2022年12月7日発行
ISSN0919-5998



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.104 (2022)

第104回
2022年度秋季

低温工学・超電導学会

講演概要集

2022年
12月7，8，9 日

長良川国際会議場（岐阜）＋Web
〒502-0817 岐阜県岐阜市長良福光2695-2

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

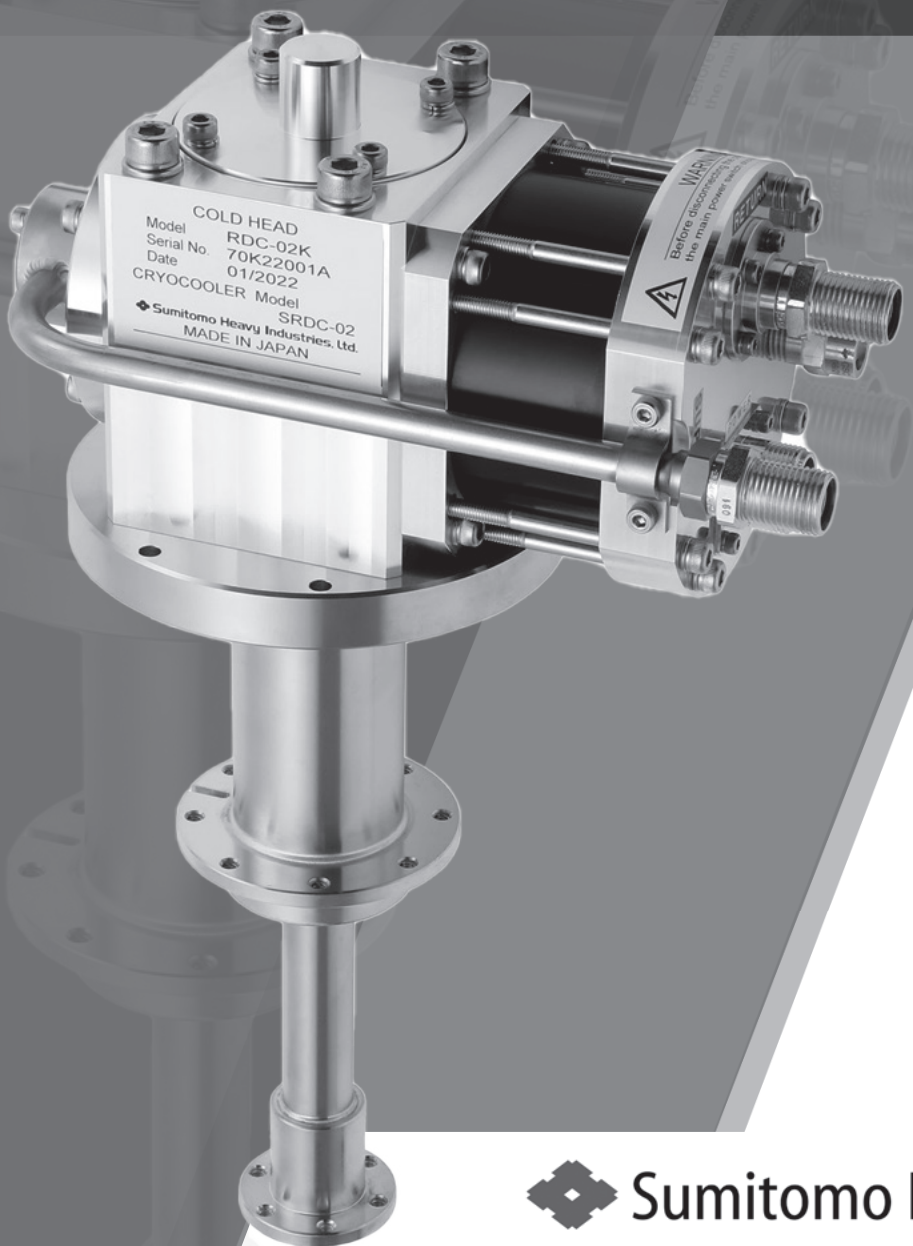
104回

THE WORLD'S SMALLEST

2 Kelvin GM CRYOCOOLER

RDC-02K | 0.02W @ 2.3K

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



Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

2022 年度秋季低温工学・超電導学会

2022 年 12 月 7 日（水）~ 12 月 9 日（金）

会　場： 長良川国際会議場 + WEB
所在地：〒 502-0817 岐阜県岐阜市長良福光 2695-2

参加費： 正会員 * 10,000 円，賛助会員等 ** 下記参照，学生 4,000 円，非会員（一般）20,000 円，
非会員（学生）5,000 円
（概要集のみ：正会員 5,000 円，賛助会員等 *** 下記参照，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
** 賛助会員は 11,000 円，賛助会員価格の適用は 1 口あたり年間 2 名まで
協賛等団体に属する個人参加者は 15,000 円。所属団体を証する会員証等の提示が必要
*** 賛助会員は 5,000 円，協賛団体は 7,000 円

懇親会： 12 月 8 日（木）18:30 - 20:30
岐阜キャッスルイン 2 階 末広の間

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

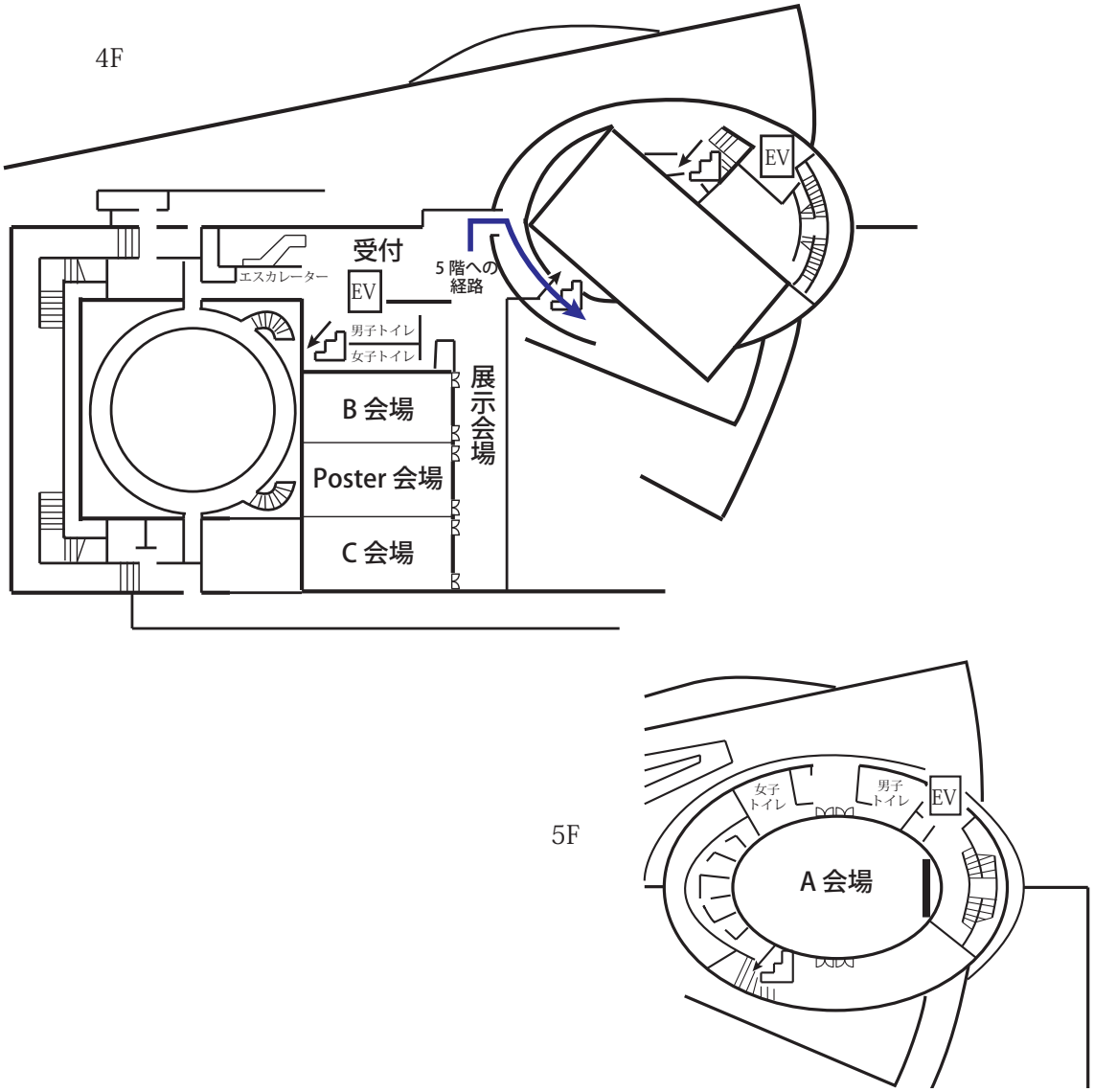
後　援： 岐阜観光コンベンション協会

交通案内： JR 岐阜駅からバスで 20 分 + 徒歩
岐阜バス「市内ループ線」で長良川国際会議場北口下車（徒歩 2 分）
「三田洞線 K50・K55」で長良川国際会議場前下車（徒歩 2 分）
このほか，岐阜駅からのバスが頻繁に通る鵜飼屋バス停から徒歩 5 分





会場配置図：長良川国際会議場



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/2022a/

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

※ 口頭発表は，すべて WEB 会場にて視聴できます。

ポスター講演：ポスター発表質疑応答は現地のみで行われます。WEB 会場には資料のみ掲載されます。講演 1 件につき，幅 90 cm，高さ 180 cm のパネルが用意されます。ポスターは，同一セッション内の他の発表者も見られるよう手短紹介が始まる 30 分前には指定の場所に掲示し，終了後は直ちに撤去してください。パネルには講演番号しか掲示されていませんので，ポスター内に講演題目と発表者名を明記してください。詳細は上記ホームページのポスター発表要領をご覧ください。ポスター発表者は，発表当日 (12 月 7 日，8 日) の「ポスター手短紹介」にて 1 件 1 分以内で概要を話していただきます。書画カメラが用意されますので，紙の資料をご用意ください。詳細は上記ホームページのポスター手短紹介のページをご覧ください。

お知らせ：展示案内より先にポスター手短紹介を行います。開始時間にご注意ください。

今回も学会併設展示会を開催いたします。

2022 年度秋季低温工学・超電導学会　セッションテーブル

	A 会場	B 会場	C 会場
12 月 7 日（水）	受付 10:00 ～		
	10:45 - 12:00 HTS コイル・解析 (1) p. 1	10:45 - 12:00 臨界電流測定 p. 15	10:30 - 12:00 水素液化 p. 29
	昼食		
	ポスター手短紹介 / 展示案内　13:15 - 14:15　（A 会場）		
	ポスターセッション I　14:15 - 15:30　（Poster 会場） 計測・基礎 p. 43，磁気冷凍 p. 48，Nb_3Al 導体 p. 50，HTS 電流特性 p. 51，MgB_2 (1) p. 56，回転機 (1) p. 59		
	15:45 - 16:45 回転機 (2) p. 6	15:45 - 16:45 HTS 線材作製 p. 20	15:45 - 16:45 小型冷凍機 p. 35
	17:00 - 18:15 超電導応用 (1) p. 10	17:00 - 18:15 HTS 線材細線化 p. 24	17:00 - 18:00 冷却技術 p. 39
12 月 8 日（木）	9:45 - 11:00 安定性・保護 p. 64	9:45 - 11:00 MgB_2 (2) p. 75	10:00 - 11:00 低温物性 p. 87
	特別セッション　11:15 - 12:00（A 会場） 「ザ・メーカー」（企画委員会） 吉原 健彦（住友電気工業 パワーシステム研究開発センター） 木村　豊（アルバック・クライオ） 今村 寿郎（日立製作所 ヘルスケアイノベーション事業部）		
	昼食	賛助会員と学生の交流会	昼食
	ポスター手短紹介　13:15 - 13:40（A 会場）		
	ポスターセッション II　13:45 - 15:00　（Poster 会場） HTS 作製・評価 p. 98，医療用加速器・核融合 (1) p. 103，超電導応用 (2) p. 106，HTS コイル・解析 (2) p. 113		
	15:15 - 16:00 核融合 (2) p. 69	15:15 - 16:00 超電導接合 p. 80	15:15 - 16:00 低温安全 p. 91
	16:15 - 17:00 NMR・MRI・医療応用 p. 72	16:15 - 17:15 HTS 高性能化 p. 83	16:15 - 17:15 Nb_3Sn 材料・線材 p. 94
	懇親会（岐阜キャッスルイン 2 階 末広の間）　18:30 - 20:30		
12 月 9 日（金）	10:15 - 11:00 送電ケーブル p. 120	10:15 - 12:00 デバイス応用 p. 132	10:00 - 10:45 磁気分離 p. 147
	11:15 - 12:00 電力応用 p. 123		11:00 - 12:00 バルク着磁 p. 150
	昼食		
	13:15 - 14:45 SCSC ケーブル p. 126	13:15 - 14:15 磁場中臨界電流 p. 139	13:15 - 14:30 薄膜・バルク作製 p. 154
		14:30 - 15:30 HTS 機械特性 p. 143	

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

※ 各会場とも換気のため常時窓・扉を開放しています。

2022 年度秋季低温工学・超電導学会 研究発表会 運営委員会

研究発表会実行委員会

委員長	三戸 利行	核融合科学研究所
委員	柳　長門	核融合科学研究所
	平野 直樹	核融合科学研究所
	小野寺 優太	核融合科学研究所
	髙田　卓	核融合科学研究所

プログラム編成委員会（企画委員会）

委員長	伴野 信哉	学会運営担当 / 物質・材料研究機構
副委員長	井上 昌陸	プログラム編成担当 / 福岡工業大学
委員	岩井 貞憲	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	岡村 崇弘	高エネルギー加速器研究機構
	川越 明史	鹿児島大学
	下山 淳一	青山学院大学
	高田　卓	核融合科学研究所
	田中 秀樹	株式会社 日立製作所
	宮城 大輔	千葉大学
	村上 陽之	量子科学技術研究開発機構
	山梨 裕希	横浜国立大学
	横山 和哉	足利大学

オブザーバー（前委員長）

古瀬 充穂	産業技術総合研究所

12 月 7 日（水）

受付開始　10:00 ～

※ 一般講演の発表時間はすべて 10 分，質疑応答 5 分です。

プログラム番号の例

1A-a05：1 日目 A 会場の午前 5 番目

1B-p05：1 日目 B 会場の午後 5 番目

※ タイトル，著者，所属は講演申し込み時のものです。

12 月 7 日（水） A 会場　10:45 - 18:15

HTS コイル・解析 (1)　10:45 - 12:00　座長： 東川 甲平

1A-a01　液体水素冷却核融合マグネットの概念検討 ---- 1
今川 信作（NIFS），白井 康之（京大），岩本 晃史（NIFS），濱口 真司（NIFS）

1A-a02　無絶縁コイルの導体並列数が中心磁場の時間変動に及ぼす影響 ---- 2
大池 章太，仲田 悠馬，小林 宏泰，早乙女 英夫，宮城 大輔（千葉大）；長﨑 陽，津田 理（東北大）

1A-a03　遮蔽電流が鉄支配型高温超伝導マグネットの発生磁界に与える影響の解析的評価 ---- 3
李 陽，曽我部 友輔，雨宮 尚之（京大）

1A-a04　銅複合多芯薄膜線材における動的抵抗の数値解析と実験の比較 ---- 4
曽我部 友輔，雨宮 尚之（京大）

1A-a05　高温超電導コイル磁石の残留磁化 ---- 5
脇 耕一郎，笹川 卓（鉄道総研）

昼食　12:00 - 13:15

ポスター手短紹介 / 展示案内　13:15 - 14:15　（A 会場）

回転機 (2)　15:45 - 16:45　座長： 宮崎 寛史

1A-p01　MgB_2 巻線を用いた液体水素冷却の超高速回転超電導モータの検討 ---- 6
寺尾 悠，淵野 修一郎（東大）；松本 明善（NIMS）；馬渡 康徳，吉田 良行（産総研）；
菅野 未知央（KEK）；淡路 智（東北大）；田中 秀樹（日立）

1A-p02　液体水素冷却高温超電導発電機の開発 (1) コイル開発 ---- 7
大屋 正義（関西学院大）；殿岡 俊，三浦 英明（三菱電機）；寺尾 悠（東大）；白井 康之（京大）；
小林 弘明，田口 秀之，岡井 敬一（JAXA）

1A-p03　液体水素冷却高温超電導発電機の開発 (2) 超電導発電機の電磁設計 ---- 8
寺尾 悠（東大）；大屋 正義（関西学院大）；白井 康之（京大）；殿岡 俊，三浦 英明（三菱電機）：
小林 弘明，田口 秀之，岡井 敬一（JAXA）

1A-p04　水素 / ネオン冷却回転機のセルフポンピングに関する検討 ---- 9
星野 勉（明星大）

休憩　16:45 - 17:00

超電導応用 (1)　17:00 - 18:15　座長： 平野 直樹

1A-p05　超伝導バルクを用いた高 Q 値コイルの開発と無線電力伝送の高効率化 ---- 10
押本 夏佳，作間 啓太，關谷 尚人（山梨大）

1A-p06　高周波用超伝導線材を用いた高 Q 値ソレノイダルコイルの開発 ---- 11
内田 考紀，作間 啓太（山梨大）；三浦 正志（成蹊大）；小川 純（新潟大）；關谷 尚人（山梨大）

1A-p07　浮上力に対する低速回転超電導磁気軸受の回転損失特性の数値解析 ---- 12
奥村 皐月，寺尾 悠，大崎 博之（東大）；桜井 雄基（岡山大）；松村 知岳，片山 伸彦（東大）

1A-p08　SMB 用高温超電導バルク / コイルの運用温度に関する実験検討 ---- 13
宮崎 佳樹，山下 知久，坂本 泰明，富田 優（鉄道総研）

1A-p09　吸引型磁気浮上システムにおける HTS バルク形状の検討 ---------- 14
中村 幸太，園田 翔梧，高尾 智明，中村 一也（上智大）；塚本 修巳（横浜国大）

12 月 7 日（水） B 会場　10:45 - 18:15

臨界電流測定　10:45 - 12:00　座長： 小田部 荘司

1B-a01　ホール素子を用いた超電導ケーブルコア周囲の磁場分布測定 その２ ---------- 15
大倉 大佑，筑本 知子，山口 作太郎（中部大）
1B-a02　ホール素子磁気顕微法に基づいた広い電界領域 10-5 ~ 10-11 V/m に亘る電界電流特性計測---------- 16
呉 澤宇，岸川 創紀，東川 甲平，木須 隆暢（九大）
1B-a03　機械学習を用いた磁気顕微鏡観察による長尺 REBCO 線材内の局所 I_c 不均一性の検出：
画像分類と物体検出の比較---------- 17
木須 隆暢，SOMJAIJAROEN Natthawirot，今村 和孝，寺崎 拓也，呉 澤宇，東川 甲平（九大）
1B-a04　パルス電源の回路シミュレーションを用いた回路のパラメータの最適化 ---------- 18
坂井 厳（名大）；土屋 雄司（東北大）；小濱 芳允（東大）；吉田 隆（名大）
1B-a05　パルス磁場およびパルス電流を用いた REBCO 線材の液体窒素温度における磁場中臨界電流評価---------- 19
土屋 雄司（東北大）；小濱 芳允，神田 朋希（東大）；水野 謙一郎（MTL）；坂井 厳，吉田 隆（名大）；
岡田 達典，淡路 智（東北大）

昼食　12:00 - 13:15

HTS 線材作製　15:45 - 16:45　座長： 井上 昌睦

1B-p01　Reel-to-Reel 式本焼成炉による TFA-MOD YGdBCO+BZO 線材の作製 ---------- 20
佐藤 迪夫，高橋 保夫，青木 裕治，足立 和久（昭和電線）；中岡 晃一，和泉 輝郎（産総研）
1B-p02　RtR システムを用いた Vapor-Liquid-Solid -$YBa_2Cu_3O_y$ 厚膜線材の作製プロセス ---------- 21
美和 虎之介，吉田 隆（名大）
1B-p03　フッ素フリー MOD 法を用いた人工ピン導入 REBCO 線材の磁場中特性 ---------- 22
吉原 健彦，稲垣 充，本田 元気，永石 竜起，小林 慎一（住友電工）；蟹江 澄志，岡田 達典，
淡路 智（東北大）
1B-p04　PLD 及び TFA-MOD 法で作製した $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 線材の超伝導特性---------- 23
齋藤 寛晃，原 由子，鈴木 匠（成蹊大）；衣斐 顕，和泉 輝郎（産総研）；三浦 正志（成蹊大）

休憩　16:45 - 17:00

HTS 線材細線化　17:00 - 18:15　座長：藤田 真司

1B-p05　引きさき法による REBCO スプリット線材の作製と臨界電流特性 ---------- 24
吉川 翔馬，岩知道 大樹，間所 風地，伊賀 介星，草野 海成，福岡 美穂，金沢 新哲（室蘭工大）
1B-p06　複数回の引きさき加工により作製した REBCO スプリット線材の臨界電流特性---------- 25
岩知道 大樹，吉川 翔馬，間所 風地，伊賀 介星，草野 海成，福岡 美穂，金沢 新哲（室蘭工大）
1B-p07　人工ピンなしの REBCO 線材により作製したスプリット線材の評価 ---------- 26
草野 海成，吉川 翔馬，間所 風地，伊賀 介星，岩知道 大樹，福岡 美穂，金沢 新哲（室蘭工大）
1B-p08　引きさき法を用いて作製した REBCO スプリット線の臨界電流と磁化の測定評価---------- 27
福岡 美穂，岩知道 大樹，間所 風地，伊賀 介星，草野 海成，吉川 翔馬，金沢 新哲（室蘭工大）
1B-p09　アブレーション効果を用いた REBCO 線材のレーザースクライビング加工技術---------- 28
町 敬人，和泉 輝郎（産総研）

12 月 7 日（水） C 会場　10:30 - 18:00

水素液化　10:30 - 12:00　座長： 岡村 哲至

1C-a01　JST 未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」の概要 ---------- 29
沼澤 健則，神谷 宏治，齋藤 明子，西島 元，北澤 英明，間宮 広明，櫻井 裕也，武田 良彦（NIMS）；
松本 宏一（金沢大）；増山 新二（大島商船高専）；竹屋 浩幸，清水 禎，西宮 伸幸（NIMS）
1C-a02　能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMRR) による水素液化---------- 30
神谷 宏治，沼澤 健則（NIMS）；松本 宏一（金沢大）；齋藤 明子，竹屋 浩幸，夏目 恭平，白井 毅，
内田 公（NIMS）
1C-a03　回転型水素液化磁気冷凍機---------- 31
平野 優友，松永 啓吾，水口 皓平，堀江 征生，五十嵐 柚依，松本 宏一（金沢大）；神谷 宏治，
内田 公，沼澤 健則（NIMS）
1C-a04　水素液化用磁気冷凍システム向け Bi2223 超伝導マグネットの開発---------- 32
西島 元，神谷 宏治，沼澤 健則（NIMS）
1C-a05　水素液化のための AMRR 用材料開発（JST-Mirai）
― ヒステリシスの小さな巨大磁気熱量効果材料 ― ---------- 33
SEPEHRI-AMIN Hossein，TANG Xin，LAI Jiawei，齋藤 明子，大久保 忠勝，宝野 和博（NIMS）
1C-a06　水素液化のための AMRR 用磁気冷媒開発 (JST-Mirai)
― 球状磁気冷凍材料の作製技術とその特性― ---------- 34
山本 貴史，竹屋 浩幸，齋藤 明子，高野 義彦，沼澤 健則（NIMS）

昼食　12:00 - 13:15

小型冷凍機　15:45 - 16:45　座長： 高田 卓

1C-p01　大容量 4KGM-JT 冷凍機の開発 ---------- 35
島田 卓弥，笹崎 修司（住重）
1C-p02　蓄冷式冷凍機の 20 K 以下における冷凍能力向上（その 1 ）---------- 36
安田 仰，大塚 清見，金尾 憲一，恒松 正二，平塚 善勝（住重）
1C-p03　スターリング型パルス管冷凍機の性能予測手法の開発（その 1）---------- 37
平塚 善勝，大塚 清見，恒松 正二，金尾 憲一（住重）；楢崎 勝弘（新居浜高専）
1C-p04　アンカラ大学で実施されたパルス管冷凍機製作スクール ---------- 38
増山 新二（大島商船高専）；上岡 泰晴（コールドテック）：GENCER Ali（Ankara 大）

休憩　16:45 - 17:00

冷却技術　17:00 - 18:00　座長：槙田 康博

1C-p05　PTFE 多孔質膜を用いた極低温機器の予冷時間短縮～液体窒素による急冷実験---------- 39
高畑 一也（NIFS）
1C-p06　小型超電導機器の並列ガス循環冷却技術の開発 ---------- 40
高木 紀和，高橋 政彦，上野 航生，栗山 透，福島 武人，上田 紘司，金谷 和長
（東芝エネルギーシステムズ）
1C-p07　液体水素浸漬冷却 MgB_2 線材への過電流通電による熱暴走測定---------- 41
田中 秀樹，児玉 一宗，鈴木 孝明（日立）；白井 康之，塩津 正博，川崎 理香子，松本 郁哉，
大矢 輝（京大）
1C-p08　多層断熱材の巻き方による熱侵入量への影響---------- 42
渡邉 裕文，塩見 天哉，神田 昌枝，山口 作太郎（中部大）

ポスター手短紹介 / 展示案内　13:15 - 14:15　（A 会場）

12 月 7 日（水）　ポスターセッション I　Poster 会場　14:15 - 15:30

計測・基礎　14:15 - 15:30　座長：岩本 晃史

1P-p01　ねじりテープを挿入した円筒発熱体の液体水素熱伝達特性 ---- 43
大矢 輝，白井 康之，塩津 正博，海野 峻太郎（京大）

1P-p02　冷凍機冷却引張り通電試験機の開発 ---- 44
小黒 英俊，山田 純弘（東海大）

1P-p03　バルク金属ガラスの熱収縮率測定 ---- 45
平山 貴士，森江 孝明，上村 宗二郎（住重）

1P-p04　完全非接触型 液体水素用液面計の開発 ---- 46
及川 敏之，二村 宗男，三浦 茂男，岡本 洋（秋田県立大）

1P-p05　磁気冷凍技術併用冷媒循環による超電導コイル冷却に関する研究 ---- 47
高澤 拓海，岡村 哲至，逢坂 昇汰（東工大）；平野 直樹（NIFS）

磁気冷凍　14:15 - 15:30　座長： 夏目 恭平

1P-p06　静止型磁気冷凍システムに関する研究 ― コンセプトの検証 ― ---- 48
平野 直樹，小野寺 優太，三戸 利行（NIFS）；川越 明史（鹿児島大）；岡村 哲至（東工大）

1P-p07　La 系化合物階層充填磁気冷凍機の冷凍性能 ---- 49
小松 航，安部 勇汰，濵岡 遼真，岡村 哲至（東工大）

Nb_3Al 導体　14:15 - 15:30　座長： 宮城 大輔

1P-p08　Nb_3Al 超細線ストランド超伝導ケーブル開発 ― 直線形状ケーブルの臨界電流値温度依存性測定 ― ---- 50
大内 徳人，有本 靖，王 旭東，宗 占國，青木 和之，土屋 清澄（KEK）；菊池 章弘（NIMS）；
山本 優，河野 雅俊（明興双葉）

HTS 電流特性　14:15 - 15:30　座長：馬渡 康徳

1P-p09　超電導複合導体の電流導入部近傍の電流分布解析 ---- 51
高橋 正希，田中 祥貴（福岡工大）；岩熊 成卓（九大）；井上 昌睦（福岡工大）

1P-p10　幅の異なる REBCO 線材における臨界電流のねじり特性 ---- 52
田中 祥貴，久我 響暉，古賀 大揮，塚原 柊弥（福岡工大）；山田 穣（中部大）；井上 昌睦（福岡工大）

1P-p11　超伝導線材 REBCO のエッジワイズ曲げによる臨界電流測定 ---- 53
山根 昇悟（大同大）；長村 光造（応用科学研）；町屋 修太郎（大同大）

1P-p12　超電導ケーブル用の低融点金属を用いた接合技術 ---- 54
山本 春海，恩地 太紀，赤坂 友幸，福本 祐介，富田 優（鉄道総研）

1P-p13　REBCO 超伝導ダイオードを用いたマイクロ波信号の整流特性 ---- 55
土屋 雄司（東北大）；水野 彰人（名大）；鶴田 彰宏（産総研）；尾崎 壽紀（関西学院大）；
吉田 隆（名大）

MgB_2(1)　14:15 - 15:30　座長：児玉 一宗

1P-p14　kA 級大容量 MgB_2 ラザフォード導体の電流再配分と安定性 ---- 56
谷貝 剛，猪俣 涼，中川 優，星野 壮太（上智大）；恩地 太紀（鉄道総研）；平野 直樹（NIFS）；
槇田 康博，新冨 孝和（KEK）；駒込 敏弘（前川）；濱島 高太郎（東北大）

1P-p15　MgB_2 ラザフォード導体を用いた電磁力平衡ヘリカルコイルの素線曲げひずみ解析 ---- 57
許 航，野村 新一（明治大）；谷貝 剛（上智大）；新冨 孝和（KEK）；平野 直樹（NIFS）；
仁田 旦三（東大）

1P-p16　X 線 CT による MgB_2 多芯線材のフィラメント構造解析 ---- 58

尾崎 優一，井上 昌睦（福岡工大）

回転機 (1)　14:15 - 15:30　座長：中村 武恒

1P-p17　トロイダル型高温超電導アキシャルギャップ誘導モータの特性評価 ---- 59
GOMBOJAV Nandintsetseg，渡邊 浩行（神戸製鋼）；松本 拓也（JASTEC）
1P-p18　高温超電導ダイナモ特性へのテープ線材構造の影響の 2 次元数値解析 ---- 60
張 志宇，寺尾 悠，大崎 博之（東大）
1P-p19　全超電導モータの固定子一回転子間ギャップ中の希薄ガスの伝熱・流体連成解析による
回転子冷却特性の検討 ---- 61
赤坂 和紀，寺尾 悠，大崎 博之（東大）；岡井 敬一，田口 秀之（JAXA）
1P-p20　転位並列導体で構成した全超伝導回転機の電機子コイル向け REBCO レーストラック型
ダブルパンケーキコイルにおける均流化コンセプトの実験的評価 ---- 62
公文 麻人，増田 陽平，三浦 峻，宮崎寛史，吉田 幸市，佐藤 誠樹，佐々 滉太，岩熊 成卓（九大）
1P-p21　REBCO 超伝導線材による台形コイルを組み合わせた超伝導誘導モータの電磁解析 ---- 63
山崎 亮斗，岡出 祐汰，宮﨑 寛史，吉田 幸市，佐々 滉太，三浦 峻，岩熊 成卓（九大）

12 月 8 日（木）　A 会場　9:45 - 17:00

安定性・保護　9:45 - 11:00　座長：西島 元

2A-a01　伝導冷却 All-HTS 900 MHz NMR 磁石に向けた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの
設計検討 ---- 64
末富 佑（理研）；田中 湧也，高尾 智明（上智大）；柳澤 吉紀（理研）
2A-a02　導電性エポキシを用いた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイル接触抵抗率制御技術の構築 ---- 65
田中 湧也（上智大）；末富 佑（理研）；有園 若葉，高尾 智明（上智大）；柳澤 吉紀（理研）
2A-a03　外挿コイルのクエンチ発生時における内挿無絶縁コイルの熱的挙動の検討 ---- 66
仲田 悠馬，小林 宏泰，早乙女 英夫，宮城 大輔（千葉大）；長崎 陽，津田 理（東北大）
2A-a04　NbTi 超電導線における縦磁場効果の磁場角度依存性測定 ---- 67
横山 彰一，小湊 健太郎，石田 清，村上 幸伸（JASTEC）；川嶋 慎也（神戸製鋼）
2A-a05　銅線が NbTi/Cu 線の冷却安定性に及ぼす影響の研究 ---- 68
島本 知輝（総研大）；今川 信作，高田 卓（NIFS）

休憩　11:00 - 11:15

特別セッション　11:15 - 12:00　（A 会場）

「ザ・メーカー」（企画委員会）
吉原 健彦（住友電気工業 パワーシステム研究開発センター）
木村 豊（アルバック・クライオ）
今村 寿郎（日立製作所 ヘルスケアイノベーション事業部）

昼食　12:00 - 13:15

核融合 (2)　15:15 - 16:00　座長：王 旭東

2A-p01　JT-60SA CS モジュール冷却試験におけるコイル内最大温度差の推定 ---- 69
園田 翔梧，中村 一也，結縄 ことみ，小林 倫香（上智大）；福井 良磨，村上 陽之，
濱田 一弥（量研機構）
2A-p02　次世代核融合マグネットへの適用をめざした 20 kA 級高温超伝導 STARS 導体開発の進捗 ---- 70
柳 長門，成嶋 吉朗，小野寺 優太（NIFS）；伊藤 悟（東北大）；濱口 真司，力石 浩孝，高田 卓（NIFS）；

GARFIAS-DAVALOS Diego（総研大），平野 直樹，高畑 一也（NIFS）
2A-p03　ヘリカル型核融合炉における磁場配位最適化コイルの電磁力と応力挙動 ---------- 71
田村 仁，山口 裕之，後藤 拓也，柳 長門，佐竹 真介，市口 勝治（NIFS）

休憩　16:00 - 16:15

NMR・MRI・医療応用　16:15 - 17:00　座長： 横山 彰一

2A-p04　超良好一様磁場に受動シミング調整された MRI 磁石磁場の長時間安定性と磁場変動原因 ---------- 72
阿部 充志，佐々木 憲一，萩津 透，齊藤 直人，三部 勉，下村 浩一郎（KEK）；杉田 萌（原子力機構）；
飯沼 裕美（茨城大）；多田 紘規（名大）；小山 駿，田中 陶冶（東大）
2A-p05　消磁コイルの配置が遮蔽電流磁界消磁法に与える影響の実験的評価---------- 73
白石 和輝，柁川 一弘（山理大）
2A-p06　HTS バルク体を用いた磁気誘導型ドラッグデリバリーシステムに適した磁場分布の形成方法---------- 74
野島 渉平，長崎 陽，津田 理（東北大）

12 月 8 日（木）　B 会場　9:45 - 17:15

MgB_2 (2)　9:45 - 11:00　座長： 木内 勝

2B-a01　変動磁場用 MgB_2 線材の基礎検討 (2) ― 無添加 MgB2 の臨界電流密度― ---------- 75
田中 秀樹，児玉 一宗，鈴木 孝明，小瀧 博司（日立）；松本 明善，西島 元（NIMS）
2B-a02　超極細 MgB_2 超伝導線材及びケーブルの開発---------- 76
菊池 章弘，飯嶋 安男，熊倉 浩明（NIMS）；山本 優，河野 雅俊，大坪 正人（明興双葉）
2B-a03　超極細 MgB_2 超伝導線材を用いて作製した 49 本撚線の超伝導特性 ---------- 77
熊倉 浩明，飯嶋 安男（NIMS）；山本 優，河野 雅俊（明興双葉）；菊池 章弘（NIMS）
2B-a04　異種超伝導ハイブリッド MgB2 線材の開発 ---------- 78
大橋 克也，松岡 杏祐，小黒 英俊（東海大）；淡路 智（東北大）
2B-a05　B 過剰 MgB2 を原料とした MgB_2 多結晶体の合成 ---------- 79
関口 直希，岩﨑 響，元木 貴則，下山 淳一（青学大）

昼食　12:00 - 13:15

超電導接合　15:15 - 16:00　座長： 筑本 知子

2B-p01　高強度 Bi2223 線材間超伝導接合における I_c と微細組織の関係---------- 80
中井 優亨，稲葉 勇人，山口 章，元木 貴則，下山 淳一（青学大）；武田 泰明，小林 賢介，内田 公，
北口 仁（NIMS）；中島 隆芳，山出 哲（住友電工）
2B-p02　高強度 Bi2223 線材間超伝導接合の熱処理過程の最適化---------- 81
稲葉 勇人，中井 優亨，山口 章，元木 貴則，下山 淳一（青学大）；武田 泰明（NIMS）；中島 隆芳，
山出 哲（住友電工）
2B-p03　冷凍機による Bi2223 線材間の接合の臨界電流と臨界温度の測定---------- 82
金沢 新哲，関根 ちひろ（室蘭工大）

休憩　16:00 - 16:15

HTS 高性能化　16:15 - 17:15　座長：吉田 隆

2B-p04　キャリア・ピン制御による RE123 超伝導線材の高臨界電流密度化---------- 83
三浦 正志（成蹊大）；黒川 穂高（横浜国大）；關谷 尚人（山梨大）；加藤 康之，鍋島 冬樹，
前田 京剛（東大）；岡田 達典，淡路 智（東北大）；CIVALE Leonardo，MAIOROV Boris（ロスアラモス国立研）

2B-p05　O2+ イオン照射した RTR-PLD 法 (Eu,Er)$Ba_2Cu_3O_y$+$BaHfO_3$ 線材の磁場中臨界電流密度特性---------- 84
鈴木 匠，大木元 勇貴（成蹊大）；尾崎 壽紀（関西学院大）；衣斐 顕，和泉 輝郎（産総研）：
岡田 達典，淡路 智（東北大）；三浦 正志（成蹊大）
2B-p06　フッ素フリー MOD 法 Y123 薄膜への様々なタイプのピンニングセンター導入 ---------- 85
小澤 美弥子，元木 貴則，大崎 瑛介，坂井 秀成，堀口 佳吾，下山 淳一（青学大）
2B-p07　CuO 二重鎖面を持つ RE 系超伝導体の材料ポテンシャル---------- 86
下山 淳一，松下 哲哉，新津 遥都，齋藤 晶文，元木 貴則（青学大）

12 月 8 日（木） C 会場　10:00 - 17:15

低温物性　10:00 - 11:00　座長：濱口 真司

2C-a01　デジタル画像相関法を用いた実用超電導線材のひずみ測定---------- 87
町屋 修太郎（大同大）；長村 光造（応用科学研）；山根 昇悟，梶田 慎也（大同大）
2C-a02　液体水素用流量計開発のための低温下における GFRP 管の力学的特性研究 ---------- 88
佐藤 更，杉原 弥悠加，武田 実，前川 一真（神戸大）
2C-a03　ジョセフソン電流の追跡による超伝導体内への低温水素吸蔵現象の観測 ---------- 89
宮川 一慶，太 子周，高田 弘樹，河江 達也（九大）
2C-a04　700 mK 以下における超流動ヘリウム 4 と銀微粒子焼結体との熱抵抗---------- 90
中川 久司（産総研）

昼食　12:00 - 13:15

低温安全　15:15 - 16:00　座長：沼澤 健則

2C-p01　低温流体安全マニュアル「極低温流体の取り扱いに関する安全性」の和訳完成とホームページ公開 --------- 91
伊藤 聡（JASTEC）；神谷 祥二（川崎重工）；白井 康之（京大）；槙田 康博（KEK）；宮井 玲，
弘川 昌樹（大陽日酸）；林 和彦（Kyoto Future Medical Instruments）；新郷 正志（川崎重工）：
中内 正彦（鉄道総研（当時））；池内 正充（前川）
2C-p02　環境・安全委員会での安全テキストの作成について---------- 92
伊藤 聡（JASTEC）；神谷 祥二（川崎重工）；白井 康之（京大）；槙田 康博（KEK）；
宮井 玲（大陽日酸）；増田 孝人（住友電工）；鷺山 玲子（東大）；辻上 博司（岩谷産業）；
林 和彦（Kyoto Future Medical Instruments）；池内 正充（前川）
2C-p03　超電導・低温機器の安全と信頼性のアンケート実施について---------- 93
伊藤 聡（JASTEC）；神谷 祥二（川崎重工）；白井 康之（京大）；槙田 康博（KEK）；
宮井 玲（大陽日酸）；増田 孝人（住友電工）；鷺山 玲子（東大）；池内 正充（前川）；
淵野 修一郎（東大）；木下 康秀（鈴木商館）；野口 隆志（池上技術）；武田 実（神戸大）；
平野 直樹（NIFS）；平井 寛一（大陽日酸）；平塚 善勝（住重）；吉田 茂（元九大）；
竹下 直（産総研）：三戸 利行（NIFS）：大橋 義正（アイシン精機）

休憩　16:00 - 16:15

Nb_3Sn 材料・線材　16:15 - 17:15　座長：菱沼 良光

2C-p04　高い一軸圧力下で放電プラズマ焼結した Nb_3Sn 超伝導バルク体の緻密化と磁束ピン止め特性 II：
結晶粒微細化効果---------- 94
小山田 拓真，内藤 智之（岩手大）
2C-p05　Nb_3Sn 超伝導バルク体の磁気的不安定性に対する 高比熱材料の添加効果---------- 95
小山田 拓真，天瀬 洸太，内藤 智之（岩手大）；菊池 章弘（NIMS）
2C-p06　超極細ストランドで撚線した Nb_3Sn ケーブルの臨界電流測定と臨界温度測定 ---------- 96

王 旭東，土屋 清澄，寺島 昭男（KEK）；菊池 章弘，飯嶋 安男（NIMS）
2C-p07　JA DEMO 候補の高強度 Nb_3Sn 線材の曲げ特性測定と組織解析---- 97
伴野 信哉（NIMS）；谷貝 剛（上智大）；川嶋 慎也（神戸製鋼）；杉本 昌弘（古河電工）；
淡路 智（東北大）；宇藤 裕康，坂本 宜照（量研機構）

ポスター手短紹介　13:15 - 13:40　（A 会場）

12 月 8 日（木）　ポスターセッション II　Poster 会場　13:45 - 15:00

HTS 作製・評価　13:45 - 15:00　座長：土屋 雄司

2P-p01　金属基板上に成膜された $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 高温超伝導薄膜における格子定数の評価---- 98
赤塚 創多（玉川大学）
2P-p02　極細多芯化を目指した REBCO 薄膜線材の開発 － 2---- 99
松本 明善，立木 実，大井 修一（NIMS）；寺西 亮（九大）；土井 俊也（京大）；井上 昌睦（福岡工大）；
大保 雅載，飯島 康裕（フジクラ）
2P-p03　Zr をパターニングした基板上に形成した REBCO 薄膜の臨界電流特性 ---- 100
酒井 秀哉（福岡工大）；松本 明善（NIMS）；井上 昌睦（福岡工大）
2P-p04　浸漬法による溶融水酸化物法 RE_Ba_Cu_O 膜の膜厚制御---- 101
舩木 修平，河田 浩一郎，豊嶋 健瑠，山田 容士（島根大）
2P-p05　BSCCO 超伝導線材の断面組織観察---- 102
梶田 慎也，町屋 修太郎（大同大）；長村 光造（応用科学研）

医療用加速器・核融合 (1)　13:45 - 15:00　座長：寺尾 悠

2P-p06　スケルトンサイクロトロンを想定した無絶縁 REBCO マルチコイルの熱的安定性---- 103
中村 太郎，長渕 大河，結城 拓真，濱田 一希，石山 敦士（早大）；野口 聡（北大）；植田 浩史（岡山大）
2P-p07　「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発：
小型実証 REBCO コイルシステムの製作 ---- 104
熊谷 塁，糸日谷 浩平，小久保 早希，石山 敦士（早大）；植田 浩史（岡山大）；野口 聡（北大）；
福田 光宏（阪大）
2P-p08　機械学習による大型超伝導マグネットシステムの状態予測モデル開発---- 105
尾花 哲浩（NIFS）

超電導応用 (2)　13:45 - 15:00　座長：三浦 峻

2P-p09　次世代超電導マグネット機器向け REBCO 集合導体の開発 ---- 106
生田 勝利，中西 啓太，西山 諒，大屋 正義（関西学院大）
2P-p10　ミッションプロファイルに基づく航空機用高温超電導ケーブルの交流損失解析---- 107
呂 高泰，寺尾 悠，大崎 博之（東大）
2P-p11　アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発 (5) － まとめ---- 108
伊東 徹也，河島 裕，緒方 康博，正 孝幸（テラル）；福井 聡，小川 純（新潟大）；古瀬 充穂（産総研）；
渡部 智則，長屋 重夫（中部電力）；森下 勇樹，長岡 孝，府山 伸行，縄稚 典生（広島総技研）
2P-p12　超伝導浮上搬送装置におけるバンク角度のためのレール磁場の検討---- 109
二村 宗男，大畑 翔，佐藤 明（秋田県立大）
2P-p13　高温超電導テープ線材を用いた磁気浮上型超電導免震装置の浮上力特性 ---- 110
吉村 創，齋藤 圭太，長﨑 陽，津田 理（東北大）
2P-p14　遮蔽性能向上に適した電磁誘導型超電導磁気シールドの構成方法 ---- 111
長﨑 陽，花木 悠哉，塚田 耀太，津田 理（東北大）
2P-p15　SMES 応用を想定した無絶縁バンドル・ダブルパンケーキコイルの電流分布解析 ---- 112

小笠原 友樹，石山 敦士（早大）

HTS コイル・解析 (2)　13:45 - 15:00　座長： 井上 良太

2P-p16　無絶縁 REBCO コイルのためのコイル保護法に関する検討 ---------- 113
寺内 和，濱田 一希，長渕 大河，結城 拓真，石山 敦士（早大）；野口 聡（北大）；
渡部 智則，長屋 重夫（中部電力）
2P-p17　双方向分割型回路解析手法を用いた無絶縁コイルの遮蔽電流磁場解析（その 1）：定式化 ---------- 114
太田 海斗，小久保 早希，石山 敦士（早大）；植田 浩史（岡山大）；野口 聡（北大）
2P-p18　双方向分割型回路解析手法を用いた無絶縁コイルの遮蔽電流磁場解析（その 2）：解析結果 ---------- 115
内山 誠士郎，小久保 早希，石山 敦士（早大）；植田 浩史（岡山大）；野口 聡（北大）
2P-p19　層間接触不良が無絶縁 REBCO パンケーキコイルの熱的安定性に及ぼす影響 ---------- 116
天野 一樹，長渕 大河，結城 拓真，濱田 一希，石山 敦士（早大）；野口 聡（北大）；植田 浩史（岡山大）
2P-p20　液体水素冷却 REBCO コイルの通電試験に用いるスプリット型 REBCO 外部磁場コイルの
液体ヘリウム中励磁予備試験 ---------- 117
山川 友瑚，村田 将一朗，石田 悠人，稙田 隆太，大屋 正義（関西学院大）；今川 信作，
岩本 晃史（NIFS）；白井 康之（京大）
2P-p21　スプリット型 REBCO 高温超電導コイルの励磁試験 ---------- 118
村田 将一朗，山川 友瑚，大屋 正義（関西学院大）；今川 信作（NIFS）
2P-p22　革新的技術による超電導コイル磁石励磁電源装置 ---------- 119
河島 裕，杉本 志郎，伊東 徹也（テラル）

懇親会（岐阜キャッスルイン 2 階 末広の間）　18:30 - 20:30

12 月 9 日（金）　A 会場　10:15 - 14:45

送電ケーブル　10:15 - 11:00　座長： 増田 孝人

3A-a01　プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発 ---------- 120
塩原 敬，佐藤 迪夫，金山 諄志，長井 港太，高橋 保夫，青木 裕治，中西 達尚，三堂 信博，
足立 和久（昭和電線）
3A-a02　HTS テープ線材の短絡電流試験 － 3 ---------- 121
山口 作太郎，江口 実穂，川合 修平，IVANOV Yury，神田 昌枝，斎藤 涼夫（中部大）；
二ノ宮 晃（明治大）
3A-a03　500 m 高温超伝導直流送電ケーブルの通電試験及び電流分布 (2) ---------- 122
筑本 知子，渡邉 裕文，IVANOV Yury，日野 友明，奥野 清，井上 徳之（中部大）

休憩　11:00 - 11:15

電力応用　11:15 - 12:00　座長： 植田 浩史

3A-a04　電力・水素複合エネルギー貯蔵システムの高精度変動補償に適した SMES システムの構成 ---------- 123
大和田 智也，深梅 正太郎，長﨑 陽，津田 理（東北大）
3A-a05　再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性 (4) ----- 124
東川 甲平，井手 暁仁，辺 文浩，木須 隆暢（九大）
3A-a06　高温超電導コイルを用いた直流遮断システムの限流・遮断特性 ---------- 125
松田 智紀，西山 花名子，長﨑陽，津田 理（東北大）

昼食　12:00 - 13:15

SCSC ケーブル　13:15 - 14:45　座長： 大屋 正義

3A-p01　SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(1)：概要---------- 126
雨宮 尚之，曽我部 友輔（京大）；山野 聡士（古河電工）；坂本 久樹（SuperPower Inc.）
3A-p02　SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(2)：層数の異なる SCSC ケーブルの磁化損失測定---------- 127
重政 茉於，祖父江 卓哉，曽我部 友輔，高橋 明，藤野 正人，雨宮 尚之（京大）
3A-p03　SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(3)：
スパイラル銅複合多芯薄膜線材の磁化損失に与える金属コアの影響---------- 128
祖父江 卓哉，重政 茉於，曽我部 友輔，高橋 明，藤野 正人，雨宮 尚之（京大）
3A-p04　SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(4)：
スパイラル銅複合多芯薄膜線材のクエンチ過程における金属コアへの電流分流の測定---------- 129
許 光煒，曽我部 友輔，雨宮 尚之（京大）
3A-p05　SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(5)：層間偏流を考慮した SCSC ケーブルの全損失解析 --- 130
江崎 友哉，曽我部 友輔，雨宮 尚之（京大）
3A-p06　SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(6)：銅複合多芯薄膜線材の熱暴走解析と実験の比較------ 131
曽我部 友輔，沈 靖宇，雨宮 尚之（京大）

12 月 9 日（金） B 会場　10:15 - 15:30

デバイス応用　10:15 - 12:00　座長： 日高 睦夫

3B-a01　HTS-SQUID を用いた超高感度な磁気ナノ粒子の交流磁化特性評価装置の開発---------- 132
黒田 滉人，守屋 列神，山本 泰起，岸本 航平，山下 慶，王 璡，堺 健司，紀和 利彦（岡山大）
3B-a02　ハードウェア記述言語を用いたデジタル SQUID 磁束計のレイアウト設計---------- 133
今谷 純平，成瀬 雅人，明連 広昭（埼玉大）
3B-a03　外部制御電流で書き込み可能な超伝導メモリセルの小型化---------- 134
山梨 裕希，細谷 岳哉，吉川 信行（横浜国大）
3B-a04　力学インダクタンス検出器用フィルターバンク方式 SFQ 信号処理回路の設計---------- 135
藤江 和輝，成瀬 雅人，明連 広昭（埼玉大）
3B-a05　単一磁束量子論理回路によるトポロジカル量子ビット用ブレイディング操作回路の設計---------- 136
大場 来，船澤 卓朗，成瀬 雅人，明連 広昭（埼玉大）
3B-a06　希釈冷凍機下における窒化ニオブジョセフソン接合特性の評価---------- 137
上田 伴春，田中 雅光，堀 裕貴，中山 彪之助（名大）；山下 太郎（東北大）；藤巻 朗（名大）
3B-a07　磁束線の運動を利用した超電導リザバーによる音声認識---------- 138
有田 拳，上田 天馬，小田部 エドモンド，宇佐美 雄生，田中 啓文（九工大）；松野 哲也（有明高専）

昼食　12:00 - 13:15

磁場中臨界電流　13:15 - 14:15　座長： 松本 明善

3B-p01　仕込金属組成を変えた Bi2223 線材のキャリアドープ状態と磁場中臨界電流特性---------- 139
宮本 能伸，公平 龍之介，元木 貴則，下山 淳一（青学大）；武田 宗一郎，中島 隆芳，山出 哲（住友電工）
3B-p02　結晶方位データに基づく超伝導電流輸送のフローネットワーク解析---------- 140
浅井 俊樹（東京農工大）；嶋田 雄介（東北大）；山本 明保（東京農工大）
3B-p03　バルクピンのない第二種超伝導体における縦磁場中の臨界電流---------- 141
馬渡 康徳（産総研）
3B-p04　縦磁界下における REBCO 線材の表面電界の評価---------- 142
島田 涼平，木内 勝（九工大）

休憩　14:15 - 14:30

HTS 機械特性　14:30 - 15:30　座長：田中 秀樹

3B-p05　局所フィラメント損傷に基づく Bi2223 線材の I_c ― ひずみ特性の考察 ---------- 143
岡田 達典，淡路 智（東北大）

3B-p06　REBCO 線材の機械特性の銅めっき厚依存性---------- 144
藤田 真司，武藤 翔吾，土屋 光揮，平田 渉，大杉 正樹，大保 雅載（フジクラ）

3B-p07　高温超電導テープの臨界電流の限界曲げ歪の評価 ---------- 145
長村 光造（応用科学研）；町屋 修太郎，山根 昇悟（大同大）

3B-p08　希土類系高温超伝導線材の転移曲線に与えるひずみ効果 ---------- 146
長谷川 凌也，小黒 英俊（東海大）；淡路 智（東北大）

12 月 9 日（金）　C 会場　10:00 - 14:30

磁気分離　10:00 - 10:45　座長：秋山 庸子

3C-a01　リスク物質処理のためのステンレス球磁気フィルタを用いた分離・回収プロセスの検討---------- 147
江村 寛，吉田 弦，井原 一高（神戸大）

3C-a02　発電プラント配管中のクラッド分離用高勾配マグネットフィルターに関する検討 ---------- 148
三島 史人，長濱 葵，野村 直希，西嶋 茂宏（福井工大）

3C-a03　常磁性粒子の淘汰管を用いた高勾配磁気分離の基礎研究 ---------- 149
長濱 葵，野村 直希，西嶋 茂宏，三島 史人（福井工大）

休憩　10:45 - 11:00

バルク着磁　11:00 - 12:00　座長：元木 貴則

3C-a04　細孔加工したバルク体における軟鉄ヨークが捕捉磁場特性に及ぼす影響 ---------- 150
CONG Yu，JIAHAO Shang，横山 和哉（足利大）；岡 徹雄（芝浦工大）

3C-a05　MVT 法 MgB_2 超伝導バルクの大型化に向けた捕捉磁場電磁界解析 ---------- 151
池田 直生，田中 里佳，白旗 知暉，山本 明保，川﨑 玲（東京農工大）

3C-a06　軟鉄ヨークの形状がパルス着磁特性に及ぼす影響の数値解析による評価 ---------- 152
JIAHAO Shang，CONG Yu，横山 和哉（足利大），岡 徹雄（芝浦工大）

3C-a07　バルク体の不均一性を考慮したパルス着磁の数値解析---------- 153
横山 和哉，CONG Yu，JIAHAO Shang（足利大）；岡 徹雄（芝浦工大）

昼食　12:00 - 13:15

薄膜・バルク作製　13:15 - 14:30　座長：小林 祐介

3C-p01　一方向溶融成長 (SDMG) 法による高均質 REBCO 溶融凝固バルクの育成と物性 ---------- 154
元木 貴則，三輪 将也，仙波 実怜，近藤 莉帆（青学大）；中村 新一（TEP）；下山 淳一（青学大）

3C-p02　REBCO 溶融凝固バルク間超伝導傾斜接合の開発 ---------- 155
三輪 将也，元木 貴則，仙波 実怜，近藤 莉帆，下山 淳一（青学大）

3C-p03　ボールミル粉砕した Gd211 粉末を用いて作製した GdBCO バルクの磁束ピン止め特性 ―
ボールミル材由来の不純物混入の影響 ---------- 156
箱石 裕人，内藤 智之（岩手大）

3C-p04　高エネルギー混合法 Co ドープ Ba122 多結晶バルクのマクロ / ミクロ超伝導特性評価---------- 157
長谷川 友大（東京農工大）；卞 舜生，為ヶ井 強（東大）；菊池 慎次郎，石渡 翔大，
山本 明保（東京農工大）

3C-p05　Zr をパターニングした基板上での MOD-YBCO 薄膜の結晶配向の膜厚依存性 ---------- 158
藤本 大貴，寺西 亮（九大）；大井 修一，松本 明善（NIMS）

液体水素冷却核融合マグネットの概念検討

Study on a concept for fusion magnets cooled with liquid hydrogen

今川信作, 岩本晃史, 濱口真司(NIFS); 白井康之(京都大)
IMAGAWA Shinsaku, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji (NIFS); SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合炉のマグネットは, 大型であり, 運転開始後の交換は困難であることから, クエンチ保護が可能で, かつ, ある程度の性能低下は許容される必要があると考えている。そこで, 冷却能力に優れた液体水素で直接冷却することによりクエンチ保護が可能な電圧発生まで冷却安定な(熱暴走しない)高温超伝導コイルの基礎的な研究を進めている。冷却安定な大電流導体の概念設計を提案し, 検討すべき課題を整理する。

2. 導体の概念設計方針

線材の 20 K の比熱は 4 K の 10-70 倍であり, 適切な温度マージンを確保することにより機械的擾乱による常伝導転移の確率は十分に低くなると期待される。しかし, 交換が困難なコイルの場合は, 局所的な性能低下を許容する冷却安定性が必要と考えている。分流開始温度や臨界温度は劣化の程度によって変わるため, 安全側に「安定化材に全電流が流れた場合の導体温度が健全な状態の分流開始温度以下」となる導体を検討する。12-14 T, 20 K 付近での候補線材は REBCO または Bi2223 補強線材と考えられ, 温度マージンの観点で REBCO が優れている。導体に働く強い電磁力と遮断時の高電圧を考慮し, まず, ITER マグネットと同様の強制冷却を検討する。これまでに高温超伝導大電流導体の試作が精力的に行われており, 製作や繰返し励磁による性能低下等の課題も報告されている。ITER 用導体の断面構成との共通性と超伝導線の濡れ面積等の観点から, CORC-CIC(ケーブル・イン・コンジット)導体[1]を参照して液体水素冷却導体の概念を検討する。

3. 導体とコイルの概念設計

CORC 素線は Cu 芯に REBCO テープ線を多層巻き付けた構成であり, 比較的に小さい曲げ半径が許容される。文献[1]では CORC 素線を円弧上に並べてツイストする構成が提案されており, 素線数を増やし過ぎると中央の領域が拡大し, 電流密度が低下する。大電流化のため素線径を大きくすることが考えられるが, 素線の製作性や可撓性の検討が必要となる。文献[1]と同じ素線 9 本を並べた構成を図 1a に示す。コンジットの断面寸法は ITER-CS コイル導体(45 kA, 13 T)と同一とした。この CORC 素線の 13 T における I_c は 22 K で 6.3 kA, 30 K で 5.0 kA なので, 運転電流を 45 kA とすると分流開始温度は 30 K となり, 十分な温度マージンを確保できる。4.5 K の SHe 冷却の Nb_3Sn 導体と同じ性能を 21 K の水素冷却で達成できることになる。ITER-TF コイル(68 kA, 11.8 T)と同じコンジット内径(39.7 mm)の場合, 素線の層数を 14 から 20 に増やすことにより, 13 T, 30 K の I_c として 70 kA 以上の設計(図 1b 参照)が可能である。

コイル製作時に CORC 素線に加わるひずみを軽減する方法として, 図 2 に示すようにコンジットの2分割案を検討している。予めコイル形状に曲げた下半分コンジットにケーブルを置いてから上半分コンジットを載せ, コンジットの弾性範囲内の変形で巻枠に導体を移動させる際に, 分割部の溶接と絶縁テープ巻付けを行い, 最後は真空含侵で一体化する構想である。

図 1b に対して ITER-TF コイルの流路(長さ 390 m, 並列数 252)を想定し, 入口温度 21 K, 入口圧力 1.5 MPa, 出口圧力 1.4 MPa, 通電電流 68 kA の条件で H_2 冷却と He 冷却を比較した結果を図 3 に示す。CIC 導体の圧力損失を中心チャンネルとバンドル部の並列回路として評価し, 熱伝達係数は層流熱伝達の式から求めた。導体の発熱は RRR=100 の安定化銅に全電流が流れる場合の値を用いた。超臨界圧 H_2 冷却では, その優れた冷却能により, 50 kW を超える入熱がある場合でも局所的な常伝導部のケーブル温度を 30 K 以下に保持できる結果となった。一方, He 冷却の場合は, 熱伝達係数が 1/2 以下であるため, 導体発熱だけでも 30 K を超える結果となった。

謝辞

本研究は, 科研費補助金 K119H02130 および NIFS 共同研究 NIFS20KOBA032 の支援の下に実施されました。

参考文献

1. T. Mulder, et al.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 279 (2017) 012033.

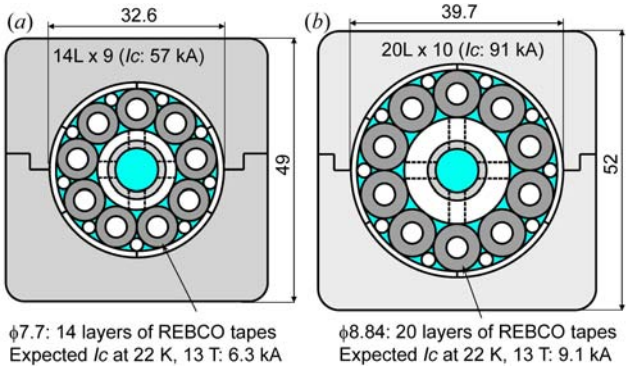


Fig. 1. Concept of conductor for fusion magnets cooled with H_2.

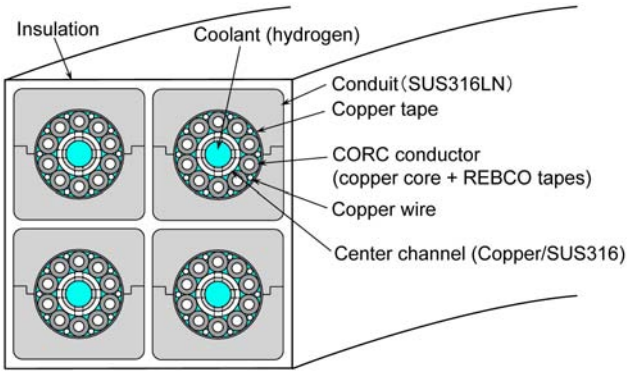


Fig. 2. Concept of a fusion magnet cooled with H_2.

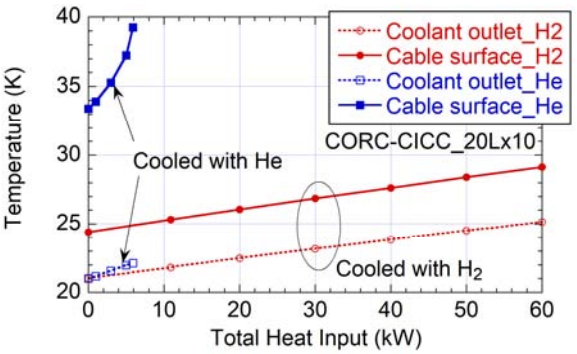


Fig. 3. Estimation of temperatures for a CORC-CICC shown in Fig. 1b under the conditions of the length of 390 m, number of parallel paths of 252, inlet temperature of 21 K, inlet pressure of 1.5 MPa, pressure drop of 0.1 MPa, and current of 68 kA.

無絶縁コイルの導体並列数が中心磁場の時間変動に及ぼす影響

Effect of the Number of Tapes on the Central Magnetic Field Fluctuation in No-Insulation Coils

大池 章太, 仲田 悠馬, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔(千葉大学);
長崎 陽, 津田 理(東北大学)
OIKE Shota, NAKADA Yuma, KOBAYASHI Hiroyasu, SAOTOME Hideo, MIYAGI Daisuke (Chiba Univ.);
NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto(Tohoku Univ.)
E-mail: shotaaaaa.1114@chiba-u.jp

1．はじめに

高電流密度化および熱的安定化を両立する高磁場マグネットとして，無絶縁高温超電導コイルが提案されている。無絶縁コイルは導体間が絶縁されていないため，励磁時にコイル巻線内の電流が周方向だけではなく，径方向にも流れる。中心磁場の発生に寄与するのは周方向電流のみであるため，励磁遅れが生じる。そこで，超電導導体を並列化し，インダクタンスを低減することで時定数を減少させ，励磁遅れを改善する手法が提案されている[1]。しかし，並列導体間に偏流が生じることで，中心磁場が所望の値と異なる値をとる可能性がある。加えて，電流の集中する導体で電圧が発生することで，電流分布が変化し中心磁場が大きく時間変化する可能性がある。また，電流が特定の導体に集中することによる発熱も懸念される。本研究では PEEC モデル[2]を用いて，並列導体で構成された無絶縁コイルの過渡的な電磁現象の解析を行い，温度分布，電流分布について検討した。また，偏流が中心磁場に与える影響について検討を行った。

2．解析モデル及び解析方法

当モデルではパーコレーションモデルに基づく高温超電導導体の *E-J* 特性[3]を反映し，PEEC 法を用いて導体間の電流分布解析を行っている。温度分布解析は，二次元円筒座標系熱伝導方程式を用いた。境界条件は，コイル内外で熱の出入りの無い断熱条件とした。解析に用いた Y 系テープ導体，超電導コイルの諸元，及び解析条件を Table 1 に示す。コイルの運転電流は 260A とし，負荷率は 0.7 となる。このときの I_C は Table 1 に示した値となる。

3．解析結果

Fig. 1 に励磁遅れの様子を示す。Fig. 1 において，コイル内のすべての区間に流れる周方向電流の合計値を運転電流の総量で割ることで正規化を行っている。Table 1 に示す各モデルにおいて，通電電流が運転電流に到達してから中心磁場の大きさが最大値の 99.99%に到達するまでの所要時間は，Model A～E の順にそれぞれ 146，107，83，71，41 秒である。結果より，並列数が増えるにつれて励磁遅れが小さくなっていることが分かる。これは，並列数が増えるにつれてインダクタンスが低減し，時定数が小さくなることによって励磁遅れが改善されたと考えられる。

励磁開始から 1500 秒経過後までにおける，導体並列数の異なる無絶縁コイルの最大温度上昇量は，3 並列の無絶縁コイルにて最大 0.45 K であった。したがって，今回の励磁条件下では熱的安定性に関しては問題ないと考えられる。

Fig. 2 に各モデルでの導体に流れる電流量の最大値と最小値の差分(I_{diff})の時間推移を示す。Fig. 2 より，通電電流が運転電流に到達してから並列数が増えるにつれて偏流が増えているのがわかる。励磁開始から 1500 秒後において，Model A の I_{diff} は 18.8 A，Model E の I_{diff} は 90.3 A であった。中心磁場の値は，導体並列数の増加に合わせて増大した。励磁開始から 1500 秒後の中心磁場の大きさは，Model E の値が最大であり，Model A を基準とすると 27.5 ppm 増えた。これは，並列数が増えることによって偏流が大きくなり，並列導体中において，コイルの中心により近い，内側に位置する導体の通電電流量が増えたためである。Fig. 2 より，励磁開始後十分に時間が経過した後においても偏流はほとんど解消されないことがわかる。偏流が解消されないため中心磁場の大きさはほとんど変化しなかった。

Table 1. Specifications and analysis conditions of No-Insulation coil (NIC).

Model	A	B	C	D	E
Number of parallel layers	3	4	5	6	10
Number of turns	20	15	12	10	6
I_c[A] at $B_\perp$= 0.4[T], 30 K	356.3				
Divisions per turn	10				
Tape width [mm]	4				
Tape thickness [mm]	0.16				
Coil i.d. [m]	0.5				
Excitation rate [A/s]	6	8	10	12	20
Excitation time [s]	125				

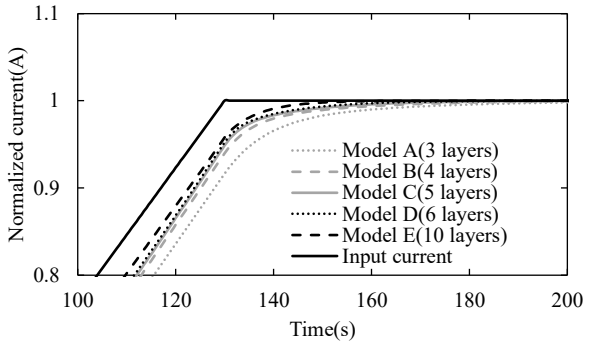


Fig. 1. Charge delay of each model.

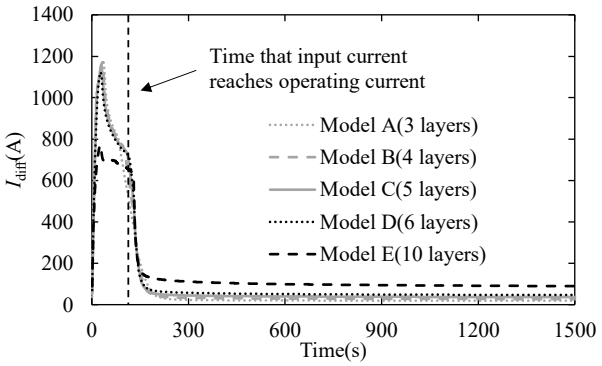


Fig. 2. Transition I_{diff} in NICs with different number of parallel tapes.

参考文献

1. J. Geng et al., IEEE, vol.32, no 8 (2019)
2. Tao Wang et al., IEEE, vol.25, no 3 (2015)
3. Masayoshi Inoue et al., IEEE, vol.17, no 2 (2007)

遮蔽電流が鉄支配型高温超伝導マグネットの発生磁界に与える影響の解析的評価

Influence of shielding currents in coated conductors on field quality of iron-dominated HTS magnets estimated by numerical analyses

李 陽, 曽我部 友輔, 雨宮 尚之(京大)
LI Yang, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)
E-mail: li.yang.8i@kyoto-u.ac.jp

1. Shielding-current induced field in HTS magnet

Shielding current is persistent eddy current that induced in HTS tapes by time-changing magnetic field. And additional magnetic field induced by shielding currents (shielding-current induced fields, SCIFs) would worsen the field quality of HTS magnet.

In iron-dominated HTS magnet, many previous researches assumed the influence of SCIFs on the field quality is negligible, because magnetic field distribution at beam region (between iron pole) of the magnet is mostly decided by the shape of iron pole. However, quantitative estimation of SCIFs is required to support this assumption. Therefore, we investigated the temporal behavior of SCIF distributions in typical iron-dominated HTS magnets by numerical analyses.

2. Analysis method

We developed a practical analysis method to estimate SCIF in iron-dominated HTS magnets by combining three different analyses. First, we conducted magnetic field analysis considering 3D geometry of HTS magnet to obtain magnetic field induced by magnetization of iron core. Then, obtained magnetic fields by iron magnetization are used as the input for the shielding current distribution analyses which considered 3D geometry of the HTS coil. At last, obtained current distributions at a typical cross-section of the HTS coils are used as the input for the 2D magnetic field analyses. And SCIFs are obtained by subtract analysis results with uniform current distribution from analysis results with non-uniform current distribution that includes shielding currents.

3. Analysis results and conclusions

The analysis object is the iron-dominated combined-function HTS magnet for rapid-cycling synchrotrons [1]. Current pattern of the magnet is shown in Fig. 1. And we pick up 4 typical times during the ramp up process to conduct SCIF analyses.

Fig. 2 shows the distribution of the SCIFs at bottom of HTS coils, and Fig. 3 shows the distribution of SCIFs at beam region of the magnet. SCIF at bottom of coils is in the order of 10^{-2} T, and its magnitude increases with the ramp up process of current. And SCIF at beam region of magnet is in the order of 10^{-4} T. Table I shows the relative error caused by SCIFs. SCIF at bottom of coils is in the order of 10^{-2}, and SCIF at beam region is in the order of 10^{-6} to 10^{-4}.

In conclusion, SCIF at bottom of coils could be in the order of 10^{-2}, but SCIF at beam region of the magnet is in the order of 10^{-5}. This results supports the assumption that SCIF is almost negligible at beam region of iron-dominated HTS magnet.

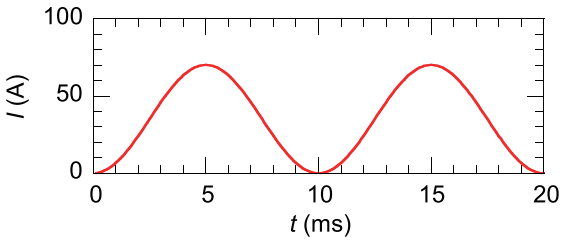


Fig. 1 Current pattern of HTS magnet

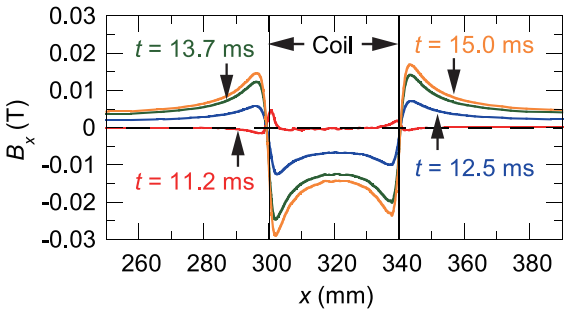


Fig. 2 SCIFs at bottom of HTS coils (along y = 128 mm, the distance with coils is 4 mm)

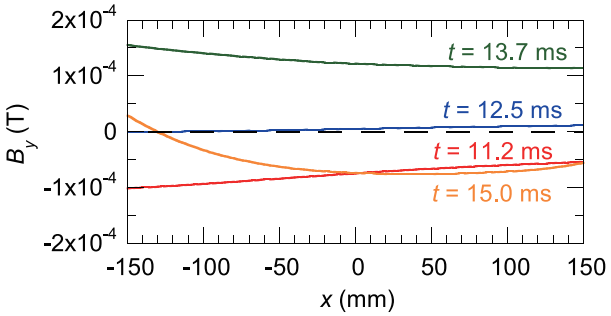


Fig. 3 SCIFs at beam region of HTS magnet (along the x axis)

Table I Relative error caused by SCIFs

Times	SCIF(RMS)/B(RMS) at bottom of coils	SCIF(RMS)/B(RMS) at center of magnet
t = 11.2 ms	4.28×10^{-3}	3.82×10^{-4}
t = 12.5 ms	1.67×10^{-2}	8.48×10^{-6}
t = 13.7 ms	1.83×10^{-2}	1.02×10^{-4}
t = 15 ms	1.71×10^{-2}	4.32×10^{-5}

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP20H00245.

References

1. Y. Li, et al.: IEEE TAS., Vol. 30 (2020) 4700905

銅複合多芯薄膜線材における動的抵抗の数値解析と実験の比較

Comparison of numerical analyses and experiments of dynamic resistivities in copper-plated multifilament coated conductors

曽我部 友輔, 雨宮 尚之(京都大学)
SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)
E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

直流電流を通電している薄膜高温超伝導線に交流磁界が印加されると、動的抵抗と呼ばれる抵抗が発生する。動的抵抗及びそれによって発生する電圧が発生する原理については理論的に検討がなされ、実験的評価が進められていたものの、系統的に数値解析と実験を比較した研究は行われていなかった。

我々はこれまで、直線状・スパイラル状の薄膜線材を対象とした動的抵抗測定を通して、スパイラル状の銅複合多芯薄膜線材において動的抵抗が低減されることを示した[1]。今回我々は、交流外部磁界下で直流電流を通電している直線状及びスパイラル状の銅複合多芯薄膜線材の電磁気的振舞いを数値解析並びに解析によって評価し、動的抵抗及びそれによって発生する電圧、並びに動的損失の時間的振舞い、また試料形状が動的抵抗特性に与える影響を詳細に調査した。

2. 測定試料及び測定方法

我々は 4 つの試料を測定した。それぞれの試料の諸元を Table 1 に示す。直線状の単芯線材及び多芯線材、スパイラル状の単芯線材及び多芯線材が測定試料である。全ての試料は SuperPower 社及び古河電気工業株式会社製の薄膜高温超伝導線であり、銅分流層が両面にめっきされている。

動的抵抗の測定には、最大磁束密度 100 mT、最高周波数約 200 Hz まで発生可能な交流電磁石を使用した。動的抵抗は試料に取り付けた電圧タップによる電圧から測定した。通電電流 I_t、測定電圧が V であるとき、一周期当たりの単位長さ当たりの動的抵抗 R_d は、以下の式で与えられる。

$$R_d = V / I_t\, d\, f \qquad (1)$$

ここで、d は電圧タップ間距離、f は外部磁界の周波数である。また、電圧測定においては、時間平均された電圧を測定するのではなく、外部磁界に対する電圧の時間変化を測定し、波形から得られる一周期当たりの平均電圧を式(1)における V とみなして動的抵抗を計算する。

3. 数値解析手法

数値解析においては、電流ベクトルポテンシャルを用いた T 法に薄板近似を適用した[2]。実験における測定条件を模擬し、試料に直流電流を通電している状態で外部交流磁界を印加し、試料全体で発生している一周期当たりの損失と通電電流値から動的抵抗 R_d を計算する。直線状・スパイラル状の銅複合多芯薄膜線材においては、超伝導フィラメント部で発生している損失をヒステリシス損失、それ以外の常伝導部で発生している損失を結合損失とみなす。

4. 発生電圧波形の測定結果例

STF1 を例にとり、直流電流通電中に外部交流磁界に晒された場合の発生電圧波形を示す。外部印加磁界の時間変化を Fig. 1(a)に、発生電圧の時間変化を Fig. 1(b)に示している。ここでは、自己磁界下での臨界電流 I_c に対する通電電流 I_t の割合 $i = I_t / I_c$ を 0.8 とし、外部印加磁界の振幅を 20 mT としている。磁界の方向が反転し、逆方向に増加する過程で発生電圧が最大となっていることが確認できる。これは、超伝導線材内での磁束分布がこの時刻に大きく変化することに起因していると考えられる。

Table 1 Specifications of measured samples.

Straight samples		
Sample name	STF1	STF5
Number of filaments	1	5
Copper thickness per side	40 µm	
Substrate thickness	30 µm	
Tape width	4 mm	
Sample length	130 mm	
Spiral samples		
Sample name	SPF1	SPF5
Number of filaments	1	5
Copper thickness per side	40 µm	
Substrate thickness	30 µm	
Tape width	4 mm	
Core diameter	3 mm	
Spiral angle	55°	

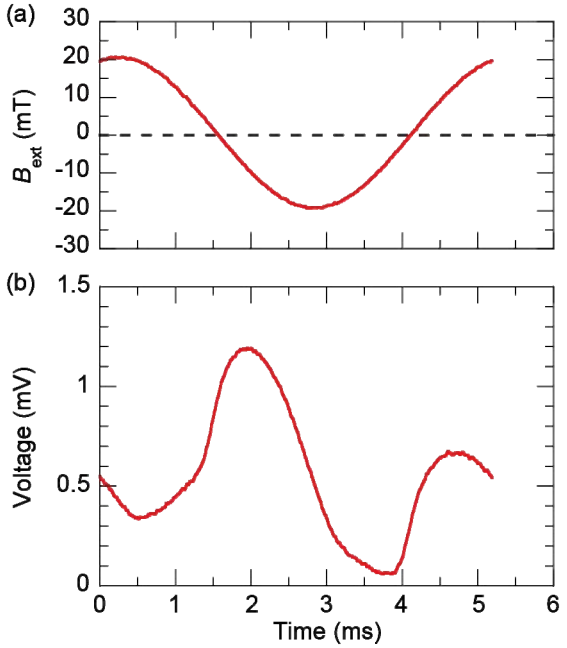


Fig. 1 Measured temporal variation of (a) external magnetic flux density B_{ext} and (b) voltage in STF1 at load ratio of current i = 0.8 and amplitude of B_{ext} = 20 mT.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H00245 の助成を受けたものである。

参考文献

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

高温超電導コイル磁石の残留磁化

Residual Magnetization of HTS Coil Magnet

脇 耕一郎, 笹川 卓(鉄道総研)
WAKI Koichiro, SASAKAWA Takashi (RTRI)
E-mail: waki.koichiro.08@rtri.or.jp

1. はじめに

高温超電導線材(高温超電導体を基板などとテープ状に積層したもの)をレーストラック状に巻いたコイルが納まった高温超電導コイル磁石について, 電源からの通電を止めても, 僅かながら磁界が生じた。これは, 通電によって強い磁界を経験したので, 塊状の高温超電導体に比べて弱いながらも磁化が残留したためと考えられる。そこで, 残留磁化による磁束密度の分布を, 高温超電導コイル磁石表面において測定した。ここで, コイルの中心における磁束は通電したときと逆の向きであった。即ち, 磁化は単純に残留するのでないことが分かる。そこで, コイルが高温超電導線材をレーストラック状に巻いたものであることの, 残留磁化への影響を検討した。

2. 残留磁化による磁束密度の分布の測定

対象とする高温超電導コイル磁石は, 超電導磁気浮上式鉄道における地上コイルの電磁加振試験用であり, 高温超電導体は希土類系である[1]。残留磁化による磁束密度の分布の測定座標を図 1 に示し, 測定結果を図 2 に示す。コイル直上において, B_Yは極性が反転し, B_Y以外はピークがあった。

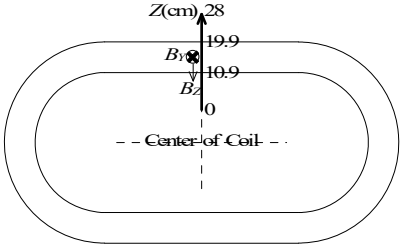


Fig.1 Measuring Coordinate of Magnetic Flux Density due to Residual Magnetization

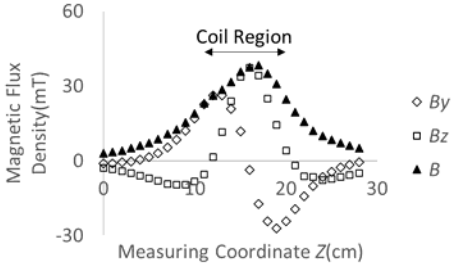


Fig.2 Measured Distribution of Magnetic Flux Density due to Residual Magnetization

3. 残留磁化への影響の検討

先ず, 無限平面の高温超電導体に臨界状態モデル[2]を適用し, 高温超電導体の外部から磁界 H を印加したとする。高温超電導体内部において, 高温超電導体外部から印加する最大の磁界H_Mの, 高温超電導体内部の中心まで増磁が及ぶ(中心到達)ような磁界 H_P との大小関係に応じ, 磁化の平均$\langle M \rangle$の H依存性が求まる[3]。

なお, H =0 からの増磁過程における H =H_Mのときの$\langle M \rangle$を遮蔽磁化$\langle M \rangle_S$と呼び, H =H_Mからの減磁過程における H =0 のときの$\langle M \rangle$を残留磁化$\langle M \rangle_R$と呼ぶ。

次に, 高温超電導線材を円状に巻いたコイルについて, 高温超電導線材に占める高温超電導体の総てにおいて, 通電電流の磁力線を軸方向の成分と径方向の成分へ分け, 臨界状態モデルを適用したとする。

$\langle M \rangle_S$について, 軸方向の成分は中心到達の下で H_Mより規模が遥かに小さくて無視でき, 径方向の成分は中心不到達の下で H_Mより規模が小さくても同じオーダーかつ H_Mと逆の向きであって無視できない[4]。

また, 通電停止による$\langle M \rangle_R$について, 軸方向の成分は中心到達の下で$\langle M \rangle_S$ と規模が同じであって無視でき, 径方向の成分は中心不到達の下で$\langle M \rangle_S$より規模が小さくても同じオーダーかつ$\langle M \rangle_S$と逆の向きであって無視できない。

このため, コイルの中心軸において, 通電停止による$\langle M \rangle_R$ の分布に基づく磁束線が, 通電電流の磁力線に基づく磁束線に対し, コイルの内側は同じ向きとなるが, コイルの外側は逆の向きとなる。円状に巻くのでなくてレーストラック状に巻いても同様に考えられるので, 特に, コイルの外側は, 測定における磁束の逆向きを再現した。

そこで, 通電停止による$\langle M \rangle_R$ を通電停止による残留電流と捉え, 解析済みの$\langle M \rangle_S$[5]とは電流の向きだけが逆の方法で磁束密度の分布を解析した。残留磁化による磁束密度の分布の解析結果を図 3 に示す。コイル直上における磁束密度について, 座標依存性は測定結果を再現した。

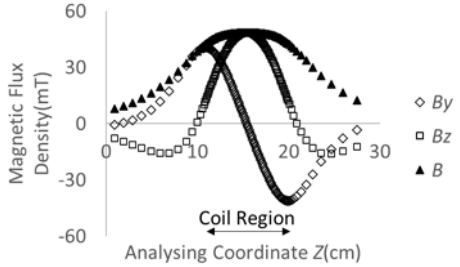


Fig.3 Analyzed Distribution of Magnetic Flux Density due to Residual Magnetization

4. おわりに

測定結果よりやや大きくなったピークも, 電流をやや小さく設定すれば, 測定結果を再現するようになると考えられる。

参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Electromagnetic Vibration Test of a Ground Coil Using a REBCO Magnet, RTRI Report, Vol. 34, No. 11 (2020) pp.5-10
2. C. P. Bean: Magnetization of Hard Superconductors, Phys. Rev. Lett, Vol. 8, No. 6 (1962) pp.250-253
3. Y. Iwasa : Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues, Springer Science + Business Media, LLC (2009)
4. 山田忠利:小型高磁界超伝導マグネットにおける問題例ー導体の磁化がつくる磁界ー, 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社 (1993) pp.616-618
5. 笹川卓, 他:地上コイル電磁加振用 RE 系 SCM の設計検討, 電気学会産業応用部門リニアドライブ技術委員会マグネティックス・モータードライブ・リニアドライブ合同研究会 (2020.12.10-11) MAG-20-102, MD-20-178, LD-20-121

MgB_2 巻線を用いた液体水素冷却の超高速回転超電導モータの検討

Investigation of ultra-high-speed rotating superconducting motors with liquid hydrogen cooling using MgB_2 windings

寺尾 悠, 淵野 修一郎(東大), 松本 明善(NIMS), 馬渡 康徳, 吉田 良行(産総研),
菅野 未知央(KEK), 淡路 智(東北大), 田中 秀樹(日立)
TERAO Yutaka, FUCHINO Shuichiro (Univ. of Tokyo), MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS), MAWATARI Yasunori,
YOSHIDA Yoshiyuki (AIST), SUGANO Michinaka (KEK), AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.), TANAKA Hideki (Hitachi)
E-mail: yterao8934@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、航空宇宙分野において推進機構の電動化が盛んに議論されている。小型ロケット用のエンジンにおける液体燃料用ポンプ等も超電導モータの適用先候補の一つである。高電流密度の超電導巻線による高出力密度化が期待出来るためである。その一方で、数万 rpm という超高速回転数での設計検討及びシステムとしての出力密度の向上が課題である。

本発表では、ロケットエンジンの燃料用液体水素(LH_2)ポンプに用いるため、従来の超電導回転機設計の常識を覆す、数万 rpm 領域での運用を考えた超電導モータ(永久磁石界磁+MgB_2 電機子巻線)に関して、解析式及び有限要素法による電磁設計を行い、出力密度や交流損失に関して検討した結果を報告する。

2. LH_2 ポンプ用超電導モータの概要

Fig. 1 及び Table 1 に今回提案する超電導モータの概要と諸元を示す。本モータの適用を前提とするロケットエンジンは、人工衛星の打ち上げ等に用いる比較的小型の推力 20-30 kN 程度エンジンを想定し、その場合の LH_2 ポンプの出力として 100 kW を設定する。また参考文献[1]等を参考にすると、この時のポンプの回転速度は 50,000 rpm となる。これを踏まえ、高速回転であることを利用して可能な限り磁束密度を下げ、極数は最小の 2 極とすることで周波数の上昇を抑え、交流損失を低減する。また鉄心等を使用しない非磁性材料のみで構成することで高出力密度化を狙う。回転子部分は励磁器を使用しないリング状ネオジム永久磁石(残留磁束密度 Br = 1.4 T)を使用する一方、電機子巻線は交流損失の低減が期待出来る ϕ 0.4 mm の 51 芯線の MgB_2 線材を採用し [2] 、集中巻構造とする。本モータは LH_2 中(20 K)で浸漬冷却する。

3. 有限要素法による 2 次元解析

提案する超電導モータの電磁特性を解析するため、JMAG-Designer®による 2 次元解析を行った。永久磁石による電機子巻線部分の磁束密度は、最大 0.2 T となり従来モータと比べても非常に小さいが、空芯構造かつ MgB_2 電機子コイルにより 145 A を通電しているため、Fig. 2 に示す解析結果の様にほぼリプルもなく安定して 100 kW が出力されている。また、出力密度を概算すると、15.2 kW/kg であり、交流損失は文献[3]を基に概算して 1 kW 未満となった。すなわち、本モータはロケットエンジンの LH_2 ポンプへ適用可能なポテンシャルを秘めているといえる。

4. まとめと今後の課題

ロケットエンジンの LH_2 燃料ポンプ等への応用を目指した超高速回転の超電導モータに関して電磁設計を行い、基本特性の解析を行った。その結果、100 kW の超電導モータで出力密度 15.2 kW/kg が得られる可能性を得た。今後は詳細な交流損失の見積もりや材料特性の点からも考察・検証を行っていく予定である。また、3 次元解析等も実施して多角的な観点からフィージビリティの検証を行っていく。

謝辞

本研究はTIAの連携プログラム探索推進事業「2022年度かけはし」の支援を受けて実施した。

参考文献

1. 青木宏, et al.: 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 53, No. 617 (2005) pp. 257-265.
2. H. Tanaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 103 (2022) p. 61
3. T. Balachandran, et al.: IOP Conference Series: Matl. Sci. Eng., Vol. 756. No. 1 (2020) pp. 1-10.

