にあたり、故障電流の遮断 の後、素早く超電導状態に復帰することが求められる。超電導 線材表面に PTFE (PolyeTetraFluoroEthylene)コーティングを 施したり、液体窒素に圧力をかけたりすることで、復帰特性が 向上することがすでに確認されている[1]が、本研究では GdBCO 無誘導巻コイルを用い、液体窒素の流路を変えて実 験を行い、復帰特性を検討した。

2. 試験体

Τ

本実験に使用した試験体(住友電工製)を Fig.1 に示す。使 用した超電導線材は幅4 mm、厚さ0.2 mm、長さ2560 mm で 単位長さ当たりの常温抵抗値が276.8 m Ω /m の GdBCO 線 材であり、先行研究[1]と同じ無誘導巻パンケーキ巻枠を用い て、Table.1 に示す5 つの試験体を用いて、液体窒素の流路 条件を変えた。



Fig.1 Bare sample

able.1	Comparison	of	each	non-inductive	coil
	±				

No	Sample	Surface	Position	$R (m\Omega)$
		condition		at <i>T</i> [K]
1	Bare	Bare	Normal	683
				(T = 297)
2	Fluorosurf	Fluoro	Normal	651
	coated			(T = 285)
3	Bare	Bare	Upside-	683
	upside-		down	(T = 284)
	down			
4	Bare no-	Bare	No-roof	681
	roof			(T = 300)
5	Fluorosurf	Fluoro	Upside-	647
	coated		down	(T = 285)
	upside-			
	down			

3. 試験方法

Fig.2のように実験回路を組んだ。Switch1を閉じ、100 ms 間 交流電圧を試験体にかけてクエンチさせた。電圧値はクエン チ後の抵抗値が 600 mΩに達するように調整した。復帰特性 を観察するため、超伝導線材が超電導状態に戻るまで、一定 電流(100 mA)を通電し、抵抗を計測した。また、試験体の側面 から超電導線材の表面をハイスピードカメラで撮影し、復帰中 の沸騰現象を観察した。液体窒素にかける圧力は 0.10 MPa から0.50 MPaまで0.05 MPa刻みで変化させて実験を行った。



Fig.2 Test circuit

4. 実験結果と考察

Fig. 3 に 0.10 MPa における各試験体の復帰特性の比較 を示す。図より試験体 No.1、No.2のグループと No.3、No.4、 No.5 のグループに分けられる。前者のグループの復帰時 間は約 2.8 s ~ 3.2 s であるのに対して、後者のグルー プの復帰時間は約 1.9 s と非常に早い。そのうえ、前者 のグループよりも後者のグループは膜沸騰領域での冷却 速度が大きいこのことから、0.10 MPa の時、気泡の挙動 が復帰特性に大きな影響を与えていることが分かる。



Fig.3 Comparison of recovery characteristics of each sample

5. まとめ

0.10 MPa の時は気泡の挙動が復帰特性に与える影響が 大きいため、気泡が排出される流路を適切に設定するこ とで復帰時間は大幅に短縮することが分かった。一方で 0.20 MPa~0.50MPa においては気泡があまり発生しない ため、気泡の挙動が復帰特性に与える影響は小さい。そ のため、加圧にかかるコストと加圧による復帰特性の向 上を考慮して圧力を設定する必要がある。

参考文献

[1]. S.Yanai, et al (2019): "Study on Improvement of Recovery Characteristics of GdBCO Non-Inductive Coil for Resistive SFCL" 2019 年度春季低温工学·超電導学会

抵抗型超伝導限流器の復帰時間短縮を目的とした 金属ポーラス体利用による REBCO 線材の高速冷却 Quick cooling of REBCO tape with metal porous medium to shorten recovery time of resistive type superconducting fault current limiters

<u>結城 光平</u>, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大) <u>YUKI Kohei</u>, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.) E-mail: kohei.yuki.t2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

抵抗型超伝導限流器では希土類系銅酸化物超伝導体 (REBCO)線材を利用することにより,短絡事故後1ms 以内の高速動作を可能にしている.一方,限流動作時にお いて REBCO 線材温度は最大 300 K 程度まで上昇するた め,事故後の高速復帰(0.3 s 以内)には熱伝達性能の低い 膜沸騰の抑制が有効である[1].そこで,著者らは膜沸騰抑 制効果を有する金属多孔質体(ポーラス体)を REBCO線 材上面に接合することで復帰性能向上を図っている[2].

これまでの研究[3]により,低熱伝導材料を介しポーラ ス体を接合することで,ポーラス体未接合時に比べ4倍の 高速復帰を達成した.また,REBCO線材上面で非沸騰領 域が発生後,線材全体に非沸騰領域が伝播する様子を確認 し,液体窒素とREBCO線材間の固液接触[4]が復帰に影響 を与えることを明らかにした.そこで本研究では,復帰過 程における固液接触を促進するためのREBCO線材構造を 検討し,実験および数値解析により復帰性能を評価した.2

2. 実験・解析方法

本実験では幅4 mm, 超伝導層上に厚さ2 µm の保護銀 層のみが積層されている REBCO 線材 (SuperOx Japan 製, ST-4-20)を使用した. ポーラス体には気孔率 90%, 厚さ 0.5 mm の Ni-Cr 金属発泡体 (Nilaco 社製)を使用し, REBCO 線材保護銀層上に熱伝導率 0.6 W/mK の絶縁性エポキシ

(セメダイン社製, EP138) を介して接合した. Fig.1 に試 験体概念図を示す. 試験体の長手方向中央部には厚さ 0.6 mm のインジウムが配置されており, インジウムの電気抵 抗率は $1.7 \times 10^{-8} \Omega m$ (77 K)と低いため, インジウム配置領 域は電流通電時においても温度が上昇せず常に非沸騰領 域となる. 今回はインジウム配置長さ Lindが固液接触およ び復帰時間に与える影響に関して評価した. なお, 製作し た試験体の臨界電流値は 35 A, n 値は 36 程度であった. 液体窒素で浸漬冷却した試験体に, $I = I_0 \exp(t/t)$ で表され る電流を 0.5 s 間通電し, その後の復帰時間を測定した. ここで, I は電流, I_0 は初期電流, t は時間, τ は時定数(0.13 s)であり, 0.5 s での電流(最大電流) は 80 A であった.

また,実機体系における性能を評価するため Fig.2 に示 す回路モデルにおいて数値解析を行い,数値解析・実験双 方の結果を利用し限流・復帰性能を評価した.限流器は長 さ75 mの REBCO 線材が20本並列接続された構成とし, REBCO 線材は各試験体と同様の構造を有するとした.

3. 実験・解析結果および考察

Fig. 3 に Lind が実験および実機体系における復帰時間に 及ぼす影響を示す. 絶縁性エポキシの熱伝導率は非常に低 いため,同じ大きさの電流を通電した場合,試験体の最大 温度は Lind に関わらずおおよそ等しくなるが,実験で得ら れた復帰時間は,インジウムを配置することで短くなって いる.これは,非沸騰領域(インジウム配置領域近傍)か ら沸騰領域(絶縁性エポキシ領域)へと液体窒素が侵入し, 固液接触が促進されたことが要因であると考えられる.ま た, Lind が長くなるに伴い,試験体内に占める沸騰領域の 割合が小さくなるため,非沸騰領域がより瞬間的に線材全 体へと伝播し復帰時間が短縮されたと考えられる.一方, 実機体系における性能を評価したところ、Lind が長くなる に伴い復帰時間が増加した.これはLind が長いほど線材の 電気抵抗が低下するため、事故電流が増加し、その結果、 線材内の熱負荷が増大したためであると考えられる.以上 の結果より、限流器としての復帰性能の更なる向上には、 REBCO線材の電気抵抗低下を抑制しつつ、固液接触を促 進させることが重要であることが示された.

4. まとめ

本研究ではポーラス体を低熱伝導材料でREBCO線材に 接合した際の復帰性能評価を行った.その結果,インジウ ムを部分的にREBCO線材上に配置することで,非沸騰領 域が発生し,固液接触および除熱性能が向上した.しかし, 実機体系においては,インジウムによる電気抵抗低下の影 響が強く現れ,復帰時間は増加するという結果となった. その他の構造を有するREBCO線材の性能や,実験・数値 解析の方法・結果の詳細は発表当日に報告する.

参考文献

- M.Tamashima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.27 (2017) 5601805
- 2. K. Yuki et al., Supercond. Sci. Technol., Vol.33 (2020) 034002
- K. Yuki et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.99 (2020) p.105
- 4. S. Nishio et al., Trans. JSME B, Vol. 53 (1987) pp.1781–1787



Fig. 3 Relationship between Lind and recovery time

Bi2223 とコーテッドコンダクターにおける航空機用積層導体の臨界電流 Critical current of Bi2223 and coated conductor for hybrid stacked conductor of aircraft

<u>神田 昌枝</u>, 川合 修平, 岩田 暢祐, 山口 作太郎 (中部大学) <u>KANDA Masae</u>, KAWAI Shuhei, IWATA Yousuke, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University) E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

1. 緒言

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に耐える新しいケーブルが求められている。航空機では大電力を使うために超伝導ケーブルの利用が検討されており、航空機用の超伝導ケーブルとして軽量で直流から600Hzまでの交流を流す必要がある。また、アースが取れないため高電圧の利用には制限があり、400V以下での利用が想定されている。このため、テープ線材をスタック状に積層したケーブル導体を提案してきた[1,2]。

一方、超伝導バスバーに大電流を流すと自己磁場が大き くなり、臨界電流が下がる。さらに交流を流す場合には均流 化が課題で、現在はRoebel導体を利用しているが、線材を細 く切り出すため臨界電流は半分以下になることが報告されて いる[3]。大電流を流すためには自己磁場の影響を小さくする ことが重要である。そこで各層に流す電流は逆方向にした。 本研究では、コーテッドコンダクターと Bi2223 超伝導テープ 線材を組み合わせてケーブル導体を開発し、臨界電流を測 定した。

2. 実験試料·方法

本研究で使用した試料は、コーテッドコンダクター (SuNAM 製)とBi2223 (DI-BSCCO, HT-CA, 住友電工製)の 超伝導テープ線材を準備した。コーテッドコンダクターの試料 形状は横幅 4.1mm、厚み 0.14mm で 77K 時の臨界電流は 200A のものを使用した。また Bi2223 の試料形状は横幅 4.6mm、厚み 0.35mm で 77K 時の臨界電流は 180~200A の ものを使用した。

コーテッドコンダクターと Bi2223 の超伝導テープ線材を組 み合わせて線材 6 層を重ねており、外側をコーテッドコンダク ター(1+、3-)、内側 4 本(1-、2+、2-、3+)を Bi2223 と した。なお、積層構造に加工した積層導体は、各層毎に電流 方向を反転させた。

3. 実験結果·考察

6層の超伝導テープ線材を全てBi2223とした場合、6層(1 +、3-、1-、2+、2-、3+)の中で2+と2-の部分のみに 電流を流すと、2+の臨界電流は262Aであった。これは、 Bi2223のメーカー使用値(180A級)よりも高い値である。また、 外側の線材に通電させていくにつれて臨界電流は低下した。

6層の超伝導テープ線材 で最外層(1+、3-)をコーテッ ドコンダクター、内側4本(1-、2+、2-、3+)をBi2223とし た場合の結果を図1に示す。その結果、2+の臨界電流は 270Aであった。これは、メーカー使用値(180A級)よりも高い 値で、Bi2223線材としては世界最大の臨界電流である。また、 6層の超伝導テープ線材を全てBi2223とした場合と同様に最 外層コーテッドコンダクター、内側4本をBi2223とした場合で どちらの場合も外側の線材に通電させていくにつれて臨界電 流は低下した。 以上のことから外側の線材はさらに外側に線材が無い、つまり他の線材に挟まれていないため、線材垂直面方向の外側磁場が内側のように打ち消すことができず、臨界電流が下がった。今回は外側に磁場の影響が少ないコーテッドコンダクターを置くことで臨界電流の低下が抑制されると考えている。



Fig.1 Critical current measurement of six high temperature superconducting tapes.

4. 結言

本研究では、超伝導技術を超伝導送電システムや超伝導 モータなど新しい技術として宇宙・航空機応用するためコーテ ッドコンダクターとBi223を組合せ、積層構造に加工した。そ して、各層毎に電流方向を反転させ、各層の臨界電流を測定 した。その結果、一番内側にある2+、2-を通電させた場合臨 界電流が大きく向上させ、Bi223線材としては世界最大の臨 界電流を達成した。しかし、外側の線材に通電させていくに つれて臨界電流は減少傾向にあった。これは通電している線 同士の距離が離れていくため打ち消すことができる自己磁場 が減少してしまうためだと考えられる。この影響を減らすため、 本研究では最外層をBi2223より臨界電流の性能が良いとさ れているコーテッドコンダクターに置き換えた。

本研究グループの積層超伝導導体は、単純な構造で臨 界電流は高い構造であるため、Roebel 導体に比べて、宇宙・ 航空機用に貢献できるであろう。

- 1. J. Sun, et al.: Physics Procedia, Vol. 36 (2012) 1290-1295.
- 2. J. Sun et al.: Physica C, Vol. 494 (2013) 297-301.
- 3. S. S. Fetisov et al.: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 26 (2016) 4803204.

洋上風カ用三相同一軸型高温超電導ケーブルの低熱伝導層が ケーブル内の温度分布に及ぼす影響

Influence of the thickness of low thermal conductive layer on the temperature distribution within a tri-axial HTS cable for an offshore wind power generation system

富岡 和貴, 遠藤 夏実, 長崎 陽, 津田 理(東北大);宮城 大輔(千葉大) <u>TOMIOKA Kazuki</u>, ENDO Natsumi, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto(Tohoku Univ.); MIYAGI Daisuke(Chiba Univ.) E-mail: kazuki.tomioka.r3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、超電導ケーブルを洋上風力発電の海底送電ケー ブルに用いることを目指し、三相同一軸型超電導ケーブルの 長距離化に有効なケーブル構成について検討している^[1]。こ れまでに、外部からの侵入熱による冷媒の温度上昇を抑制す るために、熱伝導率の低い低熱伝導層をケーブル内に設け ることが、ケーブルの長距離化に有効であることを明らかにし た^{[2][3]}。しかし、低熱伝導層を厚くすると、ケーブル内流路の LN₂温度上昇を抑制できるものの、ケーブル径が大きくなるこ とにより外部侵入熱が増加する。また、低熱伝導層の設置場 所によっては、HTS 層の径(HTS 線材数)が変わるため交流 損失量も変化する。そこで、本研究では、低熱伝導層の厚さ がケーブル内部の温度分布に及ぼす影響を明らかにし、長 距離化に適した低熱伝導層の設計指針について検討した。

2. 解析方法

本解析に用いた三相同一軸型超電導ケーブルの諸元と解 析モデルを Table. 1 および Fig. 1 に示す。各相は、銅テープ で構成されたシールド層、超電導層、絶縁用の PPLP®により 構成され、コルゲート管に収容されると仮定した。ケーブルの 冷却は1つの冷却ステーションで行うとし、循環系の構築が簡 易な向流を採用した。また、冷媒は内側流路、外側流路の順 に流れ、回帰するものとし、低熱伝導層は内側冷媒流路の外 側に設置した。ケーブル内の熱解析では、銅テープ線の渦電 流損、超電導線の交流損失、PPLP®の誘電体損失、冷媒の 摩擦損失、ケーブル外部からの侵入熱を考慮し、各相の超電 導線における交流損失は、有限要素法による薄板近似モデ ルを用いた電磁界解析により評価した。なお、ケーブル最長 距離は、冷媒温度で決定される最長距離と冷媒圧力で決定 される最長距離の短い方に依存するとし、断熱管内半径は、 ケーブル長が最も長くなるように最適化した。

3. 解析結果及び考察

Fig. 2に,様々なケーブル長において,適用する低熱伝導 層の厚さを変化させた際のケーブル内最大温度を示す。 Fig. 2より, 低熱伝導層の厚さに対するケーブル内最大温度 には極小値が存在することがわかる。ケーブル長10 kmの場 合に着目すると,低熱伝導層を10 mmから15 mmに増加させ るとケーブル内の最大温度は減少している。これは内側冷媒 と外側冷媒との間の熱伝導抑制効果が増大し,より多くの熱 を冷媒に吸収させて外部に排出できるためである。また,超 電導層の径が増大し,超電導線数が増加するため超電導線 の電流負荷率が減少し,交流損失も減少する。しかしながら, 低熱伝導層の厚さを15 mm以上に増加させると、ケーブル内 の最大温度は上昇している。これは、ケーブル外径が増大す ることによりケーブルの表面積が増え、外部からの侵入熱が 増加する影響の方が大きくなるためである。また, Fig. 3に, ケ ーブル内最大温度が極小値をとる際の低熱伝導層の厚さを ケーブル長ごとにプロットした結果を示す。Fig. 3より, 極小値 をとる際の低熱伝導層の厚さとケーブル長の関係から,目標 ケーブル長に対して適用すべき最適な低熱伝導層の厚さを, 線形近似して求めることができることがわかった。

Table. 1 Specifications of analytical model of an HTS tri-axial cable with low thermal conductive layer.

Nominal voltage [kV]	6.6
Transmission capacity [MW]	40
Outer radius of inner refrigerant flow path [mm]	24.89
Twist pitch [mm]	500
Critical current at 77 K [A]	200
Cu layer thickness [mm]	0.01
PPLP [®] insulation thickness [mm]	2.0
Thermal conductivity of low thermal conductive layer [W/m/K]	0.018
Flow rate of LN ₂ [L/min]	60
LN ₂ inlet temperature [K]	65
LN ₂ inlet pressure [MPa]	1.0







Fig. 2. Maximum temperature in the cable as a function of the thickness of low thermal conductive layer for each cable length.



Fig. 3. Optimum thickness of low thermal conductive layer as a function of cable length.

- D. Miyagi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond*, Vol. 28, No. 4 (2018) 17662561.
- N. Endo, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.159.
- 3. N. Endo, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond*, Vol. 29, No. 5 (2019) 2904546.

ホール素子を用いた超電導ケーブルコアの電流分布測定 Measurement of current density profiles of superconducting cable core by Hall probe method

<u>筑本</u>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) <u>CHIKUMOTO Noriko</u>, YAMAGUCHI Satarou Chubu Univ.); SHYSHKIN Oleg (Institute of Plasma Physics (IPP), CAS) E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導 (HTS) ケーブルコアの構造例を Fig.1 に示 すが、ケーブルコアは、HTS 線材を複数用いて積層・並 列させて所定の電流容量となるようにしている。このよ うな配置においては、通電時には相互の自己磁界の影響 を受けることになる。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、我々のグループではケーブルで の電流分布を非破壊で測定する方法として走査型ホール プローブを用いた評価手法の開発を行ったので、その概 要と評価結果について報告する。



Fig.1	超伝導ケーブ	ルコア構造例
	(20kV-5kA、	直流送電用同軸ケーブル)

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 (DI-BSCCO[®]、内導体:11本/12本;外導体:16本、 外径 35mm)を用いた ケーブルの磁場分布測定は Arepoc 社(型番:HHP-VP)の横軸型ホール素子を用 い、Fig.2 に示すようケーブルに電流を流した状態で回転 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 ケーブル用磁場分布測定装置におけるホール素子 の配置とスキャン方向

3. 磁場分布評価結果と電流分布の解析

次に Fig.3 にケーブルの外導体1本に電流を通電した 時の磁場分布測定結果例を示す。またこのデータから計 算で求めた電流分布計算結果を Fig.4 に示す。このときの ケーブル導体-ホール素子間距離は1 cm であったため、 現在ホール素子を近づける改造をおこなっているところ である。

謝辞

磁場分布測定について、鶴岡誠、大倉大佑、岩田暢祐 の各氏のご協力に感謝いたします。



(b) 通電電流 150AFig.3 ケーブルの外導体1本に電流を通電した時の磁場 分布測定結果



Fig.4 電流分布計算結果

— 142 —

MgB2フィラメントへの残留圧縮ひずみ増加による MgB2線材の曲げ耐性向上

Improvement of bending tolerance of MgB_2 wire

by increasing residual compressive strain on MgB_2 filaments.

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

<u>TANAKA Hideki</u>, SUZUKI Takaaki, KODAMA Motomune (Hitachi); NISHIJIMA Gen, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS) E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

MgB2線材は 20 K 前後で使用可能な線材として期待され ている。MgB2線材を React&Wind で用いる場合,室温におけ る曲げ耐性は磁石形状を左右するため,曲げ耐性の向上指 針と、これを反映させたMgB2線材の実現が重要である。MgB2 線材の曲げ耐性はフィラメントの残留圧縮ひずみに影響され ることが示唆されており,先行研究において,熱処理条件の み異なるMgB2線材を用いてこの影響を明らかにした[1]。

本研究では、比較的熱膨張係数の大きなステンレス鋼を 線材構成材料に用いたMgB2線材を試作し、曲げ耐性を評価 した。なお本試作線材は安定化銅を最外層に持つ。これは超 電導接続の前処理である線材端部(接続対象部)からの安定 化銅の除去を容易にするためである。

2. 実験方法

Fig. 1(a)に試作線材(18 fila. SUS)の断面写真を示す。外から銅, SUS, 鉄をバリア材に持つ18 芯フィラメント,中央に鉄の構成であり線径は1.5 mmである。長さ約100 mmのサンプル線材を直線状で熱処理した後に以下の方法で曲げ耐性を評価した。線材の一端を曲げ用のボビンに固定し,固定端から他端に向かって線材をボビンに沿わせることで所望の曲げ負荷を与えた。曲げ回数は3回である。*I*。測定は,線材長さ約40 mm,電圧タップ間距離を5 mmとして,液体へリウム浸漬冷却による四端子法を用いた。電界基準は1μV/cmである。

本測定方法では、銅への分流に起因すると思われる抵抗 性電圧($0.02 \sim 0.1 \mu \Omega \times$ 電流値)が観測されたため、取得した 電流-電圧曲線から抵抗性電圧を差し引いて *I*。を評価した。 この抵抗性電圧が分流由来であることを確認するために、曲 げ負荷を与えていないサンプルを用いて銅の除去前後での *L*測定を行った。Fig. 2 に得られた電流-電圧曲線を示す。銅 を除去した結果、抵抗性電圧が極小となり通常の電流-電圧 曲線が得られ、抵抗性電圧がフィラメント欠陥に由来しないこ とを確認した。曲げ耐性の評価は全て銅付きの状態で行い、 *L*。劣化の限界曲げ半径近くでは 3 サンプルずつ評価した。

3. 結果

Fig. 3(a)に曲げ無しサンプルを基準とした L の曲げ半径依存性を示す。横軸は曲げ半径の逆数である。曲げ半径 108 mm の 3 サンプルのうち 1 サンプルで明らかに L が劣化したため,許容曲げ半径は 108~125 mm と分かる。各曲げ半径での L 測定値を平均したグラフが Fig.3(b)である。同図には比較用 MgB2線材[2](線径 1.5 mm,外からモネル,鉄バリア 10 芯,中央に銅, Fig.1(b))の評価結果も示す。同じ線径 1.5 mm の MgB2線材において曲げ耐性が2倍に向上したことが分かる。

なお,本試作線材(18 fila. SUS)および比較用線材(10 fila. Monel)における MgB₂ 部の面積率はそれぞれ約 30%, 24%であ る。以上のように,熱膨張係数の大きなステンレス鋼を MgB₂ 線材に用いることで, MgB₂ の占積率を維持しつつ曲げ耐性 を向上できることを示した。

熱膨張係数から推定した MgB₂ フィラメントの残留圧縮ひ ずみの大きさ,および曲げ限界における曲げ外側フィラメント の引っ張りひずみとの比較などは当日合わせて報告する。



Fig.1 Cross-sections of (a) 18 fila. SUS and (b) Monel reinforced 10 filaments (10 fila. Monel).