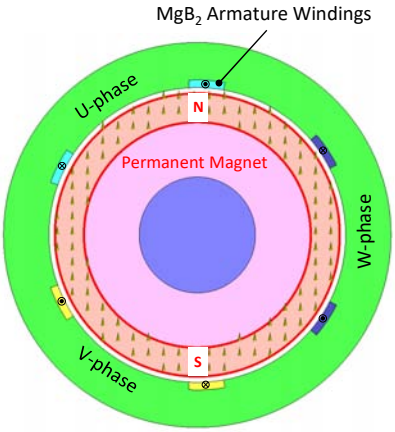


Fig. 1. Proposing superconducting motor using permanent magnet and MgB_2 armature windings.

Table 1. Superconducting motor specifications.

Output	100 kW
Rotation Speed	50,000 rpm
Num. of Poles	2
Motor Diameter	≦ 100 mm
Gap Magnetic Flux density	< 0.3 T
Rotor Field	Permanent Magnet (Br = 1.4 T)
Armature Winding	MgB_2 wire
Operating Temperature	20 K

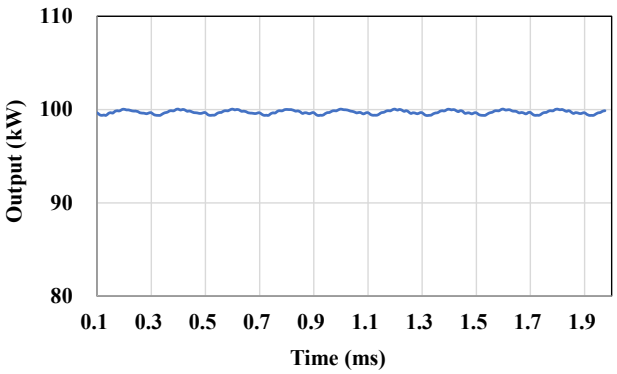


Fig. 2. Analysis result of motor output as a function of time.

液体水素冷却高温超電導発電機の開発（1）コイル開発

Development of liquid hydrogen-cooled high-temperature superconducting generator (1) -coil development-

大屋 正義(関学)；殿岡 俊，三浦 英明(三菱電機)；寺尾 悠(東大)；白井 康之(京大)；
小林 弘明，田口 秀之，岡井 敬一(JAXA)
Masayoshi OHYA (Kwansei Univ.); Shun TONOOKA, Hideaki MIURA (Mitsubishi Electric); Yutaka TERAO (Univ. of Tokyo);
Yasuyuki SHIRAI (Kyoto Univ.); Hiroaki KOBAYASHI, Hideyuki TAGUCHI, Keiichi OKAI (JAXA)
E-mail: Masayoshi-Ohya@kwansei.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル実現のため、水素社会の構築が進められている。実現の際には、水素キャリアの一つである液体水素の冷熱活用が重要になる。我々は、液体水素の冷熱を活用した冷凍機レス・冷却コストレスな高温超電導発電機の研究開発を行っている。図 1 に示すように、液体水素で超電導界磁コイルを冷却し、蒸発したガスは常電導電機子を冷却した後に水素ガスタービンに送って発電することで、液体水素の冷熱を活用したゼロエミッションな発電システムの実現を目指す。本報では、2023 年度に検証する超電導発電デモ機向け REBCO 界磁コイルの開発状況に関して報告する。

2. プロジェクト概要

NEDO の先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム(2022～2023 年度)において、液体水素冷却高温超電導発電機の開発を進めている。本プロジェクトでは、以下 3 項目の研究開発を行っている。

(A) 高強度コイル化技術の開発：大型で高速回転の REBCO 界磁コイルの課題は機械的な脆弱性である[1]。想定される遠心力 8,000×g(回転半径 0.5m、回転数 3,600rpm)に対する高強度コイル化技術を開発する。また、液体水素浸漬冷却下における REBCO コイルの通電特性を明らかにするため、JAXA 能代ロケット試験場に整備した液体水素試験装置を用いて通電試験を行う。

(B) 超電導発電機システムの開発：これまでに蓄積した液体水素給排技術[2]と安全性に関する知見を活用し、10kW 級の液体水素冷却高温超電導発電デモ機を設計開発する。液体水素給排下において、世界初の 1,800rpm 回転励磁検証を行う。安定・安全な回転励磁技術を確立し、液体水素冷却超電導発電機の安定性と安全性を検証する。

(C) 高温超電導発電機の実用化検討：600MW 級液体水素冷却高温超電導発電機の概略設計を行って経済性を議論する。並行して、再生可能エネルギーの大量導入が予想される将来の電力系統において、超電導発電機が電力系統の安定化に寄与できる可能性について系統解析を行う。さらに、今後の開発ロードマップと導入シナリオを構築する。

3. コイル開発

液体水素冷却高温超電導発電デモ機(4 極、10kW 級、1,800rpm)の設計検討を行い[3]、REBCO 界磁コイルの設計案をまとめた。コイルの 1 極分の諸元を表 1 に示す。50 ターンのシングルパンケーキコイル 2 枚を重ねてダブルパンケーキコイルを構成し、ステンレス製のコイルケースに挿入して遠心力(コイル軸方向応力)に対して補強する。3 枚のダブルパンケーキコイルを重ねて 1 極分の界磁コイルを構成する。直線部の長さは 200mm であり、定格電流値は 100A である。

デモ機向け界磁コイルの製作に先立ち、製作性を確認したり、液体水素中での通電特性を検証したりするため、2 極分のコイルを試作した。能代ロケット試験場の 500A 直流電源を用いて、液体水素浸漬冷却下で限界通電特性を検証できるように、意図的に臨界電流特性の低い線材(Ic<50A@77K, s.f.)を用いて試作を行った。発表当日は、液体窒素中での単体コイル通電試験および能代ロケット試験場で行った液体水素中での 2 極コイル通電試験の結果についても報告する。

4. まとめ

NEDO先導研究プログラムにおいて液体水素冷却高温超電導発電機の開発を行っている。遠心力に耐えうる高強度コイル化技術の開発と、10kW級・1,800rpm回転の液体水素冷却発電デモ機の検証を行い、並行して超電導発電機の優位性と経済性を議論する。これまでに、10kW級デモ機の設計検討を行い、REBCO界磁コイルの設計案をとりまとめ、2極分の界磁コイルを試作して通電特性を検証した。

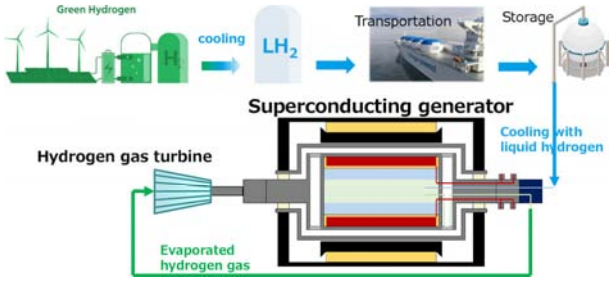


Fig.1 Concept of liquid hydrogen-cooled HTS generators

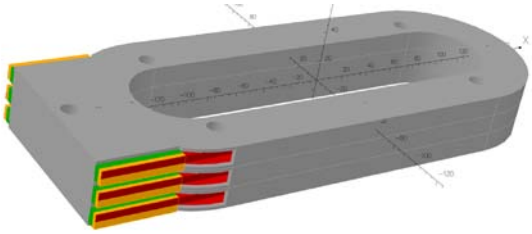


Fig.2 Illustration of field pancake coil (1 pole)

Table 1 Specifications of field pancake coil (1 pole)

Width of REBCO wire	4 mm
Effective length of double pancake coil	200 mm
Turn number of double pancake coil	100
Number of double pancake coils	3
Rated current	100 A

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業(JPNP14004)の結果得られたものです。

参考文献

1. Y. Nagasaki et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 5 (2021) #8400405
2. Y. Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1 (2020) pp. 44-52
3. Y. Terao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 104 (2022) 1A-p03

液体水素冷却高温超電導発電機の開発 (2) 超電導発電機の電磁設計

Development of liquid hydrogen-cooled high-temperature superconducting generator (2) Electromagnetic design of the superconducting generator

寺尾 悠(東大), 大屋 正義(関学), 白井 康之(京大), 殿岡 俊, 三浦 英明(三菱電機), 小林 弘明, 田口 秀之, 岡井 敬一(JAXA)

TERAO Yutaka (Univ. of Tokyo), OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.), SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.), TONOOKA Shun, MIURA Hideaki (Mitsubishi Electric), KOBAYASHI Hiroaki, TAGUCHI Hideyuki, OKAI Keiichi (JAXA)

E-mail: yterao8934@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラルな社会を目指す中で、液体水素の有効利用はキーポイントの一つであり、それを活用する手段の一つが超電導回転機である。我々は、液体水素の冷熱を活用した冷凍機レス・冷却コストレスの高温超電導発電機の研究開発を行っており、これまでの回転子中における液体水素給排技術の知見[1]を活かして回転界磁超電導構造の超電導発電機のデモ機製作を行う。今回は発電機の製作に当たり、有限要素法による電磁設計を行った結果を報告する。

2. 超電導発電機の基本構造

Fig. 1 及び Table 1 に今回製作する超電導発電機の概念図を示す。本発電機は回転子側に界磁巻線として 4 極分の REBCO パンケーキコイル(300 ターン、100 A 通電)[2]を搭載し、固定子側に銅電機子巻線を用いた界磁超電導発電機である。出力は 10 kW 以上、回転数は 1800 rpm とし、発電機直径は 480 mm である。回転子は二重断熱構造としている(回転子内の液体水素給排部分とシャフトは省略)。尚、今回は回転子部分の詳細検討を主軸に置いたデモ機設計の為、固定子側はティースに鉄心を使用した既製品を使用する。

3. 有限要素法による電磁界解析

今回のデモ機を製作する上で基本電磁特性を把握するため、JMAG-Designer®による二次元の電磁界解析を行った。Fig. 2 に解析結果として電流及び電圧波形を示す。界磁電流、電機子電流、線間電圧共に諸元を満たしている。また、この時の出力として 12.3 kW が得られることを確認した。

4. まとめと今後の課題

NEDO 先導研究プログラムにおいて液体水素冷却による超電導デモ機の開発を行うため、有限要素法による電磁設計を行った。その結果、諸元を満たす値が得られることを確認した。引き続き、実機の製作に向けて 3 次元解析等も組み合わせて詳細な検討を進めていく予定である。

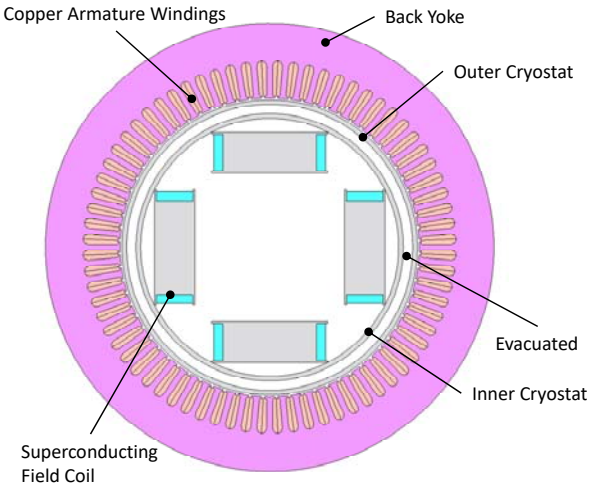


Fig. 1. Conceptual diagram of superconducting generator

謝辞

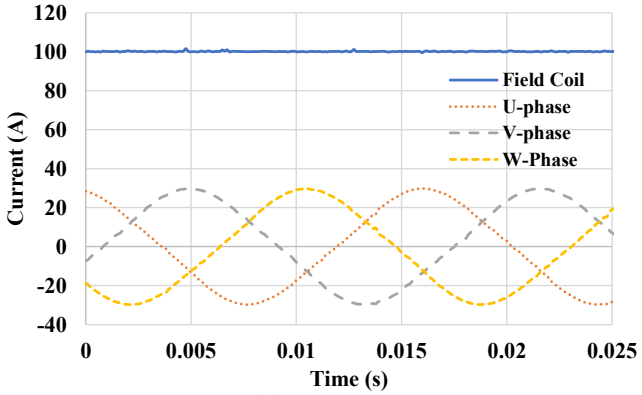
本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)として実施した。

参考文献

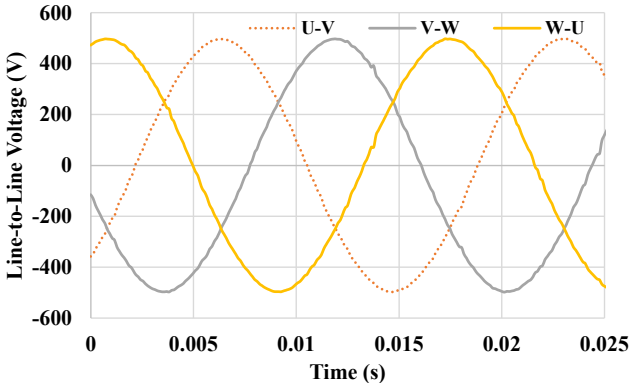
1. Y. Shirai and M. Shiotsu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., vol. 55, no. 1 (2020) pp. 44-52.
2. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 104 (2022) 1A-p02.

Table 1. Superconducting generator specifications.

Output	> 10 kW
Rotation Speed	1,800 rpm
Num. of Poles	4
Line-to-Line Voltage	≦ 440 V
Diameter	480 mm
Effective Length	200 mm
Field Coils	REBCO
Armature Windings	Copper
Operating Temperature	20 K



(a) Current



(b) Line-to-Line Voltage

Fig. 2. 2D analysis results of the superconducting generator

水素/ネオン冷却回転機のセルフポンピングに関する検討

Self pumping effect on hydrogen or neon cooled rotating machine

星野 勉 (明星大)
HOSHINO Tsutomu (Meisei Univ.)
E-mail: thoshino@ee.meisei-u.ac.jp

1. はじめに　回転子に対する液体ヘリウムの供給は, セルフポンピング効果によって容易に達成できることが明らかとなっている。以前, 窒素冷媒に関するセルフポンピングについて検討した [1]。昨今 MgB_2 線材を用いて, 界磁巻線を構成し, 水素やネオンを冷媒とする試みがされている [2]。そこで, 簡単な回転モデルを設定し, セルフポンピング効果を検討した。

2. 解析原理　Fig. 1 にトルクチューブ熱交換器を含む回転部のモデルを示す。0 の位置で固定子から回転子に冷媒が注入される。定常状態では簡単のため, 5 ⇒ 6 の流路で, 熱遮蔽との熱交換が行われ, 回転子への侵入熱はできると無視する。0 ⇒ 1, 3 ⇒ 4, 7 ⇒ 8 の流路では, 熱交換はなく冷媒流による圧力損失を無視する。1 ⇒ 2, 4 ⇒ 5 の流路では, 遠心力によるエンタルピーの増加がある。2 ⇒ 3 では, 回転子コイルと熱交換し, 5 ⇒ 6 では, トルクチューブにおける熱交換で, コイル部への熱侵入を遮蔽しているとする。6 ⇒ 7 の流路では, 遠心力によるエンタルピーの減少がある。本論では, トルクチューブの熱交設計を除外するため, トルクチューブ接続点 7 の圧力と温度を設定し, 冷媒入り口に向かって, 熱物性値を計算することとした。

定常状態でエンタルピー H を r: 回転子半径, $\omega = 2\pi n$: 回転子の角速度, m: 冷媒の質量流量, 各部を下添字で区別すると,

$$H_7 - H_8 = \frac{\omega^2}{2}\left(r_7^2 - r_8^2\right), \quad H_3 - H_4 = \frac{\omega^2}{2}\left(r_3^2 - r_4^2\right) \quad (1)$$

$$H_6 - H_5 = \frac{\omega^2}{2}\left(r_6^2 - r_5^2\right), \quad H_2 - H_1 = \frac{\omega^2}{2}\left(r_2^2 - r_1^2\right) \quad (2)$$

$$H_3 - H_2 = Q_0/\dot{m}, \qquad H_6 - H_5 = Q/\dot{m} \quad (3)$$

の関係式が得られる。

また, 冷媒流路は十分大きく, 冷媒流慮の圧力損失を無視できるとすると, エントロピー S と圧力 P, 温度 T について

$$S_1 = S_2, \quad S_3 = S_4, \quad S_5 = S_6, \quad S_7 = S_8 \quad (4)$$

$$P_0 = P_1, \quad P_2 = P_3, \quad P_4 = P_5, \quad P_6 = P_7 \quad (5)$$

$$T_0 = T_1, \quad T_2 = T_3, \quad T_4 = T_5, \quad T_8 = T_9 \quad (6)$$

の関係がある。出口の温度 T_9, 圧力 $P_9 = P_8$ を決めれば, H_8, S_8 が与えられる。ω, r_8, r_7 を決めれば, 式 (1) より H_7, 式 (4) より S_7 が求められ, H_7, S_7 より, T_7, P_7 が与えられる。

入り口温度 T_0, 圧力 P_0 を決めれば, 式 (5), 式 (6) より, H_1, S_1 が与えられる。r_2, r_1 を決めれば式 (2), 式 (4) より, H_2, S_2 が求められ, T_2, P_2 が与えられる。回転子コイルによる熱負荷 Q_0 により冷媒は液相から気相へと相変化するものとし, 相変化のエンタルピー差 $H_3 - H_2$ に対応して, 質量流量 $\dot{m}$ を決められる。飽和蒸気圧の気体であると仮定し, S_3 が決まる。式 (1), 式 (4) より H_4, S_4 が求められ, T_4, P_4 が得られる。式 (5), 式 (6) より, $T_5 = T_4$.$P_5 = P_4$ であるから, 式 (2) より, H_6, $S_6 = S_5$ が求まる。

3. 近似計算　出入口の冷媒条件から計算を進めると, 6 ⇒ 7 の熱交換器の設計を律することとなる。熱交換器の設計を先行させると, 入口の温度, 圧力が, 冷却条件によって変化することを意味する。3 ⇒ 6 の流路では, 断熱を仮定しているので, 3 と 6 で熱物性値は概ね同じであると考えてよいこととなる。すなわち, 圧力差 $P_7 - P_9$ と $P_2 - P_0$ の大小を論ずることとなる。冷媒の気液密度比が, 回転数や回転子半径に制約条件となる。

出口温度 300 K, 出口圧力 1.2 ata, 回転子半径 0.25 m の場合の窒素冷媒における回転数と低温端圧力 P_1, 温度 T_1 について Fig. 2 に再掲する。航空機用回転機 [2] は, 回転数 5000 rpm, 回転子半径 60 mm, 風力発電用回転機 [3] は, 回転数 10 rpm, 回転子半径 1355 mm の設計が示されている。これらの設計例についてセルフポンピング効果を検証する。

4. むすび　冷媒流路の圧力損失を無視できると, 液相冷媒への遠心力と室温近傍の気相冷媒への遠心力の差が, 入口圧力の減圧を引き起こすと考えてよい。密度差を考えれば, セルフポンピング効果は常に期待できる。しかし, 現実には, トルクチューブの熱交換部における圧力損失をどれだけ低減できるかによって, セルフポンピング効果が得られるかが決まる。

講演では, 水素とネオン冷媒の場合の圧力, 温度についても報告する予定である。

参考文献

1. T. Hoshino, et al.: “Self pumping effect on liquid nitrogen cooled superconducting generator”, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 59, No. C1-15 (1998) p. 57
2. Y. Terao, et.al.: “Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Electric Aircraft Propulsion”, IEEE Trans. ASC, Vol. 28 (2018) 5208005
3. Y. Teraoet.al.: “Electromagnetic Design of 10 MW Class Fully Superconducting Wind Turbine Generators”, IEEE Trans. ASC, Vol. 22 (2012) 5201904

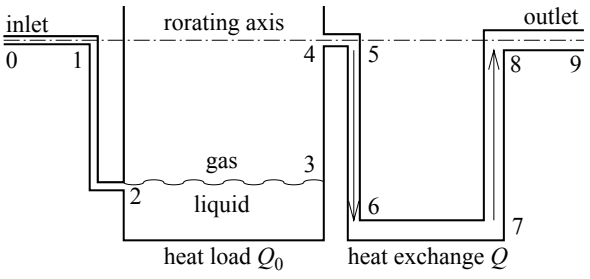


Fig.1 Sketch of self-pumping apparatus.

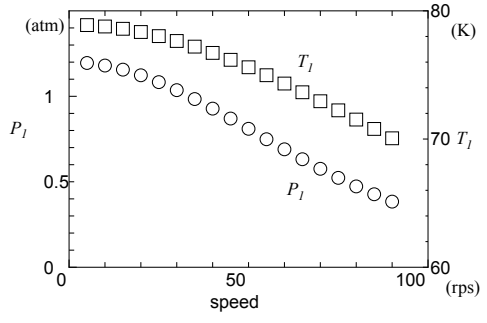


Fig.2 Self-pumping effect with nitrogen. R = 0.5 m [1]

超伝導バルクを用いた高 Q 値コイルの開発と無線電力伝送の高効率化

Development of High-Quality Factor Coils using Superconducting Bulk and High-Power Transfer Efficiency Wireless Power Transfer System Using Them

押本 夏佳, 作間 啓太, 關谷 尚人(山梨大学);小野 哲(電気通信大学)
OSHIMOTO Natsuka, SAKUMA Keita, SEKIYA Naoto (University of Yamanashi); ONO Satoshi (UEC)
E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

無線電力伝送(Wireless Power Transfer:WPT)はドローンや電気自動車などの非接触給電などで応用されている. WPT の伝送効率を高めるためには Q 値を向上させることが必要だが, 従来の銅コイルはこれ以上導電率を向上させることができない. これに対して, 銅コイルよりも非常に低損失な超伝導体を WPT の送受電コイルに用いることで伝送効率の向上が期待できる. そこで, 超伝導バルクを用いた高 Q 値コイルを提案し, 構造を最適化していない超伝導バルクコイルの Q 値測定から超伝導バルクコイルの導電率が銅コイルより 3 桁以上高いことを明らかにした[1].

本研究では超伝導バルクコイルの構造を最適化して高 Q 値コイルを開発し, それを WPT の送受電コイルに用いることで高効率化を図る.

2. 超伝導バルクを用いた高 Q 値コイルの開発

厚さ 1.5 mm, 直径 65 mm の超伝導バルクからサンドブラスト加工によって超伝導バルクコイルを作製し, それを 2 枚のサファイア基板で支持する. まず, 三次元電磁界シミュレータ CST studio を用いて, コイルの線幅・線間距離を変えたときの Q 値を求め, 最大 Q 値となるコイル構造を明らかにした. この構造を基に作製した超伝導バルクコイルと比較用の銅コイルの周波数特性を測定(Fig. 1)し Q 値を算出したところ, 超伝導バルクコイルの Q 値(9,431)は銅コイルの Q 値(750)の約 12 倍となることを明らかにした.

3. WPT の高効率化

開発した高 Q 値超伝導バルクコイルを WPT に応用した. WPT は 2 段のバンドパスフィルタの設計方法を用いて設計できる[2]. 伝送効率はネットワークアナライザで測定した. ①送受電コイルが超伝導バルクコイル同士の場合, ②送電コイルが超伝導バルクコイル, 受電コイルが銅コイルの場合, ③送受電コイルが銅コイル同士の場合における伝送効率を比較した.

Fig. 2 に各コイルの組合せにおけるコイル間距離に対する伝送効率の測定結果を示す. 超伝導バルクコイルを WPT に実用化する際, ②の条件で行う可能性が高いと予想されるが, ②は③よりも伝送効率が向上することを明らかにした. さらに, ①は②よりも伝送効率が向上し, コイル間距離 20 cm における伝送効率が, ①は 74.8%, ②は 52.8%, ③は 20.6%となり, コイルの Q 値が高いほど伝送効率が向上した. よって, 高 Q 値超伝導バルクコイルを用いることで WPT の高効率化を実現した.

4. まとめ

超伝導バルクから作製した超伝導バルクコイルの構造を最適化することで Q 値が銅コイルの約 12 倍(9,431)となる高 Q 値コイルを実現した. また, 高 Q 値超伝導バルクコイルを WPT の送電コイルに用いると, 銅コイル同士の WPT と比較して伝送効率が向上し, 送電コイル, 受電コイル両方を超伝導バルクコイルにすると, さらに伝送効率が向上した. 以上のことから, 超伝導バルクは高周波応用できる可能性があることを初めて示した.

謝辞

超伝導バルクコイルは日本製鉄によって作製された.

参考文献

1. T. Fujita, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 31 (2021) no. 1500604
2. K. K. Ean, et al: in Proc. IEEE Wireless Microw. Technol. Conf. (2012) pp. 1-6

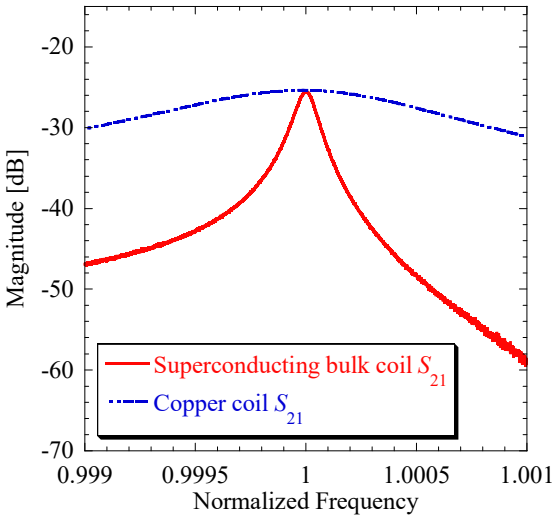


Fig.1 Frequency Response of Superconducting Bulk Coil and Copper Coil

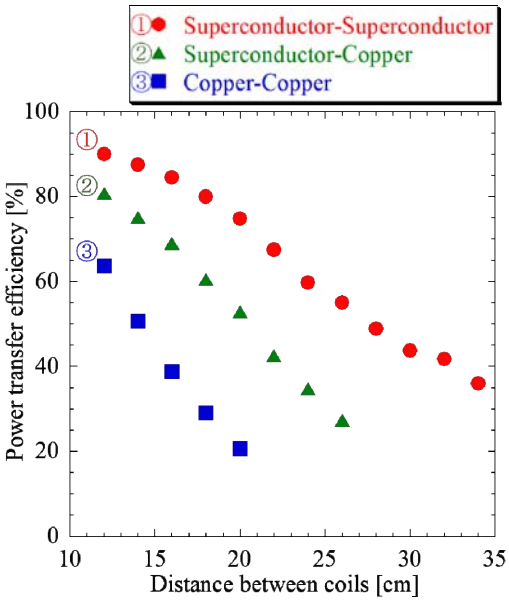


Fig.2 Power Transfer Efficiency versus Distance between Coils

高周波用超伝導線材を用いた高 Q 値ソレノイダルコイルの開発

Development of high quality factor solenoidal coils using superconducting wires for high frequency applications

内田 考紀, 作間 啓太, 關谷 尚人(山梨大);三浦 正志(成蹊大);小川 純(新潟大)
UCHIDA Takanori, SAKUMA Keita, SEKIYA Naoto (Yamanashi Univ.)
MIURA Masashi (Seikei Univ.) ; OGAWA Jun (Niigata Univ.)
E-mail: g21te006@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

カプセル内視鏡のような非常に小さなコイルへ高効率にワイヤレス電力伝送（WPT : Wireless Power Transfer）を行うためには，送受電コイル間の結合が小さいため，高 Q 値送電コイルが必要となる．これに対して我々は，高周波（数 10 kHz～数 10 MHz）で低損失を実現できる高周波用超伝導線材を開発し[1, 2]，それを用いてスパイラルコイルを作製することで，銅コイルよりも大幅に導体損失を低減し，約 14 倍も高い Q 値（約 14,000）のコイルを実現した[2]．また，高 Q 値コイルを WPT に用いることで伝送効率が大幅に改善できることを明らかにした[2].

本研究では，カプセル内視鏡の位置によって伝送効率が大きく変化しないように，スパイラルコイルと比較して中心を貫く磁界分布が均一であるソレノイダルコイルに高周波用超伝導線材を用いて，高 Q 値となるコイル構造（支持材や冷却用の容器を含む）を設計し，それを実証したので報告する．

2. コイルの設計と測定

ソレノイダルコイルの設計は 3 次元電磁界シミュレータ（CST Studio Suite）を使用した．高周波用超伝導線材の構造を図 1 に示す. 従来の REBCO 線材を 2 枚重ねて誘電体テープで一体化した構造となっている. 各 REBCO 線材の臨界電流は約 800 A である．ソレノイダルコイルの設計条件は，共振周波数 9 MHz 付近とし，長さ 9 m の高周波用超伝導線材を使用し，腹部の大きさを考慮しコイルの直径を 40 cm とした．図 2 に設計したコイルを示す．巻き数は 7 となった．ソレノイダルコイルを実現するためにはコイル形状を維持するために支持材が必要となる．しかし，発泡スチロールなどの誘電体損失の比較的小さな($\tan\delta = 2\times10^{-4}$)誘電体材料でも，超伝導線材を直接巻き付けてしまうと，誘電体損失によって大幅に Q 値が低下してしまう．これに対して，支持材に誘電体損失の非常に小さなサファイア棒($\tan\delta = 1\times10^{-7}$)を使用することを提案する. それによって支持材を使用しないときと同程度の Q 値を有するコイルを実現できる可能性をシミュレーションによって示した．

測定では超伝導コイルを液体窒素で冷却する必要があり，加工の容易さと低誘電体損失である発泡スチロールを容器として使用した．しかし，容器とコイル間の距離が近すぎても Q 値が低下するため，適切な容器とコイル間距離をシミュレーションによって決めた．詳細は当日報告する．

これら設計をもとに超伝導ソレノイダルコイルを作製（図 3 挿入図）し，ネットワークアナライザを用いて S パラーメタ（S21）を測定することで Q 値の算出を行った．図 3 に示すように銅と比べて急峻な周波数特性が得られ，超伝導コイルの Q 値は 13,755 となり，銅コイルの Q 値(1,037)の約 13 倍の非常に高い Q 値を得た．

3. まとめ

カプセル内視鏡用 WPT の高 Q 値送電コイルを実現するために高周波用超伝導線材を用いたソレノイダルコイルの設計を行い，支持材にサファイア棒を使用することで高 Q 値を有するコイルの設計を行った．実際に超伝導ソレノイダルコイルを作製し測定を行ったところ，銅コイルのおよそ 13 倍の Q 値(13,755)が得られ，高 Q 値ソレノイダルコイルを実現できた．

謝辞

本研究は令和 3 年度パワーアカデミー特別推進研究の補助を受けて実施した．

参考文献

[1] N. Sekiya et al., IEEE Trans. Superconductivity., vol. 27, no. 4, 6602005, June2017.
[2] 桶田 他，信学技報, vol. 121, no. 137, SCE2021-1, pp. 1-4, (2021-8).

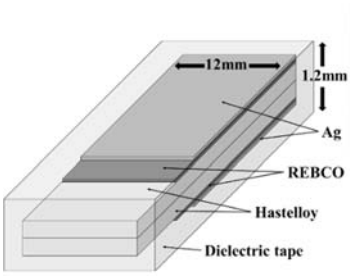


Fig.1 Superconducting wire

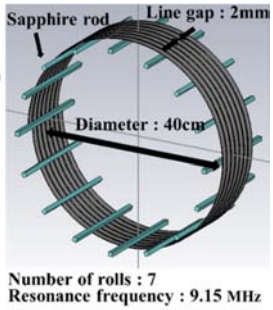


Fig.2 Designed coil

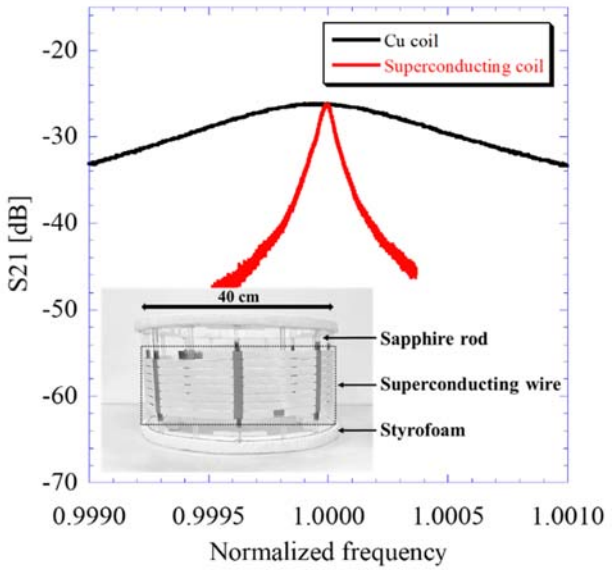


Fig.3 Frequency response

浮上力に対する低速回転超電導磁気軸受の回転損失特性の数値解析

Numerical Analysis of Rotational Loss Characteristics of Low-Speed Rotating Superconducting Magnetic Bearings for Levitation Forces

奥村 皐月, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大);桜井 雄基(岡山大);松村 知岳, 片山 伸彦(東大)
OKUMURA Satsuki, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (University of Tokyo);
SAKURAI Yuki (Okayama University); MATSUMURA Tomotake, KATAYAMA Nobuhiko (University of Tokyo)
E-mail: satsuki-okumura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

超電導磁気軸受(SMB)は低損失, 長寿命, 省メンテナンスという特徴からフライホイールエネルギー貯蔵システムや人工衛星搭載用軸受[1]への応用が検討されている. 研究対象とする人工衛星搭載用低速回転 SMB は Fig. 1 (a)に示すように直径が約 600 mm と大きいことから, 回転子は分割された平行着磁永久磁石と鉄ヨークで構成されており, 固定子は分割されたバルク超電導体で構成されている. このような構造から SMB を設計する際には回転損失特性を含む電磁界特性を詳細に検討し, 最善な設計を行うことが重要である. 本研究では 3 次元超電導数値解析を行い, 回転損失メカニズムを電磁気学的に明らかにする. また, 回転子の永久磁石が非軸対称であることや固定子の超電導体が分割されていることの影響を評価する.

2. 解析手法とモデル

H-ϕ 法(2)と A-V 法を組み合わせた解析手法とモデルを使用して SMB の回転損失について解析を行った. この手法は回転子が発生する磁界の計算に ϕ 法, 固定子の超電導体に誘起される電流の計算に H-ϕ 法, 超電導電流による磁界によって固定子に誘起される渦電流の計算に A-V 法を用いる. 解析対象とした SMB のパラメータを Table 1 に示し, 解析モデル形状を Fig. 1 (b)に示す. 解析には汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics を用い, 超電導体の電流電圧特性として n 値モデルを使用している.

3. 解析結果と考察

異なる浮上力での数値解析の結果を Fig. 2 に示した. 回転損失には固定子側の超電導損失と回転子側の渦電流損失がある. 浮上力の増加に伴い両方の損失とも増加した. 固定子側の超電導損失は浮上力が小さい場合, 小さくなった. 一方, 回転子側の渦電流損失は浮上力が 0 N 付近でも 0 mW にはならなかった.

損失発生メカニズムについて考察する. 回転子の位置が磁界中冷却位置から変化すると, 浮上力を発生させる電流が超電導体に流れる. 永久磁石が平行着磁されているものが周方向に並んでいることから, 永久磁石が作る磁場は空間的に非軸対称である. 回転子が回転すると, 永久磁石が作る非軸対称の磁場に応答する電流が超電導体に流れる. この超電導電流は回転子の回転に同期して移動する. また, この超電導電流は超電導体が分割されていることにより振幅が変化する. したがって, 固定子側に超電導損失が発生する. 超電導電流が作る磁場は浮上力を発生させる超電導電流が作る磁場に永久磁石が作る非軸対称性に応答する超電導電流が作る磁場が重畳される. したがって, 渦電流損失が発生する.

つまり, 浮上力が 0 N の場合でも永久磁石が作る非軸対称的な磁場に応答する超電導電流が発生するため, 低浮上力でも渦電流損失が発生することが明らかになった.

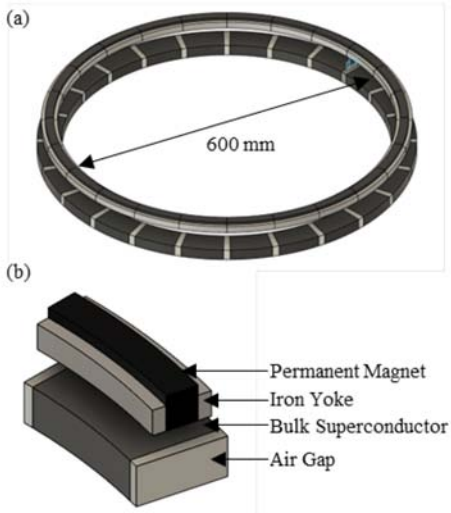


Fig. 1 (a)Schematic view of SMB, (b) Model build in COMSOL.

Table 1 Specifications of analyzed SMB.

Rotor (PM)	
Width × Height	12 mm ×14 mm
Angle	15 deg.
Residual magnetic flux density	1.2 T
Relative magnetic permeability	1
Conductivity	1.25×10^{6} S/m
Rotor (Iron yoke)	
Width × Height	5 mm × 10 mm
Angle	15 deg.
Permeability	100
Relative magnetic permeability	1.00×10^{8} S/m
Stator (YBCO)	
Width × Height	34 mm × 16 mm
Angle	13 deg.
Critical current criterion E_C	1.00×10^{-4} V/m
J_C	3.30×10^{8} A/m^2
n	21
B_0	0.35

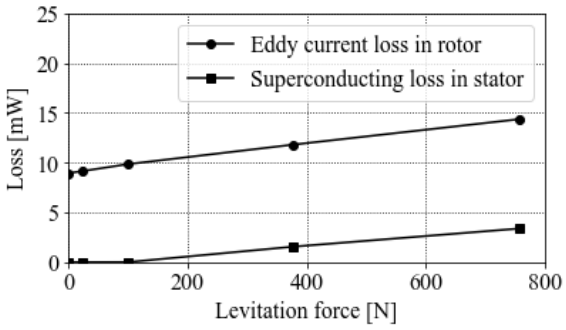


Fig. 2 The numerical analysis results for different levitation forces.

参考文献

1. Y. Sakurai, et al.: *Proc. SPIE 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX;* 107080E (2018)
2. A. Arsenault, et al.: *IEEE TAS*, Vol. **31**, No. 2 (2021)

SMB 用高温超電導バルク/コイルの運用温度に関する実験検討

Experimental Study on Operation Temperature of HTS Bulks and Coils for SMB

宮崎 佳樹, 山下 知久, 坂本 泰明, 富田 優(鉄道総研)

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

1. はじめに

超電導磁気軸受(SMB)[1]の運用温度を向上すれば、冷却に必要な電力を低減できる。超電導バルクと超電導コイルを組み合わせた SMB の浮上力等の特性と、超電導バルク/コイル温度との関係はこれまで十分に調べられていない。そこで、超電導バルク/コイル温度が SMB 特性に与える影響について、臨界電流モデルを用いた浮上力の解析ならびに超電導バルク温度を変えた場合の浮上力確認試験を実施した。

2. SMB の超電導コイル、バルク

Fig. 1 に SMB の超電導コイルとバルクの構成、Table 1 に各諸元を示す。超電導コイルは 40K においても必要な浮上力を賄える臨界電流特性を有する線材を用い、ダブルパンケーキコイルを 5 個スタックしている。超電導バルクは直径 140mm と 90mm のものを組み合わせている。超電導コイル上面と140mm超電導バルク下面のギャップは 20mm に設定している。

超電導コイルは、冷凍機コールドヘッドに取り付けたヒーター、超電導バルクは、直径 90mm バルクの下面に取り付けたヒーターにより温度制御している。

3. 超電導コイル負荷率

超電導線材の臨界電流は磁場、角度、温度依存性を持つため、コイル形状にした時に経験する磁場、角度ごとに超電導線材の負荷率を見積もった。Fig. 2 に通電電流 160A、30K、40K のときの負荷率分布を示す。30K において負荷率は 35%程度であり、40K においても負荷率は 60%を下回る程度で通電余裕があることがわかる。

4. 超電導バルクの浮上特性

超電導バルクの運用温度による浮上力特性を把握するため、簡易的に臨界電流モデルを用いて計算を行った。実際に試験に用いた超電導バルクの臨界電流特性は未知のため、まず30Kの実験結果にフィッティングするように臨界電流を定め、それをもとに臨界電流の温度依存性[2]を考慮してバルク温度が40K～60Kのときの浮上力を求めた。

試験結果との対応をFig. 3に示す。100A程度までは30、40、50Kでは浮上力に大差はなく、臨界電流モデルでもある程度の浮上力の見積もりが可能であることがわかった。しかし通電電流を増加していくと、特に50Kにおける浮上力計算結果は実験結果との差異が確認できる。臨界電流モデルでは臨界電流の磁場、電界依存性を考慮していないため、計算結果と実験結果に差異が生じたことが考えられる。60Kにおいては80A付近から計算結果/実験結果の乖離が目立ってくる。実際の超電導バルク内部には温度分布が生じており、一定温度の臨界電流を仮定した解析条件とは異なることも原因のひとつと考えられる。

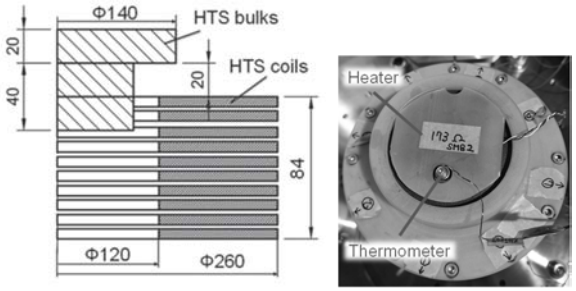


Fig. 1 (a) HTS coils and bulks for SMB, (b) Heater attachment on HTS bulk .

Table. 1 Specifications of HTS coils and bulks.

Wire	Type	REBCO
Wire	Width(mm)	6
	Thickness(mm)	0.1
	Inner diameter(mm)	120
	Outer diameter(mm)	260
	Thickness Double pancake(mm)	17.6
	Inductance(H)	4
Bulk	**Type**	**REBCO**
	Diameter of large bulk(mm)	140
	Diameter of small bulk(mm)	90
	Thickness(mm)	20

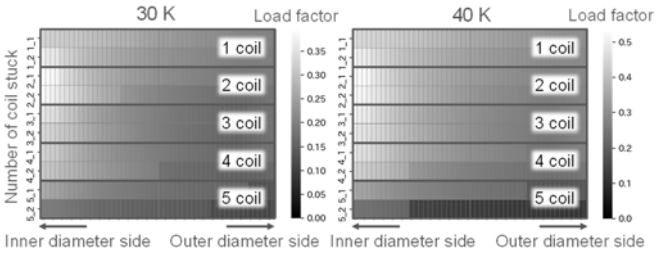


Fig. 2 Load factor of HTS coils in 30, 40K.

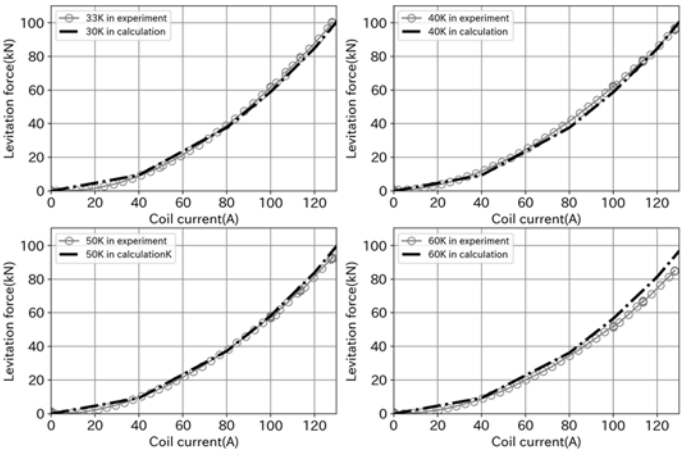


Fig. 3 Comparison of levitation force of temperature dependence in HTS bulks.

参考文献

[1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, **103** (2022) 168
[2] S. Nariki, et al.: TEION KOGAKU, Vol. 40 No. 7(2005)

吸引型磁気浮上システムにおける HTS バルク形状の検討

Study on HTS Bulk's Shape in Attraction Magnetic Levitation System

中村 幸太, 園田 翔梧, 高尾 智明, 中村 一也(上智大学);塚本 修巳(横浜国立大学)
NAKAMURA Kota, SONODA Shogo, TAKAO Tomoaki, NAKAMURA Kazuya (Sophia University);
TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University)
E-mail: k-nakamura-3l9@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

強磁性体レール, HTS バルク, HTS コイルから構成される吸引型磁気浮上システムについて研究している[1][2]。HTS バルクの磁気遮蔽効果を用いることにより, 浮上距離を無制御で一定に保つことが可能である。研究の進展により, HTS コイルの形状を従来の円形からレーストラック型に変更しているため, HTS バルクの形状を検討する必要がある。

本研究では, レーストラックコイルモデルにおいて, HTS バルクの長手方向の長さを変化させ, 浮上力への影響を検討した。

2. 浮上原理と解析モデル

Fig. 1 に解析モデルを示す。鉄レールと HTS バルク間の距離を *Gap* と定義する。*Gap* が小さくなった場合, つまり鉄レールと HTS バルクが近い場合, バルクの磁気遮蔽によりレールに到達する磁場量が減少する。よって, コイルとレールの吸引力が減少するため, 元の位置に戻る。反対に *Gap* が大きくなった場合, つまり鉄レールと HTS バルクの距離が遠い場合, バルクの磁気遮蔽が弱まるので, レールに到達する磁場量が増加する。よって, コイルとレールの吸引力が増加するため, 元の位置に戻る。以上が, 我々が提案している磁気吸引型浮上システムの浮上原理である(原理の詳細は[2])。ここで *Gap* が増加することによって, 浮上力が増加する領域を安定領域と定義する。また, 本研究では, 鉄レールへの吸引力を車体の浮上力として定義する。

Table 1 に材料諸元を示す。レーストラックコイルの内径は 60 mm, 外径は 97 mm, 直線部の長さは 50 mm である。HTS バルクの下部の長手方向の長さを L_b とし, L_b を変化させることによって, 浮上力特性への影響を解析した。解析に使用したソフトは COMSOL Multiphysics (version 6.0)である[3]。

3. 解析結果

Fig. 2 に浮上力解析結果を示す。横軸は *Gap*, 縦軸は各 L_b における浮上力である。L_b = 90, 115 mm のとき, 最大浮上力は *Gap* = 0.4 mm となったが, 安定領域は狭い結果となった。L_b = 140 mm のとき, 最大浮上力は *Gap* = 0.4 mm であり, 安定領域は最も広い結果となった。L_b = 190 mm のとき, 最大浮上力は *Gap* = 0.2 mm となり, 安定領域は狭い結果となった。HTS バルクの長手方向の長さが短い時, コイルから発生する磁場が遮蔽されずにレールに到達するため, *Gap* を変化させても浮上力はほぼ一定の値となる。反対に長くした時, コイルから発生する磁場が多く遮蔽されるため, 安定領域は狭くなり, 最大浮上力も減少する。

以上より, L_b = 140 mm のとき, 安定領域は最も広くなった。

4. まとめ

本研究では, レーストラックコイルモデルにおいて, HTS バルクの長手方向の長さを変化させることに着目した。その結果, L_b = 140 mm において, 安定領域は最も広くなった。よって, バルクの長手方向の長さが浮上力に与える影響について示すことができた。

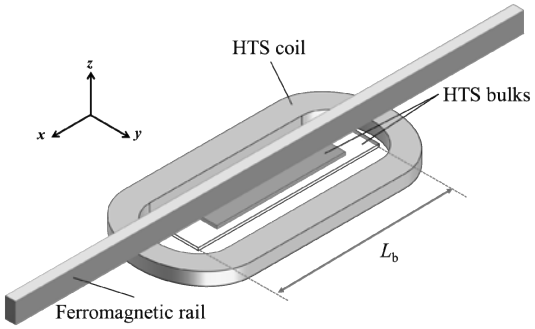


Fig. 1. Analysis model.

Table 1. Specifications of analysis model.

Component	Dimension [mm]
Ferromagnetic rail	$x \times y \times z$: 400 × 8 × 16
HTS bulk (upper)	$x \times y \times z$: L_b × 20 × 2
HTS bulk (lower)	$x \times y \times z$: (L_b − 30) × 10 × 2
HTS racetrack coil	Inner dia.: 60, Outer dia.: 97, Height: 9.7, Straight section: 50

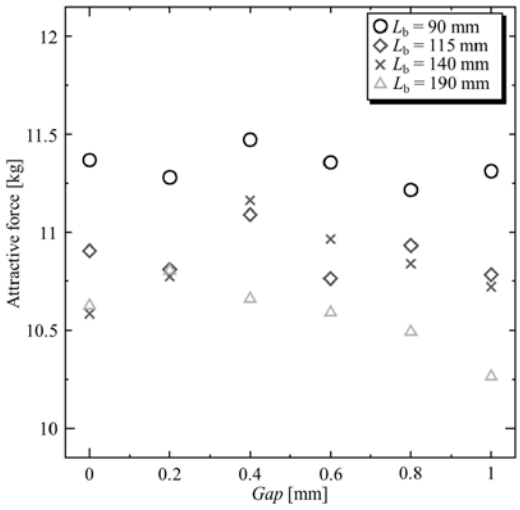


Fig. 2. Attractive force by varying the L_b.

参考文献

1. K. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.16.
2. Y. Kaneko, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30, no. 5, (2020), Art. no. 3601706.
3. KESCO 「 COMSOL 」, 〈https://kesco.co.jp/comsol/〉 2022 年 11 月 1 日アクセス.

ホール素子を用いた超電導ケーブルコア周囲の磁場分布測定(2)

Measurement of magnetic field density distribution around the superconducting cable core by Hall probe method(2)

大倉 大佑, 筑本 知子, 山口 作太郎（中部大学）
OHKURA Daisuke, CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)
E-mail: ts21051-6669@sti.chubu.ac.jp

1. はじめに

超電導ケーブルの大容量化に向けての課題の一つは各素線に流れる電流の均流化させることである。高温超電導(HTS)線材の電気伝導特性はテープ面垂直方向にかかる磁場に大きく影響されることが知られている。超電導ケーブルコアは、Fig.1 に示すように、複数の線材を平行にかつ層状に配置された構造をしているため、通電時にはお互いの自己磁場による影響を受けると考えられる。そこで本研究では、ホール素子によりケーブルの各素線への通電条件により自己磁場分布がどのように変化するかの測定を行なってきており、前回までは、ケーブルの外導体の 1 ないし 2 本に電流を同じ向きに流した時の磁場分布測定結果について報告した[1-2]。今回は通電させる本数を増やした場合および、通電方向を反平行にしたときの結果について報告する。

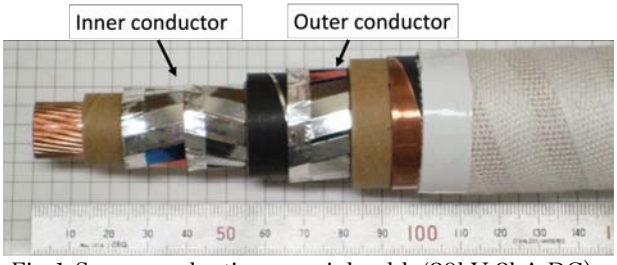


Fig.1 Superconducting coaxial cable(20kV-2kA,DC)

2. 実験方法

測定試料として、Fig.1 に示す定格 2kA の直流送電用ケーブルコア (DI-BSCCO®、内導体：11 本/12 本；外導体：16 本、外径 35mm、外導体巻ピッチ 300 mm) を用いた。磁場分布測定は Arepoc 社（型番：HHP-VP）の一軸型ホール素子を用い、Fig.2 に示すようにホール素子の回転方向に対してホール素子が垂直になるように配置してケーブルコアの周囲を回転させて行なった。

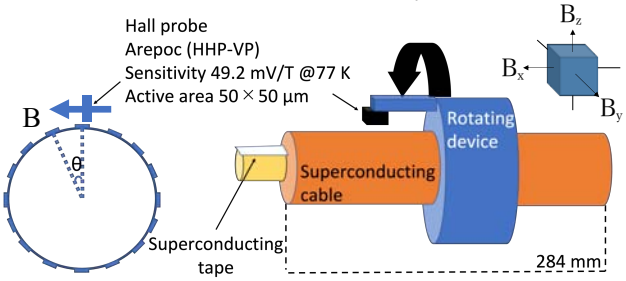


Fig.2 Layout for scanning Hall probe measurement

3. 磁場分布測定結果

Fig.3 にケーブルの外導体について、(a)任意の線材 2 本 (No. 1 .2)に同方向に電流を流した場合、(b)同じ線材 2 本（No.1. 2）に逆方向に I_a=100A の電流を流した場合の磁場分布測定結果を示す。(Field of two tapes current) またそれぞれについて比較として線材 1 本に電流を流した時の磁場強度の値を足し合わせた結果を示す。(Sum of individual fields)

Fig.3(a)では隣り合う 2 本同時に電流を流した際はそれぞれの導体の自己磁場が重畳され最大磁場強度が大きいが、単純な総和にはなっていないことがわかる。その差の最大値は B_{max} で 0.5 mT であった。また Fig.3(b)より、線材同士を逆向きに電流を流した際はお互いの自己磁場の影響で磁場が打ち消しあっているがこちらも最大値が一致していないなど単純和となっていないことから、一本流した場合と比較して 2 本流した場合にはそれぞれの自己磁場の影響を受けていることが示唆される。

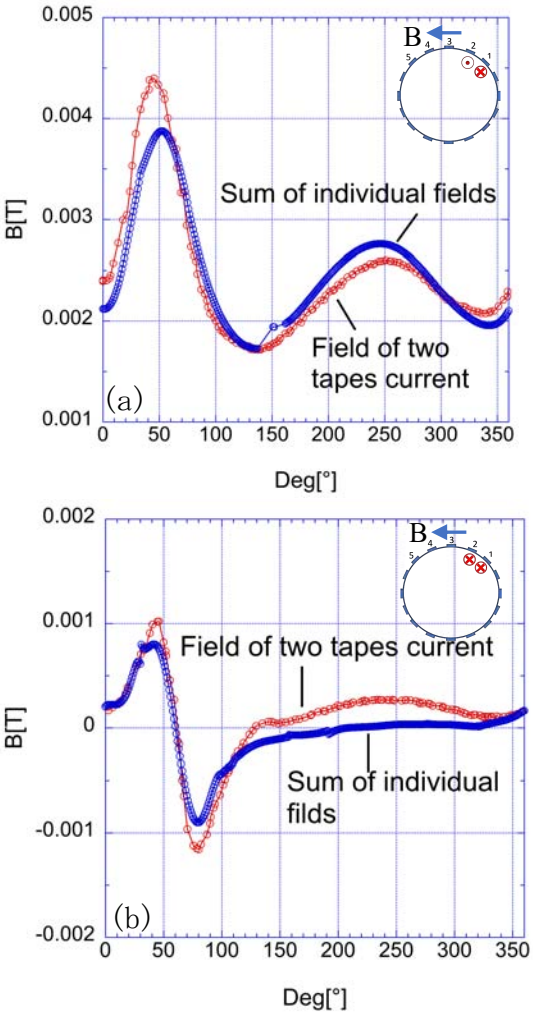


Fig.3 Magnetic field distribution around cable core measured by Hall sensor, when the current is passed into two tapes for same direction (a), and for opposite direction (b). In both figures, the measured profile was compared with “the sum of individual fields”, a simple addition of the magnetic field distribution when an electric current is applied to each tape.

参考文献

1. N.Chikumoto, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) p.142
2. D.Ohkura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.37

Realization of Wide-range Measurement on Electric-field versus Current-density Characteristics from 10^{-5} V/m down to 10^{-11} V/m Based on Hall-probe Magnetic Microscopy

WU Zeyu, KISHIKAWA Sohki, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.)
E-mail: z.wu@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. Background

Electric-field (E) versus current-density (J) characteristic is an important property of high-temperature superconductor. For not only understanding the vortex dynamics under the influence of thermal fluctuation, but also for the applications of wide aspect of AC and DC operation mode, which requires more than 8 orders of magnitude of electric field depending on the operation frequencies. Many previous works have presented with discrete and semi-quantitative results by combining transport (10^{-5} ~ 10^{-2} V/m) and magnetic measurements such as vibrating sample magnetometry (10^{-9} ~ 10^{-5} V/m), 3rd harmonics measurement (10^{-8} ~ 10^{-4} V/m) and SQUID magnetometer (< 10^{-7} V/m) [1, 2]. However, the previous methods could not yet fully cover the dynamic ranges of the electric field continuously. In this study, we have demonstrated a systematic methodology by using Hall-probe magnetic microscopy in order to obtain the E-J characteristics with the dynamic range of E from 10^{-5} V/m down to 10^{-11} V/m benefiting from high temporal resolution of the Hall-probe magnetic microscopy and flux annealing method.

2. Methodology

A 5-mm-width REBCO coated conductor was measured at 5 K and 2.5 T of perpendicular magnetic field to the tape surface. After magnetizing the sample, relaxation of the magnetic field, B_z, at the center of the sample was measured by fixed-point (0-D) mode and followed by the line scan (1-D) mode [3]. The relaxation of the magnetization current, $I(t)$, was derived by solving the inverted Biot-savart law from the magnetic field decay, while the relaxation of the electric field, $E(t)$ was derived by solving Faraday's law.

3. Result and discussion

Fig. 1 is the results of $I(t)$ and $E(t)$ measured at fixed temperature of 5 K. By measuring the initial relaxation with temporal resolution less than 0.1 s, electric-field window was extended up to 10^{-5} V/m, while relaxed to 3×10^{-10} V/m for 20000 s. However, the relaxation becomes very small and have to wait a long time in order to reach an ultra-low electric field range according to the relation where $E \propto 1/t$. Instead of carrying out long-term relaxation measurement, "flux annealing" was adopted to access to the desired electric field faster. The concept of the "flux annealing" is to decrease the load factor by magnetizing the sample at higher initial temperature (T_{ini}) and followed by cooling to the measuring temperature. An example of I and E at T_{ini} = 7 K were shown in Fig. 1. After cooling down to desired 5 K at ~120 s, relaxation rate becomes slow and approach to that of 5 K. The time-axis was adjusted by an offset value to be 1100 s, and both agree well without regard for relaxing at fixed temperature or "flux annealing" mode. This offset value is the time we can skip to access to lower load factor and electric-field window. The E-J characteristics obtained by this "flux annealing" mode was shown in Fig. 2 with different T_{ini} up to 12 K, as can be seen in the figure, we observed clear kink in the E-J characteristics after cooling down the sample, which corresponds to the transition of E-J characteristics to that of 5 K with very low electric fields. By this method, we have succeeded in measuring the E-J characteristics down to the range of 10^{-11} V/m.

Acknowledgement: This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP19H05617 and JP22K20430.

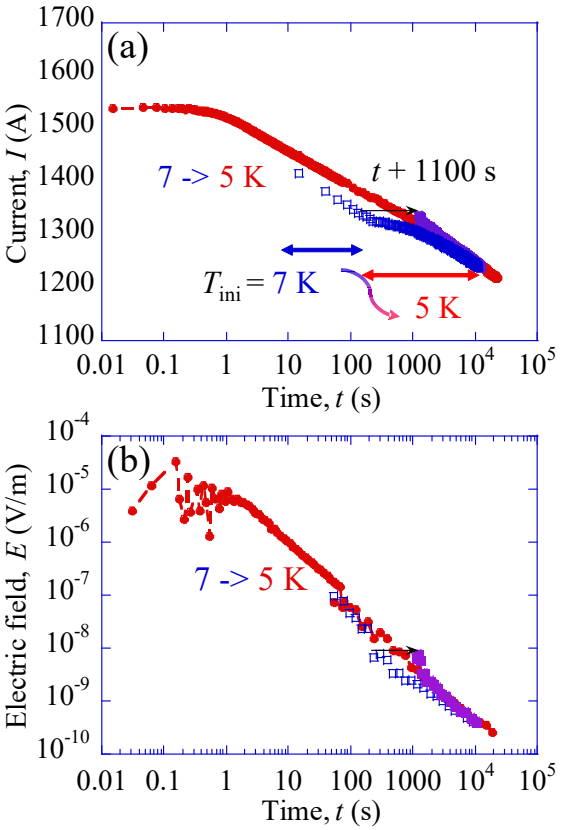


Fig. 1. Relaxation measurements at fixed 5 K (closed circle) and "flux annealing" mode (open square). Time-axis of magnetization current was adjusted by timescale offset to be 1100 s (closed square). (b) Relaxation of electric field at fixed 5 K (closed circle) and flux annealing mode (open square), as well as after adjusting the time-axis (closed square).

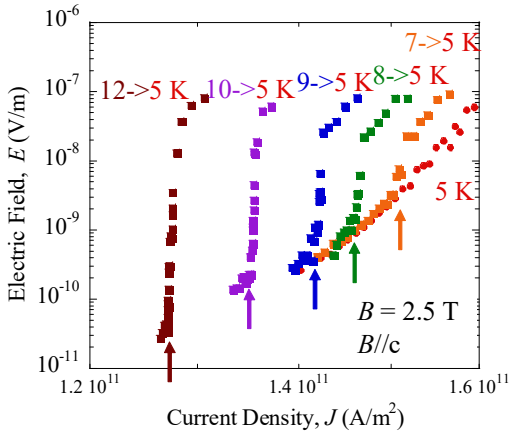


Fig. 2. E-J characteristics obtained at fixed 5 K (closed circle) and adopting the "flux annealing" method at T_{ini} = 7 ~ 12 K (closed square).

Reference: [1] Ö. Polat *et al*, *Phys. Rev. B* 84, 024519 (2011).
[2] H. Yamasaki et al., *IEEE TAS*, 15, pp. 3636-3639 (2005)
[3] Z. Wu *et al, Abstract of CSSJ*, 3B-a07

機械学習を用いた磁気顕微鏡観察による長尺 REBCO 線材内の局所 I_c 不均一性の検出：画像分類と物体検出の比較

Detection of local I_c inhomogeneity in long REBCO coated conductor by introducing machine learning based image analysis in magnetic microscopy: Comparison between classification and object detection

木須 隆暢, SOMJAIJAROEN Natthawirot, 今村 和孝, 寺﨑 拓也, 呉 澤宇, 東川 甲平（九州大学）
KISS Takanobu, SOMJAIJAROEN Natthawirot, IMAMURA Kazutaka, TERAZAKI Takuya, WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei
(Kyushu University)
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

筆者等の研究グループでは、先行研究において、長尺 REBCO 高温超伝導線材のリール式磁気顕微鏡観察に深層学習による画像解析を導入し、数千枚の磁気観察像における局所 I_c 低下部位の検出について報告した[1]。本報告では、その代表的画像解析手法である、画像分類モデルと物体検出モデルについて、マルチカテゴリーの画像分類による結果と物体検出による欠陥サイズとの対応を調べ、検出された欠陥の数やそのサイズの分布など両者の比較を行い、その定量的関係や整合性について検討した。

2. マルチカテゴリーの画像分類を用いた欠陥検出

本研究では、model の基本アーキテクチャとして事前学習を行った GoogleNet [2]を用い、出力層を 1) 健全画像、2) Small size 欠陥(7.1±1.2 mm) を含む画像、3) Medium size 欠陥(12.7±3.5 mm を含む画像)、4) Large size 欠陥(21.8±5.8 mm)を含む画像の4つのカテゴリーに変更すると共に、我々の磁気顕微鏡観察で取得した各カテゴリーの磁化電流マップの像を教師データとして用いて学習を行い、ネットワークのパラメータの fine tune を行った。得られたモデルを用いて、入力画像を分類した例を Fig. 1 に示す。

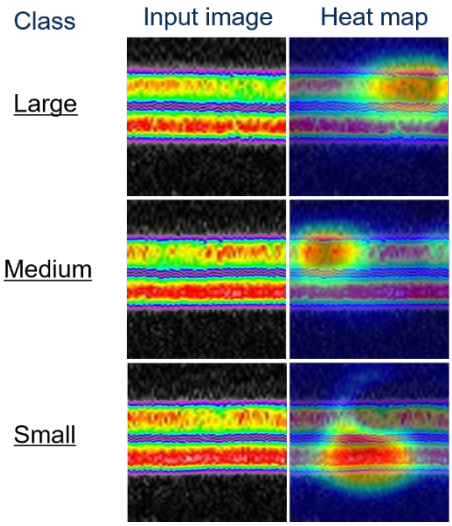


Fig. 1 The results of image classification for the three categories, Large-, Medium- and Small-size defects, together with heatmap.

3. Object detection による欠陥検出

局所 I_c 低下部位の位置情報やドメインサイズの情報を、より直接的に得るために、object detection モデルを作成し、I_c 低下領域を bounding box を用いて特定した。本モデルは、アルゴリズムに Faster R-CNN [3]を用い、欠陥位置の分類と、位置情報に bounding box を当てはめる regression とを行う。本モデルで検出した局所 I_c 低下領域の例を Fig. 2 に示す。

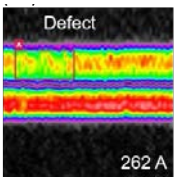


Fig. 2 A result of object detection with bounding box shown by the red square. Minimum I_c at this section was 262 A.

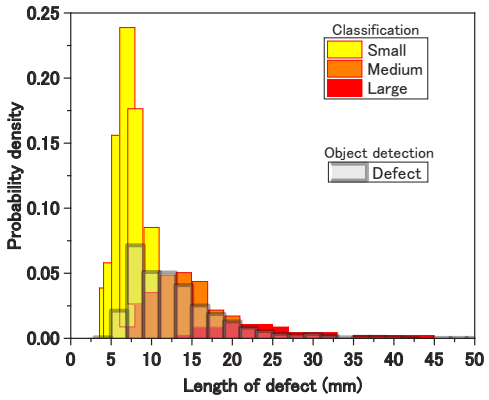


Fig. 3 Defect size distribution evaluated from multi-category classification and object detection.

4. マルチカテゴリー画像分類と Object detection の比較

画像分類によって得られた3種類の欠陥サイズの統計分布はそれぞれ、教師データの欠陥サイズの統計分布に等しいと仮定し、検出した全ての欠陥の頻度をもとに確率密度分布としてマッピングした結果を Fig. 3 に示す。また Object detection では、直接欠陥部位のサイズの検出が可能であるため、サイズ分布を導出し、その結果を画像分類の結果に重畳したものを Fig. 3 に示す。Object detection では 747 個の欠陥領域を検出しており、画像分類で得た Large size 欠陥と Medium size 欠陥を足した 696 と定量的によく一致し、その分布も類似していることが分かった。一方、Object detection model では I_c の局所低下を誘起している部分を教師データとして用いたため、最小検出欠陥領域は 5 mm 程度となった。その結果、この閾値より小さなサイズを有する画像分類で分類した Small size 欠陥の大半は、object detection model では検出にかかっていないと考えられる。

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] N. Somjaijaroen et al., IEEE TAS, Vol. 32, 6601504, 2022.
[2] C. Szegedy, et al., IEEE Conf. Comp. Vision and Paterne Recognition, 2015.
[3] C. Lee et al., *16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016)*, 2016.

パルス電源の回路シミュレーションを用いた回路のパラメータの最適化

Optimization of Pulsed Current Circuit Parameters Using Circuit Simulation of Pulsed Power Supply

坂井 巌(名大工)、土屋 雄司(東北大)、小濱 芳允(東大)、吉田 隆(名大工)
SAKAI Itsuki(Nagoya University); TSUCHIYA Yuji(Tohoku University); KOHAMA Yoshimitsu(University of Tokyo); YOSHIDA Yutaka(Nagoya University)
E-mail: sakai.itsuki.m2@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

近年、超伝導コイル、加速器など、大規模な機器への超伝導の利用が期待されている[1]。これらの超伝導機器の性能評価では、パルス電流が利用されることがある。限流器、変圧器などの、電気デバイス用の HTS マグネットの過電流通電時のシミュレーションとして、159 A のパルス電流が通電されるなど、超伝導機器へのパルス電流通電が必要とされている[2]。パルス電流源を作製する際の問題の 1 つとして、回路中のインダクタンスとキャパシタンスによる電流の発振が発生すること挙げられる。

本研究では、シミュレーションによるパルス電源の電流振動の抑制を目的として、シミュレーションを用いてパルス電源回路を作製、回路のパラメータを変更して電流波形を観測した。

2. 実験方法

直流 4 端子法及び LCR メーターを用いて、Fig. 1(a)に示す直流電圧源からの配線の抵抗 R_{cableP}, 制御回路からの配線の抵抗 R_{cableC}, 直流電圧源からの配線のインダクタンス L_{cableP}, 制御回路からの配線のインダクタンス L_{cableC} を測定した。これらの測定結果をシミュレーションに用いた。

3. シミュレーション方法

MATLAB と Simulink を用いて、抵抗、キャパシタ、インダクタ、オペアンプ、IGBT、直流電圧源、パルス電圧源を配置し、Fig. 1(a)に示すフィードバック回路を用いたパルス電源を作製した。ここで、I_{test} の大きさは、I_{test} がすべて R_{sense} に流れると仮定すると、以下の式で表される[3]。

$$I_{\mathrm{test}} = \frac{V_{\mathrm{pulse}}\left(1+\frac{R_{\mathrm{NFB2}}}{R_{\mathrm{NFB1}}}\right)}{R_{\mathrm{sense}}}$$

I_{test} の波形を電流計とスコープを用いて表示した。Table 1 に R_{cableP}, R_{cableC}, L_{cableP}, L_{cableC} 以外のブロックの値を示す。この時、上式から I_{test} = 20 A となる。パルス幅は 1 ms とした。パルス電流に含まれる電流の振動の大きさを評価するため、パルス波形が立ち上がった後の I_{test} の最大値を I_{max}、最小値を I_{min} として、$I_{\mathrm{max}} - I_{\mathrm{min}}$ の値を測定した。また、I_{max} と I_{min} の平均値を I_{ave} とした。

4. 実験結果及び考察

直流 4 端子法を用いて配線抵抗を測定した結果、R_{cableP} = 3.72 mΩ, R_{cableC} = 531 mΩ であった。LCR メーターを用いて配線インダクタンスを測定した結果、 L_{cableP} = 2.017 μH, L_{cableC} = 0.855 μH であった。Fig. 1(b)に、配線抵抗、インダクタンスを追加したときの、$I_{\mathrm{max}} - I_{\mathrm{min}}$, I_{ave} の値の変化を示す。Fig. 1(b)の内挿図に、I_{test} の波形の例を示す。配線抵抗、インダクタンス有のとき、$I_{\mathrm{max}} - I_{\mathrm{min}}$ = 2.66 A, I_{ave} = 18.0 A であった。一方、配線抵抗、インダクタンス無の時は $I_{\mathrm{max}} - I_{\mathrm{min}}$ = 0.167 A, I_{ave} = 18.3 A であり、$I_{\mathrm{max}} - I_{\mathrm{min}}$ の値は小さくなった。 したがって、回路の配線のインダクタンスと IGBT の寄生容量との発振によって電流の振動が発生すると考えられる。

当日は、シミュレーションで求めた素子の組み合わせで実際にパルス電源回路を作製したときの電流波形について報告する予定である。

Table 1 Voltage, resistance and capacitance values.

Parameters	Values
V_{DC}	10 V
V_{pulse}	0.1 V
V_+, V_-	±15 V
R_{sense}	10 mΩ
R_{NFB1}, R_{NFB2}	1 kΩ
R_{g}	10 Ω
R_{pd}	1 kΩ
R_{att}	10 Ω
C_{LPF}	10 μF

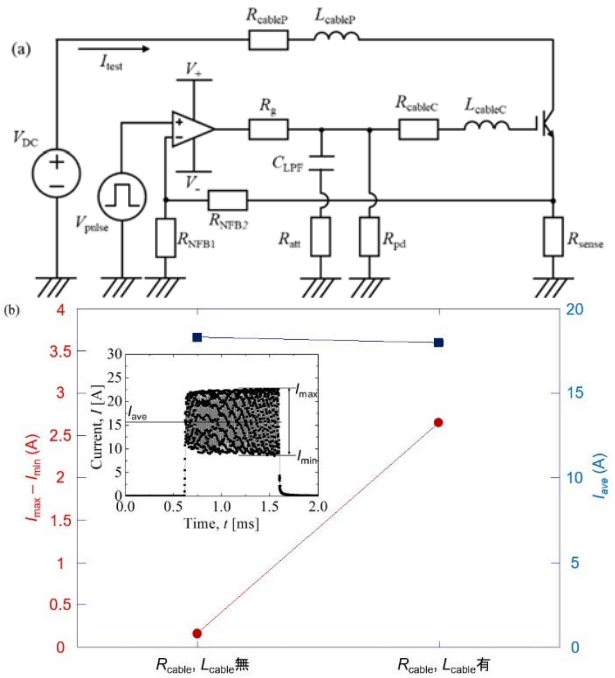


Fig. 1 (a) Circuit diagram of pulsed current circuit with feedback circuit. (b) Resistance and inductance of cable dependence of $I_{\mathrm{max}} - I_{\mathrm{min}}$ and I_{ave} by simulation. Inset shows pulse current waveform by experiment.

謝辞

本研究の一部は、鈴木商館-名大の共同研究、科学研究費補助金(20K15217, 20K20892, 22H00104, 22H01522)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20004)の助成の結果得られたものです。

参考文献

[1] T. Iwashita *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **14** (2011) 071301.
[2] A. Sugawara *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 1848-1851.
[3] F. Sirois *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 3585-3590.

パルス磁場およびパルス電流を用いた REBCO 線材の液体窒素温度における磁場中臨界電流評価

Evaluation of critical current of REBCO tapes at 77 K with pulsed current and pulsed magnetic field

土屋 雄司(東北大), 小濱 芳允, 神田 朋希(東大), 水野 謙一郎(MTL), 坂井 厳, 吉田 隆 (名大), 岡田 達典, 淡路 智(東北大)

TSUCHIYA Yuji (Tohoku Univ.), KOHAMA Yoshimitsu, KANDA Tomoki (Univ. Tokyo), MIZUNO Kenichiro (MTL), SAKAI Itsuki, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.), OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: tsuchiya@tohoku.ac.jp

1. はじめに

Bi 系および Y 系高温超伝導線材は、低温強磁場運転での NMR や強磁場マグネットへの応用や、液体水素温度運転での核融合炉、回転機への応用が注目されている。そのような中、世界各国で線材開発が進められており、素線の臨界電流 I_c は数 1,000 A まで向上している。機器設計に必要な I_c の測定には、強磁場、温度、磁場角度の環境が必要であり、限られた空間および冷却能力での大電流通電が課題となる。これに対して、我々はパルス通電により、20 T 超伝導マグネットの定常磁場中および 500 A 級のパルス電流を組み合わせた I_c 測定手法を開発した [1]。一方、定常磁場を超える強磁場の発生のためフラットトップパルス磁場とパルス電流の組み合わせによる 50 T 級強磁場中 I_c 測定手法が報告されている[2]。しかし、フラットトップパルス磁場および 1 A 以上のパルス電流による I_c 測定の報告は未だにない。

そこで本研究では、フラットトップパルスマグネット[3]とパルス電流による I_c 測定を組み合わせることで、強磁場中 I_c 測定装置の開発を行なった。

2. 実験方法

Fig. 1 に、測定回路の模式図を示す。フラットトップマグネットは、メインコイルで主な磁場を発生させた後、ピックアップコイルでの磁場変動がゼロとなるようにフィードバックしたミニコイルにて磁場を調整することで、フラットトップ磁場を得る[3]。磁場が安定した後、20 A、20 V のパルス電源により試料へ通電した。定常磁場中パルス通電測定と同じプローブをマグネットに挿入した。マグネット、プローブおよび試料は液体窒素により冷却した。パルス磁場の振幅は 0.6-10 T、フラット幅は 50 ms、パルス電流の振幅は 20 A、幅は 2 ms とした。試料電圧、試料電流、ピックアップコイル電圧を、絶縁オシロスコープにて測定した。試料はフジクラ社製の REBCO 線材 (FYSC-SCH04)を用いた。電圧端子間距離は、6 mm とした。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に、77 K、フラットトップパルス磁場 4 T にて REBCO 線材にパルス通電した際の磁場、電流および電圧の波形を示す。パルス磁場とパルス電流を同期することで、4 T のフラットトップパルス磁場中に、試料には 2 A おきに 0-20 A の電流が印加された。電流印加に対して、試料電圧は 0-80 μV まで非線形に上昇した。試料電圧および試料電流は、冪乗関数にてよくフィッティングされた。試料電圧のノイズは 2 μV であった。

当日は、測定装置の詳細、定常磁場中 I_c 測定の結果との比較、パルス磁場中の試料に対する磁場遮蔽の効果についても報告する予定である。

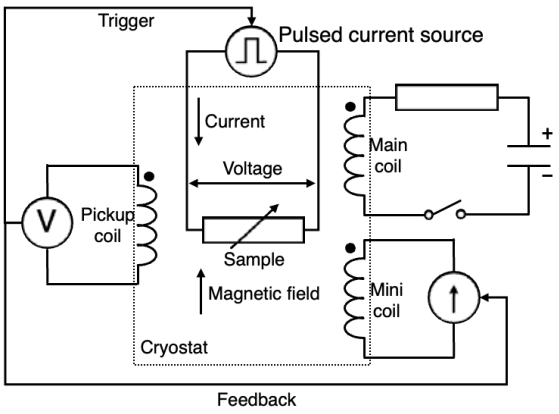


Fig. 1 Schematic diagram of pulsed current critical current measurement in flat-top magnet.

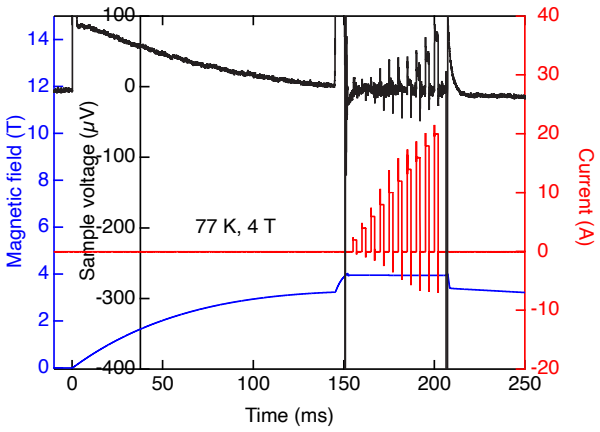


Fig. 2 Waveforms of magnetic field, voltage, and current during measurement of critical current in a REBCO tape at 77 K, 4 T.

謝辞

この成果は、名大-鈴木商館の共同研究、科学研究費補助金 (20K20892, 22H00104, 22H01522)、NEDO の助成事業（JPNP20004）の結果得られたものです。

参考文献

[1] Y. Tsuchiya *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, **103**, 110 (2022).

[2] M. Leroux *et al.*, Phys. Rev. Appl. **11**, 054005 (2019).

[3] Y. Kohama, K. Kindo, Rev. Sci. Instrum. **86**, 104701 (2015).

Reel-to-Reel 式本焼成炉による TFA-MOD YGdBCO+BZO 線材の作製

Development of TFA-MOD YGdBCO+BZO CCs by using a reel-to-reel system furnace

佐藤 迪夫, 高橋 保夫, 青木 裕治, 足立 和久（昭和電線）, 中岡 晃一, 和泉 輝郎(AIST)
SATO Michio, TAKAHASHI Yasuo, AOKI Yuji, ADACHI Kazuhisa(SWCC)
NAKAOKA Koichi, IZUMI Teruo(AIST)
E-mail: m.sato468@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

近年、温室効果ガスである CO_2 の排出抑制が世界的に求められている。航空機業界では国際航空運送協会 IATA (International Air Transportation Association)が、2050 年までに CO_2 排出量を 0%に削減することを 2021 年に表明している。この CO_2 削減目標値の達成に向け、バイオ燃料（SAF）への転換など新技術の開発は喫緊の課題である。推進システムの電動化に関する開発も精力的に進められている[1]。その中でも超電導技術を用いた推進システムは、鉄心が不要となる事から従来の電動機に比べて軽量化が可能であり且つ高効率になることが期待されている。

$REBa_2Cu_3O_y$ (REBCO)線材は、液体窒素温度下で超電導状態を示し、磁場中における臨界電流(I_c)が高いことからモーターや発電機、変圧器、ケーブルといった様々な危機への適用が期待されている。我々は、Trifluoroacetates Metal Organic Dposition (TFA-MOD)法を選択して開発を行っている。REBCO 線材をこれらの機器に適用するには高 I_c 化だけでなく長尺化が必須である。また、磁場中 I_c を維持する手段として磁束ピンニング点の導入が知られており、MOD 法では 3 次元形状の磁束ピンニング点 $BaMO_3$ (BMO : M = Zr, Hf)の導入で磁場中 I_c の向上が報告されている[2, 3]。更に、REBCO 相の結晶化温度より低い温度で熱処理をする中間熱処理を加えることで BMO が微細化し磁場中 I_c が向上することが報告されている[3-5]。

当社では Batch 式焼成炉を用いて中間熱処理を加えた長尺線材で、磁場中 I_c の向上を行ってきた[4, 5]。しかしながら、Batch 式焼成炉は装置サイズによって熱処理可能な線材長が制限されるため、炉体の大型化が要求される。その結果、熱容量が大きくなり中間熱処理温度と REBCO 相の結晶化温度における昇温制御に難があった。そこで長尺線材作製に適している RTR 焼成炉を新たに開発、導入して焼成条件の検討を実施した。

本報告では RTR 焼成炉による YGdBCO+BZO 線材の長尺線材作製の開発状況について報告する。

2. 長尺線材の作製

YGdBCO+BZO 線材の作製方法として TFA-MOD 法を用いた。面内配向した中間層付金属基板上に超電導溶液をディップコート法により連続的に塗布、仮焼成を行い所定の膜厚になるまで繰り返した。作製した仮焼膜を RTR 焼成炉にて中間熱処理及び本焼成を行い、超電導層を作製した。超電導層作製後、安定化層として DC スパッタリング法より Ag 層を形成した後、酸素アニールを行い YGdBCO+BZO 線材を作製した。

線材の結晶性は X 線回折法、I_c 特性は直流四端子法により評価を行った。I_c の電界基準は、1 μV/cm とした。長尺線材の I_c 分布の評価は、THEVA GmbH 社製、超電導線材特性評価装置(Tapestar^{TM})を用いた磁化法により液体窒素中(77 K)で行った。

3. 長尺線材の作製結果

図 1 に RTR 焼成炉で作製した 60m 級 YGdBCO+BZO 超電導線材の評価結果を示す。図より、線材長手方向に大きな I_c 劣化が無く、均一な I_c 分布が得られている。平均 I_c は 459 A/cm-w であることが確認された[6]。

RTR 焼成炉を用いることで、長尺線材を安定して作製出来ることが確認された。

発表では、更にスケールアップし 100m 級線材の作製結果及び磁場中特性について報告する。

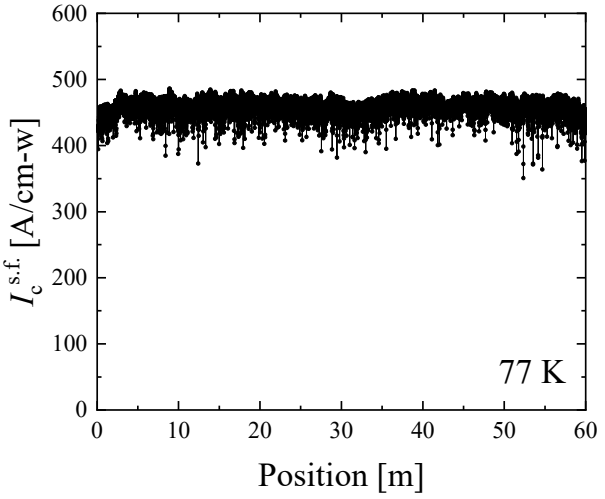


Fig.1 Self-field I_c distribution of 60 m class YGdBCO+BZO coated conductor[6].

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（JPNP15005）の結果得られたものです。

参考文献

1. T. Yutaka and O Hiroyuki: J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol. 57 No. 2 (2022) p.71
2. M. Miura, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 26 (2013) 035008
3. K. Nakaoka, et al.: J. Phys.: Conf. ser. vol. 1293 (2019) 012035
4. K. Kimura, et al.: SWCC review, vol. 60 (2014) p.20
5. K. Kimura, et al.: SWCC review, vol. 60 (2015) p.10
6. M. Sato, et al.: SWCC review, vol. 68 (2022) (in press)

RtR システムを用いた Vapor-Liquid-Solid -$YBa_2Cu_3O_y$厚膜線材の作製プロセス

Fabrication process of Vapor-Liquid-Solid thick $YBa_2Cu_3O_y$ coated conductors using RtR system

美和虎之介、吉田　隆（名大工）
MIWA Toranosuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya University)
E-mail: miwa.toranosuke.j2@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

現在、高温超伝導応用に向けて、$REBa_2Cu_3O_y$ (REBCO) 線材の高 I_c 化、長尺化が求められている。液相を介在して成長する Vapor-Liquid-Solid(VLS)成長法は、*a* 軸配向粒の発生を抑制し、I_c 飽和を防ぐことが期待されている[1]。我々は、静止系成膜においてこの VLS 成長法を用いて成膜速度 1.4 μm/min.で YBCO 厚膜を作製し、膜厚 10 μm で臨界電流 625 A/cm-width（77 K, 自己磁場中）を達成した。この VLS 成長法を Reel to Reel (RtR)システムに応用する際、Solid, Liquid, Vapor の三相を蒸着するため、線材を何度か往復させる必要があった。

本研究では、Liquid 相ターゲットを YBCO ターゲットの中心に埋め込んだドーナツ型ターゲットを用いることで、RtR-VLS-YBCO 線材の作製を簡便化した。また、これまで検討してきた VLS-YBCO 膜の表面観察から、成長が原料供給律速となっている可能性が示唆されている[2]。

そこで、高 I_c を有する RtR-VLS-YBCO 線材の高速作製を実現するため、原料供給量向上による線材厚膜化を検討した。

2. 実験方法

RtR システムにおいて PLD 法および VLS 成長法を用いて、RtR-VLS-YBCO 線材を以下の手順で作製した。Table1 に各手順の、酸素分圧 P_{O2}、レーザー周波数、基板温度 T_s、テープ移動速度を示す。まず、IBAD-MgO 基板に PLD 法で YBCO 線材を作製した。昇温した後、$Ba_3Cu_7O_{10}$(BCO)+Ag_2O 焼結体を中心に埋め込んだ YBCO ターゲットを用いて Liquid 相と YBCO 相を供給した。この際、ドーナツ型ターゲットの中心位置を制御することで、Liquid 相に対する YBCO 相の供給時間を 1~3 倍の範囲で変化させた。

作製した線材の電流特性について、線材を幅 100 μm、長さ 1 mm のブリッジに加工し、直流四端子法によりカンタム・デザイン社の PPMS を用いて測定した。I_c は、電界基準 1 μV/cm として算出した。

Table1 Deposition parameters of each phase.

Phase	Solid	Liquid+Vapor
Target	$YBa_2Cu_3O_y$	$Ba_3Cu_7O_{10}$+Ag_2O, $YBa_2Cu_3O_y$
P_{O2} (Pa)	53	200
Laser frequency (Hz)	100	
T_s (℃)	860	940
Substrate moving speed (mm/sec.)	1	0.4

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に静止系 PLD-YBCO 膜と、RtR-VLS-YBCO 線材の 77 K、自己磁場中における各膜厚での J_c を示す。PLD-YBCO 膜は膜厚 1 μm 程度で *a* 軸配向粒が 50%程度発生し、I_c が飽和することが確認された。それに対して、RtR-VLS-YBCO 線材は膜厚 1 μm においても J_c = 1 [MA/cm^2]以上を維持し、I_c が上昇し続けていくことが確認された。

Fig.2 は Liquid(BCO)相に対する YBCO 相の供給時間を 1~3 倍の範囲で変化させた RtR-VLS-YBCO 線材の 77 K、自己磁場中における J_c と膜厚を示す。Liquid 相に対する YBCO 相の供給時間の増加に伴い、膜厚が増加していることが分かる。また、供給時間を変化させても *a* 軸配向粒の発生を抑制し、高 J_c が維持された。現在、RtR-VLS-YBCO 線材のさらなる高速作製を実現するため、レーザーエネルギー制御により、単位時間当たりの YBCO 供給量を増加させることを検討しており、当日はその結果も報告する予定である。

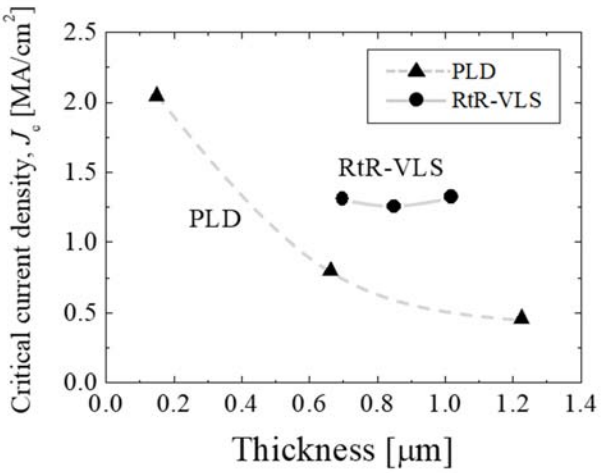


Fig.1 Current characteristics of PLD-YBCO thin films and RtR-VLS-YBCO C.C. with each film thickness

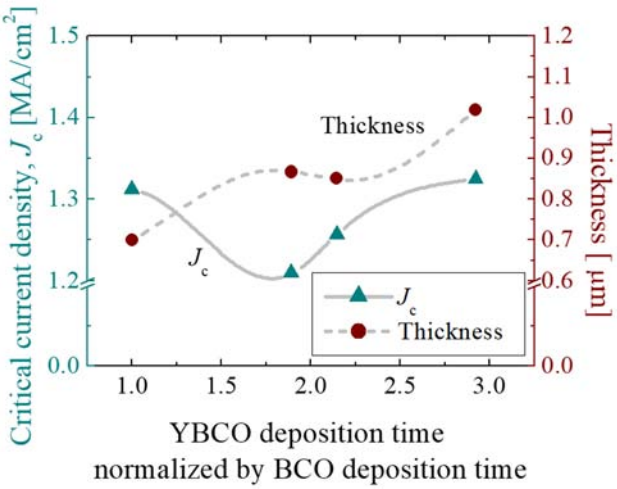


Fig.2 J_c and film thickness of RtR-VLS-YBCO C.C. at each YBCO supply amount normalized by BCO

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（20H02682、21H01872）、NEDO からの助成を受けて実施した。また産総研の和泉輝郎氏、衣斐顕氏、町敬人氏から IBAD-MgO 基板を提供していただいた。

参考文献

[1] T. Ito *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., **31**, (2021) 6601304.
[2] 美和他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-A304-10 (2022)

フッ素フリーMOD 法を用いた人工ピン導入 REBCO 線材の磁場中特性

In-field properties of APC doped REBCO wires fabricated by Fluorine-Free MOD

吉原 健彦, 稲垣 充, 本田 元気, 永石 竜起, 小林 慎一(住友電工);
蟹江 澄志(東北大,国際放射光イノベーション・スマート研究センター); 岡田 達典, 淡路 智(東北大,金属材料研究所)
YOSHIHARA Tatsuhiko, INAGAKI Makoto, HONDA Genki, NAGAISHI Tatsuoki, KOBAYASHI Shinichi
(Sumitomo Electric Industries, Ltd.);
KANIE Kiyoshi (Tohoku Univ., SRIS), OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ., IMR)
E-mail: yoshihara-tatsuhiko@sei.co.jp

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_x$ (REBCO)薄膜の作製方法の中で、有機金属塗布熱分解法(MOD 法)は真空装置を必要とせず、高い原料収率が実現できる手法である。その中でもフッ素フリーMOD(FF-MOD)法は、良好な 2 軸配向膜を短時間で得ることができるため[1, 2]、低コストな量産線材を実現可能とする工業的に優れた製法と考えられる。一方で、FF-MOD 法を用いた人工ピン導入に関する報告はあるものの[2, 3, 4]、超電導層厚みが 1 μm 以下であることや、主に単結晶基板上の実験に留まっており、長尺線材への適用は進んでいなかった。

そこで我々は $BaMO_3$ (BMO)ナノ粒子を溶液へ添加する方法及び、結晶化プロセスの最適化を行ってきた。その結果、FF-MOD 法による REBCO 薄膜線材において 77 K の I_C が 200 A/4 mm 幅を超える 120 m 長の人工ピン入り線材の作製に成功し、報告を行った[5]。

本発表では、更なる I_C 向上を目的とし、添加する BMO ナノ粒子のサイズを前回報告より小径化したことで、同じ添加濃度においても膜内の BMO 粒子の密度を増加させ、磁場中特性が向上したことを報告する。

2. 実験方法

Ni/Cu/SUS から成る 30 mm 幅のクラッド基板[6]上に、中間層 CeO_2/YSZ/Y_2O_3 を RF スパッタリング法により成膜した。ソルボサーマル法[7]により作製した BMO (M = Zr, Hf)ナノ粒子を添加したフッ素フリー$GdBa_2Cu_3O_x$(GdBCO)溶液をダイコートにより塗布し、酸素雰囲気下で仮焼後、$BaCO_3$ の分解、超電導の多結晶化を目的とした熱処理を行った。その後、低酸素雰囲気下にて本焼を行い、人工ピン入り REBCO 層を成膜した。磁場中 I_C は～100 μm 幅のマイクロブリッジを形成したサンプルを用いて、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター所有の無冷媒超伝導マグネット 20T-CSM、及び 25T-CSM により評価を行った。

3. 実験結果

Fig. 1 に $BaZrO_3$ (BZO)、及び $BaHfO_3$ (BHO)のナノ粒子溶液の各粒子における(a), (b)TEM 像、(c), (d)XRD パターン、(e), (f)動的散乱法 (DLS)による粒径評価結果に示す。XRD パターンから算出された BZO、及び BHO の平均粒径は 6.54 nm、及び 1.88 nm であり、DLS により測定された平均粒径の 6.5-7.0 nm、及び 1.6-2.2 nm と良い一致を示した。これらのナノ粒子溶液を用いて作製した GdBCO 膜の 77 K, 20 K における I_C の $B//c$ における磁場依存性を Fig. 2 に示す。測定した全磁場領域において、平均粒径 7 nm の BZO を用いた GdBCO 膜と比較して、2 nm の BHO の方が高 I_C であった。2 nm の BHO を用いた GdBCO 膜内の断面 TEM では、2-10 nm の BHO が分布していることが分かり、小径化したナノ粒子を用いることで同じ添加濃度においても超電導膜内のピン密度を増加させ、磁場中の特性が向上したと考えている。添加濃度、添加粒子サイズの最適化により、更なる高 I_C 化が予想でき、本手法により FF-MOD 法による低コストな低温磁場中特性に優れた超電導線材の量産化が期待できる。

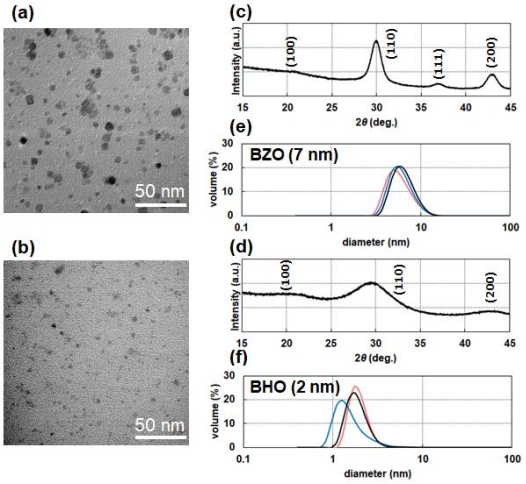


Fig.1 TEM images of (a) BZO and (b) BHO nanoparticles with detail of a single nanocrystal in inset, XRD patterns of (c) BZO, (d) BHO nanoparticles, DLS measurements of (e) BZO, (f) BHO nanoparticles.

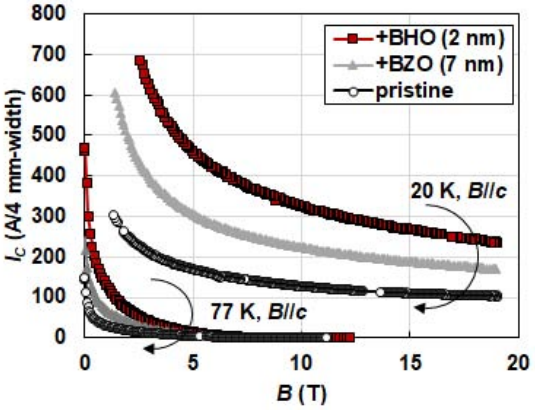


Fig.2 I_C-B properties of pristine, +BHO (2 nm) 2.7 mol% and +BZO (7 nm) 2.7 mol% at 77 K and 20 K

謝辞

技術的な議論をしていただきましたInstitut de Ciéncia de Materials de Barcelona(ICMAB)のProf. Puig, Dr. Obradors他、関係者に感謝いたします。また、本成果の一部は、東北大学金属材料研究所における共同研究(強磁場センター課題番号202112-HMKPC-0006)によるものである。

参考文献

1. Y. Ishiwata *et al., IEEE Trans. Appl. Supercond.,* **23** (2013) 7500804.
2. L. Soler *et al., Nat. Commun.,* **11** (2020) 334.
3. F. Lu *et al., Supercond. Sci. Technol.,* **26** (2013) 045016.
4. T. Motoki *et al., Supercond. Sci. Technol.,* **29** (2016) 015006.
5. T. Yoshihara *et al., Abstracts of CSJ Conference*, Vol. **103** (2022) p.107.
6. K. Ohki and T. Nagaishi, *Ceramics Japan,* **47** (2012) 280.
7. N. Chamorro *et al., RSC Adv.*,**10** (2020) 28872.

PLD 及び TFA-MOD 法で作製した $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 線材の超伝導特性

Superconducting properties for $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductors fabricated by PLD and MOD

齋藤 寛晃, 原 由子, 鈴木 匠(成蹊大); 衣斐 顕, 和泉 輝郎(AIST); 三浦 正志(成蹊大, JST-FOREST)

SAITO Hiroaki, HARA Yuko, SUZUKI Takumi (Seikei Univ.); IBI Akira, IZUMI Teruo (AIST);
MIURA Masashi (Seikei Univ., JST-FOREST)

E-mail: dm216308@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物超伝導 $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$(RE123)線材は、高い臨界温度(T_c)や高い磁場中臨界電流密度(J_c)を有していることから、MRI や NMR などのマグネット応用に期待されている。特に Trifluoroacetate metal organic deposition (TFA-MOD)や Reel-to-Reel Pulsed Laser Deposition (RTR-PLD)で作製された長尺 RE123 線材は、高い臨界電流(I_c)を得ることに成功している[1-4]。しかし、応用には、それぞれの異なる成長様式の特徴を活かし更なる粒内 J_c 及び粒界 J_c 向上が必要である。粒内 J_c 向上として、人工欠陥導入による磁束ピンニング力向上が有効である[1,2,3,5]。一方、粒界 J_c 向上として、金属基板の配向性向上や成長制御による超伝導層の面内配向性向上などがある[6]。

本研究では、成長様式の異なる PLD と MOD 法を用いて RE123 線材を作製し、それぞれの自然欠陥(転位、双晶欠陥、積層欠陥、ナノサイズ析出物)や超伝導層の面内配向性の違いが自己磁場および磁場中 J_c 特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

異なる面内配向性を有する CeO_2 層/バッファ層/金属基板上に PLD 法 $EuBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Eu123) 及び MOD 法 $(Y_{0.77}Gd_{0.23})Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ((Y,Gd)123)線材を作製した。作製した RE123 線材の結晶性を X 線解析法、微細構造観察を透過型電子顕微鏡(TEM)、表面観察を原子間力顕微鏡(AFM)、電気特性を四端子法(PPMS)で評価した。

3. 実験結果

Fig.1(a)よりいずれの RE123 線材の面内配向性($\Delta\phi_{RE123}$)は CeO_2 の面内配向性($\Delta\phi_{CeO2}$)が良好なほど結晶性が良いことが分かる。$\Delta\phi_{CeO2} \leq 3°$で、特に MOD-(Y,Gd)123 線材の $\Delta\phi_{RE123}$ は PLD-Eu123 線材より良好であることが分かる。これらの違いは成長様式の違いによるものと考えられる。Fig.1(b)より $\Delta\phi_{RE123}$ が良好なほど自己磁場 J_c($J_c^{s.f.}$)特性が高いことが分かる。また、$\Delta\phi_{CeO2} \leq 3°$で、PLD- Eu123 線材より $\Delta\phi_{RE123}$ が良好であった MOD-(Y,Gd)123 線材が高い $J_c^{s.f.}$を示すことが分かる。

Fig.2 に $\Delta\phi_{CeO2} = 3°$ の金属基板上に作製した MOD-(Y,Gd)123 および PLD-Eu123 線材の J_c の磁場印加角度依存性を示す(77K, 3T)。図より低磁場では J_c が低かった PLD-Eu123 線材が MOD-(Y,Gd)123 線材より高い特性を示すことがわかる。

当日は、詳細な微細構造や超伝導特性について詳しく報告する予定である。

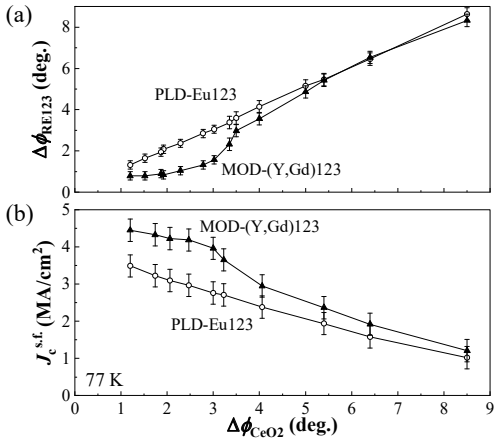


Fig.1 (a) $\Delta\phi_{RE123}$ and (b) $J_c^{s.f.}$ at 77K as a function of $\Delta\phi_{CeO2}$.

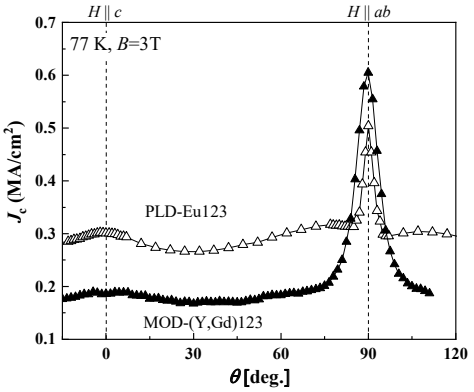


Fig.2 J_c at 77K, 3T as a function of angle.

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202G の支援を受けたものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費(20H02184)の助成を受け実施したものである。

参考文献

[1] A. Ibi *et al*., *Physics Procedia* **58** (2014) 97-100.
[2] M. Miura, *Springer* 2015 (ISBN:978-3-319-14477-1), chapter 1, pp.3-26
[3] M. Miura *et al*., *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 014019.
[4] T. Izumi, *Synthesiology* **12** (2019) 6-18.
[5] M. Miura *et al*., *NPG Asia Materials* **9** (2017) e447
[6] M. Miura *et al*., *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85

引きさき法による REBCO スプリット線材の作製と臨界電流特性

Fabrication of REBCO split wire by tearing method and its critical current characteristics

吉川 翔馬, 岩知道 大樹, 間所 風地, 伊賀 介星, 草野 海成, 福岡 美穂, 金沢 新哲(室工大);
YOSHIKAWA Shoma, IWACHIDO Daiki, MADOKORO Futi, IGA Kaisei, KUSANO Kaisei, FUKUOKA Miho, KANAZAWA Shintetsu(MIT);
E-mail: shintetsu_kanazawa@mmm.muroran-it.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材の多芯化について、我々はスプリット線の開発を進めている[1-3]。スプリット線は、線材内部の超伝導層のみ分割され、内部スプリットが形成されている。線材のテープ表面にローラーカッターを当てて、応力を印加しながらローリング加工をすることで長尺の線材が製造される。これまでは人工ピンが入っていない GdBCO 線材について、スプリット線を作製・評価してきたが今回は人工ピン入り線材を用いて作製・評価した。人工ピンなしのスプリット線材では磁化損失の改善がみられ、今回は人工ピンありのスプリット線材ではどのような電気、磁気的な特性を示しているか調べることを目的とする。

2. サンプル作製

REBCO 単芯線は、(株)フジクラ製の EuBCO 線(幅 4 mm、厚さ 0.05 mm)を使用して、内部スプリットの加工を実施した。製造した線材サンプルの長さは 10 cm 程度である。今回は印加応力を変化させながら、複数のスプリット線材を製造した。

図1に加工装置であるマルチスプリッターの写真を示した。35 枚と 30 枚の計 65 枚のカッターを使用することで、最大 65 本の加工ラインを同時に可能としている。挿入図はスプリット加工部の側面図を示し、1つのカッターの厚さが 0.1 mm であるので、0.1 mm 間隔でスプリット線を入れることができる。本研究では、ガイドローラーの材料に SUS304 を用いて、印加応力が表1に示したようなスプリット線材サンプルを 3 種作製し、臨界電流および磁化損失を評価した。

表1 スプリット線材の作製方法

サンプル	負荷[N]	カッター枚数
①	100	65
②	150	65
③	300	35

3. 実験結果とまとめ

Fig. 2 は製造したスプリット線サンプル1の基板側の表面写真である。基板層の表面が均等に加工したラインが形成されている。

Fig.3 は 77K、外部印加磁場無しでの臨界電流の測定結果であり、サンプルが 140.0A となった。この値は元の線材に対し約 80%程度であり、高い臨界電流が測定された。

Fig.4 は 77 K で測定したサンプル1の磁化の磁場依存性の結果ある。磁化損失は、ヒステリシス曲線で囲まれた面積から求めた。その結果、磁化損失が元のサンプルに比べて 1/3 程度に改善されていることがわかった。

このような結果から、人工ピン入りの REBCO 線材でも内部スプリットの効果があることがわかった。今後のさらなる開発により、性能が高いスプリット線材の実現が期待できると考えている。

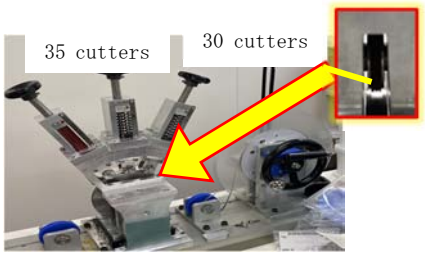


Fig. 1 Picture of multi-splitter with 30 and 35 cutters.


Fig. 2 Tape surface of REBCO split wire sample 1.

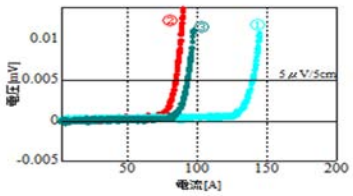


Fig. 3 Measurement results of critical currents.

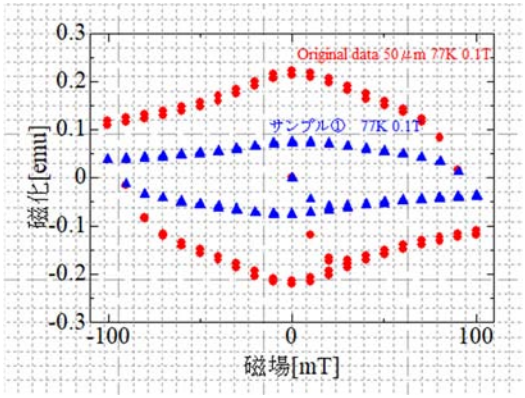


Fig. 4 Magnetic field dependence of magnetization samples.

参考文献

1. 金 新哲、前田 秀明, PCT/JP2015/072393, 2015.08.06
2. Xinzhe Jin, et al., Supercond. Sci. Technol. **29** (2016) 045006
3. Xinzhe Jin, et al., "Fabrication of 16-main-core RE123 split wire using inner split method", IEEE Trans. Appl. Supercond. **29** (2019) 6601304

複数回の引きさき加工により作製した REBCO スプリット線材の臨界電流特性

Critical current characteristics of REBCO split wires fabricated by multiple tearing method

岩知道　大樹，吉川　翔馬，間所　風地，伊賀　介星，草野　海成，福岡　美穂，金沢　新哲(室工大)
IWACHIDOU Daiki, YOSHIKAWA Shoma, MADOKORO Fuchi, IGA Kaisei, KUSANO Kaisei, FUKUOKA Miho, KANAZAWA Shintetsu (MIT)
E-mail: shintetsu_kanazawa@muroran-it.ac.jp

1. はじめに

我々は、市販の REBCO 単芯線材から多芯構造を持つスプリット線の開発を行っている[1,2]。これまでは、人工ピン無しの GdBCO 線材を用いて、スプリット線材の作製評価を行ってきた。本研究では、高磁場で臨界電流が高い人工ピンありの EuBCO 線材を用いて、初めてスプリット線を加工し、電気的、磁気的な特性を調べたので、その結果を報告する。人工ピンが存在する REBCO 線材において、スプリット線加工により臨界電流と交流損失に効果があるのか、非常に興味深い。

2. サンプル作製

本実験では、(株)フジクラ製の EuBCO 単芯線(幅 4mm、厚さ 50 μ m、銅メッキなし、人口ピンあり)を使い、スプリット線加工を行った。全て 3 つのスプリット線サンプルを作製し、長さは同じ 15cm 程度である。作製方法については、Fig.1 に示すマルチスプリッターを用いて、加工回数の異なる3種作製した。加工回数とは、図に示したように、線材をローラーカッターで圧力をかけて、往復のローリング加工を実施する回数である。今回は、図の中心と右側の加工部を使って、計65枚のカッターを使用することでスプリット線の加工を行った。表 1 はスプリット線サンプルの作製条件を示し、加工部で印可した負荷はすべて同じ 5N であり、加工回数はそれぞれ 20、30、350 である。

表1　REBCO スプリット線のサンプルの作製条件

サンプル名	負荷 (N)	加工回数
サンプル 1	5	20
サンプル 2	5	30
サンプル 3	5	350

3. 実験結果とまとめ

Fig.2 は、サンプル 1 の表面写真である。線材の長手方向に沿った複数の加工ラインがはっきり見えていることから、ローラーカッターから応力を受けていることがわかる。超伝導層が分離されていれば、臨界電流と磁化測定に効果がでる可能性があるので、続いて調べた。

作製した 3 つのスプリット線サンプルと元線材(単芯)の電流−電圧特性を Fig.3 に示す。測定した温度は 77 K、印加磁場は線材のテープ面に垂直方向で 0.7 T である。全てのスプリット線サンプルは、元の単芯線に対する臨界電流の保持率が 85%以上で高い傾向であった。その中で、サンプル 1 は、元の単芯線に比べ臨界電流が 21%向上した。これは、スプリット線加工により、臨界電流が向上することを意味し、人工ピンなしの線材と同様に、人工ピン入り REBCO 線もスプリット加工により臨界電流が向上することが分かった。

Fig.4 は、温度 77 K、最大印加磁場 0.1 T(線材のテープ面に垂直方向)までの磁化測定の結果を示す。図のヒステリシス曲線で囲まれた面積から磁化損失の値を求めた。その結果、元の線材より臨界電流が 21%向上したサンプル 1 は、損失においても 10%の上昇が見られた。このような結果は、臨界電流の向上による磁化の変化であると考えている。サンプル 3 では損失が元の単芯線より半分程度改善されていた。

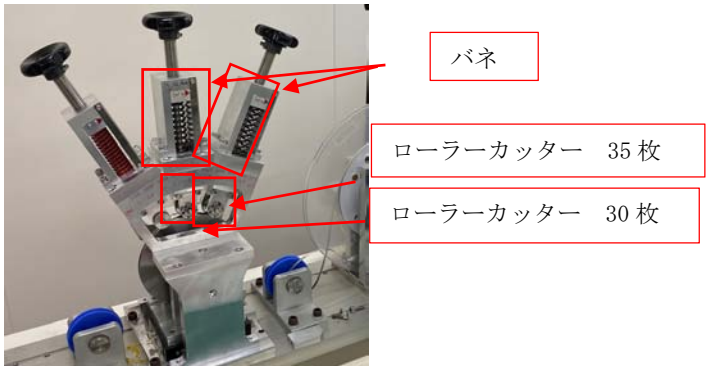


Fig. 1 Picture of multi-splitter with 65 cutters.



Fig. 2 Tape surface of EuBCO split wire sample 1 .

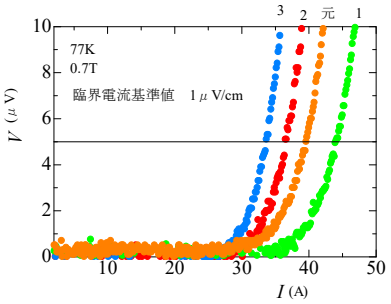


Fig. 3 *I*−*V* properties of the samples.

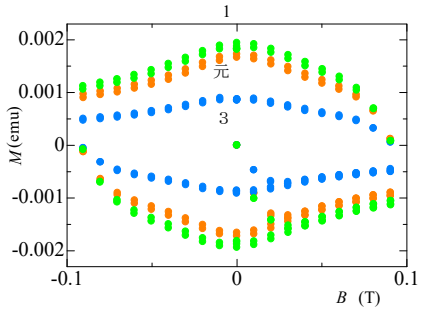


Fig. 4 Magnetic field dependence of Magnetization.

参考文献

[1] 金　新哲、前田　秀明, PCT/JP2015/072393, 2015.08.06
[2] Xinzhe Jin, et al., Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 045006

人工ピン無しの REBCO 線材により作製したスプリット線材の評価

Evaluation of split wires made from REBCO-coated conductors without artificial pins

草野海成，福岡美穂，岩知道大樹，吉川翔馬，伊賀介星，間所風地，金沢新哲
KUSANO Kaisei, FUKUOKA Miho, IWACHIDO Daiki,
YOSHIKAWA Shoma, IGA Kaisei, MADOKORO Fuchi, KANAZAWA Shintetsu
E-mail : kaikai.120501@gmail.com

1. はじめに

REBCO線材の多芯化について、我々はスプリット線材の作製を進めている[1]。スプリット線材は、凹型のガイドローラーにはめ込んだ線材を複数のローラーカッターにより、圧力を印加しながらローリング加工をすることで作製される。ローラーカッターは複数枚を重ねて使用することで、1回のローリング加工で複数の加工ラインが同時に形成され、線材の製造時間の短縮と、加工ライン間の間隔の均一化などが可能である。今回は、厚さ0.1mmのローラーカッターを65枚使用してスプリット線材を作製した。線材は人工ピン無しのフジクラ製のREBCO線であり、人工ピンありの場合と比較しながら実験評価をする。

2. サンプル作製

(株)フジクラ製のGdBCO線材(幅4mm、厚さ75μm、銅めっきなし)を用いて、スプリット線材の作製を実施した。製造したサンプルの長さは全て同じ14cm程度である。

Fig.1にスプリット線材の加工装置であるマルチスプリッターの写真を示した。左の図で、中央のカッター35枚と右側のカッター30枚の計65枚のカッターを使用することで、65本のライン加工を同時に形成できる。さらに、ローリング加工を往復で複数回実施することで、数多くの加工ラインを形成できる。右側の図は加工部の側面図を示し、30枚のカッターを装着した加工部を示す。本研究では、ローラーカッターによる負荷とローリングの加工回数が異なるスプリット線材サンプルを多数作製した。表1にその中の2種を示し、加工回数が異なる。この表のサンプルの作製条件は、SUSのガイドローラーを使用して、ローラーカッターを線材の金属基板(ハステロイ)層に接触させ、20Nの負荷をかけた。

表1 GdBCOスプリット線材サンプルの作製条件

サンプル	負荷 (N)	ローリングの加工回数(回)
1	20	50
2		200

3. 実験結果とまとめ

Fig.2は作製したスプリット線材サンプル2の基板側表面の写真である。加工ラインがはっきり見え、200 回の往復加工をしたので、数多くの加工ラインが形成されている。

臨界電流は、線材のテープ表面に垂直の磁場0.7Tを印加しながら77K で測定した。その結果、両サンプルとも元の単芯線と比べ、約101%であり、臨界電流が下がらないことがわかった。測定結果などの詳細について、当日に発表する。

次に、サンプルの磁化測定を行った。磁化測定では、MPMS装置を利用して77Kで磁化の磁場依存性を測定し、ヒステリシス曲線で囲まれた面積から磁化損失を求めた。測定結果はFig.3に示した。元の線材に比べ、サンプル1は約27.2%、サンプル2は約17.3%の損失改善がみられた。我々は発表番号 1B-p06 で、人工ピンありのスプリット線材が損失50%程度改善されていることを報告している。それに対して、人工ピンなしのスプリット線は低磁場で加工効果が小さいことがわかった。今後印加応力の増加によるさらなる研究が必要であると考えている。

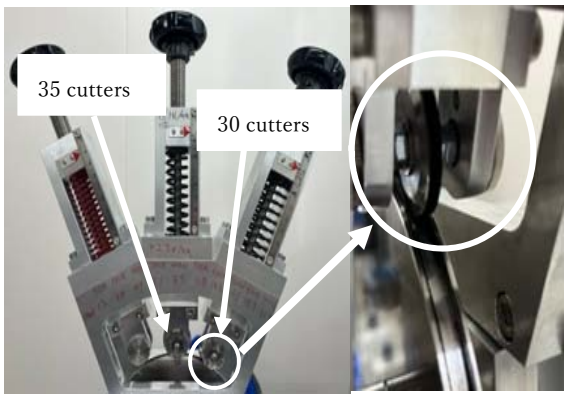


Fig.1 A total of 65 multi-splitters

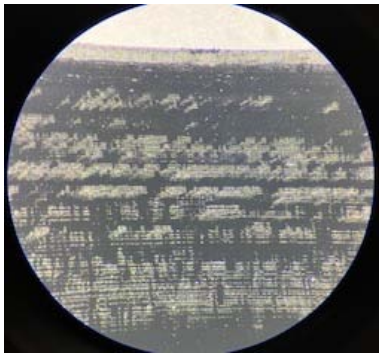


Fig.2 Metal substrate surface of sample 2

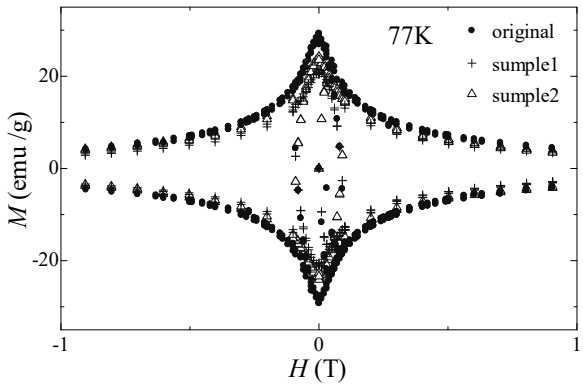


Fig.3 Magnetic field dependence of magnetization

参考文献

[1] Xinzhe Jin, et al., (2016), "Development of a $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ multi-core superconductor with 'inner split' technology" Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 045006

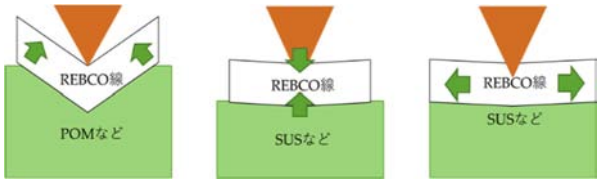
引きさき法を用いて作製した REBCO スプリット線の臨界電流と磁化の測定評価

Measurement and evaluation of critical current and magnetization of REBCO split wire fabricated using the tearing method

福岡美穂, 岩知道大樹, 間所風地, 伊賀介星, 草野海成, 吉川翔馬, 金沢新哲(室工大)
FUKUOKA Miho, IWACHIDO Daiki, MADOKORO Fuchi, IGA Kaisei, KUSANO Kaisei,
YOSHIKAWA Shouma, KANAZAWA Shintetsu
E-mail:miho.2.1.44@gmail.com

1. はじめに

我々の研究室では、多芯線であるREBCOスプリット線材の開発を進めている。これまでは線材を長手方向にV字曲げをする方法や圧力集中による方法などの内部スプリット法を報告している[1]。Fig. 1 の(1)、(2)はそれぞれV字曲げと圧力集中によりスプリット線材を作製するイメージを示した図である。今回は Fig. 1 の(3)に示したように、刃先が細いローラカッターとSUS のガイドローラーを用いて、線材を幅方向に広げる応力を印加しながら引きさき法により製造した。



(1)V字曲げ　(2)圧力集中　(3)引きさき法

Fig. 1 3manufacturing methods of split .

2. サンプルの作製

REBCO単芯線は、㈱フジクラ製の厚さが75μmのGdBCO線材(幅:4mm、人口ピンなし)を使用した。Fig. 2 の左図にスプリット線加工装置であるマルチスプリッターの写真を示した。図の中心の加工部では35枚のカッターを使用し、右側の加工部では30枚のカッターを使用した。合計65枚であるため、一度のローリング加工で計65本の加工ラインが形成できる。カッター1枚の厚さが0. 1mmであり、0. 1mmの間隔で加工ラインを入れることができる。右図は加工部の拡大図であり、30枚のカッターとガイドローラーを示している。

本研究では、ローリング加工の回数が1度のみで、印加応力を変化させた線材サンプルを多数作製し、臨界電流および磁化を測定評価した。本原稿では、その中の2種について述べる。スプリット線サンプルの作製条件は表1のようである。

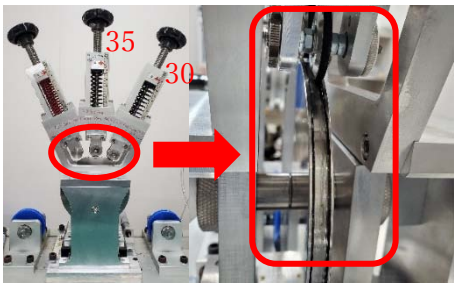


Fig. 2 Multi-splitter and 65 blades .

表1　REBCOスプリット線サンプルの製造方法

サンプル	負荷 [N]	ローリング加工の回数	線材の長さ [cm]
オリジナル	―	―	13
1	50	1	
2	125		

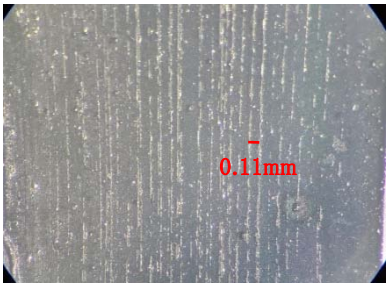


Fig. 3 Surface of sample 2.

3. 実験結果とまとめ

Fig. 3は製造したスプリット線サンプル2の基板層の表面写真である。加工ラインははっきり現れ、間隔はほぼ均等である。これは線材が複数のローラカッターから応力を受けていることを示している。臨界電流の測定では、77K、0. 7T でサンプル1、2共に高い値を示し、元の単芯線の臨界電流と比べ、93%と99%を維持していた。

線材の磁化損失については、MPMS 装置を利用して77Kで磁化の磁場依存性を測定し、ヒステリシス曲線で囲まれた面積から損失を求めた。Fig. 4 は測定で得られた磁化の磁場依存性を示す。この図からそれぞれのサンプルにおけるヒステリシスの面積を求め、磁化損失を比べた結果、単芯線に比べ、サンプル1は39%程度、サンプル2は49%程度の損失改善がみられた。これにより臨界電流を維持しながら損失の改善ができることがわかった。具体的な測定方法や結果は当日に発表する予定である。

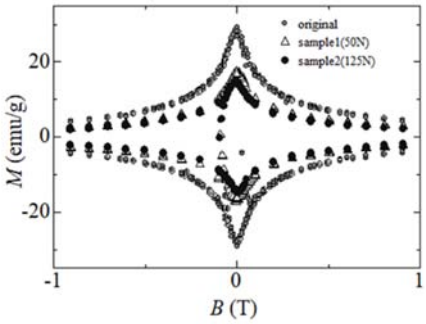


Fig. 4 Magnetic field dependence of magnetization.

参考文献

1. X. Jin, et al.: Development of a REBa2Cu3O7−δ multi-core superconductor with 'inner split' technology, IOP Publishing, Vol. 29(2016)

アブレーション効果を用いたREBCO線材のレーザースクライビング加工技術

Laser scribing technique by using ablation effect for coated conductors

町　敬人, 廣瀬陽代, 和泉輝郎(産総研)
E-mail: t.machi@aist.go.jp

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_{7-d}$ (REBCO)線材の交流損失を低減するために細線化がもっとも効果的な手段である。我々は，細線化の手段としてレーザー照射によって超電導層まで達する溝を形成して細線化を行うレーザースクライビング加工を行っている。これまでに，レーザー照射と２段階エッチングによる加工[1]や，エキシマレーザーを用いたスクライビング加工[2]などの技術開発を行ってきたが，レーザー照射＋２段階エッチング法は，溝幅の制御性に乏しく安定化層が Ag の場合にしか適用できず，エキシマレーザースクライビングは，パルス長が nsec オーダであるため熱加工となることと，最近の線材の主流である Cu メッキ線材の加工には時間が掛かりすぎるという欠点があった。

パルス長が短いレーザーでは分子間結合を切断して熱の影響の少ないアブレーション加工が可能となる。しかしながらパルス一発あたりの照射時間は短いものの，照射回数が増すことによって投入されたエネルギーは累積して短パルスレーザーといえども熱の影響は発生する。そこで我々は，短パルスレーザーとガルバノスキャンを組み合わせたレーザースクライビング装置を開発し，そのスクライビング性能を評価した。

2. 短パルスレーザーを用いたスクライビング装置の開発

パルス長が短いレーザーとして，psec および femto sec レーザーを検討した。市販されている femto sec レーザーは波長が 1μm の帯域の製品が主流で，テスト加工の結果から熱加工によるデブリが発生していたので， 波長域が 355nm(UV)のパルス psec レーザー (Coherent 製 Hyper Rapid NX355-30)を選択した。psec レーザーの技術は成熟しており，長時間安定して使用できるという利点もある。このレーザーは，パルス長 7.0psec で繰り返し周波数 800kHz から 1.6MHz で 30W の出力を維持できる性能を有する。psec レーザーではあっても，同じ場所に長時間照射すれば熱加工となってしまうので，ビームを高速で移動できるガルバノスキャナ(最大速度 1.8m/s)を導入し，線材の長手方向にビームを単振動させながら加工が可能とした。ガルバノスキャナを導入したことで，複数の溝を同時に加工することもできるようになった。図１に新しいレーザースクライビング装置の概略図を示す。線材は搬送系により一定の速度で移動しており，レーザービームはガルバノスキャナにある x，y 方向のミラーで移動し，fθ レンズで試料に垂直に照射されアシストガスは線材の幅方向から吹き付ける構造となっている。

3. 新しいスクライビング装置の性能テスト

試料として安定化層が Ag の REBCO 線材を用いてビームスキャン psec レーザースクライビングを行った。加工条件は，繰り返し周波数 800kHz，試料上での出力約 25W，線材の搬送速度は 20m/h で，ビームの移動速度は 0.5m/s，ビームの振り幅は±10mm であった。図２にスクライビング後の溝周辺の断面 SEM 像を示す。図２(a)は従来の KrF_2 エキシマレーザーでのスクライビングで，フィラメントに切削された金属などがドロスとして付着していることが分かる。一方，図２(b)が今回のスクライビング線材の断面であり，溝周辺のフィラメントにドロスが付着するようなことはなかった。このように，エキシマレーザーは波長 248nm の UV 域での加工であるにも関わらず熱加工となっているのに比べて，新しいスクライビング装置では psec レーザービームをスキャンさせた UV 域でのアブレーション加工が成功していることが分かる。分割された線材のフィラメント間抵抗を測定した結果，259kΩcm まで到達しており，カップリング損失の低減にも有効であることが示された。さらにこの手法を用いて，100m 長の 5mm 幅 Ag 安定化層 REBCO 線材を５フィラメントに分割する加工を行い，ヒステリシス損失が全長に渡る平均で 4.5 分の１に低減しているという結果が得られた。エキシマレーザースクライビングでは困難であった Cu メッキされた線材でも psec レーザービームをスキャンさせた UV 域でのアブレーション加工が可能であることも確認できた。今後はこの技術の最適化を行っていく。

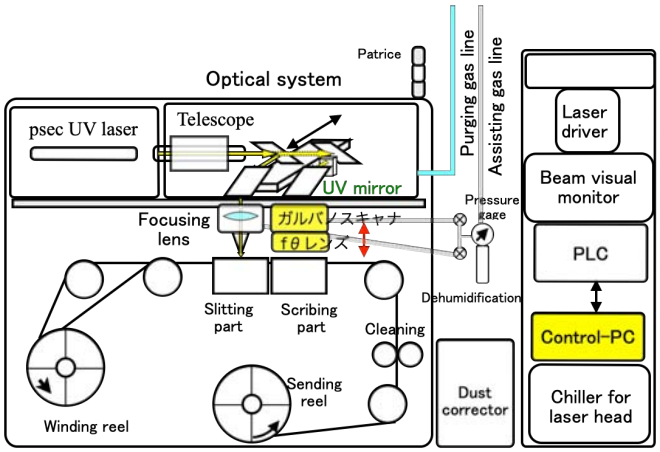
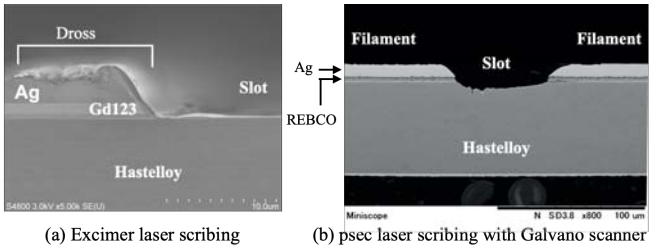


Fig.1　Schematic view of new laser scribing equipment.



(a) Excimer laser scribing　(b) psec laser scribing with Galvano scanner

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

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 Machi, K Nakao, T Kato, T Hirayama and K Tanabe, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 105016.
[2] K. Katayama, T. Machi, T. Nakamura, Y. Takagi, K. Nakaoka, M. Yoshizumi, T.Izumi and Y.Shiohara, Physics Procedia 58 (2014) 142 – 145.

JST 未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」の概要

Development of advanced hydrogen liquefaction system by using magnetic refrigeration technology for JST-MIRAI large-scale project

沼澤 健則, 神谷 宏治, 齋藤 明子, 西島 元, 北澤 英明, 間宮 広明, 櫻井 裕也, 武田 良彦 (NIMS), 松本 宏一 (金沢大), 増山 新二(大島商船高専), 竹屋 浩幸, 清水 禎, 西宮 伸幸(NIMS)

NUMAZAWA Takenori, KAMIYA Koji, SAITO Akiko, NISHIJIMA Gen, KITAZAWA Hideaki, SAKURAI Makoto, TAKEDA Yoshihiko (NIMS) , MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University), MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College) , TAKEYA Hiroyuki, SHIMIZU Tadashi, NISHIMIYA Nobuyuki (NIMS)
E-mail: Numazawa.takenori@nims.go.jp

1. はじめに

水素ガスの 1/800 の体積をもつ液体水素は高密度な輸送・貯蔵が可能であることが広く知られている。日本やヨーロッパ、米国では水素のサプライチェーンに液体水素の活用が進められており、最近ではオーストラリアからの褐炭による水素の大規模輸入を目指し、川崎重工によって液体水素タンカーが製造されている[1]。

本研究開発では、原理的に高い冷凍効率が期待できる磁気冷凍法を用い、革新的磁性材料および高効率磁気冷凍サイクルの開発により、高効率水素液化機、および液化水素ゼロボイルオフを目指した小型・省電力な冷凍機を実現し、我が国における水素社会の実現を大きく加速させることを目的としている。本講演ではプロジェクト全体の概要について紹介する。本講演に引き続き、主要な研究のトピックスについて 5 件の報告が行われる。

2. プロジェクトの概要

2018 年度の JST 未来社会創造事業・大規模プロジェクトの課題の一つに、革新的水素液化技術が取り上げられた。液化水素のサプライチェーンにおいては、水素の液化と輸送・貯蔵技術が必須となる。Fig. 1 には、解決すべき技術課題について、現状と達成目標および予想される効果について示した。このような課題を解決するため、我々は磁気冷凍による革新的水素液化システムの提案を行い、2018 年末から大規模プロジェクトとしての採択を経て継続中である[2]。本研究開発では、高効率な磁気冷凍技術をコアとして、以下の2つの実証研究を設定している(POC＝Proof of Concept)。

- POC1:液化効率 50%、液化量 100kg/day 以上を実現する中・大型高効率水素液化機
- POC2:液化水素ゼロボイルオフを目指した小型・省電力な冷凍機

POC の特徴やマイルストーンについて Fig. 2 に示した。POC1 では高効率な水素液化機を、POC2 では小型・省電力な再凝縮冷凍機を目指しており、それぞれで磁場発生技術や磁性材料に要求される開発課題が異なる。本プロジェクトで想定されている研究期間は 10 年間で、ステージ 1 からステージ 3 までの 3 つのステージから構成される。現在、ステージ 2 の初年度であり、プロトタイプの開発が本格化している。POC1 では超伝導磁石を用いた往復動型 2 駆動 AMR 磁気冷凍サイクルによって、水素の安定的な液化に成功している[3]。POC2 では 4 つの永久磁石と 8 つの AMR ユニットを用いた磁場回転型 4 駆動 AMR サイクルによって 20K 領域での運転に成功している。

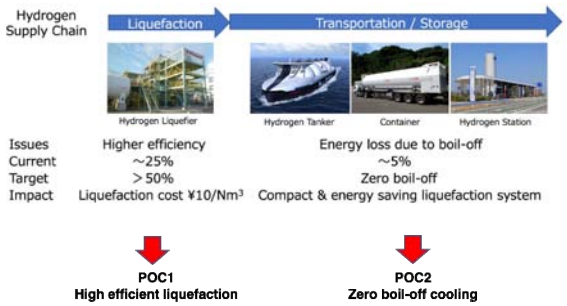


Fig. 1 Issues on hydrogen supply chain and POCs in this study

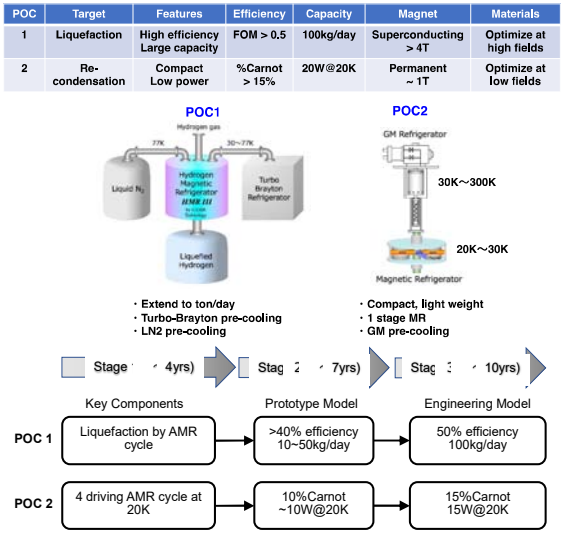


Fig. 2 Details of POC1 and POC2

3. まとめ

本プロジェクトでは基盤研究、装置開発、材料開発、さらにはインフラの分野まで、多数の国研や大学、企業が参画し開発が進行中である。完成したプロトタイプはメガソーラー等を利用した水素製造設備に設置し、オンサイトでのグリーン水素の液化実証を試みる予定である。また、多様な社会実装を目指しハードウェアのみならず経済性も見据えた不断の検討も進められている。

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

参考文献

[1] www.khi.co.jp/pressrelease/detail/ 20191211_1.html
[2] www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/saitaku2018/JPMJMI18A3_nishimiya.pd
[3] Koji Kamiya, et al., Applied Physics Express, 15(5) 053001 (2022)

能動的蓄冷式磁気冷凍(AMRR)による水素液化

Hydrogen liquefaction by Active Magnetic Regenerative Refrigeration (AMRR)

神谷 宏治, 沼澤 健則(物材機構);松本 宏一(金沢大学);増山 新二(大島商船高専);
齋藤 明子、竹屋 浩幸、夏目 恭平、白井 毅、内田 公(物材機構)
KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University); MASUYAMA Shinji (NIT Oshima College); SAITO T. Akiko, TAKEYA Hiroyuki, NATSUME Kyohei, SHIRAI Tsuyoshi, UCHIDA Akira (NIMS)
E-mail: kamiya.koji@nims.go.jp

1. はじめに

2018 年 NIMS において JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」がスタートした。同プロジェクトでは液化機として磁性体駆動式 AMRR(以下 AMRR)を採用し開発が進んでいる[1)]。本発表では、NIMS で開発中の AMR の詳細と液化実験について述べる。

2. AMR 実験装置

Fig. 1 は、AMR システムの外観と装置の断面図である。AMR システムは、2 つの AMR ベッド、NbTi 超伝導磁石、AMR ベッド駆動用アクチュエータ、そしてヘリウムガスを AMR ベッド内に駆動するガス循環システムで構成されている。このシステムでは、アクチュエータが下向きに動くと上側の AMR が励磁、下側の AMR は消磁され、上向きに動くとその逆となる。冷凍サイクルを調整することによって、上下 2 つの AMR ベッドの間を最低温度領域にすることができる。また AMR 高温端からの排熱は, GM 冷凍機で除去する。本研究では磁気作業物質として $HoAl_2$ を選択した。各 AMR ベッドに粒径 300～500 μm の $HoAl_2$ スタンプ粒子を 250 g ずつ充填した。

3. 水素液化容器と液面計

液体水素の液化容器は上下の AMR の冷端間に設置され、液体水素は本研究で開発した小型水素液面計で検知する。**Fig. 2** は、Cold stage 内に設置した水素液化容器の模式図である。AMR サイクルがスタートすると、2 つの AMR ベッド間の Cold stage の温度が最低温領域となり、AMR ベッドの高温端が排熱領域となる。Cold stage 内の水素液化容器に水素ガスが導入されることで冷却し最終的に液化する。

液面をとらえるため本研究ではシリコンダイオード温度計を液面計として使用した事例 (P. J. Dempsey et al., NASA Technical Memorandum 105541) を基に、水素液化槽内に入る小型液面計を開発した。液面計は 1 mA の電流で駆動し、液体と気体の熱伝達率の違いから液面を検知する。シリコンダイオードは垂直に 3 個配置し、検知の時間差から液面の上昇速度を把握することができるようにした。

4. 実験結果

Fig. 3 は, AMRを初期中心温度 26 K から周期12秒で運転開始し, 圧力約 0.11 MPa, 周期 12 秒で液化させた実験の一例である。AMR サイクルを開始した後 AMR の高温端と低温端に温度差が形成される。その後 低温端温度は水素の液化温度より低くなる。このとき、シリコンダイオードの出力は、水素液化装置の周期的な磁場変化により、周期的な磁界の変化に応じて振動する。試験初期(約 65 秒まで)は、容器内には水素ガスしか存在せず、容器内の均質な冷却により 3 つの液面センサーの電圧(温度)は同時に上昇(下降)するが、液化が始まり液面が LS3 に到達すると、他の 2 つの出力は変わらないのに、LS3 のみで追加の電圧上昇が観測された。続いてLS2、LS1 の順に電圧が上昇しており、液面が上昇していることを示していることから液化を実証したと結論付けた。

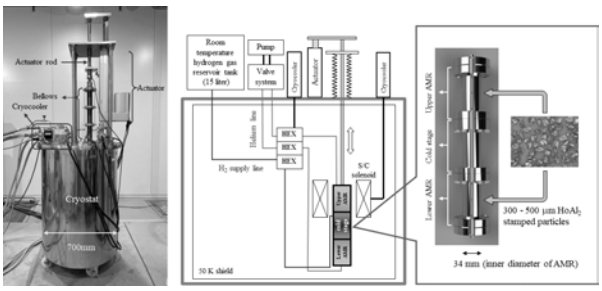


Fig. 1 A picture of the AMR system is shown (left). Cross sectional view of the AMR system and an enlarged view of two AMR beds in which $HoAl_2$ stamped particles are filled.

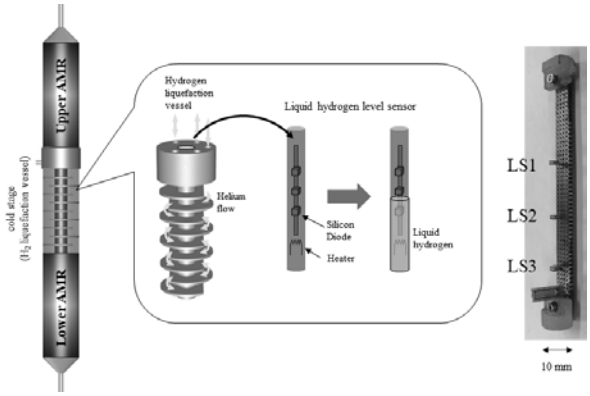


Fig. 2 A schematic of the AMR beds and the H_2 liquefaction vessel. The enlargement of the liquefaction vessel is shown in the balloon. Three level sensors are vertically installed in the vessel. Right is a picture of the level sensors.

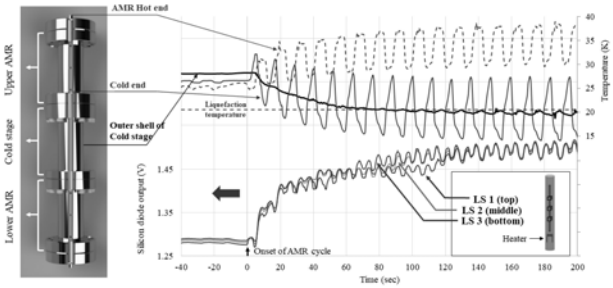


Fig. 3 An example of hydrogen liquefaction experiment. Output voltage of silicon diode level sensors rise in sequence from the bottom in response to increase of liquid level.

5. まとめと今後

本研究で AMR による水素液化に成功した。今後は、超伝導磁石の大型化などを進め液化量の増大を目指す。

謝辞

本研究はJST未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」(JPMJMI18A3)の支援を受けた。

参考文献

1. Koji Kamiya, et al.: Appl. Phys. Express 15 053001 (2022).

回転型水素液化磁気冷凍機

Rotating magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction

平野 優友, 松永 啓吾, 水口 皓平, 堀江 征生, 五十嵐 柚依, 松本 宏一(金沢大);
神谷 宏治, 内田 公, 沼澤 健則(NIMS)

HIRANO Yusuke, MATSUNAGA Keigo, MIZUGUCHI Kohei, HORIE Masaki, IGARASHI Yui,
MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University); KAMIYA Koji, UCHIDA Akira, NUMAZAWA Takenori (NIMS)
E-mail: yusuke1017@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

JST 未来社会創造事業革新的水素液化技術において、2つの研究開発テーマが進行中である。すなわち、高効率な水素液化技術、およびボイルオフガスの再液化技術である。本研究では液化水素貯蔵時のゼロボイルオフ化を目指し、小型・省電力な冷凍機の開発を進めている。これを実現するために、従来使用されている超伝導磁石に代わり永久磁石を用いた磁気冷凍サイクルを取り上げた。永久磁石の採用を検討した理由は、磁石の回転による冷凍サイクルの高速化や入力電力の大幅な低減の可能性に着目したことによる。一方で、超伝導磁石に比べて磁場強度が1 T 程度しか得られず、また、磁場発生空間も小さいため、使用できる磁性材料の体積が限られるというデメリットもある。そもそも極低温領域で永久磁石を用いた磁気冷凍サイクルの実施例はこれまでにほとんどなく、その実現には多数の困難が予想される。

本講演ではその第一段階として、永久磁石を用いた磁気冷凍機の構造と基本的な特性試験結果について報告する。

2. 回転型冷凍機概要

本磁気冷凍機を試作するにあたりベースとなったのは、4駆動型 AMR サイクルである[1]。Fig. 1 に示すように、従来のAMR サイクルは 1 駆動あるいは 2 駆動であるが、これを 4 駆動に拡張し、2 対の AMR サイクルの位相をずらすことにより低温部での連続的な冷却温度の発生と熱交換流体の移動体積を最小化することを特徴としている。この方法はすでに室温領域で検証されており、50%カルノー以上の高い冷凍効率が得られている。

これを 20 K 領域の極低温で実現するために、永久磁石の熱設計には特段の配慮が求められた。すなわち、一般的に使用されている Nd-Fe-B 系永久磁石では、温度の低下と共に磁場の減少が発現するため、120 K 以下で用いることは避けなくてはならない。従って、永久磁石の温度は比較的高温に保持、一方で磁気冷凍サイクルを駆動する AMR 容器は 20 K 近傍に予冷しなくてはならないという、相反する熱設計が要求された。これについては永久磁石の保持に FRP を用いるなどの工夫によって所定の温度レベルが実現できた。

Fig. 2 の左部には磁気冷凍機主要部を示した。4 駆動型 AMR サイクルは 2 つの磁場と 4 つの AMR 容器で構成されるが、これをさらに拡張し、4 つの磁場と 8 つの AMR 容器が取り付けられるように設計された。これは高々1 T 程度の磁場しか使用できないことを勘案し、AMR ユニット数を増加させるとともに磁石の回転による高速化を狙ったものである。

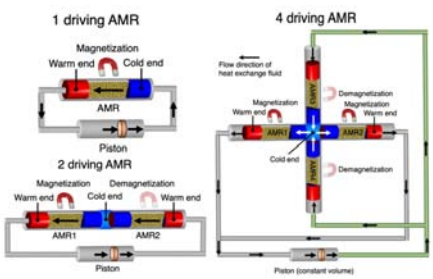


Fig. 1 Concept of 4 driving AMR cycle.

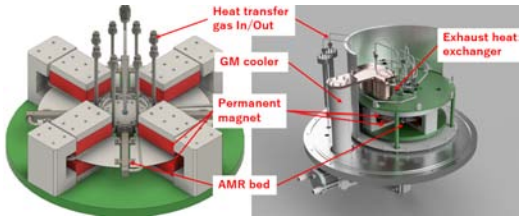


Fig. 2 Left : Main part of rotating magnetic refrigerator.
Right : CAD image of rotating magnetic refrigerator.

Fig. 2 の右部には磁気冷凍機全体の CAD 断面図を示した。磁気冷凍機からの排熱は隣接して設置された GM 冷凍機にコイル型熱交換器を経由して行われる。AMR 容器の熱交換流体は外部に接続された圧縮機を経由し流れ方向を磁場変化に同期させながら反転制御した。

3. 冷凍試験

GM冷凍機にて予冷したのち、AMRサイクルの運転を行い、マグネットの回転速度及び熱交換流体の質量流量を制御する電磁弁の開閉時間を変化させ様々な運転条件で AMR 容器に低温側と高温側に発生する温度差を観測した。また、冷凍試験はAMR 容器 8本と半分の4本の条件でも行った。磁性体は $HoAl_2$ と HoB_2 の 2 種類を使用した。

Fig. 3 に AMR 容器 4 気筒、磁性体 $HoAl_2$、磁石回転速度 3 rpm のときの AMR 容器の温度変化例を示す。磁石の回転速度の依存性はほとんど見られず、約 5 K の温度差を観測することができた。図の条件では AMR の排熱部と排熱 GM 冷凍機のバランスが完全には取れておらず、低温側は 20 K 近傍で安定しているが、高温側の温度は徐々に上昇している。様々な条件下で実験を行った結果、現状では 20 K までの到達に成功している。講演では、冷凍機の詳細や他の実験結果などについて報告する。

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

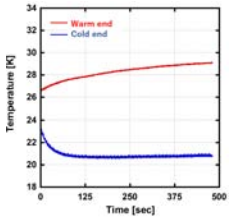


Fig. 3 AMR Bed temperature variation at magnet rotation speed of 3 rpm.

参考文献

[1] Takenori Numazawa, Four Driving AMR Cycle for Hydrogen Liquefaction, TEION KOGAKU 55(2020) p53 (in Japanese)

水素液化用磁気冷凍システム向け Bi2223 超伝導マグネットの開発

Development of Bi2223 superconducting magnet for magnetic refrigeration system for hydrogen liquefaction

西島 元, 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)
NISHIJIMA Gen, KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)
E-mail: nishijima.gen@nims.go.jp

1. はじめに

NIMS では JST 未来社会創造事業「革新的水素液化技術」により磁気冷凍を用いた水素液化システム開発が進められている。最近、神谷らは能動的蓄冷式磁気冷凍（AMRR）による水素液化に成功した[1],[2]。このシステムでは磁性体を超伝導マグネット中に出し入れすることで磁性体への印加磁場を変化させ、磁気熱量効果によって寒冷を得ている。超伝導マグネットは現時点では NbTi マグネットであるが、将来的には、定常運転時にシステム自身が液化した水素の冷熱によって超伝導マグネットを冷却することが望ましく、このためには高温超伝導マグネット実装が必須である。本研究では我々が取り組んできた Bi2223 超伝導マグネットの開発について報告する[3],[4]。

2. マグネット諸元

マグネット諸元[2] Table 1 に示す。マグネットはメインコイルとシールドコイルから成り、いずれも DI-BSCCO Type HT-CA 線材を用いたダブルパンケーキ（DP）の積層構造である。シールドコイルはメインコイルと逆向きの磁場を発生し、ボアの外側の磁場をほぼゼロにする。各 DP はそれぞれエポキシ樹脂含浸されている。DP 間には冷却のための Al シートが挿入されている。メインコイルとシールドコイルとの間には定格運転（300 A）時に約 130 kN の反発力が働く。これの支持のために外周側に M10 スタッドボルト 16 本、内周側に M6 スタッドボルト 30 本が配置されている（Fig. 1）。

3. 初期冷却および励磁

Fig. 2 に初期冷却の結果を示す。マグネットは 82 時間で 4 K まで冷却された。また、超伝導転移温度は約 110 K であった。

マグネットに 150 A 通電した時の中心軸上磁場分布（ホール素子による測定）を Fig. 3 に示す。ほぼ計算通りの磁場が得られている。遮蔽電流計算を行なっていないので、その影響について定量的な評価はできないが、中心磁場における計算値と測定値の差（61 mT)は遮蔽電流磁場の影響と考えている。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」(JPMJMI18A3）の支援を受けた。

参考文献

[1] NIMS プレスリリース 2022 年 4 月 11 日, https://www.nims.go.jp/news/press/2022/04/202204110.html.
[2] K. Kamiya *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 15 (2022) 053001.
[3] G. Nishijima *et al.*, presented at MT-27, Fukuoka, Japan.
[4] G. Nishijima *et al.*, presented at ASC 2022, Honolulu, HI.

Table 1 Specifications of Bi2223 Superconducting Magnet

	Main coil (16DP)	Shield coil (4DP×2)
Inner diameter [mm]	142	150
Outer diameter [mm]	238	226
Height [mm]	166	41
Number of turns	3592 (224.5/DP)	714×2 (178.5/DP)
Operating current (I_{op}) [A]	300	
Central magnetic field (B_0) [T]	4.8	



Fig. 1 Completed Bi2223 magnet.

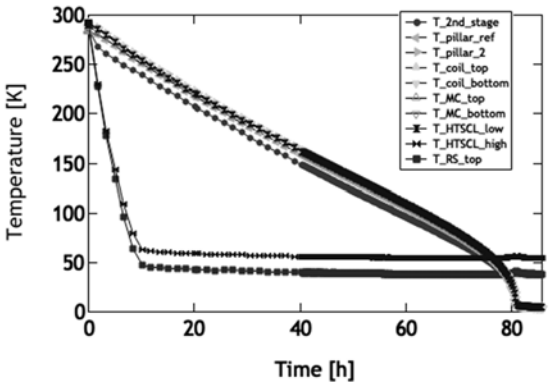


Fig. 2 Cooldown of Bi2223 magnet.

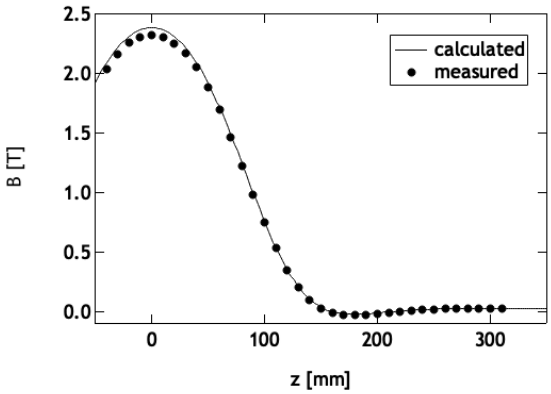


Fig. 3 Magnetic field profile of Bi2223 magnet.

水素液化のための AMRR 用材料開発（JST-Mirai） —ヒステリシスの小さな巨大磁気熱量効果材料—

Magnetic refrigerant materials for AMRR for hydrogen liquefaction (JST-Mirai) -Giant magnetocaloric materials with small hysteresis-.

H. Sepehri-Amin (NIMS), Xin Tang (NIMS), J. Lai (NIMS), A. T. Saito (NIMS), T. Ohkubo (NIMS), K. Hono (NIMS)
E-mail: h.sepehriamin@nims.go.jp

1. Introduction

Hydrogen will play a major role in the establishment of a renewable-energy-based society and realization of carbon neutrality. However, one of the major challenges is the storage and transportation of hydrogen: the H_2 gas has large volume and its liquefaction is necessary. The current available technology for hydrogen liquefaction is conventional gas compression systems based on the Joule-Thompson effect, which is costly and inefficient at low temperatures. Cryogenic magnetic refrigeration is a prospective environmentally friendly technology for temperature below 120 K, and it can theoretically exhibit a higher efficiency as compared to those of conventional gas compression systems. In the Cryogenic magnetic refrigeration, the gaseous hydrogen is pre-cooled down to ~77 K by using liquid nitrogen, and, at the second stage, the magnetic liquefier provides a further decrease in temperature down to 20 K (H_2 liquefaction temperature). However, the lack of magnetic refrigerant materials with high magnetic entropy change in a wide temperature range of 77-20 K required for the hydrogen liquefaction is a bottle-neck for practical applications of MR cooling systems. In this talk, we will demonstrate our recent progress on development of hysteresis free magnetocaloric materials with giant and reversible magnetocaloric effect at the cryogenic temperatures.

2. Experimental

$(Fe,Mn)_2(P,Si)$ based alloys and $La(Fe,Si)_{13}$-based alloys were prepared by induction melting of high purity constituent elements followed by optimum homogenization heat treatment. The $Ho(Er)Co_2$-based alloys were prepared by arc melting of high purity of constituent elements. The magnetocaloric performance of the alloys was studies using squid-vsm. Microstructure of the samples was studied using XRD, SEM, and TEM at room temperature as well as cryogenic temperatures.

3. Results and discussion

In this talk, we will first demonstrate how data science can be used to develop magnetocaloric materials with giant and reversible magnetocaloric effect at the cryogenic temperatures. We conducted machine learning on a dataset extracted from literature on Fe_2P based alloys to predict optimum alloy composition which results in a decrease of transition temperature below 100 K (Fig. 1). Combination of machine learning and experimental validations resulted in realization of rare-earth free $(Mn,Fe,Co)_2(P,Si)$ based compounds which exhibit a large magnetocaloric performance in isothermal magnetic entropy change (ΔS_m) of 7.5–11.5 J/kgK at the temperatures below 100 K [1]. This study demonstrates that data-driven development of magnetocaloric materials can efficiently boost the optimization of their properties, thus aiding the practical applicability of magnetic refrigeration technology. In the second part of the talk, we will discuss how the alloys design and microstructure engineering, such as engineering of the type and distribution of secondary phases, can benefit to eliminate thermal hysteresis [2]. We will show the effect of soft secondary phases in reduction of thermal hysteresis in $La(Fe,Si)_{13}$-based compounds with a transition temperature of below 77 K [2]. Moreover, we will demonstrate how by designing the alloy composition in $Er(Ho)Co_2$-based compounds, a series of materials with a giant and reversible magnetocaloric effect (MCE) in magnetic entropy change ($-\Delta S_m > 0.2$ Jcm^{-3}K^{-1}) can be developed, suitable for operation in the full temperature range required for hydrogen liquefaction (20-77 K) [3]. We found that the giant MCE becomes reversible, enabling sustainable use of the MR materials, by eliminating the magneto-structural phase transition revealed by detailed cryogenic and in-situ microstructure characterizations. We will discuss how this discovery can lead to the application of $Er(Ho)Co_2$-based alloys for the hydrogen liquefaction using MR cooling technology for the future green fuel society.

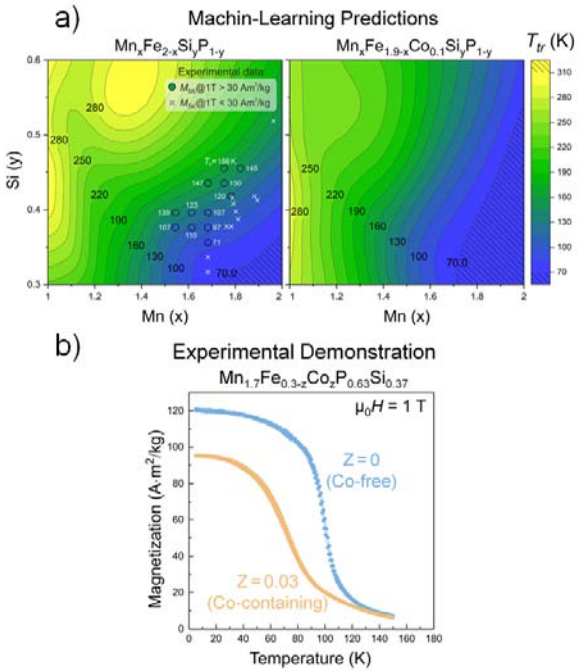


Figure 1: Machine learning assisted reduction of transition temperature of $(Mn,Fe)_2(P,Si)$ to the cryogenic temperatures.

4. Acknowledgement

This work was in-part supported by the JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI18A3

Reference

1. J. Lai, A. Bolyachkin, N. Terada, S. Dieb, Xin Tang, T. Ohkubo, H. Sepehri-Amin, K. Hono, Acta Mater. Vol. 232 (2022) p.117942
2. J. Lai, H. Sepehri-Amin, Xin Tang, J. Li, Y. Matsushita, T. Ohkubo, A. T. Saito, K. Hono, Acta Mater. Vol. 220 (2021) p.117286
3. Xin Tang, H. Sepehri-Amin, *et al.* Nature Communications Vol. 13 (2022) p.1

水素液化のための AMRR 用磁気冷媒開発（JST-Mirai）
-球状磁気冷凍材料の作製技術とその特性-

Magnetic refrigerant development for AMRR for hydrogen liquefaction (JST-Mirai)
-Fabrication technology and characteristics of spherical magnetocaloric particles-

山本 貴史、竹屋 浩幸、齋藤 明子、高野 義彦、沼澤 健則 （物材機構）

YAMAMOTO. D. Takafumi, TAKEYA Hiryoyuki, SAITO T. Akiko, TAKANO Yoshihiko, NUMAZAWA Takenori (NIMS)

E-mail: YAMAMOTO.Takafumi@nims.go.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けた動きが世界的に加速する中で、次世代エネルギー媒体として水素が注目されている。こうした背景から、水素の効率的な運搬利用を可能にする技術開発の重要性がより一層高まっている。NIMS では、磁気冷凍による高効率水素液化技術の確立を目的として、能動的蓄冷式磁気冷凍機（AMRR）の開発を進めている[1]。AMRR において高い冷凍性能を得るには、大きな磁気熱量効果を示す磁性材料（磁気冷凍材料）を、直径数百ミクロンの球状材料へと加工した上で磁気冷媒として用いるのが良いとされている。そこで我々は、低温用磁気冷凍材料候補物質を対象に、種々のアトマイズ法を用いた球状磁気冷凍材料の作製に取り組んできた。本講演では、ガスアトマイズ法に基づく粒子化技術および作製した球状粒子の特性を中心に、これまでに得られた成果を紹介する[2, 3]。

2. 実験方法

NIMS 現有の小型ガスアトマイズ装置を用いて、ラーベス相金属間化合物 RT_2 (R = 希土類元素, T = Al, Co など)や希土類二ホウ化物 HoB_2 の球状磁気冷凍材料を作製した。これらの物質はいずれも、高融点である上に反応性が高いことや非常に脆いといった特徴から、通常のアトマイズ法を適用することが難しい。そこで我々は、原料棒の作製手法や加熱方式、およびアトマイズプロセスを工夫して粒子化を実現した。得られた球状試料について、球形度や粒径分布の評価、結晶相の同定、磁化および磁気熱量特性の評価を行った。

3. 結果と考察

本研究におけるアトマイズプロセスは繰り返し行うことができ、これまでに、AMRR に適した直径 200-500 μm の粒子をキログラムオーダーで作製することができている。 Figure 1 に $HoAl_2$ および HoB_2 のガスアトマイズ粒子（直径 212-355 μm）の電子顕微鏡画像を示す。いくらか異形が見られるものの、多くの粒子が球形であることが分かる。また、作製した球状試料は、酸化物などの不純物が少ない純良なものであり、バルク対応物と比べて遜色のない磁気熱量特性を示すことを確認している (Figure 2)。講演では、これまでの成果を踏まえた上で、低温用球状磁気冷媒作製に関して、現時点で残された課題や今後の指針についても議論する予定である。

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。

参考文献

1. NIMS NOW 19 (2019) 4.

2. T. D. Yamamoto et al., Appl. Phys. A 127 (2021) 301.

3. T. D. Yamamoto et al., J. Magn. Magn. Mater. 547 (2022) 168906.

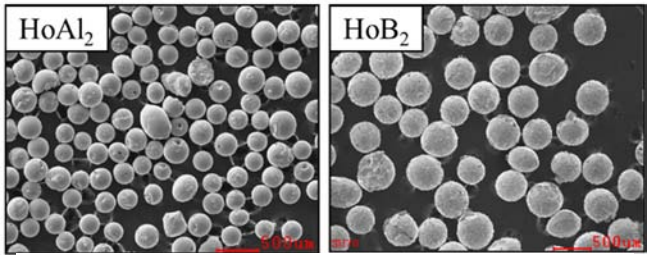


Figure 1: Electron microscope images of $HoAl_2$ and HoB_2 particles with 212-355 μm diameter.

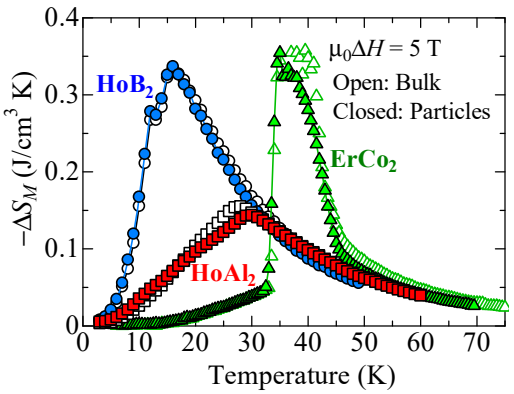


Figure 2: Magnetic entropy change of particles (open) and bulk counterpart (closed) for HoB_2, $HoAl_2$, and $ErCo_2$.

大容量 4KGM-JT 冷凍機の開発

Development of High-Capacity 4K GM-JT Cryocoolers

島田 卓弥, 笹崎 修司(住重)
SHIMADA Takuya, SASAZAKI Syuji (SHI)
E-mail: takuya.shimada@shi-g.com

1. はじめに

近年のヘリウムガス高騰や入手困難による省ヘリウム化の一例として、超電導磁石等の冷却を液体ヘリウムによるものから小型冷凍機によって直接冷却する方法があるが、1 台あたりの冷凍能力が小さいため、必要な冷凍能力によっては複数台組み合わせて使用することになり、消費電力(効率)やフットプリント、メンテナンスコストの面で課題がある。そのため、当社製 4KGM 冷凍機 RDE-418D4 を予冷機として使用した 10W@4.2K クラスの大容量かつ高効率な 4KGM-JT 冷凍機 RJT-100 の開発を進めているので、報告する。

2. 大容量 4KGM-JT 冷凍機 RJT-100 の概要

大容量 4KGM-JT 冷凍機 RJT-100(再凝縮タイプ)の構成を図 1 に示す。RJT-100 は 2 段ステージタイプの当社製 GM 冷凍機 RDE-418D4 を予冷機として使用した 4KGM-JT 冷凍機である。JT 冷媒回路は GM 冷媒回路と隔離されており、それぞれ JT 圧縮機ユニット J117V および GM 圧縮機ユニット E-77A(開発中)と接続されている。また、シールド冷却をする場合の一例として、単段ステージタイプの GM 冷凍機と圧縮機ユニット E-77A も記載している。

E-77A はヘリウム圧縮機と GM 冷凍機の回転数をインバータにより調整が可能であり、冷却は水冷方式を採用している。

J117V はヘリウム圧縮機 2 台により 2 段圧縮を行っており、E-77A と同様にインバータにより圧縮機の回転数を調整可能かつ水冷方式である。内部にバッファ回路を設けており、RJT-100 の冷却開始(常温)から完了(4.2K)まで、JT 冷媒回路の高圧及び低圧圧力を一定に調整する機能を有する。

RJT-100 の JT 冷媒回路は、予冷機の 1 段ステージ、2 段ステージとそれぞれ熱交換を行い、固定オリフィスによる JT 膨張によって気液混合状態となり、4.2K を得る。オリフィス以降のインターフェースは使用目的別に冷却ステージを設けたステージタイプ(図 2(a)参照)と挿入管の先に凝縮器を設けた再凝縮タイプ(図 2(b)参照)の 2 種類を開発している。熱交換後のヘリウムガスは、熱交換器を通り、J117V の低圧ラインに接続される。4.2K は液体ヘリウムの飽和蒸気圧(約 99kPa abs)により一意に決まるため、J117V の低圧ラインの圧力調整により 4.2K がコントロールされる。

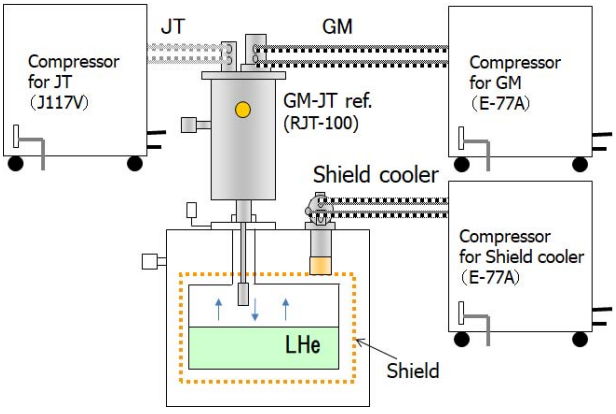
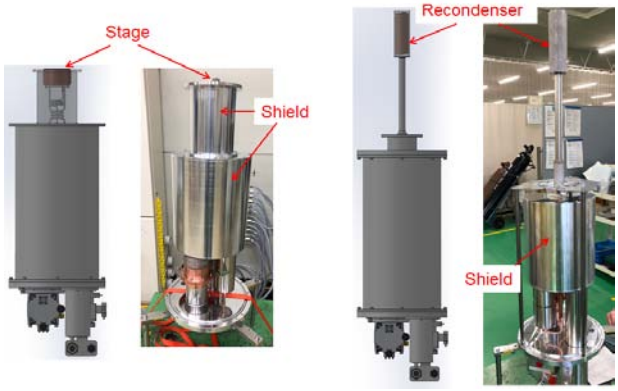


Fig. 1 Configuration of 4KGM-JT Refrigeration System (recondensation type)

Table 1 Specifications of 4KGM-JT Refrigeration System

	Stage Type	Recondensation type
Cooling capacity (W)@4.2K	≧9.0 (T.B.D.)	≧8.5 (T.B.D)
Power consumption (kW)	≦14.1 (T.B.D.)	
Outside dimensions (mm)	φ350×L:1040	φ350×L:1435
Weight (kg)	60	70
Maintenance interval (h)	10000 (T.B.D.)	



(a) Stage type (b) Recondensation type

Fig. 2 3D model and photograph of the RJT-100

3. 性能試験結果

表 2 に当社製冷凍機との性能比較を示す。開発した GM-JT 冷凍機は、4K 冷凍能力ならびに COP において GM および PT(Pulse tube)冷凍機に対し向上している。

Table 2 Comparison of specifications another type ref.