Fig.2 V-I curves obtained from sample wire (18 fila. SUS) and the same sample without Cu sheathe.



Fig. 3 (a) Measurement results of bending tolerance of 18 fila. SUS.
(b) Comparison between averaged values of 18 fila. SUS and conventional MgB₂ wire (10 fila. Monel).

参考文献

1. H. Tanaka, et al.: IEEE TAS, Vol. 29, no.5 (2019) 8401104

2. H. Tanaka, et al.: IEEE TAS, Vol. 28, no.4 (2018) 8400605

MgB4 を前駆体とした MgB2 多結晶体材料の開発 Development of MgB2 polycrystalline materials using MgB4 precursor

<u>須藤 将太朗</u>,小池 亘,元木 貴則,下山 淳一(青学大) SUDO Shotaro, KOIKE Wataru, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.) E-mail: c5619049@aoyama.jp

1. 緒言

MgB2 は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度~39 K を 有し、化学的に安定、合成が比較的容易で、さらに粒間の結 合に本質的に優れているなど多くの長所を持つ。このため MgB2線材は冷凍機冷却による 20 K 付近で運転する医療用 MRI 磁石や液体水素冷却による送電ケーブルなどへの応用 が期待されている。しかし、MgB2線材の広範な磁石応用には、 磁場中の臨界電流特性の改善が必須であり、それには MgB2 コアの高密度化、高純度化と主要なピンニングセンターである 結晶粒界の高密度化が重要な指針となる。高密度化、および 不純物 MgO 除去による高純度化に向けては、B と MgB2の 混合粉末の圧粉体に Mg を拡散させる Premix-PICT 拡散法 印が適している。さらに磁場中の臨界電流特性の改善に向け ては、結晶粒界の高密度化に加え、B サイトへの C 添加^[2]が 有効な手法の1 つである。以上の背景から我々はこれまで MgB4を原料とした Premix-PICT 拡散法により MgB2 バルクを 作製してきた。さらに~2 GPaの高圧1軸プレスとロール圧延成 型を用いることで MgB2 バルクを作製し、初期の B 原料に依 存せず、20K,~0Tにおいて~10⁶Acm⁻²の高いJ。を有する試 料の合成に成功し、初期 B 原料に依存しない低コスト MgB2 線材の作製が可能であることを報告してきた[3]。今回の発表で は MgB4を原料とした MgB2 バルクに対する C 添加効果、お よび MgB4を原料とした MgB2線材の物性について報告する。

2. 実験方法

高純度 MgB₄ 粉末は、Mg(粒径 1 mm): B = 1:4 の比で PICT 拡散法^[4]により SUS316 管内に充填し石英管中で熱 処理することで作製した。B 原料には Pavezyum 社製の高 価な B(粒径~300 nm)とフルウチ化学社製の安価な B(粒径 ~50 µm)を用いた。また本研究では炭素源に MgB2C2 を選 択し^[5]、MgB₂C₂の作製においても PICT 拡散法により MgO の低減を試みた。これら原料を用いた Premix-PICT 拡散法 MgB2バルクでは、premix 比を MgB4: B=1:0.5 の比で固 定し、一部試料では B に対して 2%C 置換を試みた。また プレス過程では~2 GPa の高圧 1 軸プレスにより SUS316 管を含めた試料厚さ d~1.03 mm に加工した試料に対し、 ロール圧延成型により d~0.90 mm まで加工した。また MgB2線材は、MgB4:B=1:0.5の混合粉末に対し、Mgを混 合する premix 法を用い、作製した。この原料粉末を SUS 管に 充填し、0.5 mm Øの丸線に加工後、真空石英管内で焼成した。 作製した試料の微細組織は SEM により観察し、超伝導特 性は SQUID 磁束計による磁化測定により評価した。また 試料の実効 C 置換量 xA を以下の式を用いて算出した[6]。 x_A = 47.6 × (0.3087-a) a [nm]: 試料の a 軸長

3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した MgB_2 バルクの $J_c - H$ 特性を示す。C 添加試料では磁場中において J_c 特性が向上する傾向が見られ

た。しかし 750°C で焼成した試料の実効 C 置換量 x_A は仕込 み組成 x = 0.04 に比べ非常に少なく、 800° C の比較的高温で 熱処理した試料では若干改善したが、依然仕込組成の半分 程度であった。Fig. 2 に、MgB4 を原料とした MgB2 線材の外 観(a)と断面の反射電子像(b)を示す。線材の直径は ~0.5 mm、 MgB2 の割合は約 40 %で緻密であることを確認している。

当日は MgB4と B の premix 比を変化させ、様々な焼成条 件で作製した Cドープ MgB2 バルクの物性、そして MgB4を原 料とした MgB2 線材の物性についても報告する。

謝辞 MgB2線材の加工に協力いただきました日立製作所、 児玉一宗様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] I. Iwayama, et al., Physica C 460-462 (2007) 581-582.
- [2] S.X. Dou et al., Appl. Phys. Lett 81 (2002) 3419-3422.
- [3] S.Sudo et al., abstract of CSSJ Conf. 99 (2020) 5.
- [4] S. Ueda et al., Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 222502.
- [5] M. Sawada et al., Solid State Commun. 281 (2018) 53-56.
- [6] A. Yamamoto *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 1323-1328.



Fig. 1 J_c-H curves at 20 K and 15 K of dense C doped MgB₂ bulks using MgB₄ precursor.



Fig. 2 (a) Photographs of MgB₂ wires. (b) Backscattered electron image of the cross section of MgB₂ wire prepared from MgB₄, Mg and B.

— 144 —

部分拡散 ex-situ 法による MgB2 バルクの作製

Synthesis of MgB₂ bulks by partial diffusion *ex-situ* method

小池 亘, 須藤 将太朗, 荒井 孝介, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

KOIKE Wataru, SUDO Shotaro, ARAI Kosuke, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5620050@aoyama.jp

1. 緒言

MgB2 超伝導体は、他の実用線材に用いられる超伝導体 と比べ上部臨界磁場 Hc2 と不可逆磁場 Hirr が低く、臨界電 流密度 J。 が磁場中で急激に減衰する。磁場中臨界電流特 性の改善には支配的なピンニングセンターである粒界の 高密度化、つまり MgB2結晶の微細化が重要な指針の一つ となる。さらに、有効電流経路の増加による J.特性向上に は充填率の改善が有効である。ex-situ 法は既製の MgB2 粉 末を材料形状に成型し焼結する手法で、均一な組織を持つ 多結晶体が得られる。この手法では微細な結晶が高密度に 充填した成型体を結晶成長させずに焼結することが高 J。 化の戦略となる。また、数 T レベルの磁場領域における使 用を想定した MgB2 超伝導線材には、炭素添加が必要不可 欠である。添加された炭素は MgB2の B サイトを置換して磁場 中のJcの低下を抑制する[1]。本研究では、ex-situ 法により 作製した MgB2 バルクの高 Jc 化を目的として、高密度化の ための高圧プレス、結晶成長を抑制するため少量の B 添 加及び、粒界のピンニング力を強化するために MgB2C2^[2] と高濃度 C 置換 MgB₂(MgB_{1.8}C_{0.2})の 2 種類の炭素源を用い てCドープ量制御を試みた。

2. 実験方法

MgB₂バルクの作製は MgB₂粉末(フルウチ化学製, 99%, #100)に少量の B(Pavezyum 製、粒径 250 nm)を MgB₂: B = 1: y (y = 0-0.5)のモル比で混合し、外部から Mg を拡散さ せる部分拡散 *ex-situ* 法により行った。具体的には、一端を プレスした SUS316 管に Mg(#100)、MgB₂ と B の混合粉、 そして Mg(粒径 1 nm)の順で充填し、もう一端をプレスし て封じた後、高圧一軸プレスを施した。また、磁場中 J_c特 性の向上のため、炭素源として自作した MgB₂C₂ や高濃度 C ドープ MgB₂(MgB_{1.8}C_{0.2})を B: C = 2-x: x (x = 0-0.06)のモ ル比となるように添加し、MgB₂バルクを作製した。

微細組織は SEM 観察、超伝導特性は SQUID 磁束計を 用いた磁化測定により評価した。J。は磁化ヒステリシス曲 線から拡張 Bean モデルを用いて算出した。また試料の実 効 C 置換量 xa は以下の式^[1]を用いて算出した。

x_A~47.6×(0.3087-a) a [nm]: 試料のa 軸長

3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した試料の J_{c} -*H*特性を示す。すべての焼 成条件において従来の *ex-situ* 法で作製した試料に比べ部 分拡散 *ex-situ* 法で作製した試料は高い J_{c} を示した。これ より少量の B 添加によって粒間結合が大幅に改善し、さ らに高粒界密度化につながることが示唆された。Fig. 2 に 仕込炭素量、10 Oe 下での ZFC 磁化率における転移の中点 T_{c}^{mid} および J_{c} ~10⁵ A cm⁻² (20 K) を示す外部磁場の関係を 示す。炭素置換した部分拡散 *ex-situ* 法 MgB₂において磁場 中 J_{c} の改善効果が確認できた。また、MgB₂C₂を炭素源と した試料に比べ MgB_{1.8}C_{0.2} を炭素源とした試料のほうが、 $J_c \sim 10^5 \text{ A cm}^2$ (20 K) を示す外部磁場が高くなった。一方、 3%C 置換試料においては T_c の大幅な低下により 20 K で の J_c 特性が劣化した。このことから本研究での合成方法、 条件において、20 K での磁場中応用に対しては最適 C 置 換量が 1%前後であることが示唆された。当日は焼成条件 を変えた炭素置換 MgB₂ ベルク試料の超伝導特性と微細 組織についても報告する。

- [1] A. Yamamoto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 1323-1328.
- [2] M. Sawada et al., Solid State Commun. 281 (2018) 53.



Fig. 1 J_c – H curves at 20 K of MgB₂ bulks prepared by partial diffusion *ex-situ* method.





<u>齋藤 優大</u>,太田 順也,作間 啓太,三浦 正志(成蹊大) <u>SAITO Masahiro</u>, OHTA Junya, SAKUMA Keita, MIURA Masashi (Seikei University) E-mail: dm206307@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

3B-a04

銅酸化物超伝導薄膜線材や鉄系超伝導薄膜線材の磁場 中応用に向けて、高い磁場中臨界電流密度(J_c)を有する線材 作製に向けて磁束ピン止め点の導入が盛んにおこなわれて いる。これまで我々も Trifluoroacetates Metal Deposition(TFA-MOD) 法を用いて REBa₂Cu₃O_y(REBCO) 薄膜内部に BaHfO3(BHO)ナノ粒子を導入することで高い磁場中Jcを得る ことに成功してきた。また、Pulsed Laser Deposition(PLD)法を 用いて BaZrO₃(BZO)ナノ粒子導入 BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂(Ba122)薄 膜を作製し、高い磁場中 J。特性を報告してきた[1,2]。これら の結果をもとに、磁束クリープを考慮したナノ粒子導入超伝導 薄膜の J。解析モデルを構築し、REBCO 及び Ba122 の J。を 理論的に説明できることを報告してきた[3]。この解析モデル により、磁場中 J。特性には、ローレンツ力と熱擾乱による量子 化磁束の運動をいかに抑制するかが重要であると分かった。 特に熱擾乱を抑制するには、磁束ピンニング点の導入と小さ いギンツブルグ数($G_i \propto \gamma^2 T_c^2 \lambda^4 / \xi^2$)が重要である[4]。

本研究では、REBCO と Ba122 の間の Gi を有する(La2xBax)CuO4(LBCO)に着目し、TFA-MOD 法を用いて磁束ピン ニング点としてBZOナノ粒子の導入を試み、REBCOとBa122 で有効性の確認されている高 J。を有する超伝導材料設計指 針のユニバーサル性を確認することを目的とした。

2. 実験方法

本研究ではLBCO に対するBZO 添加量を9 mol%とした。 LBCO+BZO 薄膜は、単結晶基板 LaAlO₃(LAO)上に TFA-MOD 法を用いて、本焼成温度(T_s)を 650 $^{\circ}$ C~820 $^{\circ}$ C、本焼 成時の酸素分圧(PO_2)を 100 Pa~1000 Pa と変化させ作製し た。LBCO+BZO 薄膜のキャリアを制御するため O₃ 雰囲気中 で熱処理を行った。超伝導層の膜厚は 150 nm である。作製 した LBCO+BZO 薄膜は、薄膜表面を光学顕微鏡、結晶構造 を X 線回折(XRD)法、超伝導特性を 4 端子法により評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 および Fig. 2 に本焼成時の酸素分圧 1000 Pa 一定と して、本焼成温度を変化させた LBCO+BZO 薄膜の XRD よ り得られた *c* 軸配向強度と結晶性(*c* 軸配向性($\Delta \omega$),面内配向 性($\Delta \phi$))をそれぞれ示す。Fig.1 および Fig.2 より *Ts*=800 °C、 *PO*2=1000 Pa が本研究では最も *c* 軸配向強度が高く、良好な 結晶性を示した。Fig.3 に O₃ アニール温度(*T*_{O3} anneal)150 °C、 アニール時間 4.5 h で熱処理した LBCO+BZO 薄膜の $\rho/\rho_{300 \text{ K}}$ 特性を示す。Fig3 より O₃ アニールした LBCO+BZO 薄膜は、 *T*_c^{onset} = 23.4 K を示した。

当日の発表では、成膜条件及び O3 アニール条件が結晶 性や超伝導特性に及ぼす影響について議論する。







Fig.2 Influence of PO_2 on $\Delta \omega$ and $\Delta \phi$ for $(La_{2-x}Ba_x)CuO_4$ +BZO films.



Fig.3 $\rho/\rho_{300 \text{ K}}$ for (La_{2-x}Ba_x)CuO₄+BZO films with O₃ annealing treatment($T_{O3 \text{ anneal}}$ =150 °C, hold time=4.5 h).

謝辞

本研究は、JSPS 科研費(18KK0414 及び 20H02184)、平和 中島財団、日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資 金を受け実施したものである。この研究の一部は新エネルギ ー・産業技術総合開発機構の助成を受け実施したものである。

- [1] M. Miura et al., NPG Asia Materials 9 (2017) e447.
- [2] M. Miura et al., Nature Communications 4 (2013) 2499.
- [3] M. Miura et al., Supercond. Sci. Technol. 32 (2019) 064005.
- [4] S. Eley, M. Miura *et al.*, *Nature Materials* 16 (2017) 409-413.

Reel-to-Reel PLD 法 EuBa₂Cu₃O_y+BaHfO₃線材の 磁場中超伝導特性

The J_c in magnetic field for Reel-to-Reel PLD EuBa₂Cu₃O_y+BaHfO₃ coated conductors

高橋 洸, 宮田 健司, 三浦 正志(成蹊大); 横江 大作, 加藤 丈晴(JFCC); 衣斐 顕, 和泉 輝郎(AIST) <u>TAKAHASHI Ko</u>, MIYATA Kenji, MIURA Masashi (Seikei University); YOKOE Daisaku, KATO Takeharu (JFCC); IBI Akira, IZUMI Teruo (AIST) E-mail: dm206310@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

REBa2Cu3Oy(REBCO)超伝導線材は、液体窒素下(77 K)に おいて高い超伝導特性を示すため、医療機器や電力機器な どへの応用が期待されている。中でも、Reel-to-Reel Pulsed Laser Deposition(RTR-PLD)法で作製された REBCO 線材は、 500 m 長を超える長尺線材において高い臨界電流値(Ic)を示 すことが確認されている[1]。しかし、特にマグネット応用に向 けては、更なる磁場中臨界電流密度(J_c)の向上が必要である。 また、実際のマグネット応用では磁場があらゆる方向から加わ るため、磁場印加角度に対して等方的なんの向上が求められ る。磁場中 J。向上の手法として磁束ピンニング点の導入が挙 げられる。これまで我々は、Trifluoroacetates Metal Organic Deposition(TFA-MOD)法 REBCO 線材に、磁束ピンニング点 として母相に対してインコヒーレントな界面を有する等方的な BaHfO3(BHO)ナノ粒子を導入することにより、あらゆる磁場印 加角度に対して等方的かつ高い J. を得ることに成功してきた [2]。一方で、PLD 法では母相に対してコヒーレントな界面を 有するため、導入量に伴いひずみによるキャリアの低下により Tcや自己磁場 Jc (Jc,s.f.)が低下し、磁場中 Jc 特性が向上しな い。また、PLD 法では導入した BHO ナノロッドなどが異方的 な柱状形状になるため、c軸方向では J。の向上が見られるが、 J_cの最小値(J_{c,min})が低い[3]。よって、これらのPLD法REBCO 線材の課題を解決するためには、Teや Jestを低下させずに、 等方的な形状に近い BHO ナノロッドを導入する必要がある。

そこで、本研究では RTR-PLD 法 EuBa₂Cu₃O₃(EuBCO)線 材及び異なる添加量(2~5 vol.%)の BHO ナノロッドを導入した EuBCO+BHO 線材を作製し、作製条件や添加量が結晶性、 微細構造や超伝導特性に及ぼす影響について検討する。

2. 実験方法

本研究では、RTR-PLD 法を用いて金属基板上に EuBCO 線材及び、BHO ナノロッドを 2 ~ 5 vol.%導入した EuBCO+BHO 線材を作製した。線材膜厚はそれぞれ、 EuBCO線材が 600 nm、EuBCO+BHO 線材が 550 nm であ る。作製した線材は結晶性をX線回折(XRD)法、微細構造を 透過型電子顕微鏡(TEM)、超伝導特性は四端子法を用いて 測定した。

3. 実験結果

Fig.1 に EuBCO+BHO 線材の T_c 、 $J_{c.s.f.}$ を EuBCO 線材の T_c 、 $J_{c.s.f.}$ で規格化した特性の BHO 添加量依存性を示す。図より、 3 vol.%までは T_c に影響を及ぼさないことが分かる。一方、 $J_{c.s.f.}$ は 3 vol.%までは向上することが分かった。Fig.2 に 77 K, 3 T における $J_{c,min}$ の BHO 添加量依存性を示す。図から、3 vol.%まで $J_{c,min}$ が添加量に伴い増加し、4 vol.%以上では低 下する。最も高い $J_{c,min}$ を示した EuBCO+3BHO 線材は $J_{c,min}$ =0.62 MA/cm² であり、非常に高い特性を得ることに成功した。

当日の発表では、BHO 添加量が結晶性、微細構造や磁場 中超伝導特性に及ぼす影響について報告する。



Fig.1 Normalized (a) *T*_c and (b) *J*_{c,s.f.}(77 K) as a function of vol.% of additions for RTR-PLD EuBCO+BHO CCs.



Fig.2 *J*_{c,min} at 77 K, 3 T as a function of vol.% of additions for RTR-PLD EuBCO+BHO CCs.

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の助成を受け実施したものである。また、本研究の一 部は、日本私立学校振興・共済事業団学術研究振興資金、 JSPS 科研費(18KK0414 及び 20H02184)の助成を受け実施し たものである。

- [1] A. Ibi et al., Physics Procedia 58 (2014) 97-100.
- [2] M. Miura, et. al., NPG Asia Materials 9 (2017) e447.
- [3] V. Selvamanickam, et al., SUST. 27 (2014) 055010.

フォースフリーケーブル応用に向けた Reel-to-Reel PLD 法により作製した BaHfO₃ 添加 YBa₂Cu₃O_y 厚膜線材の縦磁場中超伝導特性 Superconducting Properties under the Longitudinal Field in BaHfO₃-doped YBa₂Cu₃O_y Tapes Fabricated by the Reel-to-Reel PLD Method for the Force-Free Cable

<u>日比野 拓</u>, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大); 一野 祐亮(愛工大); 高橋 誠, 田橋 正浩(中部大); 木内 勝(九工大); 一瀬 中(電中研) <u>HIBINO Taku</u>, TSUCHIYA Yuji, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); ICHINO Yusuke (Aichi Inst. of Tech.); TAKAHASHI Makoto, TAHASHI Masahiro (Chubu Univ.); KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI) E-mail: hibino.taku@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体 REBa2Cu3Oy(REBCO)の送電ケーブル応 用に向けて、臨界電流 Lの向上が必要不可欠である。L向 上への取り組みとして、REBCO 層の厚膜化及び縦磁場効 果が挙げられる。後者について、電流方向に平行な磁場 (縦磁場)中においては、電流方向に垂直な磁場(横磁場)中 と比較して Ic が向上する。我々は、静止系で作製した IBAD-MgO 金属基板上の無添加及び BaHfO3(BHO)添加 REBCO 薄膜を交互に積層した構造において、縦磁場中に おける Jc が自己磁場中よりも向上する現象を報告した [1]。これまで報告してきた多層構造は膜厚が 0.4 µm であ るため厚膜化による L 増加が求められる。また、自己磁 場を利用して縦磁場を作り出すことで大幅な L 向上が期 待されるフォースフリーケーブル[2]への応用には REBCO 線材の長尺化が必須であるため、移動系での線材 作製を行う必要がある。本研究では、縦磁場効果に有効 的な REBCO 長尺線材を作製することを目的とし、Reelto-Reel システム及び PLD 法を用いた移動系にて、最大膜 厚 4.6 µm の 3vol.%BHO 添加 YBa2Cu3Ov(YBCO)厚膜線材 を作製し、縦磁場及び横磁場中における超伝導特性の評 価を行った。

2. 実験方法

KrF エキシマレーザー、Reel-to-Reel システムを用いた PLD 法により、長さ3 cm 程度の IBAD-MgO 金属基板上 に 3vol.% BHO 添加 YBCO 層の作製を行った。まず、buffer 層として膜厚 0.1 µm の BHO 添加 YBCO 層を、基板温度 T_s = 890 °C、酸素分圧 P_{02} = 53 Pa、基板移動速度 v_s = 7.20 m/h で作製した。buffer 層上に upper 層として BHO 添加 YBCO 層を T_s = 900 °C、 P_{02} = 200 Pa で作製した。ここで v_s を 0.72 -7.20 m/h と変化させることで upper 層の膜厚を 0.3-4.5 µm に制御した。膜厚の算出は、誘導結合プラズマ 発光分析法を用いた。超伝導特性の評価はカンタムデザ イン社製の PPMS を用いた直流四端子法により縦磁場及 び横磁場中での測定を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に自己磁場中臨界電流密度 J_c st で規格化した 65 K における 3vol.%BHO 添加 YBCO 線材の縦磁場中 J_c 特 性を示す。内挿図に 65 K における 3vol.%BHO 添加 YBCO 線材の J_c st の膜厚依存性を示す。J_c st と比べ、0.3 T にお ける J_c は、2.6 μm 厚の線材では 100.7%に向上した。一 方、4.6 μm 厚の線材では 84.7%と最も低下した。また、J_c st は膜厚の増加に伴って単調に減少した。

Fig. 2 に *B*//*c* 方向の *J*。で規格化した 65 K、3 T におけ る 3vol.%BHO 添加 YBCO 線材の横磁場中 *J*。の磁場印加 角度依存性を示す。0.4 µm 厚の線材は *B*//*c* 方向に最も鋭 いピークを有し、膜厚の増加に伴ってピークが緩やかに なった。この結果から、厚膜化によって *c* 軸相関した磁 束ピンニングセンターが減少することが示唆された。こ れは膜厚増加に伴い、成膜時の表面温度の低下によって BHO ナノロッドが細く、切れて成長したためと考えられる[3]。

当日は、TEMによる微細構造観察及び積層構造を有する厚膜線材の縦磁場中 Jcの検討を行う予定である。



Fig. 1 Field dependence of the normalized J_c of the 3vol.% BHOdoped YBCO tapes under the longitudinal magnetic fields at 65 K. The inset shows the thickness dependence of the $J_c^{\text{s.f.}}$ of the 3vol.% BHO-doped YBCO tapes at 65 K.



Fig. 2 Field angular dependence of the normalized J_c of the 3vol.% BHO-doped YBCO tapes at 65 K and 3 T.

謝辞

本研究の一部は、JST-A-STEP、科学研究費補助金 (19K22154、20H02682、20K15217)、NEDOからの助成を受 けて実施したものである。本研究で使用した IBAD-MgO テープは(株)フジクラ飯島康裕様より提供して頂いた。

- K. Sugihara *et al.*: J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 83 (2019), No. 9, pp. 314-319.
- [2] T. Matsushita *et al.*: Supercond. Sci. Technol. Vol. 25 (2012), No. 125009.
- [3] S. Miura et al.: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 53 (2014), No. 090304.

REGREB 法で作製された RE 系コート線材を用いた 単層縦磁界超電導導体の通電特性

Current-carrying properties of single-layer longitudinal magnetic field superconducting conductors by RE-based coated tape using REGREB method

<u>木内 勝</u>, 黒木 篤也(九工大); 日比野 拓, 土屋 雄司, 吉田 隆(名大); 高橋 誠, 田橋 正浩(中部大) <u>KIUCHI Masaru</u>, KUROGI Atsuya (Kyushu Inst. Of Tech.); HIBINO Taku, TSUCHIYA Yuji, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); TAKAHASHI Makoto, TAHASHI Masahiro (Chubu Univ.) E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

通電電流方向と磁界の向きが平行になる縦磁界下では臨 界電流が増加し、この現象を利用した電流導体が提案されて いる[1]。更なる大容量、高効率化のためには縦磁界下での 大きな臨界電流 *L*を有する線材が必要である。短尺線材では 縦磁界下で、自己磁界よりも大きな臨界電流密度 *L*の報告が あるが[2]、電流導体の作製で使用するような長尺線材での報 告はまだない。

一方で、基板上に良好な結晶性を示す REBCO のシード 層を作製し、そのシード層上に幅広い成膜条件で良質な超 電導層を作製できる REBCO Growth Using REBCO Buffer-layer(REGREB)法が提案されている[3]。この手法は厚 膜で、人工ピンを導入した線材の作製が可能である。そこで、 本研究では、この REGREB 法を用いて作製された厚膜超電 導線材を用いて、単層縦磁界超電導導体を設計し、その有 効性を議論する。

2. 実験

単層電流導体の作製に用いた超電導線材は、KrF エキシ マレーザーとReel-to-Reel システムを用いた PLD 法により、 IBAD-MgO金属基板上に3vol.% BaHfO₃(BHO)を添加した、 YBa₂Cu₃O_yの厚膜線材である。まず、buffer 層として膜厚 0.1 μ mのBHO添加YBCO層を作製し、その上にupper 層1.3 μ mを作製した。最終的な超電導層の厚さは 1.4 μ mである。 なお、成膜時の基板移動速度は、buffer層で7.20 m/h、upper 層では2.16 m/h とした。

作製した超電導線材の縦磁界下と垂直磁界下の Jcの磁界 依存性を、カンタムデザイン社製の PPMS を用いた直流四端 子法で測定を行った。

結果及び検討

Fig.1 に四端子法で測定した、65 Kと77 K における縦磁 界(J//B)と垂直磁界($J \perp B$)の J_c の磁界依存性を示す。 77 K では磁界に対して一定の J_c となったが、65 K で僅かであ るが自己磁界 J_c よりも大きな値を示した。

上記の実験結果を考慮して、直径 12.7 mm のフォーマに 線材幅4 mmの線材を10枚用いた場合の単層縦磁界超電導 導体の設計を行った[1]。ここでは、線材の巻き角度 $\theta < 5^{\circ} \sim$ 20° と変化させた場合の電流容量 I_{ct} を求めた。Fig. 2 に 77 K と 65 Kの I_{ct} の磁界依存性を示す。77 K では、 θ を変化させて も、自己磁界下の I_{ct} を超えるよう特性は得られなかったが、65 K では 0.04 T 近傍で、 I_{ct} がピークを持つことがわかった。さら に、巻き角度が 5°~10°の間でも同様な増加が確認できた。 これは、温度の低下により線材の縦磁界下での J_c が増加した ためである。詳細な議論は当日行う。

謝辞

本研究(の一部)は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)の研究成果展開事業「A-STEP 機能検証フェーズプロ グラム」の支援によって行われた。



Fig. 1 Critical current density J_c vs. longitudinal magnetic field B in the BHO-doped YBCO coated conductors. Symbols and dotted lines show experimental results and fitting results, respectively.



Fig. 2 Current-carrying capacity $I_{\rm ct}$ vs. longitudinal magnetic field for one-layer conductor at (a) 77 K and (b) 65 K, respectively.

- [1] V.S. Vyatkin et al.: Physica C 494 (2013) 135-139.
- [2] K. Sugihara *et al.*: J. Japan Inst. Met. Mater. 83 (2019) 314-319.
- [3] J. Matsuzaka *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, 96 (2018) 64.

Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_yフィラメントの強磁場臨界電流特性 High-field measurements on critical current properties of Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y filaments

小林 大地, 岡田 達典, 淡路 智 (東北大) <u>KOBAYASHI Daichi</u>, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.) E-mail:d.kobayashi@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Bi2223)高温超伝導体は、低温・高磁場 下で大電流を通電可能なことから超伝導マグネットへの応用 が期待されている。当研究室では、30 T 無冷媒超伝導マグネ ット用インサートコイルの選択肢の 1 つとして、住友電工製の DI-BSCCO テープの利用を検討している。マグネット応用で は、テープ面に対し様々な角度で磁場が印加されるため、臨 界電流 *L* の磁場・角度依存性の理解が必要不可欠である。 DI-BSCCO テープの *L* の磁場依存性は既に報告されている [1]が、*L* の詳細な角度依存性は 77 K での報告[2]のみである。 低温では *L* が急激に増大するため、テープ線材のままでは測 定が難しい。そこで本研究では、DI-BSCCO Type-H テープ から抽出したフィラメントを用いて、Bi2223 の臨界電流特性を 様々な条件で測定した。

2. 実験方法

試料は DI-BSCCO Type-H テープを用いた。Type-H テー プをH₂O₂とNH₃の混合液に浸し、表面の銀シースを除去する ことでフィラメントを抽出した。臨界電流や電気抵抗率の測定 には直流四端子法を用いた。臨界電流の評価には n 値モデ ルを用い、電界基準は 1μ V/cm とした。磁場は、東北大金研 強磁場センター所有の 20 T 無冷媒超伝導マグネット (20T-CSM)を用い、最大 19 T まで印加した。尚、磁場印加角度は テープ面に垂直な方向を 0°と定義した。

3. 実験結果·考察

ピン止めカ F。の磁場依存性は、50 K より低温側で温度ス ケーリングを確認できたが、65 K より高温ではスケーリングから 逸脱する振る舞いが見られた。このため、低温と高温側で異な るピン止め機構が支配的になっている可能性がある。

Fig. 1 に 65 K における Bi2223 フィラメントの臨界電流密度 J_c の角度依存性を示す。 $\theta = 90^{\circ} (B//テープ面)$ において、 固有ピンニングで典型的な急峻なピークではなく、緩やかなピ ークが見られた。これは、テープ垂直軸を中心に c軸が分布し ているためと考えられる。実際に種々の DI-BSCCO テープに おいて c 軸配向性の分布が存在することが報告されている[2]。 図中に黒線で示したフィッティング曲線は、c 軸配向がガウス 分布に従うと仮定して 16の角度依存性を計算した結果である。 フィッティングにはピン止め力 Fnの温度スケーリングから得ら れる $J_c(T,B, \theta)$ の関係式 (1)と B_{c2} に関する Tinkham モデル [3]を用いた。更に c 軸配向の標準偏差 σ として、先行研究 で報告されている σ = 9.0 [2]を用いた。結果、Fig. 1 のように 実験結果をおよそ再現できている。しかし、細かな逸脱も見ら れる。(1)式における J. の異方性は、有効質量の異方性のみ を考慮したもので、このような逸脱は有効質量以外の因子(要 素的ピンニング力など)が付加的な角度依存性を有している

可能性を示している。更に、フィッティングに用いた異方性パ ラメータは y= 8.5 と小さく、その起源については更なる検討を 要する。

$$J_c(T, B, \theta)$$

=
$$J_{c}(T, B, 0^{\circ}) \left(\frac{B_{irr}(T, \theta)}{B_{irr}(T, 0^{\circ})} \right)^{1.51-p} \left(\frac{1 - B_{B_{irr}}(T, \theta)}{1 - B_{B_{irr}}(T, 0^{\circ})} \right)^{q}$$

 $p, q: \mathcal{I}$ イングパラメーター、 $B_{irr}: 不可逆磁場$

4. 結論

F_pのスケーリングプロットでは低温でスケーリングしたが、 65 K より高温ではスケーリングから逸脱する振る舞いが見られた。このため、低温と高温側で異なるピン止めセンターが有効 になっている可能性がある。

J.の角度依存性は c 軸配向の分布を考慮した Tinkham モ デルでフィッティングした結果、概ね再現できた。フィッティン グの精度を上げるため、今後、更に条件を詰めていく必要が ある。

講演では、上記の詳細を報告し、Bi2223 フィラメントにおけ る磁場中臨界電流特性について議論したい。



Fig. 1 Angular dependence of J_c at 65 K and fitted curves for Bi2223 filaments taken from DI-BSCCO Type-H tape.

参考文献

- [1] N. Ayai, et al.: IEEE-TAS., Vol. 17 (2007) p. 3113.
- [2] P. Sunwong, et al.: IEEE-TAS., Vol. 21 (2011) p. 2840.
- [3] M. Tinkham,: Phys. Rev., Vol. 129 (1963) p. 2413.

— 150 —

Bi2223 線材に対する後熱処理条件と磁場中臨界電流特性

Post Annealing Condition and In-Field Critical Current Properties of Bi2223 Tapes

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

SATO Kaito, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

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

E-mail: c5619047@aoyama.jp

3. 結果と考察

1. はじめに

Bi2223 は高い臨界温度(~110 K)を有し、c 軸配向組織の 形成が容易な劈開性を有していることから長尺多芯線材 としての開発が比較的早期に進行し既に多くの用途で実 用されている。最も普及している住友電工社製 DI-BSCCO[®] は2回の圧延と2回の焼成によって作製されている。2次 圧延後の2次焼成には高圧ガスを用いた加圧焼成法が採用 されているが、その焼成条件は1次焼成と同じ酸素分圧~8 kPa 程度で行われている [1]。我々はこれまで酸素分圧2~3 kPa の焼成で Bi2223 相の生成が促進されること、不純物相 の粒成長が抑えられることを報告してきた[2]。さらに、低 酸素分圧下での焼成では Pb の固溶限界が高濃度側にシフ トすることから磁場中臨界電流特性の改善だけでなく、焼 成温度の低下による不純物相の生成や不純物粒子の成長 抑制や Pb の飛散量低減の効果も期待できる。

以上の背景のもと、本研究では DI-BSCCO®2 次圧延線材 に対して大気圧下 2 次焼成を低酸素雰囲気下で行い、その 焼成条件および後熱処理条件と磁場中臨界電流特性の関 係の解明を目指しており、特に中温域(20 – 60 K)における 磁場中臨界電流特性改善指針を得ることに注力している。

2. 実験方法

DI-BSCCO の 2 次圧延線材に対して大気圧下、810-825°C, $P_{02} = 3 \text{ kPa}, 6 \text{ h}$ の条件で 2 次焼成を行った後、740°C, $P_{02} = 1 \text{ kPa}, 24 \text{ h}$ のポストアニールを施した。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っ た。磁化特性は SQUID 磁束計により評価した。電気抵抗 の温度依存性は交流四端子法により調べ、不可逆磁場は 1 $\mu\Omega$ の抵抗基準で決定した。また、高温短時間焼成 (810 – 825°C, $P_{02} = 3 \text{ kPa}, 6 \text{ h}$)と低温長時間焼成(790°C, $P_{02} = 3 \text{ kPa}, 36 \text{ h}$)を組み合わせた2段階焼成を行った試料につ いても物性評価を行った。 Fig.1 に 810 - 825°C, P_{02} = 3 kPa, 6 h で 2 次焼成した Bi2223 線材の 1 kOe での磁化ヒステリシスの幅 ΔM で規格化した $\Delta M - H$ 特性を示す。大気圧中低酸素分圧下焼成では焼成 温度に依らず $\Delta M - H$ 特性の再現性の高い線材が得られる ことがわかった。810°C で焼成した線材がいずれの温度域 においても特性がやや低いことは、粒間の結合が不十分で あることを示唆している。一方、825°C で焼成した線材で は 60 K, 40 K の ΔM の減衰が大きく、その一因として焼成 中の飛散による Pb 固溶量の低下が考えられる。講演では 2 段階焼成線材の磁場中臨界電流特性についても議論する。



Fig.1 Normalized $\Delta M - H$ curves at 20 - 60 K of Bi2223 tapes sintered under $P_{02} = 3$ kPa for 6 h at various temperatures.

参考文献

[1] K. Sato, S. Kobayashi, T. Nakashima, *Jpn. J. Appl. Phys.* 51
 (2012) 010006

[2] R.Tajima, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K.
Kishio, T. Nakashima, S. Kobayashi, K. Hayashi, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23 (2013) 6400604

— 151 —

銅酸化物超伝導材料における実際のキャリアドープ状態制御(2) -Bi2223 材料について-Actual Control of Carrier Doping State of Cuprate Superconducting Materials(2)

- Bi2223 materials-

<u>下山淳一</u>、岩見壮徒、佐藤海斗、元木貴則(青学大) <u>SHIMOYAMA Jun-ichi</u>, IWAMI Taketo, SATO Kaito, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.) E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物超伝導体のなかで実用材料化が最も進んでい る REBa2Cu3O7-δ (RE123)や(Bi,Pb)2Sr2Ca2Cu3Oy(Bi2223)で は、臨界電流特性など材料としての物性はよく理解され ているが、基礎的な物性制御の知見が材料物性向上に十 分に生かされているとは言えない。材料開発では実用的 な臨界電流特性の再現性良い実現が最優先であり、実際 の超伝導領域の化学組成やこれに直接かかわるキャリア ドープ状態に遡っての物性改善が図られることは少ない。 RE123 材料では不定比酸素量と Ba サイトへの RE の部分 置換量が臨界電流特性に大きく影響する。前回の報告で は Gd123 溶融凝固バルクにおける酸素拡散挙動を調べ、 Ba サイトへの RE の部分置換を抑制する還元ポストアニ ール過程の追加や、また直方晶-斜方晶転移を低い温度 で起こすことで、酸素拡散が著しく速やかになり、材料全 体にわたる酸素量制御が容易になることを報告した。一 方、Bi2223 では RE123 と比較してかなり小さいが酸素不 定比性があり、Sr サイトに Bi, Ca が固溶でき、さらに Bi サイトへの Pb 固溶量もキャリアドープ状態に大きく影響 する。加えて Pb3221 相が高酸素分圧下で生成しやすく、 これが Pb 固溶量の低下を伴うだけでなく粒間結合を劣化 させることから、最終的に Pb3221 相の析出が無いように 熱処理を行う必要がある。RE123 では同じく高酸素分圧 下で進行しやすい Ba サイトへの RE の部分置換が起こら ない条件で酸素アニールを行う必要があるが、Bi2223 で はPb3221の生成が起こらない条件で酸素量を調節する必 要がある。今回は低温領域での精密な酸素不定比性のデ ータがほとんどない Bi2223 焼結体の平衡酸素量の変化を 高温微重量熱天秤を用いて調べ、さらに酸素量を調節し た焼結体の超伝導特性を系統的に調べた結果を報告する。

2. 実験

標準的な実用線材の出発組成に近い、金属組成比 Bi: Pb:Sr:Ca:Cu=1.66:0.34:1.95:2:3の仮焼粉末をペレッ ト成型後、825°C, P_{O2}=3 kPa 下で 12 h 焼成することにより Bi2223 焼結体を得た。熱重量測定には高温微重量熱天秤 (CAHN-1000)を用い、Bi2223 焼結体(6.867 g)の平衡重量の 温度、酸素分圧依存性を Bi, Pb の飛散が起こらない条件下 で調べた。熱重量測定の後、同じ焼結体から切り出した小片 試料を様々な条件でアニール後、急冷することにより酸素量 を調節し、SQUID 磁束計を用いて超伝導特性を調べた。

3. 結果と考察

Fig. 1 に Bi2223 焼結体の熱重量測定結果を重量増加で 検知できる Pb3221 相の生成領域と合わせて示した。重量 変化 1 mg が酸素量として約 0.01 の変化に相当する。 Bi2223 焼結体の酸素量変化は RE123 より極めて小さく、 この測定範囲では 0.07 程度しか変化していない。200°Cま で酸素を十分吸収させた試料と、空気中($P_{O2} = 21$ kPa)、



Fig. 1 Equilibrium weight change of a Bi2223 sintered bulk as functions of temperature and partial pressure of oxygen.



Fig. 2 ΔM -H curves at 50 K of Bi2223 sintered bulks with different oxygen content. ZFC magnetization curves measured under 5 Oe are shown in inset.

450°C でアニール後急冷した試料の 50 K における磁化ヒ ステリシス幅 ΔM の磁場依存性と T_c 近傍での ZFC 磁化の 温度依存性を Fig. 2 に示す。これらの試料はキャリアのオ ーバードープ状態にあり酸素量の差 Δy は約 0.027 である が、 ΔM の磁場依存性と T_c に大きな違いがある。注目すべ きは Bi2223 として T_c が極端に低いことである。これは実 用線材(T_c >108 K)よりも低温、低酸素分圧下で焼成したこ とで、実際の Pb 固溶量が多くなったためと考えているが、 一層の磁場中臨界電流特性改善の可能性を示唆している。 講演では c 軸配向 Bi2223 焼結体におけるキャリアドープ 状態と臨界電流特性の関係についても報告する。

溶融成長を用いた YbBCO 丸線の組織観察 Microstructure of YbBCO round wire fabricated by melt growth method

<u>小澤 優一朗</u>, 小島 寛航, 小黒 英俊 (東海大) <u>OZAWA Yuichiro</u>, KOJIMA Hirokazu, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.) E-mail: 9bajm@mail.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

REBCO (REBa₂Cu₃O_y RE: Y または希土類元素) 超伝導線 材は coated conductor として作製されている。しかしながら、 coated conductor の問題点として、REBCO もしくは中間層が 剥がれやすい[1]、磁場の方向によって電流の流れる大きさが 変化する等の欠点がある。この問題点は、特に超伝導マグネ ット作製にとって大きな障害となっている。このため、高温超伝 導の丸線ができると、超伝導マグネット開発に大きなメリットが あると考えられる。

一方で、REBCO バルク体は部分溶融状態から、種結晶を 用いて結晶を成長させる溶融結晶成長法で作製することで、 非常に高い超伝導特性を持つことが知られている[2]。溶融結 晶成長法によるバルク体作製では、融点の高い RE₂BaCuO₅ (RE211)を含む大型の REBCO バルク体を用いて、REBCO のみ部分溶融状態とし、徐冷によって種結晶と同じ結晶方向 にバルク体を成長させることで、結晶軸の制御を行う。

我々は、溶融結晶成長法による REBCO 丸線材の作製を 最終目的として研究を行なっている。溶融結晶成長法を丸線 材作製に用いるためには、丸線のシースとなる銀の融点よりも、 試料の REBCO の融点が低いことが条件となる。さらに、酸素 分圧を下げることで YbBCO の融点が低くなることが報告され ている[3]。本研究では、REBCO の中でも融点が低いとされる YbBCO 粉末を用いて、Powder-in-Tube 法により YbBCO 丸 線材を作製し、内部組織観察を行ったので報告する。

2. 実験方法

Yb₂O₃(高純度化学、99.9%)、BaCO₃(和光純薬、99.9%)、 CuO(和光純薬、95.0%)をYb:Ba:Cu=1:2:3となるように混合し、 油圧プレス機を用いてペレットを作製した。作製したペレットを、 大気中 920℃で24時間加熱した。熱処理を行ったペレットを 粉砕し、再び油圧プレス機を用いてペレットを作製した。ペレ ットを大気中900℃で24時間加熱し、室温まで48時間かけて 冷却した。熱処理を行ったペレットを粉砕し、混合してYbBCO 粉末を作製した。その後、作製した粉末に対しX線回折測定 を行った。

続いて YbBCO 丸線材を作製した。このとき、GdBCO coated conductor (フジクラ)を Ag 管内部の壁面に沿うように 入れた。さらに、融点をより下げるため、Ag₂O (和光純薬、 99.0%)を YbBCO の質量に対して 10wt%となるよう添加した YbBCO 粉末を作製し、Ag 添加 YbBCO 丸線を Powder-in-Tube 法により作製した。

作製した YbBCO 丸線材の一部を切り取り、大気中 920℃ で 24 時間加熱した。熱処理を行っていない丸線材と熱処理 後の丸線材を光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡により内部 観察を行った。

3. 結果および考察

Fig. 1 に、YbBCO 粉末の X 線回折測定の結果を示す。測 定されたパターンより、Yb123、Yb211、BaCuO₂ が確認され た。

Fig. 2に、熱処理を行っていないYbBCO丸線材と、熱処理 後のYbBCO丸線材の、光学顕微鏡による断面観察画像を示 した。さらにFig. 3に、熱処理を行っていないYbBCO丸線材 と、熱処理後のYbBCO丸線材の、走査型電子顕微鏡による 断面観察画像を示す。 Fig. 2およびFig. 3より、熱処理によって丸線材内部の組織 が変化したことがわかる。これは、熱処理を行ったことで、 YbBCO線材内部のYbBCOが溶融したと考えている。Fig. 2(b)から、線材中央部に大きな空隙が観察できる。この空隙 は、粉末の隙間の小さな空隙が、結晶が溶融したことで1つ に集まり大きな空隙を作ったのではないかと考えられる。







Fig. 2 OM images of cross sections of the parallel to the wire axis for YbBCO round wire (a) before heat treatment and (b) after heat treatment.