Ref. type	GM	PT	GM-JT
Model	RDE-418D4	RP-182B2S	RJT-100 (Stage type)
4K cooling capacity	2.0W@4.2K	1.5W@4.2K	9W@4.2K (T.B.D.)
COP※2	2.7×10^{-4}	1.0×10^{-4}	6.4×10^{-4}
Power consumption※1	7.5kW	14.5kW	14.1kW
1st cooling capacity	50W@50K	36W@48K	N/A (Need a shield cooler)
Comp. unit	F-50×1	F-100×1	E-77A×1 J117V×1
Limit of max. heat load	No limit	No limit	≦9W
Orientation	Free	Vertical	Vertical

※1:Except for a compressor for a shield cooler.
※2:COP = 4K cooling capacity(W) / Power consumption(W)

4. まとめ

10W@4.2K クラスの大容量 4KGM-JT 冷凍機 RJT-100 の開発を行い、当社製の GM および PT 冷凍機に対し 4K 冷凍能力ならびに COP において、性能を向上することができた。当該冷凍機は現在開発中であり、2023 年度の上市を予定している。

蓄冷式冷凍機の 20K 以下における冷凍能力向上（その1）

Improvement of the cooling performance below 20K (part 1)

安田 仰, 大塚 清見, 金尾 憲一, 恒松 正二, 平塚 善勝(住重)
AOGU Yasuda, OTSUKA Kiyomi, KANAO Kenichi, TSUNEMATSU Shoji, HIRATSUKA Yoshikatsu (SHI)
E-mail: aogu.yasuda@shi-g.com

1. はじめに

住重(SHI)は，人工衛星に搭載する 4K 級冷凍機,1K 級冷凍機を供給している。4K 級冷凍機,1K 級冷凍機は予冷機とジュール・トムソン冷凍機で構成されており，予冷機は 20K 以下に冷却する必要があるが，予冷機として用いる蓄冷式冷凍機は 2 段構成にすることで 20K 以下の冷却を実現する。将来計画に向けてユーザーからは 4K 級冷凍機，1K 級冷凍機の冷凍能力の向上が求められている。4K，1K 領域での能力向上には，予冷機の冷凍能力を向上させ，予冷温度を下げることが有効である。

本開発では，4K，1K 領域での冷凍能力を向上させるために，予冷機の冷凍能力の向上に取り組んでおり，2 段目の蓄冷器を改良することで，冷凍能力の向上が期待できる。

本稿では，2 段構成の蓄冷式冷凍機の冷凍能力向上のため，計算モデルを構築して冷凍能力の推定を行い，蓄冷材の改良と性能試験を行った結果について報告する。

2. 性能向上検討

Table 1 に現在の 4K 級冷凍機および 1K 級冷凍機の予冷機の仕様を示す[1]。予冷機は 2 段式のスターリング冷凍機で，90 W の電力入力に対して，20 K で 200 mW の冷凍能力を有している。圧縮機ピストンはリニアモータにより駆動し，冷凍機内部の圧力を変動させている。膨張機ディスプレーサは圧縮機の圧力変動により駆動し，リニアモータにより位相調整をしている。

本開発では予冷機として用いる蓄冷式冷凍機の性能として，15 K で 200 mW の冷凍能力を目標値として定める。20 K 以下の冷凍能力を向上するためには，現在用いている SUS の蓄冷材料では動作ガスに対して，20 K 以下の熱容量が不足している。そこで蓄冷式冷凍機の 2 段目の蓄冷材を，SUS と比較して高い体積熱容量を持つ材料に置き換える。まず候補材料について，計算による冷凍能力への効果の予測を行い，その結果をもとに蓄冷器の製作，試験を行う。

3. 冷凍能力の推定

Fig.1 に 2 段構成の蓄冷式冷凍機の計算モデルを示す。幾何形状などのインプットパラメータは，Table 1 に示す現行機と同様の物を使用する。計算方法としては，各計算区間の温度を等温の仮定のもと計算する等温解析を使用する。圧縮ピストンと膨張機ディスプレーサの挙動は，リニアモータの電磁方程式と運動方程式を解くことにより計算する。蓄冷器の熱損失の計算には，Hausen の手法を用いた[2]。

Fig.2 に現行機蓄冷材と候補蓄冷材の蓄冷器への充填割合に対する冷凍能力の増加率の計算結果を示す。1 段目膨張空間の温度は 100 K，2 段目膨張空間の温度は 15 K とした。同図より，候補材料を蓄冷材として用いることで，冷凍能力が増加することが予測される。

4. まとめと今後の予定

4K 級冷凍機，1K 級冷凍機の冷凍能力の向上のため，予冷機である蓄冷式冷凍機の蓄冷器の改良の検討を行っている。計算結果より，体積熱容量の高い蓄冷材候補材料を使うことで，冷凍能力が向上することが示唆された。

本計算より得られた結果を用いて蓄冷器の製作を行い，冷却試験を実施し，その結果について当日報告する。

参考文献

1. K. Narasaki, et al. , Cryocoolers 19 (2016) 613
2. M. Jakob , “Heat Transfer” Vol. 2 , Wiley and Sons, New York (1957) 275

Table 1 Specifications of 2-stage regenerative cryocooler

Item	Value
Type	Two-stage Stirling Cooler (2ST)
Cooling Capacity	200 mW at 20K 1000 mW at 100 K
Environment Temp.	200 K - 300 K
Power Consumption	90 W
Size	Compressor: Φ108×400 L (mm) Cold Head: Φ81×329 L (mm)
Mass	9.5 kg
Drive Frequency	15 Hz

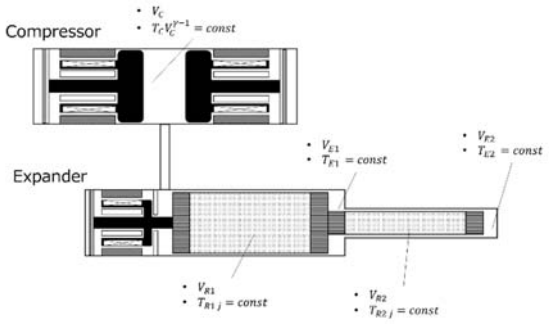


Fig.1 Analysis model for regenerative cryocooler

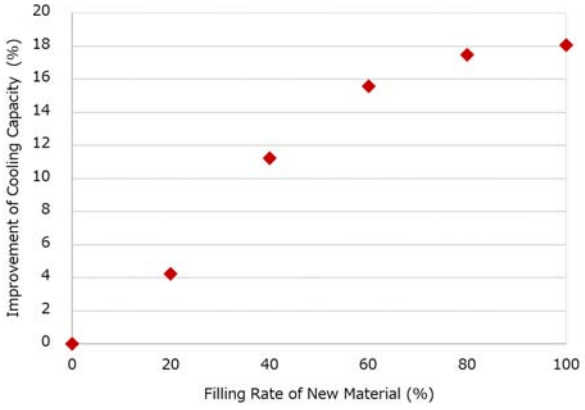


Fig.2 Improvement of cooling capacity

スターリング型パルス管冷凍機の性能予測手法の開発(その 1)

Development of Performance Prediction Method for Stirling Pulse Tube cryocooler

平塚 善勝, 大塚 清見, 恒松 正二, 金尾 憲一(住重), 楢崎 勝弘(新居浜高専)

HIRATSUKA Yoshikatsu, OTSUKA Kiyomi, TSUNEMATSU Shoji, KANAO Kenichi (SHI), NARASAKI Katsuhiro (NIT,Niihama College)

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

1. はじめに

住重(SHI)は, 1982 年から約 40 年に渡り人工衛星搭載用の冷凍機開発を宇宙開発事業として携わってきた。その間, 地球観測衛星, 科学衛星用センサ冷却やシールドクーラ用途として単段, 2 段スターリング冷凍機および JT 冷凍機を冷却システムとして提供してきた。近年ユーザからの要求仕様として, 現在の 5 年寿命から 10 年に延ばすことが求められている。単段スターリング冷凍機や JT 冷凍機は, これまでの試験実績から得られた知見により10 年寿命の目途は立っているが, 長尺なディスプレーサシールを持つ 2 段スターリング冷凍機に関してはその限りでない。この課題を解決するための方策として, 2 段パルス管膨張器の適応が考えられるが, 設計開発するための性能予測ツールを構築する必要がある。2 段パルス管冷凍機の開発に先立ち, 単段パルス管冷凍機を開発する際に使用した性能予測ツール(STPN)ならびに市販ソフト SAGE について評価検証を行ったので報告する。

2. 性能計算方法

パルス管冷凍機内部ガスの挙動は, 蓄冷器, 位相制御機構などの各抵抗体に大きく依存しているため, 冷凍機の性能を計算するには, 各構成要素における熱損失や圧力損失などの諸損失を考慮に入れた 3rd order による数値計算が必要となる。解析方法は, パルス管冷凍機を大きく 8 つの空間要素に分割し, 各空間に円形断面を有する多分割した空間要素に物理学の 3 保存則を適用する(図 1)。さらに, 圧縮機ピストンの運動方程式とモータ部電気回路のキルヒホッフの式を連立し, ピストンの挙動と電気入力を算出している。位相制御部は, 集中定数系を用いて LCR 等価回路モデルを解くことで簡素化している。

イナータンス内ガス運動方程式： $P^* - P_b = \left(L_{it} \frac{d^2 X_{it}}{dt^2} + R_{it} \frac{dX_{it}}{dt} \right) A_{it}$

バッファ内の圧力と温度の式：

$$\frac{dP_b}{dt} = \frac{dM_b}{dt} \frac{\gamma R_g T^*}{V_b}, \quad \frac{dT_b}{dt} = \left(1 - \frac{T_b}{\gamma T^*} \right) \frac{T_b}{P_b} \frac{dP_b}{dt}$$

本解析モデルは, 作動空間に座標を固定し, 流体の温度, 圧力などを座標と時間の関数として扱うオイラー座標系に基づいている。蓄冷器における作動ガスと蓄冷材との熱伝達及び摩擦係数は, 往復流れ場において得られた以下の式を用いる[2]。

$$N_u = \frac{\alpha d_{rg}}{\lambda} = 0.24 R_{e_d}^{0.67} \qquad (5 \leqq R_{e_d} \leqq 120)$$

$$f_r = \frac{\Delta P / N_{rg}}{\rho u / 2} = \frac{50.3}{R_{e_l}} + 0.390 \qquad (10 \leqq R_{e_l} \leqq 2000)$$

バルス管では管壁とガスとの間で熱交換があるため蓄冷器同様に, 高温端から低温端への熱流入が存在する。この交換熱量は, 往復流れ場における熱伝達特性に渦度の影響を考慮に入れた実験式を使って算出した[3]。

$$N_u = 0.92\ R_e^{0.44} P_r^{0.4} S_t^{-0.2} S_{tl}^{-0.26} \quad (R_e \leqq 2100)$$

$$N_u = 0.053\ R_e^{0.62} P_r^{0.4} S_t^{-0.2} S_{tl}^{-0.26} \quad (4000 \leqq R_e)$$

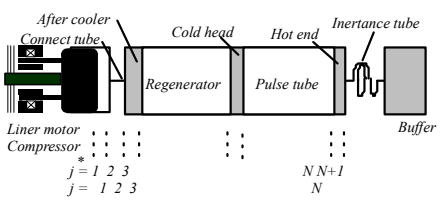


Fig. 1 Numerical analysis model.

パルス管の圧力損失については, 円管内における乱流の管摩擦係数である Blasius の式を用いて計算する。

しかし, この計算方法は, 各構成要素を多分割し, 個々の検査体積に割り当てられた連立方程式を解くため, 分割数を増やすと一般に解析精度は増すが収束性が悪くなる。2 段膨張器では構成要素が多くなるため, さらに計算時間が長くなる。

冷凍機などの性能計算コードとして米 Gedeon associates が提供しているSAGEプログラム(以後 SAGE)は, 独自の GUI 操作によるモデルを作成し, パラメータ自動変更機能と最適化機能を搭載しており, STPN と同様な物理量を解いてるにも関わらず収束性が良く, 今後, 構成要素が増加する 2 段パルス管冷凍機を開発する上での工数軽減が可能と考える。単段パルス管冷凍機の STPN ならびにSAGEによる計算結果を試験結果と比較し評価検討した。

3. 計算結果と試験結果の比較検討

図2には, 単段パルス管冷凍機の電気入力 120W 時の性能試験結果と STPN ならびに SAGE の性能計算結果が示されている。どちらの計算結果も試験結果より定量的には若干大きく計算されているが, 定性的には良い結果が得られていると考える。しかし, SAGE は STPN より収束性は良いが, コードが公開されていないので(購入は可能), プログラムが収束しない場合のデバック作業が難題で, その他構成要素部品パラメータの物理的な設定に限界があり, 冷凍機開発においてどちらのプログラムも一長一短な側面があり今後の課題となる。

4. まとめと今後の予定

2 段パルス管冷凍機を設計開発するに先立ち, 単段パルス管冷凍機を設計した際に使用した STPN と市販 SAGE を試験結果と合わせて評価した。その結果, どちらの方法も課題があるものの新規冷凍機開発における仕様としては満足できる結果は得られており, 2 段パルス管冷凍機開発では, 適宜プログラム方法の使用検討を考えている。

参考文献

1. Y. Hiratsuka, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 100 (2020) p. 107.

2. T. Tanaka, et al. , JSME, 55-516, B(1989), 2478-2485.

3. M. Shinoki, et al. , JSME, 02-20, (2002), 79-82.

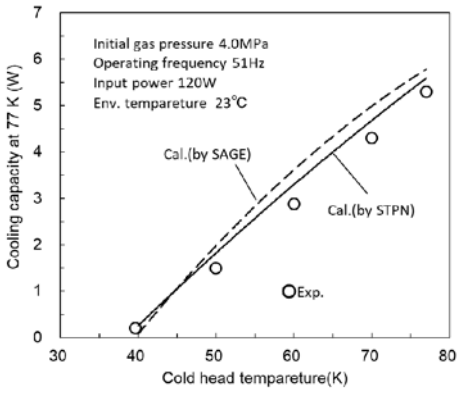


Fig. 2 Comparison between the calculation results of STPN, SAGE and the measurement results.

アンカラ大学で実施されたパルス管冷凍機製作スクール

Pulse tube cryocooler fabrication school at Ankara University

増山 新二（大島商船高専），上岡 泰晴（合同会社コールドテック），Ali Gencer（アンカラ大）
MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College), KAMIOKA Yasuharu (ColdTech LLC), Ali GENCER (Ankara Univ.)
E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

近年，冷凍部会の活動の一環として，「低温技術夏合宿 77 K 小型冷凍機を作ろう」といった取組みが夏に開催されている[1]。しかしながら，ここ数年は新型コロナの影響で実施が見送られており，今年度も残念ながら中止となった。新型コロナに対する国内の対応は，外国人観光客の受入れ規制が緩和されたものの，マスク着用，座間間隔の確保，大人数での会食制限などの要請が，依然継続中である。

これに対し，新型コロナに対する要請がほとんど無いに等しいトルコにおいて，「パルス管冷凍機製作スクール」が 8 月，アンカラ大学で実施された。本報では，その実施内容，スクール風景などを中心に報告する。

2. スクール実施内容

本スクールは，トルコの首都アンカラ中心部から郊外へ 20 km ほど南下した Ankara 大学の Gölbaşı キャンパスで行われた。近くに Mogan 湖があり，湖畔のウォーキング，景色を楽しみながらの食事をすることができる。

ご存じの通り，トルコでは MgB_2 などの超電導研究が盛んに実施されており，本スクールも，大学内の「超電導研究センター」のプロジェクトの一環として開催された。日程は 8 月 13～26 日の約 2 週間で，前半の 1 週間でパルス管冷凍機の準備，後半の 1 週間で講義や実験を行った。後半のスケジュールを **Table 1** に示す。日本で開催される夏合宿と比較して，講師の違いから講義内容が若干異なるが，ほぼ同じ内容である。参加者は，日本から講師として 2 名 (増山・上岡)，トルコから約 15 名 (内，学生は 2/3 程度で，残りは大学教員) であった。

3. パルス管冷凍機製作と動作試験

パルス管冷凍機は，コールドヘッド部 (パルス管と蓄冷器) の配管のみが完成している状態であったため，スクールで (1) 電磁バルブとニードルバルブ配管，(2) 蓄冷材充填，(3) 温度計・ヒータ配線が主な工程であった。**Fig. 1** に製作したパルス管冷凍機の外観写真を示す。室温部配管は，パルス管冷凍機の 4 つの動作モード (ベーシック，オリフィス，ダブルインレット，4 バルブ) が実施できるよう，スェージロック，T 型チーズ，エルボなどを駆使して，はんだ付け，銀ロウ付けが行なわれた。蓄冷材としては，#200 ステンレスメッシュが準備され，1 枚ずつ充填する作業が行われた。後から感想を聞くと，充填作業は，意外と楽しかったとのことである。

パルス管冷凍機につながる圧縮機は，住友重機械工業社の F-70 が使用された。コールドヘッドサイズから考慮すると，オーバースペックのため，高低圧をバイパスするバルブを設け，ガスの流れを調整した。

Table 2 に，4 つの動作モードにおける到達温度の実験結果を示す。動作速度はいずれも 2 Hz とした。限られた実験時間のため，電磁バルブ開閉タイミングや各ニードルバルブ開度の最適値を見出すことができなかったものの，オリフィスとダブルインレットモードで窒素温度を下回ることができた。ただし，冷凍能力の測定には至らなかった。

4. まとめ

日本国内が，新型コロナに対する行動制限下にあった 8 月，トルコのアンカラ大学にて，約 2 週間のパルス管冷凍機製作スクールが実施された。スクール参加者は，冷凍機製作，実験のどの過程においても，熱心に取り組み，時にはわれわれ講師陣にたくさんの質問を投げかけてきた。実験結果は，最低目標であった窒素温度を下回ることができ，われわれも一安心であった。今後について，Gencer 先生や他の参加者は，2 段型パルス管冷凍機も製作してみたいと言っていたので，トルコ版パルス管冷凍機製作スクール第 2 弾が実施される可能性が高いが，そのための準備が大変そうである。

Table 1 Schedule of pulse tube school at Ankara Univ.

Date (Aug.)	Contents of lectures	
22	Opening remarks	A. Gencer Y. Kamioka
	Theory and design of cryocoolers I	S. Masuyama
	Vacuum and thermal insulation	Y. Kamioka
	Cryostat and a cryocooler	Y.Kamioka
	Safety of cryogenics and high pressure gas	Y. Kamioka
23	Theory and design of cryocoolers II	S. Masuyama
	A cryocooler you make	S. Masuyama
	Fabrication of a pulse tube cryocooler	All members
24	Experiments	All members
25	Experiments	All members
26	Experiments	All members
	Presentation by students	Students
	Review and closing remarks	A. Gencer Y. Kamioka S. Masuyama

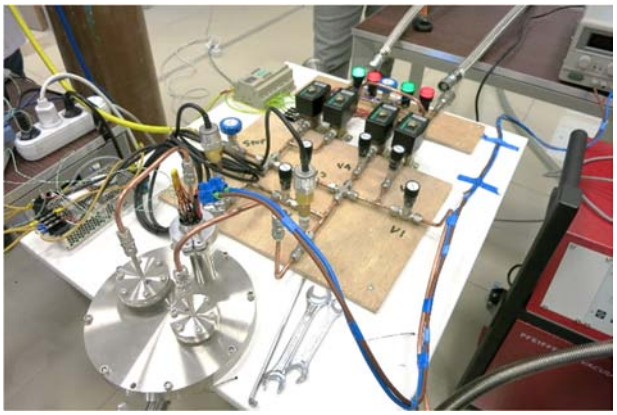


Fig. 1 Photo of the fabricated pulse tube cryocooler

Table 2 Experimental results of the attained temperature by each operational mode. The operation speed was 2 Hz.

Operational mode	Attained temperature [K]
Basic	157
Orifice	74
Double inlet	66
Four-valve	80

参考文献

1. 野村裕一ら: Abstracts of CSSJ conference, Vol. **97** (2018) p. 57

PTFE 多孔質膜を用いた極低温機器の予冷時間短縮～液体窒素による急冷実験

Chilldown time reduction of cryogenic equipment using PTFE porous membrane — quenching experiment in liquid nitrogen

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

1. はじめに

極低温機器の配管，タンクなどを液体窒素や液体水素を用いて予冷する際，冷媒の消費量削減，時間効率の観点から予冷時間の短縮が重要となる。ところが予冷過程の初期においては，伝熱面に膜沸騰による蒸気相が発生し伝熱を阻害することが知られている。そこで古くから，表面テクスチュアリングやコーティングなどの表面改質による伝越促進が試みられてきた。その一例が，PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）コーティングである。熱絶縁層を用いて伝熱を促進するという一見矛盾した方法であるが，期待以上の効果が得られる。しかし，膜厚を厚くするとその低い熱伝導率によって促進効果が相殺され，予冷時間短縮には限界があった。そこで，本研究では，ライデンフロスト現象を抑制すると期待される PTFE 多孔質膜を金属面に貼り付けることにより，さらなる予冷時間短縮を試みた。

2. 実験方法

30 mm×30 mm×1 mm の銅板をユニレート®製のブロック（70 mm×70 mm×20 mm）に貼り付け，銅板片面の伝熱面（30 mm×30 mm）以外を熱絶縁した。銅板の温度を測定するため，熱絶縁された側の表面中央に T 型の熱電対を半田付けした。液体窒素の浴槽に，伝熱面を上にしてブロックを落下させ，その後の温度変化を測定した。

続いて，0.1mm 厚の PTFE 多孔質膜（住友電工ファインポリマー製，ポアフロン®メンブレン，FP-500-100），または同じ 0.1 mm 厚の PTFE シートを，真空グリースで銅伝熱面に貼り付け，同様の実験を行った。多孔質膜は，薬液ろ過などに使われるもので，延伸によって繊維化したPTFEに，ミクロンオーダーの空孔が形成されている（図 1）。

3. 実験結果と考察

図 2 に，銅裸面，PTFE シート貼り付け，PTFE 多孔質膜貼り付けの 3 条件における銅板の温度変化を示した。90 K に達する時間は，銅裸面で 82 秒，シートで 24 秒，多孔質膜で 11 秒であった。多孔質膜貼り付けでは，シートを上回る予冷時間短縮の効果があった。

図 3 には，集中熱容量モデルを仮定し，次式を用いて求めた伝熱面における熱流束 q を示した。

$$q = -\frac{mc}{A}\frac{dT}{dt} \qquad (1)$$

ここで m, c, Aはそれぞれ銅板の質量，比熱，伝熱面積である。 冷却速度$\left(\frac{dT}{dt}\right)$は，図 2 の温度変化のデータから計算した。いずれの条件においてもピークが見られるが，これはプール沸騰に見られる限界熱流束点に相当し，限界熱流束の値はいずれも 2×10^5 W/m^2 程度であった。しかし限界熱流束点における銅板の温度は，大きく異なり，銅裸面で 90 K，シートで 176 K，多孔質膜で 288 K であった。多孔質膜では，限界熱流束点が室温付近までシフトしたのみならず，それ以下の温度でも全域にわたり，高い熱流束を維持した。また，低温ほど熱伝達係数が増加する特異な現象も観測された。これらが予冷時間の短縮に大きく寄与した。

シート貼り付けによる予冷時間短縮は，PTFE の低い熱伝導率に起因することがすでに報告されているが，PTFE 多孔質膜貼り付けによる大幅な伝熱促進の報告は例がない。

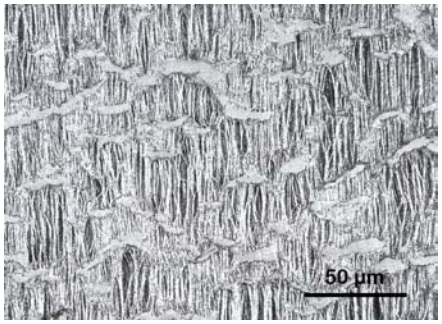


Fig. 1 Surface micrograph of PTFE porous membrane.

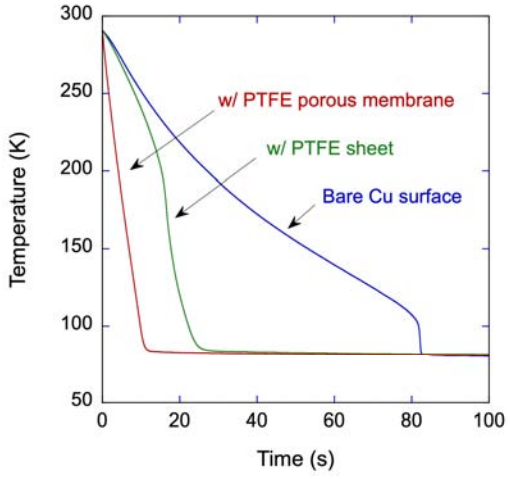


Fig. 2 Effect of PTFE sheet/porous membrane attachment on plate temperature variation.

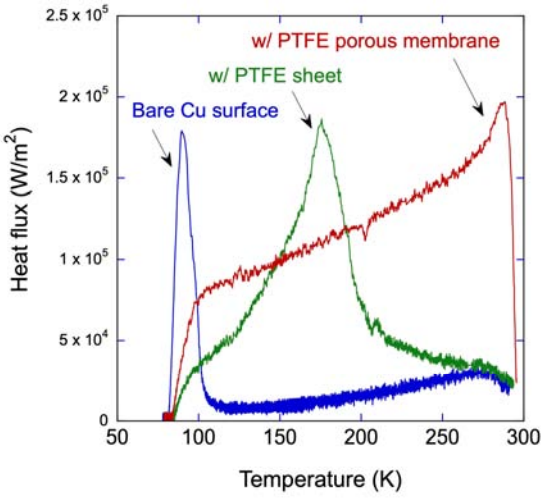


Fig. 3 Effect of PTFE sheet/porous membrane attachment on heat flux variation.

小型超電導機器の並列ガス循環冷却技術の開発

Development of parallel gas circulation cooling technology for compact superconducting equipment

高木 紀和, 高橋 政彦, 上野 航生, 栗山 透, 福島 武人, 上田紘司, 金谷和長(東芝エネルギーシステムズ)
TAKAGI Norikazu, TAKAHASHI Masahiko, UENO Koki, KURIYAMA Toru, FUKUSHIMA Takehito, UEDA Koji, KANAYA Kazuhisa (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)
E-mail: norikazu1.takagi@toshiba.co.jp

1. 背景

複数の超電導・極低温機器を分散配置する場合、一つの冷却源から各機器に並列流路で冷却ガスを供給すると、個別に冷却源を設ける場合に比べて高効率に冷却できる。しかし、並列流路では不安定性の課題があり、制御が必要なため、小型機器ではあまり利用されてこなかった。そこで、小型機器向けの並列循環冷却システムの構築を目指し、制御に必要な小型の低温バルブと低温流量計を試作し、単流路での流量計の評価と温度制御を行った。

2. 試験装置

試験装置の構成を Fig.1 に示す。ヘリウムガスは室温部の圧縮機で昇圧され、2 段 GM 冷凍機と 2 台の熱交換器で冷却された後、熱負荷を模擬したヒータ(HS)を設けた銅ブロックを冷却する。銅ブロック入口ガス温度(T1)は、冷凍機 2 段ステージに設けたヒータ(H2nd)の出力で調整する。冷凍機には 2 段 GM 冷凍機 1 台(住友重機械工業株式会社製 RDK-415D)を用いた。温度測定には Cernox®温度計を用いた。

室温部に流量計 1(TELEDYNE Hastings Instruments 社製 HFM-301)を設け、低温流量計 2 の誤差評価に用いた。低温流量計 2 は、簡易な構成で圧力損失の小さい熱式流量計の温度差測定法を用いた。配管外側にヒータ(HF)を設け、ヒータの上流温度(T3)と下流温度(T4)を測定した。質量流量 m は、ヒータ加熱量Qとヒータの上流と下流の温度差 ΔT、ガス比熱 C_p を用いて以下の関係式から求められる。

$$Q = m \times C_p \times \Delta T$$

流量調整用の低温バルブには、ニードルバルブを用いた。駆動部に直結したステップモータの回転角度でバルブ開度を制御する。制御部では、各温度計の微小電圧を、アンプを介して PC に入力し、ノイズ除去処理を行い温度に換算する。制御対象である銅ブロック温度(T2)が目標値となるよう、PC からモータへ回転角度の制御信号を出力する。

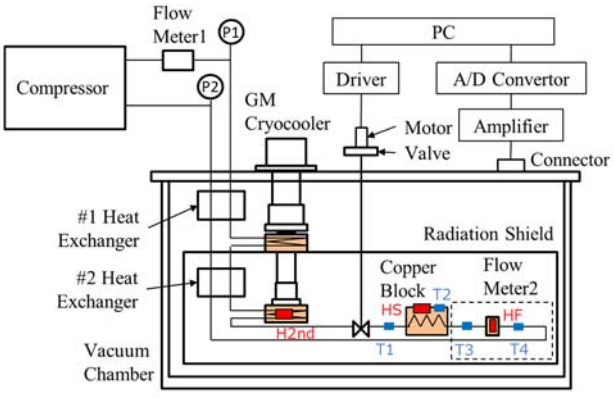


Fig.1 Flow diagram of helium gas cooling system.

3. 試験方法

(1) 室温流量計 1 を用いて低温流量計 2 の誤差評価を行う。低温流量の入口温度は 28K、流量は 0.1～0.8g/s、流量計ヒータ HF の出力は 1～2W として、2 つの流量計の測定値を比較する。

(2) 熱負荷模擬ヒータ(HS)の出力を変化させ、低温バルブを用いた温度一定制御を行う。銅ブロック温度(T2)の目標温度を 28.2K とし、ヒータ出力をステップ状に 13W から 6W に下げ、その後 13W へ上げた。

4. 試験結果

(1) 室温流量計 1 で測定した流量 m_1 に対する低温流量計 2 で測定した流量 m_2 の誤差評価結果を Fig.2 に示す。縦軸は m_1 に対する誤差 m_2-m_1 の比率を示す。低温流量計の測定誤差は 3%以下となった。低温流量計を用いて高い精度で流量を測定できることを確認した。

(2) 温度制御の試験結果を Fig.3 に示す。熱負荷の変化に応じて流量が変化し、銅ブロック温度(T2)の目標温度からの差は熱負荷変化直後に最大で 0.4K 以下となり、定常状態での差は 0.1K 以下となった。流量の変化は低温流量計で確認できた。

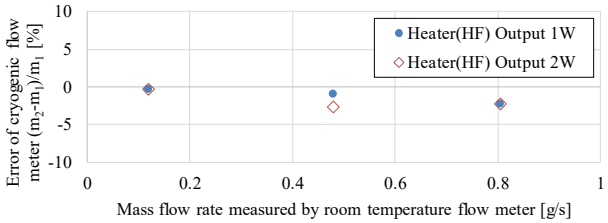


Fig.2 Validation of cryogenic mass flow meter.

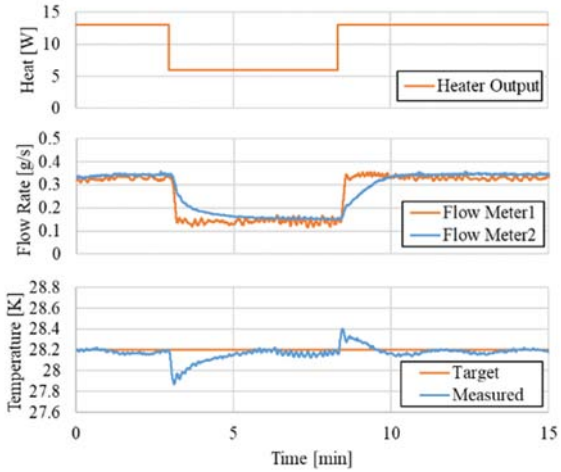


Fig.3 Temperature and flow rate profile of temperature control experiment under heat load variation.

5. まとめ

並列流路のガス循環冷却制御の実証に向けて、単流路の試験装置において、簡易な構成の熱式低温流量計の誤差評価を行い、測定誤差 3%以内の精度が得られた。低温バルブを用いた温度制御を行い、熱負荷変化時の目標温度との差は最大で 0.4K 以下に抑えられた。今回構築した制御系を用いて、今後並列流路での温度制御の実証を目指す。

液体水素浸漬冷却 MgB_2 線材への過電流通電による熱暴走測定

Measurement of overcurrent test results and thermal runaway of MgB_2 wire with liquid hydrogen immersion cooling.

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明(日立), 白井 康之, 塩津 正博, 川崎 理香子, 松本 郁哉, 大矢 輝(京大)
TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki (Hitachi),
SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro, KAWASAKI Rikako, MATSUMOTO Fumiya, OYA Hikaru (Kyoto university)
E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

液体水素を用いて高温超電導コイルを直接または間接的に冷却することが検討されている。浸漬冷却においては，液体水素の核沸騰熱伝達における限界熱流束の大きさと温度 20K 以上での金属材料の比熱の大きさから，10^{-4}V/m の電界基準で定義される臨界電流値を超える電流値を安定的に通電できる場合がある(以下，過電流通電と呼ぶ)。超電導線材・磁石の冷却・保護設計には，液体水素の冷却特性測定の積み上げが必要であり，先行研究では過渡的な過電流に対する冷却特性把握[1]や，液体水素の沸騰状態を観測する装置の作製[2]が行われている。本研究では短尺 MgB_2 線材を対象に，液体水素浸漬冷却中での過電流通電による熱暴走を測定し，限界熱流束の値を把握することを目的とした。

2. 実験方法

Fig.1 に過電流通電に用いたサンプルの概念図を示す。用いた線材は 48 本の MgB_2 フィラメントを有する線径 0.6mm の MgB_2 線材である。電圧タップ間距離を約 20mm として第一，第二，第三区間の電圧を観測した。第二区間の中央の長さ 7mm の部分は，FRP 板とグリスを用いて MgB_2 線材が液体水素に直接接触しない略断熱区間とし，第二区間から熱暴走が開始することを期待した。液体水素温度および槽内圧力は 20K/大気圧または 30K/810kPa，外部磁場はない環境下で，臨界電流値を測定した後に，電流値をステップ状に上昇させることで核沸騰から膜沸騰に至る境界点を探索した。

3. 結果

20K および 30K における自己磁場での臨界電流値はそれぞれ 150A，30A であった。Fig.2 に過電流通電における熱平衡状態の電界測定結果を示す。温度は 30K である。これらは各電流値において約 10 秒間電流値を維持し，発生電圧が安定していることを確認して次の電流値へ変化させた結果である。臨界電流値の電界基準である 10^{-4}V/m を超え、10^{-1}V/m でも安定して通電できたことが分かる。

Fig.3 に 30K における熱暴走開始時の電流および各区間での電界を示す。114.7A 通電時には電圧はほぼ一定の値を保っていたが，117.7A へ電流値を増加させる途中から第二区間の電圧上昇が他よりも大きくなり，117.7A へ到達後 1.5 秒ほどで電圧が急上昇した。その後 0.5 秒ほど遅れて第一，第三区間の電圧も急上昇し，中央の第二区間から始まった熱暴走が両脇の区間へと伝搬したことが推定できる。

各区間における消費電力は電流(A)×電圧(V)で明確であるが，冷却に有効に働いた線材表面積は推定せざるを得ない。円形断面の線材を長手方向が水平となるよう，ほぼ鉛直に立っているサンプルフォルダ面に接するように配置しているため，核沸騰限界においては線材下半分からは水素気泡が逃げにくく，線材表面積の上半分の 50%が冷却に有効に働いたと仮定する。この有効断面積を用いて算出した熱流束(kW/m^2)を Fig.3 中に示す。これらの結果から，液体水素温度 30K，槽内圧力 810kPa における限界熱流束は約 40kW/m^2 と得られた。当日は大気圧下 20K での測定との比較なども報告する。

参考文献

1. H Shigeta, et al. : IEEE TAS 26 (2016) 6200405
2. A Iwamoto, et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.101 (2021) p.4

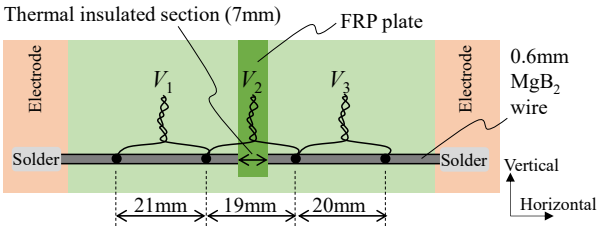


Fig.1 Schematic view of test sample.

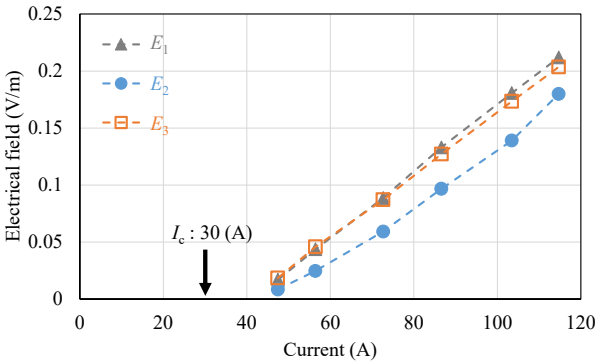


Fig.2 *I*–*E* measurement results in thermal equilibrium at 30 K, self field.

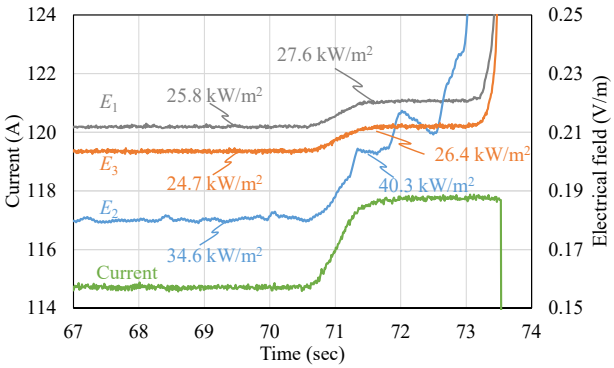


Fig.3 Electrical field (E_1, E_2, E_3) and heat flux (kW/m^2) near the thermal runaway begun from the second section at 30 K.

多層断熱材の巻き方による熱侵入量への影響
Influence of winding methods of multi-layer insulation on the heat leak

渡邉　裕文，塩見 天哉，神田　昌枝，山口　作太郎 （中部大）
WATANABE Hirofumi，SHIOMI Takaya，KANDA Masae，YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)
E-mail: h_watanabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

超伝導送電用の断熱配管では輻射による熱侵入を低減するために低温部分に多層断熱材(MLI)が施工される。石狩の超伝導直流送電プロジェクトの断熱配管を開発する際、MLI の積層層数を一定として巻き方が異なる断熱配管の断熱性能をテストすると、層数が同じなのにも関わらず断熱性能が大きく異なる結果が得られた[1,2]。本研究では石狩プロジェクトで採用された巻き方を模擬した方法を基準として、異なる巻き方を試行することにより、断熱配管の断熱性能向上の可能性を調べる。

2. 実験方法

実験装置の模式図を図 1 に示す。今回は保護槽付きの縦型ボイル・オフ・カロリメーターを用いた。液体窒素タンクは円筒形であり、上中下の 3 段のタンクからなる。測定用の中タンクの長さは 600 mm、保護槽である上下タンクの長さは 290 mm であり、上下タンクと中タンクの間には 10 mm の隙間がある。液体窒素タンクの外径は 89.1 mm であり、外容器の内径は 159.6 mm である。内部の温度測定用に TL1~6 の熱電対が取り付けられている。

今回、MLI にはカネカ製 KFHN-9B05 を用い、３種類の巻き付け方を試行した。巻き付け方の模式図を図２に示す。一つ目は(a)石狩プロジェクトの断熱配管同様 MLI フィルムを積層し、片側を糸で緩く縫ってブランケット化し、最外一層のみ継ぎ目を覆うように巻き付けた場合、二つ目は(b)一枚の MLI フィルムを連続的にスイスロール状に巻き付けた場合、三つ目は(c)MLI フィルムを一層ずつ巻き付け、フィルムの継ぎ目部分をタンクの外周上で 180 度ずつ交互になるように巻き付けた場合である。いずれの場合も巻き付け層数は７層とし、MLI の使用量を揃えるために同面積 MLI フィルムを使用した。

実験では MLI を巻き付けた液体窒素タンクを外容器内に取り付け後、外容器の排気を開始する。放出ガスを十分に減らすために 100 時間以上排気を継続した後、液体窒素タンクに液体窒素を充填する。カロリメーター内部が十分に冷えるのを待つため一晩置き、液体窒素を再充填する。そして、中タンクに流量計を取り付け、測定を開始する。外容器の温度は熱電対による温度測定結果を元に温度調節器で制御されたヒーターにより一定に保つ。

3. 測定結果

測定結果の例として外容器を 25 ℃に設定し、MLI をスイスロール状に巻いた場合の結果を図３に示す。TL4 は図１に示される中タンクに繋がるパイプのタンク入口直上の温度、FR は蒸発窒素ガス流量を示す。TL4 が上昇した後の１時間の流量を、中タンク満液時の流量として、熱侵入量を求めるのに用いた。流量計は 20 ℃で校正されており、流量と中タンク 1 m 当たりの熱侵入量の関係は、

$$q\ [\mathrm{W/m}] = 6.427 \times Q\ [\mathrm{L/min}]$$

である。

図４に今回の結果を示す。外容器温度 25~50 ℃において熱侵入量は、ブランケット化して巻いた場合 0.411~0.494 W/m、スイスロール状に巻いた場合 0.393~0.473 W/m、継ぎ目部分を交互に重ねて巻いた場合 0.330~0.421 W/m であった。3 種類の巻き方の内、継ぎ目部分を交互に重ねて巻いた場合に一番良好な結果が得られた。一方、熱的短絡が生じるスイスロール状に巻く方法でもブランケット化した場合と同程度の断熱性能が得られた。

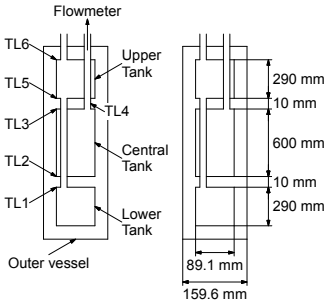


Fig. 1 Experimental setup

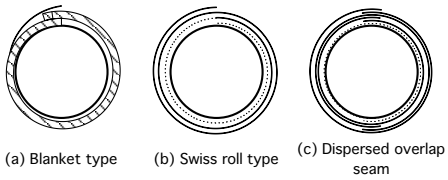


Fig. 2 Winding methods of MLI

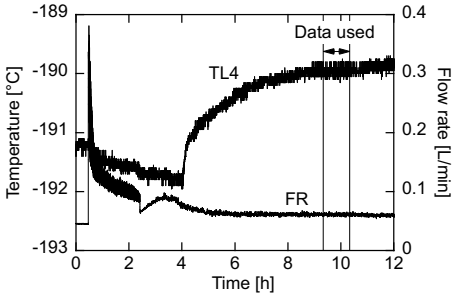


Fig. 3 An example of the measured results

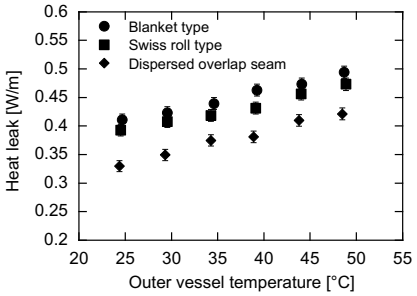


Fig. 4 The results of measurements

参考文献

1. H. Watanabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.101.
2. H. Watanabe, et al.: J. Phys: Conf. Series, Vol. 1590 (2020) 012059.

ねじりテープを挿入した円筒発熱体の液体水素熱伝達特性

Forced flow heat transfer characteristics of liquid hydrogen in a twisted tape inserted cylindrical pipe

大矢 輝, 白井 康之, 塩津 正博, 海野 峻太郎(京大)
OYA Hikaru, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro, UNNO Syuntarou (Kyoto Univ.)
E-mail: oya.hikaru.46r@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

将来の低炭素社会において、水素はエネルギーキャリアとして主要な役割を果たすことが期待されている。液体水素はその大量輸送において優位性を持つ。消費地へ輸送した水素は気体状態で発電、工業利用がなされることから、効率よく気化、昇温を行うことができる熱交換器の開発が重要となる。

熱交換器に送る水素は臨界圧以上とするが、超臨界水素の熱伝達は擬臨界温度以降の領域において、Dittus-Boelterの式と比較して低下することが当研究室の実験より明らかになっている [1]。これは冷却面近傍において、水素の密度が低くガスライクな境界層が加熱によって成長し、熱伝達が悪化するためと考えられる。そこで冷却管内に伝熱促進体を挿入することで、壁面近傍の流速増加や境界層の撹拌による熱伝達の向上が期待できる。当研究室ではねじりテープを挿入した円筒発熱体を製作し、未臨界領域から超臨界領域までの幅広い範囲において液体水素熱伝達特性の測定を行った。

本報では未臨界領域について報告する。

2. ねじりテープ入り円筒発熱試験体

試験体は内径 6 mm、長さ 200 mm の SUS310S 製円筒管に、長さ 220 mm のねじりテープを挿入したものである。円筒管は GFRP ブロック内に設置されている。試験体には電流加熱のための電流リードを、管の中ほどに 110 mm の間隔を空けて設けた。また電流リード間には 20 mm の間隔を空けて電圧タップを取り付けた。ねじりテープはねじりピッチ p について三種類(13 mm/180°turn、20 mm/180°turn、25 mm/180°turn)を用意した。ねじりテープの幅 w は 5.95 mm である。加えて、p = 20 mm/180°turn のねじりテープについては幅 w = 5.5 mm のものも用意した。Fig. 1 に試験体の概略図を示す。

3. 実験装置と方法

試験は秋田県能代市の JAXA 能代ロケット実験場に設置されている差圧駆動式液体水素強制対流試験装置を使用した。試験体は試験槽内に液体水素の流れが鉛直上向きとなるように設置した。

試験槽圧力を 400 kPa, 700 kPa, 1100 kPa の三段階、液体水素の温度を 21 K からその圧力における飽和温度に設定して流路に液体水素を強制対流させ、その状態で指数関数的な入熱を加えたときの試験体端子電圧と試験槽の重量変化を測定した。測定した電圧より試験体温度や冷却熱流束を求めた。また重量変化より入熱中の質量流量を計算した。

4. 実験結果

Fig. 2 に横軸を発熱体表面温度と入口液体温度の温度差 ΔT_L、縦軸を冷却熱流束とした非沸騰熱伝達特性の実験値、他流体の場合におけるねじりテープ挿入管の熱伝達表示式および Dittus-Boelter の式を示す。実験結果が示す伝熱促進効果は表示式と比較して小さい。液体水素がその低い粘性、小さな表面張力のためにねじりテープと管壁の隙間をすり抜け、旋回流が熱伝達に作用しなかった可能性がある。

Fig. 3 に横軸を過熱度 ΔT_{sat}、縦軸を膜沸騰熱伝達率 h とした膜沸騰熱伝達特性を示す。ねじりテープを挿入した試験体では空管の場合と比較して大きな伝熱促進効果が見られ、特に飽和液温の条件では膜沸騰熱伝達率が表示式の 2 倍～4 倍に向上した。ねじりテープと管壁の隙間を発生した気泡が塞ぐことで隙間の流れが抑制され、旋回流が沸騰膜をかき取ったことで大きな伝熱促進効果が生じたと考えられる。

5. まとめ

ねじりテープを円筒管に挿入した場合の液体水素熱伝達特性は、壁面近傍の様相に大きく左右されることがわかった。今後は数値解析を実施して加熱中の流れを可視化し、液体水素熱伝達のメカニズムについてさらなる検討を進める。

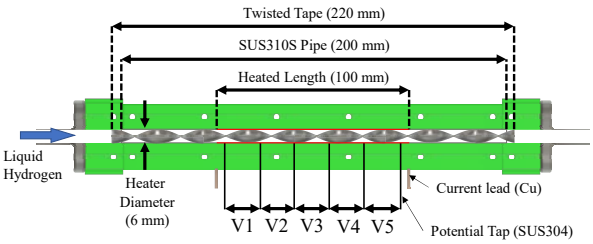


Fig. 1 Twisted tape inserted cylindrical pipe test body. The test body is set vertically, and liquid hydrogen flows upward.

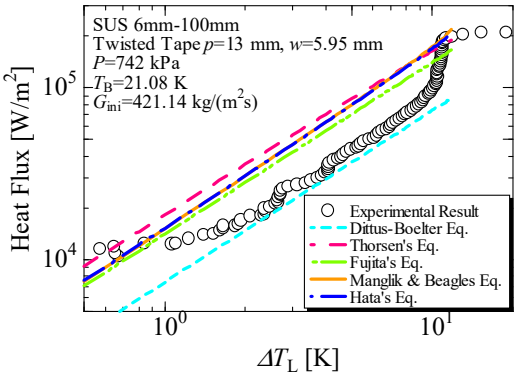


Fig. 2 Non-boiling heat transfer of forced flow liquid hydrogen in the twisted tape inserted cylindrical pipe.

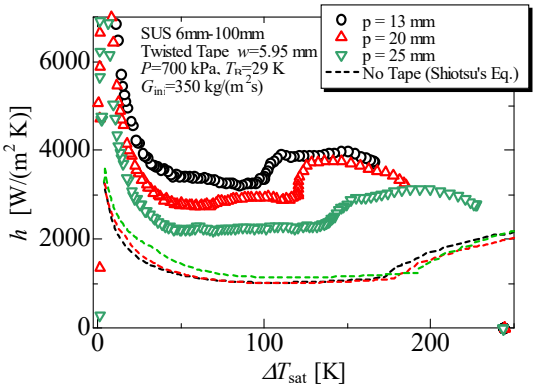


Fig. 3 Film-boiling heat transfer of forced flow liquid hydrogen in the twisted tape inserted cylindrical pipe.

参考文献

[1] M. Shiotsu et al.: AIP Conf. Proc. 1573, pp.36-43, 2014

冷凍機冷却引張り通電試験機の開発

Development of cryocooled resistance measurement device under tensile load

小黒 英俊, 山田 純弘(東海大学)
OGURO Hidetoshi, YAMADA Yoshihiro (Tokai Univ.)
E-mail: h-oguro@tsc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

超伝導線材の応用にあたっては、超伝導特性のみならず、機械特性の把握も必要となる。これは、超伝導マグネット運転時に線材引張り方向へ電磁力が発生することでひずみが発生するためである。超伝導線材の場合、超伝導特性がひずみによって変化する材料があることから[1, 2]、引張り強度のみならず、引張り荷重下における超伝導特性を測定する必要もある。このとき、臨界電流、臨界温度、上部臨界磁場を総合的に調べることで、超伝導線材に対するひずみ効果の本質に迫る研究ができると期待される。

そこで本研究では、冷凍機冷却下において引張り通電試験を行うことのできる装置開発を行うことを目的とした。今回は、臨界温度のひずみ効果測定のため、冷凍機に小型引張り試験機を取り付け、低温での引張り試験、並びに、引張り応力下での通電試験を行うことのできる装置を作製し、その能力を評価した。

2. 装置の概要

図 1 に装置試料部の写真を示した。GM 冷凍機のコールドヘッドが写真下部にあり、その上に引張り試験機を乗せた形となっている。冷却のため、本体は無酸素銅により作製した。試料の長さは 40-50 mm を想定し、つかみ部分は FRP の板で本体と電気的に絶縁し、サンドペーパーを FRP に貼り付け、試料の滑りを抑制した上でネジを用いて固定している。写真には、標点距離 25 mm の伸び計がついており、この伸び計もしくはひずみゲージによりひずみの測定を行う。試料には直接電流端子と電圧端子を取り付け、電気抵抗測定を行えるようにした。上部のつかみ具は冷凍機と接していないため、試験機本体からのサーマルアンカーを接続し、冷却している。また、上部つかみ具は室温部へ SUS304 シャフトを伸ばし、2 kN まで測定可能な小型ロードセルにつながっている。この時、熱侵入を抑えるため、つかみ具とシャフトは FRP を介してつながっている。温度計をコールドヘッド、上部つかみ具、試料に直接貼り付け、温度測定を行う。以上の装置にサーマルシールドと真空容器を取り付け、冷却する。

上記の測定条件の下で、研究室で作製した、直径 1.5 mm の Powder-in-Tube 法 Nb_3Sn 単芯線材[3]の低温引張り通電試験を行った。

3. 試験結果

図 2 に、冷却時の上部つかみ具と試料の温度変化を示した。いずれも 1 時間半以内に 10 K まで冷却することが出来たことから、事前の真空引きと合わせて 2 時間で測定のための最低温度まで到達できることがわかった。その後、引張り試験を行った結果を図 3 に示した。この時は荷重 400 N まで印加することができ、このときひずみは 0.4%まで発生した。これは、希土類系高温超伝導線材には不十分な荷重であるため、つかみ具の改良を検討する必要がある。また、測定時にひずみに大きなノイズが観測された。これは、冷凍機の振動が原因であると考えられ、測定値の平均をとるなど何らかの対策が必要と思われる。電気抵抗測定には成功したが、上記試料は劣化しており超伝導が観測できなかったため、臨界温度の引張りひずみ依存性の結果などは当日報告する。

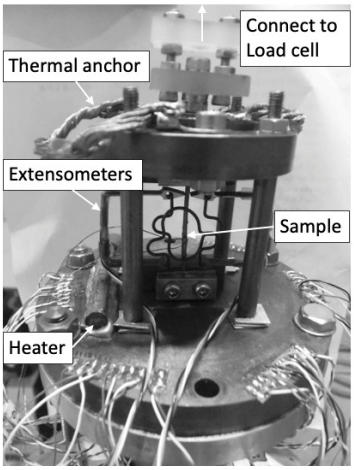


Fig. 1 The photo of the cryocooled tensile testing device.

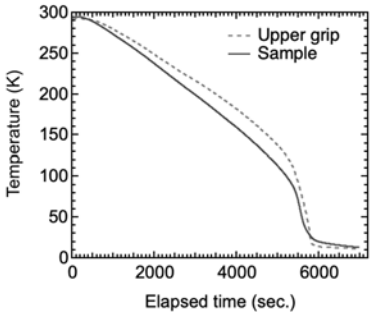


Fig. 2 The measurement temperature of the device.

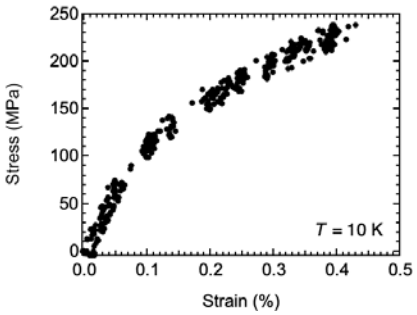


Fig. 3 The tensile test result of Powder-in-Tube processed Nb_3Sn wire at 10 K.

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H01889 及び、核融合科学研究所一般共同研究(研究コード NIFS22KIEF004)の支援を受け、実施したものである。

参考文献

1. J. Ekin: Cryogenics, Vol. 20 (1980) p. 611
2. M. Sugano, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 085013
3. M. Nagasawa et al., Abstract of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p. 16

バルク金属ガラスの熱収縮率測定

Measurement of the thermal expansion of Bulk Metal Glass

平山　貴士, 森江　孝明, 上村　宗二朗 （住友重機械）
HIRAYAMA Takashi,　MORIE Takaaki,　UEMURA Sojiro (SHI)
E-mail: takashi.hirayama@shi-g.com

1. はじめに

冷凍機や Magnetic field applied Czochralski(MCZ)のような超電導応用機器を設計する際に、構造部材の熱収縮率は非常に重要な設計因子である。
従来、熱収縮率の測定には、ひずみゲージ法やキャパシタンス法などが用いられてきた。これらの方法は測定サンプルだけでなく、測定に必要なセンサー自身も極低温環境下に設置されるため、対象センサーの幅広い温度領域における校正が必要になるなど測定の難易度が高い[1]。そこで本研究では、測定用のセンサーは室温環境下に設置することで温度変化の影響を回避し、測定が容易に行える熱収縮率測定システムを開発した。また測定をより簡便に行うために、測定対象物の冷却は冷媒を使用せず 4K-GM 冷凍機を用いた伝導冷却方式を採用した。

開発した本計測システムを用いて、極低温下での活用が期待できるバルク金属ガラスの熱収縮率を測定した。

2. 熱収縮率測定システム

Fig.1 に開発した熱収縮率測定システムの概念図を示す。サンプルは 4K-GM 冷凍機の 2 段熱負荷フランジと機械的、熱的に締結されたステージに設置する。真空容器の一部に光学窓を設置し、真空容器外に設置したレーザー変位計によりサンプルの変位を計測することで、熱収縮率を測定する。

3. 熱収縮率測定システムの健全性の確認

開発したシステムの健全性を確認するため、極低温までの熱収縮率が既知である銅の熱収縮率の測定を行った。Fig.2 に開発した本測定システムを用いて計測した結果を白抜きマーカーで、既知の試験結果を破線で示す。開発したシステムは広い温度範囲で既知のデータを定量的に良く再現できていることが分かる。

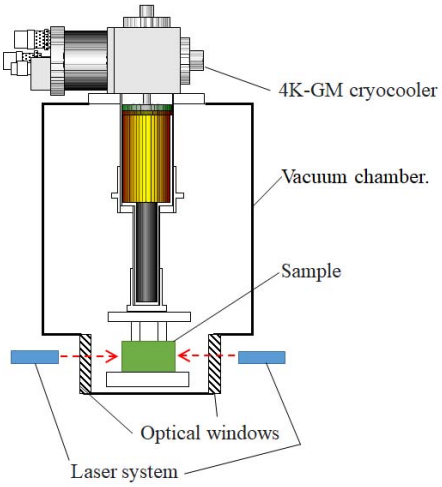


Fig.1 Schematic of the new measurement system

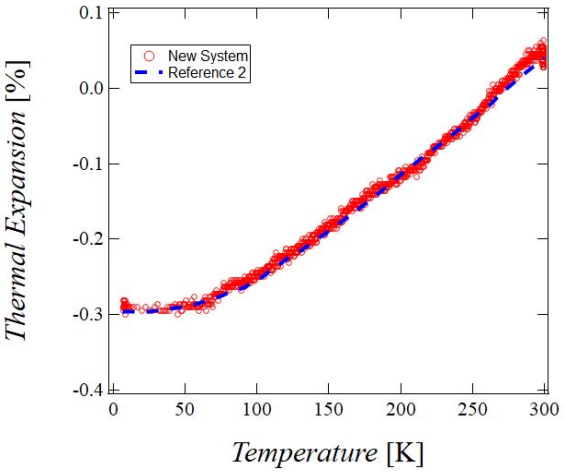


Fig.2 Test result of system confirmation

4. バルク金属ガラスの熱収縮率測定

バルク金属ガラスは結晶構造を持たないアモルファス金属の一種であり、高強度・低ヤング率の特徴を持つ。Fig.3 にバルク金属ガラスと通常の金属の比較を示す。この特徴を活かし、NASA の研究グループによって極低温用ギアへの活用が精力的に研究されている[3]。当日はバルク金属ガラスにおける極低温までの熱収縮率の測定結果について報告する。

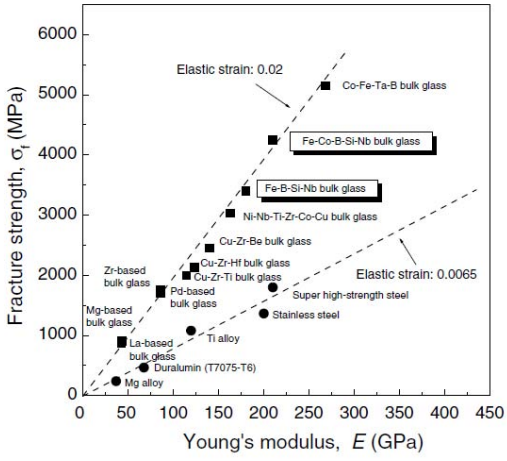


Fig.3 Relation between compressive fracture strength and Young's modulus [4]

参考文献

1. 産業技術総合研究所　計量標準総合センター　物質計測標準研究部門　熱物性標準研究グループ　HP https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-tp/ja/kaisetsu/shokai_TE method.html
2. 超電導・低温工学ハンドブック P1098
3. D. Hofmann et al.; Sci Rep 6, 37773 (2016)
4. A. Inoue et al.; Acta Material 52 (2004) 4093-4099

完全非接触型液体水素用液面計の開発

All-optical non-contact level sensor for liquid hydrogen

及川 敏之, 二村 宗男, 三浦 茂男, 岡本 洋(秋田県立大)
OIKAWA Toshiyuki, FUTAMURA Muneo, MIURA Shigeo, OKAMOTO Hiroshi(Akita Prefectural Univ)
E-mail: b21n003@akita-pu.ac.jp futamura@akita-pu.ac.jp okamoto@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

水素は再生可能エネルギーの貯蔵媒体として期待されている。水素は液化することで常圧でも体積をおよそ 800 分の 1 に圧縮できるため貯蔵スペースの効率を高めることができる。液体水素の貯蔵量を管理するためには液面計が必要である。既存の液体水素用液面計の原理として、差圧式[1]、静電容量式[2]、超電導式[3]がある。しかし、いずれも部品や電気配線が液体水素に浸っている。よって、伝熱による液体の損失、電気による潜在的事故リスクが問題となる。

我々は完全非接触型液体水素用液面計を開発している。この液面計はタンク上部から複数の光源で液面を照らし、その反射像を観察することで貯蔵量を計測する。

2. 原理

図 1 に測定原理を示す。正三角形に配置された光ファイバー3 本からの光を液面に照射し、反射像をレンズによりファイバーバンドル端面に結像する。ファイバーバンドルが容器外にトランスファーした画像を室温部のカメラで観察する。センサーと液面の距離に応じて、観察される三角形の大きさが変化する。例えば、液面が低いときは観察される三角形は小さくなる。

必要な角度測定の精度は、光ファイバーの先端間の距離をd、センサーと液面との距離をLとすると、$\theta \approx d/L$となる。したがってLの変化δLによるθの変化は$\delta\theta \approx d\delta L/L^2$となる。例えば、$L$ =1 m、δL=1 cm、d =3 cm のとき、$\delta\theta$ ≈0.3 mrad なので、高精度の角度測定が要求されることが分かる。

3. 実験

今回は液体窒素を用いて予備実験を行った。図 2 にセンサーヘッドを示す。センサーヘッドは A5052 アルミニウム製であり、図 2 右側の太い部分(以下トップフランジ)の直径は ϕ 82 mm である。トップフランジには追加工した Swagelok 社のウィルソンシール(商品名ウルトラトール)が 2 個取り付けられ、3 本の照射用プラスチックファイバーおよび、ϕ 3.2 mm のファイバーバンドル(ファイバー素線数約 5×10^4) の導入に使われている。ファイバーバンドルの端面より約 2 cm の位置にあるアルミ板には焦点距離 2 cm のレンズ(Edmund Optics)が配置されている。上記のアルミ板には、照射用ファイバー3 本が ϕ 30 mm の円周上に正三角形状に配置されている。図 3(a)、(b)はファイバーバンドルの端部に現れた反射光の画像である。液体窒素液面とセンサー間の距離は図 3(a)、(b)についてそれぞれ 12 cm、21 cm である。

図 4 に光源と照射用ファイバーのカップラーのプロトタイプを示す。光源には 10 mA 流した赤色発光ダイオードを使用し、その光をレンズで集光する。光ファイバーを XY ステージに固定し、集光した輝点と光ファイバーの先端が重なるように XY ステージで調節する。今後、当該カップラーを小型化し、それら 3 個を 1 つのシステムにする。

4. 今後の課題

画像数値処理による反射光角度の測定精度の向上、および液面が揺れているときの画像の平均化、が課題である。

謝辞

実験装置の開発にご協力いただいた尾藤輝夫教授、議論いただいた松下慎也准教授、液体窒素を提供いただいた川島洋人准教授に感謝します。本研究は、株式会社ユーラスエナジー秋田港からの支援を受けた。

参考文献

[1] W. A. Olsen, A Survey of Mass and Level Gauging Techniques for Liquid Hydrogen. In: K.D. Timmerhaus (eds), Advances in Cryogenic Engineering, vol 8. Springer, Boston, MA. (1963).

[2] Koichi Matsumoto, Masamitsu Sobue, Kai Asamoto, Yuta Nishimura, Satoshi Abe, and Takenori Numazawa, Capacitive level sensor for liquid hydrogen, Cryogenics **51**, 114-115 (2011).

[3] Ch. Haberstroh and G. Zick, A Superconductive MgB 2 Level Sensor for Liquid Hydrogen, AIP Conference Proceedings **823**, 679 (2006).

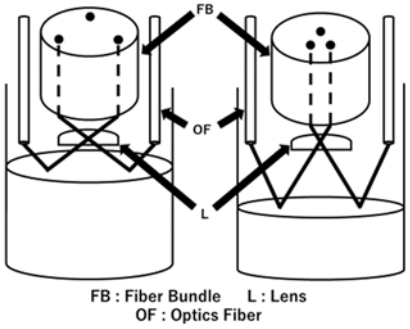


Fig 1. Measurement principle

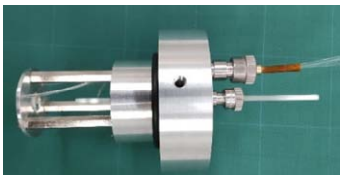
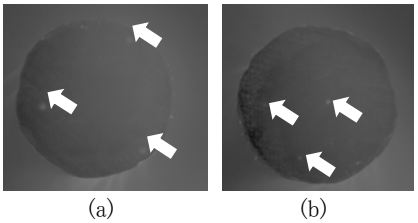


Fig 2. Sensor head



(a) (b)

Fig 3. Reflected images appearing on the fiber bundle for two liquid levels

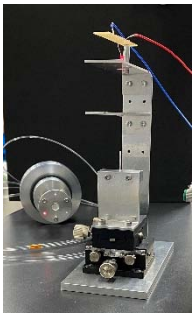


Fig 4. Optical coupler for illumination

磁気冷凍技術併用冷媒循環による超電導コイル冷却に関する研究

Research on superconducting coil cooling by refrigerant circulation combined with magnetic refrigeration technology

高澤 拓海, 岡村 哲至, 逢坂 昇汰(東工大);平野 直樹(NIFS)
TAKAZAWA Takumi, OSAKA Shota, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); HIRANO Naoki (NIFS)
E-mail: takazawa.t.ab@m.titech.ac.jp

1. はじめに

冷凍機から離れた位置にある複数の超電導コイルを冷却することを目的として、冷媒を循環させるシステムの検討を行っている。また、高温超電導コイルを極低温に維持するシステムとして、発生する磁場を利用した磁気冷凍技術を組み合わせることで冷却をアシストする技術の研究を行っている。磁気冷凍材料の磁気熱量効果を発揮させるために、超電導体を用いた磁気シールドを動かすことで磁場変化を生じさせる方式について検討しており、その磁気シールドの磁気遮蔽効果の確認結果や解析結果について報告する。

2. 磁気冷凍技術併用冷媒循環冷却

磁気冷凍技術を併用した冷媒循環冷却システムの概略図をFig.1に示す。冷媒は室温に置かれたコンプレッサーから吐出され予冷熱交換機と GM 冷凍機によって冷却される。その後、消磁された磁気冷凍材料によりさらに冷却された後、高温超電導コイルを冷却し、励磁された磁気冷凍材料から熱を受ける。そして予冷熱交換機で熱を受け取りコンプレッサーへと戻る。解析により、磁気冷凍技術を併用したば場合の冷却アシストの可能性はすでに確認している。

3. 超電導磁気シールドによる磁気遮蔽効果

高温超電導コイルの冷却に磁気冷凍技術を組み合わせた冷却システムとして、磁気冷凍効果を発揮するための磁場変化手法に、超電導コイルによって発生する磁場中に置かれた磁気冷凍材料の上下を挟むように軸に取り付けた超電導体の磁気シールドを回転させることで磁場変化を発生させる方法を検討している。

磁気シールドには YBCO バルクを用い、シールド間距離が10mmとなるよう磁場中に設置することで磁場遮蔽量を計測した。磁気シールドの冷却には液体窒素を用い、大気圧下の約 77K と減圧下での約 65K(一部 55K 程度まで低下した条件も含まれる)で行った。Fig.2 は実験装置の概略図である。

また、実験から得た結果から YBCO バルクの臨界電流密度を決定し[1]、解析を行った。Fig.3 に実験結果と解析結果を示す。支配方程式には、以下の遮蔽電流(渦電流)を考慮したアンペールの法則を用いた。

$$\boldsymbol{J} = rot\left(\frac{1}{\mu} rot\boldsymbol{A}\right) + \sigma\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} + gradV\right)$$

4. まとめ

磁気冷凍技術を組み合わせた冷却方式では磁場変化量が大きいほど高いアシスト効果を得られることを確認した。また、YBCO バルクの磁気遮蔽能力を約 77K と約 65K(一部約55K)で確認し、温度低下によって遮蔽能力が向上することを確認した。また、バルクの厚みによって遮蔽能力に差はあるものの、厚み依存性は大きくないことを確認した。65K の 5mm の遮蔽効果の増加は測定中に温度が減少し 55K に達してしまったためである。2mm の遮蔽効果が 5mm より高い原因として、内部組成の違いによる電流密度分布の違いや表裏差によるものだと考えられる。今後は、バルクの形状や内部構造などを考慮にいれた臨界電流密度を推察し、より低温での遮蔽効果と超電導コイルの冷却をアシストできる磁気冷凍技術の実現可能性を検討する。

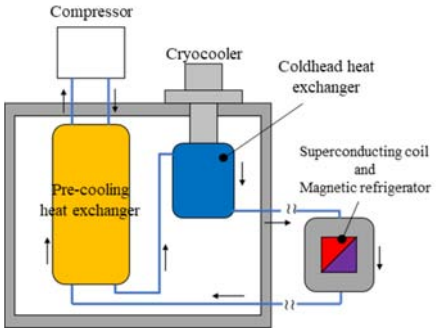


Fig.1 Outline diagram of superconducting coil cooling system

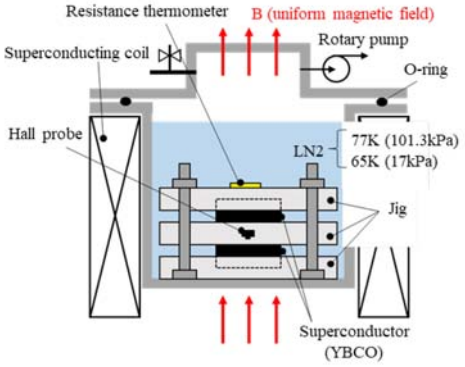


Fig2. Outline diagram of magnetic shielding experiment

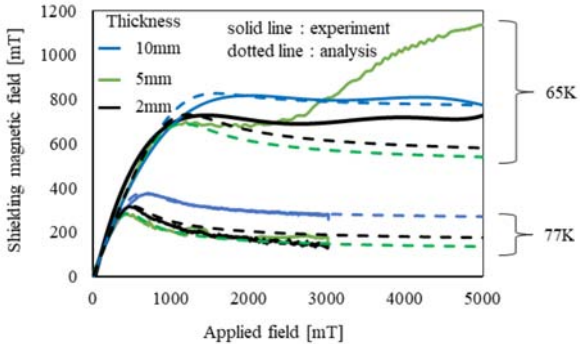


Fig.3 Magnetic shielding effect for YBCO bulks.

謝辞

本研究の一部は, NIFS(UFZG-016, NIFS21KECA084)の支援を受けて行ったものである。

参考文献

1. V. Antal et al.: Relationship between local microstructure and superconducting properties of commercial YBa2Cu3O7−δ bulk (2020), Supercond. Sci. Technol. 33
2. H.Ueda, et al.: Numerical Electromagnetic Analysis for Applied Superconductivity III − Superconductivity and Electromagnetic Analysis −, J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 48, No. 9 (2013) p. 472-484

静止型磁気冷凍システムに関する研究
― コンセプトの検証 ―
Research on Static Magnetic Refrigeration System
- Verification of the concept -

平野 直樹, 小野寺 優太, 三戸 利行(NIFS);元木 悠太, 川越 明史(鹿児島大学);岡村 哲至(東工大)
HIRANO Naoki, ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki (NIFS)
MOTOKI Yuta, KAWAGOE Akihumi (Kagoshima Univ.), OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)
E-mail: hirano.naoki@nifs.ac.jp

1. はじめに

磁気冷凍は、磁性材料(MCM)に磁場変化を与える必要がある。また、大容量かつ極低温を磁気冷凍で冷却するためには、永久磁石の磁場強度だけでは不十分であり、低消費電力で強力な磁場を発生できる超伝導コイルの使用が不可欠である。本研究では、複数の高温超伝導コイルを用い、コイルへの通電電流を変化させることで磁場変化を発生させる静止型磁気冷凍システム(Static Magnetic Refrigeration System:SMRS)の実用化を目指している。超伝導コイルのエネルギー貯蔵特性を利用することで、電力系統からの大きなエネルギー入出力を必要とせず、省エネルギーで磁場変化を繰り返し発生させることができる磁気冷凍システムについても検討している。本発表では、外径 63 mm の ReBCO コイルの交流損失測定結果に基づき、高温超伝導コイルを用いた 20 K をターゲットとした SMRS の実現可能性について検討したので報告する。

2. 静止型磁気冷凍システム(SMRS)[1]

SMRS は、超伝導磁石の電流を変化させることによって MCM の磁場を変化させる構成であり、その特徴は、磁場源も MCM も動かないことである。超伝導コイルの電流のオン・オフにより、大きな磁場変化が得られるのも特徴である。一方、超伝導コイルの電流変化による交流損失の発生を考慮する必要がある。さらに、磁気冷凍では大きな温度変化を得ることは難しいため、磁気冷凍機の高温端を他の冷却システムと組み合わせることが現実的な選択と考えている。SMRS の最小単位構成概念図を Fig.1 に示す。

3. 交流損失評価

SMRS の成立性の鍵を握る交流損失の検討として、4 mm 幅の ReBCO 線材を用いた外径 63mm のダブルパンケーキを 4 個製作し、液体窒素温度下で 4 端子法により交流損失を測定した。その結果の一例を近似的な計算値と共に Fig.2 に示す。計算値は、シングルパンケーキコイルを一つの超伝導体の塊とみなし、その塊の通電損失と磁化損失の和として求めている。通電損失は Norris の理論式で求め、磁化損失は、テープ幅広面に垂直な磁界のみを考慮し、Slab 近似で求めた。測定された交流損失は、計算値とよく一致することが確認される。

4. 考察

交流損失について得られた結果を基に、Table.1に示す超伝導コイルを用いたSMRSを試設計し、その効率を試算した。SMRSは液体水素再凝縮温度域として20Kをターゲットとし、用いるMCMは$DyNi_2$とした。超伝導コイルは50Kに冷却するとし、GM冷凍機を用いることを想定し、その効率をCOP:0.05と仮定した上で、SMRSの効率計算を行った。結果をTable.2に示す。

20K で 38W の冷却能力を持つ静的磁気冷凍システムの効率が、COP: 0.005 と算定された。この値は、20K冷却の GM 冷凍機と同等の効率である。本検討では、超伝導コイルの交流損失について、4mm幅のReBCO線材による試作コイルの実測値に基づいており、交流損失をさらに低減できれば、高効率で可動部がほとんど無い冷却システムを実現できる可能性があることが確認された。

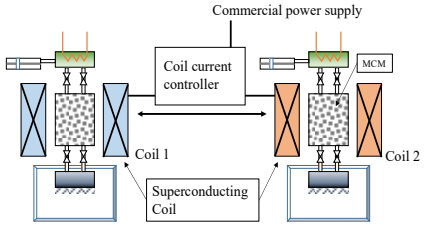


Fig.1 SMRS basic configuration using superconducting coils.

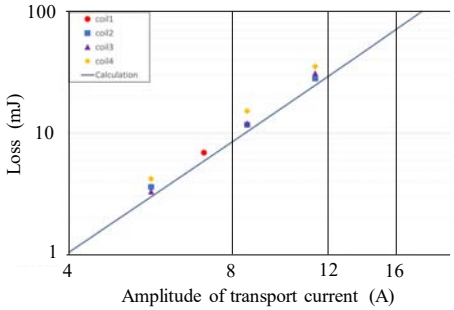


Fig.2 AC loss for each coil and calculated loss.

Table.1 Parameters of magnets for SMRS

Number of magnets	2
Number of double pancake coils in one magnet	5
Height of one magnet	100mm
Inner diameter	100mm
Outer diameter	200mm
Turn number of one magnet	5000
Operating top current	90 A
Period of one cycle	4 sec

Table.2 Parameters to estimate COP of SMRS

$DyNi_2$	70 mmΦ×30 mmH
Δ B	3T
Entropy change @ΔB=3T	15 J/kgK
ΔTemp.	5 K
Cooling power of the SMRS	38W
AC losses in the two magnets	0.36kW
Total power consumption	7.56kW
Estimated COP of SMRS	0.005

謝辞

本研究の一部は、岩谷科学技術研究助成、ならびに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。

参考文献

[1] N. Hirano, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, No.6, 0500105 (2022).

La 系化合物階層充填磁気冷凍機の冷凍性能

Refrigeration Performance of Active Magnetic Regenerator with Layered Beds of Lanthanum(La)-based Alloys

小松 航, 安部 勇汰, 濵岡 遼真, 岡村 哲至(東工大)
KOMATSU Wataru, ABE Yuta, HAMAOKA Ryoma, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Institute of Technology)
E-mail: komatsu.w.aa@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, 室温磁気冷凍機の研究が行われている. 先行研究により, 磁気再生器(Active Magnetic Regenerator; AMR)ダクト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, 磁気冷凍機の運転温度範囲が拡大することが明らかにされている[1,2]. 本研究では La 系化合物を階層充填した際の冷凍性能を 1 次元伝熱数値解析によって調べた.

2. 磁性材料について

本研究で用いた La 系化合物は $La(Fe_{1-x}Co_xSi_y)_{13}H_y$ である. この材料は磁気転移の際に潜熱を伴う一次相転移を示す. Fig.1 に $La(Fe_{1-x}Co_xSi_y)_{13}H_y$ の 0 T における比熱を示す. 比熱の最大値を示す温度をキュリー温度 T_c と呼び, Co や H の含有量を変化させることによって制御することが可能である. 各物性値が測定できている材料はキュリー温度が異なる 3 種類のみであるため, その他のキュリー温度の物性値は既知の 3 種類の物性値から補間した.

3. 一次元伝熱数値解析

一次元伝熱数値解析を用いて磁性材料充填ダクトの熱の特性を調査した. ダクト内の計算では, 熱輸送媒体と磁性材料それぞれで一次元エネルギー方程式を, 差分法を用いて解いた. 有効熱伝達率は Ranz の式および磁性材料のビオ数を用いて算出した[3]. また本研究では, 流体摩擦による損失およびダクト外部からの熱侵入は無視した.

4. 解析条件

Fig.2 に解析に用いた磁性材料充填ダクト内の La 系化合物の充填構造を示す. 内径 14 mm, 長さ 150 mm のダクトに平均粒子径 0.45 mm の球形状の材料を充填率 0.62 で充填した. ダクトの両端部に充填される材料のキュリー温度は固定とし, 高温端に T_c = 25℃, 低温端に T_c = 1℃の材料を充填した. そのうえでキュリー温度間隔および一種類当たりの充填長さを変化させた. (a)キュリー温度間隔 1℃, 充填数 25 種類, 各充填長さ 5 mm, (b)キュリー温度間隔 2℃, 充填数 13 種類, 各充填長さ 11-12 mm, (c)キュリー温度間隔 4℃, 充填数 7 種類, 各充填長さ 21-22 mm, (d)キュリー温度間隔 12℃, 充填数 3 種類, 各充填長さ 50 mm, の 4 通りの条件を検討した. 磁場の切り替え周波数は 0.5-10 Hz, 流量は 0.3 L/min, 排熱温度は 25℃とした.

5. 結果と考察

Fig.3 に磁場の切り替え周波数と最大冷凍能力の関係を示す. 横軸が磁場の切り替え周波数, 縦軸が最大冷凍能力を表しており, 低温端温度が排熱温度を上回らずに発揮できる冷凍能力の最大値を最大冷凍能力と呼ぶ. Fig.2 より周波数が低い条件では充填数が多いほど冷凍能力が向上することがわかる. 一方で周波数が高い条件では充填数の少ない場合でも充填数が多い場合と同等かそれ以上の冷凍能力を示すことがわかる. これは周波数の増加に伴い熱交換時の熱輸送媒体の熱容量が小さくなったことでダクト内の温度分布が変化し, 材料の物性が変化したためだと考えられる.

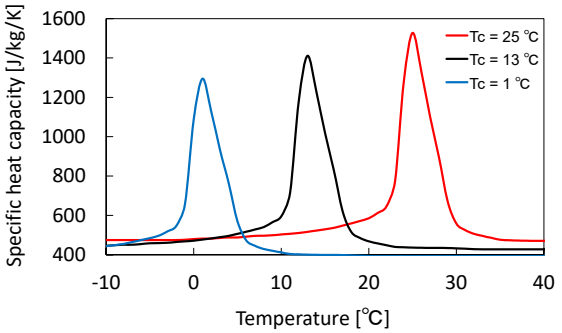


Fig.1 Specific heat capacity of La-based alloys at 0T.

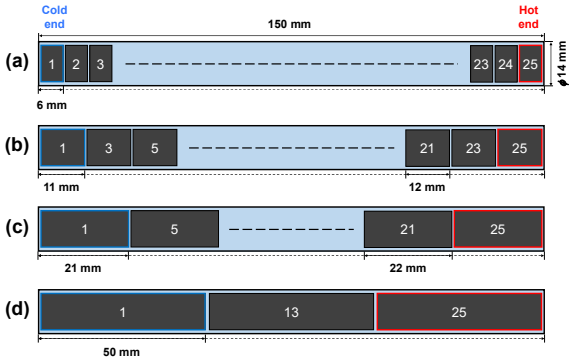


Fig.2 Schematic drawings of (a) twenty-five-layered, (b) thirteen-layered, (c) seven-layered, (d) three-layered AMR with T_c [℃] of each layer.

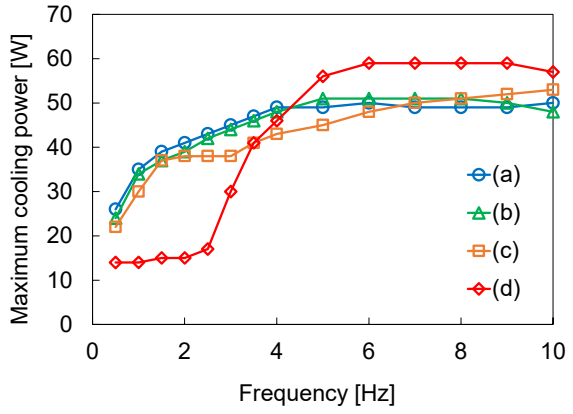


Fig.3 The maximum cooling power as a function of the operational frequencies (Legends correspond to Fig.2.).