Fig. 3 SEM images of cross sections of the parallel to the wire axis for YbBCO round wire (a) before heat treatment and (b) after heat treatment.

謝辞

本研究の一部は東海大学高度物性評価施設および、東海大 学イメージング研究センターの支援を受け、実施したものであ る。

- [1] T. Takematsu et al., Physica C, 470 (2010) p. 674
- [2] D. A. Cardwell, Mat. Sci. Eng., B53 (1998) p. 1
- [3] Z. Zhang et al., Cryst. Eng. Comm., (2019), 21 p.1371

Coated Conductor を利用した YBCO 丸線の組織観察

Microstructure of YBCO Round Wire Using Coated Conductor

小島 寛航,小澤 優一朗,小黒 英俊(東海大)

KOJIMA Hirokazu, OZAWA Yuichiro, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.)

E-mail:9BAJM015@cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_{7-δ}(YBCO、Y123)は、臨界温度が液体窒素温度 (77.3 K)以上であり、磁界中での特性も高いことから、高温応 用や強磁場応用が期待されている。しかし、結晶構造が有す る異方性から、通電方向が制限されてしまう。そのため、薄膜 技術を利用した Coated Conductor が開発され、研究が進めら れている。しかし、超伝導層が薄膜であることから物理的に弱 く、基板上からの剥離が生じてしまうといった課題があり、 YBCO線材の丸線化が求められている。実際に、アメリカでは 銀管内で REBCO を溶解させる研究が進められている[1]。

このため、YBCO線材の丸線化を可能にする線材作製方法 の確立を目指し、Coated Conductor利用した溶融凝固法、及 び、Powder In Tube法(PIT法)を用いて YBCO丸線の作製を 目的として実験を行った。本報では、線材作成時に Coated Conductorを利用し、低酸素分圧下で熱処理を行った線材の 組織について報告する。

2. 実験方法

Fig.1 に PIT 法による線材の作製方法を示す。 原料は Y2O3 粉末(和光純薬、99.99%)、BaCO3粉末(和光純薬、99.9%)、 CuO 粉末(和光純、95.0%)を使用した。これらを mol 比で Y:Ba:Cu=1:2:3 になるように秤量し混合した後に、プレス機を 用いて圧粉成形しペレット状にした。このペレットを大気中に て 900℃×24 h で熱処理を行った。熱処理後、バルク体を粉 砕し、充分に細かくした粉末に Ag 粉末(和光純薬、99.9%)を 10wt%、Pt 粉末(高純度化学、99.9%)を0.5wt%、Y2BaCuO5粉末 を30mol%添加した。この粉末をプレス機でペレット状に成形し、 同条件で再度熱処理を行った。作製した試料を乳鉢、乳棒を 用いて粉砕し、充分に細かくし、粉末状にした。Fujikura 社製 GdBCO Coated Conductor の超伝導層を保護層側から剥離 させ、超伝導体が銀層側に付着していることを確認した。剥離 させた超伝導層を保護層及び安定化銅層と共に、外径 5.0 mm、内径 4.0 mm、長さ 50 mm の銀管の内壁に沿うようにして 挿入し、作製した粉末を充填した。外径 4.0 mm、長さ5.0 mm の Cu によって蓋をし、溝ロール機による線引き加工を行った。 加工後の線材をガラス管に挿入し、Ar ガスフロー雰囲気にて 925℃×24 h で熱処理を行った。

作製した線材をエポキシ樹脂に埋め込み、回転研磨機、耐水研磨紙を用いて研磨を行った。研磨した線材を光学顕微鏡、透過型電子顕微鏡を用いて線材断面の観察を行った。

3. 実験結果および考察

Fig.2 に熱処理前線材の長手方向に平行方向の断面写真 を示す。Fig.3 に熱処理後線材の長手方向に平行方向の断 面写真を示す。Fig.4 に熱処理後線材の長手方向に垂直方 向の断面写真を示す。熱処理前の線材では、Coated Conductor が壁面に沿って圧延されていることが確認できた。 しかし、熱処理後の断面からはCoated Conductor は確認でき ず、内部に空洞が形成されていた。また、熱処理後のガラス 管内部に黒色の物質が付着していた。線材の充填率が40% 程度と低かったことから、内部の空隙が凝集したことや、内部 で溶融したYBCOが流出したことで、空洞が形成されたので はないかと考えられる。熱処理後線材断面の光学顕微鏡の 観察結果から、粒子同士の隙間が見られず、溶融後に凝固し たような組織が観察された。以上のことから、Ar ガスフローに よって雰囲気制御を行った結果、酸素分圧の低下に伴って 銀管内におけるYBCO の融点を低下させることが出来たとい

える。電子顕微鏡による詳細な組織観察は当日示す。 参考文献





Fig.1 Powder in tube process for YBCO round wire with REBCO coated conductor.



Fig.2 Cross-section of the parallel to the axial direction of the YBCO round wire before heat treatment.



Fig.3 Cross-section of the parallel to the axial direction of the YBCO round wire with heat treatment in Ar gas flow.



Fig.4 Cross-section of the YBCO round wire with heat treatment in Ar gas flow.

貼り合わせたRE系超電導線材の曲げ特性 *I*c change due to bending of double stacked coated conductors

<u>町 敬人</u>, 和泉輝郎(産総研);中村美幸, Ivan Veshchunov,大倉大佑, 蓮尾信也, Sergey Lee (SuperOx Japan) <u>Takato MACHI</u>, Teruo Izumi (AIST); M. Nakamura, I. Veshchunov, D. Ohkura, S. Hasuo, S. Lee (SuperOx Japan) E-mail: t.machi@aist.go.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材の臨界電流特性は年々向上し ているが、数百 m の長尺にわたる薄膜プロセスで作製される REBCO 線材に内在する欠陥を完全に排除することは困難で ある。金属基板由来の大きな欠陥以外で RE 系超電導線材に 内在し I_c の低下を引き起こす 100µm 程度の大きさの欠陥は 1m あたり数個から数十個であることが我々のこれまでの研 究で明らかになっている。したがって2枚の線材の欠陥が同 じ位置に重複する確率は低いため2枚の線材を貼り合わせる FFDS(face to face double stacked)とよばれる構造[1]により極端 な I_c 低下を緩和できると考えられる。2枚の線材は超電導層 を内側にして貼り付けるため、曲げに対する中立線と超電導 層が近く通常の REBCO 線材よりも曲げ特性が良好であると 推察されるが、これまで系統だった報告はなかった。そこで、 我々は FFDS の曲率半径 25mm から 7.5mm までの I-V測定に より I_c の変化を導出した。

2. FFDS線材作製と曲げ特性評価

曲げ特性測定に用いた FFDS 線材は、厚さ 40µm のハステロ イ C276 上にベッド層, IBAD 層, バッファ層, 超電導層 (PLD 法),銀安定化層, Cu メッキ層という構造の REBCO 線材を長 尺に渡ってハンダで接合して作製した。ハンダ接合は、ハン ダ浴を通した2本の線材を面に垂直に圧力を加えて貼り付け るという方法を用いた。ここで、2つの線材の REBCO 層が貼 り付ける面に向くように(2枚の線材のハステロイ側が外側 にくるように)配置した。

*I-V*は曲率半径 25, 20, 15, 10, 7.5mm で曲げた状態で液体窒素に浸漬して 77 K,自己磁場中で測定した。電流,電圧端子はハンダ付けで形成した。曲げる前に平坦な状態での *I-V*を測定し,次に曲率半径が大きい状態から小さい方へと測定を行った。

3. 実験結果および考察

図1にFFDS 線材の断面SEM像を示した。SEM観察像から ハンダの厚さは2.5µm から5µm程度まで分布があった。ただ し、端部は10µm 以上までハンダ厚が広がる傾向があった。 これは、今後の接合方法で改良が必要な部分であろう。

図2に、曲率半径を変化させた場合の *I-E* 測定結果を示す。 ここで *I*。値は電界値が 1µV/cm の場合の電流値と定義した。 曲げる前の *I*。は 295.08 A であったが、最小の曲率半径である 7.5 mm においても 291.95 A であり、3 A 程度の低下にとどま った。ほとんど変化がないためこのスケールでそれぞれを区 別することは難しい。図3には、図2の *I-E* カーブから求めた *I*。値を曲率半径に対してプロットしたものである。曲率半径 が小さくなるにしたがって *I*。値が緩やかに低下している傾向 が見て取れる。

超電導層が応力中心に近いFFDS 線材では、期待通り曲げ 強度が高いという結果が得られた。講演では、FFDS でない 場合の曲げ特性および FFDS を接続した場合の曲げ特性など についても報告する。







謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総 合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。 参考文献

[1] T. Kiss, *et al.*, 'Analysis and Modeling of Current Transport Properties in Long Length Coated Conductors', ISS2017.

追加堆積膜を利用した GdBa₂Cu₃O_y線材接合時の膜厚の影響

Precursor thickness dependence of joint property for GdBa₂Cu₃O_y coated conductors prepared via crystallization of additionally deposited precursor layers

<u>寺西</u>亮, 土井裕太郎, 佐藤幸生, 金子賢治(九州大); Valery Petrykin, Sergey Lee(SuperOx Japan); 松本明善(NIMS); 岡田達典, 淡路 智(東北大)

TERANISHI Ryo, DOI Yurato, SATO Yukio, KANEKO Kenji (Kyushu Univ.); PETRYKIN Valery, LEE Sergey (SuperOx Japan); MATSUMOTO Akiyoshi (MINS); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

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

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO)線材の長尺化には、線材そのもの の長尺開発のみならず線材同士を接合して長尺化することが 有用であり、REBCO 層同士の超伝導接合に関していくつか の手法が報告されてきている[1-5]。接合体において高いIcを 得るには、低抵抗で広い面積にて接合することが重要となる。 我々は、これまで REBCO 線材上に前駆体を追加堆積してそ れらを対向させて熱処理する手法により接合体を作製し[6]、 接合面積に及ぼす因子として機械的圧力の影響を考察して きている[7]。本報告では、接合面積に及ぼす前駆体の膜厚 および接合熱処理時の温度の影響を述べる。

2. 実験方法

GdBCO線材の GdBCO 層と、同層上にパルスレーザー蒸 着法にて Gd、Ba、Cu の酸化物微結晶から成る前駆体を追 加堆積した層を、幅および長さが 6 mm および 5 mm の領域で 対向させて重ね合わせ、重錘式電気炉内に設置して 40 MPa の機械的圧力を印加した。その後、酸素分圧 1 Pa のもと各温 度にて 40 分間熱処理して接合体を得た。接合面積の前駆体 膜厚依存性は、温度を 800℃に固定して前駆体の膜厚を 50 nm から 200 nm の条件下で変化させて調査した。また、接合 面積の熱処理温度依存性は、前駆体の膜厚を 200 nm に固 定して温度を 700℃から 800℃に変化させて調査した。接合 面積は、熱処理後の接合体を剥がしたのち、試料表面を光 学顕微鏡にて観察して算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 は本プロセスにて GdBCO 線材の超伝導同層上に 作製した前駆体膜の試料断面を透過型電子顕微鏡(TEM) にて観察した結果である。図中の中段に左右方向へ記した点 線は線材の GdBCO 層と前駆体膜との境界位置を、曲線は前 駆体膜中の粒の界面をそれぞれ示している。また、制限視野 回折図形像から各粒の構成要素を同定した結果を付記して いる。これらの結果から、前駆体中には c 軸配向した GdBCO 粒、c 軸とは異なる方位の GdBCO 粒、Gd, Ba,Cu の酸化物か ら成る非晶質が混在していた。

Fig.2 は、前駆体の膜厚と接合面積の関係を示している。 前駆体の膜厚が厚いほど接合面積が増加する傾向が示され た。Fig.1 の前駆体組織では膜厚が大きくなるにつれて膜面 当たりの非晶質の割合が増える傾向にあることから、膜厚が 大きな試料では圧力印加した際にそれら非晶質領域が変形 して対向する試料膜面により接触し、その状態で結晶化した ことで大きな接合面積となったことが考えられる。

Fig. 3 は、接合面積の熱処理温度依存性を示す。温度の 上昇とともに接合する面積の割合が増加する傾向が示された。 高い熱処理温度条件では対向部間での固相拡散が促進さ れ、その結果高温ほど接合面積が大きくなったと考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K22157の助成を受けて実施したものである。



Fig. 1 Cross-sectional TEM image of precursor film.



Fig. 2 Precursor thickness dependence of joint area.



Fig.3 Heating temperature dependence of joint area.

- [1] Y.J.Park etal., Supercond. Sci. Technol., 27 (2014) 85008.
- [2] X.Jin etal., Supercond. Sci. Technol., 28 (2015) 75010.
- [3] https://furukawa.co.jp/release/2016/kenkai_160427.html
- [4] K.Ohki etal., Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 11501.
- [5] 舩木修平ら., 低温工学, 55, 4 (2020) 255.
- [6] R. Teranishi etal., IEEE TAS, 29, 5 (2019) 6602904.
- [7] T.Miyajima, R.Teranishi etal., JJAP 58 (2019) 050907.

パウダー・イン・チューブ(PIT)法による7芯 MgB2線材の超電導接続 -2 Superconducting joints of power-in-tube processed 7-filamentary MgB2 wires -2

<u>熊倉浩明</u>, 瀧川博之, 松本明善, 北口 仁(物材機構) <u>KUMAKURA Hiroaki</u>, TAKIGAWA Hiroyuki, MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS) E-Mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

前回の春の低温工学では、向き合う 2 本の素線材の Mg-Bフィラメントの位置(位相)が一致するようにして 接続を作製したが、これは実際に超電導接続を行う現場 においては、かなり困難な作業となる。そこで今回は、 向き合う素線材のフィラメント位置(位相)の食い違い が最大となる角度 30°のズレ(線材断面は6回回転対称) を有する接続を作製し、構造・組織と特性を評価した。 このフィラメント配置においても、接続部の臨界電流 L は線材自身のLの 50%程度であった。これより、7 芯線材 の接続を作製する場合は、2 本の線材のフィラメント位置 のズレを気にしなくても、かなり良好な L 特性の得られ ることが判った。

2. 実験方法

超電導接続は前回と同様な方法で作製した。超電導接続 の作製法をFig.1(a)に示す。未熱処理の7芯MgB₂/Cu素線 材(鉄バリア材、線材径1.2mm)2本の端部を同じ角度 (15°)で斜めに切断した。その際、2本の線材をつき合 せた時に、Mg-Bフィラメントの位置(位相)の食い違い が30°となるように切断した。これらの線材を切断面が重 なるようにステンレス管の両端から挿入し、接続部を一 軸プレスで加圧して密着性を向上させた後、接続に用い た PIT法7芯線材の最適熱処理条件である600℃×1hrの熱 処理を施した。得られた超電導接続の例をFig.1(b)に示す。

接続部に流れる臨界電流 *L* を、液体ヘリウム中において四端子抵抗法で評価した。*L* 測定装置の都合上、磁界は接続 (線材)と平行に印加した。電圧リードは接続部に近い線材部 分にハンダ付けした。その際、前回と同様に Fig.1(b)に示した ように、電流端子と電圧端子との間の一部分の線材周囲の安 定化銅をマイクログラインダーで取り除いて超電導コアに電流 が流れるようにした。*L* を 1μV の電圧が発生する電流で定義 した。臨界電流を評価した後、接続部分の構造・組織を光学 顕微鏡で観察した。

3. 結果及び考察

作製した接続部の断面の光顕写真の例(右)を、前回作製し たフィラメントの位相を合わせた断面(左)と比較してFig.2 に示 す。二本の線材の接続界面を点線(白)で示す。今回作製し た接続においては、右側の部分のフィラメントと左側の部分の フィラメントでは位相が約 30° ずれているのが判る。一方、前 回の接続では、ほぼ6回対称のフィラメントが認められる(どっ ちらもプレスによって歪んでいる)。また、前回の接続では Cu 安定化材への Mgの滲み出しがわずかに認められたが、今 回の接続においても Mgの滲み出しが認められた。ただし、 これらの Mg の滲み出しはどちらの接続においても局所 的であり、*I*cに及ぼす影響は小さいと考えられる。

Fig.3 に今回作製した超電導接続の 4.2K における *I*-B 特性を、前回の接続の特性と比較して示す。*I*。値にバラツキはあるものの、今回作製した接続の *I*。は、線材の *I*。の 50% 程度で比較的良好な値が得られた。

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。



Fig.1 (a)Fabrication method of a PIT 7-filamentary MgB₂ superconducting joint. (b)Joint fabricated with SUS 316 tube.



Fig.2 Transverse cross section of PIT 7-filamentary MgB₂ superconducting joints. Discrepancies of filaments between two wires are \sim 0°(left, previous study) and \sim 30°(right, this study).



Fig.3 *I*_c-*B* curves at 4.2K of superconducting joints of PIT 7-filamentary MgB₂/Cu wire. Discrepancies of filaments between two wires are \sim 30°(this study) and \sim 0°(previous study). Magnetic field was applied parallel to the wire axes.

BSCCO 超伝導接合試料の磁場中接合抵抗評価

Joint resistance evaluation of BSCCO superconducting joint in magnetic field

小林 賢介(NIMS), 内田 公(NIMS), 西島 元(NIMS), 武田泰明(理研), 下山 淳一(青学大), 北口 仁(NIMS) KOBAYASHI Kensuke(NIMS), UCHIDA Akira(NIMS), NISHIJIMA Gen(NIMS), TAKEDA Yasuaki(RIKEN), SHIMOYAMA Jun-ichi (Aogaku Univ.), and KITAGUCHI Hitoshi (NIMS) E-mail: kobayashi.kensuke@nims.go.jp

1. はじめに

高温超伝導(HTS)線材の超伝導接合技術は、HTS線材を 用いた超伝導磁石開発において非常に重要であり、現在進 められている永久電流運転1.3 GHz NMR 開発においても必 要不可欠な技術である[1]。

近年、Bi2223線材においていくつかの超伝導接合手法が 報告された[2,3]。しかし、通常の4端子法では10⁹ Ω 以下の 抵抗は測定が困難であり、接合抵抗の正確な評価は難しい。 我々は、電流減衰法を用いた超低抵抗・超伝導接合試料の 評価に特化した装置の開発を行っており、この装置を用いる ことで、3 K から120 K 程度までの温度範囲で、10⁹ Ω 以下の 接合抵抗を評価可能である[4]。また、実機における接合部は 磁場にさらされることが想定されるため、3 T までの磁場を接 合部に印加可能な超伝導磁石も備えている。

本講演では、最近報告された Bi2223 超伝導接合試料[3] を用いて行った磁場中接合抵抗評価の結果について報告す る。

2. 実験方法

BSCCO 超伝導接合試料は、住友電工製 DI-BSCCO type-H線材の両端をBi2223多結晶厚膜中間層によって拝み 合わせ接合した5回巻きループ試料を用いた。

誘導コイルを用いて電流を試料へ誘導し、3 時間程度の 電流減衰測定データに対して、 $V_{\text{Hall}}(t) = A + Bexp\{-t/(L/R)\}$ のフィッティングから接合抵抗(回路抵抗)R を評価した。ここで、 A, B はフィッティングパラメーター、L は自己インダクタンスで、 $同型試料の室温の実測値 5.6 <math>\mu$ Hを用いた。測定は、4.2 Kから 100 K までの温度範囲で 3 T までの磁場中で行った。磁場 は、接合部および線材表面に対して平行に印加した。

3. 結果と考察

Figure 1 に 4.2 Kから 100 K における自己磁場中での永久 電流測定結果を示す。試料に誘導された電流は、接合部温 度 100 K でも消失せず、5 A 程度の永久電流が観測された。 77 K では、初期に誘導電流の減衰が見られたが、これは誘 導電流が接合部の Lを超えたことが原因と考えられ、Lまで減 衰後はほぼ横ばいになった。4.2 K では、試料へ誘導できる 最大電流 140 A 程度でも減衰は見られず、3 時間程度の測定 データから見積もった接合抵抗は、10⁻¹⁴ Ωのオーダーだった。 一方で、100 K の 3 時間測定データから得られた接合抵抗は 10⁻¹¹ Ωであり、負荷率が高い状態では、接合抵抗が大きく見 積もられた。

Figure 2 に 77 K における磁場中の電流減衰測定結果を 示す。全て同じ初期誘導電流値で、磁場を 0.1 から 1.5 T ま で印加した。自己磁場中では見られなかった電流減衰が 0.1 T から明確に見られ、1.0 T ではわずかに永久電流が存在す るが、1.5 T では 3 時間後の残留電流はほぼゼロであり、永久 電流は観測されなかった。接合部への印加磁場の増加に伴 って電流減衰の傾きが急増しており、磁場中での臨界電流の 急減を示している。接合抵抗は、自己磁場中の 10⁻¹³ Ωから磁 場中では 10⁻¹⁰ Ωと大きくなったが、誘導電流が概ね臨界電流 に到達した後は減衰は緩やかになっており、接合抵抗自体の 変化ではなく、負荷率の増加が原因と考えられる。



Fig. 1 Persistent current measurements of Bi2223 SC joint at various temperatures in self-field.



Fig. 2 Current decay measurements of Bi2223 SC joint under various magnetic fields at 77 K.

4.2 K では、最大印加磁場 3 T でも電流は消失せず、100 A 以上の I_c が確認できた。得られた接合抵抗は、低負荷率で は 10^{-12} Ω のオーダーだった。講演では、4.2 K、20 K、100 K での磁場中電流減衰測定結果と接合抵抗評価結果について も報告する予定である。

謝辞

本成果は, JST 未来社会創造事業[JPMJMI17A2]によっ て得られたものです。

- [1] H. Maeda et al., IEEE TAS 29, 4602409 (2019).
- [2] S. Kanazawa et al., J. Alloys Compd. 806, 897 (2019).
- [3] Y. Takeda *et al.*, *APEX* **12**, 023003 (2019).
- [4] K. Kobayashi et al., IEEE TAS 30, 9000204 (2020).

FEM を用いた超伝導線材のラップ長と接触抵抗の分布を考慮した臨界電流特性の評価 Evaluation of critical current characteristics by wrap length and contact resistance variation of superconducting wire by using FEM

<u>鍾 宇軒</u>,小田部 荘司,赤坂 友幸,安谷 葵(九工大);石原 篤,富田 優(鉄道総研) <u>Yuxuan Zhong</u>, Edmund Soji Otabe, Tomoyuki Akasaka, Aoi Yasutani(K**yutech**);, Atushi Ishihara, Masaru Tomita(RTRI) E-mail: yuauxn.zhong603@mail.kyutech.jp

1 はじめに

1987年にYBa₂Cu₃O_{7-δ}(YBCO)が発見されて以来、線材化の 工夫がなされ、第二世代(2G)希土類バリウム銅酸化物被覆導体 (CC)は実用的なレベルまで開発が進んだ。CC は高い臨界電流 *I*_cを持っており、また*I*_cの高磁場での劣化が低く、良好な機械 的特性および妥当なコストのため、超高磁場 MRI への応用が 期待されている[1]。これを実現するためには、これら CC の間 の接合技術が必要である。このために超電導接続が研究されて いる[2]。また、超電導線材を用いた送電ケーブルを利用するこ とで、電力を消費することなく送電が可能となる。超電導線材 は現在数百メートル単位でしか製造できないため、実際に実現 するためには線材どうしを低抵抗で接合して長距離での送電 に対応させる必要がある。このように接合することによって、 通常の超電導線材とは異なる電流密度分布・磁界分布、また力 を受けるときの応力分布などが表れると考えられる。

本研究では、超電導線材の接合部における電気特性を明らか にするため、有限要素法 (FEM) (JMAG-Designer18.0)を用いて 接合を数値シミュレーションし、臨界電流密度の変化を評価し た。

2 解析方法

本研究では、電気特性に対する有限要素法計算のために、 JSOL 社製 JMAG を使用した。線材を接合させたモデルを作成し、電流密度をシミュレーションした。超電導線材は幅4mm 厚さ 1 μ m であり、5枚をまず長さ方向に低抵抗金属を用いて 接合した。そしてさらに電流を補強するために 1枚から 5枚 の同じ特性の超電導線材を長さ方向と直角に接合した。1枚か ら5枚の場合、電極間距離は 60 mm、56 mm、52 mm、48 mm、 44 mm であった。接合部は 5 μ m の銀層、外側は 100 μ m の銅 層、横渡線は左側にずらした。電流を流し、有限要素法を用い て計算し、*I-V*特性により、*I-E*特性を計算して、臨界電流の変 化を明らかにした。

3 結果および考察

Fig.2に示すのはJMAGで解析した通電電流に対する電界の 特性の結果である。電界はシミュレーションした結果の電圧を 電極間距離で割った結果である。電界は 100 µV/m の時の電 流を臨界電流と定義した。左図は 1 枚から 5 枚の同じ特性の 超電導線材を長さ方向と直角に接合したの*I-E*特性曲線であり 右図は横渡線がない場合と横渡線 2 枚、3 枚、5 枚を左側にず らしたの*I-E* 特性曲線である。

Fig. 3 は接合部の線材の枚数による臨界電流の変化を示す。 Fig. 3 に示されるように、電流を補強する線材枚数が1の枚か ら5 枚に増えるに従って単純に臨界電流は上がっている。この ように、シミュレーションを用いてラップ長と接触抵抗の分布 を考慮した臨界電流特性を評価することができた。



Fig. 1: Models of superconducting wire



Fig. 2: *I-E* curve of superconductor



Fig. 3: Critical current dependence on the number of CC

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。

- [1] Y. Park et al.: NPG Asia Materials **6** (2014) e98
- [2] X. Jin et al.: Supercond. Sci. Technol 28 (2015) 075010
- 159 —

PbBi を用いた REBCO 線材の超伝導接続とその問題点 Property and problem of the PbBi superconducting joint for an REBCO coated conductor

武輪 裕之, <u>小黒 英俊</u> (東海大); 淡路 智 (東北大) TAKEWA Hiroyuki, <u>OGURO Hidetoshi</u> (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.) E-mail: h-oguro@tsc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

高磁場 NMR 用超伝導マグネットでは、低温超伝導線材 と高温超伝導線材の両方を利用することが考えられるが、 永久電流モードでの運転のためには、それらをつなぐ超 伝導接続技術が必須である。このため我々のグループで は、超伝導はんだとして知られている、PbBi はんだを用 いた異種超伝導線材同士の超伝導接続を試みている。こ れまでに、NbTi、Nb₃Sn、Bi2223 線材の超伝導接続は確 認できたが、REBCO coated conductor だけはこれが確 認できなかった[1]。

そこで、PbBiと REBCO との界面の様子を詳細に調べ、 超伝導接続ができる可能性を検討した結果、超伝導接続 が確認できたので報告する。さらに、この接続が時間とと もに劣化していくことが分かったので、合わせて報告す る。

2. 実験方法

試料として、SuperOx 製 GdBCO coated conductor を 使用した。線材は Cu が付いていないものを使用し、Ag の保護層は、過酸化水素水とアンモニア水の混合液を用 いてエッチングし、超伝導層を露出させた。露出長さは 10 mm とした。

PbBiは、Bi(平野清左衛門商店、99.99%、針状)と、Pb(平 野清左衛門商店、99.99%、粒状)を共晶点である Bi-44wt%Pbの組成になるように秤量し、350℃ x 6 h で加 熱し、溶融拡散させた。その後、溶融した PbBi はんだを 台に垂らし、厚さ 0.75 mm の薄板状に圧延加工した。

接続試料は、図1のように超伝導線材を挟み込むよう にPbBiはんだの薄板を設置し、油圧ポンプを用いて加圧 し、圧着した。圧力印加の際に、はんだが伸び、線材から はみ出たはんだ同士が圧着されるため、超伝導接続表面 が剥がれないようになっている。加えた荷重(圧力)は500 kg(122.5 MPa)、および 3000 kg(735 MPa)とした。

この試料に対して、4.2 K で電気抵抗測定を実施した。 さらに、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた接続面の組織観 察と、電子線マイクロアナライザー(EPMA)を用いた接続 面の組成分析を行った。

3. 実験結果

図2に、3000kgの荷重を加えて圧着した接続試料の、 4.2Kにおける電気抵抗の電流による変化を示した。電気 抵抗ゼロを確認するため、電流反転し、数回の電流の増減 を行い、ゼロ抵抗となったと結論づけた。ただし、臨界電 流は 0.01 A と非常に低い。この原因を組織と組成から考 察するため、SEM および EPMA による分析を行った。図 3に SEM 画像と EPMA で測定した組成分析結果の一部 を示した。組成分析結果から、Ba が PbBi 側に、Pb と Bi が REBCO 層側に検出されていることが分かった。この 結果から、お互いの元素が拡散し、反応して別の物質がで きていることが考えられる。そのため、上記試料とは別に PbBi と REBCO を反応させた塊を粉末にし、X 線回折測 定を行ったところ、Ba(Bi, Pb)O3と思われるピークが確認 できた。これより、接続面にも同じ物質ができていると考 えられる。さらに、Baの拡散距離は、作成から9日では 6.706 µm、38 日後には 7.670 µm と時間変化することが



Fig. 1 Schematic view of the PbBi-REBCO coated conductor joint sample.



Fig. 2 The resistance of the PbBi-REBCO coated conductor joint prepared under a load of 3000 kgf as a function of transport current.



Fig. 3 The backscatter electron image and the elemental mappings of the PbBi-REBCO coated conductor joint sample.

分かった。これは、室温で拡散が進み、REBCO と PbBi が反応していくことを示しており、時間とともに超伝導 特性が変化していくことが予想される結果である。

謝辞

本研究は、東海大学高度物性評価施設の支援を受け、実施したものである。

参考文献

1. H. Takewa, et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p. 142

高温超伝導線材のインジウム低熱処理機械的接合の改善 Improvement of mechanical joint of high-temperature superconducting tapes using indium foil and low-temperature heat treatment

<u>伊藤</u>悟, 早坂 遼一路, 結城 光平, 阿竹 洋輔, 橋爪 秀利(東北大学);加藤 丈晴, 横江 大作(JFCC) <u>ITO Satoshi</u>, HAYASAKA Ryoichiro, YUKI Kohei, ATAKE Yosuke, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.); KATO Takeharu, YOKOE Daisaku (JFCC) E-mail: satoshi.ito@gse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

著者らは高温超伝導線材の簡易接合法として、インジウム 箔を接合部に挿入し、120°C以下程度の熱処理でプレスして 接合する低温熱処理機械的接合[1]の開発に取り組んできた。 既報[2]では、表面を#240の研磨紙で研磨して接合した BSCCO線材(Bi-2223線材)および REBCO線材の接合部断 面のSEM-EDX分析を行った。その結果、接合界面には安定 化材とインジウムの化合物が形成され、かつ、多くの空隙が存 在することが確認された。そこで、本研究では、抵抗低減、空 隙抑制のために線材表面の前処理方法を改善して接合サン プルに対して、抵抗評価および SEM-EDX 分析を行った。

2. 接合サンプル準備と抵抗評価

高温超伝導線材として、4 mm 幅の銅安定化層付 REBCO 線材(Superpower, SCS4050-AP, 臨界電流~100 A at 77 K, self-field)および 4.3 mm 幅の BSCCO 線材(住友電工, DI-BSCCO Type H, 臨界電流 170–180 A at 77 K, self-field) を用いた。本研究では、まず REBCO 線材接合で接合条件の 最適化を行い、その後 BSCCO 線材接合を同様の条件で製 作した。REBCO 線材接合に対しては、線材表面研磨(研磨 紙番号),酸洗いの有無(In:希塩酸,線材:フラックス/ NH₃Cl+ZnCl),接合温度 T_h (常温(RT)–120°C)を変化させ て、複数のサンプルを製作した。また全てのサンプルに対し、 接合部に 100 μ m 厚の In 箔を挿入し、100 MPa で接合した。

Fig. 1に酸洗い条件とREBCO線材接合の接合抵抗率(= 接合抵抗×接合面積)の関係[3]を示す。酸洗いをすることに より,接合抵抗率が10 n Ω cm²程度低減した。また,酸洗い無 の場合では,線材表面が粗い場合に接合抵抗率が低下した のに対して,酸洗い有の場合では,線材表面研磨の違いによ る接合抵抗率に有意差は見られなかった。接合温度が上昇 すると,接合抵抗率は減少したが,接合抵抗率の内訳を分析 すると,これは In 箔の厚さの減少のみに影響される,すなわ ち接合界面の状態は熱処理の有無によって変化しないことが わかった。BSCCO線材接合に対しては,酸洗い有,線材表 面研磨を#1500,接合温度 120°C で接合サンプルを製作した (BSCCO 線材は断面形状が平坦ではないため,真実接触面 積を増やすには,接合時熱処理が有効である)。酸洗い無の 接合[4]では接合抵抗率は18–25 n Ω cm²だったが,酸洗い有 の場合には 10–14 n Ω cm²に低減した。

3. 接合部断面の SEM-EDX 分析

Fig. 2 に REBCO 線材接合の断面 SEM 写真を示す。(a), (b)が酸洗い無,(c),(d)が酸洗い有の場合,また(a),(c)が常温 接合,(b),(d)が低温熱処理接合の場合の結果を示す。いず れの場合においても接合界面には In2Cu が形成されているが, 酸洗い無の場合,In の拡散の阻害により,大きな空隙ができ る傾向にある。一方で酸洗い有の場合には、均一に In2Cu が 形成され,空隙のサイズ・量が小さくなった。酸洗い有の場合, 常温接合でも低温熱処理接合でも界面の In2Cu の形成の状 況に違いは見られず,これは接合抵抗率評価の結果を支持 するものとなっている。発表当日は BSCCO 線材接合の SEM-EDX 分析結果も報告する予定である。

4. まとめ

低温熱処理機械的接合において,線材および In 箔の酸洗い処理によって,接合界面の空隙発生を抑制し,接合抵抗 率を低減できることがわかった。発表当日は,予稿で紹介した 以外の線材を用いて製作した接合サンプルの評価結果につ いても併せて報告する。



Fig. 1 Relationships between the joint resistivity at 77 K and pickling conditions for REBCO-tape joint with T_h =RT and #240 polishing [3].



Fig. 2 SEM image of a REBCO-tape joint: (a) T_h =RT, #240 polishing, w/o pickling, (b) T_h =100°C, #240 polishing, w/o pickling, (c) T_h =RT, #1500 polishing, w/ pickling, and (d) T_h =70°C, #1500 polishing, w/ pickling.

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. T. Nishio, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) Art ID 4603305.
- S. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.6.
- 3. R. Hayasaka, et al.: J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1559 (2020) Art ID 012034.
- 4. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) Art ID 6600405.

— 161 —

音波振動による高温超伝導 CC 線材の半田フリー低抵抗接合

Solder-free low-resistance joining of high- \mathcal{T}_{c} superconducting coated conductors

by sound bonding

<u>木須 隆暢</u>,楊 明旭,呉 澤宇,鈴木 賢次,東川 甲平 (九州大学); 佐藤 茂 (ULTEX) <u>KISS Takanobu</u>, YANG Ming Xu, WU Zeyu, SUZUKI Kenji, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu University);

SATO Shigeru (ULTEX)

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

1. はじめに

高温超伝導線材の応用において、作業性に優れ、再現性、 信頼性の高い低抵抗接合技術の確立が不可欠となる。本研 究では、加圧した線材間に音波振動を加え、半田や中間金属 を用いることなく REBCO コート線材同士を直接低抵抗に接 合する技術について検討を行った。

2. 実験·解析方法

本研究で用いた音波接合では、接合する素線をホーンと アンビル間に積層して挟み、圧力を印加した状態でホーンよ り音波振動を印加することによって、接合界面の酸化物層な どのコンタミ層を除去し、フレッシュな金属層間の拡散接合を 実現する。この間、加熱等は行わず、エネルギーの投入は音 波振動のみによって行った。音波の周波数は可聴域の15 kHzを用いている。その他の主要なプロセス条件は、印加圧 力、音波のピークパワー、ならびにエネルギーである。試料に は40 µm の Cu 安定化層を有する REBCO コート線材を用い た。得られた試料の特性は、四端子法によって接合抵抗率、 臨界電流を評価するとともに、磁気顕微観察によってテープ 面内の超伝導層の劣化の有無を高解像度に観察した。

3. 実験結果および考察

接合時の入力エネルギーを接合面の単位面積当たり 35 J/cm²の一定値に保った条件下において、印加圧力, P,に対 する依存性を調べた結果を Fig. 1 に示す。圧力には最適値 が存在し、40 MPa近傍で接合抵抗率は最小値を取ることを見 出した。この時、圧力依存性は、線材の振動方向(線幅方向、 線長方向)によらずほぼ同様の振る舞いを示した。このことは、 音波エネルギーを接合界面に効率よく伝えるために印加圧 力が主要因子として作用することを示唆している。さらに、接 合界面の劣化の有無と、接合時のピークパワー密度, Pm,の 関係を調べた結果を Fig. 2 に示す。 接合の単位面積当たりの ピークパワーによって超伝導層の劣化の有無が支配され、閾 値 700 W/cm² 以上において劣化が確認された。さらに、700 W/cm²以下のピークパワー密度に抑制した状態で、投入エネ ルギー密度, E, を増大したところ、劣化を回避した状態で、 接合抵抗率を低減できることを明らかとした。Fig.3に示すよう に、エネルギー密度の増大に伴って接合抵抗率は徐々に低 下し、約 450 J/cm² 以上の投入エネルギー密度で、ほぼ一定 値:30 nΩcm²に飽和した。

以上により、音波接合プロセスにおいて接合時の加圧力や ピーク電力密度、投入エネルギー密度に対する依存性を系 統的に調べ、プロセス条件の最適化によって、秒オーダーの 短時間の処理で接合抵抗率 30 nΩcm²の低抵抗接合を再現 性良く得ることに成功した。この接合抵抗率の値は、典型的な 半田接合の半分以下の大きさである。本接合では、半田やフ ラックスはもちろん、中間材や加熱処理なども一切必要とせず、 環境性や作業性の点で従来手法にない利点を有する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H05617 ならびに JST-未来プ ログラム JPMJMI17A2 の助成を受けたものである。



Fig. 1 Pressure dependence of joint resistivity obtained by the sound bonding process.



Fig. 2 Influence of peak power density on damage of the joint during the sound bonding process.



Fig. 3 Dependence of joint resistivity on joining energy density during the sound bonding process.
コンパクトな LTS-HTS 低抵抗接続を実現するための接合構造の提案 A new concept of joint structure enabling compact low-resistance joint between LTS and HTS wires

<u>伴野信哉</u>, 浅野稔久(物材機構); 加藤丈晴(JFCC); 前田秀明(JST, 理研) <u>BANNO Nobuya</u>, ASANO Toshihisa (NIMS); KATO Takeharu (JFCC); MAEDA Hideaki (JST, RIKEN) E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. 緒言

現在 JST 未来社会創造事業「高温超電導線材接合技術 の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」の中で、 1.3GHz NMRシステムの実現に向けて超伝導接続の開発が 進められているが、NbTi などの低温超伝導線材(LTS)と REBCO 線材(HTS)との超伝導接続の実現は今のところ目 途が立っていない。現状で LTS-HTS の低抵抗化を実現す るためには、はんだ接続が有効であるが、1.3GHz NMRの 減衰時定数の要求を満足するためには、1接続当たり少な くとも0.1nΩの接合抵抗値を満足する必要があり、その ためには5 m以上の長さの接続が必要となる。単純な貼 り合わせの接続では、設置の観点から困難である。

本研究は、解決策の一つとして、REBCO テープ線のひず み特性と、NbTi と超伝導はんだの超伝導接続技術を生か した、コンパクトな LTS-HTS 低抵抗接続を実現するボー ト型の接合構造の提案を行った。加えて、直接的な REBCO 層とはんだとの接合試料を作製し、その界面での反応を 微細観察し、REBCO 層とはんだとの直接接合がいかに難し いかを示した[1]。

2. 実験方法

Fig. 1 に提案するボート型接合の概念図を示す。まず、濡 れ性の確保のため、REBCO テープ表面をはんだでコーティ ングする。次に、REBCO 層が内側になるようにボートに巻き入 れていく。REBCO 層を内側にすることで、圧縮ひずみが加わ るようになり、よりコンパクトに曲げることができるようになる。こ のボートの中に、超伝導はんだを流し込む。次に、先端にお いてフィラメントを超伝導はんだ溶かして、これをその中に埋め 込み接合試料を完成させる。これにより、NbTi と超伝導はん だは超伝導接続が実現され、接続抵抗は REBCO 線と超伝 導はんだとの接合抵抗によってのみ決まる(REBCO 線は Cu 被覆されているので超伝導接続にはならない)。巻き入れる REBCO線の長さを15cm~2mとし、抵抗の長さ依存性を調べ た。今回抵抗測定は、4 端子法で実施した。

これとは別に、REBCO 層とはんだの直接接合試料を、界 面反応性の観察のため準備した。界面を HAADF-STEM、 TEM で観察した。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に接合抵抗に対する、REBCO線の巻き入れ長さ依存性を示す。巻き入れ長さを増大させることで、それに比例して接合抵抗が減少していることがわかる。ただし、巻き入れ長さ2mとすると、接合抵抗が1nΩ以下となり、4 端子法のほぼ限界精度となる。それ以下の測定には、電流減衰法での測定

が必要となる。

Fig. 3 には直接的な GdBC0 層とはんだとの接合界面の TEM 像を示した。REBC0 母層は規則的な格子縞を示してい るのに対し、表面にはそれがほとんど観察されない。これ は、REBC0 層が Sn に侵食され、表面において非常に微細 な多結晶組織を形成していることを示している。

 N. Banno, T. Asano, T. Kato, and H. Maeda, Supercond. Sci. Technol., 2020, doi: 10.1088/1361-6668/abb789.



Fig.1. Illustration of proposed boat-joint structure for REBCO-LTS.



Fig.2. Joint resistance of prepared joint specimens as a function of embedded length of REBCO tape in the boat.