参考文献

1. M. A. Richard, et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 95 (2004) p.2146-2150
2. C. Zimm, et al.: International Journal of Refrigeration, Vol.29 (2006) p.1302-1306
3. W. E. Ranz, et al.: Chemical Engineering Progress, Vol.43 (1952) p.141-146

Nb_3Al 超細線ストランド超伝導ケーブル開発 －直線状ケーブルの臨界電流値温度依存性測定－

Development of the Nb_3Al superconducting cable with super fine strands -Temperature dependence measurement of the critical current of the straight Nb_3Al cable-

大内 徳人, 有本 靖、王 旭東、宗 占國、青木 和之、土屋 清澄(KEK/総研大);菊池 章弘(NIMS)、山本 優、河野 雅俊(明興双葉)

OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, WANG Xudong, ZONG Zhanguo, AOKI Kazuyuki, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK/Sokendai); KIKUCHI Akihiro (NIMS), YAMAMOTO Masaru, KAWANO Masatoshi (Meiko Futaba)

E-mail: ohuchi@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、SuperKEKB 加速器[1]を用いた電子・陽電子の衝突実験を 2018 年 4 月から開始し、現在、ビーム衝突性能は先代器 KEKB の 2 倍以上に到達している。更なる衝突性能向上を目指して、常伝導 6 極電磁石の超伝導化の検討を行っている[2]。システム設計では超伝導電磁石は小型冷凍機で冷却される為、NbTi よりも温度マージンがとれる A15 化合物超伝導線材を設計線材として採用している。本件では、超伝導 6 極電磁石システム用として開発を進めている直径 ϕ 50 μ m 超細線 Nb_3Al ストランド線で構成された超伝導ケーブルの直線状の臨界電流値の温度・磁場依存性について報告する。ストランド線の細線化により熱処理後の Nb_3Al ケーブルで加速器用超伝導コイル製作のための基礎データ取得を研究課題としている。

2. 超細線ストランド Nb_3Al ケーブルの開発

Nb_3Al ケーブルは、Nb と Al のシートをジェリーロール法で製作したビレットを線径 ϕ 50 μ m まで伸線加工し 49 本撚りにした。Nb_3Al ケーブルのパラメータを Table 1 に示した。ケーブルは 49 本のストランド線を 8 mm のピッチで撚線され、ケーブルの相当径は ϕ 0.4 mm である。このケーブルの超伝導 6 極電磁石から必要とされる臨界電流値は、磁場 4 T、温度 6 K で 50 A 以上である。Fig. 1 に ϕ 0.6 mm と ϕ 50μm まで伸線加工されたストランドの断面形状を示した。また、Fig. 2 に 49 本のストランドをケーブル化した外観と断面写真を示した。

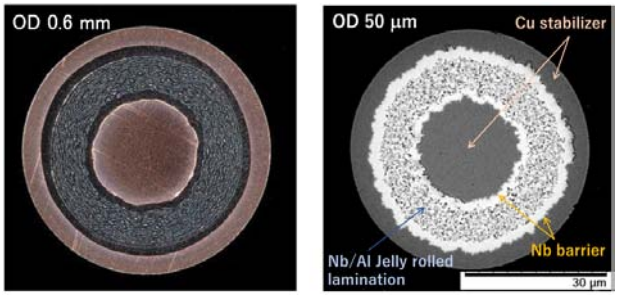


Fig.1 Cross sections of the Nb_3Al strands

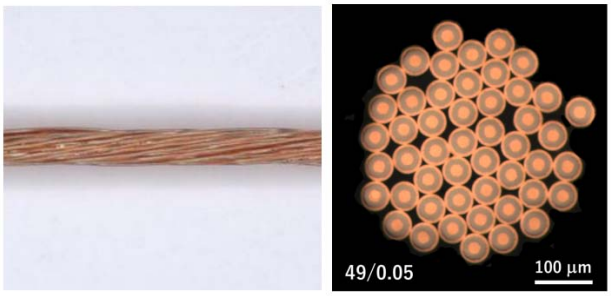


Fig.2 External view of the 49 Nb_3Al strand cable and the cross section

Table 1 Parameters of the Nb_3Al cable

Strand diameter, μm	50
Number of strands	49
Cu ratio	1.0
Cabling pitch [S] (mm)	8.0
Required transport current @ 4 T & 6 K, A	50

3. 49 本 Nb_3Al ケーブルの臨界電流値測定

49 本撚りストランドケーブルは、直線状ケーブルの超伝導特性を測定するために銅の板に半田で固定した。ヒーターによる温度制御と5 Tまでのソレノイド磁場を印加することで温度と磁場を変数として臨界電流値測定を行った。測定は、装置全体を液体ヘリウムに浸漬することにより行った。測定装置の詳細については、ポスター発表の資料により説明を行う。

測定結果を Fig. 3 にまとめた。1 μ V/cm の電圧発生時の電流値を臨界電流値として定義している。図中に示されたデータは、横軸温度 T_{cs}、縦軸臨界電流値 I_{cs}を示している。電流値の大きいグループから 0 T、1 T、2 T、3 T、4 T、5 T の磁場を印加している。Fig. 3 に示すように 4T、6 K での臨界電流値は 86.4 A であり、Table 1 の目標とするケーブルパラメータを超えている。

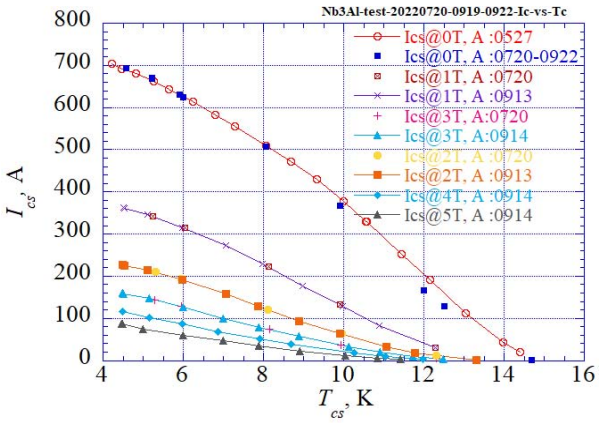


Fig.3 Temperature and magnetic field dependence of the Nb_3Al cable

謝辞

本研究は、科研費(21H04477)と(22H03876)の研究費助成事業のサポートを受けている。測定装置の製作は、KEK 機械工学センターの協力による。

参考文献

1. K. Akai and H. Koiso, “SuperKEKB Accelerator”, J. PASJ, Vol. 15, No. 4, 2018, pp. 213-220
2. N. Ohuchi, *et al.*, 19th Annual conf. of PASJ, FROB13, 2022

超電導複合導体の流入部近傍の電流分布解析

Analysis of current distribution in the inflow section of a superconducting composite cable

髙橋 正希, 田中 祥貴(福岡工大);岩熊 成卓(九大);井上 昌睦(福岡工大)

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

E-mail: mem22104@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

超電導線材と銅やアルミニウムなどの低抵抗材料からなる複合導体は、超電導回転機などの大通電デバイスや核融合用高磁場磁石用に開発されている。複合導体の開発において、超電導線材への電流の入口付近の局所的な発熱が重要な課題の 1 つである。

本研究では、線材及び低抵抗材料の電流分布を明らかにすることを目標に、表面導体から超電導線材への電流分布を実験及び数値・有限要素解析により得ることを試みた。

2. 実験及び解析

複合導体のもっとも単純な例として、幅 2 mm×長さ 50 mm×厚み 1 μm の REBCO 膜を有する超電導線材の銀安定化層の上部に、厚み 100 μm の銅板をはんだ付けし、通電測定を行った。その概要図を Fig. 1 に示す。電流端子から流入した電流は、はんだ接合部を介して銅板から超電導層へと流れ込み、反対側の電流端子から流出する。また、電圧端子は銅板上に取り付けられている。この複合導体の電流電界(*I-E*)特性を Fig. 2 に示す。同図に示す銅のみの *I-E* 特性との対応から、高電界側では銅の分流が進んでいることが分かる。

そのときの *I-E* 特性を解析的に求めるために、Fig. 3 のような分布定数回路による等価回路を考えた。ここで、R_{Cu} は銅の抵抗成分を、R_i は接合部の抵抗を、$R_{REBCO}(I)$ は、REBCO 線材の抵抗成分を表している。$R_{\mathrm{REBCO}}(I)$ は、非線形な電流依存を有するため、各部に流れる電流を求めるには、非線形連立方程式を解く必要がある。超電導の *I-E* 特性には *n* 値モデルを想定しており、*n* 値及び臨界電流には、それぞれ実験により得られた 22.69 と 81.4 A を用いた。本研究では、この非線形方程式は MATLAB を用いて解いており、実験結果を良く再現する結果が得られている。[1]

また、有限要素法による電流分布解析も進めている。Fig.4 に作成したモデルを示す。モデルの形状は Fig. 1 と同様とし、物性値(銅の抵抗率及び非線形 *I-E* 特性)には実験により得られた値を適用している。

等価回路及び有限要素法による解析の詳細及び実験結果との対応と電流導入部の電流分布解析の詳細については、当日発表する。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務、並びにJSPS科研費JP22H01928の結果得られたものである。

参考文献

1. M. Takahashi, *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, vol.103 (2022) p.40

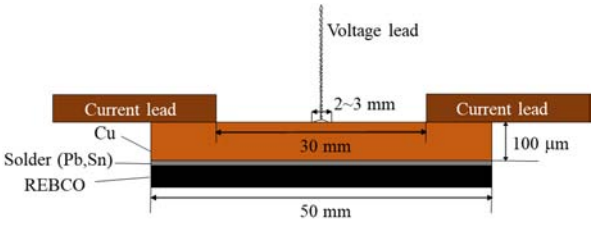


Fig. 1 Schematic of a measurement sample

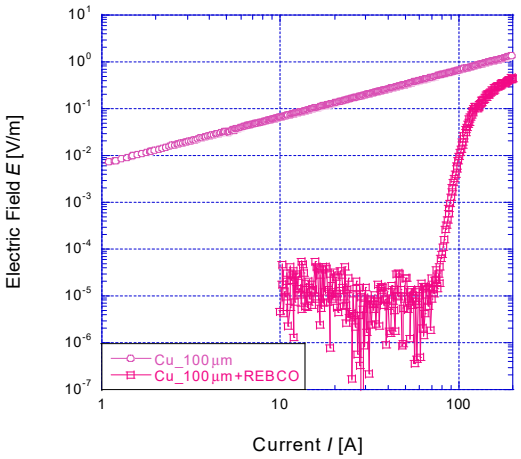


Fig. 2 Measured *I-E* characteristics

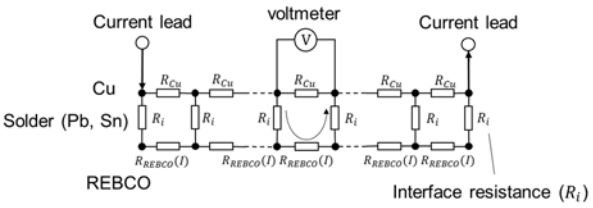


Fig. 3 Equivalent circuit of *I-E* measurement

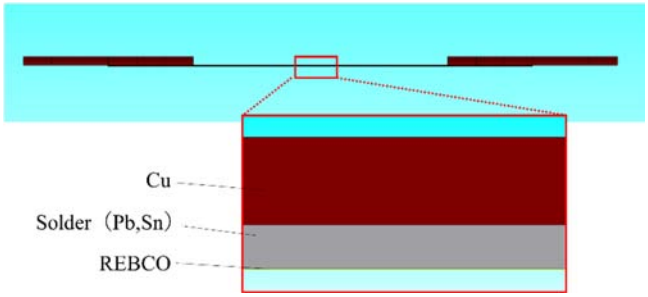


Fig. 4 Finite element model of a superconducting composite wire

幅の異なる REBCO 線材における臨界電流のねじり角度依存性

Torsion angle dependence of critical current in REBCO tape with different widths.

田中 祥貴, 久我 響暉, 古賀 大揮, 塚原 柊弥(福岡工大);山田 穣(中部大);井上 昌睦(福岡工大)
TANAKA Yoshiki, KUGA Hibiki, KOGA Daiki, TSUKAHARA Toya (Fukuoka Inst. of Tech.);
YAMADA Yutaka (Chubu Univ.); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. of Tech.)
E-mail: mem21109@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導(REBCO, RE=Rare Earth)線材を用いた超伝導ケーブル等の交流機器応用では、交流損失を低減するために REBCO 線材に対してツイストが施される。しかし、線材をツイストすることで臨界電流(I_c)が低下するため、I_cのねじり依存性を調べる必要がある。また、線材の細線化の研究開発も進められており、現在では 2 mm 幅線材も市販されるに至っている。そこで本研究では、線材幅の異なるREBCO線材に対して直流4端子法によるねじり試験を実施したので報告する。

2. 実験方法

REBCO 線材は上海超電導社製の幅 4 mm と 2 mm のもので、基板(Hastelloy, 50 μm)、中間層(CeO_2 / $LaMnO_3$ / MgO / Y_2O_3 / Al_2O_3)、超伝導層($GdBa_2Cu_3O_y$, 1 μm)、安定化層(Ag, Cu)で構成されている。また、安定化層の銅は線材表面にコーティングされている。これを長さ 120 mm に切り出して直流 4 端子法による電流-電圧測定を実施した。実験にはパルス電流を用いており、パルス幅は2.0 sである。ねじり試験装置の全体図を Fig. 1 に示す。試料は測定装置下部のステージに取り付けている。試料をステージに取り付けた際の概要図を Fig. 2 に示す。通電時の発熱の影響を低減させるために電流端子には銅ブロックを用いており、線材長手方向両端に取り付けた。上部の電流端子を回転させることによりねじり角度を与えている。電流リードには回転に追従するためにフレキシブルなものを用いた。また、電圧端子は REBCO 線材表面にはんだを用いて取り付けた。電流、電圧端子間距離はそれぞれ 100 mm、50 mm 程度である。

3. 結果と考察

Fig. 3 は I_c のねじり角度依存性の結果である。縦軸の I_c はねじり角度 0°の場合の臨界電流 I_{c0} で規格化している。2 mm 幅の REBCO 線材(○)の場合、280°付近、すなわち、ツイストピッチ(TP)123 mm から I_c の低下がみられ、442°(TP = 78 mm)では初期 I_cから70%以上低下していることが確認された。一方で、4 mm 幅 REBCO 線材(□)の場合、240°(TP = 141 mm)付近からI_cの低下がみられ、最終的には470°(TP = 72 mm)で初期 I_c に対して 70%以上の低下となった。I_cが低下し始める角度は、2 mm 幅線材と比較すると4 mm 幅線材の方が小さかった。これは、線材長が同一の場合、幅が広い線材の方が長手方向にかかる歪み力が局所的に大きくなることに対応していると考えられる。また、4 mm 幅線材ではねじり角の変化に対して急激な I_c 低下も観察された。これは、ねじりを印加した際に線材内部の欠陥が大きく進展しているためだと考えられる。

発表当日には、異なる線材に対してもねじり試験を行った結果や、ねじりに対する可逆性を調べた結果についても報告する予定である。

謝辞

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

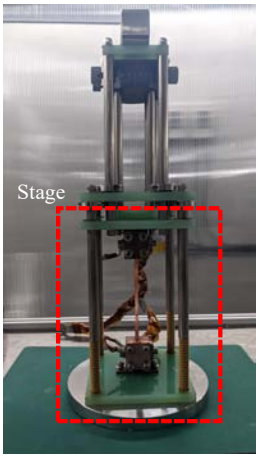
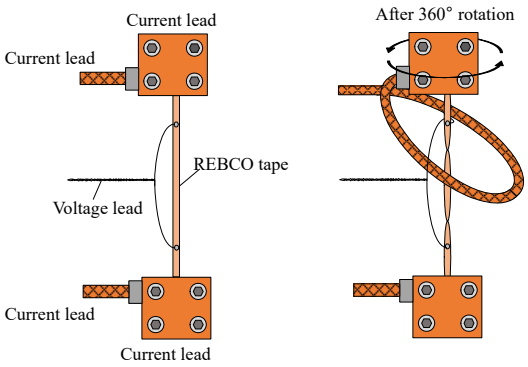


Fig. 1 Photograph of twist test equipment



(a) 0° (b) 360°

Fig. 2 Schematic of the sample stage for twist test

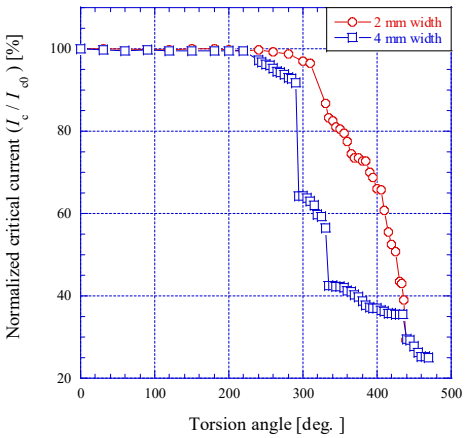


Fig. 3 Torsion angle dependence of I_c in REBCO tape

超伝導線材 REBCO のエッジワイズ曲げによる臨界電流測定

Critical current measurement by edgewise bending of superconducting wire REBCO

山根 昇悟（大同大）; 長村 光造（応用科学研究所）; 町屋 修太郎（大同大）

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

E-mail: dmm2129@stumail.daido-it.ac.jp

1. はじめに

日本では発電所で発電された電気は、自宅や会社に届く際、約 5%の送電ロスがあると言われている。この送電ロスをゼロにできれば、世界的なエネルギー問題を解決することができる。現在、軸に超伝導線材をスパイラル状に巻いたものを送電ケーブルとする開発が進められている。その際、超伝導線材が曲げによる力を受ける。しかし、曲げによる臨界電流の劣化はまだよくわかっていない。今回は、機械特性の良い超伝導線材 REBCO を用いてエッジワイズ曲げによる臨界電流の劣化の基礎理論を研究したので報告する。

2. 実験方法

2 種類の REBCO を使用する。REBCO の断面構造は Fig. 1 に示す。ニッケル合金の厚さが 0.05mm のものを REBCO1、0.75mm のものを REBCO2 とする。線材単体では薄すぎて、エッジワイズ変形を実現できないので、同じ板幅の真ちゅうを貼り付け厚さを確保した。上から曲率半径 250mm～667mm を持つ曲げ治具を押し付けて REBCO を半径に沿わせて変形させ、臨界電流を測定する。

3. 結果

荷重が最大値の時の曲げ治具半径と臨界電流比のグラフを Fig. 2 に示す。95%までを劣化なしと定義した。曲げ治具の半径が小さくなるほど、臨界電流比の劣化が大きいことがわかる。そして r400mm までは臨界電流劣化は見られなかったが、r350mm 以降で劣化が出始めた。r350mm 付近から臨界電流比の劣化が始まると考えられるので r400mm から、曲げ治具の半径を細かくして実験を行っていく必要がある。荷重と臨界電流比のグラフを Fig. 3 に示す。臨界電流比が劣化なしの区間、臨界電流比が落ちていく区間、臨界電流比が一定になる区間の 3 区間に分けることができることが発見できた。外側の曲げひずみが大きいため、超伝導層がそこから劣化していると考えられる。

4. まとめ

曲げ治具の半径が r350mm 以降で臨界電流比の劣化が見られたため、r400mm から曲げ治具を細かくして実験していく必要がある。

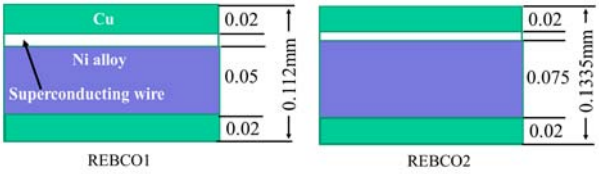


Fig. 1 Sample dimension

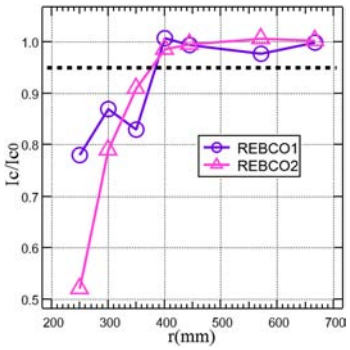


Fig. 2 Dependence of Ic/Ic0 on bending fixture radius in edgewise bending

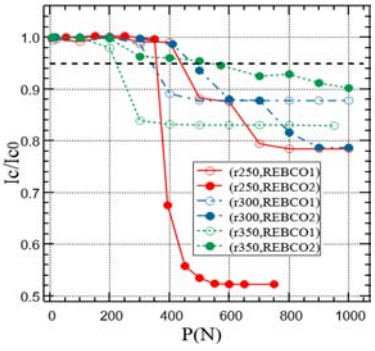


Fig. 3 Load dependence of Ic/Ic0 in edgewise bending

超電導ケーブル用の低融点金属を用いた接合技術

Joint technology using low T_m metal for superconducting cable

山本 春海, 恩地 太紀, 赤坂 友幸, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研);伊藤 悟(東北大学)
YAMAMOTO Haruumi, ONJI Taiki, AKASAKA Tomoyuki, FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru
(Railway Technical Research Institute); ITO Satoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: yamamoto.haruumi.52@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では直流電気鉄道向け高温超電導ケーブル(超電導き電ケーブル)の開発を行っている。超電導き電ケーブルの導入により、電圧降下の抑制による輸送の安定化、変電所の集約化、送電損失の低減や回生効率の向上による省エネルギー化といった効果が期待できる[1]。

超電導き電ケーブルは、工場で製作後に断熱管に収めた状態でドラムに巻き付け、トラック等で鉄道現場へ輸送する。道路交通法の制約から、その輸送単位は最長でも 500 m 程度と考えられ、さらなる長距離ケーブルの導入には鉄道現場におけるオンサイト接続が必要となる。鉄道現場におけるオンサイト接続は確保できる空間、時間などが制限されることから、簡易な接続技術が必要となる。特に、超電導線材同士の接合は接合抵抗や機械特性などを実用レベルに保つ必要があることから、鉄道総研では複数の接合技術について検討を進めている。本発表では、簡易な接合技術としてインジウムを用いた接合技術に着目し、必要な前処理条件について詳細に検討したため、結果について報告する。

2. 接合に必要な処理条件の詳細検討

インジウムは、融点が低いこと(156.4℃)や、常温で柔らかく、高い凝着性といった特徴を有する。そのため、インジウムを用いた加圧および融点以下の加熱処理により接合する手法(低温熱処理機械的接合)について検討を進めている。従来の低温熱処理機械的接合は、Fig.1 に示す複数の工程から成るが、鉄道現場における接合を想定すると工程を簡略化することが望ましい。これまでにも簡略化に向けた検討を行っている[2]が、今回、各工程の与える影響について詳細に調査を実施した。

接合工程の中でも(A) 超電導線材の表面研磨、(B) インジウム酸洗い、(C)圧接界面へのフラックス塗布および(D)加熱を対象として、各工程の有無をパラメータとし接合抵抗への影響を調査した。その結果、(C)圧接界面へのフラックス塗布があれば(A) インジウム酸洗いおよび(B)超電導線材の表面研磨、(D)加熱は省略しても影響は少ないことがわかった。

次に(C)圧接界面へのフラックス塗布の影響をより詳細に調査するため、(A)、(B)および(D)を無しとした上で、各種フラックス塗布に対する接合抵抗を測定した。酸を含む水溶性のフラックスでは低い接合抵抗が得られたが、ロジン系のフラックスやペーストフラックスでは接合ができなかった。ロジン系のフラックスは酸と異なりインジウム表面の酸化被膜を溶解し新生面を露出させる働きがないこと、ペーストフラックスは酸を含むものの加圧時に界面に留まり接合を妨げたことが原因と考えられる。

以上、超電導線材単位の評価では(A)、(B)および(D)の工程は省略しても接合抵抗に大きく影響しなかったことから簡略化の見通しを得た。また(C)の工程で用いるフラックスとして、酸を含み塗布時は表面に留まるものの加圧時に接合界面から除去される水溶液が適していると考えられる。

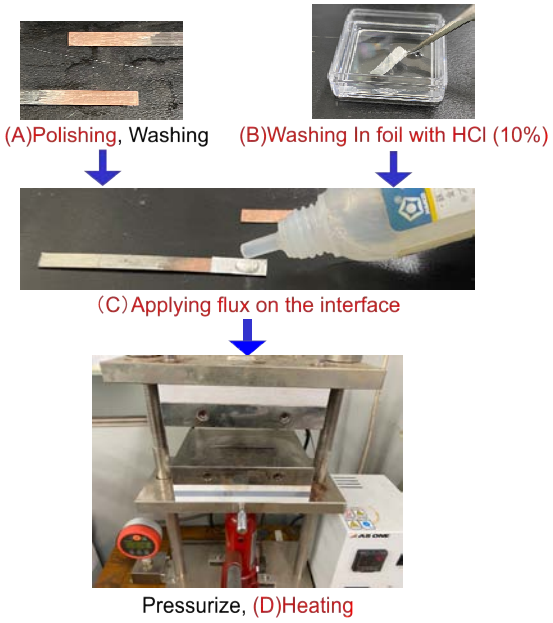


Fig. 1 Joint process of press welding using Indium



Fig. 2 Simplified jig for press welding

3. オンサイトを想定した接合手法の検討

実ケーブル形状の接合は、超電導線材毎に接合すると膨大な時間を要するため、一括で行えることが望ましい。これまでの実験室における接合では半円のくぼみを持つ治具を油圧プレス機で加圧していたが、鉄道現場では大掛かりな装置の持ち込みは現実的ではない。そこでよりコンパクトでスペースに制約がある中でも施工が可能な手法として、Fig. 2 のようなボルトナット方式の治具を用いた加圧方法を考案した。実ケーブル形状での加圧接合試験を実施した結果、接合可能であることを確認した。

謝辞

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「未来社会創造事業(JPMJMI17A2)」の支援を受けて実施した。

参考文献

1. M. Tomita, et al.: Energy, (2017) 579-587.
2. S. Ito, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.33

REBCO 超伝導ダイオードを用いたマイクロ波信号の整流特性

Rectification of Microwave Signal using High-Temperature Superconducting Diodes

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

1. はじめに

電流の流れる方向によって臨界電流が変化する超伝導体は、超伝導ダイオードと呼ばれる。このような特性は、磁束量子に対する非対称ポテンシャル[1]や、クーパー対に対する非対称ポテンシャル[2]により実現される。

我々はこれまで、高温超伝導体 $REBa_2Cu_3O_y$ (REBCO)薄膜において、表面平坦化および格子不整合ひずみにより発現する超伝導ダイオードについて報告してきた[3]。さらに、この素子を活用して、マイクロ波を用いた長距離ワイヤレス送電を提案している。この送電方法では、900 MHz、2.4 GHz, 5.7 GHz の帯域の使用が想定されている。この応用に向けて、超伝導ダイオードにおける周波数 300 MHz 以上のマイクロ波帯の交流信号の整流効果の確認が課題である。

そこで本研究では、格子不整合抑制のために $PrBa_2Cu_3O_y$ (PrBCO)バッファ層上に成膜した $YBa_2Cu_3O_y$ (YBCO)薄膜を用いた超伝導ダイオードを作製し、マイクロ波周波数帯の整流効果測定装置を用いて、交流入力信号に対する整流効果を測定した。

2. 実験方法

パルスレーザー蒸着法により、IBAD-MgO 基板上に膜厚 50 nm の PrBCO バッファ層を成膜した後、膜厚 450 nm の YBCO 薄膜を作製した。パルスレーザーを用いて、薄膜を幅 100 μm、長さ 1 mm のブリッジ形状に加工した。試料を冷凍機伝導冷却で 77 K に冷却し、超伝導電磁石を用いて-5 から 5 T までの面内磁場を印加しながら、マイクロストリップラインを介してマイクロ波信号を入力し、試料にて整流された直流出力電圧をカットオフ周波数 160 kHz の RC ローパスフィルタを介してナノボルトメータにて測定した。80 MHz-1 GHz のマイクロ波信号は、信号発生器およびパワーアンプを用いて出力し、マイクロ波信号の透過時の試料中のピーク電流は、測定系の終端に設置したパワーメータの電力測定値および特性インピーダンス 50 Ω を想定して計算した。

3. 実験結果および考察

Fig.1 に、PrBCO 薄膜上 YBCO 薄膜の 77 K、(a)0.16 T および(b)-0.16 T の面内磁場下における異なる周波数に対する直流出力電圧の電流振幅依存性を示す。周波数によらず、ピーク電流に比例して正に線形に増加する成分と、あるピーク電流にて電圧が急激に立ち上がる成分が現れた。また、前者は磁場の向きに依存しないのに対し、後者は磁場の向きによって値が反転した。磁場に対して反転する電圧は超伝導ダイオード効果による整流成分、反転しない電圧は熱起電力であると考えられる。以上の結果から、超伝導ダイオードによりマイクロ波入力信号が整流されたことが示された。また、整流電圧の正負から、磁束量子は超伝導薄膜表面から基板方向へ整流されていることが明らかになった。この結果から、基板-超伝導薄膜海面での表面バリアにより磁束量子の侵入が防がれていることが示された。

周波数の変化に着目すると、出力電圧は電流振幅に対して単調増加するが、750 MHz 以上の周波数では非単調な振る舞いを示した。これは、回路内の接触抵抗や表面抵抗による散逸により試料温度が局所的に上昇し熱起電力が発生したためと考えられる。

当日は、熱起電力の防止、電流振幅の大きな領域での発熱による熱起電力について報告する予定である。

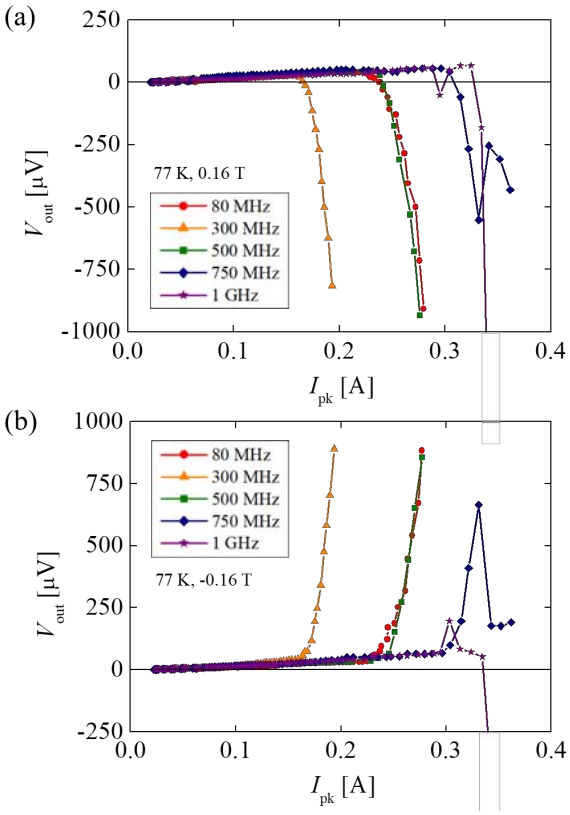


Fig. 1 Peak current dependence of output DC volage at magnetic fields of (a) 0.16 T and (b) -0.16 T at 77 K in the superconducting diode made of the YBCO film with the PrBCO buffer layer.

謝辞

この成果は、科研費(20K15217、22H01522)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20004)の結果得られた ものです。株式会社フジクラ飯島康裕様より金属テープを提供いただきました。

参考文献

[1] A. Palau *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 012502 (2012).
[2] R. Wakatsuki *et al.*, Science Advances, **3**, e1602390 (2017).
[3] 土屋雄司 他, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 19p-C206-5. 水野彰人 他, ISS2020, WB4-3 (2020).

kA 級大容量 MgB2 ラザフォード導体の電流再配分と安定性

Experimental and Numerical Study of Current Re-distribution for Stability in a Newly Developed kA-class MgB2 Rutherford Cable

谷貝 剛, 猪俣 涼,中川 優, 星野壮太(上智大学); 恩地太紀(鉄道総研);槇田 康博, 新冨 孝和,(KEK);
平野 直樹(NIFS) ;駒込 敏弘(前川製作所); 濱島 高太郎(東北大学)
YAGAI Tsuyoshi, INOMATA Ryo, NAKAGAWA Hiro, HOSHINO Sohta (Sophia University), ONJI Taiki (RTRI);
MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); HIRANO Naoki(NIFS); KOMAGOME Toshihiro(MAEKAWAMFG. CO., LTD);
HAMAJIMA Takataro(Tohoku University)
E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラル実現のため，水素社会の発展が期待される。様々な貯蔵・輸送方式が提案されているが，本グループでは，液体水素の輸入事業に着目し，貯蔵状態から水素ガス利用時に無駄となる冷熱を有効に利用でき，かつ再生可能エネルギー由来の発電電力を平準化できる新しい電力システムの実現を目指している。先進超電導電力変換システム(Advanced Superconducting Power Conditioning System: ASPCS)は，不安定な電力を平準化する装置として，超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)，燃料電池と電気分解装置を導入している[1]。 変動する発電電力を長周期と短周期成分に分解して平準化できる上，水素冷熱と水素ガスをも有効利用できるシステムである。

2. 実証試験用 SMES 容量の算定

SMES の貯蔵容量は，一般的な 2 万 m^2 のメガソーラ(PV)が，最大出力から平均 20km/h～30km/h で移動する雲によって出力がゼロまで減少する時間を約 20sec と見積もり，1kV 出力電圧の PV システムの場合の必要貯蔵容量を 20MJ と設定した。それを実現するステップとして， 10kJ より 1 桁大きい 100kJ を設定した。コイル外径 600mm の制約の下では，最大経験磁場 2T で 1.5kA の定格電流の導体で巻いた，9 枚のダブルパンケーキ(DP)コイルが必要となる。そのため，20K においてkA を超える定格電流の導体の設計・開発を行った。

3. 導体試験のセッティング

ラザフォード導体は，熱的な安定性を考慮して素線の銅比から必要本数を算出した。撚りピッチは，R&W 法を想定して，撚り線時およびコイル巻き線時の曲げ歪みが各々熱処理前後の許容値以内になるように設計した[2]。作成したラザフォードケーブルを 650 mm 切り出して直線形状のまま，液体ヘリウム中で 8T の背景磁場下で試験できる装置に設置した。

測定系の設定を Fig. 1 に示した。導体 Ic を評価する電圧タップの他，磁場中心付近にヒータを配置し，ヒータから206 mm 上流とヒータからすぐ下流に，5ch のホール素子アレイを配置し，電流分布変動由来の磁場変動の空間分布を約 2mm の空間分解能で検出できるようにした。これにより，ヒータ入熱後の磁場変化，すなわち電流分布の変化を詳細に計測した。

Table 1 Specification of kA rated-current conductor

Strand	Specifications
Strand material	MgB_2
Number of filaments	18
Diameter	0.83 mm
Fill factor MgB_2/Cu	0.16 / 0.3
Jc (20K, 2T)	～1,000 A/cm^2
Rutherford Conductor	specifications
Number of strands	24
Twist pitch	110 mm
Operating temperature	4.2 K
Background field	< 8 T
Rated current designed (20K, 2T)	1 .5 kA

4. 実験結果と考察

Fig. 2 は， 3.2 kA 通電の途中でヒータ入熱を行った前後の導体の電極間電圧の変化とホールセンサーで検出した磁場変動(ΔB)の時間変化の一例である。電圧の立ち上がりと同時に，ヒータ下流の磁場が変動し，ヒータで加熱された素線直上の磁場が 20 mT 減少，一方導体端の磁場は 40 mT 増加している事が確認できる。上流の磁場変動と比較すると下流の磁場変動が顕著であり，比較的スムーズな電流転流が確認できた。講演では，電流分布解析の詳細を含めて報告する。

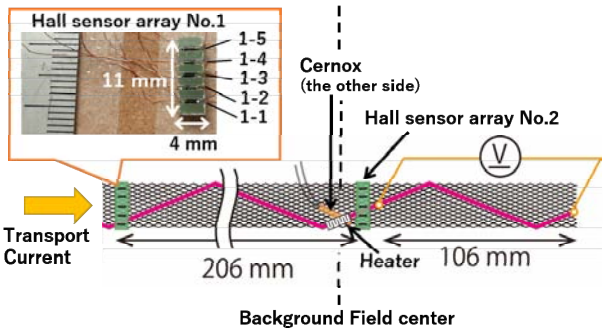


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup detecting current re-distribution being triggered by intentional heat input

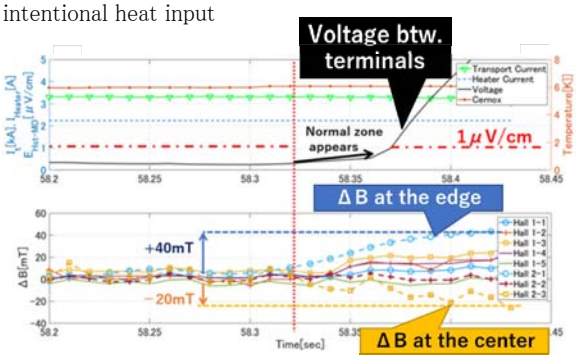


Fig. 2 Measured ΔB initiated by heat disturbance with 3.2 kA transport current.

参考文献

1. T. Hamajima, et al., TEION KOGAKU J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol.14 No.11(2014)
2. T. Yagai, et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn. Vol. 56, No. 5, (2021) pp.269-276.

MgB_2 ラザフォード導体を用いた電磁力平衡ヘリカルコイルの素線曲げひずみ解析

Strand Bending Strain Analysis of Force-Balance Helical Coil Using MgB_2 Rutherford Cable

許 航、野村 新一（明治大）、谷貝 剛（上智大）、新冨 孝和（KEK）、平野 直樹（NIFS）、仁田 旦三（東大）

Xu Hang, Nomura Shinichi (Meiji Univ.), Yagai Tsuyoshi (Sophia Univ.), Shintomi Takakazu (KEK), Hirano Naoki (NIFS), Nitta Tanzo (Tokyo Univ.)

E-mail: wardenxuhang@meiji.ac.jp

1 はじめに

本研究では、MgB_2 超電導線を使用した 1 MJ 級 SMES 用電磁力平衡ヘリカルコイル (FBC: force-balanced coil) 製作の可能性を検討している。MgB_2 超電導線を大電流容量化するため、ラザフォード導体を候補として考えている。しかし、撚線作業と巻線作業により、ラザフォード導体の素線に曲げひずみがかかり、臨界電流の低下が懸念される [1]。したがって、MgB_2 ラザフォード導体を用いた FBC を開発する事前に導体にかかる曲げひずみを解析する必要がある。本発表では、1 MJ 級電磁力平衡ヘリカルコイルを W&R 方式と R&W 方式それぞれの場合で製作する時に、MgB_2 ラザフォード導体の素線に印加される曲げひずみの解析結果を報告する。

2 ラザフォード導体素線の曲げひずみ

FBC 導体素線の軌道は複雑な 3 次元空間曲線である。曲線上の任意点の曲げ半径 ρ は素線中心の軌道座標の 2 階微分で評価できる [1]。曲線軌道上の任意点における素線曲げひずみ ε は、

$$\varepsilon = \frac{r_f}{\rho} = r_f \cdot \sqrt{(\frac{d^2x}{ds^2})^2 + (\frac{d^2y}{ds^2})^2 + (\frac{d^2z}{ds^2})^2} \qquad (1)$$

となる。ここで、r_f は素線の半径である。

3 FBC の導体素線曲げひずみの解析

図 1 は、解析対象である 1 MJ 級 SMES 用 FBC の外観図と Hyper Tech Research 製 MgB_2 素線を用いて設計したラザフォード導体の断面図を示している [2]。本研究では、MgB_2 素線を 12 本に減らして解析を行う。W&R 方式の場合、素線をラザフォード導体に加工した後で FBC の撚線作業を行う。そのため、ラザフォード導体構成 [1] と FBC の巻線軌道 [2] から FBC の導体素線軌道を解析し、素線の曲げひずみを解析する。図 2 は、ラザフォード導体の撚りピッチによる導体素線の曲げひずみ最大値の変化の解析結果を示している。解析結果より、W&R 方式の素線曲げひずみの許容値である 4% [1] 以下に制限するため、撚りピッチを 70 mm 以上にする必要がある。

一方、R&W 方式の場合、MgB_2 ラザフォード導体を熱処理用円形ボビンに巻いた状態で熱処理することを想定する。巻線作業による導体素線に印加される曲げひずみは、円形コイル状態と FBC 状態で印加されるラザフォード導体素線ひずみの三次元差分と考えられる。図 3 は、熱処理用ボビン半径の違いによる導体素線曲げひずみ最大値の変化を示している。ここで、ラザフォード導体の撚りピッチは 100 mm としている。解析結果より、R&W 方式の素線の曲げひずみの許容値である 0.23% [1] 以下に制限するため、熱処理用ボビンの半径を 140 mm 以上にする必要がある。また、熱処理用ボビンの半径を 300 mm にする場合、素線曲げひずみが最小になり、半径が 300 mm を超えると曲げひずみが増えることがある。

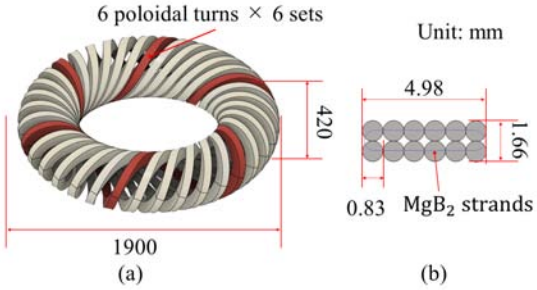


Fig. 1. Schematic illustration of the 1 MJ-class SMES coil with FBC (a) and the cross section of designed Rutherford cables with Hyper Tech Research MgB_2 strands.

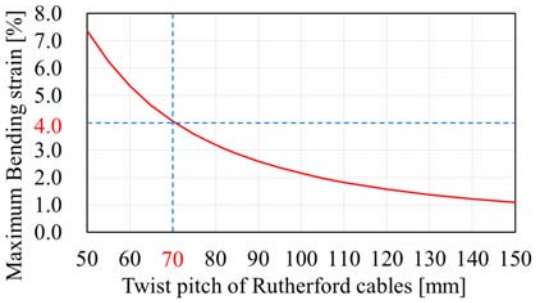


Fig. 2. Analysis results of maximum strand bending strains versus twist pitch of Rutherford cable in the FBC wound by W&R method.

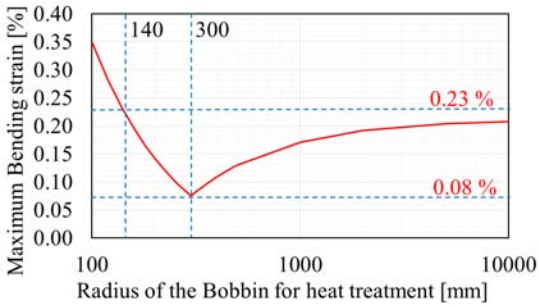


Fig. 3. Analysis results of maximum strand bending strains versus radius of bobbin for heat treatment during the R&W method.

解析手法の詳細、ラザフォード導体の撚りピッチ、熱処理巻枠の半径を変化させ、導体素線の曲げひずみの解析結果及び評価については当日報告する。

参考文献

[1] 谷貝 剛, 他, 「大型 SMES 磁石応用への大電流容量 MgB_2 導体開発」, 低温工学, Vol. 56, No. 5, 2021.

[2] 野村 新一, 「系統安定度測定装置としての SMES の可能性」, 低温工学, Vol. 56, No. 5, 2021.

X 線 CT による MgB_2 多芯線材のフィラメント構造解析

Structure analysis of MgB_2 multi-filament wire by X-ray CT

尾崎 優一, 井上 昌睦(福岡工業大学)
OSAKI Yuichi, INOUE Masayoshi (Fukuoka Institute of Technology)
E-mail: mem22103@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 超伝導線材の研究開発は進んでおり、既に km 長の超伝導線材が国内外で販売されている[1-2]。現在は、交流損失を低減させるための多芯化及びフィラメント径の微細化が精力的に行われている。フィラメントの径の微細化に伴う、フィラメントの断線や亀裂、ソーセージングが懸念されている。

我々は、X 線 CT を用いた MgB_2 多芯線材内のフィラメント構造の可視化に取り組んできた[3]。本研究では、X 線 CT に画像解析を施し、MgB_2 フィラメントの断線の有無やソーセージングなどの内部構造を調べた。

2. 実験方法

試料はパウダーインチューブ(Power in Tube, PIT)法により作製された直径 0.83 mm の 18+1 芯 MgB_2 線材で、熱処理前と熱処理後の 2 つの線材を用意し、それぞれ 5 mm 長に切断した後、高分解能 X 線 CT(SKYSCAN 1172, Bruker)での測定を行った。X 線 CT での測定条件は空間分解能を 1.96 μm とし、このときの回転変位角を 0.4 度とした。

X 線 CT により得られた断面画像から MgB_2 フィラメントの領域を抽出するために画像処理を行った[3]。その後、三次元解析ソフトウェアの Avizo を用いてフィラメント周りの三次元モデルを作成し、フィラメントの断線の有無、ソーセージングの様子を調べた。また、ソーセージングの様子を定量的に比較するために、フィラメント断面積の統計分布解析を行った。

3. 結果と考察

X 線 CT 測定により得られた断面像の一例を Fig. 1 に示す。MgB_2 フィラメントとその周囲の Nb バリアが明確に判別できることが分かる。一連の断面像に適用二値化法を適用して MgB_2 フィラメント領域の抽出を行ったあと、Nb バリアの領域も抽出し、それぞれの三次元モデルを作成した。三次元モデルにて MgB_2 フィラメントの断線の有無を確認したところ、熱処理前、熱処理後ともに断線は確認されなかった。一方、ソーセージングについては、外周のフィラメントよりも内周のフィラメントの方が顕著となっており、熱処理後の線材では Nb バリアが破れて MgB_2 が漏れ出ている様子が確認された。

三次元モデルから得られた MgB_2 フィラメントの断面積の統計分布を Fig. 2 に示す。熱処理前の外周フィラメントの断面積分布は標準偏差が平均値の約 1.7 %と高い均一性を示していたが、内周フィラメントでは約 5 %と 2 倍以上にも広がっており、より大きいソーセージングが発生していることがわかる。一方、熱処理後の MgB_2 フィラメントは内周フィラメントの断面積が Fig. 2(c)のように複数のピークを示すような振る舞いであった。これは前述した MgB_2 フィラメントの漏れが関係していると考えられる。

他のフィラメントについての詳細やソーセージングの原因についての考察は当日報告する。

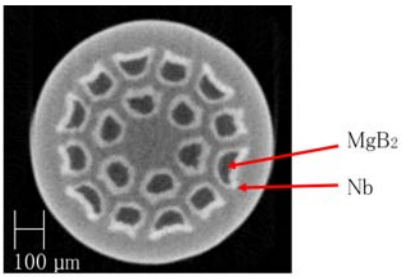
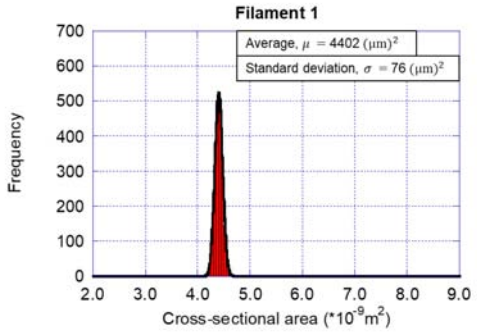
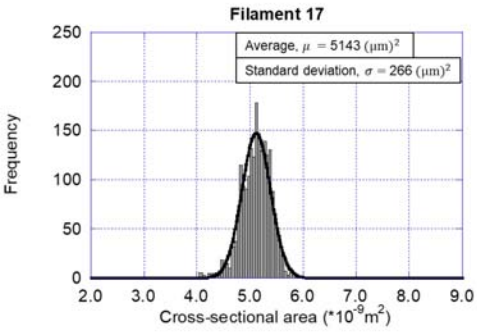


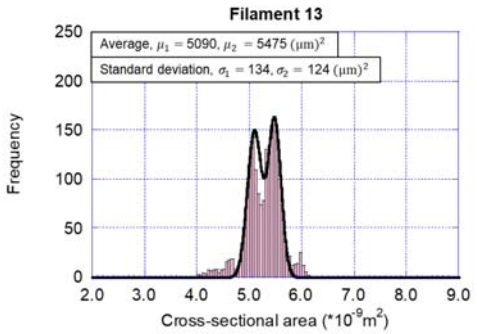
Fig. 1 A cross-sectional X-ray CT image



(a) Outer filament for before heat treatment



(b) Inner filament for before heat treatment



(c) Inner filament for after heat treatment

Fig. 2 Statistical distribution of cross-sectional area of MgB_2 filaments

参考文献

1. Sam Dong R&D, https://samdongamerica.com/products/mgb2-superconducting-wire/
2. https://www.hitachi.co.jp/rd/news/topics/2019/1008.h
3. M. Inoue, *et al*., Abstract of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 64

トロイダル型高温超電導アキシャルギャップ誘導モータの特性評価

Experimental Study on Toroidal-Winding based High Temperature Superconducting Axial Gap Induction Motors

GOMBOJAV Nandintsetseg, 渡邊 浩行 (神戸製鋼所); 松本 拓也 (JASTEC)
GOMBOJAV Nandintsetseg, WATANABE Hiroyuki (Kobe Steel); MATSUMOTO Takuya (JASTEC)
E-mail: gombojav.nandintsetseg@kobelco.com

1. はじめに

カーボンニュートラルへの実現に向けて輸送機分野では電動化が加速している。特に航空機では、推進システムの電動化のためモータの大幅な高出力・軽量化が求められており、その手段として高温超電導回転機が注目されている。

アキシャルギャップ構造を適用した誘導モータは、小型・扁平形状において2次導体に発生する磁束の面積を大きくすることができ、高トルク化が可能である。加えて、占積率を向上させるトロイダル巻固定子とダブルロータ構造を採用することで、従来のラジアルギャップ誘導モータに対してトルク密度が2倍になることが解析により示された[1]。さらに、固定子巻線に高温超電導導体を用いることで、高出力・小型・軽量なモータが期待されている。本発表では、トロイダル巻固定子を採用した高温超電導アキシャルギャップ誘導モータの試作・駆動試験を行った。

2. モータ設計・解析

Fig.1(a)に試作したモータの設計モデルを示す。1つの固定子を2つの回転子で挟み込むダブルロータ型を採用し、固定子は、トロイダル巻線方式で、線材にはレアアース系高温超電導線材を適用した。さらに、製作とモータ組立を容易にするため固定子コアを分割構造で設計した。回転子は、銅フレームの枠に台形の圧粉コアを挿入しており、フレームとヨークが設置された構造で設計した。固定子コアには圧粉、 ヨークには帯鉄心を採用し、鉄損を低減する構造にした。

定格電流は、事前に行った臨界電流測定試験より固定子コアの磁気飽和を考慮のうえ25 Armsに設定した。この条件をもとに有限要素解析ソフトJMAG-Designerを用いて解析を実行した。モータの詳細仕様をTable.1に示す。

Table.1 Motor Specifications

Power Density	0.4 kW/kg
Rotational Speed	2500 rpm
Rated Torque	17 Nm
Rated Current	25 Arms
Pole Number	12
Split Stator	18
Outer Diameter	180 mm
Thickness	91 mm
Cooling temperature	77 K

3. モータ試作・駆動試験

Fig.1(b)に試作したモータの外観を示す。分割構造を採用することで容曲げ半径に制約がある高温超電導線材においても、トロイダル巻固定子を容易に製作できた。Fig.2 に試験装置の構成を示す。駆動時の制御は、回転角度センサによる検出情報が必要なく、簡便に駆動することを目的に V/f制御を採用した。本試験は、冷却するためにモータを液体窒素に浸漬した。対抗モータを外した状態での無負荷試験結果をFig.3 に示す。Fig.3 は、約 270 rpm で駆動させた際の回転数、入力電圧、電流の時刻波形である。

各相に同期速度 350 rpm 相当の三相交流の電流が流れ、モータがほぼ一定の回転数で回転している結果が得られた。

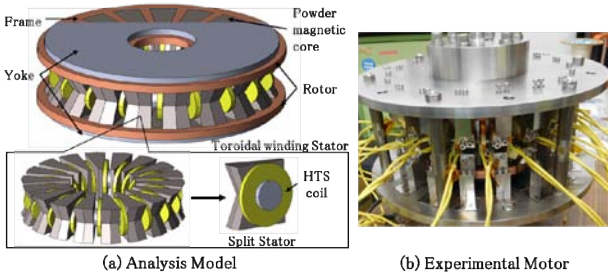


Fig.1 Analysis and experimental model of HTS Axial Gap IM.

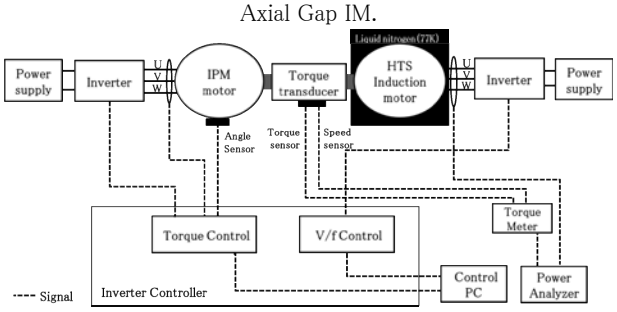


Fig.2 Test setup for measurements.

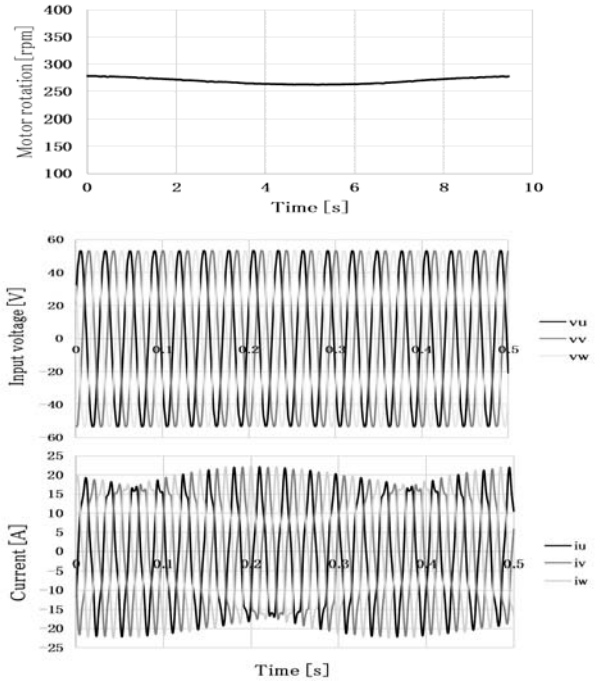


Fig.3 Experimental results of HTS Axial Gap IM.

4. まとめ

トロイダル巻固定子を採用した高温超電導アキシャルギャップ誘導モータを試作し、モータ駆動試験を実施した。すべりと損失の関係及び電圧と電流の妥当性について今後検証していく。

参考文献

1. R. Sakai, Y. Yoshida, and K. Tajima: T. Magn. Soc. Jpn., 2,43 (2018).

高温超電導ダイナモ特性へのテープ線材構造の影響の 2 次元数値解析

2D Numerical Analysis of the Influence of Coated Conductor Structure on HTS Dynamo Characteristics

張 志宇, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)
ZHANG Zhiyu, TERAO Yutaka and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)
E-mail: zhangzhiyu799@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Compared with the traditional electric machines, the superconducting rotating machines have the merits of high-power density, which are considered ideal candidates for the electrified aircraft. However, the current leads loss is an obstacle to hinder the increase of machine's efficiency. The high-Tc superconducting (HTS) Dynamo enables the injection of DC currents into the machine's field windings without the requirement of current leads, which has been confirmed more power-saving by some groups with experimental results. However, both in experiment and simulation process, the expected linear relationship between frequency and DC open circuit output voltage becomes nonlinear under different experiment conditions and the value of transition frequency changes accordingly as well. There is no available literature explaining the phenomenon, so in this work, we attempt to investigate the influence of HTS tape's structure on the transition frequency based on 2D numerical modeling and the first period of our work is shared in this paper.

2. HTS Dynamo Specifications

Table 1 shows the fundamental specifications of the HTS Dynamo which is one of the mostly well-known experimental set-ups and it is made of a rotating disk powered by a motor, several permanent magnets (PM) and a HTS tape [1].

Table 1. Specifications of the HTS Dynamo [1].

Width and thickness of the HTS tape	12mm	1 μ m
Critical current and n value	283A(77K)	20
Width and height of the PM	6mm	12mm
Active length of the PM	12.7mm	
Operating frequency of the PM	4.25Hz	
Remanent flux density of the PM	1.25T	
Distance of the airgap	3.7mm	
Radius of the rotating disk	35mm	

3. Analysis Methods

In our work, we use a coupled H-formulation and A-Vm formulation to solve the electromagnetic problems in the HTS Dynamo, which was firstly used to model the superconducting machines in [2] and [3]. As shown in the Figure 1, we use the H formulation and E-J power law in the superconducting region (red area) to calculate the solution of the induced current and magnetic field distribution while in the none superconducting region (blue area), we apply the A-Vm formulation to obtain the magnetic field generated by the PM and the distribution of electric field.

4. Simulation Results

We use the COMSOL Multiphysics to carry the numerical modeling where the H-formation is carried out in the Magnetic Field Formulation (MFH) interface and the A-Vm formulation is implemented in the Rotating Machinery Magnetic interface. As shown in the Figure 2, in the superconducting area, we focus on the magnetic flux density of one specific point, the outer contour's center of the HTS tape. According to the simulation results, we can find that the value of magnet flux density norm on the selected point increases as the PM approaches the HTS tape and reaches the highest value when the PM is 180 degree or directly above the HTS tape while the value decreases as the PM getting away. The general reason is that the total flux penetrating the HTS tape varies with the rotation of the PM, and the flux reaches the peak value when the PM is centered above the HTS tape.

Conclusions

We have built a 2D numerical model of the HTS Dynamo with a coupled H-formulation and A-Vm formulation. In the simulation results, we found that the magnetic flux density norm changes when the PM is approaching the HTS tape.

Reference

1. Z. Jiang, et al.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol.105, No.11 (2014)
2. R. Brambilla, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.28, No.5 (2018)
3. Mark Ainslie, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, 33 105009 (2020)

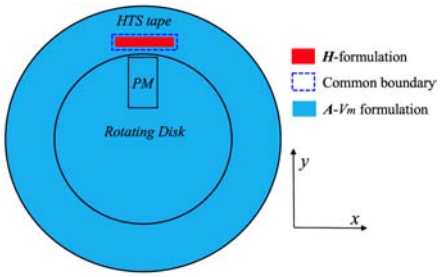


Figure 1. (a) 2D geometry of the HTS Dynamo, reproduced based on [3]; (b) Domain divisions based on the coupled formulations.

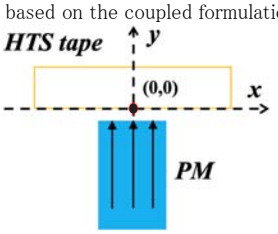


Figure 2. 2D geometry of the HTS Dynamo when the PM is directly under the HTS tape.

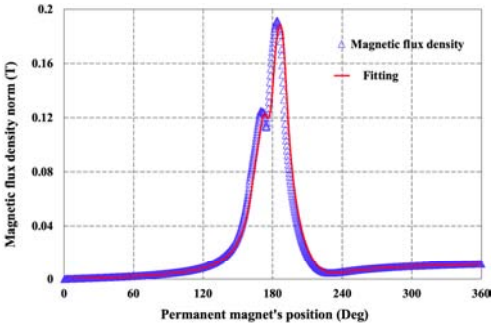


Figure 3. Magnetic flux density norm on the HTS tape's outer contour's center when the PM is at different positions.

全超電導モータの固定子-回転子間ギャップ中の希薄ガスの伝熱・流体連成解析による回転子冷却特性の検討

Study of Rotor Cooling Characteristics by Coupled Heat Transfer and Fluid Analysis of Dilute Gas in the Stator-Rotor Gap of Fully Superconducting Motors

赤坂 和紀，寺尾 悠，大崎 博之（東大），岡井 敬一，田口 秀之（JAXA）
AKASAKA Kazuki, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo), OKAI Keiichi, TAGUCHI Hideyuki (JAXA)
E-mail: akasaka-kazuki@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

電動航空機推進用超電導モータにおいて，より高出力密度化が求められるが，従来の全超電導モータは固定子と回転子のそれぞれに冷却機構を備えているため，構造が複雑となる[1]。そこで固定子と回転子のギャップ中に充填した希薄ガスを用いた回転子冷却構造はよりシンプルな構造が可能となる[2]。ここでは電動航空機推進用に，3MW，5000 rpm クラスの全超電導モータを対象に，固定子の電機子巻線の温度を 20 K 程度，回転子の界磁巻線の温度を 50 K 以下に冷却することを目標とする。

本稿では，全超電導モータの回転子への熱侵入，超電導界磁巻線の SUS 磁気シールドにおける渦電流損等の発熱を考慮して，有限要素法による熱伝導と流体の連成解析を行なった結果と，冷却手法の実現可能性に関する考察について報告する。

2. 電磁解析

界磁巻線の外側に電機子巻線側からの高調波を防ぐ目的で SUS 管を取り付けた。電磁界解析ソフト JMAG を用いてモータの電磁解析を行い，SUS 磁気シールド部分に生じる渦電流損を算出した。Fig. 1 に各ギャップ時の渦電流損を示す。ギャップが 15 mm 時で損失は 4150 W，35 mm 時で 415 W となった。この結果を熱解析に適用し，冷却特性を検討する。

3. 熱解析

有限要素法解析ソフト COMSOL Multiphysics を使用して熱伝導と流体の連成解析を行なった。Fig. 3 に電動航空機推進用全超電導モータの概念図を示す。二次元軸対象でモデリングし，解析を行った。

Fig. 1 に各ギャップ時における回転子表面温度を示す。ギャップが 15 mm 時で約 656 K，35 mm 時で約 266 K となった。別途計算を行った結果，ギャップが 35 mm 時の常温側からのトルクチューブを介した侵入熱は約 1.4 W であったため，回転子温度は回転子部分に生じる発熱が支配的であると言える。Fig. 2 にギャップ 15 mm, 35 mm 時における渦電流損失をパラメータ場合の回転子表面温度を示す。運転温度である回転子温度 50 K を達成するためには，ギャップ 15 mm 時で 40 W，35 mm 時で 10 W 程度まで損失を小さくする必要があることが分かった。

今後，電機子巻線の高調波を減らすために電磁設計を進めていく。

参考文献

1. Y. Terao, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29, No. 5, (2019), 5202205.
2. M. Kato, et al.: *J. Phys. Conf. Ser.,* Vol. 1857, No. 1, (2021), p.012016.

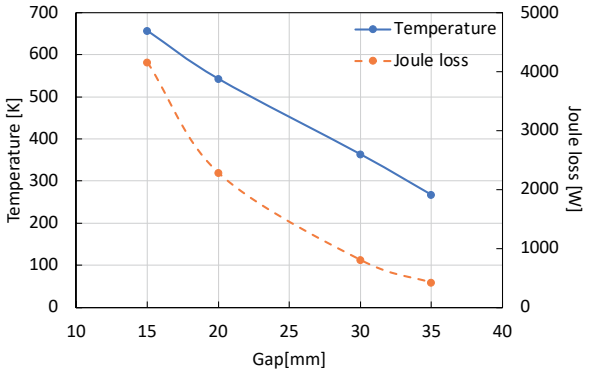


Fig. 1 Joule loss and rotor temperature at each gap

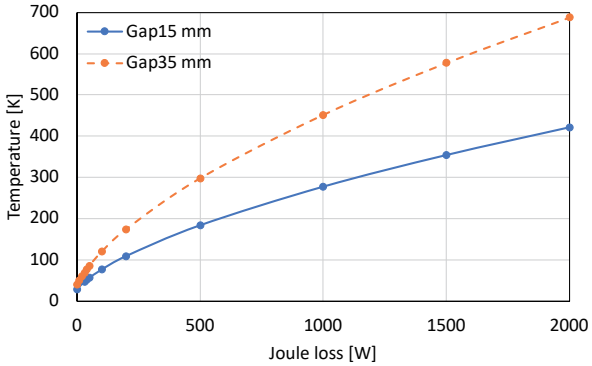


Fig. 2 Rotor temperature for each eddy current loss

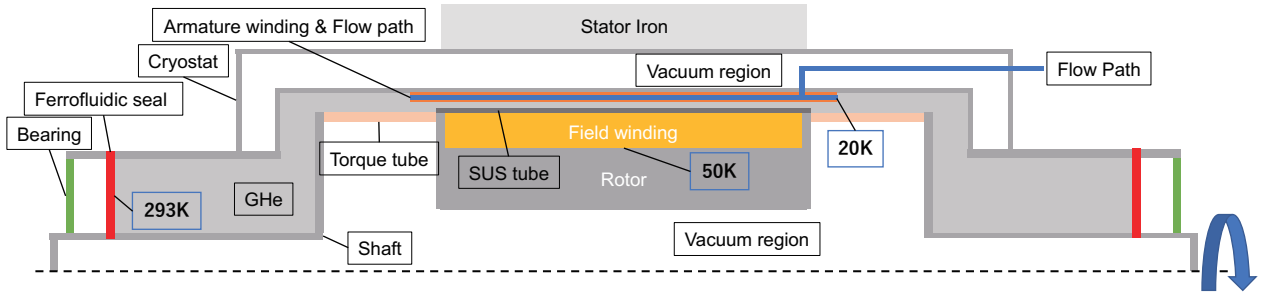


Fig. 3 Conceptual diagram of a fully superconducting motor

転位並列導体で構成した全超伝導回転機の電機子コイル向け REBCO レーストラック型ダブルパンケーキコイルにおける均流化コンセプトの実験的評価

Experimental Evaluation of Basic Concept for Uniform Current Distribution on REBCO Racetrack Double Pancake Coils Composed of Transposed Parallel Conductors for Armature Coils in Fully-Superconducting Rotating Machines

公文 麻人, 増田 陽平, 三浦 峻, 宮﨑 寛史, 吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓(九大)
KOBUN Asato, MASUDA Yohei, MIURA Shun, MIYAZAKI Hiroshi, YOSHIDA Koichi, SATO Seiki, SASA Hiromasa, IWAKUMA Masataka(Kyushu Univ.)
E-mail: kobun.asato.481@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は航空機向け超伝導回転機の開発を進めており、20 MW 級推進システムの実現を目指している。先行研究では 10 MW 級超伝導回転機で、電機子コイルに 1 kA_{rms} 以上の大電流通電を行う設計がなされている [1]。我々は、大電流化手法として複数本の超伝導線材を束ねて使用する並列導体を構成することを提案している [2]。今回は、回転機の電機子として使用される並列導体において、各素線間での電流分布を均一化するための基礎的なコンセプトを提案し、その効果を実験的に評価したため報告する。

2. 均流化コンセプト

航空機向け超伝導回転機を構成する電機子は、これまでに転位並列導体が使用されてきた超伝導変圧器と比較して小型の設計がなされている。そのため、構成を容易にするために少ない転位回数で均流化を実現することが望ましい。今回は 2^n 本並列導体(n : 2 以上の自然数)で構成されたコイルを使用する場合であり、各コイル間に充分な距離があり、相互インダクタンスが無視できるという前提条件の下で適用可能な均流化コンセプトを提案する。本コンセプトは、電機子の単相を構成する 2 つのコイルの巻線開始位置にそれぞれ 1 回の最内層転位(IT)を施し、各コイルを接続する相間空間に 1 回の最外層転位(OT)を施すことで均流化を実現するものである。最内層転位は複数本のテープをまとめて転位するものであり、各素線をそれぞれ転位する場合と比べて容易な作業となる。また、コイル間にはコイル中と比較して大きな空間があるため、最外層転位ではグループ単位での転位や各素線間での転位を施すことが可能である。ここで、提案する均流化コンセプトに基づく転位パターンを Fig.1 に示す。図中において DP および SP はダブルパンケーキコイルおよびシングルパンケーキコイルを示す。Fig.1 に示す転位パターンではすべてのグループ間の鎖交磁束が打ち消される構成になっているため、グループ間に遮蔽電流は発生せず、各素線のインダクタンスバランスが整えられているため均流化を実現できると考えられる。

3. 実験方法

本コンセプトの効果を評価するために 4 mm 幅の REBCO テープを使用してレーストラック型ダブルパンケーキコイルを試作し、電機子の単相を模擬した試験系を構築した。Fig.2 にテストコイルの様子を示す。このとき、コイルを構成する素線数やコイルのターン数を変化させ、複数のサンプルを用意した。また、試験系は 2 つのコイルを向かい合わせ、30 cm の距離に配置し、各コイルを構成する素線同士を半田接続することで構築した。評価実験として、液体窒素中で通電を行い、ロゴスキーコイルを使用した手法で各素線の通電電流を測定した。このとき、通電電流はロゴスキーコイルの両端電圧を台形積分することで計算した。式(1)にロゴスキーコイルの相互インダクタンス M と両端電圧 V_r を使用した各素線の通電電流 I の計算式を示す。

$$I = -\frac{1}{M}\int V_r \, dt \qquad (1)$$

4. 結果および考察

4 本並列コイルにおける電流分布の測定結果を Fig.3 に示す。測定結果より、最内層および最外層転位を組み合わせて適用することで 4 つの素線に均一な電流が流れることを確認した。以上の結果から本コンセプトに基づく転位パターンを適用し電機子を構成することで、4 つグループ間での均流化を実現できることを部分的に証明することができた。引き続き、8 本並列コイルにおける均流化効果の検証実験を進めている。

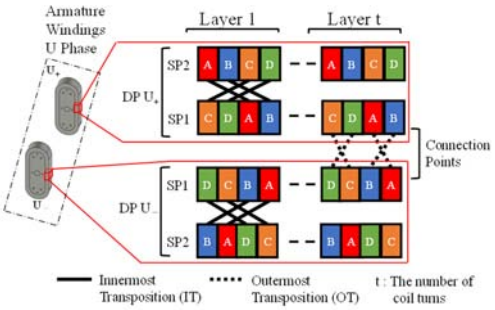


Fig.1 Concept of uniform current between groups

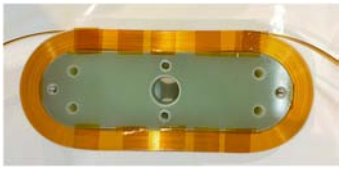


Fig.2 A photograph of four-strand test coil

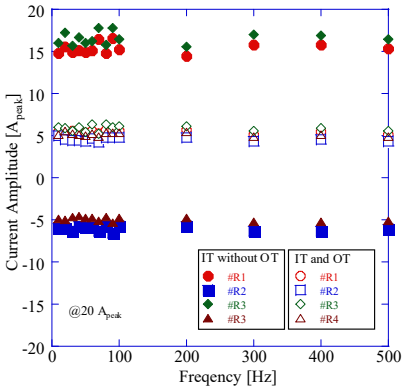


Fig.3 Frequency dependence of the current amplitude of each strand

参考文献

1. M. Filipenko et al.: Sci. Technol., vol. 33, 054002, 2020.
2. M. Iwakuma et al.: Phys. C Supercond. Appl., vol. 469, no. 15-20, pp. 1726-1732, 2009.

REBCO 超伝導線材による台形コイルを組み合わせた超伝導誘導機の電磁解析

Electromagnetic Analysis of Superconducting Induction Motor with REBCO Trapezoidal Armature Coils

山崎 亮斗, 岡出 祐汰, 宮崎 寛史, 吉田 幸市, 佐々 滉太, 三浦 峻, 岩熊 成卓 (九大)
YAMASAKI Ryoto, OKADE Yuta, MIYAZAKI Hiroshi, YOSHIDA Kouichi, SASA Hiromasa, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka (Kyushu Uninv)
E-mail: yamasaki.ryoto.070@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量削減を目指して、航空機の電動化が進められている。さらに高出力、高効率なモーターを実現するため、REBCO 線材のモーターへの応用が研究されている。REBCO 線材は、過度の曲げやねじりによって臨界電流値が著しく低下してしまうため[1]、形状が簡単なレーストラックコイルが電機子に用いられることが多い。我々はさらなる高出力化を目指して、台形コイルを用いた超伝導誘導機を提案している。コイルの短辺を隣り合うコイルの長辺に入れ込み、集中巻きでありながら分布巻きに近い構造を実現することで、より正弦波に近い回転磁界分布を発生させることが出来る。本研究では、台形コイルとレーストラックコイルの出力を解析によって比較し、優位性を明らかにすることを目的とした。

2. 解析モデル

台形コイルとレーストラックコイルで構成される超伝導誘導機の解析モデルを図 1 に示す。向かい合った 2 つコイルで一相となる。比較として同量の線材を用い、台形コイルは 57 ターン、レーストラックコイルは100 ターンのコイルを重ねたダブルパンケーキコイルとなっている。線材は厚さ 0.2mm、幅 4mm の REBCO 線材を想定している。電機子コイルには REBCO 線材の臨界電流値と、使用する電源の関係からコイル一つあたり 90A の三相交流電源を流すとして解析を行った。回転子には銅と鉄でできた円筒を用いた。

3. 結果

レーストラックコイルと台形コイルでのすべり周波数-トルク特性解析結果を図 2 に示す。回転子が同一の場合、すべり周波数がどの場合でも台形コイルのほうが大きな出力を得ることが出来ることが確認できる。また、滑り周波数が高い場合にはよりその差はより顕著となっている。すなわち高い電源周波数でも大きな始動トルクを得られることがわかる。負荷をかけて始動から回転させた場合でのトルク比較結果が図 3 となる。ここでは負荷としてプロペラを想定した。レーストラックコイルに対して台形コイルを用いた場合、約 1.7倍の定常トルクを得られる。

4. まとめ

解析の結果、どのようなすべり周波数でも台形コイルがより高い出力を出せることがわかった。負荷をかけて回転させた場合の解析では、レーストラックコイルより十分大きなトルクを得らた。これらは台形コイルのほうが滑らかな正弦波に近い回転磁界を発生させるためだと考えられる。上記の結果からレーストラックに対する台形コイルの優位性を確認できた。

今後、これらの結果を確かめるため、台形コイルを用いた超伝導誘導機の試作を進めていく予定である。

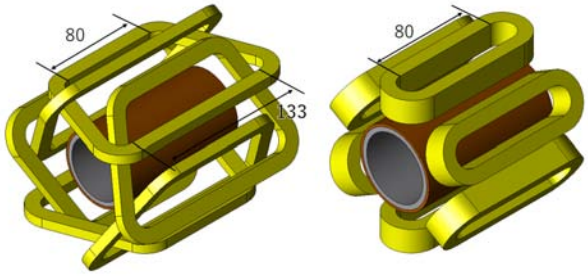


図 1 Simulation model of Trapezoidal coils (left) and racetrack coils (right)

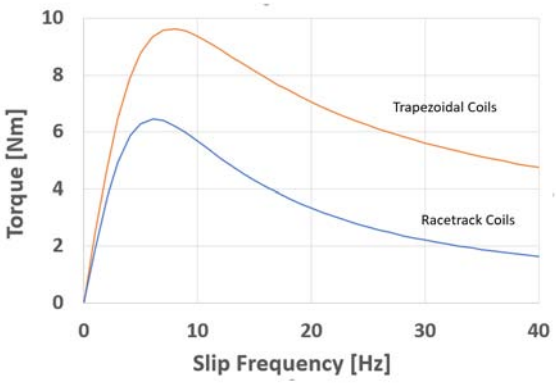


図 2 Comparison of Slip Frequency vs. Torque with both coils

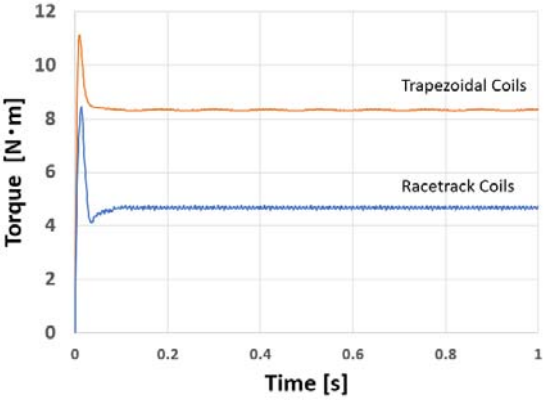


図 3 Comparison of Torque with both coils

参考文献

1. Simon Otten, et al., 2016 Supercond. Sci. Technol. 29 125003

伝導冷却 All-HTS 900 MHz NMR 磁石に向けた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイルの設計検討

Design study of an intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO coil for conduction-cooled All-HTS 900 MHz NMR magnets

末富 佑(理研)、田中 湧也、高尾 智明(上智大)、小林 賢介、柳澤 吉紀(理研)

SUETOMI Yu(RIKEN), TANAKA Yuya, TAKAO Tomoaki(Sophia Univ.),

KOBAYASHI Kensuke, YANAGISAWA Yoshinori(RIKEN)

E-mail: yu.suetomi@riken.jp

1. はじめに

近年の先端的なNMR磁石開発においては、主に超高磁場化を目的としてHTS線材が使用されている。一方で、広範な普及には、(i)小型(設置容易、低コスト)、(ii)永久電流(管理容易)、(iii)液体ヘリウムフリー(希少資源不要)を全て備えていることが望ましい。(i)の観点から、高電流密度All-HTSコイルが、(ii)の観点からはレイヤー巻コイルが適している。(iii)は伝導冷却により実現できるが、レイヤー巻HTSコイルでは伝熱パスの引き入れが難しいため、適用事例は極めて少ない。

著者らが提案しているintra-Layer No-Insulation (LNI)法は、上述の条件に好適である。特に、クエンチ時の電流迂回経路のために全レイヤー間に巻き込む銅シートは、伝熱パスとして利用できる。

本研究では、最終的に900 MHz (21.1 T)級の伝導冷却LNI REBCO NMR磁石の開発を目指す。本報では、LNI REBCOコイルの巻線内の基本的な熱伝導特性を把握するために有限要素法による熱伝導解析を実施し、また、開発が必要な要素技術を調査するために900 MHz LNI REBCO NMR磁石の概念設計を実施した。

2. 単一レイヤーLNI REBCOコイル熱伝導解析

単純な解析対象として、内径80 mm、単一レイヤーの50ターンREBCOコイルの熱伝導モデルを作成した。REBCO線材は10 μm銅メッキが施されたSuperPower SCS4050を想定した。線材のみのモデルと、LNIコイルを想定して銅シートがレイヤー内周部に接続されているモデルに対して解析を実施した。隣接する線材間と、線材と銅シート間には、参考文献[1]で報告されている熱伝達係数800 $Wm^{-2}K^{-1}$を設定した。解析にはCOMSOL Multiphysics®の伝熱モジュールを用いた。

Fig.1に、コイル上端部を冷却した場合のコイル下端部の温度の時間変化を示す。室温から4 Kに冷却するのに必要な時間は、線材のみのモデルでは約8.5時間であるのに対し、銅シートが接続されているモデルでは約2時間に抑えられる。LNI法によって軸方向の伝熱特性が大幅に向上することを確認できた。実際のコイルは数百レイヤーになるが、レイヤー間から引き出した銅シートを冷却ステージと接続することで、効果的に冷却できうる。実装の観点からは銅シートと線材間の熱接触を確実に得ることが課題であり、導電性エポキシを用いて接触界面を形成する手法を検討している。

3. All-REBCO 900 MHz (21.1 T) NMR磁石の設計パラメータ

設計したAll-REBCO 900 MHz NMR磁石のパラメータをTable 1に示す。標準的な54 mm室温ボアより小さい23 mmボアを想定し、コイル内径を45 mmとした。REBCO線材は10 μmの銅メッキが施されたSuperPower SCS4050のパラメータを用いた。LTSコイルとHTSコイルを用いた強磁場磁石においては、HTSコイルのフープ応力が設計を制限するケースが多いが、本設計のようなHTSコイルのみの強磁場磁石の場合、軸圧縮

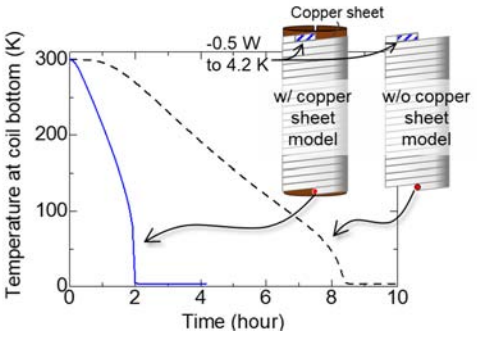


Fig. 1 Numerical simulation results of thermal conduction analysis on single-layer 50-turn layer-wound REBCO coils.

Table1 Parameters of the All-REBCO 900 MHz NMR magnet

	Unit	#1	#2
Coil i.d. / o.d. / height	mm	45 / 106 / 211 (inner notch)	45 / 145 / 211 (inner notch)
Conductor length	km	4.1	8.5
Operation current	A	220	139
Overall current density	Amm^{-2}	602	379
Central magnetic field	T / MHz	21.19 / 902.3	21.18 / 901.5
Max. hoop stress per conductor B_zJR	MPa	467.0	324.3
Max. compressive stress per conductor σ_z	MPa	-137.4	-97.5
Z2 harmonics/20mmDSV	ppm	-14.0	2.8
5 Gauss line	m	1.54	1.85

応力 σ_zによって制限される。Table1に示した設計#1は巻線電流密度602 Amm^{-2}の超高密度電流運転であるが、最大 σ_zが137 MPaと大きな値となる。σ_zを100 MPaに抑えるため、電流密度を下げた設計をTable1の#2に示す。σ_zは抑制できるが、使用線材長が約2倍に増加してしまう。小型設計には、REBCO線材の許容 σ_zとコイル巻線内部で実際に線材に印加される σ_z値の定量化、および、補強技術がポイントである。

本設計では内層・コイル赤道面付近の数ターンを除去したインナーノッチ構造を採用した。これにより、コイルの高さを抑えつつ、エラー磁場成分Z2/20 mmDSVを20 ppm以下に低減できる。最終的には、鉄シム・室温シムを用いてNMR計測に必要な磁場均一度1 ppbまで補正することを想定している。遮蔽電流磁場を考慮して、インナーノッチ構造、鉄シム配置を最適化することが必要である。

また、設計#1についてはクエンチ解析も実施した。詳細は当日の発表にて報告するが、コイルをクエンチから保護するために、銅シートと線材間の接触抵抗率を100 mΩcm^2オーダーに制御する必要があることを明らかにした。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21K20419 および理化学研究所基礎科学研究員制度の支援を受けたものである。

参考文献

[1] T. Ariyama et al., IEEE TAS, 27, 4, 8800106 (2017)

導電性エポキシを用いた intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO コイル 接触抵抗率制御技術の構築

Development of contact resistivity control technology for intra-Layer No-Insulation (LNI) REBCO coils with conductive epoxy

田中 湧也、末富 佑(理研)、有園 若葉、高尾 智明(上智大)、小林 賢介、柳澤 吉紀(理研)

TANAKA Yuya, SUETOMI Yu(RIKEN), ARIZONO Wakaba, TAKAO Tomoaki(Sophia Univ.),

KOBAYASHI Kensuke, YANAGISAWA Yoshinori(RIKEN)

E-mail: y-tanaka-6d9@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

NMRのより広範な普及にむけて、伝導冷却All-HTS NMR磁石が強く望まれている。レイヤー巻HTSコイルへ伝導冷却を適用するには、冷却パスの確保が課題となるが、intra-Layer No-insulation(LNI)法を用いることで、レイヤー間の銅シートを冷却パスとして利用できる。LNI法はクエンチに対する自己保護特性が大きな利点だが、その保護性能は線材と銅シートの接触抵抗率に大きく影響され、特に強磁場コイルにおいては10 mΩcm^{2}以上の大きな接触抵抗率が必要となる[1]。このため、(i)接触抵抗率を適切な値に制御すること、(ii)熱サイクルや電磁力を経験しても接触状態が保持されることが必要である。これらの観点から、導電性エポキシを用いて接触界面を形成する手法を考えた。エポキシに混合する導電性フィラーの種類と含有率を変化させることで抵抗率を制御する。本研究では、フィラーとして銅粉と黒鉛粉を用いてREBCO線材同士を接着し、接触抵抗率を4端子法で測定し、含有率の影響を調べ、さらにコイルを試作し77 Kでの試験を行った。

2. 実験方法

Fig. 1 (a)にREBCO線材 (SuperPower, SCS4050) を用いて作成した接触抵抗率評価試験系の模式図を示す。導電性エポキシを線材間に塗布し、外周側線材におもりで張力をかけた状態で凝固させた。液体窒素浸漬下で通電し、抵抗値 ($=V_{contact}/I$) と接着面積を掛け合わせたものを接触抵抗率として定義した。

3. 実験結果

Fig. 2に導電性フィラー含有率(wt%・重量%)に対する接触抵抗率変化を示す。○/△印はそれぞれフィラーとして銅粉/黒鉛粉を用いたサンプルである。エポキシはSTYCAST 2850FTJ、フィラーの粒径は40 μm、張力は0.5 kgfでサンプルを作成した。フィラー含有率の増加に伴って、接触抵抗率が減少している。フィラーの増加により、電流パスが増加するためだと考えられる。また、黒鉛紛を用いることで100 mΩcm^{2}級の高い接触抵抗率が得られた。ただし、サンプル断面を光学顕微鏡で観察したところ、Fig. 3 (a)に示すように、エポキシ層の厚さが100 μm程度と厚くなっていた。そこで、粘度が小さいエポキシ(CTD-521)を用い、張力1.0 kgf、フィラー粒径5 μmでの実験を行った。銅粉/黒鉛粉を用いたサンプルの測定結果を、それぞれFig. 2に●/▲印で示す。また、Fig. 3 (b)にCTD-521、銅紛を用いたサンプル断面の光学顕微鏡画像を示す。エポキシ層の厚さを11～18μmに抑えられることが確認できた。一方で、CTD-521サンプルにおいては、フィラー含有率が接触抵抗率に与える影響が小さく、5mass%においては接触抵抗率が小さくなっている。また、黒鉛紛サンプルにおいては同じmass%のサンプルでも接触抵抗率が大きくばらついている。これは、エポキシ層が薄くなったことにより、線材同士が直接接触する部分が発生するためと考えられる

4. まとめ

導電性フィラーとして黒鉛紛を用いることで、強磁場コイルのクエンチ保護に必要とされる 10 mΩcm^{2}以上の接触抵抗率が得られる。また、エポキシ硬化時の張力を大きくし、低粘度のエポキシ、粒径が小さい銅紛を用いることでエポキシ層の厚さを 20 μm 以下に抑えられる。 ただし、線材間の直接接触が接触抵抗率制御の課題となる。

当日の発表では、導電性エポキシを LNI コイルに適用した際の接触抵抗率と熱サイクルによる接触状態の変化についても報告する。

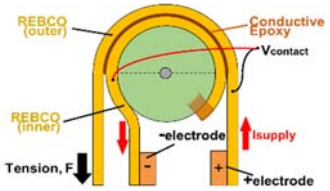


Fig. 1 Schematic illustration of the test setup

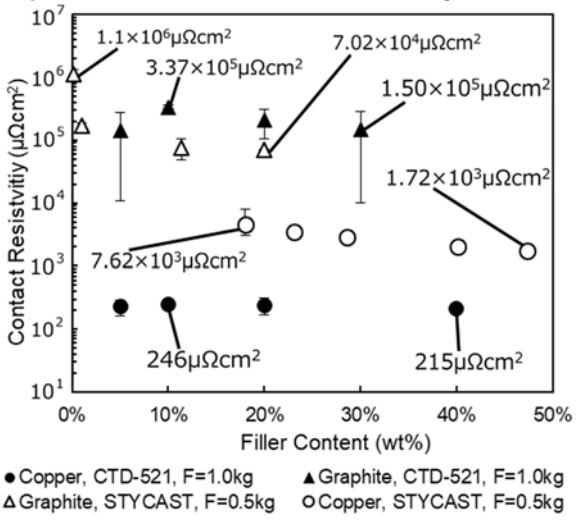


Fig. 2 Contact resistivity versus filler content ratio of copper powder and graphite powder as filler

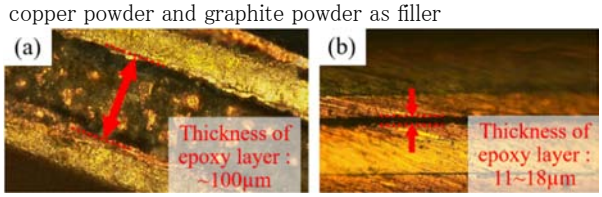


Fig. 3 Micrograph of sample cross sections. (a) STYCAST2850FTJ, D_{cu}=40 μm, F=0.5 kgf (b) CTD-521, D_{cu}=5 μm, F=1.0 kgf (D は粒径)

本研究は JSPS 科研費 JP21K20419 および理化学研究所基礎科学研究員制度の支援を受けたものである。

参考文献

[1] Y. Suetomi et al., SuST, 34, 064003 (2021)

外挿コイルのクエンチ発生時における内挿無絶縁コイルの熱的挙動の検討

Study on The Thermal Behavior of No-Insulation Coil by Quenches in a Outsert Coil

仲田 悠馬, 小林 宏泰, 早乙女 英夫, 宮城 大輔(千葉大学);
長崎 陽, 津田 理(東北大学)
NAKADA Yuma, KOBAYASHI Hiroyasu, SAOTOME Hideo, MIYAGI Daisuke (Chiba Univ.);
NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto(Touhoku Univ.)
E-mail: nakada1125@chiba-u.jp

1. はじめに

NMR 等の高磁場マグネットの内挿コイルとして, 無絶縁コイル(NIC)の活用が期待される。しかし, 外挿コイルがクエンチを起こした際の内挿無絶縁コイルの電流挙動や熱的挙動は明らかとなっていない。外挿コイルクエンチ時に, 大きな誘導電流が内挿無絶縁コイルに流れることで, コイル全体の発熱量が急激に増大する。その結果, 無絶縁コイルに不可逆的な損傷を与える可能性がある。本研究では, PEEC モデル[1]による電流解析と有限差分法による温度解析の連成解析を行い, 外部磁場減少時における無絶縁コイル内部の熱挙動, 及びコイル内電流分布について解析を行った。

2. 解析モデル及び解析方法

当モデルでは高温超電導導体の臨界電流I_cの 30 K における磁場依存性[2]を反映し, 数値解析を行っている。温度分布解析は, 二次元円筒座標系熱伝導方程式を用いた。境界条件は, コイル内外で熱の出入りの無い断熱条件とした。解析に用いた Y 系テープ導体, 超電導コイルの諸元, 及び解析条件を Table 1 へ示す。解析では, 劣化部の臨界電流値を周囲の導体の 20%の値とした。劣化部はコイルの 50 ターンと 51 ターンの間に存在する。運転負荷率は 6 割とした。無絶縁コイルに加わる外部磁場の大きさは 10 T とした。外部磁場は運転開始 400 秒から減少を始める。内挿無絶縁コイルに鎖交する外部磁場が減少することで発生する誘導起電力を等価回路モデルに反映することで, 外部磁場変動時の内挿コイルの電流挙動を解析している。内挿コイルの入力電流は運転開始 400.02 秒後に遮断される。遮断後, 内挿コイルは 0.1 Ω の保護抵抗と並列接続される。

3. 解析結果

Fig. 1 に, 外部磁場減少時の無絶縁コイルの最大温度と発熱量の時間推移を示す。外部磁場減少率 ε が 100 T/s の場合の最大温度は 234.4 K であり, ε が 1000 T/s の場合は 403.1 K である。ε が増えることで周方向の誘導起電力が増大し, 通電電流量が著しく増大したため, 最大温度が増加したと考えられる。無絶縁コイル内部の発熱量の最大値は ε が 100 T/s の場合 1.46 MW であり, ε が 1000 T/s の場合は 12.2 MW である。発熱量の最大値は概ね ε の値に比例している。Fig. 2 に外部磁場減少時の無絶縁コイルの周方向電流分布を示す。Fig. 2より, 外部磁場が 10%減少した時点で, 入力電流 470 A を大きく超えた電流がコイル全体に流れているのがわかる。ターン間の接触抵抗を介したコイルの 1 ターンにて外部磁場変動を打ち消すように誘導電流が流れるため, 周方向に大きな電流が流れたものと考えられる。また, Fig. 2 より, 内側ターンと外側ターンで特に大きな誘導電流が流れているのが確認できる。これにより温度上昇量は内側ターン, 及び外側ターンで特に大きくなった。最内層, 及び最外層では入出力端に繋がる接触抵抗を介して流れる誘導電流の量が特に大きくなるため, 入出力端における温度上昇量が最大となった。以上より, 外部磁場変動時に無絶縁コイルの内側と外側ターンに非常に大きな誘導電流が流れることで, 臨界温度を超えた温度に到達することが明らかとなった。そして, 最内層, 及び最外層では誘導電流は入出力端付近の接触抵抗を介して流れるため, 入出力端付近で大きく温度が上昇する。

Table 1. Specifications and analysis conditions of NIC.