Fig.3. TEM image of the GdBCO surface corroded by Sn. $\,$

均質で形状の自由度に優れた単一結晶成長領域からなる REBCO 溶融凝固バルクの作製 Fabrication of homogeneous and flexible REBCO melt-textured bulks with single grain-growth region

元木 貴則, 布川 航太, 笹田 廉陛, 富久 琢磨, 下山 淳一 (青学大)

MOTOKI Takanori, NUNOKAWA Kota, SASADA Rempei, TOMIHISA Takuma, 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) 法や Top-Seeded Infiltration Growth (TSIG)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する溶融成長で育成す 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 領域からなる。バルクの成 長方向によって RE2BaCuOs(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。バルクの大部分が c-growth 領域からなる溶 融凝固バルク育成の試みとして、縦に長い円柱状の前駆体 ペレットの使用や、バッファーペレットの導入が報告され ている[1][2]。これに対し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^[3]。本手法 は、希土類元素の異なる REBCO の包晶温度(Tp)の差を利 用して、底面に設置した Seed plate からバルクを鉛直方向 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 溶融凝固バルク(Gd-QMG®)を [001]方位が鉛直方向になるよう板状に切り出し Seed plate とし、その上に YBCO 焼結体ペレットを設置し、最高保 持温度を YBCO の Tp以上かつ GdBCO の Tp以下とし溶融 成長させることでバルク全体が c-growth 領域からなる SDMG 法 YBCO 溶融凝固バルクを作製した。なお、YBCO ペレットには、TEP 社製混合粉(YBCO:Y211 = 7:3)に Tpを 低下させるため 10 wt%の Ag2O を、Y211 の微細化のため 0.1 wt%の Pt をそれぞれ混合したものを用いている。 SDMG 法では Top-seed 法と異なり鉛直方向のみに成長す るため、様々な形状のバルクの直接育成が可能である。そ こで、今回は Fig.1 (a) に示す対辺が 16 mm の正六角形お よび一辺が 16 mm の正方形の金型を用いて 100 MPa で一 軸プレスによりペレット成型しバルクを作製した。すべて のバルクについて、Seed plate から切り離した後、400℃で 長時間の酸素アニールを行った後、捕捉磁場特性は液体窒 素浸漬下(77 K)、1 T 下で着磁後にバルクの下面(Seed plate 側)~0.5 mm 上方を評価した。

3. 結果と考察

Fig.1 (b)に SDMG 法で育成したバルクの外観をそれぞ れ示す。正六角形や正方形状のバルクであっても形状を維 持しており、SDMG 法を用いて直接育成が可能であるこ とが示された。側面からみると、バルク上方から下方にか けてやや台形状に膨らんでおり、溶融成長時に生じる液相 に伴う変形と考えている。Fig.2に、作製したバルクを Seed plate から切り離し、長時間酸素アニールした後の77K における捕捉磁場特性を示す。正六角形、正方形状バルクともに形状を反映した捕捉磁場分布であり、形状に依らず、バルク全体に一様に結晶成長している傍証である。

本手法は鉛直方向のみに結晶成長が進行するため、結晶 成長時間がバルクの形状や動径方向のサイズに依らず、短 時間での大型バルク育成に有望である。また、Top-seed 法 では不可能なリング状バルクの直接育成も期待できる。当 日は、正方形状バルクを連結した大型バルクの捕捉磁場特 性についても報告する。



Fig. 1. Photographs of dies for preparation of hexagonal and square-shaped pellets (a) and SDMG YBCO melt-textured bulks with hexagonal and square shapes grown on the GdBCO seed plate (b).



Fig. 2. Trapped field distributions of SDMG-processed YBCO melt-textured bulks with hexagonal (a) and square shapes (b) at 77 K after magnetized under 1 T.

参考文献

- [1] T. Nakashima, J. Shimoyama, M. Honzumi, Y. Tazaki,
- S. Horii, K. Kishio, *Physica C* **426–431**, 720 (2005).
- [2] N. D. Kumar, Y. Shi, W. Zhai, A. R. Dennis, J. H. Durrell, D. A. Cardwell, *Cryst. Growth Des.* 15, 1472 (2015).
- [3] T. Motoki, Y. Yanai, K. Nunokawa, J. Shimoyama, *Appl. Phys. Express* 13, 093002 (2020).

— 164 —

放電プラズマ焼結法による Coドープ Ba122 多結晶バルクの作製 と超伝導特性の評価

Fabrication and Evaluation of Superconducting Properties of Co-doped BaFe₂As₂

Polycrystalline Bulks by Spark Plasma Sintering

長谷川 友大, 德田 進之介, 藤井 陸太, 山本 明保(東京農工大)

HASEGAWA Yuta, TOKUTA Shinnosuke, FUJII Rikuta, YAMAMOTO Akiyasu (Tokyo Univ. of Agri. and Tech.) E-mail: s173753u@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体の一種であるBaFe₂As₂は臨界温度 T_c と上部 臨界磁場 H_{c2} が高く強磁場応用が期待されている。また、比 較的大きい臨界傾角($\theta_c = 5-9^\circ$ [1])を持つため多結晶材料 の作製に適している。一方で臨界電流密度 J_c の向上が課題 である。SPS(Spark Plasma Sintering,放電プラズマ焼結)は 試料に圧力を印加しながらパルス電流を流し、それによって 生じるジュール熱を用いて加熱、焼結を行う手法である。本研 究では、Coドープ Ba122 多結晶バルクの J_c を向上させること を目的に、SPS 法を用いて試料を作製し、密度、構成相、超 伝導特性を評価した。

2. 実験方法

BaFe_{1.84}Co_{0.16}As₂の化学組成となるように秤量した単体金属 粉末をボールミル混合し、グラファイト製の SPS 型に充填した。 50 MPa の一軸圧力下において+50℃/min の速度で昇温し、 600, 700, 800, 900℃で 5 min 保持することで、直径 10 mm、 厚み約 1.3 mm の多結晶バルク試料を作製した。作製した試 料の構成相を、試料表面の X 線回折(XRD)により評価した。 試料の寸法と質量から焼結密度を求め、Co8%ドープ Ba122 単結晶の格子定数を用いて計算した理論密度から相対密度 を評価した。SQUID VSM で磁化測定を行い、磁気ヒステリシ スループから J_c を計算した。PPMS を用いて四端子法により電 気抵抗率 ρ の温度依存性を測定し、超伝導転移の 90%とな る温度を T_c と定義した。

3. 結果·考察

全ての焼結温度で、黒色円盤状のバルク試料が得られた。 試料の相対密度はいずれも約90%以上の高い値を示した。試 料のXRDパターンを図1に示す。全ての試料においてBa122 相が主相として得られた。焼結温度の増加とともにメインピー クである(103)ピークの半値幅が狭まったことから、結晶性が改 善したと考えられる。電気抵抗率の温度依存性から、全ての 試料が超伝導転移し、ゼロ抵抗を示すことが分かった。 T_c は 600℃で24.9 Kであるのに対し、700-900℃では27 K以上の 高い値を示した。Ba122 相の結晶性の改善により T_c が向上し たと考えられる。5 Kにおける J_c の外部磁場依存性を図 2 に 示す。焼結温度の増加とともに自己磁場下の J_c は減少した。 FeAs の増加により J_c が減少したと考えられる。本研究で得ら れた最高の J_c は、600℃で焼結させた試料の J_c = 2.3×10⁴ A/cm²であり、常圧合成で作製した試料(1.7×10⁴ A/cm² [2]) の値を上回った。

4. まとめ

本研究では L_{e} を向上させるため、SPS 法を用いて Coドープ BaFe₂As₂ 多結晶バルクを作製した。SPS 法により高密度かつ Ba122 を主相としたバルクが作製できた。600°C, 5 min で焼結 させた試料で 2 ×10⁴ A/cm²を超える L_{e} が得られた。



Fig.1 XRD patterns of the samples normalized by the intensity of (103) peak of 122.



density at 5 K

- 1. T. Katase, et al.: Nature Communications, Vol.2 (2011) 409
- S. Tokuta, et al.: Superconductor Science and Technology, Vol. 33 (2020) 094010

放電プラズマ焼結法による CaKFe₄As₄超電導バルクの作製

Synthesis of CaKFe₄As₄ bulk superconductors using spark plasma sintering technique

<u>石田 茂之</u>, Sugali Pavan Kumar Naik, 土屋 佳則, 馬渡 康徳, 吉田 良行, 伊豫 彰, 永崎 洋, 荻野 拓 (産総研); 神谷 良久, 川島 健司 (イムラ材研)

Ishida Shigeyuki, Sugali Pavan Kumer Naik, TSUCHIYA Yoshinori, MAWARAEI Yasunori, YOSHIDA Yoshiyuki, IYO Akira, EISAKI Hiroshi, OGINO Hiraku (AIST); KAMIYA Yoshihisa, KAWASHIMA Kenji (IMRA MATERIAL R&D) E-mail: s.ishida@aist.go.jp

1. はじめに

高磁場応用が期待される鉄系高温超電導体では、短尺線 材の臨界電流密度は実用水準に迫りつつあり[1]、近年では そのコイル化も試みられている[2]。一方で、コイル電磁石と比 べて作製プロセスが簡便な、超電導バルク磁石への応用も検 討されている[3]。大型化・低コスト化が可能な多結晶バルクで MgB2バルク以上の高磁場発生が実現すれば、応用への道が 拓ける。現状、鉄系バルクの捕捉磁場は1 T 程度であり[3]、 大幅な特性向上が望まれる。鉄系バルクの特性向上に向け て、まずは臨界電流密度 Lの向上が必須である。本研究では、 材料の選択とバルク作製方法に着目し、鉄系バルクの作製と 特性評価を行った[4]。

2. 実験方法

鉄系バルクの材料としては CaKFe₄As₄[5]を用いた。我々 は本物質が特有の欠陥構造を有し、優れた粒内臨界電流特 性を示すことを報告し[6,7]、高い応用ポテンシャルがあると見 込んでいる。CaKFe₄As₄多結晶粉末は前駆体 CaAs、KAs、 Fe₂Asを用いて合成した。熱処理中にロスしやすいKとAsを やや過剰に、CaAs:KAs:Fe₂As=1:1.05:1の比率で混合 し、ステンレス製の反応容器に封入した。900℃で3時間焼成 した後、試料を再粉砕・混合し、920℃で3時間再焼成した。

続いて、多結晶粉末を放電プラズマ焼結 (Spark Plasm Sintering (SPS)) 法を用いてバルク化した。SPS 法は、簡便かつ短時間で高密度焼結体が得られるという利点がある。約1gの粉末を内径10 mm のカーボン型に充填し、50 MPaを印加した状態で通電加熱した(昇温レートは約 50℃/min)。500~600℃で焼結が始まり、700~800℃で完了した。

SPS 法により作製した CaKFe₄As₄ バルクについて、密度、 表面 X線回折パターン、ビッカース硬度を評価した。またバル クを数 mm 角の小片に切出し、磁化測定により臨界温度 T_cを 決め、Bean モデルを用いて J_cを評価した。また走査型電子顕 微鏡(SEM)による組織観察を行った。

3. 結果·考察

図 1 のインセットに作製した \$ 10mm の CaKFe₄As₄バルク 試料の写真を示す。バルクの密度は 5.02 g/cm³であり、 CaKFe₄As₄の理論密度(5.22 g/cm³)の約 96%に相当すること がわかった。X 線回折パターンは、元の粉末と比較して FeAs 等の不純物の析出が見られるものの、主相は CaKFe₄As₄のま まであった。SPS 法の利用により、高密度かつ比較的不純物 の少ない CaKFe₄As₄バルクを作製することができた。

超電導特性については、バルク試料の T_c は 35 K であり、 単結晶の T_c (~36 K)と同等であった。図1 に、4.2 K, 10 K, 20 K における J_c の磁場依存性を示す。 J_c の値は、4.2 K、ゼロ 磁場では 80 kA/cm²、5 T の磁場中で 18 kA/cm² であった。こ れは鉄系バルクとしては高い値であるが、CaKFe₄As₄ 単結晶 の J_c から 1~2 桁低い。また単結晶の J_c は特徴的な温度依存 性を示す(20 K 付近にピークを持つ)[6,7]が、本バルク試料 ではそのような振る舞いは見られなかった。これらの結果は、 粒界特性が J_c を律速していることを示唆している。 図2に、バルク表面のSEM画像を示す。組成分析により、 不純物として、FeAsの他、Ca酸化物やKFe2As2等が析出し ていることがわかった。また、粒界には細かなクラックが生じて いた。これらは粒間 J。を大きく下げる要素であり、本バルク試 料のJ。が単結晶より1桁以上低いことの原因と考えられる。

4. まとめ

SPS法の利用により高密度、高 *L*の CaKFe₄As₄バルクが得られた。一方で、不純物析出やクラックといった *L* 特性の律速 要因も明らかになった。これらの解消に向け SPS プロセスを改 善することが今後の課題である。



Fig. 1 Magnetic field dependence of J_c for SPS bulk.



Fig. 2 SEM image of SPS bulk surface.

謝辞

本研究はJSPS科研費(16H06439、19H02179)および日立 財団倉田奨励金の助成を受けたものである。

- 1. C. Yao and Y. Ma: SuST 32 (2019) 023002
- 2. D. Wang, et al.: SuST **32** (2019) 04LT01
- 3. J. D. Weiss, et al.: SuST 28 (2015) 112001
- 4. S. Ishida, et al.: SuST 33 (2020) 094005
- 5. A. Iyo, et al.: J. Am. Chem. Soc. 138 (2016) 3410
- 6. S. Ishida, et al.: npj Quantum Mater. 4 (2019) 27
- 7. S. Pyon, et al.: Phys. Rev. B 99 (2019) 104506

機械学習を活用した K ドープ Ba122 多結晶バルクの合成プロセスの検討 Optimization of synthesis processes for K-doped BaFe₂As₂ polycrystalline bulks using machine learning

<u>德田 進之介</u>,長谷川 友大,藤井 陸太,岡田 雄輝,石井 秋光,山中 晃徳(東京農工大); 嶋田 雄介(東北大);波多 聰(九大);山本 明保(東京農工大)

TOKUTA Shinnosuke, HASEGAWA Yuta, FUJII Rikuta, OKADA Yuki, ISHII Akimitsu, YAMANAKA Akinori (TUAT);

SHIMADA Yusuke (Tohoku Univ.); HATA Satoshi (Kyushu Univ.); YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)

E-mail: s195941r@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体の一種である BaFe₂As₂(Ba122)は、T_c と Hc2 が高く、銅酸化物系超伝導体と比べて粒界特性 に優れるため[1]、強力磁石用の多結晶材料としての応 用が期待されており、2015年には1Tを捕捉する直径1 cmのKドープBa122バルク磁石[2]が報告されている。 これまで我々のグループでは、Coドープ Ba122 多結晶 バルクの構造特性・超伝導特性に対する高エネルギー 混合の効果[3,4]や、KドープBal22多結晶バルクの放 電プラズマ焼結法による合成[5]について報告してきた。 一方、材料科学の分野において、データベースや機械 学習を利用して新材料や合成条件の探索効率化など を目指す、マテリアルズ・インフォマティクスが注目され ている。本研究では、K ドープ Bal22 多結晶バルクの 臨界電流特性J。を向上させるため、機械学習手法の一 つであるベイズ最適化による合成プロセスの検討を行 った。

2. 実験方法

直径 10 mm、厚み約 1.3 mmのKドープBa122 多結 晶バルク試料は、50 MPa の一軸圧力下での放電プラ ズマ焼結により作製された。前駆体粉末として、ボール ミル混合で作製したメカニカルアロイング Ba122 粉末 (仕込組成:K40%ドープ)を使用した。ベイズ最適化で は、未知関数f(x)がガウス過程に従うと仮定して、xにお ける平均関数 $\mu(x)$ と標準偏差 $\sigma(x)$ を計算し、獲得関数 a(x)に従って次の条件を決定しながらf(x)を同定してい く。本研究では、 $f(x) = J_c(5 \text{ K}, 3 \text{ T}), x = (昇温速度,焼$ 結温度,焼結時間)として、図 1 のフローチャートにしたがって、プロセス条件の最適化を進めた。

3. 実験結果

ベイズ最適化を始めるにあたり、昇温速度、焼結温 度、焼結時間の探索範囲を設定し、これまで作製してき た試料、および、幾つかの条件で新規に作製した試料



Fig. 1 Flowchart of Bayesian optimization

のデータを事前情報として用いた。事前情報を用いて 獲得関数を計算し、獲得関数が最大となる合成パラメ ータ(次の一手)を得た。講演では、これまでのベイズ最 適化の進捗を報告する。

謝辞

本研究はJST-CREST、JSPS科研費、文部科学省元 素戦略プロジェクトの支援を受けて行ったものである。

参考文献

- 1. H. Hosono, et al.: Mat. Today, Vol. 21 (2013) 278
- J. D. Weiss, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 28 (2015) 112001
- 3. S. Tokuta and A. Yamamoto: APL Mater., Vol. 7 (2019) 111107
- S. Tokuta, Y. Shimada and A. Yamamoto: Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) 094010
- S. Tokuta, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.120

— 167 —

低温磁場配向法による c 軸配向 Bi2223 多結晶材料の作製と物性 Synthesis of *c*-axis oriented Bi2223 polycrystalline materials through magnetic grain alignment process at low temperature and their physical properties

岩見 壮徒 (青学大); 武田 泰明 (理研); 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

<u>IWAMI Taketo</u> (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (RIKEN); MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5619040@aoyama.jp

1. はじめに

これまで我々は(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₃[Bi2223]多結晶材料に おける臨界電流特性の改善に向けた粒間結合強化手法を報 告してきた[1]。最近は永久磁石を用いた簡便な静磁場配向 法に注目しており、試料全体にわたり高度 c 軸配向組織を形 成することで、厚膜試料においても高い粒間 J_c の実現を期待 している。これまでに新手法として開発した低温磁場配向を中 心に、0.22 T の弱磁場で作製した試料においても試料内部ま で高度 c 軸配向組織の形成に成功したことを報告した[2]。前 回は、高度 c 軸配向試料に対して高圧プレスを施した後に、 $P_{02} = 3$ kPa 下、様々な焼成温度で焼結を行ったところ、800°C 以下の焼成で 20 K での粒間 J_c が 30 kA cm⁻²を上回るバルク が再現性良く得られることを報告した[3]。

今回は、高圧プレス後に $P_{02} = 3$ kPa 以外の酸素分圧下での焼成を行い、粒間 J_c の改善を試みた結果を報告する。

2. 実験方法

原料にはティーイーピー社製の高濃度 Pb 組成 Bi2223 仮焼成粉末(仕込組成 Bi1.6Pb0.45Sr2Ca2Cu3Oy)を用い、所定量 のエタノールとボールミル混合を 24 時間行うことにより スラリーを調製した。磁場配向は液体窒素で凍らせたスラ リーを、表面磁場 0.22 T のネオジム磁石上に置き徐々に 温度を上げることにより行った。乾燥後の試料を 3%O2/Ar 気流中で焼成し、Ag 箔で包み一軸プレス・焼成を繰り返 した。プレス圧力は 100-200 Pa、最後に~2 GPa までの高圧 プレスを段階的に行った。再焼成条件は 785°C, 24 h とし て、様々な酸素分圧下で行った。

試料の微細組織は SEM により観察し、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いプレス面に垂直に印加した磁場下で の磁化測定により評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 に作製した Bi2223 厚膜試料の磁化率の温度依存 性を示す。いずれの試料も緻密化と良好な粒間結合を反映し たシャープな超伝導転移を示した。Fig. 2 に作製した試料の 残留磁化法により測定した J_c の温度依存性を示す。いずれ の条件で作製した試料においても 20 K で 35 kA cm⁻²を超え ており、785°C, 24 h, $P_{02} = 2$ kPa で焼成した試料は、Bi2223 厚 膜として最高の粒間 $J_c \sim 52$ kA cm⁻²(20 K)を記録した。これには $P_{02} = 3$ kPa よりも低酸素雰囲気での焼成により、Pb 固溶量が 増大、つまり異方性が低下し、粒界における超伝導特性が向 上したことが寄与していると考えられる。一方、 $P_{02} = 1$ kPa 焼 成試料の粒間 J_c に大幅な改善が見られなかった。785°C、 P_{02} = 1 kPa は部分溶融条件に近く、 $P_{02} = 1$ kPa 下での最適焼成 温度はより低いことが考えられる。 講演では上記の結果に加え、各酸素分圧下で様々な温度、 時間で焼結した試料の物性についても報告する。



Fig. 1 Temperature dependence of normalized ZFC magnetization for Bi2223 thick films sintered at 785°C for 24 h under various P₀₂.





謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 および JSPS 科研費 17H03235 の支援を受けて実施したものである。

- [1] Y. Takeda, et al., Physica C 534 (2017) 9-12.
- [2] T. Iwami et al., Abstract of 10th ACASC-2nd Asian ICMC-CSSJ (2020) 11.
- [3] T. Iwami et al., Abstract of CSSJ Conference 99 (2020) 122.

Nb-Sn 化合物を前駆体とした Cu 添加 Nb₃Sn バルク超伝導体の作製と 磁東ピン止め特性

Fabrication and vortex pinning characteristics of Cu-doped Nb₃Sn superconducting bulks using a Nb-Sn compound precursor

天瀬 洸太,内藤 智之(岩手大);菊池 章弘(NIMS) AMASE Kota, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS) E-mail: g0319010@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 超伝導線材は10 Tを超える超伝導マグネットに 応用されている。一方、Nb₃Sn テープ線材を螺旋状シリン ダー形状としたもので 4.2 K において 2.24 T の捕捉磁場 が報告されている[1]。Nb₃Sn は 10 K において約 15 T の 比較的高い上部臨界磁場を持つため、10 Kで動作するバ ルク磁石として高いポテンシャルを持っているといえる。 前回の学会において Nb-Sn 化合物を前駆体としたバルク 体を作製し、10 K において 2.14 T の捕捉磁場を報告した [2]。しかしながら、結晶粒粗大化を抑制するため Nb₃Sn の生成温度(~930℃)以下の800℃で熱処理したためNbや Nb₆Sn₅といった不純物も生成し、Nb₃Sn の体積分率が少な かった。これを解決するため、線材の製造方法として確立 しているブロンズ法を応用することにより、Nb₃Sn の分率 の向上を見込んだ。ブロンズ法は、Cu を添加することに より、生成温度を700℃以下に低下させる効果がある[3]。 従って、本研究はNb-Sn 前駆体を使用した Cu 添加の Nb₃Sn バルク体を作製し、その磁束ピン止め特性を明らかにす ることを目的とした。

2. 実験方法

原料粉末には Nb 粉末(純度 99.9%、粒径 43µm 以下)、Sn 粉末(純度 99.9%、粒径 38µm 以下)、Cu 粉末(純度 99.9%、 粒径 1µm 以下)を用いた。前駆体として NbSn₂を Nb と Sn を1:2で秤量・混合した後真空中で800℃×100時間の 熱処理をして作製した。その後、前駆体 NbSn₂と Nb を1: 5 で秤量、混合し、Cu(0.5, 1, 20 wt%)を添加し混合した 後、一軸プレスを行い \u03c6 20 mmのペレットとした。熱処理 は真空中で 800℃×100 時間行った。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た。小片試 料の磁化ヒステリシス曲線を SQUID 磁束計で測定し、臨 界電流密度 J。を拡張型 Bean モデルにより算出した。

3. 実験結果

Fig.1にCu添加したNb₃Sn バルク体のXRD パターンを 示す。すべてのバルク体で Nb₃Sn 単相であることが確認さ れた。以前報告した同じ熱処理条件の無添加バルク体で はNbとNb₆Sn₅の不純物ピークがあったのに対し、Cu添加 の場合、Nb₃Sn の生成温度の低下により単一の組成になっ た。しかし、20 wt%Cuにおいてブロンズの不純物ピーク が確認された。

Fig.2に10 K における無添加および Cu 添加した Nb₃Sn バルク体の臨界電流密度 J.の磁場依存性を示す。Cu の添 加量の 0.5 wt%から 1 wt%への増加に従い L が向上する が、20 wt%では低下した。1 wt%Cu添加バルク体の自己 磁場 J_c で 3.4×10⁵ A/cm² であり、以前報告した無添加バ ルク体と比較すると約2倍の J.の向上が示された。これ は、Nb₃Sn の生成割合の向上のためであると考える。

講演では捕捉磁場特性についても報告する予定である。



Fig.1 XRD patterns of the Cu-doped Nb₃Sn bulks



Fig.2 Magnetic field dependence of the critical current density $J_{\rm c}$ at 10 K for the pristine and Cu-doped Nb₃Sn bulks

参考文献

1. M. Rabinowitz et al.: Appl. Phys. Lett. 30, 607 (1977)

2. K. Amase et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) 3C-p03

3. G. Lefanc et al.: J. Less Common Metals 45 (1976) 339 - 342

MgB2バルク磁石のFCMおよびPFM法による捕捉磁場特性の最近の進展

Recent progress of the trapped field characteristics for MgB₂ bulk magnets magnetized by FCM and PFM methods

内藤 智之, 高橋 裕平, 平野 達也, 難波 空, 藤代 博之 (岩手大); 淡路 智 (東北大) <u>NAITO Tomoyuki</u>, TAKAHASHI Yuhei, HIRANO Tatsuya, NAMBA Sora, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.) Email: traita@iwata u ag ip

Email: tnaito@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

磁場中冷却着磁 (FCM) 法を適用すると 17 T 級磁場 を捕捉する RE-Ba-Cu-O バルク (RE は希土類元素) [1, 2] に対して MgB₂ バルクの捕捉磁場は最大で 5.4T で ある [3]。また,パルス着磁 (PFM) 法はその場着磁に 不可欠な技術であるが,磁束の激しい運動によりその 捕捉磁場は FCM 法より低く,RE-Ba-Cu-O(RE=Gd) バルクは 5.2 T [4], MgB₂ バルクは 1.1 T [5] が最高値 である。このように MgB₂ バルク磁石の捕捉磁場は決 して高くないが,弱結合問題が無いという最大の利点 が応用展開に有利に働く。我々は MgB₂ バルク磁石の 磁気共鳴装置の磁極への応用を目指して,バルクの大 型化や高捕捉磁場化に取り組んでいる。今回,MgB₂ バルク磁石の捕捉磁場の最高値を FCM 法および PFM 法の両方において更新できたので報告する。

2. 実験方法

円板状 MgB₂/TiB₂ バルク (Mg : Ti = (1-x) : x, x = 0.05, 0.1, 0.2) は熱間等方圧加圧 (HIP) 法, リング 状 MgB₂ バルクは浸透法でそれぞれ作製された。FCM 実験では円板状 MgB₂/TiB₂ バルクを 3 個積層したユニットを用いた。一方, PFM 実験ではリング状 MgB₂ バルクの中空部分に軟鉄ヨークを挿入し, その上下面 を Cu 薄板で挟んだ複合体を用いた。FCM 実験は東北大金研強磁場センターの 18T 超伝導マグネットで行った。その際 MgB₂/TiB₂ バルクユニットはガスもしく は液体ヘリウムで冷却した。PFM 実験は岩手大学で 行い, GM 冷凍機で冷却したリング状 MgB₂ バルク複 合体に 2 段階パルス磁場印加法を適用した。

実験結果および考察

Fig. 1(a) に MgB₂/TiB₂ バルクユニットの FCM 過 程を示す。初期印加磁場は 6T,着磁温度は 11.3K であ った。上部 2 個 (Mg90%Ti10% および Mg80%Ti20%) のバルク間中心で捕捉磁場 5.58 T を得た。わずか 0.18 T であるがこれまでの世界記録 5.4 T [3] を更新し た。ガスヘリウムによって積層した複数バルクを均一 冷却したことが記録更新の一つの要因と考えている。

Fig. 1(b) にリング型 MgB₂ バルク複合体の PFM 過 程を示す。パルス磁場 1 発目 (1.32 T) により約 0.6 T



Fig. 1: Time dependence of the trapped field of (a) the MgB_2/TiB_2 stacking during the FCM process and (b) the MgB_2 ring bulk composite during the PFM process at the second stage.

が捕捉された状態に2発目のパルス磁場1.26 Tを印加 したところ,これまでの最高値1.1 Tを超える1.61 T の捕捉磁場を得た。軟鉄ヨークの磁束収束の効果とCu 薄板の渦電流によるパルス磁場波形の変化が捕捉磁場 の向上をもたらしたと考えられる。

謝辞

日本製鉄(株)手嶋英一氏には HIP 法によるバルク 作製に多大なご協力を頂きました。感謝申し上げます。 また,本研究は JSPS 科研費 JP18K04920 の助成を受 けたものです。

- M. Tomita and M. Murakami, Nature **421** (2003) 517.
- [2] J.H. Durrel *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 27 (2014) 082001.
- [3] G. Fuchs *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 122002.
- [4] H. Fujishiro et al., Physica C 445-448 (2006) 334.
- [5] H. Fujishiro *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 084001.

Gd123 超電導線材を曲げ積層した界磁磁石の着磁特性評価 Evaluation of Magnetizing Characteristics for Bending Stacked-Magnet by Using Gd123 Tapes

<u>岩月 峻大</u>,都築 啓太,神戸 紀人,及川 大,塚本 武彦,安藤 浩哉(豊田高専)

IWATSUKI Takahiro, TSUZUKI Keita, KAMBE Norihito, OIKAWA Dai, TSUKAMOTO Takehiko, ANDOH Hiroya (NITTC) E-mail : j1901@toyota.kosen-ac.jp

1. 背景

超電導材料は外部から強力な磁場をかけることで、磁束を 超電導体内部で捕捉することができる。この特性を着磁と呼 び、超電導状態を保持する間、強力な磁場を発生する超電 導磁石を形成することが可能である。

超電導回転機の界磁極には、バルク超電導体を用いた超 電導磁石が適用される[1,2]。バルク超電導体は着磁特性に 優れているものの、セラミック塊であるため曲げに弱く、曲面 への活用が難しいという問題点がある。そのため、ラジアルギ ャップ型モータのロータ表面のような曲面へ沿うような形状で の活用は困難である。

この課題に対して我々のグループでは、従来のバルク超電 導体に置き換わるものとして、超電導線材を積層した界磁磁 石についての研究を進めている。これまでの研究成果により、 超電導線材の材料や幅、積層方法などを変更することで、積 層型界磁磁石の捕捉磁束密度分布を制御可能であると確認 した。超電導線材を積層した塊でも着磁を施すことで、バルク 超電導体と同様に超電導磁石を形成し回転機に適用可能で あることが確認されている[3]。

そこで本研究では、超電導線材を曲げた状態で積層した 界磁磁石モデルに対して着磁を施した際の磁場分布を計測 し、従来までの結果との比較を行う。これにより、超電導線材 の特性を明らかにし、界磁極としての能力を検証する。

2. 方法

本研究では、超電導線材を Fig.1 のように積層したモデル を作製し、着磁試験を実施する。曲げ積層モデルについては 縦 25 mm,横 25 mm,厚さ5 mmとし、曲げの大きさについて は半径 Rを5 mm間隔で設定して作製する。積層に使用する 超電導線材の性能は Table.1 に示す。着磁方法は静磁場着 磁とし、液体窒素内にて着磁を行う。5 分間の着磁後、ホール センサを用いて、曲げ積層モデルの捕捉磁束密度分布を計 測する。この結果を比較し、曲げた状態の超電導線材の捕捉 磁束密度およびその分布について検証する。



Fig.1 Bending Stacked-Magnet model

Table 1	Specs	of HTS	Tane
I able.1	opecs	OLITIO	rape

Superconducting Material	GdBCO				
Distributer	SuperOX				
Thickness [mm]	0.05				
Width [mm]	12				
Critical Current <i>Ic</i> [A] (77 K)	300				

Fig.2 に着磁試験システムの大まかなフロー図を示す。永久 磁石(<0.2 T)を用いた着磁後、液体窒素内にて固定したホー ルセンサの下で曲げ積層モデルを回転させることで、積層モデ ルとホールセンサ間の距離を一定にしたまま、一定間隔での捕 提磁東密度の計測を可能にした。ホールセンサと曲げ積層モ デル間の Gap は 1 mm とした。



Fig.2 Measurement F

3. 成果と考察

当日は、曲げ積層モデルと昨年度の積層モデルの捕捉磁 束密度分布の比較と曲げ半径を変更した場合における捕捉 磁束密度分布の比較について報告する。

今後は本研究にて得られた成果より、ラジアルギャップ型モ ータにおけるロータ界磁磁石への活用が期待できる。また、 外部からの着磁によって、曲げた状態の界磁磁石の形成が 可能となることは、適用範囲を広げられる可能性がある。今後 は磁石の大型化やさらなる形状変更の影響を検証し、様々な 応用機器への活用を視野に入れる予定である。

- Zhen Huang and T.A.Coombs: "Pulsed field magnetization strategies and the field poles composition in a bulk-type superconducting motor", *Phisica C: Superconductivity and its Applications*, Vol 534 (2017) pp.73–81
- John R. Hull and Michael Strasik: "Concepts for using trapped-flux HTS in motors and generators", *Phisica C: Superconductivity and its Applications*, Vol 484 (2013) pp.104-107
- Fernando Jorge Monteiro Dias, et Al., "Development of a Superconducting Machine With Stacks of Second Generation HTS Tapes", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol 29, Issue 5 (2019)

著者索引 第100回低温工学・超電導学会 2020/12 京都大学

(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		E			
阿部 徹	(東北大)	6, 8	江口 諒	(三菱電機)	91,92	
安部 勇汰	(東工大)	106	栄元 雄山	(埼玉大)	36	
AHMAD Doa	(東大)	122	永崎 洋	(産総研)	166	
赤坂 友幸	(九工大)	159	遠藤 夏実	(東北大)	141	
天瀬 洸太	(岩手大)	169	江藤 大登	(福岡工大)	61	
雨宮 尚之	(京大)	12, 19, 74, 113, 114				
安藤 真次	(量研機構)	25		F		
安藤 浩哉	(豊田高専)	2, 171	淵野 修一郎	(東大)	112	
青木 裕治	(昭和電線)	119	藤井 陸太	(東京農工大)	165, 167	
荒井 孝介	(青学大)	145	藤澤 玲志	(福井工大)	22	
荒木 快生	(東工大)	105	藤代 博之	(岩手大)	170	
有本 靖	(KEK)	71, 76	藤田 真司	(フジクラ)	6, 7 , 8, 15, 16, 72 , 73, 71	
有吉 誠一郎	(豊橋技科大)	40	藤田 貴紀	(山梨大)	41	
浅田 峻汰	(横浜国大)	42	藤原 英弘	(三菱重工)	24	
浅見 大亮	(古河電工)	88	福田 響	(岡山大)	89	
浅野 稔久	(NIMS)	163	福田 光宏	(阪大)	33, 125	
旦尾一樹	(東北大)	93	福原 大貴	(福岡工大)	62	
阿竹 洋輔	(東北大)	161	福井 良磨	(量研機構)	29, 30	
淡路 智	(東北大)	6 , 7, 8, 18, 64, 88 , 100,	福本 祥一	(山本電機製作	斥所) 48	
		101, 150, 156, 160, 170	福島 弘之	(古河電工)	88	
AYALA Christop	oher(橫浜国大	て) 39	船木一幸	(JAXA)	1	
			船越 湧	(鹿児島大)	111	
	В					
馬場 智澄	(NIFS)	31		Н		
BADEL Arnaud	(東北大)	6, 8	萩原 政幸	(阪大)	17, 49	
裵 相哲	(サンデン AT) 105, 106	濱田一弥	(量研機構)	29, 30	
伴野 信哉	(NIMS)	85, 87 , 163	濱田 衞	(JASTEC)	96, 97, 117	
BAPTISTA de CA	ASTRO Pedro	(NIMS) 103, 104, 109	濱口 真司	(NIFS)	3, 31, 32, 52, 124	
			濵中 麻衣	(早大)	129, 130, 132	
	C		花井 哲	(東芝エネルキ	ドーシステムズ)6	
陳妙鑫	(京大)	19	原 真太郎	(京大)	3, 51	
力石 浩孝	(NIFS)	124	原田 工夢	(成蹊大)	99	
筑本 知子	(中部大)	31, 142	泊瀬川 晋	(東北大)	14	
COLLE Alexand	re(京大)	79, 80 , 82, 83	長谷川 友大	(東京農工大)	165 , 167	
			橋爪 秀利	(東北大)	14, 32, 139, 161	
	D		蓮尾 信也	(SuperOX Jap	ban) 155	
大保 雅載	(フジクラ)	6, 7, 8	波多 聰	(九大)	167	
土井 俊哉	(京大)	20	服部 泰佑	(三菱電機)	91 , 92, 94	
土井 裕太郎	(九大)	156	早坂 遼一路	(東北大)	161	
			林幹二	(豊橋技科大)	40	

日比野 拓	(名大)	148 , 149	岩本 晃史	(NIFS)	3, 31
東川 甲平	(九大)	58, 59, 162	岩佐 太陽	(神戸大)	47
肥村 康治	(東海大)	86	岩佐 崇	(東工大)	67
平野 直樹	(NIFS)	31, 32, 70 , 108, 135	岩崎 秀	(北大)	103
平野 達也	(岩手大)	170	岩田 遥介	(東大)	112
平田 渉	(フジクラ)	7	岩田 暢祐	(中部大)	140
平塚 善勝	(住重)	107	岩谷 祐	(東芝)	135
平山 斉	(鹿児島大)	111	岩月 峻大	(豊田高専)	2, 171
飛沢 健	(豊橋技科大)	40	伊豫彰	(産総研)	166
堀越 篤	(日立)	75	和泉 充	(海洋大)	77
細谷 岳哉	(横浜国大)	43	和泉 輝郎	(産総研)	59, 121, 147, 155
HOU Zhefeng	(中国科学院)	103			
黄河	(中国科学院)	100		К	
			柁川 一弘	(山口東京理科	4大)6
	I		梶谷 秀樹	(量研機構)	24, 25, 26
衣斐 顕	(産総研)	59, 147	神戸 紀人	(豊田高専)	2 , 171
一野 祐亮	(愛工大)	55, 63 , 64, 128, 148	神谷 良久	(イムラ材研)	166
一瀬 中	(電中研)	15, 16, 71, 90	金尾 憲一	(住重)	107
井田 徹哉	(海洋大)	77	神田 昌枝	(中部大)	110, 140
井口 将秀	(量研機構)	25 , 26, 27	金子 賢治	(九大)	156
飯島 康裕	(フジクラ)	6, 7, 8	金丸 凌大	(鹿児島大)	121
飯嶋 安男	(NIMS)	90, 89	假屋 強	(筑波大)	53
池田 博	(KEK)	75.76	柏好敏	(量研機構)	29
池本 由希子	(KEK)	75.76	片山 伸彦	(東大)	122
今川信作	(NIFS)	3	加藤丈晴	(IFCC)	147. 161. 163
今村 寿郎	(日立)	53	川畑 秋馬	(鹿児島大)	111
稻谷 芳史	(JAXA)	51	川畑唯一	(九工大)	66
井上和朗	(NIMS)	115. 116	川越 明史	(鹿児島大)	31.121
井上昌睦	(福岡工大)	60, 61, 62	川井 正徳	(KEK)	71
井上良太	(岡山大)	5. 10. 56. 57. 89. 136	川合 修平	(中部大)	140
井上 靖也	(京大)	20	川又 弘志	(KEK)	75, 76
井上達也	(三菱電機)	91.92	河村 浩一	(中部電力ミラ	ライズ) 135
井上 雄太	(岡山大)	5	川並 良造	(川並鉄工)	31
井岡 茂	(東芝エネルキ	デーシステムズ)6	河野 勝己	(量研機構)	29, 30
石田 裕亮	(東大)	122	河野 雅俊	(明興双葉)	90
石井 秋光	(東京農工大)	167	川崎 理香子	(京大)	3
石井 祐介	(東芝)	135	川島 健司	(イムラ材研)	166
石山 敦士	(早大)	33, 125, 129, 130, 131,	川山 巌	(京大)	20
		132, 134	木田 孝則	(阪大)	17
石原 篤	(鉄道総研)	159	木戸 修一	(日立)	53
板橋 幸也	(東北大)	95	木戸 勇志	(京大)	94
伊藤 悟	(東北大)	14, 32, 139, 161	菊池 章弘	(NIMS)	15, 16, 71, 89, 90 , 169
伊藤 佳孝	(イムラ材研)	78,80	金錫範	(岡山大)	4, 5, 9, 10, 57, 89, 90, 125.
岩熊 成卓	(九大)	121			136, 56
岩見 壮徒	(青学大)	97, 117, 152. 168	木村 基良	(明興双葉)	90
岩見佳紀	(京大)	51	木村 誠宏	(KEK)	75
	V/JV/ V/	· · ·			10

木村 諒	(岡山大)	89	松竹 優一	(上智大)	97, 117
金道 浩一	(東大)	17	松浦 潤	(京大)	80, 84
木須 隆暢	(九大)	58, 59, 162	松山 友樹	(大阪府大)	49
北口仁	(NIMS)	90, 96, 115, 116, 157, 158	松坂 陣	(名大)	64
北村 真由	(早大)	129, 130, 132	松田 竜之介	(神戸大)	47
木内 勝	(九工大)	99, 119, 148, 149	馬渡 康徳	(産総研)	34 , 66, 166
小林 大地	(東北大)	150	三上 光瑠	(豊橋技科大)	40
小林 弘明	(JAXA)	3, 51	三村 僚太郎	(東大)	120
小林 大剛	(岡山大)	56, 57	南 龍太郎	(筑波大)	53
小林 賢介	(NIMS)	115, 116, 158	美齊津 英典	(東北大)	18
児玉 一宗	(日立)	143	三島 史人	(福井工大)	21 , 22
古閑 康則	(日立)	53	三戸 利行	(NIFS)	31 , 32, 70
小池 亘	(青学大)	144, 145	三浦 英明	(三菱電機)	91, 92 , 93, 94, 95
小泉 徳潔	(量研機構)	23 , 24, 25, 26, 27	三浦 正志	(成蹊大)	99, 146, 147
小島 寛航	(東海大)	153, 154	三浦 峻	(九大)	121
久保 毅幸	(KEK)	68	宮城 大輔	(千葉大)	141
熊倉 浩明	(NIMS)	48, 157	三宅 雄大	(岡山大)	125
久野 和雄	(三菱電機)	24	宮本 康平	(岡山大)	56 , 57
黒木 篤也	(九工大)	149	宮本 祐	(早大)	131
			宮田 健司	(成蹊大)	147
	L		宮﨑 寛史	(東芝エネルキ	デーシステムズ)6
LEE Sergey	(SuperOX Jap	oan) 155, 156	宮澤 順一	(NIFS)	32, 65
李陽	(京大)	113	水野 克俊	(鉄道総研)	11, 13
羅 珺怡	(東北大)	100 , 101	森田 太郎	(上智大)	85 , 87
羅 熙捷	(京大)	12	森田 友輔	(三菱電機)	91,92
			森脇 怜也	(福岡工大)	62
	М		元木 貴則	(青学大)	97, 117, 144, 145, 151,
马 衍伟	(中国科学院)	58, 100, 101			152, 164 , 168
町 敬人	(産総研)	15, 59, 71, 155	向山 晋一	(古河電工)	119
前田 秀明	(科学技術振興	興機構)96, 133, 163	村上 陽之	(量研機構)	29
前川一真	(神戸大)	47, 48, 69	村上 将吾	(早大)	134
丸山 真輝	(東北大)	1	村本 周平	(京大)	20
増田 孝人	(住友電工)	119	MUSSO Andrea	(CERN)	75
増山 新二	(大島商船高専	〕 45, 46	武藤 翔吾	(フジクラ)	6, 7, 72, 73
増澤 美佳	(KEK)	71	明連 広昭	(埼玉大)	36
松田 哲也	(三菱電機)	91, 92, 94			
松井 邦浩	(量研機構)	24, 25, 26		Ν	
松木 健次郎	(京大)	79, 80, 82	永廣 衛	(神戸大)	47
松本 明善	(NIMS)	143, 156, 157	永井 せつら	(東工大)	70, 108
松本一昭	(栃木カネカ)	110	永石 竜起	(住友電工)	96
松本 凌	(NIMS)	115, 116	永松 純	(由紀精密)	90
松村 知岳	(東大)	122	長崎 陽	(東北大)	95, 1, 93, 141, 3
松永 信之介	(総研大)	32, 65	永澤 諒紀	(東海大)	86
松野 哲也	(有明高専)	66	長屋 重夫	(中部電力)	33, 125, 135
松下 直也	(京大)	138	内藤 敬介	(岡山大)	4, 9, 10
松下 照男	(九工大)	99, 119	内藤 智之	(岩手大)	169, 170