Number of turns	100
Critical current at 0 T, 30 K [A]	1133
Divisions per turn	10
Tape width [mm]	4
Tape thickness [mm]	0.16
n value	33
Coil i.d. [m]	0.15
Excitation rate [A/s]	2
Excitation time [s]	235
External magnetic field (B_{ex}) [T]	10
Decrease rate of B_{ex} (ε) [T/s]	100, 1000
Protection resistance [Ω]	0.1

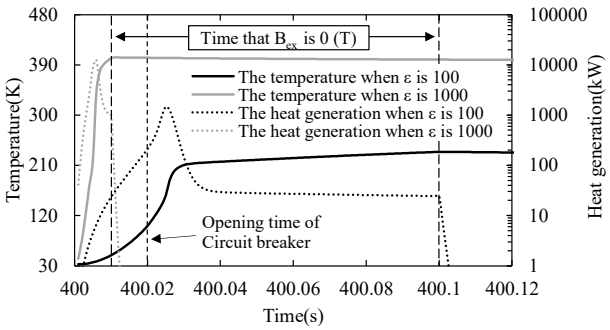


Fig. 1. Transitions of the temperature and heat generation in NICs with different value of ε when external magnetic field decreases.

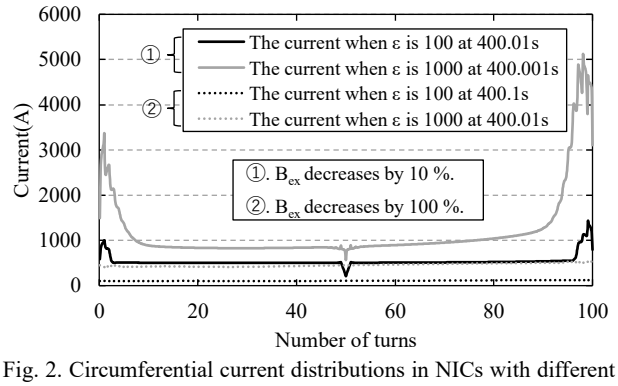


Fig. 2. Circumferential current distributions in NICs with different value of ε when external magnetic field decreases.

参考文献

1. Tao Wang et al., IEEE vol.25.no.3 2015
2. Selvamanickam, V et al., IEEE vol.25.no.12 2012

NbTi 超電導線における縦磁場効果の磁場角度依存性測定

Magnetic field angle dependence measurement of longitudinal magnetic field effect in NbTi superconducting wires

横山 彰一，小湊 健太郎，石田 清，村上 幸伸(JASTEC)；川嶋 慎也(神戸製鋼所)
YOKOYAMA Shoichi, KOMINATO Kentaro, ISHIDA Kiyoshi, MURAKAMI Yukinobu (JASTEC);
KAWASHIMA Shinya (Kobe Steel, Ltd.)
E-mail: Yokoyama.shoichi@kobelco.com

1. はじめに

超電導線材における縦磁場効果は、超電導線材が外部磁場と並行の場合、臨界電流 Ic が垂直磁場での値に比べ大きくなるもので、ある磁場領域ではゼロ磁場における Ic よりも大きい値となることが知られている[1]。一般的な超電導マグネットにおいて、超電導コイルの取り出しリード部は擾乱が発生しやすいため安定化に工夫が必要である。本報告では、このリード部の超電導安定化に縦磁界効果を利用することを提案し、NbTi 線の縦磁場効果の磁場角度依存性の測定結果を元にコイルリード部の超電導安定性を評価したことについて報告する。

2. NbTi 線の縦磁場効果の磁場角度依存性測定

NbTi 線の縦磁場効果は、ゼロ磁場 Ic(Ico)に対して、磁場が数 T において Ic が 5 倍近くなる。従って、通常の超電導コイル線材を用いての縦磁場 Ic の測定は電流容量が大きくなるため困難である。そこで、我々は、銅比 1.6 のモノリス超電導線材を φ0.1 に細線化し試料とした。Fig.1 に縦磁場効果 Ic 測定用の試料ホルダーの外観写真を示す。写真は磁場との角度 15° での計測状況である。磁場角度は、0°（並行）～90°（垂直）において 0～5T までの磁場下で Ic を測定した。

Fig.2 に Ic の磁場依存性測定結果を示す。Ico はおよそ 25A であるが、縦（並行）磁場における Ic は 3T でピークがあり 105A まで向上していることが分かる。この値は垂直磁場 3T での Ic の 60 倍の値である。Fig.3 は Ic の磁場角度依存性をプロットしたもので、磁場角度が約 23°（破線）以下では Ic は Ico より大きいことが分かる。

3. 超電導コイルの取り出し部の安定化

NbTi 超電導コイルの巻き始め、終わりについては応力の連続性が変わることからクエンチリスクが高く、線の固定など工夫が必要である。特に巻き枠から取り出したリード部においては線材の経験磁場が数 T になる場合があり、例えば運転電流 200A で垂直磁場成分1T の場合、電磁力は 200N/m となり 0.1mm 程度の線の動きでも最小クエンチエネルギ MQE を超える擾乱が発生する場合がある。ここで、筆者らは上述の縦磁場効果を考慮した超電導リード線の取り出し部の MQE を算定し評価した。その結果、縦磁場方向に引き出すことで安定性が大幅に向上することを確認した。

4. まとめ

NbTi 超電導線の縦磁界効果の磁場角度依存性を実測し、磁場角度 20° 以下ではゼロ磁場 Ic より大きい Ic となり MQE が大きく、超電導コイルリード部への安定化に寄与することが分かった。

参考文献

1. T.Matsushita: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 46, No.10 (2011) p.558-568

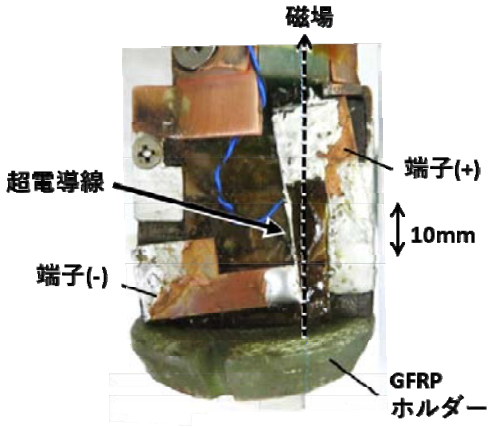


Fig.1 Appearance photo of the sample holder for longitudinal magnetic field effect measurement. (Angle to magnetic field is 15 degrees)

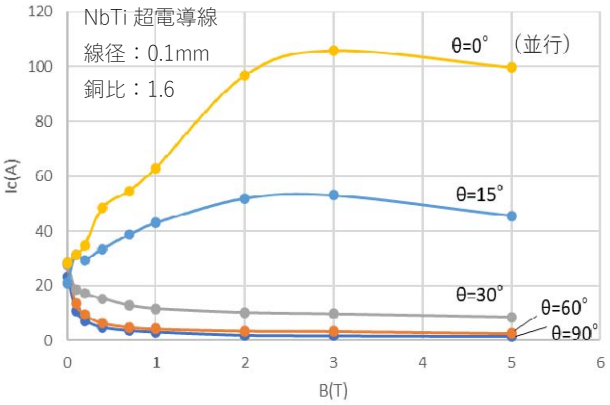


Fig.2 Measurement result of magnetic field angle dependence of longitudinal magnetic field effect

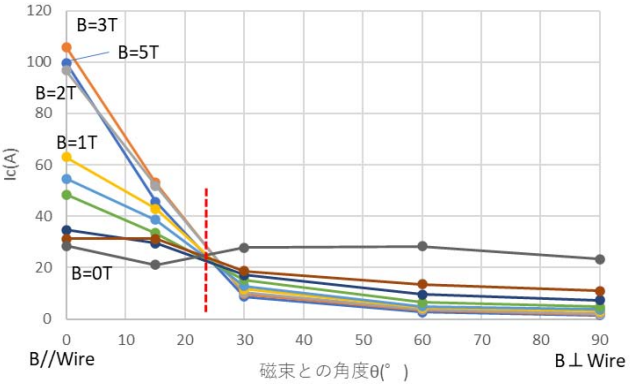


Fig.3 Magnetic field angle characteristics of critical current in NbTi superconducting wires

銅線が NbTi/Cu 線の冷却安定性に及ぼす影響

Study of effect of segregated copper wires on the cryogenic stability on NbTi/Cu wires

島本 知輝(総研大); 今川 信作, 髙田 卓, 濱口 真司, 尾花 哲浩(NIFS)

SHIMAMOTO Tomoki(SOKENDAI); IMAGAWA Shinsaku, TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, OBANA Tetsuhiro(NIFS)

E-mail: shimamoto.tomoki@nifs.ac.jp

1. はじめに

フランスで建造中の ITER で採用されている超電導コイルの導体には，SC 線(超電導素線)だけではなく銅線も含めて構成されている．この銅線は，クエンチ(常電導転移)時のコイル保護を主な目的として採用されているが，導体断面積における銅比が増加することや，超電導素線における冷却面積が増加することを踏まえると，導体の冷却安定性も向上すると考えることができる．しかし，この効果についての実験研究はほとんど行われていない．

以前より，素線間の電流転流のしやすさが，導体の冷却安定性に大きく影響することが報告されている．本稿では，銅線−超電導線間の接触抵抗を変化させた時，冷却安定性がどのように変化するのかについての実験結果について報告する．

2. 方法

円筒の支持治具に試験線を巻き付けたサンプルを液体ヘリウムで浸漬冷却されたソレノイドコイル内に挿入し，試験線への電流値と印加磁場を変化させながらクエンチ時の電圧計測を行った．試験線は，以下の 3 種類であり，SC 線には径 0.65 銅比 1.7 の NbTi 線を用い、銅線は径 0.6 のものを用いた．

① SC 線のみの線．
② SC 線と銅線をはんだ付けした線．
③ SC線と銅線を撚った線．

実験サンプルの概観を Fig.1に示す．支持治具は2種類あり，どちらも表面の溝に試験線を沿わせることができる．Fig1.(a)は，試験線を1回だけ巻いたシステムである．試験線①と②で用いた．Fig1.(b)は，円筒を4つに割ったものを，試験線で巻くことで円筒形に保持する形となっている[1]．テーパを押し込むと円筒が拡張する方向に力が加わり，試験線に対する張力を高めることができる．試験線③で用い，撚り線の接触抵抗の接触圧力による変化を狙った．

試験線には，任意に常伝導転移を引き起こすための加熱ヒーター1つと計測用電圧タップを6チャンネル分取り付けた．(a),(b)それぞれにおける試験線の概観を Fig.1(c)に示す．加熱ヒーターとして，120[Ω]の抵抗を持つひずみゲージを SC 線に貼り付け，エポキシ樹脂で固定した．通電により入熱し，任意のタイミングで狭い領域の SC 線を常伝導に転移させることができる．常電導部の拡大伝播を，電圧タップに生じる電圧で計測し，タップ間の距離と伝播までの経過時間から伝播速度を求め，試験線の冷却安定性の指標とした．

3. 結果

Fig.2 に，試験線③で実験を行った結果を示す．印加磁場が高いほど低い電流値から伝播が生じることがわかる．また，電流値に対する伝播速度も大きくなる．この結果は，超電導線の特性から予見される通りであった．

Fig.3 に，銅線との接触抵抗による伝播速度の変化を示す．試験線③での実験において，張力を変化させた結果が③’である．共巻銅線によって冷却安定性が向上し，接触抵抗が小さいほどその効果が大きいことがわかった．しかしながら，今回の実験の範囲では張力の変化による伝播速度への影響は確認できなかった．

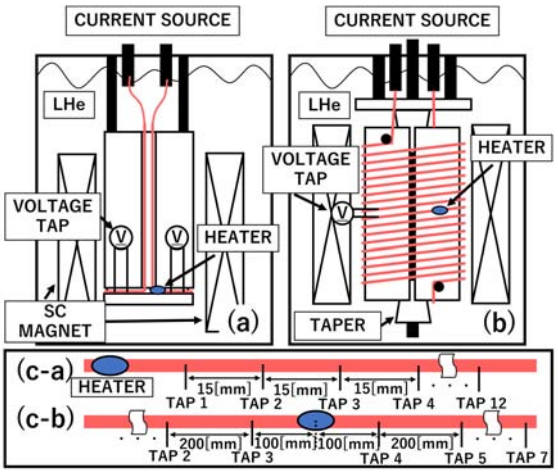


Figure 1 Experimental setup

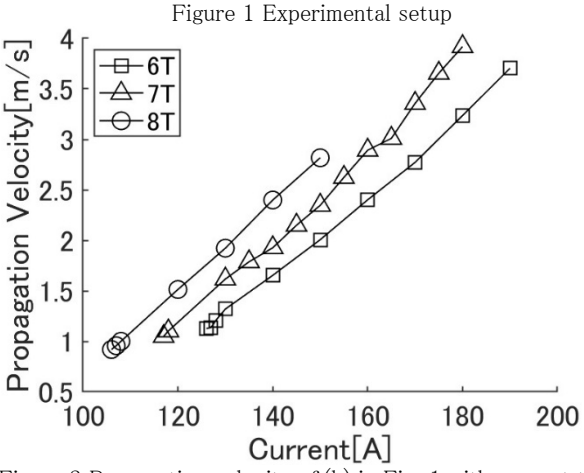


Figure 2 Propagation velocity of (b) in Fig. 1 with respect to current in each magnetic field.

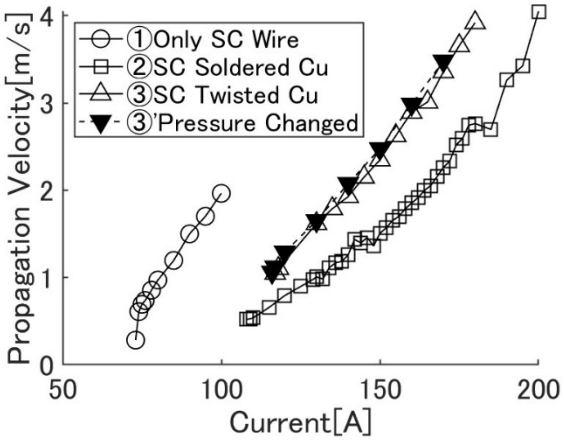


Figure 3 Change in propagation velocity due to contact with a copper wire.(B=7[T])

参考文献

[1] N. Hirano et al., “Influence of contact resistance among multi-strand superconducting cables on its stability”, Proceedings of ICEC17, (1998), p499-502

JT-60SA CS モジュール冷却試験におけるコイル内最大温度差の推定

Estimation of the maximum temperature difference in the coil during the JT-60SA CS module cool-down test

園田 翔梧, 中村 一也, 結縄 ことみ, 小林 倫香(上智大学); 福井良磨, 村上陽之, 濱田一弥(量研機構)
SONODA Shogo, NAKAMURA Kazuya, YUINAWA Kotomi, KOBAYASHI Tomoka (Sophia University); FUKUI Kazuma, MURAKAMI Haruyuki, HAMADA Kazuya (QST)
E-mail: shogo_sonod@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

核融合超電導トカマク型実験装置「JT-60SA」のマグネットシステムは中心ソレノイド(CS), 平衡磁場コイル(EFC), トロイダル磁場コイル(TFC)から構成される。

CS は 4 つのモジュールから成り, 1 つのモジュールは 52 層及び 11 ターンのパンケーキコイルで構成されている。実機運転において, コイルは液体ヘリウム(He)により, 室温から運転温度 4.5 K まで 1 カ月で冷却するよう計画されている。冷却中, 過度な熱応力を避けるため, コイル内の最大温度差に注意する必要がある。コイル内最大温度差の設計値は室温において 50 K である。しかし, コイル内部に温度センサを取り付けることは構造上困難である。したがって, JT-60SA の安全な冷却運転を保証するために, コイル内の最大温度差を推定することは重要である。

本研究では作成した解析モデルを用いて, CS モジュール冷却試験中のコイル内の最大温度差を解析し評価した。

2. CS モジュール内温度分布解析モデル

先行研究を基に, Hole 部の He を含めた温度分布解析モデルを作成した[1]。Fig. 1 に解析モデルを示す。解析モデルは 1 流路である 2 層, 11 ターンのコイルから成る。コイルの入口から供給された He はターン方向に流れ, 最内ターンで2層目に移動し, 2 層目のターン方向に流れ, 出口から冷凍機に戻る。コイルの導体は Bundle 部及び Hole 部を流れる He, ジャケット, 撚り線から構成した。

式(1)に He 温度T_fの支配方程式を示す。

$$A_f\rho_f c_f\frac{\partial T_f}{\partial t}+\dot{m}c_f\frac{\partial T_f}{\partial x}=A_c h_{j-f}a_{j-f}(T_j-T_f)+A_c h_{s-f}a_{s-f}(T_s-T_f)+\left|\frac{\partial p}{\partial x}\frac{\dot{m}}{\rho_f}\right| \quad (1)$$

ここで, A_fは流路断面積, ρ_fは He の密度, c_fは He の比熱, $\dot{m}$は導体内の He の質量流量, A_cは Bundle 部と Hole 部の面積, h_{j-f}はジャケット-He 間の熱伝達率, a_{j-f}はジャケット-He 間の単位体積当たりの熱交換面積, T_jはジャケットの温度, h_{s-f}は撚り線とヘリウム間の熱伝達率, a_{s-f}は撚り線-He 間の単位体積当たりの熱交換面積, T_sは撚り線の温度, pは He の圧力を表している。ジャケット及び撚り線の温度は先行研究の支配方程式を基に算出した。層方向及びターン方向の隣接するジャケット間の熱伝達率は CS モデルコイル冷却試験より推測された[2]。また, 導体内の管摩擦係数は JT-60SA 冷却試験より推測された式を用いた[3]。

3. コイル内最大温度差解析

Fig. 1 で示した解析モデルを用いて, CS モジュール冷却試験における, 室温からタービン運転開始前までのコイル内の最大温度差について調査した。Fig. 2 にコイル内の温度及び最大温度差の解析結果を示す。解析値は実験値に良く一致しており, 平均絶対誤差は約 1.2 K であった。コイル内の最大温度差は冷却開始時, 約 25.9 K であり, その後, 最大約 54.2 K まで増加した。したがって, コイルの最大温度差は室温での最大温度差設計値である 50 K を上回った。

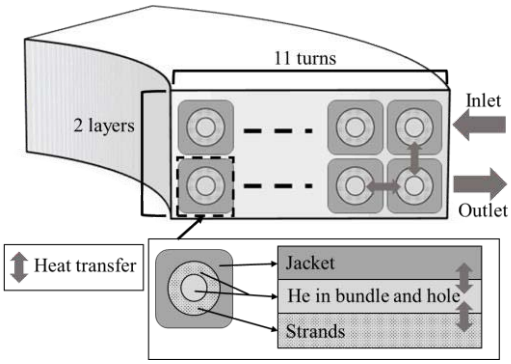


Fig. 1 Temperature distribution analysis model

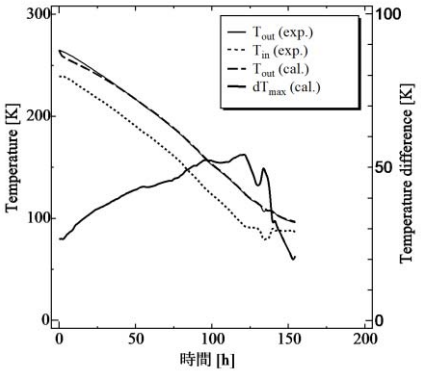


Fig. 2 Analytical results for temperature and maximum temperature difference in coil

4. まとめ

本研究では, Hole 部の温度を含めた温度分布解析モデルを用いて, CS モジュール冷却試験中のコイル内の最大温度差について評価した。結果, 冷却試験中に発生したコイル内の最大温度差は約 55.0 K であり, 室温における最大温度差の設計値 50K を上回ることが示された。しかし, コイルの温度が低下することにより, 線膨張係数が減少するため, コイルの最大温度差設計値は増加する。今後, 温度分布解析結果を用いて, コイル内に発生した熱応力について評価を行う。

謝辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金(20K04422)の助成金により実施したものである。

参考文献

1. S. Sonoda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 5, (2020), Art. no. 4201806.
2. K. Fukui, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, no. 6, (2022), Art. no. 4202305.
3. R. Bonifetto, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, (2019), Art. no. 4201005.

次世代核融合マグネットへの適用をめざした 20 kA級高温超伝導STARS導体開発の進捗

Progress of the 20-kA-class HTS-STARS conductor development for the next-generation fusion experimental devices

柳 長門, 成嶋吉朗, 小野寺優太, 濱口真司, 力石 浩孝, 高田 卓, 平野直樹, 高畑一也 (NIFS),
伊藤 悟 (東北大), Diego Garfias-Dávalos (総研大)

YANAGI Nagato, NARUSHIMA Yoshiro, ONODERA Yuta, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hirotaka, TAKADA Suguru, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya (NIFS), ITO Satoshi (Tohoku Univ.), GARFIAS-DÁVALOS Diego (SOKENDAI)

E-mail: yanagi@nifs.ac.jp

1. はじめに

次世代のプラズマ核融合実験装置のマグネットに適用できる大電流の高温超伝導(HTS)導体として、内部構造の異なる3種類の導体:STARS、FAIR、WISE の開発を行っている。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、線材間に撚りや転位を入れていないことが最大の特長である[1]。ヘリカル型核融合炉 FFHR への適用をめざして 2005 年から開発を始め、2014 年には 100 kA 級模擬試験体(全長 ~3 m)を製作して試験を行い、温度 20 K、磁場 5.3 T(いずれも~300 mm 区間)において電流値 100 kA を達成した[1, 2]。現在は 20 kA 級で実用となる導体の開発を進めている。

2. 20 kA 級 STARS 導体 6 m 長サンプルの製作

20 kA 級 STARS 導体の断面図を Fig. 1(a) に示す。REBCO 線材(12 mm 幅、15 枚)を単純に積層して銅安定化材に収納し、外周はステンレスジャケットにレーザビーム溶接を施す構造としている。銅安定化材とステンレスジャケットの間に内部電気絶縁を施している点も従来にないコンセプトである。開発の最初のフェーズでは内部絶縁を入れない直状 2 m 長の導体サンプルを製作し、スプリットコイルの中で温度を 20 K に制御、磁場 8 T で電流値 20 kA までの良好な通電結果を得た[3]。今回、内部絶縁を入れた導体 6 m 長を直径 600 mm、3 ターンのソレノイド形状で巻線したサンプル(Fig. 1(b))を製作し、大口径強磁場導体試験装置に組み込んで通電試験を行った。

3. 20 kA 級内部電気絶縁型 STARS 導体の試験結果

今回の通電試験では外部磁場 8 T、温度 20 K(いずれも全長~6 m)において定格電流である 18 kA まで段階的に電流値を上げ、常伝導転移することなく安定に通電できることを確認した。また、高速の掃引速度 1 kA/s において 18 kA まで 100 回の繰り返し励磁を行い、劣化のないことを確かめた。最後の 2 回の通電における電流、サンプル両端電圧(接続抵抗分含む)、口出し部付近に設置したホール素子によって測定した磁場の各波形を Fig. 2 に示す。サンプル電流がゼロに戻った際に磁場は元の値に戻っておらず、その後 20 秒ほどかけてゼロまで下がっている。導体の口出し部は電流リードから延長した銅ブロックに低抵抗の機械接続[4]をしており、階段形状にすることで全ての REBCO 線材を均等に接続している。線材間にはインダクタンスの差があるため電流値にアンバランスが生じ、接続部を介することで循環電流になっていると考えられる。輸送電流がゼロになった時点の残留磁場は通電速度に比例していることからこの循環電流を観測したものと理解でき、現在、このプロセスを数値計算でシミュレートしている。併せて、第二回の通電試験を予定しており、ホール素子を追加して詳細な電流分布の計測を行う計画である。

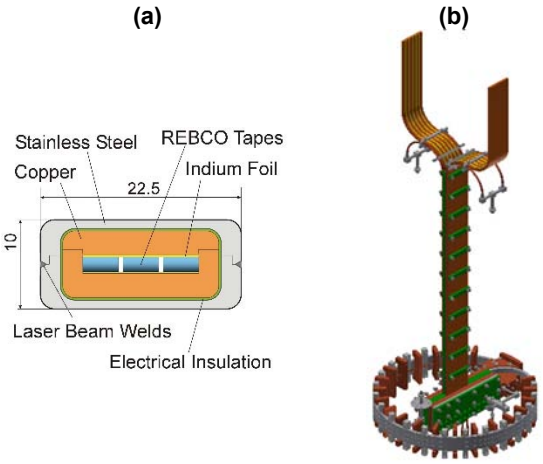


Fig. 1 (a) Cross-sectional layout of the 20-kA-class HTS STARS conductor and (b) illustration of a 6-m, 3-turn solenoid sample.

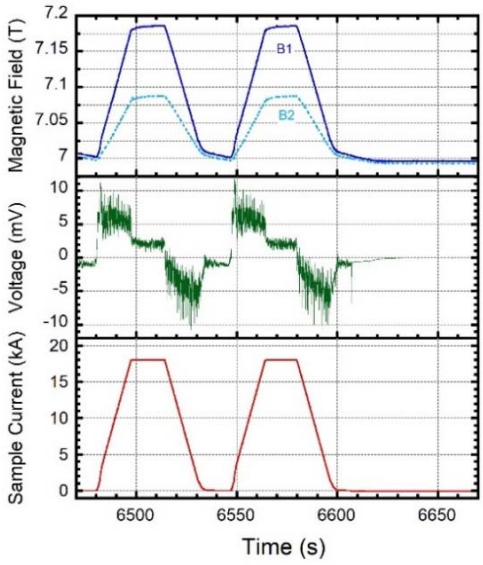


Fig. 2 Waveforms of the Hall probe signals for magnetic field measurement, the voltage signal of the whole sample (including joint resistances), and the sample current, observed in a 100 times excitation test with 1 kA/s ramp rate.

参考文献

[1] N. Yanagi et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 053021.
[2] Y. Terazaki et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4602905.
[3] N. Yanagi et al., Plasma Fusion Res. **17** (2022) 2405076.
[4] S. Ito et al., Nucl. Fusion **61** (2021) 115002.

ヘリカル型核融合炉における磁場配位最適化コイルの電磁力と応力挙動

Electromagnetic force and stress behavior of the optimized magnetic field configuration coil in helical fusion reactor

田村 仁, 山口 裕之, 後藤 拓也, 柳 長門, 佐竹 真介, 市口 勝治 (NIFS)
TAMURA Hitoshi, YAMAGUCHI Hiroyuki, GOTO Takuya, YANAGI Nagato, SATAKE Shinsuke, ICHIGUCHI Katsuji (NIFS)
E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

ヘリカル型核融合炉の概念設計では、LHDと同じヘリカルコイル(HC)の巻線則から相似拡大したものを基本形状としてきた[1]。一方、より良い閉じ込め性能を目指した研究も進められており、巻線則のパラメータ変化による最適化[2]やコイル軌跡をスプライン曲線によって柔軟に変形させる形状最適化[3]が試みられている。このようなHCの幾何形状の変化によってコイルが受ける電磁力や機械的挙動にどのような影響があるかを装置の健全性の観点から検証を行っている。

2. ヘリカルコイル巻線則

Fig. 1(left)はHCの概略で、R_cはドーナツ形状の疑似トロイダル座標(a_c,φ,θ)の主半径、a_c は小半径、φ はトロイダル角、θ はポロイダル角、m と lはトロイダルピッチ数と極数(LHD型では m=10、l=2)、α はトロイダル角に対するコイルのポロイダル位置を決めるHCピッチモジュレーション・パラメータである。α が正の場合、コイルはトーラス外側で鉛直側、トーラス内側で水平側に傾斜する形状となり、負の場合はこの逆となる。LHDは α=0.1 である。巻線則パラメータの変化による最適化では α=0 が最適値の候補となっている。また、スプライン曲線導入による最適化ではLHDのコイル形状を出発点として軌跡を探索し、従来の軌跡式では表せないコイル形状が提案されている。Fig. 1(right)に代表的なトロイダル角における各 HC の位置を示す。それぞれの軌跡によるコイル位置の変化は見た目には僅かであるが、閉じ込め領域の垂直磁場や磁極成分補正のための通電電流の調整との相乗で、発生する磁場・電磁力分布には比較的大きな変化となる場合がある。

3. 電磁場分布

磁場・電磁力分布の解析のために対象とする装置規模として、主半径 7.8m、プラズマ中心磁場 6.6T を想定した。コイル断面は縦横比 1:2 でプラズマ側は円弧状とし、電流密度がおよそ 80A/m^2 となる大きさで、全ての解析モデルで共通とした。Table 1 と Fig. 2 は電磁場解析の結果で、コイルの最大経験磁場は、スプライン最適化が最も高く 19.5T であった。コイルの電流に直交する断面内での電磁体積力をコイル断面で積分した電磁力は、LHD 型の α=0.1 の場合が最も高く 80.7MN/m であった。垂直磁場コイルを含めると最大電磁力は110MN/mを超える大きさとなっており、これらの非常に厳しい電磁力荷重を受けるコイルおよび支持構造物の応力・ひずみ分布にも注意が必要である。

3. コイル支持構造物

強大な電磁力が作用するため、コイルは十分な強度を持った構造物で囲まなければならない。また、製造コストや廃炉処理の観点から使用材料は極力少ないことが望ましい。強度に影響がない部分を削除して最適化構造を探索するトポロジー最適化手法は、大まかな初期形状から適切な形状を創出することが可能であり、概念設計段階の核融合炉用コイル支持構造の設計に非常に有効である[4]。最適化HCシステムに対してトポロジー最適化を適用して得られた支持構造の概略と電磁力に対する機械的挙動について詳細を報告する。

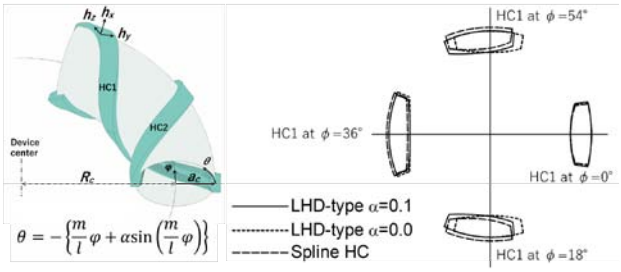


Fig.1 Definition of the LHD-type coil trajectory (left) and poloidal cross-section of HC1 (right).

Table 1 Coil specifications and electromagnetic properties

			LHD-type		Spline HC
			α=0.1	α=0	
Magnetomotive force (MA)	HC		25.74	25.74	25.97
	IV		15.03	15.37	19.46
	OV		-14.59	-16.91	-14.43
Magnetic stored energy (GJ)			85	89	93
Maximum magnetic field (T)			18.57	18.91	19.51
EM hoop force (MN/m)	HC	innermost	70.41	80.73	76.67
		outermost	53.73	44.36	50.10
	IV		77.36	75.59	113.94
	OV		22.65	28.61	22.82

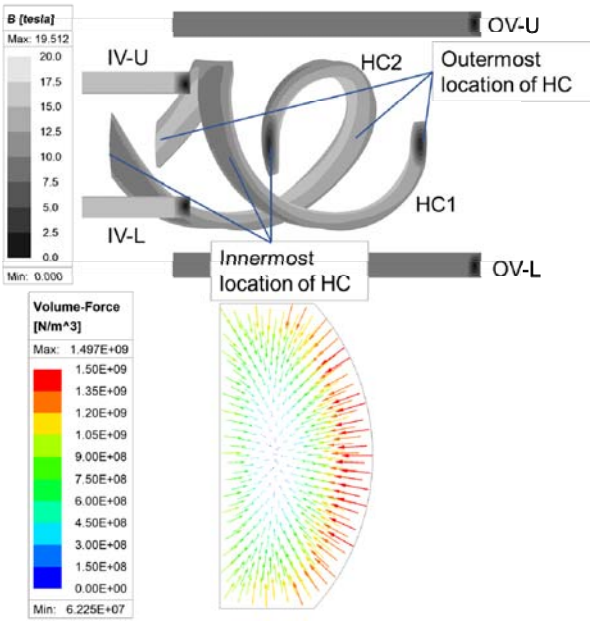


Fig.2 Magnetic field distribution on coils (upper figure) and the electromagnetic force in the cross-section of HC at the innermost location (lower figure).

参考文献

1. J. Miyazawa et al.: Nuclear Fusion 61 (2021) 126062
2. T. Goto, et al.: Plasma Fusion Res. 16 (2021) 1405085
3. H. Yamaguchi, et al.: Nuclear Fusion 61 (2021) 106004
4. H. Tamura, et al.: J. Phys.: Conf. Ser. 1559 (2020) 012108

超良好一様磁場に受動シミング調整された MRI 磁石磁場の長時間安定性と磁場変動原因

Long-term stability of passively shimmed very homogeneous magnetic field in an MRI magnet

阿部充志、佐々木憲一、萩津透、齊藤直人、三部勉、下村浩一郎(高エネ研);杉田萌(JAEA); 飯沼裕美(茨城大);
多田紘規(名古屋大); 小山駿, 田中陶冶(東京大); MuSEUM Collaboration
Mitsushi Abe, Ken-ichi Sasaki, Toru Ogitsu, Naohito Saito, Tsutomu Mibe, Koichiro Shimomura (KEK),
Moe Sugita (JAEA); Iinuma Hiromi (Ibaraki Univ.), Hiroki Tada(Nagoya Univ.); Shun Oyama, Toya Tanaka (U. of Tokyu)
E-mail: abemk@post.kek.jp

1. はじめに

J-PARC で準備中の muon 磁気能率、電気能率(g-2/EDM)と muonium 超微細構造の精密測定(MuSEUM: Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave)実験では、空間的時間的に±0.1 ppm(均一度 0.2ppm)以内に調整された超良好均一磁場領域を必要とする。永久電流通電の超電導磁石を用い、3.0T と 1.70T とし、受動(磁化鉄片利用)シミングにより空間均一度を実現し、実験室温調整により時間的変動を抑える計画である。MuSEUM 実験では再利用全身 MRI 磁石を使う。通常、MRI では 10ppm 程度の均一度 (直径 50cm 球内)である[1]が、MuSEUM 実験では 20cm 直径 30cm 長の楕円体内に、超良好均一磁場が必要である。既に、特異値分解利用で計測磁場からシム鉄片配置を算出するシミング計算[2]を適用し、この均一度が実現可能なことを示した[3,4]。今回は、長期安定性を議論する。

2. 実験方法

磁石磁場を、2 ヶ月間、永久電流通電で 1.2T を維持し、磁場分布と室温を計測した。MRI 撮像では傾斜磁場の Joule 加熱があるが、MuSEUM 実験では室温のみの影響である。MRI 磁石は EIS(External Interference Suppression)回路[5]を持つ。これは、永久電流通電時に磁石外から侵入しようとする誤差磁場抑制回路で、励磁後、シールドコイルと主コイルの回路を分離し、磁束保存効果により一定磁場に保つ。誤差磁場が侵入した場合、それぞれの素線電流が微小に異なってくる。本実験では、リセット(EIS リセット)後に計測した。

3. 試験結果

夏期の空調のない実験室で、室温変化による磁場変動を計測した。この間、下式の2つの磁場変化が観測された。

(1) 液体He注入による磁場変化、
(2) 室温変化による磁場変化。

シミング終了(均一度0.174ppm)後、長期磁場安定性試験準備で液He500l(62.5kg)を注入した。その結果、0.47～0.66μT、中心で0.57μTの磁場上昇と均一度劣化(0.26ppm)があった。極低温部(超伝導コイル)の重量下降と誘導電流が原因と考えている。磁性パテによる追加シミング、再EISリセットで、均一度0.17ppmとした。その磁場分布をFig. 1左側に示す。右側は2ヶ月後である。中心位置の磁場(B_{CEN})から0.1ppm毎の等高線で示す。打点領域では磁場>B_{CEN}である。2ヶ月後でも超良好均一度は保たれたが、室温変化による一時的な均一度劣化も有った。この様子をFig.2に示す。各位置で、磁場強度は室温に対し、線形に変化した。上側(大Y)温度係数は大きいが、上側でシム鉄片の作る磁場が強い事に関連する。

Fig. 3に磁場変化の温度係数を、シム鉄片が作る磁場との関連で示した。温度係数は鉄量の一次関数である。しかし、ブロッホ温度2/3乗則[6]の磁化変化による予想より数倍大きい。これは、温度係数の主要因が、磁化変化で無く、シム鉄と磁気計測器の室温変化による位置変動であると示している。

以上のように、超良好均一度の長期磁場安定性を調べた結果、液He重量による超伝導コイル位置変化と室温変化によるシム鉄と計測点の位置変動が主要因であると理解した。

参考文献

1. T. C. Cosmus, M. Parizh, IEEE TAS vol. 21 (2011) p.2104
2. M. Abe, et. al., IEEE TAS vol. 27, (2017) p.4400812.
3. K. Sasaki, et al., IEEE TAS vol. 32, (2022) p.9002107.
4. 阿部、他、2022 年春期、第 103 回低温工学・超電導学会研究発表会講演概要集、p.104, 2022 年 5 月.
5. ライヒエルド、他、特許第 2609295 号、1997 年 2 月 13 日。
6. C. Kittell,「固体物理学入門下」第 12 章、丸善株式会社。

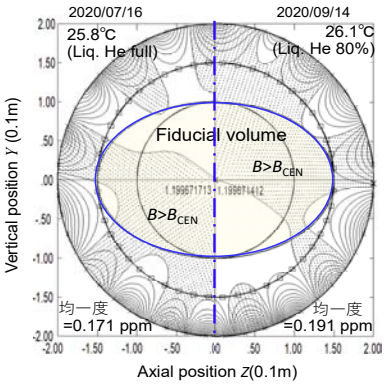


Fig. 1. Magnetic field distributions of at start (left) and end(right) of long-term magnetic field stability test.

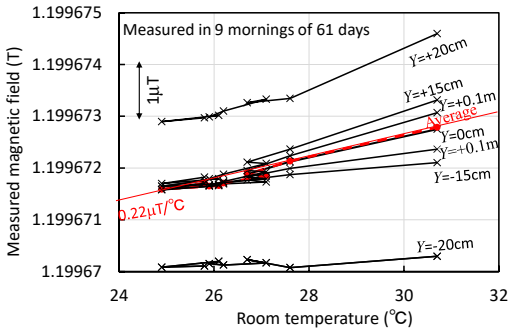


Fig. 2. Dependences of magnetic field strengths on room temperature for 8 vertical points.

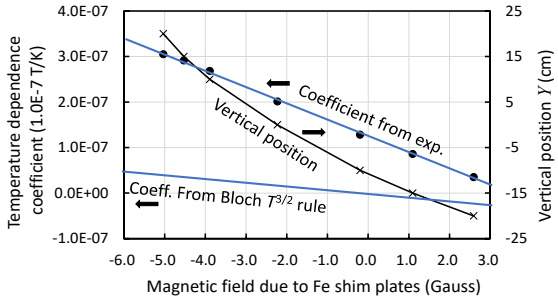


Fig. 3. Dependences of the coefficient on the shim-plate magnetic field. Coefficients are calculated at Z=0.0m through magnetic field interpolation.

消磁コイルの配置が遮蔽電流磁界消磁法に与える影響の実験的評価

Experimental evaluation of influence of shaking-coil arrangement on reduction method of screening-current-induced fields

白石 和輝, 柁川 一弘(山理大)
SHIRAISHI Kazuki, KAJIKAWA Kazuhiro (Sanyo-Onoda City Univ.)
E-mail: f122610@ed.socu.ac.jp

1. はじめに

MRI装置用の超電導マグネットは高い磁界均一度が必要であり、現在低温超電導(LTS)多芯線が用いられている。一方、高温超電導(HTS)線はテープ形状であるために幅広面内に遮蔽電流が誘起され垂直方向に大きく磁化し、それを巻いたコイルは遮蔽電流が作る磁界(遮蔽電流磁界)により磁界均一度が著しく低下する。そこで、異常横磁界効果により遮蔽電流による磁化を低減する方法が提案されている[1,2]。また、消磁用の銅コイルを同軸配置、あるいはトロイダル配置し、微小な交流磁界をHTSコイルに印加することにより、遮蔽電流磁界を低減可能なことも実証されている[1–3]。そこで、複数個のコイル群で構成されるMRI装置用超電導マグネットについても、提案する遮蔽電流磁界消磁法が適用可能であるか実験的に検証した。

2. 各種コイルおよびコイル間距離調整治具の製作

本実験ではFig. 1に示すように離れた位置で消磁コイルを励磁したとき、HTSコイルに磁気的な影響を与えることがないか観測する。そこで、各種コイルならびに位置関係を調整するための治具を製作した。各種コイルの諸元をTable 1–3に示す。治具は同軸型消磁コイルとHTSコイルの隔離距離を73～121 mm、トロイダル型消磁コイルとHTSコイルでは89～121 mmの任意の範囲で調整することができる。

3. 実験結果

製作した治具を使用して HTS コイルと消磁コイルを z 方向に一定の距離を置き、それぞれ固定した。装置全体を液体窒素中に浸漬冷却し、消磁コイルのみを励磁した直後の HTS コイルの中心磁界を極低温用ホール素子で計測した。結果の一例を Fig. 2 に示すが、89, 105, 121 mm の隔離距離で、トロイダル型消磁コイルに交流電流(30 A, 100 Hz, 10 s)を複数回印加したとき、HTS コイルが磁化することはなかった。

4. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号20K12671)の支援により実施したものである。

参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 125005
2. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 22 (2012) 4400404
3. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 4400504

Table 1 Specifications of inner/outer coaxial shaking coils.

Diameter of copper wire	1 mm
Number of layers	2
Inner diameters	80.0/150.0 mm
Outer diameters	84.0/154.2 mm
Height	47.0 mm
Number of turns	86 turns
Average field applied to HTS coil	39 mT/30 A

Table 2 Specifications of toroidal shaking coil.

Diameter of copper wire	1 mm
Number of layers	3
Number of turns	657 turns
Average field applied to HTS coil	70 mT/30 A

Table 3 Specifications of HTS coil.

Tape width (bare)	4.02 mm
Tape thickness (bare)	0.13 mm
Thickness of SC layer	2 μm
Tape critical current (77 K, s.f.)	234 A
Full penetration field	36.6 mT
Inner diameter of coil	104.0 mm
Outer diameter of coil	112.3 mm
Height of coil	17.3 mm
Number of turns	84 turns

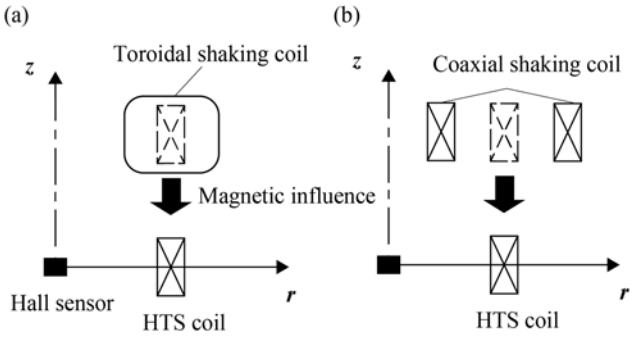


Fig. 1 Experimental evaluation of magnetic influence for (a) toroidal shaking coil and (b) coaxial shaking coil.

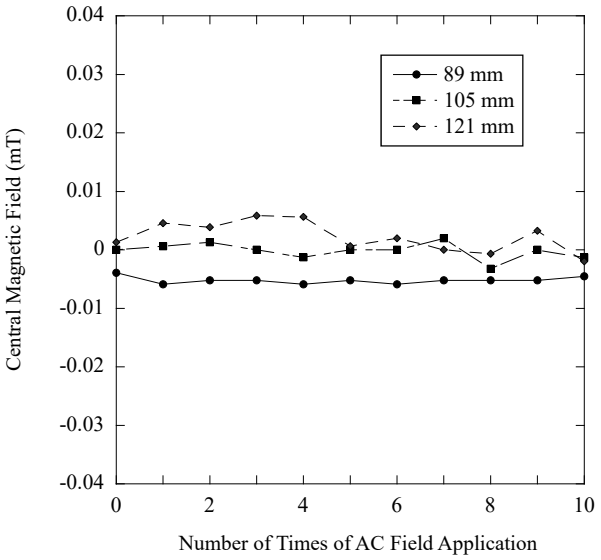


Fig. 2 Experimental results of change of central magnetic field just after AC magnetic field is applied to HTS coil far from toroidal shaking coil.

HTS バルク体を用いた磁気誘導型ドラッグデリバリーシステムに適した磁場分布の形成方法

A suitable magnetic field source composed of HTS coil and HTS bulk for Magnetic Drug Delivery System

野島 渉平, 長崎 陽, 津田 理

NOJIMA Shohei, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: shohei.nojima.q2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

磁気誘導型ドラッグデリバリーシステム(MDDS)は、安全かつ有効的ながん治療法として期待されている. 先行研究では, MDDS の磁場発生装置として超電導バルク磁石を用いることで, 磁性粒子の血管長手方向の誘導に必要な磁気力が得られることが示されている[1]。しかし、超電導バルク磁石を用いると、磁性薬剤を誘導するために必要となる血管長手方向の磁気力に対する超電導バルク磁石方向(血管表面と垂直方向)の磁気力が大きくなり、その結果, 血管内表面の摩擦力が大きくなるため磁性薬剤の誘導が困難になる。そこで, 本研究では, HTS コイルと HTS バルク体を利用して, 体内深部において血管内表面の摩擦力よりも血管長手方向の磁気力を大きくできる磁場源の構成方法について検討した.

2. 解析方法

磁性薬剤に働く血管内表面の摩擦力を低減し, 血管長手方向の磁気力を増加させるには, 薬剤がある場所の血管長手方向の磁束密度勾配を大きくし, 血管表面と垂直方向の磁束密度勾配を小さくする必要があるが, このような磁場分布を単一の磁場源で作るのは難しい. そこで, 本研究では, HTS コイル(以下, コイル)とゼロ磁場冷却した HTS バルク体(以下, バルク体)で磁場源を構成し, バルク体の磁気遮蔽効果を利用して, MDDS に適した磁場分布を形成することを試みた. 今回検討した磁場源の構成と諸元を Fig. 1, Table 1 に示す. 解析には 3 次元有限要素法(H 法)を用いた. まず, Model A, B, C の比較により, 円柱状バルク体の個数が薬剤に働く磁気力に及ぼす影響を検討した. 本解析では, 薬剤をコイルの中心軸近傍長さ 10mm の空間に集めることを想定し, $(x,z)=(5\mathrm{mm},50\mathrm{mm})$において薬剤に働く磁気力$F_{\mathrm{mx}}\left(\propto B\cdot\frac{\partial B}{\partial x}\right)-\mu F_{mz}\left(\propto B\cdot\frac{\partial B}{\partial z}\right)$を計算した. 次に, Model B において, バルク体間の距離が薬剤に働く磁気力に及ぼす影響を検討するために, 中心軸から円柱状バルク体までの距離を変化させ, $(x,z)=(5\mathrm{mm},50\mathrm{mm})$において薬剤に働く磁気力を計算した. また, バルク体の形状が薬剤に働く磁気力に及ぼす影響を検討するために, Model D において, 中心軸から四角柱状バルク体までの距離を変化させ, $(x,z)=(5\mathrm{mm},50\mathrm{mm})$において薬剤に働く磁気力を計算し, Model B の結果と比較した.

3. 解析結果及び考察

Table 2 に Model A, B, C における薬剤に働く磁気力を示す. Model A では, コイルの中心軸近傍に薬剤を集めることができなかった. これは, Model A では, 遮蔽電流が主にバルク体外周部に流れ, 中心軸近傍には流れていないためと考えられる. また, Model B の場合のみ, 血管長手方向の磁気力F_{mx}が血管内表面の摩擦力μF_{mz}を上回ることがわかった. これは, バルク体の遮蔽電流磁場によって$\left|\frac{\partial B}{\partial z}\right|$が小さくなったためと考えられる. 以上の結果より, F_{mz}と密接に関係する$\frac{\partial B}{\partial z}$は, 薬剤を集めたい領域とバルク体内部に流れる遮蔽電流領域の相対位置に依存することがわかった. そこで, Model B において, 中心軸からバルク体までの距離を変化させた時に薬剤に働く磁気力を検討した. その結果を Table 3 に示す. Table 3 より, バルク体の境界(遮蔽電流領域)が薬剤を集める領域の真下近傍にくるようにバルク体を配置することで, 薬剤に働く血管長手方向の磁気力を大きくできることがわかった. また, Model D において, 中心軸からバルク体までの距離を変化させた時の薬剤に働く磁気力を Table 4 に示す. Table 3, 4 より, 四角柱状のバルク体を隙間を空けずに配置すると, 中心軸近傍を流れる遮蔽電流磁場が打ち消されるため, 四角柱状のバルク体を用いる時は円柱状バルク体を用いる時よりもバルク体間の隙間を空ける必要があることがわかった.

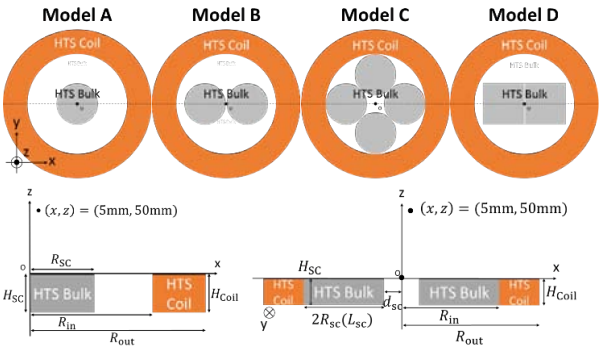


Fig. 1 Schematic illustrations of magnetic field sources.

Table 1. Specifications of HTS bulk and HTS coil.

Model	A	B	C	D	Bulk magnet
Radius of HTS bulk R_{sc} [mm]	60			-	60
Height of HTS bulk H_{sc} [mm]	20				
Length of a side of HTS bulk L_{sc} [mm]	-			120	-
Distance from HTS bulk to z-axis d_{sc} [mm]	-	0	$60(\sqrt{2}-1)$	0~10	-
Inner radius of HTS coil R_{in} [mm]	$60(1+\sqrt{2})$				
Outer radius of HTS coil R_{out} [mm]	$80+30\sqrt{2}$				
Friction coefficient of blood vessel μ	0.1[2]				

Table 2. Magnetic force in Model A, B, and C.

	B [T]	$\frac{\partial B}{\partial x}$ [T/m]	$\frac{\partial B}{\partial z}$ [T/m]	$F_{\mathrm{mx}}-\mu F_{\mathrm{mz}}$ [T^2/m]
Model A	0.414	0.501	2.120	0.120
Model B	**0.436**	**-0.290**	**-0.548**	**-0.103**
Model C	0.518	-0.522	-7.247	0.105
Bulk magnet	0.202	-0.230	-5.674	0.068

Table 3. Magnetic force in Model B as a function of d_{sc}.

d_{sc} [mm]	B [T]	$\frac{\partial B}{\partial x}$ [T/m]	$\frac{\partial B}{\partial z}$ [T/m]	$F_{\mathrm{mx}}-\mu F_{\mathrm{mz}}$ [T^2/m]
0	0.436	-0.290	-0.548	-0.103
5	**0.481**	**-0.454**	**-2.202**	**-0.113**
10	0.515	-0.526	-3.349	-0.098

Table 4. Magnetic force in Model D as a function of d_{sc}.

d_{sc} [mm]	B [T]	$\frac{\partial B}{\partial x}$ [T/m]	$\frac{\partial B}{\partial z}$ [T/m]	$F_{\mathrm{mx}}-\mu F_{\mathrm{mz}}$ [T^2/m]
0	**0.351**	**-0.114**	**0.933**	**-0.007**
5	0.425	-0.417	-1.605	-0.109
10	0.473	-0.554	-3.183	-0.111

参考文献

1. Shigehiro Nishijima et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, NO. 2 (2008) pp.874-877
2. Kazuto Takashima et al. : Tribology International, Vol 40 (2007) pp.319-328

変動磁場用 MgB_2 線材の基礎検討(2) —無添加 MgB_2 の臨界電流密度—

Basic study of MgB_2 wire for variable magnetic field (2)
– Critical current density on non-doped MgB_2 –

田中 秀樹, 児玉 一宗, 鈴木 孝明, 小瀧 博司(日立), 松本 明善, 西島 元(NIMS)
TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki, KOTAKI Hiroshi (Hitachi),
MATSUMOTO Akiyoshi, NISHIJIMA Gen(NIMS)
E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

MgB_2 線材を低交流損失化したうえで, モータや発電機など変動磁場機器で用いることが検討されている。変動磁場用 MgB_2 線材の基礎特性として, 前報では炭素添加した変動磁場用 MgB_2 線材の J_c 特性を示した[1]。交流磁場を発生する MgB_2 コイルの使用条件は, 温度は液体水素を意識した 20K, 磁束密度は 2T 以下での検討が多く, 20K, 2T 以下の条件下では無添加 MgB_2 のほうが一般的には J_c が高い。そこで本報告では, 無添加 MgB_2 からなる変動磁場用 MgB_2 線材の臨界電流密度特性について報告する。

2. 実験方法

Fig.1 に線径 0.31mm の 51 芯 MgB_2 線材の断面写真を示す。断面の基本構成は炭素添加 MgB_2 を用いた前報[1]と同一であり, MgB_2 フィラメントを包むバリア材に Nb を, フィラメント間の母材に Cu-10%Ni を, 全体を包むシースに Monel を用いた。J_c のフィラメント径依存性を把握するために, 線径 1.03～0.31mm で試作・評価した。フィラメント形状は様々であるが, その形状を円形とみなし, フィラメントの総面積と本数からフィラメント径(d_f)を換算すると, 線径 1.03～0.31mm に対しそれぞれ約 48～14μm と得られた。ツイストピッチは最短で 3.2mm である。600℃にて熱処理した線材に対し Transport J_c を四端子法で, Magnetic J_c を SQUID で測定した。

3. 結果

Fig.2 に Transport J_c のフィラメント径依存性を示す。各フィラメント径におけるサンプル数は 2 本ずつであり, ツイストは施していない。炭素添加線材と同様にフィラメント径の縮小化により J_c が低下する傾向が得られ, 特に d_f < 20μm での J_c 低下が顕著であった。

Fig.3 に線径 0.31mm, d_f=14μm における, J_c のツイストピッチ(L_p)依存性を示す。縦軸はツイストなしサンプルの J_c で規格化した値であり, 各 L_p でのサンプル数は 2 本ずつである。L_p=3.2mm においても大きな J_c の低下はなかったが全体的に J_c のバラつきが大きく, 特に L_p 約 6mm のサンプルでは J_c が 7~8 割まで低下したサンプルが存在した。

Fig.4 に線径 0.61mm, d_f = 28μm のサンプルから得た Transport J_c と Magnetic J_c, さらに d_f～300μm の単芯・無添加 MgB_2 フィラメントのみから得た Magnetic J_c[2]の 10-20K での比較を示す。d_f=28μm と 300μm における Magnetic J_c を比較すると, 外部磁場に重畳されるフィラメント磁化の影響で, d_f = 28μm の J_c が外部磁場が低下するにつれて上回っているが, 高磁場側では良く一致している。

J_c の熱処理時間依存性や, 炭素添加線材との比較などは, 当日報告する予定である。

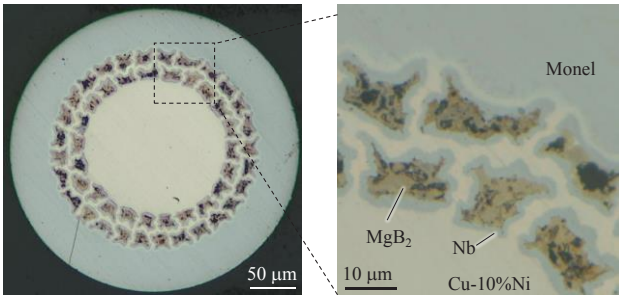


Fig.1 Cross-sections of 0.31 mm 51-filaments MgB_2 wire.

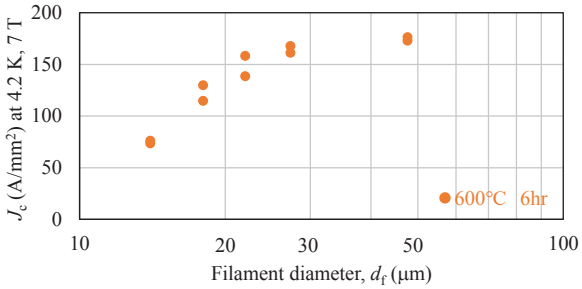


Fig.2 Filament diameter dependence on transport J_c.

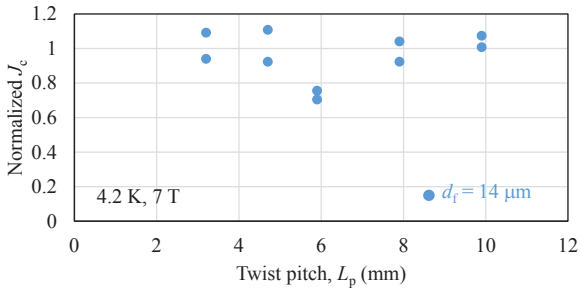


Fig.3 Twist pitch dependence on transport J_c.

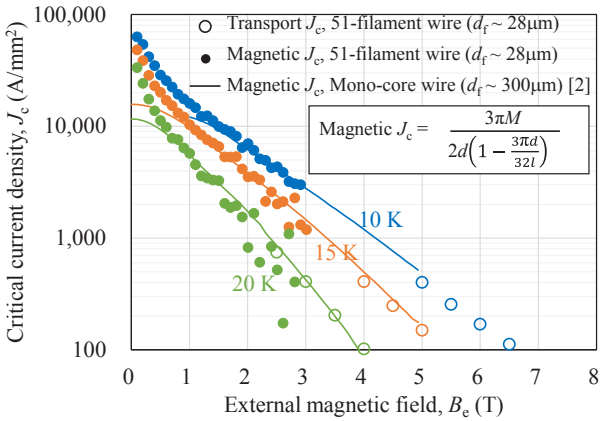


Fig.4 $J_c - B - T$ comparison on magnetic J_c and transport J_c.

参考文献

1. H Tanaka, et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.103 (2022) p.61
2. M Kodama, et al.:Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 044006

超極細 MgB_2 超伝導線材及びケーブルの開発

Development of the ultra-fine MgB_2 superconducting wires and cables

菊池 章弘, 飯嶋 安男, 熊倉 浩明(NIMS); 山本 優, 河野 雅俊, 大坪 正人(明興双葉)
KIKUCHI Akihiro, IIJIMA Yasuo, KUMAKURA Hiroaki (NIMS);
YAMAMOTO Masaru, KAWANO Masatoshi, OTSUBO Masato (Meiko Futaba, Co., Ltd.)
E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

多くの化合物系超伝導体は、合金系よりも臨界温度(T_c)や上部臨界磁場(H_{c2})は高い。しかし、合金系超伝導体のような展延性は乏しいために、線材化は容易ではない。コイル化も巻き線した後に熱処理を行う Wind & React 法が一般的に適用されている。一方、React & Wind 法は経済面でも性能面でも有利な点が多く、React & Wind 法の適用が有望な新しい超極細の化合物系超伝導線及びそれらを集合化したケーブルの研究開発を進めている。長年、極細多芯構造ではあるが、超伝導フィラメントと母材が一体化したモノリス構造の線材開発が世界的に行われてきた。超伝導フィラメントの縮径は、交流損失の低下とともに線材にかかるひずみの低減にも貢献する。しかし、超伝導フィラメントと線材母材が一体化している場合、ひずみ量は線材中央の中立軸からの距離に支配されるが、もし、超伝導フィラメントが母材に拘束されず自由度をもったなら、ひずみ量は個別の超伝導フィラメントごとに中立軸が変わって格段に小さくなることが期待できる。即ち、本研究では、極細超伝導フィラメントが線材マトリックスの拘束から解き放たれた革新的にフレキシブルな化合物系超伝導線材の創出を目指している。

先にジェリーロール法 Nb_3Al 線において、髪の毛より細い外径が 30 ミクロンの極細線の試作に成功し、超極細化合物超伝導線の製造が可能であることを示した。さらにそれら超極細 Nb_3Al 線材を集合化した撚線も試作し、熱処理後もある程度の曲げ変形を付与しても特性劣化がないことも確認できた。続いて、ブロンズ法 Nb_3Sn 線材においても同様な超極細化に取り組んだところ、外径 50 ミクロンの極細線を約 7, 000 m まで無断線で加工でき、さらに、一部の線材を用いて外径 33 ミクロンまでの極細化を進めたところ、約 1,000 m の単一条長を得ることができた。超極細伸線加工に対しても、ブロンズ法線材の優れた量産性が確認された。ブロンズ法線材の超伝導フィラメント径は、ジェリーロール法 Nb_3Al 線材よりも一桁小さくなるため、熱処理後の柔軟性はさらに優れている。

今回、超極細化合物超伝導線の第三弾として、Powder-In-Tube(PIT)法による MgB_2 線材の極細化に挑戦した。

2. 実験方法

マグネシウム(Mg)粉末とボロン(B)粉末を混合して金属管に充填する、所謂、In-situ PIT 法により MgB_2 超伝導線材の作製に取り組んだ。Mg 粉末は純度が 99.8%で-325 メッシュの市販品、B 粉末はアモルファスでナノサイズの市販品を使用した。外皮の金属管には無酸素銅などを用い、その内側には純ニオブの拡散バリアを設けた。粉末の充填作業は不活性ガスで満たされたグローブボックス内で実施した。伸線加工は、これまでの Nb_3Al や Nb_3Sn の超極細伸線加工で蓄積した各種の加工パラメータを参考にした。伸線加工は物質・材料研究機構の設備を利用して行うとともに、明興双葉(株)田富工場の量産設備も利用して行った。作製した線材は素線の状態で超伝導特性や組織を評価した。その他、極細線を集合化した撚線を作製し、同様に超伝導特性と組織観察を実施した。

3. 実験結果

複数回の断線が発生したが、まずは外径 50 ミクロンの MgB_2 極細線の試作に成功した。伸線加工途中の種々の外径における線材断面を確認したところ、縮径が進んでも断面デザインはほぼ同じ比率で相似形に加工されていることがわかった。外径 50 ミクロンの MgB_2 極細線の構成は、粉末充填部の直径が約 20 ミクロンで、銅比(銅部/比銅部)は約 1.0 であった。充填粉末を詳しく観察してみると、数十ミクロン径の Mg 粉末が、伸線加工の進行とともに割れて細かくなっていく様子が認められた。一方、アモルファス B 粉末は当初よりサブミクロン径と微細であり、Mg 粉末を包み込む(くい込む)ように存在していた。さらにこれらの外径 50 ミクロンの MgB_2 極細線を使用して、49 本を集合化した撚線も試作した。Fig.1 は、試作した 49 本撚線の断面写真である。この撚線を、650℃で 30 分～1 時間の熱処理を行った。Fig. 1 に示すように、撚線を構成するすべての素線の中心には MgB_2 化合物のコアが確実に存在しているが、Fig. 2 の写真のようにまるでやわらかい帯紐のようなハンドリングであった。先述のように先行して Nb_3Al や Nb_3Sn でも 50 ミクロン径の素線を 49 本集合化した撚線を作製しているが、それらの熱処理後のハンドリング性とは別格で、想像を上回るフレキシブルさであった。張力を維持していないと真っ直ぐの状態に撚り線を保つことが難しいほど柔軟であった。さらに驚くべきことに、ある程度、素手で自在に曲げたり戻したりしても、輸送臨界電流には大きな劣化がなかった。

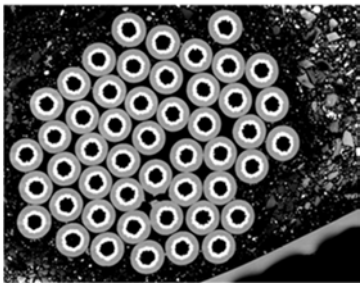


Fig. 1 SEM image of a transverse cross-section of 0.05mm 49 strands MgB_2 round cable.

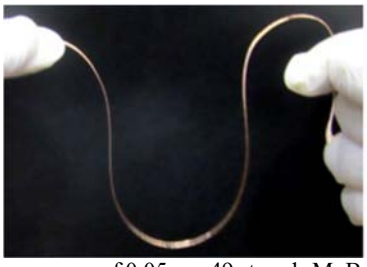


Fig. 2 The appearance of 0.05mm 49 strands MgB_2 round cable after heat treatment.

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)として実施された。

超極細 MgB_2 超伝導線材を用いて作製した 49 本撚線の超伝導特性

Superconducting properties of 49-stranded cables fabricated with ultra-fine MgB_2 superconducting wires

熊倉浩明(物材機構), 飯嶋 安男(物材機構), 山本 優(明興双葉), 河野 雅俊(明興双葉), 菊池 章弘(物材機構)

KUMAKURA Hiroaki, IIJIMA Yasuo(NIMS); YAMAMOTO Masaru, KAWANO Masatoshi(Meiko Futaba, Co., Ltd); KIKUCHI Akihiro(NIMS)

E-Mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

現在、MgB_2 超電導線材を作製する最も一般的な方法は、原料混合粉末を金属管に充填して線材に加工する Powder-in-tube(PIT)法であるが、線材径はその多くが 0.6-1.0mm 程度である。線材径がこれらよりも大幅に小さくなると、曲げ歪に対する耐性が大きく改善されて取り扱いが簡単になり、応用範囲が広がるだけでなく、また交流損失の大きな部分を占めるヒステリシス損失が大幅に低減されて交流応用に大きく道が開けるようになると期待される。最近本論文の著者らは、PIT 法を適用して径が数十マイクロメートルの MgB_2 細線を作製することに成功し、これらの細線を用いて 49 芯の撚り線材を試作することにも成功した。本論文では、これらの 49 芯 MgB_2 撚り線材について、臨界電流の長手方向の均一性などの超伝導特性について報告する。

2. 実験方法

PIT 法による Φ0.6 のモネルシース(Nb バリア材)単芯線材を、Φ0.05、Φ0.033 ならびに Φ0.022 の細線に加工し、これらの細線 49 本を用いてそれぞれ撚り線材を作製した。Φ0.05 細線を用いた 2m 長の撚り線材を 650°C で 30 分の熱処理を行った後、I_c 測定用に 40mm の短尺試料を 48 本サンプリングした。一方、Φ0.033 と Φ0.022 の細線を用いた撚り線材においては、それぞれ 10m 長の撚り線材を熱処理したのちに 60 本の短尺試料を等間隔でサンプリングした。I_c 測定は超伝導マグネットを用いて 4.2K において種々の磁界中で行った。I_c 分布の測定は、4T(Φ0.05 の撚線)または 2T（Φ0.033 と Φ0.022 の撚り線）の磁界中で行った。I_c は 1μV/cm のクライテリオンで定義した。

3. 結果と考察

最初、撚り線材はそのまま両端を I_c 測定プローブの電流端子にハンダ付けしたところ、*I-V* カーブにおいて微小な電圧が発生した。この原因として、撚り線の中心部分に存在している細線にまでハンダが廻っていかず、これらの細線には外側の細線との接触によって電流が供給されるためであると考えられた。そこで、撚り線の両端部をほぐして細線をバラバラにして十分にハンダが廻るようにしたところ、微小な電圧は観測されなくなった。

いずれの撚り線も 4.2K, 8T で 10^4A/cm^2 程度の J_c を示し、この値はこれまでに発表者らが作製してきた標準的な無添加の PIT 法 MgB_2 線材の J_c 値にほぼ等しい。Fig.1(a), (b), (c)にそれぞれ Φ0.05、Φ0.033 ならびに Φ0.022 の細線を用いて作製した撚り線材の I_c の分布を示す。これまで報告者らが作製してきた PIT 法 MgB_2 線材の I_c 値のバラツキに比べて小さなバラツキを示し、I_c の均一性に優れることが判った。素線自体のバラツキはもう少し大きいと考えられるが、いずれも 49 本の細線からなる集合導体であり、撚り線材を構成する各細線のバラツキが均されている効果もあると思われる。

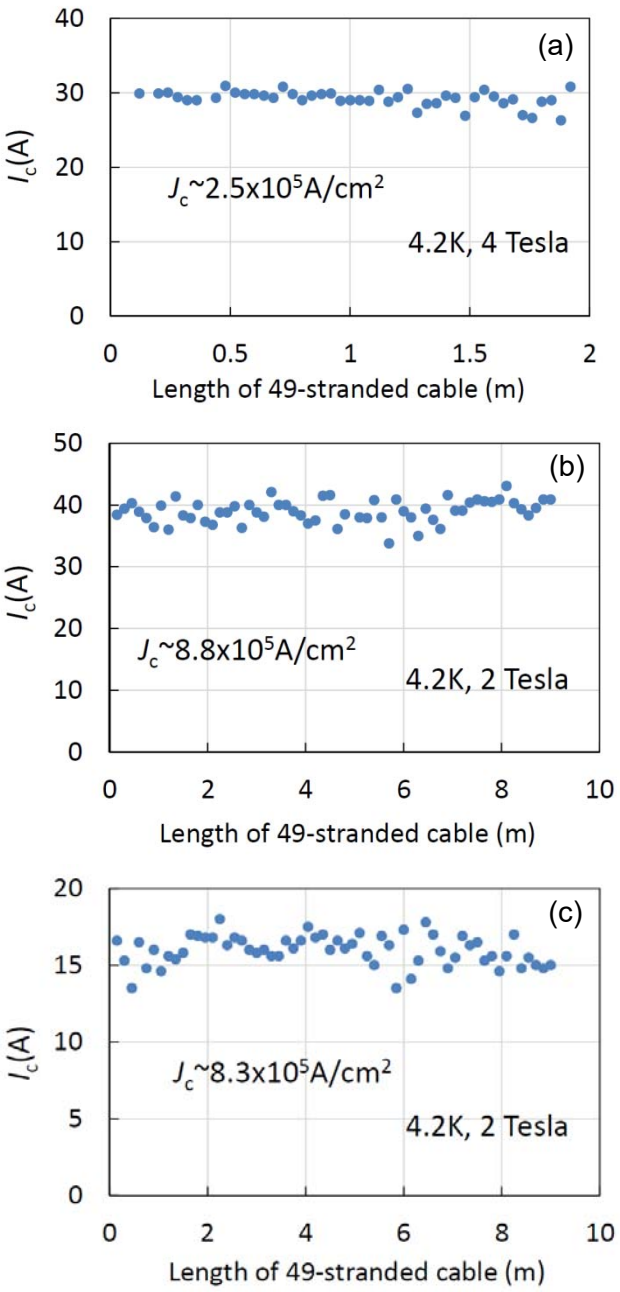


Fig.1 I_c distribution of 49-strand cables fabricated with PIT mono-filamentary MgB_2 wires having (a)0.05mm, (b)0.033mm and (c)0.022mm diameter.

謝辞: 本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14004)として実施された。

異種超伝導ハイブリッド MgB_2 線材の開発

Development of the hybrid MgB_2 wire with different types of superconductors

大橋 克也, 松岡 杏祐, 小黒 英俊(東海大); 淡路 智(東北大)
OHASHI Katsuya, MATSUOKA Kyosuke, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: 1CAJM009@mail.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 は、臨界温度 T_c が 39 K[1]であり、基礎・応用にわたり多くの研究がなされている。MgB_2 線材の利点は、T_c が高いことの他に、(1)高温酸化物超伝導体のような結晶粒の向きを揃えること(配向化)が不要、(2)資源的に豊富であるために原料が比較的安価、(3)Mg と B という原料のため軽量などが挙げられる。しかし丸線の場合、上部臨界磁場 B_{c2} が低いことから、強磁場中での臨界電流密度 J_c が低いのが現状である[2]。これは、磁場中 J_c の向上により、使用用途が広がる可能性を示している。

ところで、$YBa_2Cu_3O_y$(YBCO、Y:RE または希土類元素)は、B_{c2} が非常に高く、磁場中での Jc 特性が優れていることが知られている。しかし、結晶構造の制約から結晶軸を配向する必要があり、薄膜型に作製することで大電流通電が可能にしている。これに対して、YBCO 丸線材は、開発が望まれているが、YBCO を配向させる手段が無いため、作製が困難な状況にある。[3]

そこで、YBCO のマイスナー効果を利用することで、MgB_2 線材の B_{c2} を上げることが可能だと考えた。本研究は、MgB_2 線材の特性向上、及び新しい線材作製コンセプトの提案を目的として、MgB_2 と YBCO の 2 種類の超伝導体を利用したハイブリッド MgB_2 線材の開発を行った。

2. 実験方法

MgB_2 線材は、Ex-Situ Powder-in-Tube 法により作製した。Ar ガス雰囲気下のグローブボックス中で MgH_2 粉末(富士フィルム製)と amorphous B 粉末(Pavezyum 製)のモル比が 1:2 になるように秤量、混合し油圧プレス機で直径 25 mm、厚さ約 10 mm のペレット状に成形した。その後、真空雰囲気下で 630℃×10 h の熱処理を行い、MgB_2 を作製した。この MgB_2 を、グローブボックス内で粉砕し、粉末状態にして直径 5 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 50 mm の Nb 管に詰めた。その後、直径が 3.5 mm 以下になるまで溝ロール圧延機による圧延加工を行った後、長さ 40 mm に切断した。

YBCO 粉末の作製方法を示す。Y_2O_3(和光純薬、99.99 %)、$BaCO_3$(和光純薬、99.9 %)、CuO(和光純薬、95.0%)をモル比が Y:Ba:Cu=1:2:3 になるように大気中で秤量し、混合した後、900℃×4 h の仮焼き、930℃×24 h の本焼きを経て、YBCO を作製した。その後、大気中で粉砕し、粉末状態にした。

圧延加工後の MgB_2 ビレットに YBCO 粉末を付着させるためにアピエゾングリスを塗布し、回転させながら YBCO 粉末を振りかけた。その後、外径 5 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 50 mm の Ag 管に詰め、外径 3.0 mm まで圧延加工をした。その後、真空雰囲気下で 630℃×10 h の熱処理を行った。最後に、線材の両端を剥ぐことで Nb 管を剥き出しにした。Fig. 1 に作製した線材断面の模式図を示した。

作製したハイブリッド MgB_2 線材に対して、冷凍機冷却クライオスタットを用いて 4 端子法による電気抵抗測定を行った。さらに、東北大学金属材料研究所強磁場センターの 15 T 及び 18 T 超伝導マグネットを用いて 4.2 K での臨界電流 I_c 測定を行った。

3. 実験結果および考察

4 端子法によるハイブリッド MgB_2 線材の電気抵抗の温度依存性の測定結果より、T_c が 25 K であることが分かった。T_c が低い原因として、(1)不純物の混入(2)熱処理条件などが考えられる。これらの確認のため、線材内部の微細組織観察を準備中である。また、最外層の Ag に電流端子を付けて同様の測定を行った際には、超伝導は現れなかった。これは、YBCO 層に全く電流が流れていないことを示している。

Fig. 2 に 4.2 K、18 T 以下における I_c の磁場依存性を示す。2 つの試料は、同じ製法で作製した別バッチの試料である。2 つのハイブリッド MgB_2 線材の I_c は、磁場の値を上げても大きな劣化が見られなかった。Fig. 2 中には、同時に測定した通常の MgB_2 線材の結果を示しているが、通常の MgB_2 線材の I_c の変化とハイブリッド線材の I_c は、全く異なる振る舞いを示していることが明らかである。

4. まとめ

MgB_2 と YBCO の 2 種類の超伝導体を利用したハイブリッド MgB_2 線材の開発を行った。T_c は 25 K と低いが、通常の MgB_2 線材の I_c とは全く異なり、磁場中で I_c が劣化しない振る舞いを示した。そのため今後は、線材内部の微細組織観察などを行い、現象を解明していく。

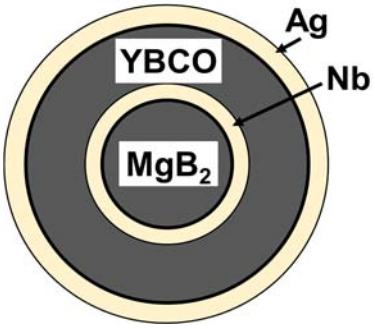


Fig. 1 Schematic drawing of hybrid MgB_2 wire structure.

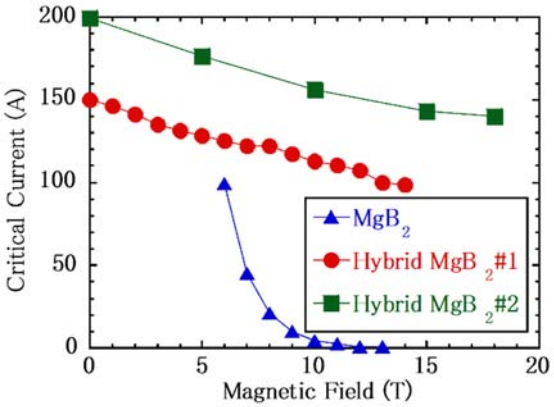


Fig. 2 Critical current as a function of magnetic field for hybrid MgB_2 wires and MgB_2 wire at 18 T.

謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの課題(202112-HMKGE-0041)の一部として行われた。本研究の一部は、東海大学高度物性評価施設及び、核融合科学研究所一般共同研究(研究コード NIFS22KIEA023)の支援を受け、実施したものである。

参考文献

1. J. Nagamatsu et al., Nature, Vol. 410 (2001) p. 63
2. 下山淳一、低温工学、Vol. 56(2021)301
3. Z. Zhang et al., Christ. Eng. Comm., Vol. 21 (2019) 1369

B 過剰 MgB_2 を原料とした MgB_2 多結晶体の合成

Synthesis of MgB_2 polycrystalline bulks starting from B-rich MgB_2 powder

関口 直希, 岩崎 響, 元木 貴則, 下山 淳一（青学大）
SEKIGUCHI Naoki, IWASAKI Hibiki, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail: c5622071@aoyama.jp

1. 緒言

MgB_2 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粒間の結合に優れているなどの長所を持つ。このため、冷凍機冷却による医療用 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、MgB_2 超伝導体は、他の実用超伝導体と比較して上部臨界磁場 H_{c2} と不可逆磁場 H_{irr} が低く、かつ臨界電流密度 J_c が磁場中で急激に低下してしまうことから、応用可能な磁場が制限されている。その改善指針の一つとして、ピンニングセンターである粒界の高密度化が挙げられる。一般に、粒界の高密度化を実現するためには、粒径の小さい B 原料を用いることが有効[1]であるが、高純度の B 原料は粒径が小さいほど著しく高価になり量産化に適していない。また、高純度化、高密度化も J_c の改善に重要な指針であり、これには MgB_2 と B の混合粉末に Mg を拡散させて反応させる Premix-PICT 拡散法[2]が有効な手法である。以上の背景から、本研究では MgB_2 多結晶体の高 J_c 化を目的として、結晶粒径の小さい MgB_2 結晶を含む前駆体粉末の作製、およびこれを用いた Premix-PICT 拡散法による MgB_2 多結晶体の合成を行った。本研究独自の戦略は、MgB_2 の結晶成長を阻害する B 過剰の仕込組成より前駆体粉末(MgB_2 + B 混合粉末)を作製したことである。さらに、高密度化のための高圧プレスおよび反応性をさらに高めるためにロール圧延を Premix-PICT 拡散法の熱処理前の工程に追加した。

2. 実験方法

前駆体粉末は *in-situ* 法により合成した。Mg(#100)と B(フルウチ化学製、粒径 48 μm)を Mg : B = 1 : 2.5 のモル比で混合し、SUS316 管に充填後、石英封管内で 850°C, 3 h の焼成を行った。本研究で用いた B は、高 J_c 材料作製に用いられることが多い B(Pavezyum 製、粒径 250 nm)と比べて安価である。MgB_2 多結晶体の合成は、前駆体粉末が含む未反応 B に対して Mg を拡散させ MgB_2 とする Premix-PICT 拡散法で行った。具体的には、一端をプレスした SUS316 管に Mg(#100)、$MgB_{2.5}$ 粉末、そして Mg(粒径 1 mm)の順に充填し、もう一端をプレスして封じた後、~2 GPa の高圧一軸プレスとロール圧延を施した。高圧一軸プレス後の SUS316 管込みの試料厚さ d_r は~1.03 mm であり、ロール圧延により、試料厚さ d_r を最も薄い試料で~0.85 mm まで加工した。また、熱処理は石英封管内、800°C で 2-24 h 行った。微細組織観察は SEM 観察、電気抵抗率は交流四端子法、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_c は磁化ヒステリシスの幅から拡張 Bean モデルを用いて算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に *in-situ* 法、850°C, 3 h の焼成で得られた定比組成 Mg : B = 1 : 2 および Mg : B = 1 : 2.5 の B 過剰組成から作製したバルク試料の破断面の二次電子像を示す。B 過剰組成から作製した MgB_2 結晶は定比組成より作製した MgB_2 結晶より明らかに微細であることが確認できた。Fig. 2 に 800°C, 3 h の熱処理により Premix-PICT 拡散法で Mg を拡散させた試料の 20 K における J_c – H 特性を示す。高圧一軸プレス後にロール圧延を施すことで圧延を施していない試料と比較して、J_c が高くなった。これは、反応前の段階で緻密になることで反応性が向上したためと考えている。また、ロール圧延を d_r ~0.85 mm まで行った試料は低磁場下で 1 $MAcm^{-2}$ を超える非常に高い J_c を示した。本方法の特徴は 800°C, 3 h という非常に短い Mg の拡散により緻密な MgB_2 バルクが得られることで、反応温度を下げられれば線材開発にも適していることである。発表では、仕込組成、熱処理条件と粒径、超伝導特性の関係について報告する。

参考文献

[1] Y. Katsura *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **43** (2006) 119-122.
[2] I. Iwayama *et al.*, *Physica C* **460-462** (2007) 581-582.

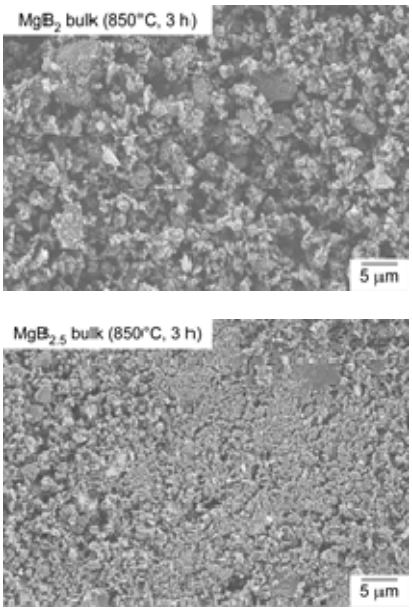


Fig. 1 Secondary electron images of fractured surfaces of MgB_2 and precursor (MgB_2+ 0.5 B) bulks prepared by *in-situ* method (850°C, 3 h).

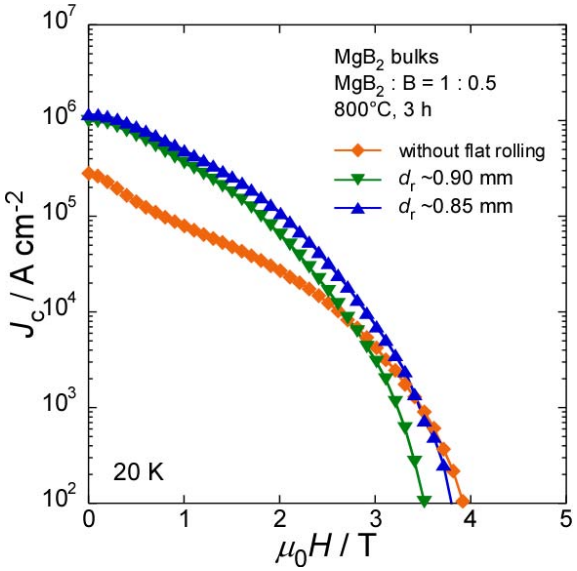


Fig. 2 J_c – H curves at 20 K of MgB_2 bulks prepared by Premix-PICT-Diffusion method using B-rich precursor.