中川 豪	(大阪府大)	49	荻野 拓	(産総研)	166
中平 昌隆	(量研機構)	24, 25, 26, 27	荻津 透	(KEK)	12, 75
中井 昭暢	(日本電線工業	養会)102,119	小黒 英俊	(東海大)	86, 88, 153, 154, 160 , 102
中井 優亨	(青学大)	97, 117	大木 康太郎	(住友電工)	96
仲井 悠貴	(岡山大)	125	大倉 大佑	(SuperOX Jaj	pan) 155
中島 健介	(山形大)	40	大崎 博之	(東大)	54, 112, 120, 122
中本 美緒	(量研機構)	24, 26, 28	大嶋 重利	(山形大)	98
中本 建志	(KEK)	75, 76	太田 順也	(成蹊大)	146
中村 美幸	(SuperOX Jap	ban) 155	大内 徳人	(KEK)	71,90
中村 亘	(中部電力ミラ	ライズ)135	及川大	(豊田高専)	2, 171
中村 武恒	(京大)	78 , 79 , 80, 81 , 82, 83, 84 ,	大石 竣介	(鹿児島大)	121
		90, 94	岡 徹雄	(芝浦工大)	123
中村 祐介	(名大)	63	岡田 尚起	(KEK)	75, 76
中島 隆芳	(住友電工)	151	岡田 達典	(東北大)	6, 7, 8, 18 , 64, 100, 101,
中山 郁夢	(神戸大)	47			150, 156
難波 空	(岩手大)	170	岡田 雄輝	(東京農工大)	167
七戸 希	(岡山理科大)	118	岡村 崇弘	(KEK)	52
楢崎 勝弘	(住重)	107	岡村 哲至	(東工大)	67, 70, 105, 106, 108
鳴海 康雄	(阪大)	17, 49	岡崎 陽大	(東工大)	70
成尾 芳博	(JAXA)	51	桶田 将弘	(山梨大)	137
成瀬 雅人	(埼玉大)	36	沖津 茂樹	(日立)	53
成嶋 吉朗	(NIFS)	32, 65	奥野 誠也	(京大)	78, 79, 81
夏目 恭平	(量研機構)	29, 30	大牟礼 将人	(早大)	131
根本 羽衣	(早大)	129, 130	大西 祥広	(量研機構)	30
二森 茂樹	(NIMS)	90	鬼塚 雄大	(九大)	59
西島 元	(NIMS)	14, 90, 96, 115, 116, 119,	小野寺 優太	(NIFS)	31, 32, 70
		143, 158	尾上 雄海	(東大)	122
西嶋 茂宏	(福井工大)	21, 22	長村 光造	(応用科学研)	102
西川 大亮	(岡山大)	56, 57	大澤 慶博	(岡山大)	5
西山 花名子	(東北大)	93	大嶋 重利	(山形大)	41
野田 礼華	(横浜国大)	37	太田 圭佑	(京大)	20
野口 正純	(東工大)	108	太田 真揮人	(福岡工大)	62
野口 悟	(大阪府大)	49	小田部 荘司	(九工大)	66, 159
野口 聡	(北大)	33, 56, 125, 129, 130,	大竹 俊輔	(三菱電機)	91, 92
		132, 134	大坪 正人	(由紀精密)	90
野元一宏	(三菱電機)	24	大辻 槙	(東大)	31, 70
野村 直希	(福井工大)	21, 22	大塚 清見	(住重)	107
野中 聡	(JAXA)	51	大内 徳人	(KEK)	76
沼澤 健則	(NIMS)	46, 104, 109	小澤 優一朗	(東海大)	153 , 154
布川 航太	(青学大)	164			
				Р	
	0		PETRYKIN Vale	ry (SuperOx J	apan) 156
尾花 哲浩	(NIFS)	32, 118 , 124	朴 任中	(理研)	96, 97, 117
小田 翔平	(山形大)	67			
小笠 卓郎	(京大)	80, 84		Q	
緒方 隆充	(早大)	33	銭可楨	(東大)	54

	S		鈴木 賢次	(九大)	162
齊藤 敦	(山形大)	67	鈴木 研人	(KEK)	75, 76
斉藤 一功	(JASTEC)	96, 97, 117	鈴木 孝明	(日立)	143
齋藤 優大	(成蹊大)	146	鈴木 匠	(東北大)	88, 100, 101
齋藤 明子	(NIMS)	109			
齋藤 嘉人	(NIMS)	35		Т	
坂口 香織	(東芝)	24	田口 春華	(東工大)	67
酒井 秀哉	(福岡工大)	60, 61	田橋 正浩	(中部大)	148, 149
坂本 瑞樹	(筑波大)	53	田井野 徹	(埼玉大)	36
作間 啓太	(成蹊大)	146	高田 卓	(NIFS)	31, 52
櫻井 武尊	(量研機構)	27, 126	高田 芳宏	(山本電機製作	乍所)48
桜井 雄基	(東大)	122	高橋 大地	(横浜国大)	38
笹田 廉陛	(青学大)	164	高橋 佳佑	(上智大)	133
佐々木 哲史	(東北大)	95	高橋 洸	(成蹊大)	147
佐々木 優一	(福井工大)	22	髙橋 弘紀	(東北大)	6, 7
篠倉 大輝	(福岡工大)	61	高橋 誠	(中部大)	148, 149
佐藤 海斗	(青学大)	151 , 152	高橋 雅人	(理研)	67
佐藤 更	(神戸大)	69	高橋 良和	(量研機構)	24
佐藤 茂	(ULTEX)	162	高橋 裕平	(岩手大)	170
佐藤 伸治	(三菱電機)	91,92	高橋 和彦	(トヨタ自動車	臣) 47
佐藤 航	(名大)	63	高畑 一也	(NIFS)	31, 32, 50
佐藤 幸生	(九大)	156	高野 克敏	(量研機構)	25, 27
関 秀一	(量研機構)	29	高野 義彦	(NIMS)	35 , 103, 104, 109, 115,
関光 正輝	(大島商船高朝	亨) 45, 46			116
關谷 尚人	(山梨大)	41, 137	高尾 智明	(上智大)	133
SHAANIKA Eras	mus(海洋大)	77	高安 眞	(MIT)	124
SHEN Tengming	g(LBNL)	12	武田 実	(神戸大)	47, 48, 69
渋谷 直哉	(NIMS)	115 , 116	武田 泰明	(理研)	96, 97 , 117, 158, 168
重政 茉於	(京大)	19	武井 慎治	(海洋大)	77
石田 茂之	(産総研)	166	竹塚 幸輝	(大島商船高専	厚) 45, 46
嶋田 雄介	(東北大)	167	竹内 正基	(RIMTEC)	11
下山 淳一	(青学大)	96, 97, 117, 144, 145,	竹内 尚輝	(横浜国大)	38
		151, 152 , 158, 164, 168	武輪 裕之	(東海大)	160
塩津 正博	(京大)	3, 51 , 138	竹屋 浩幸	(NIMS)	103, 104 , 109, 115, 116
白井 航大	(早大)	33	瀧川 博幸	(NIMS)	90, 157
白井 康之	(京大)	3, 51, 138	田村 仁	(NIFS)	32
SHISHKIN Oleg	(ハリコフ大)	142	田邉 肇	(三菱電機)	91, 92
荘林 純一	(山本電機製作	斥所)48	田中 秀樹	(日立)	143
曾我部 友輔	(京大)	19, 74 , 113, 114	田中 良二	(JEOL RESON	IANCE) 41
須藤 将太朗	(青学大)	144 , 145	田中 智之	(横浜国大)	39
末富 佑	(千葉大)	96, 97, 117, 133	田中 祥貴	(福岡工大)	60 , 61
SUGALI Pavan K	Kumar Naik ()	産総研)166	多和田 正文	(KEK)	71
菅野 未知央	(KEK)	75 , 76	寺井 誠	(埼玉大)	36
杉本 昌弘	(古河電工)	88	寺西 亮	(九大)	60, 62, 156
諏訪 友音	(量研機構)	24 , 26	寺尾 悠	(東大)	54, 112, 120, 122
鈴木 秀雄	(橫浜国大)	38	寺島 昭男	(KEK)	16, 71, 72, 75

寺嶋 健成	(NIMS)	103 , 104, 109	王寧	(京大)	19
寺﨑 義朗	(NIFS)	32, 124	WANG Xiaoron	g	(LBNL) 12
寺澤 俊久	(イムラ材研)	78, 80	王旭東	(KEK)	15, 16, 71, 72, 73
TODESCO Ezio	(CERN)	75	渡部 智則	(中部電力)	33, 125, 135
徳永 佳祐	(岡山大)	4, 9, 10	魏 亮亮	(京大)	94
德田 進之介	(東京農工大)	165, 167	WEISS Jeremy		
富久 琢磨	(青学大)	164	(Advanced Con	ductor Techno	logies LLC) 12
富岡 和貴	(東北大)	141	呉 澤宇	(九大)	162, 58 , 59
富田 優	(鉄道総研)	159			
殿岡 俊	(三菱電機)	91, 92		Х	
豊島 克幸	(JEOL RESON	IANCE) 41	徐 中堂	(中国科学院)	58
豊本 竜希	(京大)	113			
TRITRAKARN T	echit(東工大)	67		Y	
坪内 宏和	(古河電工)	88	谷貝 剛	(上智大)	3, 85, 87, 97, 117
土田 稜	(大阪府大)	49	山田 寛之	(名大)	55, 128
土谷 悦子	(NIMS)	90	山田 和彦	(高知大)	67
土屋 豪	(成蹊大)	99	山田 喬平	(上智大)	16
土屋 勝彦	(量研機構)	29	山田 祥子	(京大)	94
土屋 清澄	(KEK)	15 , 16 , 71 , 72, 73, 90	山田 雄一	(住友電工)	102
土屋 光揮	(フジクラ)	7, 8, 72, 73	山出 哲	(住友電工)	151
土屋 佳則	(産総研)	166	山口 康太	(海洋大)	77
土屋 雄司	(名大)	17 , 55, 63, 64 , 128, 148,	山口 作太郎	(中部大)	110 , 140, 142
		149	山口 高史	(住友電工)	96
津田 理	(東北大)	1, 3, 93, 95, 136, 141	山本 明保	(東京農工大)	165, 167
塚本 武彦	(豊田高専)	2, 171	山本 貴史	(NIMS)	103, 104, 109
恒松 正二	(住重)	107	山本 博和	(山本電機製作	乍所)48
津吉 杏佳	(早大)	129 , 130, 132	山本 優	(明興双葉)	90
都築 啓太	(豊田高専)	2, 171	山中 晃徳	(東京農工大)	167
			山梨 裕希	(横浜国大)	38, 42, 43, 44
	U		山岡 広	(KEK)	71
内田 公	(NIMS)	115, 116, 158	山崎 俊夫	(理研)	96
植田 浩史	(岡山大)	4 , 5, 9 , 10, 33, 56, 57, 89,	閻 洪	(九工大)	66
		96, 125, 134, 136	柳 長門	(NIFS)	31, 32 , 124
上田 聡美	(早大)	134	柳澤 吉紀	(理研)	96 , 97, 117, 133
植木 竜一	(KEK)	71, 76	柳井 創太	(京大)	138
梅野 高裕	(大陽日酸)	121	楊 明旭	(九大)	162
宇野 康弘	(量研機構)	24, 25	姚超	(中国科学院)	101
薄井 勝富	(量研機構)	29	安谷 葵	(鉄道総研)	159
			山梨 裕希	(横浜国大)	37
	V		横江 大作	(JFCC)	147, 161
VAN DER LAAN	Danko		横山 大貴	(九大)	6
(Advanced Con	ductor Techno	logies LLC)12	横山 和哉	(足利大)	123
			米塚 里奈	(九工大)	66
	W	1	吉田 大佐	(上智大)	133
和田 洋明	(横浜国大)	44	吉田 良行	(産総研)	166
若林 洸希	(京大)	74, 114	吉田 隆	(名大)	17, 55, 63, 64, 128, 148,

		149		Z	
吉原 優花	(早大)	129, 130, 132	张 现平	(中国科学院)	100
吉川 雅章	(イムラ材研)	78, 80	趙一帆	(京大)	12
吉川 信行	(橫浜国大)	37, 38, 39, 42, 43, 44	鍾 宇軒	(九工大)	159
吉澤 一美	(量研機構)	24	宗 占国	(KEK)	71
吉澤 裕一	(東芝)	24			
結城 光平	(東北大)	139 , 161			



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。

	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
第 400 日 0000 左左吉 子	電話 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573
弗 100 回 2020 年 度脊李	E-mail: cssj@csj.or.jp URL: http://csj.or.jp/
低温工学・超電導学会講演概要集	銀行口座 みずほ銀行 本郷支店
2020 年 12 月 8 日 登行	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

シーベル CEBELL

蒸発量大幅削減!

従来品と比べ、液化窒素の蒸発量を40%~60%削減(当社比) することが出来ました。また、軽量化も実現しました。

特殊仕様 : 用途により特殊仕様のものを製作いたします。 (例) 広口容器、その他装置用として各種特別仕様に対応可能

特徴

●軽量小型化

外側は金属絞りのアルミニュームを使用し、ステンレス製の内槽とは異種 金属継手(AL+SUS)で接合していることから、 軽量・小型で強度もあり 取扱いが容易です。 また、持ち運びに 台車を利用することで移動も大変楽に行えます。

また、持ち連びに 台車を利用することで移動も大変楽に行えます。 5L・10Lなら女性でも手軽に持ち運び出来ます。

●液取出しが容易

クライオジェット(別売品)との併用により、液取出しは極めて容易で、 容器を持ち上げる必要はありません。 ※高低差が1.5mくらいまでならご使用いただけます。

●高い断熱性能

スーパーインシュレーションと真空断熱の併用で、高い断熱性能を実 現しています。

●非磁性

磁場環境でもご使用いただけます。



	容量	高さ	外径	口径	内深	空重量	蒸発量	ム市
	L	cm	cm	Cm(約)	cm	kg	%/day	日中
シーベル 5	5	51	26	内:1.9/外:2.3	47	3.4	4.0	別売
シーベル 10	10	56	33	内:1.9/外:2.3	53	4.8	2.1	別売
シーベル 20	20	64	39	内:1.9/外:2.3	60	8.0	1.2	別売
シーベル 30	30	69	46	内:2.3/外:3.0	59	15.8	1.5	付属
シーベル 50	50	94	46	内:2.8/外:3.0	83	21.0	1.1	付属
シーベル100S	100	112*	61	内:2.8/外:3.0	83	68	0.6	固定式



外部から加圧することなく、 簡単なバルブ操作で液の取出しができます。

特徴

●液取出しは簡単なバルブ操作のみ

- ●液取出用フレキシブルホースが付属されています。
- ●ストッパー付きキャスターが本体に組み込まれており、安全・容易に移 動できます。
- ●SP-120型、SP-250型には、フロート液面計が付属されています。
- ●SP-120型、SP-250型は、液面計をはずし、仕切栓(仕切プラグ)に変 えて使用可能です。
- ●SP-50型には、オプションにてフロート液面計を取り付けられます。

※ストッパー付キャスター付属 ステンレス製の型番はSP-50S型、SP-120S型、SP-250S型になります。 標準付属品:液取出用フレキシブルホース、スパナ、取扱説明書



鉄製(左)、ステンレス製(右)

	SP-50型	SP-120型	SP-250型
内 容 積(L)	50	120	250
充 填 量(L)	42	100	210
標準使用圧力(MPa)	0.05	0.05	0.05
最高充填圧力(MPa)	0.3	0.3	0.3
外 径(mm)	455	505	656
高 さ(mm)	840	1.350	1.525
空 重 量(kg)	46	76	133
LN2充填時重量(kg)	80	157	303
I Nia苏登唱生 (L/day)	1.5	2.1	2.5
(%/day)	3.0	1.7	1.0
液供給量(L/min)	10	10	10
フレキシブルホース	1,200	1,200	1,200







〒350-0833 埼玉県川越市芳野台 2-8-52 Tel.049-225-7555 ホームページ http://www.jecctorisha.co.jp

最先端テクノロジーを支える!!



大陽日酸の極低温機器システム <u>ヘリウム液化装置</u>

Helium Liquefier

喜性能直信頡性を 1973日

Linde社製 高効率新型膨張タービンを搭載



大陽日酸

Professionals

_	
	コンパクト設計
I,	ダイナミックガスベアリング式膨張タービン採用
l	コンピュータ制御による全自動運転
I,	8,000時間以上の連続運転
I,	数多くの納入実績
l	万全のパンテナンス体制
l	消費電力が小さく、ランニングコストが低い
	圧縮機が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}	周波数 50Hz	32~63L/h (14~29L/h)	79~108L/h (34~50L/h)	153~233L/h (76~115L/h)		
()内はLN ₂ 予冷なし	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)	$\varphi \times H$	1,100×2,600	1,300×2,600	1,600×2,600		
消費電力(kW)	50Hz	42~76	89~114	141~210		
(液化用圧縮機)	60Hz	51~75	91~113	133~224		

※1:1.0MPaG以上も可能。※2:液化能力は純He使用時のものです。

※標準仕様以外にも、御要望により各種設計・製作致します。

■ 大陽日酸株式会社 ■ オンサイト・プラント事業本部 プラント事業部 SCE営業部 川崎市川崎区小島町6-2(京浜事業所) 〒210-0861 Tel:044-288-6937 Fax:03-6866-0111

写真 Model type L280

0 0 10

Hyper Tech

MgB2 超電導線・超伝導コイル

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



SUNPOWER



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





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	МТ	СТ	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 に木工芸株株式会社

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: 03-4218-4700FAX: 03-4212-3423TEL: 072-242-7611FAX: 072-242-7622

<u>ΜΔΥΕΚΔΨΛ</u>

マエカワの技術で社会を支える

1924年から冷凍機製造を通じて培ってきた冷却技術と圧縮技術。 この2つの技術を中心に 熱・エネルギー技術、食品技術、環境技術などを融合し 新しい製品やサービスで環境社会の実現に貢献しています。



Brayton NeO



極低温高効率冷凍機 一体型ターボ圧縮機・膨張機の 採用により高効率を図り、 極低温領域で高い省エネ運用を 実現します。

ー**1972** オイルインジェクション ヘリウム圧縮機を 世界に先駆けて開発

- 1974 ヘリウム圧縮機初号機を納入

Helium Compressors

ターボブレイトン冷凍機を 用いた高温超電導ケーブルの 実系統実証運転 2017

ターボブレイトン冷凍機 BraytonNeO販売開始 **2018-**

> 長寿命、長期安定運転、 柔軟かつ迅速なサービスを提供。 世界で270台以上の実績を持ちます。

紫菜前川製作所

本 社:〒135-8482 東京都江東区牡丹 3-14-15 Tel.03-3642-8181 (代) FAX.03-3643-7094 http://www.mayekawa.co.jp





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



www.ulvac-cryo.com



Linde tage A 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 Q/hの標準液化装置 膨張タービンとスクリューコンプレッサーの採用、精製器内蔵などに よる高効率、高信頼性のシステム

●標準および特殊仕様の冷凍装置



クライオサーム社製

液体ヘリウム容器

HELIOS 50A

- STRATOS 100SL-J
- ●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 **ハ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

CFM-iVTI無冷媒超伝導マグネットシステム



日本代理店 http://www.naccjp.com nacc-c@naccjp.com **日本代理店 http://www.naccjp.com 日本オートてディッグ・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



Bi-2223 WIRE (DI-BSCCO®)

SUMITOMO ELECTRIC

	Туре Н	Type G	Type HT-SS	Туре НТ-СА	Type HT-NX	
DI-BSCCO	High current density wire	Low thermal conductivity wire	High mechanical strength wire with different reinforcement material			
Typical Application		Current Lead	Magnet	Power cable	High field magnet	
Reinforcement tape Thickness	-	-	Stainless steel (0.02mm ^t)	Copper alloy (0.05mm ^t)	Nickel alloy (0.03mm ^t)	
Average Width	4.2+/- 0.2mm	4.2+/- 0.2mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.2mm	
Average Thickness	0.23+/- 0.01mm	0.23+/- 0.01mm	0.29+/- 0.02mm	0.35+/- 0.02mm	0.31+/- 0.03mm	
Tensile Strength * 77K, 95% Ic retention	130 MPa *	130 MPa *	270 MPa *	250 MPa *	400 MPa *	
Double Bending Diameter * RT, 95% I _c retention	80mm *	80mm *	60mm *	60mm *	40mm *	
Critical Current, I _c 77K, Self Field	170A, 180A, 190A, 200A					

2

-

Cross Section images of DI-BSCCO wires

* Typical value

States and states

DI-BSEED Type H, Type G

DI-BSEED Type HT-SS, HT-CA

DI-BSEED Type HT-NX

e-mail : superconductor@sumitomo.com https://sei.co.jp/super/index.ja.html

https://ssics.in/super/index.is.h

cross sectional images of DI-BSCCO Type H

cross sectional images of DI-BSCCO Type HT-SS

cross sectional images of DI-BSCCO Type HT-NX

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
後付)1色1P ¥65,000 1/2P ¥40,000
広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み
本式会社 明報社 T104-0061 東京都中央区敏座7-12-4 友野本住ビル TEL(03)3546-1337 FAX(03)3546-6306 医-mail:info@meihosha.co.jp HP: www.meihosha.co.jp

Fujikura 希土類系高温超電導線材

RE-based High-Temperature Superconductor

■ 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
- > 次世代超電導機器に適した超電導線材を量産
- 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





線材厚さ 0.11-0.13 mm

刑来	線材幅 線材厚さ		金属基板	安定化層	臨界電流 [A]		備去
生用	[mm]	[mm]	[µm]	[µm]	77K, S.F.	20K, 5T *3	₩₽∽
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	≥ 165	368	人工ピンなし
FYSC-SCH04(40)	4	0.17	75	40	≥ 165	368	人工ピンなし
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	≥ 550	-	人工ピンなし
FYSC-S12	12	0.08	75	—	≥ 550	—	銀保護層 ^{*1}
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	≥ 85	514	人エピン ^{*2}
FESC-SCH04(40)	4	0.15	50	40	≥ 85	514	人エピン *2
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	≥ 250	—	人エピン *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。

製品ラインアップ

*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 Ic@20K, 5Tは参考値であり、実際の性能を保証するものではありません。

株式会社フジクラ 新規事業推進センター 超電導事業推進室 〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440 TEL:043-484-3048 FAX:043-484-2472 E-mail:ask-sc@jp.fujikura.com



HELIALは進化しています。 忘れてませんか? AIR LIQUIDEを

フランスの物理学者ジョルジュ・クロードが液体空気の製造に成功し、彼と実業家ポール・ デロルムによりエア・リキードが設立されたのが1902年。5年後の1907年には早くも日 本での酸素製造事業がスタートして、さまざまな極低温の経験と最先端技術ノウハウを集結 して高品質と高効率の製品を生み出しています。



HELIAL	SL	ML	LL	XL
Capacity range with LN2	Capacity 20 L/h 100 L/h range to to vith LN2 85 L/h 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。



日本エア・リキード合同会社

グローバル・マーケット&テクノロジー部 〒661-8558 兵庫県尼崎市南塚口町4-3-23

TEL: 06-6429-2148 / FAX: 06-6421-6001

Web: https://www.airliquide.com/jp/japan Email: webmaster-aljp@airliquide.com https://advancedtech.airliquide.com/



超電導電力機器冷却用 ネオン冷凍機



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 産業ガス事業本部 マーケティング事業部 〒142-8558 東京都品川区小山1-3-26 東洋Bldg. TEL:03-5788-8610 URL http://www.tn-sanso.co.jp E-mail U04200@tn-sanso.co.jp