高強度 Bi2223 線材間超伝導接合における I_c と微細組織の関係

Relationship between microstructure and I_c in superconducting joint connecting reinforced Bi2223 tapes.

中井 優亨, 稲葉 勇人, 山口 章(青学大); 武田 泰明, 内田 公, 北口 仁(NIMS); 小林 賢介 (理研);
中島 隆芳, 山出 哲(住友電工); 元木 貴則, 下山 淳一(青学大)

NAKAI Ukyo, INABA Hayato, YAMAGUCHI Sho (Aoyama Gakuin Univ.);
TAKEDA Yasuaki, UCHIDA Akira, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); KOBAYASHI Kensuke (RIKEN);
NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (SEI, Ltd); MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail: c5621057@aoyama.jp

1. はじめに

Ag シース $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$[Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO® [1])は優れた臨界電流特性と量産性から、20 T 超の高磁場発生装置を含め様々な超伝導磁石に応用されている[2]。一方、JST 未来社会創造事業では、LTS, Bi2223, RE123 の各線材を直列に接合した永久電流 1.3 GHz(30.5 T) NMR 磁石の開発が進められており、Bi2223 線材間の実用的な手法での超伝導接合技術の確立が必須となっている[3]。これまで、我々は高強度 Bi2223 線材(DI-BSCCO® Type HT-NX)間においても Bi2223 中間層厚膜を介した超伝導接合で高い I_c が達成できることを報告してきた[4]。本研究では接合部の微細組織及び接合中間層厚膜の磁化特性と 77 K, 4.2 K での接合 I_c の関係について調べており、接合 I_c の決定因子、制限因子の考察を含めて報告する。

2. 実験方法

DI-BSCCO® Type HT-NX 線材[121 芯, ~ 4.5 mm^w × ~0.25 mm^t , I_c (77 K, self-field) > 170 A]間の超伝導接合試料を作製した。先行研究[5]と同様の方法で補強材料(Ni 合金テープおよび、線材上に残った Sn を含む半田)を除去した後、線材の先端部を 0.4°の傾斜台に固定して研磨することによりフィラメントを露出させた面に、スラリー(Bi2223 仮焼粉末、Bi2223 単相粉末とエタノール、ブタノールを混合して調製)を塗布した。溶媒の揮発後、拝み合わせ型形状に組み合わせた接合部を Ag 箔で包んだ。一軸プレス後、3 % O_2/Ar 気流中、825-830°C で一次焼成を行い、中間一軸プレス後に 3 % O_2/Ar 気流中で二次焼成することにより接合試料を得た。一軸プレス圧力は線材の部分的な破断を抑えるため従来[5]の 200 MPa より低い 130-150 MPa とした。接合試料の通電特性は 77 K および 4.2 K で調べた。試料の微細組織は SEM により観察し、中間層厚膜の超伝導特性は SQUID 磁束計を用いプレス面に垂直に印加した磁場下における磁化測定により評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 に接合試料の 77 K における *I-V* 特性を示す。一次焼成後の試料は中間層の Bi2223 結晶の成長によりポーラスな組織となることから低い接合 I_c を示したが、中間一軸プレスと二次焼成を行った後の試料では接合 I_c が大幅に向上した。Fig. 2 に一次焼成後と二次焼成後の接合中間層の破断面二次電子像を示す。中間一軸プレスと二次焼成を行った中間層は緻密な組織となっており、130 MPa の中間一軸プレスでも高密度な中間層が形成できることがわかった。当日は、4.2 K、磁場中における通電特性と閉ループ試料を用いて調べた接合抵抗[6]についても報告する。

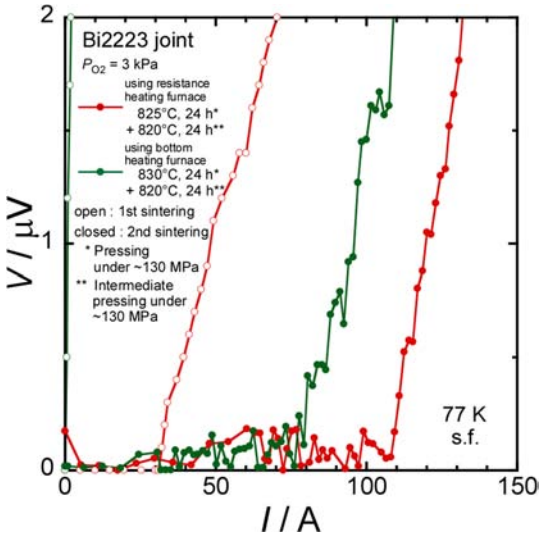


Fig. 1 *I-V* curves at 77 K in self-field of superconducting joint samples connecting reinforced Bi2223 tapes after first sintering and after second sintering through intermediate uniaxial pressing.

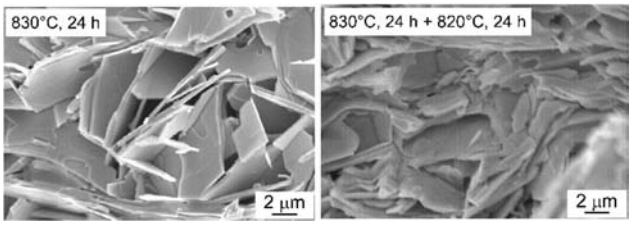


Fig. 2 Secondary electron images of fractured surfaces of Bi2223 intermediate layer after first sintering and second sintering through intermediate uniaxial pressing.

謝辞

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

参考文献

1. N. Ayai *et al.*, *J.Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112
2. T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713-718.
3. H. Maeda *et al.*, *IEEE TAS* **29** (2019) 4602490
4. U. Nakai *et al.*, *Abstract of CSSJ Conf.* **102** (2021) 47.
5. Y. Takeda *et al.*, *IEEE TAS* **32** (2022) 4301005
6. K. Kobayashi et al., IEEE TAS 30 (2020) 9000204

高強度 Bi2223 線材間超伝導接合の熱処理過程の最適化

Optimization of the heat treatment process for superconducting joints between the high-strength Bi2223 tapes

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

中島 隆芳, 山出 哲(住友電工)；元木 貴則, 下山 淳一(青学大)

INABA Hayato, (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (NIMS), NAKAI Ukyo, YAMAGUCHI Sho (Aoyama Gakuin Univ.); NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (SEI, Ltd); MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5622057@aoyama.jp

1. はじめに

Ag シース $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$[Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO®[1])は高い臨界電流特性と優れた量産性からこれを用いた超伝導磁石応用が進められている[2]。我々は、Bi2223 多結晶中間層の導入により、DI-BSCCO® Type H 線材間の超伝導接合を開発し、実用的な接合臨界電流を実現した[3]。一方、JST 未来社会創造事業では、高温超伝導線材を用いた永久電流 1.3GHz(30.5 T)超高磁場 NMR の設計、開発が進められており、超伝導磁石には Nb 系線材、REBCO 線材と高強度 Bi2223 線材(DI-BSCCO® Type HT-NX)が用いられる[4]。この Bi2223 線材は両面に補強 Ni 合金テープが Sn を含むはんだで接着されており、Sn と Ag が合金化しやすく、接合形成工程を見直す必要があったが中間厚膜層の金属組成比の最適化を経て 77 K での接合 I_c を~ 100 A に改善できた[5]。本研究では接合技術の実用化に向けて、Type HT-NX 線材間の接合形成の熱処理過程の最適化を行い、短時間焼成で再現性良く 77 K で 70 A 以上の接合 I_c を示す接合作製工程の確立を目指した。

2. 実験方法

DI-BSCCO® Type HT-NX 線材間の接合作製では、まず温風と電気化学反応を用いて補強合金テープとはんだを除去した。その後、浅い角度(~ 0.4°)で傾斜研磨し超伝導フィラメントを露出させ、その上にスラリーを滴下した。スラリーはエタノールとブタノールの混合溶媒に、Bi2223 前駆体粉末とあらかじめ作製した Bi2223 粉末を混ぜたものである。中間厚膜層に用いる前駆体粉末には標準組成と, *AE*-Cu-rich の粉末を用いた。拝み合わせ形状の長さ~2 cm の接合部を持つ約 10 cm 長の短尺線材間の接合試料を作製した。これまでの開発では一次焼成、二次焼成とも焼成時間を 24 h としていたが、本研究では 825 - 830°C、P_{O2} = 3 kPa 下で 3 - 12 h の一次焼成を行い、150 MPa で一軸プレス後、820°C、P_{O2} = 3 kPa 下で 6 h の二次焼成を行った。試料の微細組織観察は SEM により、厚膜部の構成相は XRD により評価した。接合 I_c は液体窒素浸漬下で直流四端子法により調べた。

3. 結果と考察

Fig. 1 に 825°C、12 h の一次焼成を行った試料から取り出した中間厚膜層の粉末 XRD パターンを示す。全ての試料において Bi2223 単相であることが確認できた。Fig. 2 に二次焼成後の接合試料の *I-V* 特性を示す。焼成時間を短縮しても接合 I_c ~ 50 A の超伝導接合が形成できることがわかった。接合 I_c は目標値より低いが、一次焼成時の中間厚膜層の結晶成長速度を促すことで改善できると考えており、Bi2223 前駆体粉末の含有量の異なるスラリーを使用や、さらなる熱処理過程の最適化を進めている。

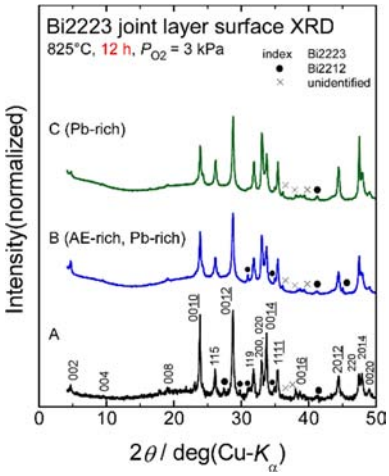


Fig. 1 Powder XRD patterns of intermediate thick film layers after first sintering at 825°C for 12 h in P_{O2} = 3 kPa.

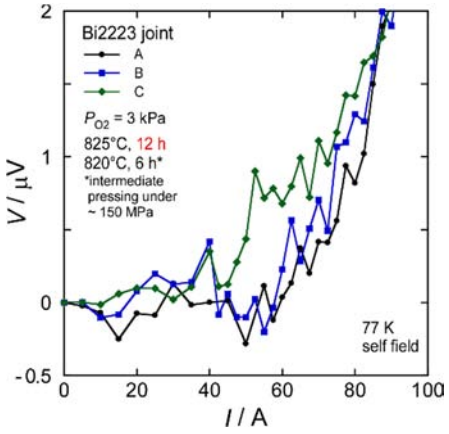


Fig. 2 *I-V* curves at 77 K in self-field for superconducting joints between Bi2223 tapes sintered for 12 h + 6 h with intermediate uniaxial pressing.

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJNI17A2 の支援を受けたものである。

参考文献

1. N. Ayai *et al., J.Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112
2. T. Nakashima *et al., Cryogenics* **52** (2012) 713-718.
3. Y. Takeda *et al., Appl. Phys. Express* **12** (2019) 023003
4. H. Maeda *et al., IEEE TAS* **29** (2019) 46024
5. H. Inaba *et al*., *Abstract of CSSJ Conf.* **103** (2022) 35.

冷凍機による Bi2223 線材間の接合の臨界電流と臨界温度の測定

Measurements of critical current and critical temperature for joint between Bi2223 wires by using a cryocooler

金沢 新哲, 関根 ちひろ(室工大)
KANAZAWA Shintetsu, SEKINE Chihiro (MIT)
E-mail: shintetsu_kanazawa@muroran-it.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 線材間の低抵抗接合は、高磁場 NMR と MRI などの装置に重要な研究課題である。我々は線材間に媒体を利用せずに、Bi2223 相を Bi2212 相と液体に分解溶融して接合する方法を提案し、界面において Bi2223-Bi2212-Bi2223 の構造を持つ超伝導接合が得られた[1]。臨界電流の測定は、これまで 77 K で行っていたが、接合界面に臨界温度が Bi2223 より低い Bi2212 が存在することを考慮すると、60K 以下での測定評価が必要ではないかと考えた。このような実験評価が重要であるかを調べるために、冷凍機とクライオスタットなどを用いた測定システムを整備し、60K 以下で接合体の臨界電流の測定を行ったので報告する。

2. 実験

接合で用いた線材は、住友電工㈱製の Bi2223 テープ線(DI-BSCCO Type HT-NX)である。臨界電流は 77 K で 160 A 程度である。接合方法は分解溶融法を用いて、表1で示した熱処理を実施した。サンプルは接合部が1つのみと、2連の2種を作製した[2]。Fig. 1 に2連サンプルの概略図を示す。

Fig. 2 は、接合サンプルの電流電圧特性の測定に利用した GM 冷凍機の写真である。測定方法は、まずサンプルを冷却ステージに十分に接触して固定し、冷却過程で 100 mA の電流を流しながら臨界温度を測定した。3 時間後、十分に冷却してから臨界電流を測定した。

表1 Bi2223 線材間の接合サンプルの作製条件と臨界電流

接合サンプル名	サンプル1	サンプル2
接合箇所	1	2
作製時間(h)	2	4
最高温度(℃)	865	865
保持時間(min)	5	5
77 K での臨界電流	30	50
4.2 K での臨界電流	—	255
冷凍機による 45 K での臨界電流	50	104

3. 実験結果とまとめ

表 1 に液体窒素と液体ヘリウムおよび冷凍機(45 K)を利用して測定した接合サンプルの臨界電流を示した。77 K では、2連のサンプル2がサンプル1より臨界電流が2倍まで向上されていないが、45 K では2倍に向上されていることが測定された。さらに、サンプル2について臨界電流の温度依存性を調べた結果、Fig. 3 に示したように、60 K 附近から大きな上昇がみられた。このようなことから、分解溶融法による接合は界面で Bi2212 がつながっていることを考慮すべく、60 K 以下での測定評価が重要であることがわかった。臨界温度などの測定結果については、当日に発表する予定である。

謝辞

本研究は 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」(JPMJMI17A2)の助成を受けた。

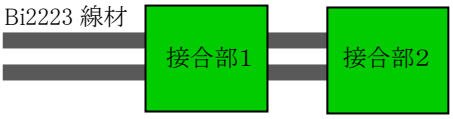


Fig. 1 Schematic of two-junction sample.



Fig. 2 GM cooling system for measurement of I-V property.

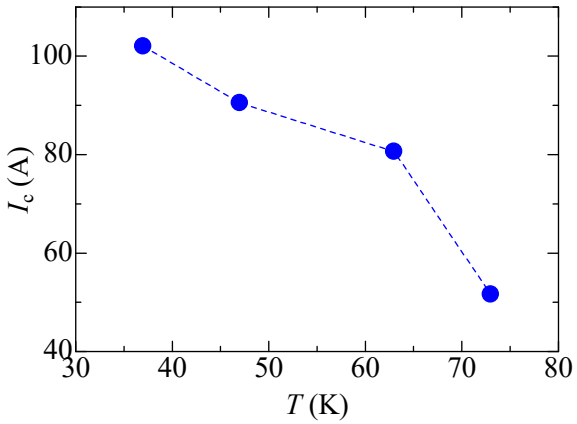


Fig. 3 Temperature dependence of critical current for sample 2 in self-magnetic field.

参考文献

[1] Xinzhe Jin, et al., Supercond. Sci. Technol. **32** (2019) 035011
[2] Shintetsu Kanazawa, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31** (2021) 7000104

キャリア・ピン制御による RE123 超伝導線材の高臨界電流密度化

Effect of combination of thermodynamic and pinning optimization route on J_c for RE123 coated conductor

三浦 正志 (成蹊大, JST-FOREST)；黒川 穂高 (横浜国大)；關谷 尚人(山梨大)；加藤 康之, 鍋島 冬樹, 前田 京剛(東大)；岡田 達典, 淡路 智(東北大)； CIVALE Leonardo, MAIOROV Boris(ロスアラモス国立研究所)

MIURA Masashi (Seikei Uni., JST-FOREST), KUROKAWA Hodaka (Yokohama Natio.Uni.); SEKIYA Naoto (Yamanashi Uni.); KATO Yasuyuki, NABESHIMA Fuyuki, MAEDA Atsutaka (Tokyo Uni.); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Uni.); CIVALE Leonardo, MAIOROV Boris (LANL)

E-mail: masashi-m@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

$YBa_2Cu_3O_y$(Y123)超伝導線材は、他の超伝導材料に比べて幅広い温度範囲で、高い臨界電流密度(J_c)を示すため、マグネット応用が期待されている。これらに応用するためには、磁場下で高い J_c が必要である。これまでの研究より、①超伝導体内に侵入する量子化磁束の運動を抑制する磁束ピン止め点(非超伝導)粒子の導入が Y123 線材の J_c 向上に有効であることが知られている[1-4]。また、②キャリア密度が高いほど多くの超伝導体の J_c が高くなる傾向があった[5]。飛躍的な J_c 向上には、①と②の融合による新しい材料設計指針が必要である。しかし、従来の Y123 薄膜線材を作製する方法では、磁束ピン止め点としてコヒーレント（異相との界面の結晶格子が連続)な $BaMO_3$(BMO)ナノロッドなどを導入するため、超伝導相の結晶性が低下し、ひずみが加わることによりキャリア密度が低下する課題があった[4, 6]。そのため、①と②を融合することが難しく、①と②をそれぞれ独立に制御し、特性向上を試みているため J_c は頭打ちとなっていた。

本研究では、Trifluoroacetates Metal Deposition (TFA-MOD)法を用いて、$(Y,Gd)Ba_2Cu_3O_y$ ((Y,Gd)123)超伝導層に対してインコヒーレント(界面の結晶格子が不連続)に $BaHfO_3$(BHO)ナノ粒子を導入し、最適キャリア導入処理を施し、①と②を融合による J_c 向上を目指す(**図 1** 参照)。

2. 実験方法

本研究では、TFA-MOD 法を用い金属基板上に添加量 12 mol%の BHO 導入した(Y,Gd)123 線材を作製した。比較のために、(Y,Gd)123 線材も作製した。本焼後の膜厚は、0.5 [μm]である。超伝導線材の結晶性、表面観察及び超伝導特性を X 線回折法、高解像度光学顕微鏡及び四端子法をそれぞれ用いて評価した。

3. 実験結果

本研究では、独自薄膜作製法(特許第 5270176 号)を応用して、インコヒーレント BHO 粒子を(Y,Gd)123 層の結晶性や格子定数にほぼ影響なく、高密度(80×10^{21} 個/m^3)かつナノサイズで導入することに成功した。さらに酸素雰囲気下熱処理を制御することで BHO 導入(Y,Gd)123 線材の CuO チェーンに高密度酸素を注入し、これまで難しかった磁束ピン止め点導入 Y123 線材へのオーバードープを実現した。これにより、キャリア制御した(Y,Gd)123+BHO 線材は、77 K で自己磁場 J_c=9.5 MA/cm^2 および 4.2 K で自己磁場 J_c=130 MA/cm^2 を達成した[7, 8]。**図 2** に示すように、この J_c はすべての材料の中でも最も高い世界最高の特性であることが分かる。さらに 4.2K において 18 T($\mu_0H\|c$)まで J_c を評価した結果、すべての超伝導線材の中で最も高い磁場中特性を示すことが分かった[7, 8]。

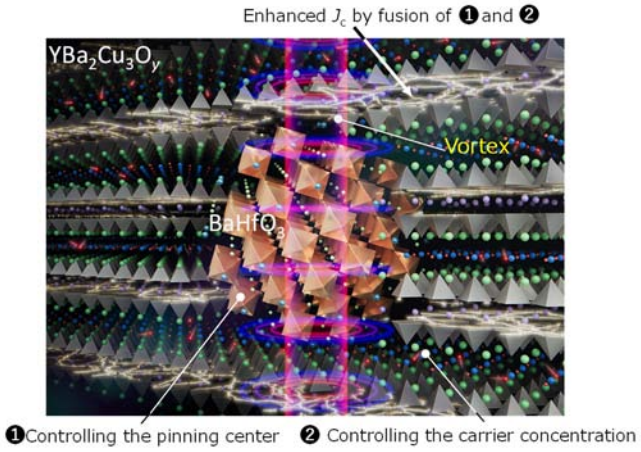


Fig.1 A concept of new advanced materials design for high J_c.

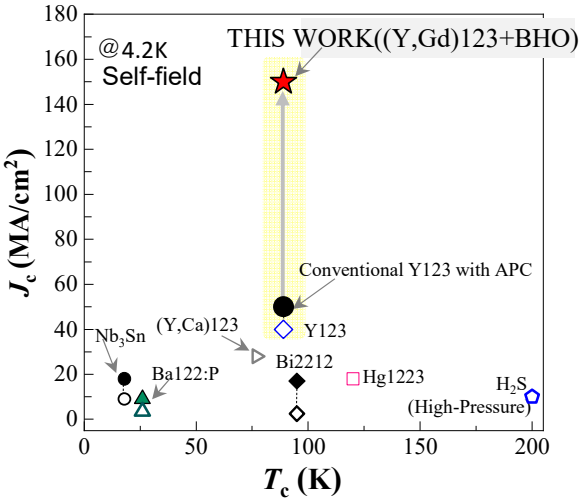


Fig.2 J_c for various superconducting materials.

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 研究課題 JPMJFR202G「新材料設計指針により対破壊電流密度に挑む (研究代表者：三浦正志)」、JSPS 科研費基盤研究(B) 20H02184の支援を受けて行われました。

参考文献

1. T. Haugan et al., *Nature* **430** (2004) 867-870.
2. M. Miura, et al., *Appl. Phys. Express,* **1** (2008) 051701.
3. M. Miura, et al., *Phys. Rev. B* **83** (2011) 184519.
4. M. Miura et al., *NPG Asia Materials* **9** (2017) e447.
5. N.M. Strickland et al., *SUST* **17** (2004) S473.
6. T. Horide et al., *ACS Nano* 11 (2017) 1780−1788.
7. M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.
8. JST Press Rerease 2022.10.24. (https://www.jst.go.jp/pr/)

O^{2+}イオン照射した RTR-PLD 法$(Eu,Er)Ba_2Cu_3O_y$+$BaHfO_3$線材の磁場中臨界電流密度特性

In-field J_c properties for O^{2+} ion irradiated RTR-PLD $(Eu,Er)Ba_2Cu_3O_y$+$BaHfO_3$ CCs

鈴木匠, 大木元勇貴(成蹊大);尾崎壽紀(関西学院大);衣斐顕, 和泉輝郎(産総研);
岡田達典, 淡路智(東北大金研);三浦正志(成蹊大, JST-FOREST)
SUZUKI Takumi, OGIMOTO Yuki (Seikei Univ.); OZAKI Toshinori (Kwansei Univ.); IBI Akira, IZUMI Terio (AIST);
OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (IMR, Tohoku Univ.); MIURA Masashi (Seikei Univ., JST-FOREST)
E-mail: t-suzuki@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_y$(REBCO:REは希土類元素)線材は、その優れた磁場中臨界電流密度特性(J_c)から MRI や航空機などへの応用が期待されている。しかし、実用のためには更に高い磁場中 J_c が必要となる。磁場中 J_c 向上のために、$BaMO_3$(BMO:M は Hf, Zr など)の磁束ピンニング点の導入により磁場中 J_c が向上することが報告されている[1]。また、イオン照射による磁束ピンニング点の導入も行われており、イオン照射のエネルギーやイオンの種類により欠陥の形状や密度を制御することができる。最近では、Metal Organic Decomposition (MOD)法で$REBa_2Cu_3O_y$薄膜に酸素イオン照射する事により J_c 特性が向上する事が報告されている[2]。

本研究では、Reel-to-Reel Pulse Laser Deposition (RTR-PLD) 法で $BaHfO_3$(BHO) ナノロッドを導入した $(Eu,Er)Ba_2Cu_3O_y$ ((Eu,Er)BCO+BHO) 線材[3]の更なる磁場中 J_c 特性向上を目的に、O^{2+}イオン照射により更なる欠陥導入を試み、それらが超伝導特性に及ぼす影響について検討する。

2. 実験方法

RTR-PLD 法により作製した(Eu,Er)BCO 線材に 3vol.%の BHO ナノロッドを導入した(Eu,Er)BCO+BHO 線材を用いた。イオン照射の条件は、O^{2+}イオンを用いてイオン照射エネルギー(2MeV)を一定として、イオン照射量を 1×10^{13} – 5×10^{13} ion/cm^2 と変化させた。結晶性を XRD、微細構造を透過型電子顕微鏡により評価した。超伝導特性は 4 端子法を用いた通電法で測定した。

3. 実験結果

Fig. 1 にイオン照射量の異なる(Eu,Er)BCO+BHO 線材における結晶性、超伝導特性を示す。ここで示すイオン照射(Eu,Er)BCO+BHO 線材は、イオン照射後に最適な酸素アニール処理を施し、キャリア濃度を制御したものである。(a),(b)よりイオン照射により c 軸配向性($\Delta\omega$)及び面内配向性($\Delta\phi$)は、低下したことが分かる。 (c),(d)より最適な酸素アニールを施したにもかかわらず、臨界温度 $T_{c,onset}$ や $T_{c,zero}$ はイオン照射量が多いほど低下していることが分かる。自己磁場 J_c(77K)も、(e)に示すようにイオン照射量の増加に伴い低下する。一方、磁場中 J_c 特性(65K, $B\|c$)は、(f)に示すように 1×10^{13} ion/cm^3 照射した(Eu,Er)BCO+BHO 線材が最も高い磁場中 J_c 特性を示すことが分かった。この磁場中特性向上は、BHO ナノロッドに加えてイオン照射により形成された新たな欠陥が更なる有効なピンニングセンターとして働いたためと考えられる。

当日は、詳細な微細構造観察結果や磁場中特性についても報告する。

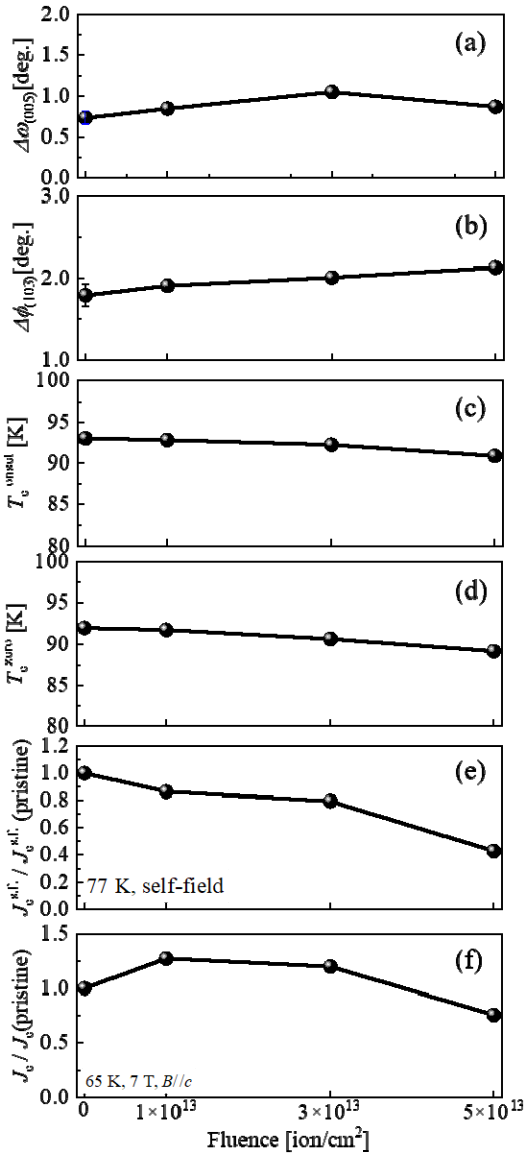


Fig. 1 O^{2+} ion irradiation fluence dependence of (a) $\Delta\omega$, (b) $\Delta\phi$, (c) $T_{c,onset}$, (d) $T_{c,zero}$, (e) $J_c^{s.f.}/J_c^{s.f.}$(pristine) at 77 K, (f) J_c/J_c(pristine) at 65 K, 7 T$\|c$ for irradiated (Eu,Er)BCO+BHO CCs.

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202G、JSPS 科研費(18KK0414 及び 20H02184)の助成を受け実施したものである。また、産総研における研究は、NEDO の助成を受け実施したものである。

参考文献

1. J.L. MacManus-Driscoll et al., Nature Mat. 3 (2004) 439.
2. S. Eley *et al*., SuST **30** (2017) 015010.
3. A. Ibi, A. *et al.*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 756 (2020) 012024.

フッ素フリーMOD 法 Y123 薄膜への様々なタイプのピンニングセンター導入

Introduction of pinning centers with various types to Y123 thin films prepared by fluorine-free MOD method

小澤 美弥子, 元木 貴則, 大崎 瑛介, 坂井 秀成, 堀口 佳吾,下山 淳一（青学大）
KOZAWA Miyako, MOTOKI Takanori, OSAKI Eisuke,
SAKAI Syusei, HORIGUCHI Keigo, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail: c5621052@aoyama.jp

1. はじめに

RE123 薄膜の作製方法の一つであるフッ素フリーMOD 法は、均質で平坦な表面を有する薄膜が短時間で得られ[1]、常圧下の簡便な焼成装置のみで作製することができるため、低コストでの高い量産性が期待でき、工業化に有望な手法である。しかし、他の手法に比べて RE123 薄膜の結晶性が高いため、有効なピンニングセンターが少なく、磁場中 J_c が低いという課題がある。これまで我々は、原料溶液への Cl 添加により RE123 と高い格子整合性を有する $Ba_2Cu_3O_4Cl_2$ (Ba2342) 微結晶が RE123 より先に成長するため、2 軸配向薄膜生成条件が拡大するとともに、Cl と不純物金属 Zr, Hf, Sn を共添加することで臨界電流特性が大きく改善することを報告してきた[2]。また RE123 のバルクや単結晶では不純物金属 Fe, Co, Ni, Zn, Ga などを添加すると Cu サイトに置換し弱超伝導領域が生成し、特に実効置換量が 1%以下の場合には希薄ドープ効果により点欠陥的ピンとなり J_c が向上することが示されている[3,4]。以上の背景のもと、本研究ではフッ素フリーMOD 法 Y123 薄膜の臨界電流特性の改善を目的とし、金属組成を精密に調整した自作溶液を用いて、不純物金属(M = Ga, Ni, Zr)の添加および共添加の効果を系統的に調べた。

2. 実験方法

Y, Ba, Cu, Mを所定のモル比になるように混合した有機金属塩を有機溶媒に溶かし、減圧蒸留後、残った乾固物を再度溶解し、微量の HCl を添加することで M 添加 Y123 原料溶液を作製した。これを $SrTiO_3$(100)単結晶基板上にスピンコート法により塗布した後、仮焼を行った。この塗布と仮焼を 3 回繰り返し、最終膜厚が約 300 nm になるように制御した後、様々な焼成温度で本焼成を行い、酸素アニールにより酸素量を制御することで、M 添加 Y123 薄膜を作製した。得られた試料について、XRD による相同定、光学顕微鏡による微細組織観察を行い、磁化特性は SQUID 磁束計により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に様々な温度で焼成した Ga 添加 Y123 薄膜の Ga 添加量と J_c(40 K, ~4 T)の関係を示す。760 - 820°C 焼成では 0.5%程度の微量 Ga 添加試料において最も高い J_cを示した。Fig. 2 に様々な焼成温度で作製した Ni 添加試料の Ni 添加量と J_c(40 K, ~4 T)の関係を示す。ほとんどの焼成条件において Ga 添加試料よりもさらに微量である 0.05 - 0.2%程度の超微量 Ni 添加において J_c が向上することがわかった。Fig. 3 に Zr(3%), Ni(0 - 1%)を共添加した試料の 40 K における J_cの磁場依存性を示す。Zr, Ni 共添加試料は Ni のみを添加した試料より明らかに高い J_c を示した。さらに、0.05 - 0.2%の超微量 Ni 共添加により Zr のみの添加試料より J_cが向上することがわかった。この結果は Ni 置換による点欠陥的なピンと $BaZrO_3$ 析出物によるピンの効果が足されたものと考えられる、講演では Fe および Zn 添加 Y123 薄膜の臨界電流特性も報告する。

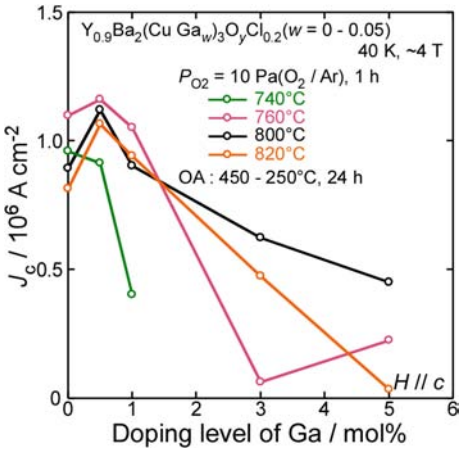


Fig. 1. Relationship between J_c (40 K, ~4 T) and Ga doping level for Y123 films sintered at various temperatures.

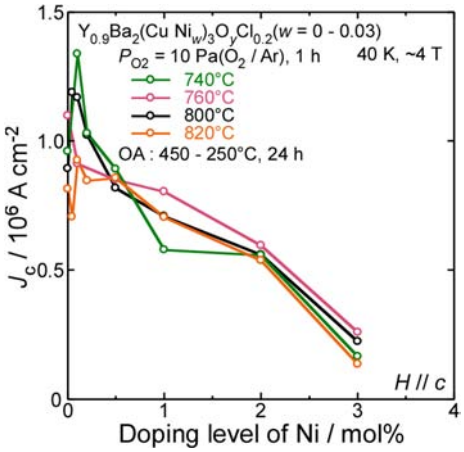


Fig. 2. Relationship between J_c (40 K, ~4 T) and Ni doping level for Y123 films sintered at various temperatures.

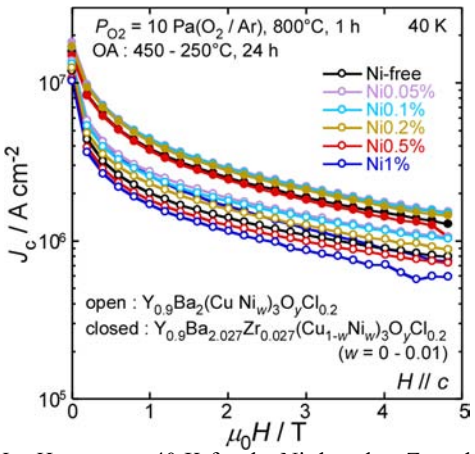


Fig. 3. J_c –H curves at 40 K for the Ni doped or Zr and Ni co-doped Y123 films with various doping levels.

参考文献

[1] Y. Ishiwata *et al., IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804
[2] T. Motoki *et al., Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 095017
[3] G. Krabbes *et al., Physica C* **330** (2000) 181-190.
[4] Y. Ishii *et al., Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 202513

CuO 二重鎖面を持つ RE 系超伝導体の材料ポテンシャル

Material potential of RE-based superconductors having CuO double-chain

下山 淳一、松下 哲哉、新津 遥都、齋藤 晶文、元木 貴則（青学大）

SHIMOYAMA Jun-ichi , MATSUSHITA Tetsuya, NIITSU Haruto, SAITO Akifumi, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに　RE123[$REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$]の研究例に対して、CuO 二重鎖面を持つ RE247[$RE_2Ba_4Cu_7O_{15-\delta}$] や RE124 [$REBa_2Cu_4O_8$]のそれは非常に少なく、主因としてこれらの相の生成に一般に高圧酸素雰囲気が必要であることが挙げられる。RE247 や Ca ドープ RE124 の T_c は RE123 とほぼ同等であり、T_c の点だけを見れば材料ポテンシャルの差は小さいが、高圧酸素雰囲気下での合成のため Ba サイトへの RE 固溶が起こりやすく、これが完全に解消できればより優れた超伝導特性が現れる可能性がある。また、最近の我々の研究より CuO 二重鎖面に類した構造が、含水蒸気雰囲気中酸素アニール[1]や Ag コート後の拡散アニール[2]によって Y123 エピタキシャル薄膜内に生成すること、特に前者の場合では適当な濃度の積層欠陥導入によって低磁場の臨界電流特性が改善することが明らかになった。しかし、これらの例では CuO 二重鎖面に類した構造となった領域の超伝導が著しく劣化することを示唆する結果が得られている。一方、CuO_2 面ではなく CuO 二重鎖面が超伝導を誘起する Pr247 では、磁化特性評価から極めて大きな電気的磁気的異方性を有する可能性が高いことを前回報告した[3]。このように、CuO 二重鎖面は構造が柔軟で、RE247 や RE124 では少なくとも金属的な伝導を示す面であり、Pr247 では超伝導を担い、後熱処理した薄膜では超伝導を阻害するなど物性に様々な影響を及ぼす。本研究では RE247 の持つ材料ポテンシャルの解明を目指して Y247 の高品質な焼結体の合成を試みているが、CuO 二重鎖面の柔軟性と Y の Ba サイトへの固溶や、おそらく CuO 二重鎖面の積層の乱れによって、超伝導特性が劇的に変化することがわかってきた。

2. 実験　Y247 焼結体は Y123 と CuO を 1:0.5 のモル比で混合、仮焼したペレットを石英封管内、950~960°C で焼成することにより作製した。得られた焼結体試料に対して様々な還元条件でポストアニールを、続いて酸素アニールを行った。また、Y123＋0.25CuO から出発した試料、あらかじめ作製した Y247 と Y123 を 1:1 のモル比で混合した焼結体試料も石英封管内での同様な熱処理により作製した。試料の構成相は粉末 X 線回折測定、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定によって評価した。

3. 結果と考察　Fig. 1 は 2 種の Y247 焼結体、Y123＋0.25CuO から出発した主相が Y123 の焼結体、Y247:Y123 =1:1 の混合粉末から出発した Y247 と Y123 両相を含む焼結体の ZFC 磁化の温度依存性である。Y247(sample A)は 80 K 級の超伝導体であるのに対し、これを 700°C、真空石英封管中でアニール後、再度酸素アニールした sample B は Y247 相を維持したまま 60 K 級の超伝導体に変化した。一方、Y247 と Y123 の中間組成に相当する 2 試料では超伝導が著しく劣化した。Fig. 2 には 2 種の Y247 焼結体の磁化ヒステリシス曲線の幅 ΔM の磁場依存性を示した。sample A では低磁場で第二ピークが現れ、sample B で

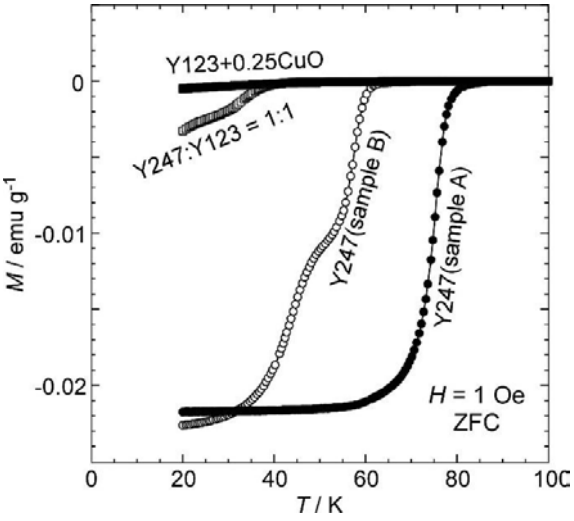


Fig. 1　ZFC magnetization curves of sintered bulks of Y247 (sample A,B), starting from Y123+0.25CuO powder and starting from Y247-Y123 mixed powder.

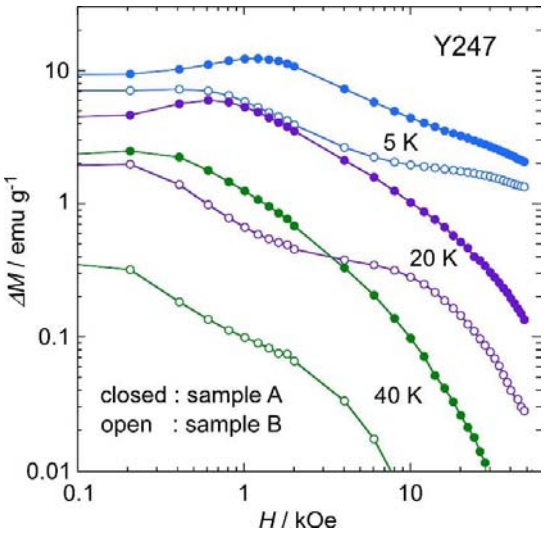


Fig. 2　Dependences of width of magnetization hysteresis loops, ΔM, on external field for Y247 sintered bulks (sample A, B) at 5, 20 and 40 K.

は ΔM の磁場依存性が数 kOe の磁場下で小さくなる領域があるなど異常な振る舞いが認められた。講演では品質を高めた Y247 焼結体の物性や、超伝導が劣化した CuO 二重鎖局所領域のピンニングについても議論する。

参考文献

1. S. Gondo *et al.*, *Abstract of 10th ACASC/ 2nd Asian ICMC/ CSSJ Joint Conference* (2020) 110.
2. E. Osaki *et al.*, *83rd JSAP Autumn Meeting* (2022) 21P-A304-4.
3. J. Shimoyama *et al.*, *Abstract of CSSJ Meeting Conference* Vol. 103 (2022) 106.

デジタル画像相関法を用いた実用超電導線材のひずみ測定

Current Status of Measuring Strain in Practical Superconducting Wires using Digital Image Correlation

町屋 修太郎（大同大学）；長村　光造（応用科学研究所）；山根　昇悟、梶田　慎也
MACHIYA Shutaro (Daido university); OSAMURA Kozo (RIAS);
YAMANE Shogo, KAJITA Masaya(Daido university)
E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

1. はじめに

近年情報処理技術の向上から物体表面に塗布されたランダムパターンから表面のひずみを測定する技術であるデジタル画像相関法(Digital Image Correlation: DIC)が発達してきている。ミクロン台の変位を安定して測定できる伸び計の代替技術には現状なっていないが、 表面のひずみ分布をグラフィカルに測定できるメリットは高い。ひずみ分解能はまだまだ足りないが、 鉄鋼材や実用超電導線材に適用した例を紹介したい。

2. DIC の測定環境

DIC の汎用システムとしては、ツアィス社の GOM グループが開発販売している ARAMIS が有名である。ARAMIS の特徴は、モノクロのステレオカメラを用いた３次元計測によるひずみ測定となっており、角度の微調整の必要がないメリットがある。しかし焦点が固定であることと、解像度が不足しており、工業材料の弾性ひずみ測定には不向きである。 また３次元データとなるために計算時間の増大やデータそのものが膨大となる問題がある(30 秒で 10GB 程度)。

そこで、本研究では 2K のモノクロステレオカメラの ARAMIS と汎用の単眼の一眼レスカメラにマクロレンズを装着して 4K 解像度で動画を測定する環境との２つで測定比較を行なった。

3. 測定試料

高弾性の試料として横幅 4.5 mm 厚み 0.1 mm の SUS304 のテープを準備した。 超伝導材料としては BSCCO の補強なしのベア材を準備した。寸法は横幅約 4.1 mm、 厚さは約 0.21 mm である。 どちらのテープについても汎用のラッカースプレーにてランダムパターンを付与した。

4. 測定結果

Fig. 1 に SUS304 の一眼レフカメラの測定系での引張試験結果を示す。図中の三角形は、Nyilas タイプの伸び計の値であり、 四角形は DIC の 面内のひずみを全て合計し平均した値を示している。両者の勾配はほぼ一致してるのがわかり、分解能は劣るものの DIC でもヤング率の測定は可能である。Fig. 2 には BSCCO の引張試験を同様のシステムで撮影した２フレームを示している。図中の値は、各ポイントでのひずみ（%）である。 左の図ではフィラメント破断によるひずみの増大が見て取れ、右直後のフレームではき裂が進展した状態が確認できる。き裂が入り画像が不連続になるとひずみの解析が不可能となった。

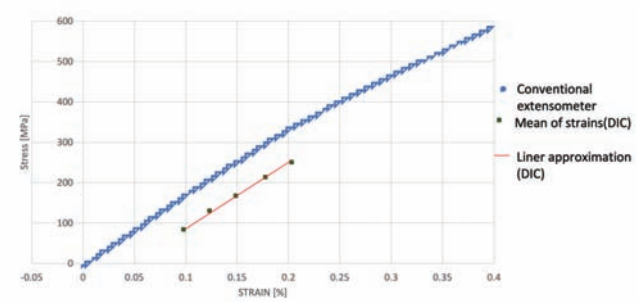


Fig. 1 Stress-strain curve of 304 steel using SLR camera

また測定には細心の注意が必要となる。 具体的には画像のひずみがそのまま工学ひずみに変換されるため、カメラと試料の平行度の確保、ならびに引張初期のねじれ、剛体移動などを回避する必要がある。

5. まとめ

測定環境を工夫することで、現状の DIC システムでも 0.03%程度の弾性ひずみを測定することは可能であるが、解像度は現行の伸び計には及ばない。

超電導の分野で考えればマルチフィラメントな線材のローカルなひずみの測定など、用途に合った測定が今後発展していくのではないかと考えている。

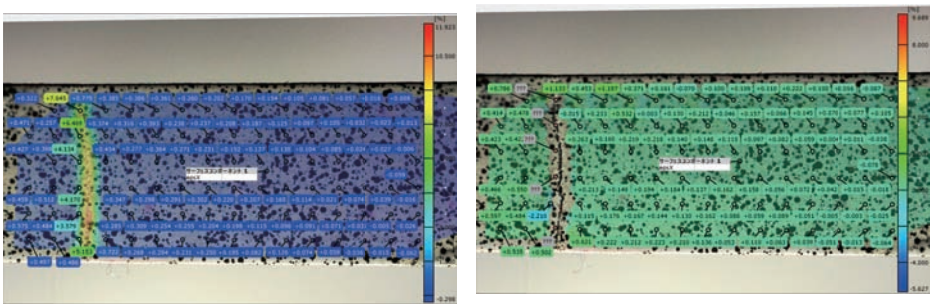


Fig. 2 DIC strain mapping of BSCCO using SLR camera with macro lens

液体水素用流量計開発のための低温下における GFRP 管の力学的特性研究

Study on mechanical characteristics of GFRP pipe at low temperature for development of liquid hydrogen flowmeter

佐藤 更, 杉原 弥悠加, 武田 実, 前川 一真(神戸大)
SATO Sara, SUGIHARA Miyuka, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)
E-mail: sato.sara@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。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、荷役技術も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 GFRP 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は、配管材料の極低温下における力学的特性について調べることは重要である。そこで、GFRP のヤング率の温度依存性を明らかにするために、ひずみゲージを貼り付けた GFRP 管の管内圧力変化を利用して、極低温下における GFRP の圧力とひずみの関係を調べた。

2. 実験装置

2.1 低温用箔ひずみゲージ

本実験で使用する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[3]を使用した。ひずみゲージの使用温度範囲は−269 ℃～150 ℃、自己温度補償範囲は−196 ℃～50 ℃である。

2.2 加圧実験システム

加圧実験システムの概略図を Fig. 1 に示す。

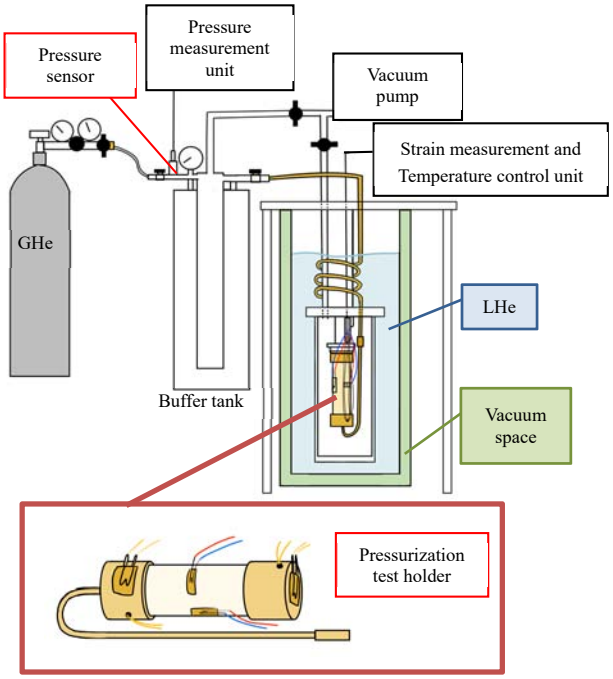


Fig. 1 Schematic diagram of pressurized experiment system.

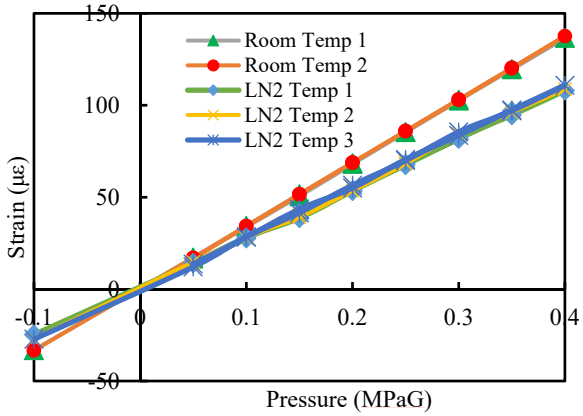


Fig. 2 Experimental result of foil strain gauge.

加圧実験システムは、ヘリウムガスボンベ、圧力計、バッファータンク、真空ポンプ、銅管、加圧試験ホルダー部で構成されている。また、加圧試験ホルダー内には試験サンプルとして、厚さ 1 mm の GFRP 管に、ひずみゲージ 2 枚を直交させるように貼り付けたもの(以下、低温試験部)が設置されている。GFRP 管の両端は真鍮でキャップをしており、その片側に銅管を差し込み加圧孔としている。また、真鍮キャップにはダイオード温度計が埋め込まれており、温度を調節するためのヒーターが貼り付けられている。

3. 実験方法

Fig. 1 のように、GFRP 管でできた低温試験部を液体窒素または液体ヘリウムで冷却し、ヘリウムガスを用いて加圧してひずみ測定を行った。温度制御には Lake Shore 製の温度コントローラ 335 型を使用した。また、計測用ソフトウェアとして、圧力の計測には LabVIEW、ひずみ計測には DCS-100A を使用した。

4. 実験結果と考察

Fig.2 は、液体窒素を用いた実験で得られた測定値をゼロ点補正し、圧力とひずみの関係のグラフを描いたものである。液体窒素での実験では、以下のことが分かった。

・GFRP 管内の圧力とひずみの関係は低温下においても非常に直線性が高かった。また、ひずみの測定値の安定性及び再現性も高かった。

・液体窒素温度では、圧力を一定にした際にひずみに行き過ぎ量が生じる傾向(オーバーシュート)があった。

液体窒素温度以下における温度と圧力の関係、及び実験結果を基に導出した GFRP 管のヤング率の詳細については、学会当日に報告する。

参考文献

[1] S. Kamiya, M. Nishimura and E. Harada: "Study on Introduction of CO_2 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] 株式会社共和電業 計測機器総合カタログ 2019 ひずみゲージ 1-41

ジョセフソン電流の追跡による超伝導体内への低温水素吸蔵現象の観測

Observation of hydrogen absorption into metal by detecting superconducting Josephson current

宮川 一慶, 太 子周, 高田 弘樹, 河江 達也(九州大学工学部)
MIYAKAWA Kazuyoshi, TAI Zizhou, TAKATA Hiroki, KAWAE Tatsuya (Dept. of Applied Quantum Physics, Kyushu University)
E-mail: t.kawae.122@m.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまでの研究で、液体水素に浸した金属ナノ接合に数十 mV 程度の電圧を印加すると高濃度の水素化物が生成されることを明らかにした。本実験では水素が金属内に侵入する際のしきい電圧をより精密に測定することを目的に、Nb 製超伝導ジョセフソン接合(JJ)に水素を吸着させ、そのジョセフソン電流の変化より Nb 金属内部への水素吸蔵のしきい値を測定した。その結果、JJ に 10 mV 程度の電圧を印可すると、JJ 表面に吸着していた水素が内部に侵入することがわかった。

2. 実験装置および実験手順

図 1 に実験装置の概略図を示す。装置は外部断熱管と、高真空の試料部である内部断熱管から成る二重断熱管構造である。密閉された内部断熱管内に水素・重水素を導入することで、試料を水素に晒して実験を行うことができる。さらに試料ホルダーには、ナノ接点を形成・制御するための Mechanically Controllable Break Junction（MCBJ）機構が取り付けられてある。

具体的実験手順としては、まず T~20K まで装置を冷却し内部断熱管に水素を導入する。次に水素が装置内に残った状態で T ~ 4K まで冷却し、MCBJ 機構およびピエゾ素子を用いて試料である Nb 細線(0.2mm)を引き伸ばしていき、超伝導－常伝導－超伝導型のジョセフソン接合(ScS-JJ)を作製する。続いて ScS-JJ 表面に吸着した水素の内部への侵入を誘起するため、ScS-JJ 接合の両端に電圧 V_m を印加する。水素吸蔵の有無を確認するため ScS-JJ を流れる電流の電圧依存性を測定する。さらに印可電圧 V_m を徐々に大きくしていき、その変化を追跡する。実験では電流−電圧（I−V）特性およびロックイン法を用いた微分伝導度 dI/dV 信号を測定することで水素侵入を検知する[1]。

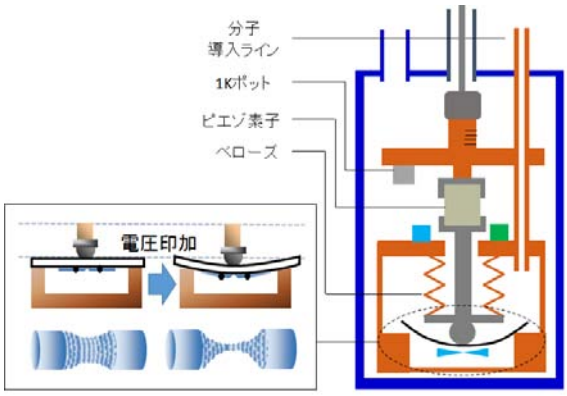


図 1. MCBJ 法の原理（左図）と本実験で用いるベローズ付き MCBJ 実験装置の模式図（右図）。

3. 実験結果

図 2 は T ~ 4.4 K で上の手順で作成した ScS-JJ 表面に水素を吸着させた状態で、最大電圧 V_m＝8, 40, 70 mV を印加後に測定した I-V 特性を示している。なお、縦軸はジョセフソン接合を流れる電流を断面積で規格化して $j(V)$ (電流密度)としてプロットしている。印加電圧を増加していくと、ゼロバイアスにおけるジョセフソン電流の大きさが抑制されることが分かる。この抑制は、ScS-JJ 周辺に吸着した水素原子がコンタクト内部に侵入したことによると考えられる。さらに、pure Nb 製の ScS-JJ の場合と比較すると、8mV の電圧しか印加していないにも関わらず、ジョセフソン電流がほぼ半減することも分かった。

我々の先行研究結果では、液体水素 (LH_2) 中に浸した Pd, Nb, V,金属コンタクトの両端に 30 mV 以上の電圧を印加すれば T ~ 20 K でも水素の侵入・拡散が促進されることを明らかになっていた [1,2]。今回の実験結果は金属ナノコンタクトへの水素吸蔵が非常に小さな電圧印加でも起こる可能性を示しており、金属等における水素の吸蔵・拡散等のダイナミクスを考える上で水素トンネルをはじめとした水素の量子性を考慮することが非常に重要であることがあらためて明らかになった。

実験結果の詳細については当日講演で報告する。

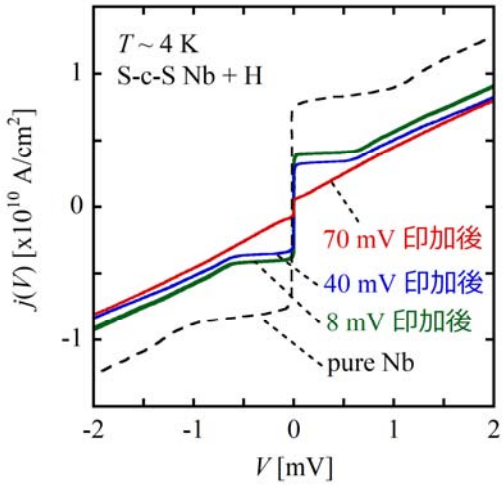


図 2. T ~ 4 K で水素中に曝した超伝導 Nb ナノコンタクトに対して、最大で 8, 40, 70mV の電圧を印加後に測定した I-V 特性。縦軸は電流密度で示している。また、比較として、pure Nb の I-V 特性も示している。

参考文献

[1] K. Miyakawa, H. Takata, T. Yamaguchi, Y. Inagaki, K. Makise, T. Kawae, Appl. Phys. Exp. **15**, 013002 (2022).
[2] K. Ienaga, H. Takata, Y. Onishi, Y. Inagaki, H. Tsujii, T. Kimura, and T. Kawae,, Appl. Phys. Lett. **106**, 021605 (2015).
[3] 家永紘一郎, 高田弘樹, 河江達也, 固体物理 **53**, 317 (2018).

700 mK 以下における超流動ヘリウム 4 と銀微粒子焼結体との熱抵抗

Thermal boundary resistance between sinters made of fine silver powders and superfluid ^{4}He below 700 mK

中川　久司（産総研）
NAKAGAWA Hisashi (AIST)
E-mail: hisashi-nakagawa@aist.go.jp

1. はじめに

量子コンピュータを冷却する希釈冷凍機（DR）には、大きな冷凍能力が要求される。冷媒の ^{3}He−^{4}He 混合液（混合液）と熱交換器との間には、冷凍能力を低減するカピッツァ熱抵抗（熱抵抗）が存在する。熱抵抗を低減するため、比表面積の大きな銀微粒子焼結体（銀焼結体）製の熱交換器が用いられる。我々は、従来より高い焼結温度をもち比表面積、気孔容積の大きな銀焼結体を開発した[1,2]。本研究では、この銀焼結体と超流動 ^{4}He との熱抵抗を調べている。

2. 金属焼結体と超流動 ^{4}He とのカピッツァ熱抵抗

混合液中の熱交換器表面は、ゼロ点振動の大きさの違いから優先的に数原子層の ^{4}He で覆われている。金属焼結体と超流動 ^{4}He との熱抵抗の測定例はない[3]。DR が生成する温度では、超流動 ^{4}He の常流動成分はほとんど消失し、とくに 600 mK 以下ではフォノンが熱輸送を支配する。孤立粒子系の熱抵抗に関する理論[4]によれば、金属微粒子には、有限サイズ効果に基づく最低振動数と、これに対応した温度が存在する。この温度は、粒径が小さいほど上昇し、例えば、粒径 0.13 (0.07) μm の銀微粒子では約 240 (440) mK である。この温度より低温では、振動が励起されないため、熱抵抗は指数関数的に増大すると予想される。

3. 熱抵抗の測定方法と熱抵抗の温度依存性

公称粒径 0.13 μm および 0.07 μm の銀微粒子を厚み 0.3 mm の銀板上に焼結した。焼結体の厚みは約 0.7 mm である。DR に設置したプラスチック製実験セル内で、高純度 ^{4}He ガスを液化し、表面積 100 m^2 程度の銀焼結体製熱交換器により冷却する。サンプルは、この実験セル壁の一部をなす。真空側の銀板裏面に、サンプル温度を測定する温度センサと既知の熱を注入するヒーターを設置した。液体温度を測定する温度センサは、超流動 ^{4}He 中に浸漬した。熱抵抗は、既知の熱注入量と、それにより生じるサンプルと液体間の温度差との比で定義される。各熱注入量における温度差を測定し、熱注入量に対する温度差の変化率として熱抵抗を求めた。ただし、この熱抵抗は、カピッツァ熱抵抗だけではなく、銀焼結体自身や銀板の熱伝導などを含む、全熱抵抗である。

図 1 に 0.13 μm 銀焼結体と超流動 ^{4}He との熱抵抗の測定結果を示す。^{4}He を抜いた空セルの熱抵抗は、銀焼結体と超流動 ^{4}He との熱抵抗に比べ一桁から二桁以上大きく、観測した全熱抵抗は、銀焼結体と超流動 ^{4}He 間の熱伝達を反映していると考えてよい。熱抵抗は最低温度まで温度のべき乗で増大し、指数関数的な増大は見られなかった。0.07 μm 銀焼結体でも同様の振る舞いが観測された。SEM 観察から、銀焼結体の構造は公称粒径より数倍以上大きいことがわかっている[1]。測定温度での支配的フォノンの熱的波長は、公称粒径や銀焼結体の構造に比べ短い。以上から、最低振動数に対応する温度が低下し、フォノンにとって銀焼結体はバルクとして振る舞うため熱抵抗は温度のべき乗の温度変化を示したと考えている。

4. まとめ

銀焼結体と超流動 ^{4}He との熱抵抗は、バルクのように、低温になるにつれ温度のべき乗で増加することが分かった。今後は、厚みの異なる銀焼結体や混合液を用いた実験を行う。DR の熱交換器を高効率化する知見を蓄積し、高性能 DR の創出を目指す。

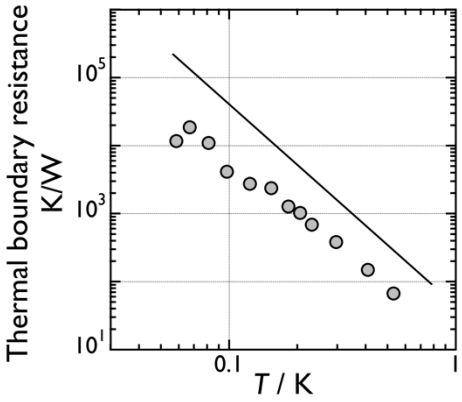


Fig.1 Measured total thermal boundary resistance between a sintered 0.13 μm silver powder with thickness of 0.7 mm and superfluid ^{4}He at pressure of 173 kPa as a function of temperature. The solid line represents a T^{-3} temperature dependence.

参考文献

1. H. Nakagawa, Y. Miseki and M. Akoshima, Cryogenics Vol. 102, (2019) pp.1 – 8.
2. H. Nakagawa, Y. Miseki and M. Akoshima, Abstracts of CSSJ Conference Vol. 98, (2019) p.49.
3. T. Nakayama, Prog. in Low Temp. Phys. Vol. XII, (1989) Chap. 3 pp.115 – 194.
4. T. Nakayama and N. Nishiguchi, Phys. Rev. B Vol. 24, (1981) pp. 6421-6429.

低温流体安全マニュアル「極低温流体の取り扱いに関する安全性」の和訳とホームページ公開

Translating「Safety in the Handling of Cryogenic Fluids」into Japanese and its publications

伊藤 聡(JASTEC);神谷 祥二、新郷 正志(川崎重工);白井 康之(京大);槙田 康博(KEK);
宮井 玲、弘川 昌樹(大陽日酸);林 和彦(住友電工 現 KFMI);中内 正彦(鉄道総研、当時)、池内 正充(前川)
ITO Satoshi (JASTEC); KAMIYA Shoji, SHINGO Masashi (KHI); SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); MAKIDA Yasuhiro (KEK);
MIYAI Ryo, HIROKAWA Masaki (TNSC);HAYASHI Kazuhiko(Sumitomo Electric
Industries, Ltd.,current:KFMI);NAKAUCHI Masahiko (ex-RTRI); IKEUCH Masamitsu(MAYEKAWA)
E-mail: kamiya_s@khi.co.jp

1. はじめに

環境・安全委員会は、①安全等の情報収集、②会員への安全の啓蒙活動」、③関連規制・基準の科学的な根拠の検討」等について調査してきた。③に関連した安全マニュアル作成で重要なことは科学的根拠を明確にすることである。明確な根拠は,今後のマニュアル、基準改定及び新たな法的規制の構築に貢献する。第1ステップの目標として米国ロスアラモス研究所の元研究員(F.J.Edeskuty 他)が執筆した「Safety in the Handling of Cryogenic Fluids」(1996 年)の和訳を行った[1]。原著は水素技術関連の内容が多いが、一部内容を削除し新たな内容(超電導磁石関連)を追加した。本稿では、和訳内容の概要と内容例を報告する。

2. 安全マニュアルの章構成と翻訳担当者

安全マニュアルの章構成と各章の翻訳担当者を Table1に示す。章構成は 12 章から成り、極低温流体の一般特性、人体に及ぼす危険性、材料の低温脆性、低温熱収縮、閉容器の圧力上昇、凝縮、酸素の危険性、可燃性ガスの燃焼特性、超電導磁石の危険性及び基準等である。超電導磁石の危険性は原著に無い内容である。

担当章		担当者
	序文	新郷 正志*、神谷 祥二**(川崎重工)
第1章	はじめに	池内 正充(前川)
第2章	生理学的危険	池内 正充(前川)
第3章	材料の脆化	林 和彦(住電)
第4章	熱収縮によって生じる応力	新郷 正志*、神谷 祥二**(川崎重工)
第5章	閉止空間での圧力上昇	伊藤 聡(JASTEC)
第6章	凝縮	新郷 正志*、神谷 祥二**(川崎重工)
第7章	燃焼の危険性	神谷 祥二(川重)
第8章	可燃性の特性	弘川 昌樹*、宮井 玲**(大陽日酸)
第9章	酸素の危険性	弘川 昌樹*、宮井 玲**(大陽日酸)
第10章	超電導磁石の危険性	槙田 康博(KEK)
第11章	ガイドライン、標準、規則	中内 正彦*(鉄道総研)、神谷 祥二**(川重)
第12章	安全に関する課題と今後の調査研究	神谷 祥二(川重)

*途中退任、**新任

Table 1 Each chapter and its translator

3. 安全マニュアルの内容例(概要)

安全マニュアル(和訳)の内容例(概要)を以下に述べる。

3.1 生理学的危険(第 2 章)

換気装置がない室内で極低温流体を取り扱う時、冷媒ガス放出により酸素濃度が減少し、最悪、致命的な環境になる可能性がある。室内の酸素濃度は一様でなく、換気状態でも低酸素濃度の淀み空間の発生に注意する。

3.2 閉止空間での圧力上昇(第5章)

放出口が閉じた容器において、外部入熱により液体内部の温度が成層化し、容器内圧力は液表面温度の飽和圧力を維持しながら上昇する(Fig. 2)。その上昇速度は液全体の熱平衡状態を維持した圧力上昇速度より早くなるので注意する。その上昇速度は入熱、容器形状及び液位等に依存する。

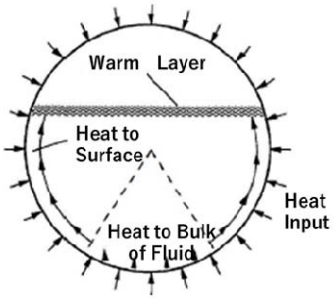


Fig.1 Distribution of heat input into a cryogenic Dewar

3.3 凝縮と酸素の危険性(第 6 章、第9章)

液体水素等により空気が凝縮し高濃度酸素が発生する状況で着火すると爆発的に燃焼する。一般に液体空気が発生する液体水素配送トレーラーの下にはアスファルトが禁止されコンクリートで覆われる。液体窒素温度の暴露表面においても空気が凝縮するので注意する。Fig.2 に示す空気の平衡状態線図で酸素濃度は 20%から 50%に増加する。

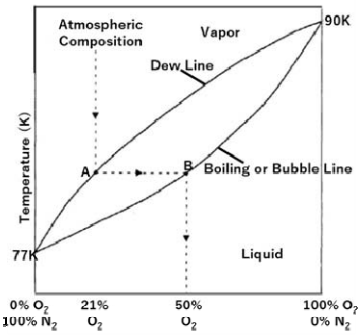


Fig. 2 Oxygen/Nitrogen phase equilibrium diagram at 1atm

3.4 燃焼の危険性(第7章)

可燃性液化ガス(例:LNG,LH_2)を取り扱う設備において、燃焼事故を想定した貯蔵タンクと一般建物(住居)の間に安全離隔距離が規定される(米国 NFPA コード、高圧ガス保安法の第1、第2種設備距離に相当)。この安全距離は保護構造により緩和できる。規定、コードに示される安全離隔距離の根拠は、まだ十分に論議されていない(日本でも同じ)。

4. おわりに

本マニュアルは科学的根拠に基づき展開されていることから「安全」に従事する研究・技術者に役立つと考える。誤訳、新しい知見があれば適宜に修正追記していく。尚、マニュアルは学会ホームページに近日公開予定である(会員限定)。

参考文献

1. Frederic J. Edeskuty,et al.,Safety in the Handling of Cryogenic Fluids, Plenum Press (1996).

環境・安全委員会での安全テキストの作成について

Preparation of safety texts by the Environment and Safety Committee

伊藤 聡(JASTEC);神谷 祥二(川崎重工);白井 康之(京大);槙田 康博(KEK);宮井 玲(大陽日酸);増田 孝人(住友電工);鷲山 玲子(東大);辻上 博司(岩谷産業);林 和彦(住友電工 現 KFMI);池内 正充(前川)

ITO Satoshi(JASTEC);KAMIYA Shoji(KHI);SHIRAI Yasuyuki(Kyoto Univ.);MAKIDA Yasuhiro(KEK);MIYAI Ryo(TAIYO NIPPON SANSO);MASUDA Takato(Sumitomo Electric Industries,Ltd.);TSUJIGAMI Hiroshi(Iwatani Corporation);SAGIYAMA Reiko(Tokyo Univ.);HAYASHI Kazuhiko(Sumitomo Electric Industries,Ltd.,current:KFMI);IKEUCHI Masamitsu(MAYEKAWA)

E-mail: ito.satoshi@kobelco.com

1. はじめに

超電導・極低温機器は、MRI を代表例として世の中で多くの数が使われるようになっている。しかし、ユーザーがそのハンドリングを直接担うことは稀であり、たいていはメーカーのサービスに委ねられる。これはひとえに、超電導・極低温機器の操作が難しく、かつ危険性を伴うためである。一方、超電導・極低温機器を供給するメーカー、あるいは超電導・極低温に関連する研究機関では、自ら装置を操作し、利用することになるから、そこには安全へのじゅうぶんな配慮が必要になってくる。そのため、事故の未然防止のため、各組織・機関では安全に関する基準やルールを独自に設けているが、残念ながらこれらが組織間で共有されることはなかった。そこで、環境・安全委員会では、学会としての公共的立場から、組織にとらわれずに参照できる安全テキストの作成を進めている。

2. 安全テキストの狙い

前述のとおり、安全テキストの作成目的は、基本的に公共的に利用可能な情報の提供である。そのうえで、現在進めているテキストでは、これから超電導・極低温技術に従事しようとする若手技術者をターゲットとし、各組織での導入教育に活用できる資料を提供することに主眼に置いた。なによりも先ず基本的安全知識を身に着けることで、円滑かつ安全に研究・開発業務が進められるようになってもらうことが狙いである。

3. 安全テキストの構成

今回作成した安全テキストの目次は下記のとおり 5 章から構成される。

Ⅰ 低温
- 1 寒剤の基本的性質
- 2 寒剤による冷却
- 3 寒剤の取扱い
- 4 高圧ガス保安法と関連法規
- 5 事故例

Ⅱ 高圧ガス
- 1 高圧ガスとは
- 2 高圧ガスの取扱い
- 3 事故事例

Ⅲ 磁場の安全性
- 1 生体への影響
- 2 周辺機器への影響

Ⅳ 電気
- 1 はじめに
- 2 低温・超伝導実験で身近に発生する電気事故例
- 3 感電災害の防止対策
- 4 電気火災防止対策
- 5 参考文献

Ⅴ 安全一般
- 1 安全対策
- 2 極低温の真空断熱機器における注意事項
- 3 日常点検
- 4 危険予知(KY)

付録
- 参考図書
- 冷凍部会合同ワーキング講演資料

目次案からわかるように、各章の項目には、分類レベル差や重複があったり、記載内容にも章毎にレベル差がある。これは、現時点ではエディター機能を担う人的余力が足りないためであり、一先ずご容赦いただきたい。むしろ、未完成であっても公開を優先することで、早期の活用に供するとともに、読者からの指摘を反映することで効率的に完成度の向上を図ることを期待している。

なお、付録には本安全テキストを補完できるよう、安全に関する関連書籍を参考文献として列記する。

4. 今後の展開

本安全テキストは、まもなく学会ホームページにリンクを貼って閲覧可能にする予定である。先ずは、広く会員の方々にご参照いただきたい。そのうえで、今後は下記についても考慮していく計画である。

内容レベル整合と充足

公開後も全体構成の整合性とバランスを図るとともに、読みやすい文章表現となるよう、継続的に版を重ねていく予定である。また、さらに深い内容にアプローチしたい読者要求にも応えるべく補足記載も加えていきたい。そのためには、読者からの意見やコメントを受けられるよう、ホームページを介した投稿機能を設けることも有用であろう。web 上での公開だからこそ活かせる双方向性に期待する。

他機関との連携

ヘリウム液化装置を導入している大学の低温センター等では、既に独自に安全テキストを作成されている例が多い。これらは冊子ベースではあっても、吟味された内容になっている。今後、これらの機関と連携することで、既存の安全テキストのエッセンスを取り込み、一層の内容充実をはかっていく。将来的に安全テキストとしての統合された原本となれば、各機関での安全教育の充実にも活用可能と考える。

安全基準等のガイドライン

現時点での安全テキストは、既存の超電導・極低温機器を扱う上での注意事項に主眼が置かれているが、これらの装置を導入あるいは製作する場合の安全ガイドラインも盛り込めればなお一層有用なものになろう。もっとも、これは広義には規格に相当するものとなるので、規格立案となれば、本来は工業会が担うことが望ましい。このため、今後は低温・超電導工業会との連携を図っていくことも必要である。

5. まとめ

以上、公開予定の安全テキスト概要について述べた。目指す完成形への志しは大きいが、作業負荷も小さくなく、委員会のみの活動では手に余ることは明白である。今後は上述のとおり他機関との連携を進めていくことが課題である。

超電導・極低温機器の安全と信頼性のアンケート実施について

Questionnaire concerning safety and reliability of superconducting/cryogenic equipment

池内 正充(前川);伊藤 聡(JASTEC);大橋 義正(アイシン);神谷 祥二(川崎重工);木下 康秀(鈴木商館);淵野 修一郎, 鷲山 玲子(東大);白井 康之(京大);竹下 直(産総研);武田 実(神戸大);野口 隆志(池上技術);平井 寛一, 宮井 玲(大陽日酸);平塚 善勝(住重);三戸 利行, 平野 直樹(NIFS);槙田 康博(KEK);増田 孝人(住友電工);吉田 茂(元九大)
IKEUCHI Masamitsu(MAYEKAWA);ITO Satoshi(JASTEC),OHASHI Yoshimasa(AISHIN); KAMIYA Shoji(KHI);KINOSHITA Michihide(SUZUKI SHOKAN);FUCHINO Syuichiro, SAGIYAMA Reiko(Tokyo Univ.);SHIRAI Yasuyuki(Kyoto Univ.); TAKESHITA Nao(AIST);TAKEDA Minoru(Kobe Univ.);NOGUCHI Takashi(IKEGAMI GIJUTU);HIRAI Hirokazu, MIYAI Ryo (TAIYO NIPPON SANSO);HIRATSUKA Yoshikatsu(SHI);MITO Toshiyuki, HIRANO Naoki(NIFS);MAKIDA Yasuhiro(KEK); MASUDA Takato(Sumitomo Electric Industries, Ltd.);YOSHIDA Shigeru(kyushu Univ.)
E-mail: masamitsu-ikeuchi@mayekawa.co.jp

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルにむけて国内外で CO_2 削減に向けた技術開発が加速している。超電導機器についても, 高効率, 大出力, 軽量・コンパクトなどの特徴を生かしつつ, 長期信頼性を確立することでライフサイクルコスト評価でも在来機器に置換わり CO_2 削減の有力候補となる可能性は十分あると考えている。

しかし, 超電導ケーブルや超電導マグネットなどの超電導機器やそれらを冷却する冷凍機・液化機, 付随する機器類(以下, 超電導・極低温機器)の信頼性や安全に関する議論をまとめて行う機会はあまりなかった。

超電導・極低温機器の商品化を進めていくうえでも超電導・極低温機の定量的な評価手法の確立が必要となる。すでに超電導の用語については IEC60050(JIS H 7005), 試験方法についてはIEC61788(JIS H 7300)などの規定ができ, 商品化を後押しする体制ができ始めている。信頼性評価についても, 超電導・極低温機器の商品化を進める観点からその必要性が求められてきている[1]。

環境・安全委員会では Safety in the handling of cryogenic fluids の訳本作成などを通して安全に関する情報収集を行い, さらに超電導・極低温機器の取扱いに的を絞った安全テキストの作成を進めている。さらに, 昨年の冷凍部会第5回例会では「極低温機器の信頼性評価」として 4 件の講演を行った。また, つくば超電導応用コンステレーションズ(ASCOT)の冷却システム検討会では高圧ガス保安法の規制見直しや冷凍機の効率評価について検討を行い, 現在, 信頼性の評価方法について検討を行っている。今回, この二つのグループが共同して, 超電導・極低温機器の安全・信頼性についてのアンケートを計画している。

2. アンケートの必要性

国内には超電導・極低温機器のトラブルデータを収集する仕組みがなく, 高圧ガス保安協会(KHK)の事故情報[2]が定期的に知ることができる唯一のものといえる。しかし, 事故情報では高圧ガス保安法上の事故に限定されており, 信頼性・安全性の評価を行うのに十分な情報とはいえない。

そこで, 本学会のネットワークを活用し, 関係者にアンケートを実施してトラブルの現状を知り, 今後の検討に活用していくことが必要であると考えている。このようなアンケートは過去にも実施していて[3], これらも参考にしていくことにしている。

3. アンケート実施上の課題

超電導・極低温機器のアンケートを行う上での主な課題を以下に示す。

・機器の種類・規模が多岐にわたる
・対象となる機器の数が少ない
・研究開発レベルのものが多い
・国内の稼働状況が不明

これらの課題を踏まえながらアンケート調査の方法を考えていく予定にしている。

4. 安全と信頼性

安全(Safety)とは,「許容できないリスクから免れている状態」JIS Z 8115:2019 と定義されており, リスクが根絶できないことを前提に, 許容可能なレベルまでリスクを低減することである。したがって, 安全は人間だけでなく機器への損傷の危険も含む概念である。

信頼性については用語自体が変遷しており, 現在は Dependability(総合信頼性)という用語が用いられる(Table1)。総合信頼性とは部品, システム, 人間を対象として安全を含む幅広い用語であり, 信頼性の向上は安全の向上への必要条件であることが明確に示されている。このため安全と信頼性のアンケートを同時に実施することは意義深いと考えている。

5. アンケート項目の検討

アンケートの項目は今後の活動の中で決めていくが, 超電導・極低温機器の特徴を踏まえて, 環境・安全委員会, 冷却システム検討会それぞれの目的の明確化, アンケートを行う対象の選定, アンケートの方法(学会ホームページ, 研究発表会, 講演会などの有効利用の検討), アンケートされる方の負担も考慮した項目数の厳選, アンケート取得後の有効な活用方法などの検討, を行ったうえでアンケートを実施していくことにしている。

参考文献

1. 秋田調:日本の電力システムの現状と将来展望, 低温工学・超電導学会 九州・西日本支部設立 20 周年記念式典特別講演スライド, (2022) p.29
2. https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/index.html
3. 低温工学協会研究委員会 :「極低温冷凍システムの信頼性に関する」アンケート調査について, J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 13 No. 5 (1978) p256-271

Table 1 Reliability term

項目	初期	中期	現在
	20世紀中	20世紀末	21世紀初
信頼性用語	Reliability	Availability	Dependability (総合信頼性)
	アイテムが, 与えられた条件の下で, 与えられた期間, 故障せずに, 要求どおりに遂行できる能力.	要求どおりに遂行できる状態にあるアイテムの能力.	アイテムが, 要求されたときに, その要求どおりに遂行するための能力
		注記1 アベイラビリティは, アイテムの"信頼性", "回復性"及び"保全性"を組み合せた特性, 並びに"保全支援性能"に依存する	注記1 ディペンダビリティすなわち総合信頼性は, "アベイラビリティ", "信頼性", "回復性", "保全性", 及び"保全支援性能"を含む。適用によっては, "耐久性", 安全性及びセキュリティのような他の特性を含むことがある
アイテム	部品	部品, システム	部品, システム, (人間)
工学分野	信頼性工学		
		品質管理, システム工学, 自然科学	
			社会科学
対象物	人工物の個々	人工物の全体	人工物, 天然物, (地球全体)
要件	壊れないこと	動くこと	持続すること

参考:山本正宜,「信頼性と安全性について」, 安全工学, Vol. 49 No. 6 (2010)。
信頼性用語の解説は JIS Z 8115:2019 より引用

高い一軸圧力下で放電プラズマ焼結した Nb_3Sn 超伝導バルク体の緻密化と磁束ピン止め特性Ⅱ ：結晶粒微細化効果

Densification and flux pinning characteristics of Nb_3Sn bulk superconductorsprepared by the SPS method under high uniaxial pressure II: Grain refinement effect

小山田拓真, 内藤智之(岩手大)
OYAMADA Takuma, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)
E-mail: g0321028@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

Nb_3Sn 超伝導体の上部臨界磁場 H_{c2} = 24 T (4.2 K) [1] は MgB_2 の H_{c2} = 10～20 T(4.2 K)より高く、臨界電流密度 J_c の磁場依存性が比較的小さい。また、異方性がないことから多結晶体で大型の強磁場バルク磁石を作製できると期待される。しかし、Nb_3Sn バルクを *in-situ* 法で作製した場合、充填率は 50 %以下になり、それに伴い J_c や捕捉磁場が低下する。このことから前回、*ex-situ* SPS(Spark Plasma Sintering)法で高圧力を印加して作製した Nb_3Sn 超伝導バルク体の磁束ピン止め特性について報告した。そこでは 100 MPa を印加して作製した直径 10 mm のバルク（充填率 90 %程度）において約 1.8 T の捕捉磁場を得た。しかし、装置の仕様上 100MPa の圧力ではさらなる大型化が出来ないという問題点がある。さらに Nb_3Sn のピン止め点は粒界であることから、SPS 法を行う前にボールミルを行い、微細化することで低い圧力でも高密度で捕捉磁場特性の高い Nb_3Sn 超伝導バルク体が得られると考えられる。このことから本研究ではボールミル粉砕した前駆体粉末を用いて *ex-situ* SPS 法により Nb_3Sn 超伝導バルク体を作製し、その磁束ピン止め特性について報告する。

2. 実験方法

原料粉末には Nb 粉末(純度 99.9%, 粒径 43 μm 以下)、Sn 粉末(純度 99.9%、粒径 38 μm 以下)、Cu 粉末(純度 99.9%, 粒径 75 μm)、Cu 粉末(純度 99.9%, 粒径 46 μm 以下)を用いた。まず Nb と Sn を化学量論比の 3 ： 1 で秤量し、Nb_3Sn の生成温度低下の効果を得るための Cu を 1 wt%添加した。その後自動乳鉢で 30 分間混合し、Ar 雰囲気中で 850℃×24 時間の熱処理を行った。この Nb_3Sn 前駆体を粉砕した後、ボールミル装置を用いて微細粉砕を行った。回転数は 300, 400, 500, 600 rpm、時間は 1 h で行った。その後、SPS 法により直径 10mm の Nb_3Sn バルク体を作製した。SPS 時の保持温度および保持時間は 900℃×20 分間、印加圧力は 50 MPa であった。
作製した Nb_3Sn バルク体は X 線回折(XRD)によって結晶相を同定した。その後、磁場中冷却着磁(FC)法で着磁を行って捕捉磁場を評価し, SQUID 磁束計によって測定した磁化ヒステリシス曲線から拡張型ビーンモデルを用いて J_c を評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 にボールミルの回転数と充填率の関係を示す。回転数を上げたことで充填率も向上したことが分かる。特に、600 rpm - 1 h の試料では充填率が約 95 %であった。これは以前報告した SPS 時の印加圧力を 120 MPa で作製した試料の充填率約 91 %より向上した。この結果は粒子が微細になったためと考えられる。
Fig. 2 に各試料の捕捉磁場の温度依存性を示す。捕捉磁場はボールミル回転数が増加するほど上昇した。600 rpm - 1 h の試料では 10 K で約 3.1 T とボールミル無しの試料の約 2 倍の値となった。これは Nb_3Sn のピン止め点が粒界であることから回転数が上昇することで Nb_3Sn 粒子が微細になったと考えられる。
当日の講演では各 Nb_3Sn バルクの XRD パターンおよび、臨界電流密度 J_c についても報告する予定である。

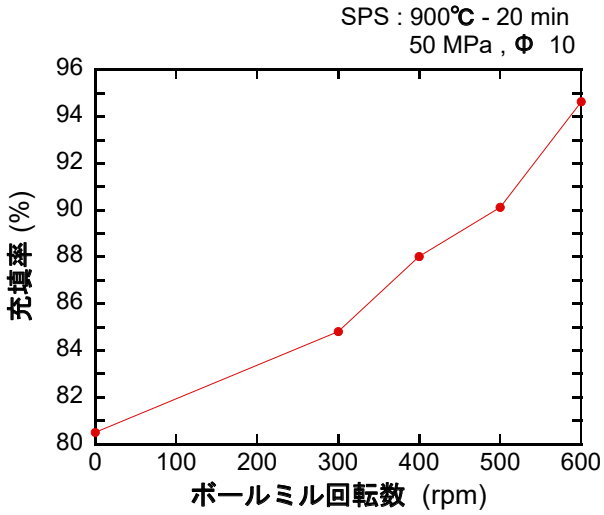


Fig. 1 Relationship between ball mill speed and filling factor

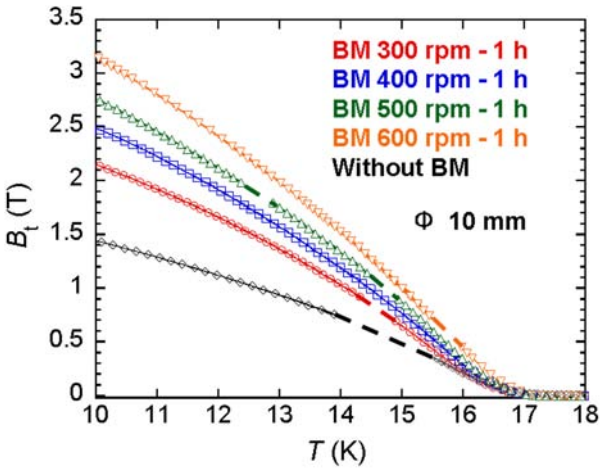


Fig. 2 Temperature dependence of the trapped magnetic field for each sample

参考文献

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

Nb_3Sn 超伝導バルク体の磁気的不安定性に対する高比熱材料の添加効果

Effects of high specific heat material addition on the magnetic instability of Nb3Sn superconducting bulk

小山田拓真，天瀬洸太，内藤智之(岩手大)，菊池章弘(NIMS)
OYAMADA Takuma NAITO Tomoyuki AMASE Kota(Iwate Univ.) KIKUCHI Akihiro(NIMS)
E-mail: g0321028@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

Nb_3Sn 超伝導体の上部臨界磁場 H_{c2} = 24 T (4.2 K) [1] は MgB_2 の H_{c2} = 10～20 T(4.2 K)より高く、また、臨界電流密度 J_c の磁場依存性が比較的小さい。また、異方性がないことから多結晶体で大型の強磁場バルク磁石を作製できると期待される。しかし、バルク磁石としての想定動作温度である 4.2～10 K において Nb_3Sn 超伝導体の比熱が小さいため、着磁過程でフラックスジャンプが起こりやすいという問題がある。そこで，本研究では Nb_3Sn 超伝導バルク体に高比熱材料を添加することで磁気的不安定性の改善を試みた。

2. 実験方法

原料は、Nb(粉末, 純度 99.9 %, 粒径 325 mesh)、Sn(粉末, 純度 99.99 %, 粒径 38 μm以下)、Cu(粉末, 純度 99.99 %, 粒径 1 μm以下)、Gd_2O_3(粉末)を用いた。まず Nb : Sn = 3 :1 で秤量し、Gd_2O_3 を 0.1, 0.5, 1, 5 wt%添加した。この原料粉末を混合し、1 軸圧力下で圧粉体を形成した後、800℃-100 h の熱処理を行い、Nb_3Sn 超伝導バルク体を作製した。

各試料の測定方法は、結晶相の同定には XRD (X 線回折)、磁化測定にはには SQUID (超伝導量子干渉磁束計)を用いた。捕捉磁場測定はホール素子で行った。

3. 実験結果

Fig. 1 に SPS 後の各バルクの XRD パターンを示す。どのバルクにおいても主相は Nb_3Sn であり、Gd_2O_3 を 1 および 5 wt%添加した試料においては僅かに Gd_2O_3 のピークが見られたがそのほかの不純物の生成は見られなかった。これらのことから、Gd_2O_3 は Nb, Sn とは反応せず、800℃-100 時間の熱処理は十分に Nb と Sn が反応し、不純物生成が抑制されると言える。

Fig. 2 に 4.2 K における磁化の磁場依存性を示す。磁化の磁場依存性において Non doped, 0.1 および 0.5wt%Gd_2O_3 の試料は 4 T 付近までフラックスジャンプが発生しているが、1, 5 wt%Gd_2O_3 ではフラックスジャンプが抑制され、特に 5 wt%Gd_2O_3 ではフラックスジャンプは発生しなかった。このことから磁気的不安定性の抑制は 1 wt%から効果があると言える。

講演では各 Nb_3Sn バルクの臨界電流密度 J_c や捕捉磁場特性についても報告する予定である。

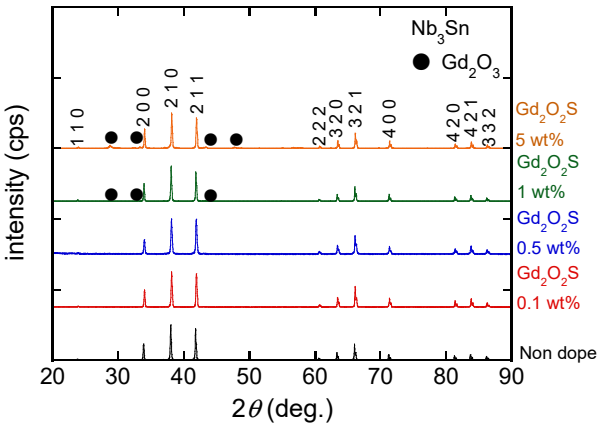


Fig. 1 XRD patterns of Nb_3Sn bulks

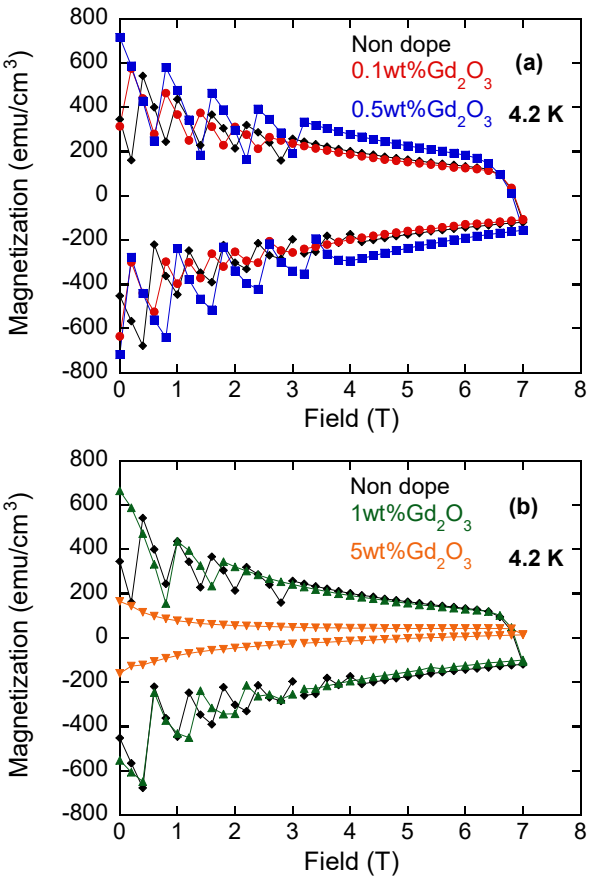


Fig. 2 Magnetic field dependence of magnetization for each sample (a) 0~0.5 wt%Gd_2O_3 , (b) 1, 5 wt%Gd_2O_3

謝辞

本研究は NIMS 連携拠点推進制度の支援を受けて実施した。

参考文献

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

超極細ストランドで撚線した Nb_3Sn ケーブルの臨界電流測定と臨界温度測定

Critical Current and Critical Temperature Measurements of a Nb_3Sn Cable made of Ultra-fine Strands

王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男 (KEK); 飯嶋 安男, 菊池 章弘(NIMS)
WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio (KEK); IIJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiro (NIMS)
E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

加速器や核融合などの超伝導コイル用として、超極細径の A15 ストランドを用いた大電流ケーブルの開発を行っている[1, 2]。極細ストランドを束ねたケーブルは優れた可撓性を有するため、リアクト・アンド・ワインド (R&W) 法によるコイル製作が期待できる。今回は、19 本の直径 50 μm の Nb_3Sn ストランドよりなる撚線ケーブルを試作し、直線形状で熱処理した後に直径 50 mm、30 mm、25 mm、20 mm の 4 種類の GFRP ホルダーに巻き付けて臨界電流 (I_c) を測定した。I_c 測定は液体ヘリウム中 (4.2 K)、18 T までの外部磁場下で行った。またカンタム・デザイン社製の磁気特性測定システム (MPMS) を用いてケーブルの臨界温度 (T_c) を測定したので報告する。

2. 臨界電流 (I_c) 測定

本研究には、19 本の直径 50 μm、銅比 0.89 の Nb_3Sn ストランドを用いた撚線ケーブル(ピッチ 4 mm)を用いた。Nb_3Sn ストランドと撚線ケーブルの断面写真と、I_c 測定に用いた GFRP ホルダーを Fig. 1 に示す。R&W 法によるコイル製作を模擬するために、撚線ケーブルを直状で 650℃×48 H の熱処理をした後に I_c 測定ホルダーに巻き付けて、銅電極に半田接続した。直径 50 mm、30 mm、25 mm、20 mm の 4 種類のホルダーを用意し、直状での I_c 測定結果との比較を行った。I_c 測定は、液体ヘリウム中 4.2 K で最大 18 T までの外部磁場(B_{ext})をケーブルに垂直に印可して、4 端子法により行った。I_c 電圧タップはケーブル中心部に設け、各ホルダーの I_c 区間長は約 7-14 cm である。

各ホルダーで測定した電界-電流 (E-I) 曲線を Fig. 2 に、1.0 μV/cm 基準で求めたケーブル I_c と Non-Cu J_c の磁場依存性を Fig. 3 示す。電界は測定電圧/I_c 区間長から計算し、Non-Cu J_c は I_c と銅比から算出した Non-Cu 断面積 (0.01974 mm^2) より算出した。Fig. 3 には直状で測定した I_c と Non-Cu J_c の結果も示す。ケーブル I_c の劣化は直径 25 mm の曲げまで見られず、直径 20 mm でのみ明確に確認できた。劣化なしの I_c と Non-Cu J_c は、4 T で約 40 A と 2026 A/mm^2、12 T で約 9.2 A と 466 A/mm^2 である。直径 25 mm と 20 mm の曲げひずみは、ケーブル直径約 250 μm で計算するとそれぞれ 1%と 1.25%であるのに対して、ストランド直径 50 μm で計算するとそれぞれ 0.2%と 0.25%となる。先行研究[3]より Nb_3Sn でひずみ 1%まで劣化が生じないことは考えにくいため、極細ストランドで撚線したケーブルの曲げ特性はケーブル径ではなくストランド径に依存することが示唆された。この傾向は短尺試料による先行研究[1]ともよく一致している。

3. 臨界温度 (T_c) 測定

短尺の Nb_3Sn 撚線ケーブルを MPMS に設置し、4.2 K まで冷却してから外部磁場 1 mT をケーブルに垂直に印可した状態で 25 K まで昇温しながら磁気モーメントを測定した。測定値と規格化した磁気モーメントの温度依存性を Fig. 4 示す。9 K 付近に Nb の遷移が、15 K 付近から Nb_3Sn の遷移が見られる。20 K 以上の測定値の平均を 0 基準として 10 K で規格化した Fig. 4(b)より、オンセット T_c (−0.001 基準) は約 17.1 K である。これは先行研究の 4 端子法の測定値ともよく一致している[1]。

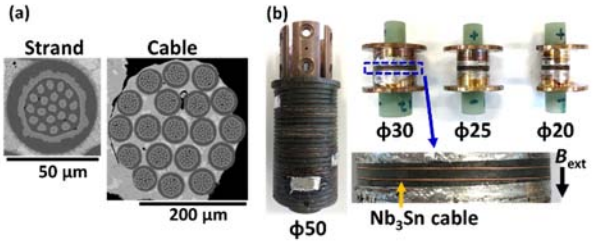


Fig.1 (a) Cross-sectional view of the Nb_3Sn sample cable after the heat treatment. (b) Photographs of the sample cables wound on the four holders with diameters of 50 mm, 30 mm, 25 mm, and 20 mm.

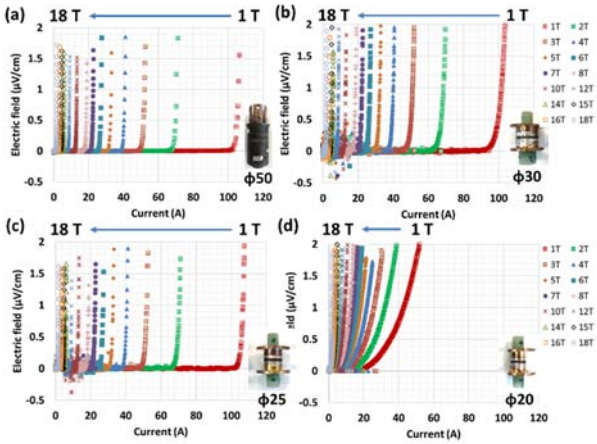


Fig. 2 Electric field versus current (E-I) curves measured by the four holders with diameters of (a) 50 mm, (b) 30 mm, (c) 25 mm, and (d) 30 mm at 4.2 K.

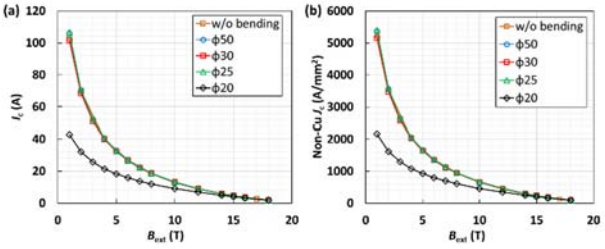


Fig. 3 Magnetic field dependence on (a) I_c and (b) Non-Cu J_c measured at 4.2 K of the Nb_3Sn sample cables.

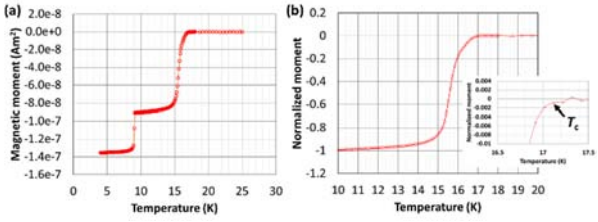


Fig. 4 Temperature dependence on (a) magnetic moment and (b) normalized moment of the Nb_3Sn sample cable. The inset shows a zoomed view around the onset T_c.

参考文献

[1] A. Kikuchi, *et.al.*, *IEEE TAS*, 32 (2022) 6000104.
[2] A. Kikuchi, *et.al.*, *IEEE TAS*, 31 (2021) 6000105.
[3] J. W. Ekin, *Adv. Cryo. Eng.* 30, 823-836 (1984).

JA DEMO 候補の高強度 Nb_3Sn 線材の曲げ特性測定と組織解析

Micrographic analysis and bending property measurement for JA DEMO candidate strengthened Nb_3Sn wires

伴野信哉(物材機構), 谷貝 剛(上智大学), 川嶋慎也(神戸製鋼)、杉本昌弘(古河電工), 淡路 智(東北大学),
宇藤裕康(QST), 坂本宜照(QST)
BANNO Nobuya (NIMS), YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.), KAWASHIMA Shinya (Kobe), SUGIMOTO Masahiro (Furukawa),
UTOH Hiroyasu, SAKAMOTO Yoshiteru (QST),
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

ITER に比べて約 1.5 倍の電磁力増大が見込まれる JA DEMO では、導体の性能を如何に劣化させずに運転するかが、大きな課題となっている。そのために、ITER でも採用されたショートツイストピッチ導体を DEMO でも採用するべく検討しているが、ショートツイストピッチはそもそもケーブリング時の線材断線リスクも高く、増大する導体剛性によって所定の空隙率やツイストピッチを実現できない可能性がある。さらに、ショートツイストピッチとすることで、導体内の素線には大きな圧縮応力領域がより増大することも報告されている。これらを解決するために、高強度 Nb_3Sn 線材の適用が検討されている。本研究では、神戸製鋼のブラス母材による高強度 DT 法 Nb_3Sn 線材、および古河電工の CuNb 補強 Nb_3Sn 線材に対し、曲げ印加時のクラック観察、I_c 特性測定、EBSD での方位解析・ひずみ解析を用いた材料内部の詳細な組織分析を実施した。これにより高強度化が、特性維持に重要な役割を果たすことを示す[1]。

2. 実験方法

Nb_3Sn 高強度化は、2 つの方法を検討している。一つは神戸製鋼 DT 線材の Cu 母材を CuZn のブラス母材に置き換える方法、もう一つは古河電工ブロンズ法線材の外周 Cu 被覆に、CuNb 補強材を組み込む方法である。Fig. 1 にテストしたブラス母材 DT 線材と CuNb 補強ブロンズ線材の断面写真を示す。試験では、参考のため Cu 母材の DT 線材（ブラス母材線材と同サイズ）も測定した。

本研究では、まず所定の曲率で線材を曲げた際のフィラメントクラック発生挙動について、微細組織観察を実施する。さらに通電試験を実施し I_c の曲げひずみ特性を測る。次に、結晶方位解析（EBSD）のひずみ解析を利用して、マトリクスの内部ひずみ状態やマイクロダイヤモンド圧痕を打ち込んだ際の周囲のひずみ状態を観察することで、ブラス母材や CuNb 補強領域の弾性力を議論する。ひずみ解析では Image Quality（IQ）とともに Grain Reference Orientation Deviation（GROD）を求めた。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に各試料のフィラメントクラック発生の組織写真を示す。DT 線材は比較的クラック発生の曲げ耐性が高く、曲げひずみ 0.38%まではクラックの発生が見られなかった。CuNb 補強線材では ITER 用線材とほぼ同等の曲げ耐性が確認された。(a)と(b)を比較すると、Cu 母材ではクラックが分散して発生するのに対し、ブラス母材ではひとたびクラックが発生すると中心部に向けてクラックが進展する傾向が見られた。これは母材の弾性率に関係すると考えられる。CuNb 補強線材の場合のクラック発生挙動は Cu 母材の状況と近かった。また I_c－ひずみ測定では、DT 線材では I_c ピークまで微増傾向を示した。これは曲げによる残留歪みの緩和が関係していると思われる。耐曲げひずみ特性が ITER 線材と同等ということは高強度化が耐曲げ応力特性の向上に有効であることを示している。Fig. 3 は Cu 母材、ブラス母材、CuNb 領域でのダイヤモンド圧痕周囲の内部歪み分布の GROD マップである。ブラス母材および CuNb 領域では Cu 母材に比べて高い内部歪み（応力）状態が示唆される（カラー版を参照されたい）。これは弾性率が高いことに起因していると考えられる。

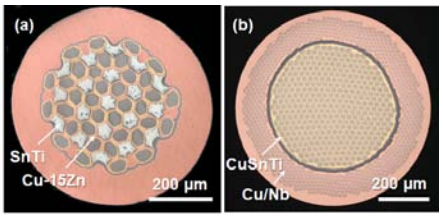


Fig. 1. Cross-sectional SEM images of (a) Kobe brass-matrix DT Nb_3Sn wire and (b) Furukawa CuNb-reinforced bronze Nb_3Sn wire as a candidate for JA DEMO.

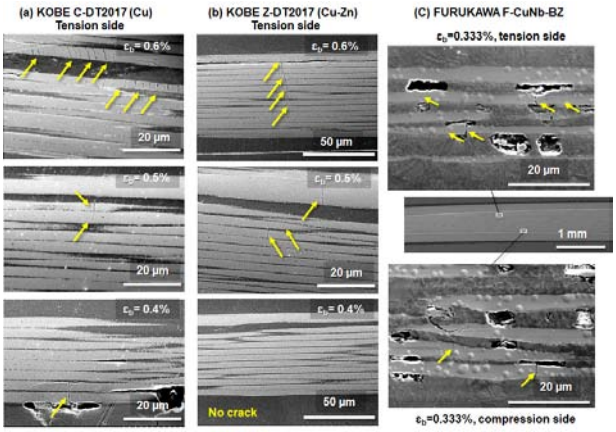


Fig. 2. Crack observation for (a) DT wire with Cu matrix, (b) DT wire with CuZn matrix and (c) CuNb-reinforced wire.

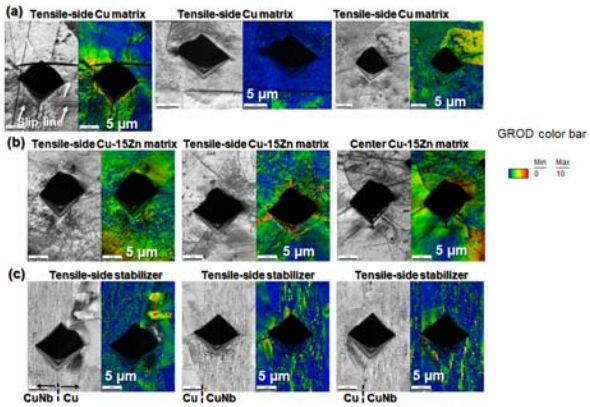


Fig. 3. IQ+GROD maps around a micro-indentation for (a) Cu matrix of DT wire, (b) CuZn matrix of DT wire and (c) CuNb-reinforced area.

本研究はQST原型炉研究開発共同研究の助成を受けた(04K067)。

[1] N. Banno et al., IEEE-TAS, to be submitted. Presented at ASC2022.

金属基板上に成膜された $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 高温超伝導薄膜における格子定数の評価

Evaluation of lattice constants of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ high-temperature superconducting thin films deposited on a metal substrate

赤塚 創多, 中藪 聖弥, 宮田 成紀(玉川大); 栗木 礼二, 中岡 晃一, 衣斐 顕, 町 敬人, 和泉 輝郎(産総研)
AKATSUKA Sota, NAKAYABU Seiya, MIYATA Seiki (Tamagawa Univ).
KURIKI Reiji, NAKAOKA Koichi, IBI Akira, MACHI Takato, IZUMI Teruo (AIST)

1. はじめに

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO)は転移温度 T_cが初めて 77K を超えた高温超伝導体である。イットリウム系の高温超伝導体は、線材加工した際に T_cの低下がしばしば観測されている。特に、人工ピンを導入した際の T_c の低下は顕著に表れる。T_c が下がってしまう理由として格子構造が歪んでいることが原因ではないかと考えられている。単に歪みが原因なら線材加工された YBCO と線材加工されていない YBCO の関係性を議論することで原因が判明しそうだが、線材加工されている YBCO の酸素量が不明なため文献値との比較ができない。

そのため本研究では、T_c の低下と結晶構造の歪みとの関係について調べるため、YBCO 薄膜の *a,b,c* 軸長の評価を行った。

2. 実験方法

YBCO を実用機器に用いるためには、以下の Fig. 1 のような線材形状に加工をする必要がある。本実験で使用する YBCO 線材は金属テープ上に中間層、超伝導層が順に重なっていて、安定化層は成膜されてない。超伝導層が超伝導状態になることで線材が電気抵抗 0 の状態で送電をすることができる。中間層は超伝導層の物質の結晶の向きをそろえるためにある。安定化層は超伝導層の超伝導状態を安定させるためにある。

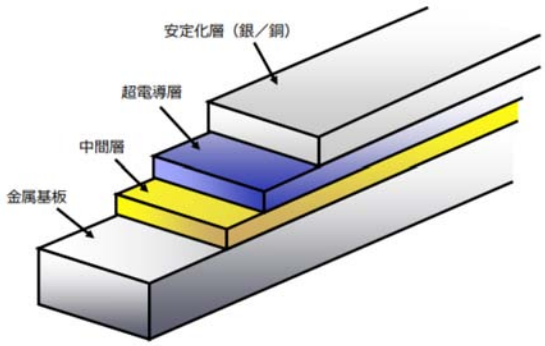


Fig. 1 Structural drawing of a superconducting thin film [1]

今回の測定では YBCO 線材の格子定数と、比較するために線材から削り出した YBCO 粉末の格子定数を測定した。X 線の out-of-plane 法を用いて線材の *c* 軸長、in-plane 法を用いて線材の *a,b* 軸長、粉末 X 線回折法を用いて粉末の *a,b,c* 軸長を測定した。

3. 実験結果

測定した YBCO 線材の格子定数、削り出した YBCO の格子定数、文献より引用した YBCO 粉末の格子定数を c 軸長に対する *a,b* 軸長という形で Fig. 2 にまとめた。線グラフが文献[2]より引用した YBCO 粉末のデータで、各点が、線材状態、削り出した粉末の YBCO の測定値となる。

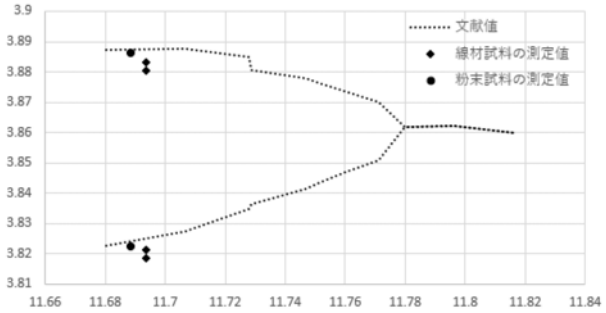


Fig. 2 *a* and *b* vs *c*, for a film and flakes of YBCO

4. 考察

粉末試料の測定結果を見ると文献値に近く、無歪み状態に近いことがわかる。粉末試料は金属基板の影響を受けていない。この結果から、金属基板上に成膜された YBCO において、金属基板が歪を生じさせる原因である可能性が高いと考えられる。

したがって粉末試料の測定結果を基準とすると線材の格子定数は *a,b* 軸方向に縮小し、*c* 軸方向に伸長している。これは、薄膜の平面方向に圧縮方向の応力が発生していて、その分束縛されていない *c* 軸方向に伸長したと解釈できる。

また、今回の測定で得られた線材試料と削り出した粉末試料の格子定数から歪み値を算出し、その数値と文献[3],[4]より引用した dT_c/dP と弾性スティフネス定数のデータを元に Tc の変化量を

$$\Delta T_c = \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_1}\varepsilon_1 + \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_2}\varepsilon_2 + \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_3}\varepsilon_3$$

を元に算出した。

参考文献

[1] MIYATA Seiki, Briefing paper for the Tokai-section Joint Conference on Electrical, Electronics, Information, and Related Engineering (2014).
[2] J. D. Jorgensen, B. W. Veal, A. P. Paulikas, L. J. Nowicki, G. W. Crabtree, H. Claus, and W. K. Kwok, Phys. Rev B41, 1863 (1990).
[3] U. Welp, M. Grimsditch, S. Fleshler, W. Nessler, J. Downey, G. W. Crabtree, and J. Guimpel, Phys. Rev. Lett. 69, 2130 (1992).
[4] M. Lei, J. L. Sarrao, W. M. Visscher, T. M. Bell, J. D. Thompson, A. Migliori, U. W. Welp, and B. W. Veal, Phys. Rev. B 47, 6154 (1993).

極細多芯化を目指した REBCO 薄膜線材の開発 2

Development of REBCO coated conductors for ultra-fine multifilament 2

松本 明善、 立木 実、 大井 修一(NIMS)、寺西 亮(九大)、土井 俊哉(京大)、大保 雅載、飯島 康裕(フジクラ)、井上 昌睦(福工大)

MATSUMOTO Akiyoshi, TACHIKI Minoru, OOI Shuuichi (NIMS), TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.), DOI Toshiya(Kyoto Univ.), DAIBO Masanori, Iijima Yasuhiro(Fujikura Co.), INOUE Masayoshi(Fukuoka Ins. Tech.)

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

1. はじめに

REBCO 超電導体は低温および高磁場条件下の超電導磁石や、電力機器への適用が期待されており、多くの企業から製品化された線材が供給されている。一方で、現在市販されている素線となる超電導線材はテープ形状をしており、薄い金属板上に何層ものバッファー層を堆積させ、配向度を整えたうえで蒸着等による薄膜成膜手法で作製されている。このような平板上に作製された超電導膜は結晶軸がほぼ 3 軸に整った単結晶に近い構造を有し、高い臨界電流密度特性を有している。我々はこれまでにREBCO層形成前の基板に構造体を意図的に導入し、バリア層として機能させることで、極細多芯化した REBCO 薄膜線材の創製を目的とした研究を行ってきており、その可能性を示すことが出来た[1,2]。本研究ではさらなる可能性を検討するために金属基材上への成膜やバンク構造の材質を変化させた。

2. 実験

本研究ではバリア層を形成させるための構造を便宜上バンク構造と呼ぶ。このバンク構造を STO 単結晶基板上や金属基材上にリソグラフィー技術によって形成させる。本研究では金属基板上への成膜や STO 基板上へ種々のバンク材質を変化させたパターン形成を行った。その後、その基板にパルス・レーザー蒸着法によってYBCO超電導膜を堆積させた。得られた超電導薄膜については組織観察等によって目的とした組織が得られているか確認するとともに超電導特性については磁気光学像を用いて超電導相の形成の確認及び非超電導相による分割の可能性を確認した。

3. 結果および考察

Fig.1 にバンク構造無しで成膜したものと Zr や Ag のバンクを入れて成膜した後の YBCO パターン薄膜のＸ線回折図形の比較を行った結果を示す。作製された薄膜においてはいずれも大きなピークの変化は見られず、バンク構造の材質が変化しても YBCO が成膜できることを示している。また、超電導特性として MO による観察を行ったところ、いずれの膜においても超電導層が Zr や Ag のバンクのところで分断されていることが確認できた。さらに STO 基板以外に IBAD 基板や低コスト用金属基板上においてもパターンを作製することが出来、いずれも超電導層と非超電導層を分断することが出来ることを確認できた。さらに Zr と Ag のそれぞれのバンク構造を有する薄膜において断面 TEM 観察を行ったところ、Zr 上には YBCO が形成されるが、結晶成長方位が異なること、Ag 上では STO 基板上とは異なる成長が見られる事がわかった。

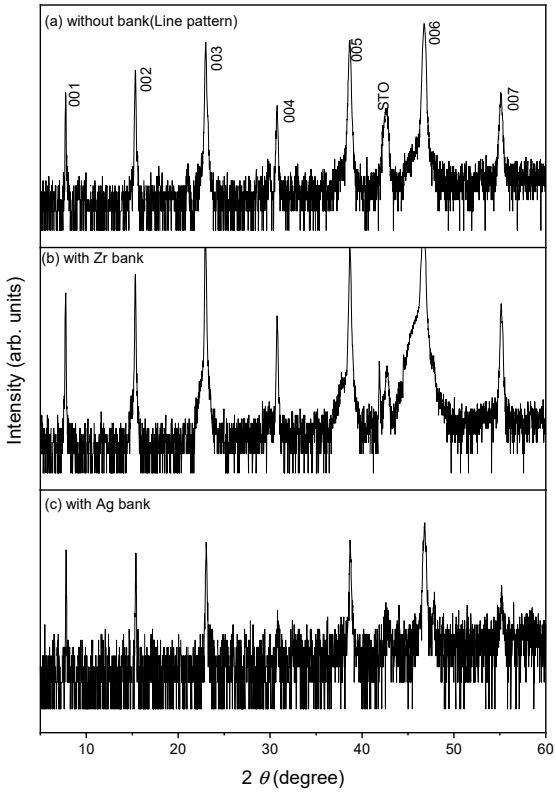


Fig.1 XRD pattern of the YBCO thin film on (a) without Zr bank line, (b) with Zr bank line, and (c) with Ag bank line. 00l peaks of YBCO were observed from the two thin films.

4. 結言

リソグラフィー技術を用いてREBCO層の成膜前基板にパターンを作製し、成膜を行った。種々のバンク構造を作り出すことができ、金属基材上にもパターンを施すことができ、極細多芯化の可能性を示すことが出来た。

謝辞：本研究の一部は公益財団法人池谷科学技術振興財団に助成を頂いた。

[1] A. Matsumoto et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.18

[2] H. Fujimoto et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.19

Zr をパターニングした基板上に形成した REBCO 薄膜の臨界電流特性

Critical current properties of REBCO thin films on Zr-patterned substrate

酒井 秀哉（福岡工大）; 松本 明善（NIMS）; 井上 昌睦（福岡工大）
SAKAI Shuya (Fukuoka Inst. Tech.); MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
E-mail: mem21108@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

交流損失低減のために $REBa_2Cu_3O_y$ (REBCO) 線材の細線化が検討されている。細線化の手法として，幅広線材を作製した後にスリット刃やレーザーを用いての切断方法があるが，これらの手法では切断部付近の超電導層にダメージを与えてしまうため，細線化できる幅に限界がある。極細多芯化の方法の一つとして，フォトリソグラフィー技術を用いて基板上にバンクと呼ばれる線状の金属 (Zr, Nb 等) をパターニングし，その後 REBCO を成膜する手法が提案されている [1], [2]。この線状の金属がバリア層として機能させることで極細多芯化を実現しようというものである。本研究では，Zr を線状にパターニングした $SrTiO_3$ (STO) 基板に REBCO を成膜した試料の臨界電流特性を調べるために，物理特性測定システム (Physical properties Measurement System, PPMS) による臨界温度 (T_c) 測定，磁場中臨界電流密度 (J_c) 測定及び，走査型ホール素子磁気顕微鏡 (Scanning Hall-Probe Microscopy, SHPM) による面内 J_c 分布測定を行った。

2. 実験方法

本研究で用いた試料は，Fig. 1 に示すような手順で作製した。まず，5 mm 角の STO 基板上に中央で二分割するように，幅 20 μm，高さ 300 nm の Zr をスパッタリングにて形成した。Fig. 2 にレーザー顕微鏡による Zr バンクの形状測定結果を示す。所望のバンクが形成されていることが確認できた。その後，REBCO をパルスレーザー蒸着法にて成膜した。この試料に対して，PPMS にて T_c を測定後，磁場中 J_c 測定を実施した。磁場中 J_c 測定では温度，磁場範囲を 60～80 K，±3 T，磁場掃引速度を 100 Oe/s とした。次に，SHPM にて捕捉磁場分布を測定し，面内 J_c 分布を求めた。捕捉磁場分布は試料を液体窒素にて冷却し，永久磁石にて磁化させた後測定した。面内 J_c 分布は，得られた磁場分布から求めている。

3. 結果と考察

T_c 測定の結果を Fig. 3 に示す。今回の試料の T_c は 86.9 K であった。SHPM による捕捉磁場分布，面内 J_c 分布を Fig. 4 に示す。捕捉磁場分布から，試料の中央付近のバンクを境に 2 つの捕捉磁場が形成されていることが確認できる。面内 J_c 分布をみると，バンク付近で反対向きの電流が流れており，Zr バンクにより成膜後の加工無しに超電導膜を分断できていることが分かる。このことは，J_c 分布において見かけ上 J_c が零となるヌルラインが試料中央付近で 3 箇所見られていることからも確認できる。一方で，試料の外周に沿って比較的大きな電流ループが形成されているように見える。これは，バンクが試料端部でうまく形成されていないためであると考えられる。

当日では，REBCO 膜の磁場中 J_c 特性，その他詳細について発表を行う予定である。

謝辞

本研究で作製したデバイスの作製行程の一部は NIMS 並木ファウンドリにて行った。また，本研究の一部は NIMS の Joint Research Hub Program, JSPS 科研費 JP22H02021 の支援により得られたものである。

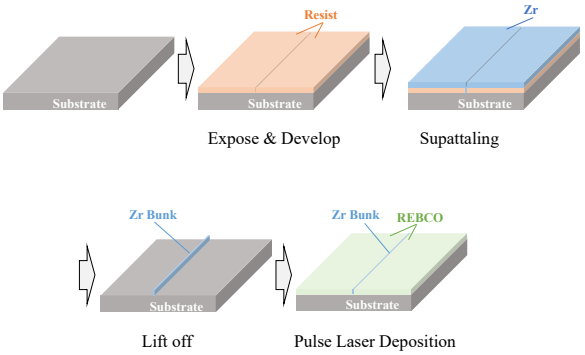


Fig. 1 Schematic of REBCO thin film on bank-patterned substrate.

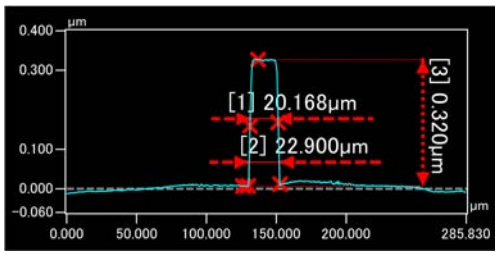


Fig. 2 Shape measurement of Zr bank by laser microscopy.

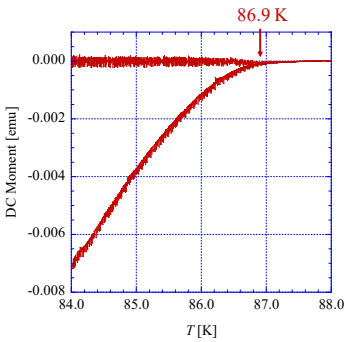


Fig. 3 Temperature dependence of DC magnetization.

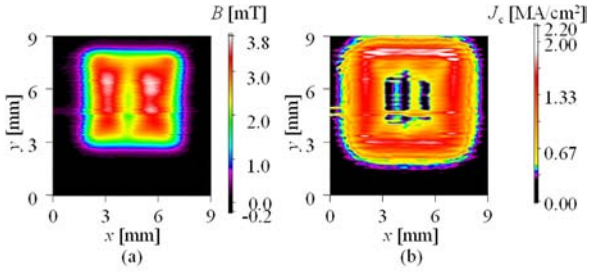


Fig. 4 (a) Magnet field distribution and (b) J_c distribution of REBCO thin film on a bank-patterned substrate.

参考文献

[1] A. Matsumoto, *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 18.
[2] H. Fujimoto, *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p. 19

浸漬法による溶融水酸化物法 RE-Ba-Cu-O 膜の膜厚制御

Control of film thickness for molten hydroxide method RE-Ba-Cu-O films via dipping process

舩木 修平, 河田 浩一郎, 豊嶋 健瑠, 山田 容士(島根大学)
Funaki Shuhei, KAWATA Koichiro, TOYOSHIMA Takeru, YAMADA Yasuji (Shimane Univ.)
E-mail: s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_y$(RE123)は高い T_c 及び磁場中 J_c を有することから, マグネット応用に向けた長尺線材の研究が盛んに行われている. しかしながら, 成膜に真空かつ高温環境が必要であるだけでなく, 超伝導層成膜時の高温環境によって生じる基板からの金属元素拡散を防止するために, 幾層にもおよぶ中間層も必要であることから, 製造コスト, 材料コストの低減が困難である.

我々は, 水酸化カリウム(KOH)を溶剤に用いた溶融水酸化物法を提案し, 大気圧下において 600ºC 程度の低温下で単結晶基板上に RE-Ba-Cu-O を成膜してきた. 本手法は, 超伝導層を低温下で形成できるため, 線材応用において中間層の層数の減少が期待できる. そしてこれまで, 単結晶基板上ではあるが, 大気中で作製した $Y_{0.9}Ca_{0.1}Ba_2Cu_4O_8$ (YCa124)膜[1], 及び窒素気流中で作製した Y123 膜[2]が T_c ～90 K を示すことを確認してきた. しかしながら, これまでの手法は原料溶解直後の過渡状態において形成していたため, 安定な結晶成長が困難であり, 膜厚の不均一性や厚膜化によるクラックによって通電 J_c の評価は不可能であった. そこで本研究では, 溶融水酸化物法 RE-Ba-Cu-O 膜の結晶成長の安定化によって膜厚を制御することを目的として, 温度差をつけた定常状態の溶液を用いた浸漬法による結晶成長を試みた.

2. 実験方法

原料として RE_2O_3, $BaCO_3$, CuO を目的の金属モル比となるように秤量・混合し, KOH とともに大気中においてアルミナ坩堝内で溶解させ, 溶液の底が高温, 液面が低温となるよう, 深さ方向に温度差をつけた. 原料溶解直後の溶液, また十分に時間が経った後の溶液に, 基材として各種単結晶基板や, $LaAlO_3$ (LAO)基板上に PLD 法で Sm123 薄膜を堆積させた種結晶(PLD-Sm123 薄膜)を浸漬させた. 溶液から取り出した試料に付着している K 由来の水酸化物, 炭酸塩を水およびエタノールで除去し, 試料を得た.

結晶相及び結晶配向性を XRD 法により, 表面状態を顕微鏡観察により, 超伝導特性を直流 4 端子法により評価した.

3. 結果及び考察

図 1 に, 溶液の底の温度が 830ºC, 液面の温度が 710ºC で十分に時間が経った後, つまり定常状態の KOH+Y124 溶液の液面付近に PLD-Sm123-seed/LAO を浸漬して得られた試料の XRD 2θ-θパターンを示す. PLD-Sm123-seed が溶解することはなく, seed 上に Y124 膜が成長することが分かった. さらに XRD ϕ-scan の結果から, Y124 膜は PLD-Sm123-seed 上に面内配向を有して成長していることも確認した. また, 図 2 に示す同試料の R-T 測定結果から, 93 K と 76 K の 2 段階転移が観察された. このことからも, PLD-Sm123 薄膜(93 K)の上に Y124(76 K)膜が成長していることが確認された. なお, Y124 相の T_c が典型的な値(80 K [3])に比べて低いが, これは Sm124 相の T_c が 69 K [3]と低いことを考慮すると, seed の Sm が 124 相に拡散し, Y124 に比べて T_c の低い YSm124 相が形成されたためだと考えられる.

また, 複数回の成膜において, 昇温完了直後, つまり原料溶解直後の溶液にくらべ, 十分に時間が経った溶液から成長させた Y124 膜は XRD のピーク強度が低い傾向が確認された. これより, 原料溶解から時間が経つと過飽和度が安定し, Y124 相が一定のレートで成長すると考えられる. 以上の結果から, 浸漬時間を変えることで, 膜厚制御が可能であると期待できる. しかしながら, 大気中における成膜は, CO_2 と反応し Ba や K を含んだ炭酸塩を生成することで溶解度が変化することから, 長時間の連続的な成長には C フリーな環境での成膜が望まれる.

謝辞

本研究における PLD-Sm123-seed/LAO は名古屋大学の吉田 隆先生からご提供いただいたものである. この場を借りて, 厚く御礼申し上げます.

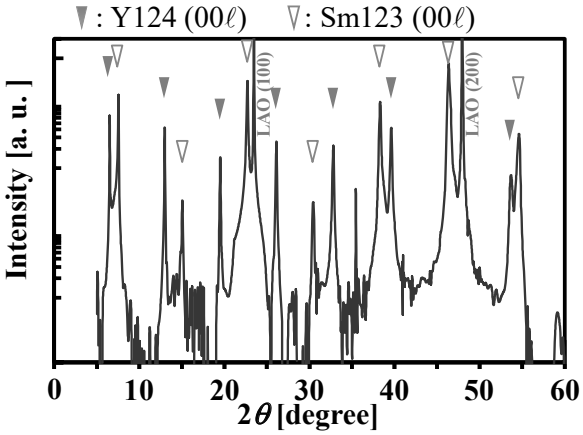


Fig. 1 XRD 2θ-θ pattern of Y124 / PLD-Sm123-seed / LAO sub. sample via steady-state dipping process

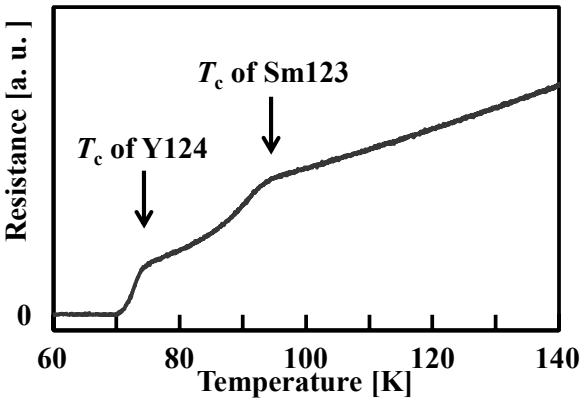


Fig. 2 R-T curve of Y124 / PLD-Sm123-seed / LAO sub. sample via steady-state dipping process

参考文献

1. S. Funaki, et al.: Phys. Proc., Vol. 27 (2012) p. 284
2. S. Funaki, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55 (2016) 04EJ13
3. D. E. Morris, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 40, No. 16 (1989) p. 11406

BSCCO 超伝導線材の断面組織観察

Cross-sectional microstructural observation of BSCCO superconducting wire

梶田　慎也（大同大），町屋　修太郎（大同大）；長村　光造（応用科学研究所）

KAJITA Masaya, MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); OSAMURA Kozo (RIAS)

E-mail: dmm2107@stumail.daido-it.ac.jp

1. はじめに

曲げを受ける場合の BSCCO の強度は、それ自体が長方形ではなく中央部が膨らんでいる形状やフィラメントの形状やその分布に依存しているため、フィラメントの分布を定量的に求めることは非常に重要である。そこで BSCCO 超伝導線材の断面を 47 点に分割しフィラメントの厚み、数、位置情報の解析を行った。

2. BSCCO 超伝導線材の画像解析方法

実際に画像解析で使用したものが Fig. 1 である（厚さ約 0.21mm，横幅約 4.1mm）。Fig. 1 を 90° 回転させたものが Fig. 2 である。Fig. 2 を画像解析ソフトウェア Figi を使用し幅 180 ピクセルの長方形を 900 ピクセルずつ移動させ、合計 47 点において、長方形内の縦方向のピクセル合計値のグレースケール値を計測し記録した。解析ソフトウェア Igor のマルチピークフィッティング機能を用いてグレースケール値から半自動で Voigt 関数でのフィッティングを行った。これにより、関数の半値幅（FWHM）からフィラメントの厚さの評価が可能と考えた。また同時に厚み方向のフィラメント数とその位置情報を得た。Fig. 3 はグレースケール値からフッティングを行った一例である。ピークの半値幅によりフィラメントの厚さ相当のデータを取得し、ピークの位置によりフィラメントの出現位置を解析した。

3. 結果と考察

フィラメントは中心に向かうにつれ数が増えていく傾向にあるが、必ずしも中央の方が多いとは限らないことが分かった。また、フィラメントの数が多いところではフィラメントの層の幅が小さいものも多く存在した。

Igor の解析において無理やり綺麗な谷を近似線で作り出しているため、本来のフィラメント層の幅が厳密に解析できていないのは今後の課題である。

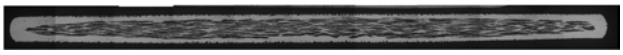


Fig. 1 BSCCO cross-sectional.

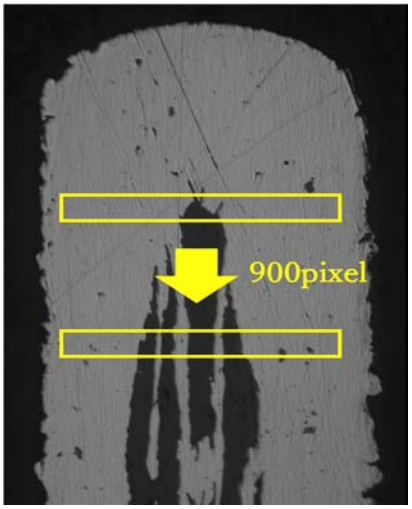


Fig. 2 BSCCO cross-sectional image 90 degrees Rotation.

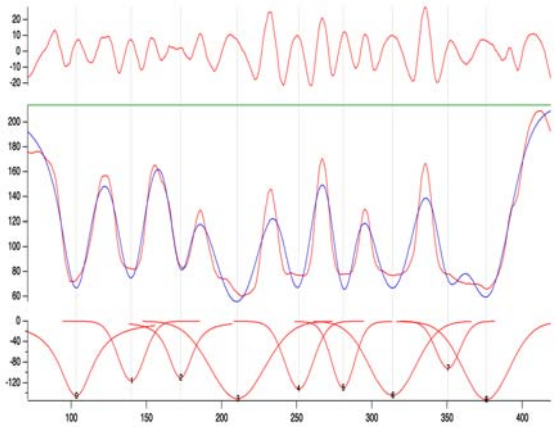


Fig. 3 Example of Multipeak Fitting

スケルトンサイクロトロンを想定した 無絶縁 REBCO マルチコイルの熱的安定性

Thermal stability of No-Insulation REBCO Multi-coil assuming a skeleton cyclotron

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

1. はじめに

超電導コイルの開発において二律背反の関係にある、高電流密度化と高熱的安定性を同時に実現する無絶縁(NI)コイルが注目されている。しかし、NI コイルではターン間の絶縁層を取り除いたことにより転流が起こる。この転流によって周方向に流れる電流が変化し、劣化発生以外のコイルにまで影響が及ぶ可能性がある[1]。本研究では、スケルトンサイクロトロンへの応用を想定して、口径の異なる NI-REBCO パンケーキコイルからなるマルチコイルシステムについて、1つのコイル内に局所的な劣化が発生した場合における電磁的・熱的解析を行ったのでその結果を報告する。

2. 解析方法

本研究で対象としたコイルシステムの諸元および解析条件を Table.1 に示す。スケルトンサイクロトロン実機の 1/2 スケールモデルである UBSC(Ultra-Baby Skelton Cyclotron)を想定してコイル特性、解析条件を設定している。今回は内径140mm、および600mmの2つからなるマルチコイルについてコイルの一部に局所的な劣化が発生した場合を解析対象とし、先行研究で妥当性が確認されている PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)モデルをマルチコイル用に拡張したものによる電流分布解析と二次元有限要素法に基づく熱解析の連成プログラムを使用した[2]。この時、層間電気抵抗の値、局所的劣化の箇所や個数を変えて解析を行った。

3. 解析結果

例として層間電気抵抗が $2.0\times10^{-3}\,\Omega\cdot cm^2$、小口径(140mm φ)コイルの 25 ターン目に 1/8 周にわたって劣化が発生した場合の解析結果について報告する。Fig.1, Fig.2 はそれぞれ発熱量とコイル最大温度の時間変化、コイル両端電圧と中心磁場の時間変化について示したものである。発熱は転流による発熱 QPASS、銅安定化層における発熱 QMT、超電導層における発熱 QSC、総発熱 QSUM を考えている。Fig.1 より、コイルの総発熱量は 15W 程度で継続して発熱していることが確認できる。しかし、コイル最大温度に着目すると 0.5 秒以降はほとんど変化せず、温度上昇は最大で 2.16K に抑えられていることが分かる。コイルが熱暴走に至らなかった要因としては、転流によって劣化部での発熱をコイル全体に分散させ許容できたこと、発熱量が冷凍性能を下回ったことが考えられる。また Fig.2 より、劣化のある小口径コイルに電圧が発生した影響を受けて中心磁場がわずかに減少するものの、大口径(600mm φ)コイルにはほとんど影響がみられないことが分かる。

発表当日は、いくつかの条件におけるコイル両端電圧、中心磁場、発熱量、最大温度の時間変化について解析結果を示す。その際、局所的劣化が NI-REBCO マルチコイルのコイル間相互作用や熱的安定性に及ぼす影響について報告する。

本研究は、科研費(基盤 S:18H05244)によった。

Table.1 Parameter and value for analysis

Parameter	Values
REBCO conductor	
Overall width[mm]	6.00
Copper stabilizer thickness [μm/side]	20
Tape Ic @77K, self-field[A]	250
NI-REBCO Coil	
Turns per pancake	50
Inner diameter (i.d.)[mm]	140, 600
Turn-to-turn contact resistance [Ω・cm²]	2.0×10^{-3}, 2.0×10^{-4}
Analysis condition	
Operating current Iop[A]	940
Iop/Ic[%]	70
External magnetic field in the z-direction[T]	1.6
Operating temperature[K]	30
Cooling condition	Conduction cooling (64W @30K)

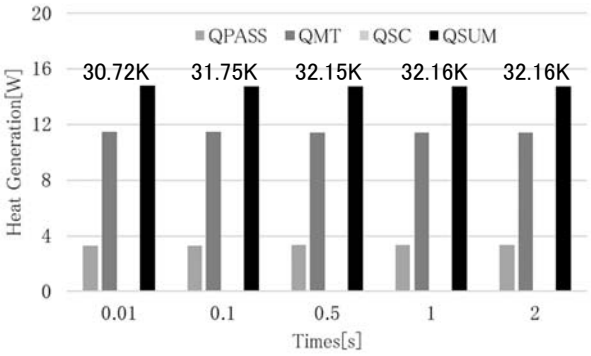


Fig.1 Heat Generation and Temperature in coil

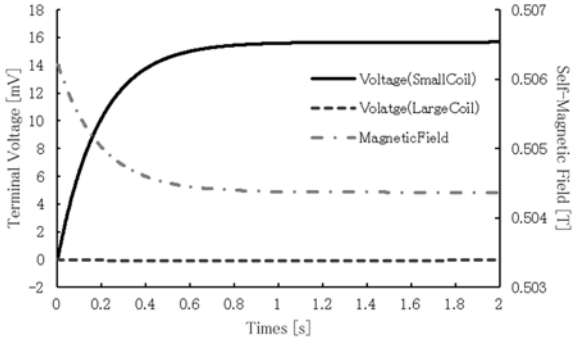


Fig.2 Terminal Volatge and Magnetic Field trace

参考文献

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

「スケルトン・サイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発：小型実証 REBCO コイルシステムの製作

Development of REBCO coil system for Skeleton Cyclotron: Manufacturing of a small demonstration REBCO coil system

熊谷 塁、糸日谷 浩平、小久保 早希、石山 敦士（早大）；植田 浩史（岡山大）；野口 聡（北大）；福田 光宏（阪大）
KUMAGAI Rui, ITOHIYA Kohei, KOKUBO Saki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
UEDA Hiroshi (Okayama University); NOGUCHI So (Hokkaido University); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka University)
E-mail: kmgi_ri@ruri.waseda.jp

1. はじめに

近年、α 線核医学治療の遠隔転移等の進行がんへの有効性が期待されていることから、研究・開発が国内外で進められている。我々が α 線放出核種として想定している ^{211}At は、α 線の飛程と平均エネルギーが約 55μm と 6.8MeV であり、標的となるがん細胞のみを効果的に破壊することができる。しかし半減期が 7.2 時間と短く、病院内あるいは近隣での生産施設が必要となる。そこで我々のグループでは、^{211}At を安定的に製造できる超小型・高強度の加速器として「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン(HTS-SC)」の開発を目指している[1]。そして HTS-SC の出力エネルギーを可変（世界初）とするため複数の空芯の REBCO コイルのみでビーム加速に必要な磁場を形成する。さらに、5-High 基盤技術 (高磁場化・小型化、高磁場精度化、高機械強度化、高熱的安定化、高電流密度化)を統合した新しいコイル化技術を確立し、HTS-SC 用の REBCO マルチコイルシステムに適用する予定である。その前段階として、HTS-SC の 1/2 スケールの小型実証用モデルである Ultra-Baby-Skeleton-Cyclotron(UBSC)用 REBCO コイルシステム(Fig.1)を設計・製作した。このコイルシステムには YOROI コイル構造[2]と無絶縁（NI）コイル巻線技術[3]が導入されている。前者は、強い電磁力によるコイル巻線の劣化やコイルの変形を防ぎ、高機械強度と高精度磁場を実現する。後者は、巻線間の電気絶縁層をなくすことで、局所的に常電導転移が起こった際には隣接する健全な層（ターン）に電流を自動的に転流させることが可能である。また、銅層（安定化層）を巻線間で共有することで銅層を薄くすることができる。これにより、高熱的安定化と高電流密度化の両立が可能になる。

2. 設計

UBSC では加速粒子として陽子を想定し、取出し半径は 200mm とした。実機 HTS-SC では 3 段階に出力エネルギーを変える運転を目指す。すなわち同一システムで ^{211}At 製造、PET 用 RI 製造、BNCT 用中性子照射の 3 用途で使用可能（多機能化）とする予定である。そこで UBSC でも出力エネルギーと通電電流を Table1 に示す 3 段階の運転の可能性を検証する。ビーム加速に必要となる磁場を発生するために設計最適化したセンターコイル、メインコイル、セクターコイルのコイル形状と位置を Fig.2 に、コイル諸元を Table2 に示す。

3. 製作

製作した NI-REBCO コイルシステムを Fig.3 に示す。これを真空断熱容器内に置き、GM 冷却機による伝導冷却により冷却した。冷却に約 10 日を要したが、コイル内の温度差は常に 5K 以下に保たれほぼ均等にコイル全体を 5K 以下まで冷却することができた（今後は温調により 20K～30K 運転予定）。今回はすべてのコイルを直列に接続し、最大 540A の直流電流を流す予定である。今後、同コイルシステムを用いて、通電・励磁試験を進めていく予定である。詳細は当日報告する。

本研究の一部は、科研費基盤研究 S(18H05244)に依った。

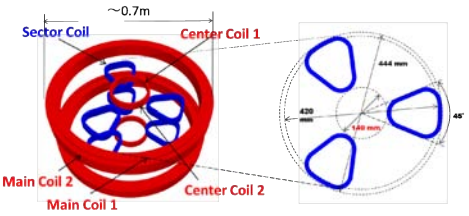


Fig.1. UBSC

Table1. Output Energy and Operating Current

	^{211}At	PET用RI	BNCT用中性子照射
Energy (MeV)	5	4	2.5
I_{op} (A)	540	483	382

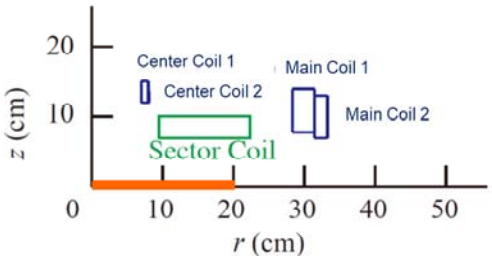


Fig.2. Coil Shape and Position

Table2. Coil Specifications

コイル種類	センターコイル 1	センターコイル 2	メインコイル 1	メインコイル 2	セクターコイル
内径(mm)	70.00	80.10	281.13	314.37	非円形
外径(mm)	79.80	80.94	314.33	332.63	非円形
底面座標(mm)	120.00	120.01	78.79	70.12	70.00
上面座標(mm)	150.00	135.01	138.79	130.12	100.00
ターン間 SUS 厚(mm)	0.096	0.005	0.680	0.258	0.1125
ターン数	50	8	40	51	60
DP コイル数	2	1	4	4	2
電流密度 (A/mm^2)	367	686	92	201	424

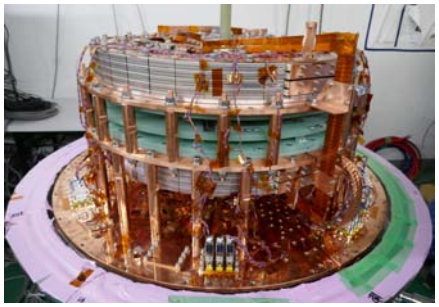


Fig.3. NI-REBCO Coil System for UBSC

参考文献

1. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.29, 4101105 (2019)
2. T.Watanabe et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, 8400204 (2015)
3 S.Hahn et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.21 (2011) pp.1592-1595

機械学習による大型超伝導マグネットシステムの状態予測モデル開発

Development of the state prediction model for a large superconducting magnet system by machine learning

尾花 哲浩(NIFS)
OBANA Tetsuhiro (NIFS)
E-mail: obana.tetsuhiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合実験装置の中核機器である超伝導マグネットシステムの高信頼性を実現するために、システムの状態を予測する機械学習モデルの開発を進めている[1]。本モデル開発では、大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導ヘリカルコイル用サブクールシステムの運用で蓄積された様々なパラメーターを、機械学習モデルのための訓練データとして活用した。

本講演では、コイル通電時に生じるサブクールシステム内での温度変化に関する機械学習モデルの詳細、及び予測値について報告する。

2. 機械学習モデル

LHD サブクールシステムでは、ヘリカルコイルの励減磁時において、システム内で温度変化が生じる。そこで、コイル励減磁によるコイル容器、及びコイル出口配管の温度変化を予測する機械学習モデルを検討した。

モデルは、入力層・中間層・出力層からなるネットワーク構造であり、中間層は長短期記憶(LSTM)で構成され、出力層は二乗誤差関数から構成される。モデルの入力パラメーターは、ヘリカルコイルを構成する3つのコイル巻線部(H-I,H-M,H-O)の各電流値と冷媒の質量流量である。また、出力パラメーターは、コイル容器温度と出口配管温度である。

3. 訓練データ

LHD プラズマ実験の第20サイクルと第21サイクルで得られた測定結果を訓練データとして使用した。Table1に、訓練データとして使用した実験日の詳細を示す。各データは、コイル励減磁時を含む22時間毎の温度、コイル電流、質量流量で構成される。Fig.1にコイル(H-I)電流の訓練データを示す。また、出口配管温度の訓練データをFig.2に示す。出口配管温度は、コイル励減磁時に発生する交流損失により急速に上昇し、その後、徐々に低下する傾向である。Fig.3に冷媒の質量流量の訓練データを示す。質量流量は測定時間ごとの変動が比較的大きいため、10分ごとの平均値を訓練データとして使用した。

4. モデル評価

モデル評価では、コイル巻線の各電流値と冷媒の質量流量をモデルに入力し、出力される出口配管温度とコイル容器温度の予測値と測定値を比較した。評価データは、LHDプラズマ実験の第21サイクル(2020年1月24日)の測定データを用いた。その結果、Fig.4に示すように、出口配管温度とコイル容器温度に関して、予測値と測定値がよく一致していることを確認した。

Table 1 LHD plasma experimental days used as training data for the modeling.

Campaign	Year	Month	Day
20	2018	Oct.	23, 24, 25, 30, 31
		Nov.	1, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 20, 21, 27, 28, 29
		Dec.	4, 5, 6, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 25
	2019	Jan.	8, 9, 10, 16, 17, 22, 23, 24, 29, 30
		Feb.	5, 6, 7, 13, 14, 19, 20
21		Oct.	9
		Nov.	14, 19, 20, 21
		Dec.	3, 4, 5, 11, 17, 18, 19, 20, 24, 25,26
	2020	Jan.	7, 8, 10, 15, 17, 21, 22, 23, 28, 29, 30
		Feb.	4, 5

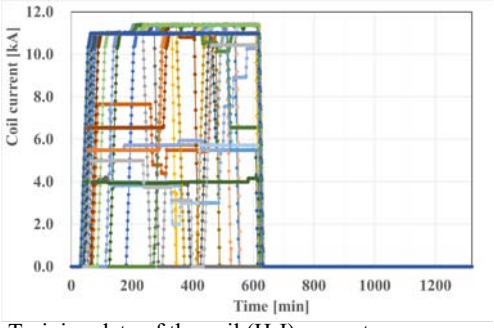


Fig.1 Training data of the coil (H-I) current.

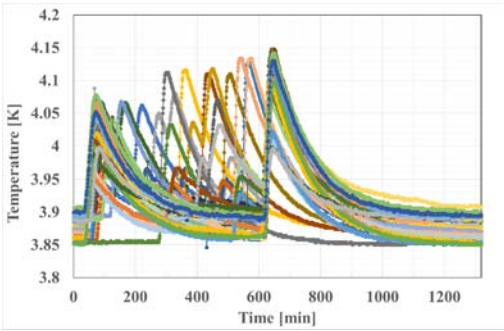


Fig.2 Training data of the temperature at the outlet pipe.

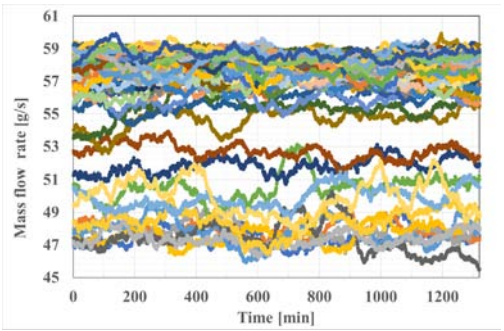


Fig.3 Training data of the mass flow rate of refrigerant.

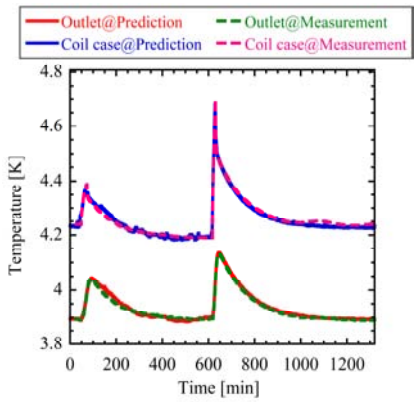


Fig.4 Comparison between the prediction and the measurement for temperatures at the outlet pipe and coil case.

参考文献

1. T. Obana: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.40

次世代超電導マグネット機器向け REBCO 集合導体の開発

Development of REBCO assembled conductors for next-generation superconducting magnet devices

生田 勝利、中西 啓太、西山 諒、大屋 正義(関西学院大)
IKUTA Shohri, NAKANISHI Keita, NISHIYAMA Ryo, OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.)
E-mail: shohri1231@kwansei.ac.jp

1. はじめに

次世代超電導マグネット機器に必要な数 kA 級の REBCO 大電流集合導体の設計・製造技術を開発している。これまでに、様々な線材を用いてスパイラル曲げ試験を行い、線材の歪みと *Ic* 維持率の関係を明らかにしてきた。今回は、線材 3 枚を用いた 1 層導体を製作し、通電特性を評価した結果について報告する。今後は、層数と本数を増やし、集合導体の曲げ試験や側圧試験を行う予定である。

2. 集合導体

発電機、核融合、加速器など、高温超電導線材を用いた様々な次世代超電導応用機器開発が進められている[1, 2]。これらの製作には数kA級の大電流導体が必要となるが、1本の線材に数 kA の電流を流すのは困難であり、複数本の線材を束ねた集合導体構造となる[3]。しかし、市販されている集合導体は少なく、機器設計から要求される仕様に対して導体設計をリアルタイムに最適化するのは難しい。このため、我々は集合導体の設計・製造に関わる基礎技術の独自開発を開始した。本発表では、1 層導体の通電試験結果について報告する。

3. 1 一層導体製作

使用した REBCO 線材の断面図を Fig. 1 に示す。基板厚は 40 μm、銅メッキ厚は 10 μm である。所有する 130 A 電源を用いて導体の通電試験を行えるように、臨界電流(*Ic*)が 25 A と低い線材を特注した。本線材を用いて製作した 1 層導体の諸元を Table 1、概要図を Fig. 2 に示す。銅フォーマーの直径は 6 mm、スパイラルピッチは 21 mm、隣り合う線材同士のギャップは 1 mm、電圧タップ間距離は 28 cm である。なお、線材の超電導面は内向きに巻いた。3 本の線材(No. 1, 2, 3)に対して導体両端で一括の端末処理を行い、電圧タップはそれぞれの線材に取り付けた。

3. 2 通電試験の結果・考察

製作した 1 層導体を液体窒素で冷却し、スイープ速度 0.5 A/s で通電したときの *I-V* 波形測定結果を Fig. 3 に示す。線材 No. 1, 2 の電圧が最初に立ち上がり、69 A 通電時に 1 μV/cmに到達した。線材 No. 3 の電圧は遅れて立ち上がり、72 A 通電時に1 μV/cm に到達した。本結果は、端末接続抵抗の差異に起因して通電電流が均等に分流していないことを示唆している。各線材に流れる電流に偏りがなければ 75 A まで通電できるが、線材 No. 1, 2 への分流が多いために先に電圧が立ち上がり、69 A 以上通電すると焼損した可能性もある。超電導面を内向きに巻いているため、線材とフォーマーのはんだ接続を適切に行うことが重要と考えており、1 層導体の解体調査を行って今後の端末処理方法の改善する予定である。

4. まとめ

次世代超電導機器に必要なREBCO大電流集合導体の設計・製造技術を開発している。1 層導体を製作して通電試験を行った結果、各線材の *I-V* 波形に差異が生じた。終端接続部のはんだ処理に起因する偏流の発生が原因と推定する。終端接続方法を改善した後、層数と本数を増やし、集合導体の曲げ試験や側圧試験を行う予定である。

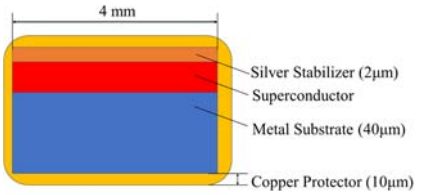


Fig. 1 Cross-sectional view of REBCO wire

Table 1 Specifications of single-layer conductor

Items	Values
Former diameter (mm)	6
Distance between voltage taps (cm)	28
Spiral pitch (mm)	21
Gap between wires (mm)	1
Wire Ic (A)	25

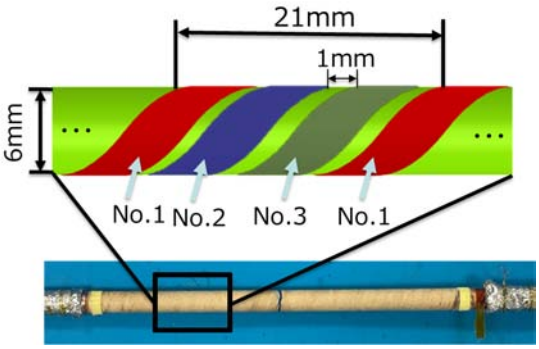


Fig. 2 Structure of single-layer conductor

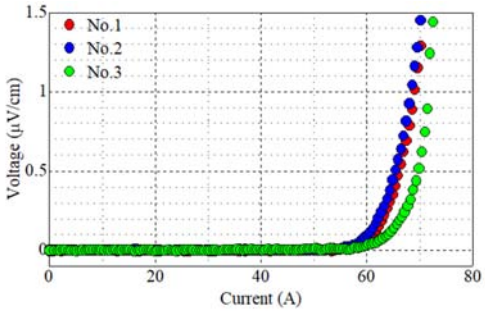


Fig. 3 Measured *I-V* characteristic of single-layer conductor

謝辞

この成果は、JKA の助成事業の結果得られたものです。

参考文献

1. M. A. Green.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18 (2008) p.248-251
2. S. Imagawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) #4604605
3. D. C. van der Laan, et al.: Supercond. Sci. Techonol., Vol. 22 (2009) #065013

ミッションプロファイルに基づく航空機用高温超電導ケーブルの交流損失解析

AC loss analysis of aircraft HTS cable with flight mission profile consideration

呂 高泰, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)
LYU Gaotai, TERAO Yutaka and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)
E-mail: lyu.gaotai22@ae.k.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

The application of superconducting technology to aircraft can solve the serious environmental problems caused by the exhaust and noise of traditional aircraft and improve the performance of aircraft. In order to cooperate with aircraft electrification, superconducting cables used in aircraft DC and AC power systems have been studied in recent years. To analyze the electromagnetic field and feasibility of the high temperature superconducting (HTS) cable during the flight period, this study uses the T-A formulation[1] to model the two-dimensional cross-section part of the cable. The AC loss of HTS cable is analyzed and discussed from three aspects: single-phase and three-phase cable types, flight mission profile of the electric aircraft, and the influence of harmonic current.

2. Modeling method and characteristics of HTS cable

To calculate the electromagnetic parameters of a superconductor, it is necessary to solve Maxwell's equations. Since the width is much larger than the thickness, in order to reduce the computational complexity, the T-A formulation for thin shell structures is used to solve the partial differential equation. As shown in Fig. 1, different types of HTS cable are constructed from the perspective of the cross-section. Fig. 1(a) depicts a single-phase cable that can be combined into a triad cable for three-phase AC power transmission. One section structure of the three-phase triaxial cable as shown in Fig. 1(b) is used to simplify the calculation process. Table 1 shows the parameters of the triaxial cable and its YBCO tapes, while the double cooling channels are applied. The diameters of the inner and outer cooling channels are 25 mm and 99.2 mm respectively.

3. Analysis of results

Considering the flight mission profile of the aircraft, the power profile in Fig. 2(b) contains the following stages: take-off (4 MW), climb (3 MW), cruise (2 MW), and landing (0.7 MW). Table 2 presents a comparison of the AC loss of cables with the rated power of 4 MW and 10 MW under the mission profiles mentioned before, while the average AC losses are evaluated at the rated current of 2 kA_{rms}.

From Fig. 3, instantaneous AC loss analysis of the take-off stage without harmonic current has been compared with the condition under additional 5% 4^{th} and 3% 5^{th} 2% 7^{th} harmonic current. The peak value and average value of AC loss increased with the harmonic frequency.

4. Conclusion

AC loss of HTS cable with T-A formulation has been analyzed considering flight profile and different harmonic current. The increase of harmonic current frequency and value influences AC loss gradually.

Reference

1. Y. Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol. 32 025003 (2019)

Table 1. Triaxial HTS Cable Specifications

Temperature	70 K
Insulation thickness	8 mm
YBCO width	4 mm
YBCO layers thickness	0.1 mm
Number of tapes	28
Critical current	150 A
Cable current	2 kA_{rms}

Table 2. Results of AC Loss Calculation

	Take-off (W/m)	Climb (W/m)	Cruise (W/m)	Landing (W/m)
4 MW AC average	(A) 0.123	0.0320	0.00597	4.89e-6
	(B) 0.317	0.0885	0.0171	1.87e-4
	(C) 0.389	0.111	0.0217	3.68e-4
10 MW AC average	(A) 0.00255	0.00102	3.17e-5	5.19e-20
	(B) 0.00716	0.00226	5.59e-4	2.45e-17
	(C) 0.00906	0.00328	7.47e-4	5.14e-16

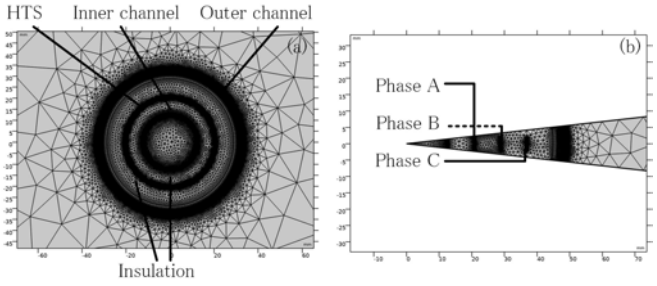


Fig. 1. Modeling of single-phase and three-phase HTS cable

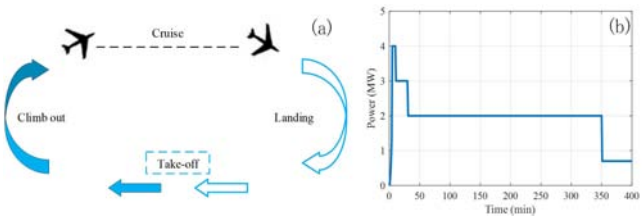


Fig. 2. Flight mission profile

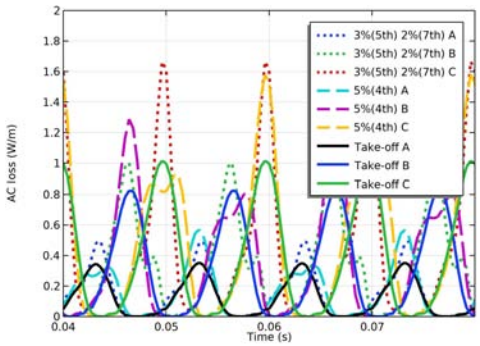


Fig. 3. AC loss analysis considering harmonic current

アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(5)－まとめ

Development of induction heating device for aluminum extrusion molding using HTS magnets (5) – Summary

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

1. はじめに

前報[1]-[4]で報告のとおり, 我々はアルミ押出加工用のアルミビレット加熱装置を開発している。これまでに, 全体設計から定格加熱出力での加熱試験結果までを報告した。今回は、連続加熱試験結果、加熱領域へのアルミビレット投入時の反力に関する報告とともに開発全体のまとめを報告する。

2. 連続加熱試験

前報にて、加熱プロセス中のアルミビレット速度変化に伴いHTS コイルに電圧が誘起され、その影響により HTS コイルの温度がわずかに上昇することを報告した[4]。これについて繰り返し加熱試験を実施し、このコイル温度上昇の影響を確認した。繰り返し加熱試験により、HTS コイルの温度は徐々に上昇したが、温度上昇カーブは飽和傾向を示しており、最終的に数 K 前後の温度上昇に収まるものと推測される(Fig. 1 参照)。HTS コイル温度の飽和は、温度上昇により冷凍機の冷却能力が向上するためと考えられる。

3. 加熱領域へのビレット投入・排出に対する反力

本装置は、装置稼働中は HTS コイルを常時励磁しているため、加熱領域には常に磁場が存在する。このため、加熱領域にビレットを投入する場合や加熱領域からビレットを取り出す際には、ビレットにブレーキ力が作用する。また、このときビレットに流れる電流変化により、HTS コイルに電圧が誘起される。装置のサイクルタイムを短くするためには、ビレットの交換時間をできる限り短くすることが求められるが、ブレーキ力及び HTS コイルに生じる誘起電圧は移動速度に応じて大きくなる。加熱領域中央磁場 1.06T にて、直径 6 インチ、長さ 500mm のアルミビレットを 200mm/s で移動させたとき、ブレーキ力は最大3kN程度であった。このときHTSコイルに約0.04Vのパルス状の誘起電圧を確認したが、それによる HTS コイルへの温度上昇は無視できるレベルであった。

4. まとめ

本研究開発では、直径6インチ、長さ500mmのアルミビレットを 60 秒以内に室温から 500℃に加熱することを目標として、装置の開発を進めてきた。

先ず、必要な加熱パワーを算定し、それに基づき必要な磁場を求めた。次に、装置全体の構想を行い、磁場発生部、ビレット把持・回転機構などの各部の詳細設計、開発を行った。磁場発生部は、装置コスト低減の為超電導線材使用量をできる限り少なくすることを目指し、コイルを直接巻付けた鉄心をヨークから分離してクライオスタット内に収容するとともに、各コイル背部を室温に設置したヨークで接続するという革新的なマグネット構造を考案し、実現した。ビレット把持・回転機構は、加熱に応じて変化するアルミビレットの機械的性質を要素試験により取得し、加熱制御に反映させた。

これらを組合せ、400kW 級の実証装置を完成させた。実証装置では、直径 6 インチ、長さ 500mm のアルミビレットに最大 400kW 以上の加熱パワー投入を実現した。また、目標とした 60 秒以内に室温から 500℃まで加熱できる能力があることを確認した。加熱処理中の HTS コイル部への影響については、主に HTS コイル部への誘起電圧の確認及びコイル温度の確認により実施し、有意な影響がないことを確認した。一連の研究開発により、磁気加熱式アルミビレット加熱装置の実用化が大きく前進した。

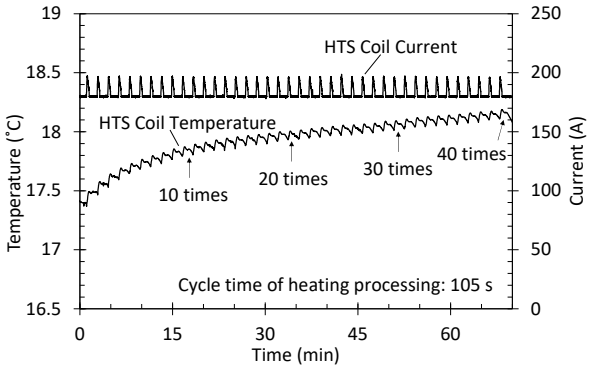


Fig. 1 Cyclic heating test results

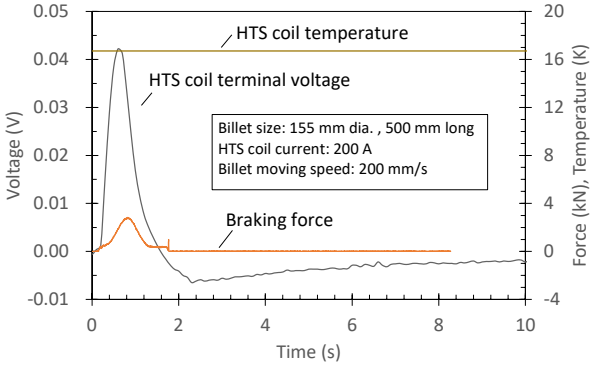


Fig.2 Influence of billet loading/unloading operation

謝辞

本研究開発の一部は, 令和元年度～令和3年度戦略的基盤技術高度化支援事業及び科学研究費補助金(19K04347)により実施した。

参考文献

1. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 99 (2020) p.108
2. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.5
3. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 102 (2021) p.42
4. T. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.15

超伝導浮上搬送装置におけるバンク角度のためのレール磁場の検討

Study of Rail Magnetic Field for Bank Angle in Superconducting Levitating Conveyance

二村 宗男, 大畑 翔, 佐藤 明(秋田県立大)
FUTAMURA Muneo, OHATA Sho, SATOH Akira (Akita Prefectural University)
E-mail: futamura@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

バルク超伝導体の磁束ピン止めによる磁気浮上の応用の一つに搬送装置がある. これは永久磁石を並べたレール上を, バルク超伝導体を内蔵した浮上体がレールに沿って非接触移動するもの(図 1)である. 小型のものは子供向け実験教室などのデモンストレーションとして行われている. これをクリーンルームなど特殊環境における搬送装置や, 大型のものは鉄道として用いることが研究されている[1-3]. しかしながら, 一般に用いられるレールの磁石配置においては, カーブなどで横方向の力が作用した際に浮上体がレールから転げ落ちるようにロール角(逆バンク角)をもつので, 浮上体の脱線や, 積載物の転落の恐れがある. そこで本研究では超伝導磁気浮上搬送装置の平面状レールにおいて浮上体の横ずれ時の安定性向上を目的として, 浮上体が横方向にずれた際に外側が持ち上がるような傾き(バンク角)をもつための磁場配置について検討した.

2. 磁気浮上力の測定

本研究では, レール上の浮上体(バルク超伝導体)が進行方向(y 方向)に対して横(x 方向)に移動した時の傾きを, 浮上体の左部と右部に作用する磁気浮上力(F_z)の差から求める. 浮上体として横幅24 mmを想定し, その一部として超伝導体は幅7 mm(新日鉄製 QMG-GdBCO 25×7×5 mm, 5.8 g)を用いた. この超伝導体を浮上体の中心から±8 mm にあるとして, レール磁石の左(x = -8), と右(x = 8)で磁場中冷却した後, 変位に対する浮上力の変化を測定した. レール磁石は以下の 4 種類の磁石配列について調べた. (1)幅 8 mm の板状磁石を 3 列並べた<8-8-8>配列. (2)両端の磁石の幅を 14 mm に変更した <14-8-14>配列. (3) 3 列の磁石の両端部に幅 8 mm の磁石を追加して 5 列にした<8-8-8-8-8>配列. (4) 5 列の磁石の両端の磁石を幅 14 mm にした <14-8-8-8-14>配列. なお, それぞれの磁石は上下方向に磁化されており, 1 列ごとに N-S が逆方向になるように配置されている. これによって浮上超伝導体は横方向には磁場が変化するため復元力が作用し, 進行方向には磁場が変化しないのでレールに沿って移動する.

3. 磁気浮上力の測定結果

<8-8-8>配列および<14-8-14>配列では, 目的の傾きになることはなかった. これは, 浮上体がたとえば x 方向に 8 mm 移動すると, 超伝導体の x = -8 において着磁された部分は x = 0 の位置にくる. これは冷却時にピン止め着磁した磁石とは逆方向の磁石の上空であるので, 大きな反発力による浮上力が作用する. それに対して浮上体の右部分はx = +8 mmの位置でピン止め着磁されたのち x = 16 mm に位置する. x = 16 mmはx = 8 mmと同じ向きの磁場のため反発力はそれほど大きくはならない. また<8-8-8>配列では磁石上空から外れるため, 磁気浮上力は著しく低下する.

<8-8-8-8-8>配列および<14-8-8-8-14>配列では, ある程度の範囲以内のズレに対して, 目的とする浮上体の傾斜を得ることができた. 図 2 に<14-8-8-8-14>配列における磁気浮上力 F_zを示す. 変位x がおよそ±16 mm 以内の範囲において, 移動した側のほうが大きな磁気浮上力になっていることが確認できる. 図 3 に<14-8-8-8-14>配列のレール上の磁場(磁場の鉛直成分 B_z)を示す. 冷却時にピン止めした磁場が, 横ずれした際には逆向きの磁場になることで大きな反発力を発生することがわかる.

4. 結言

磁石レール内側の磁石とは逆向きの磁石を, 浮上超伝導体の幅よりも外側に配置することによって, 浮上体が横ずれした際に反発力によって持ち上げ, 脱線を防ぐバンク角を付けるように作用することが明らかになった.

参考文献

1. H. Minami et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 34,1R, (1995) pp. 346-349.
2. J. S. Wang et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 18, no. 2, (2005) Art. no. S215.
3. L. Schultz et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, (2005) pp. 2301-2305.

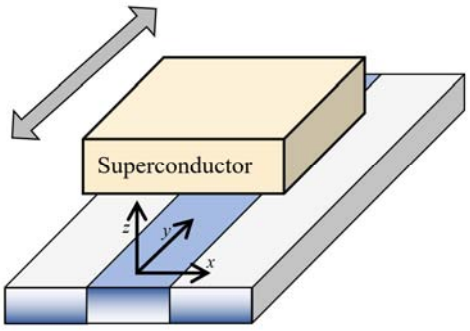


Fig.1 Schematic of a superconducting magnetic levitation conveyor.

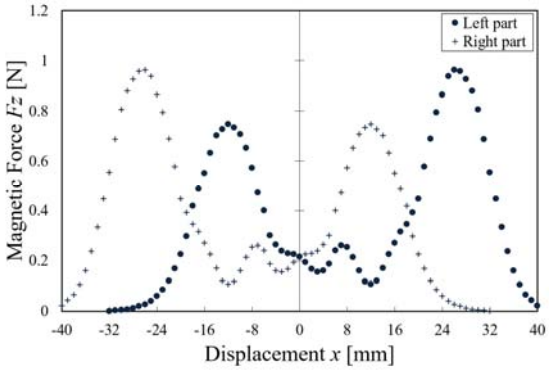


Fig.2 Levitation magnetic forces acting on each part of the shuttle superconductors with a <14-8-8-8-14> rail.

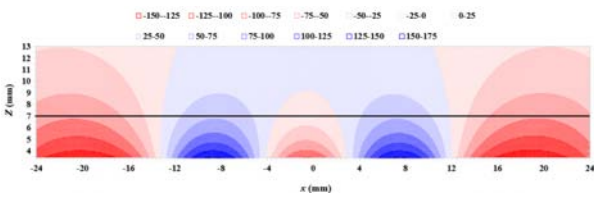


Fig.3 Contour diagram of the magnetic field around the magnet rail <14-8-8-8-14>.

高温超電導テープ線材を用いた磁気浮上型超電導免震装置の浮上力特性

Force Characteristics of Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device using HTS tapes.

吉村　創，齋藤　圭太，長﨑　陽，津田　理（東北大学）

Yoshimura Tsukuru, Saito Keita, Nagasaki Yoh, Tsuda Makoto (Tohoku University)

E-mail: tsukuru.yoshimura.p8@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

磁気浮上型超電導免震装置とは、超電導体と永久磁石レールによって構成され，超電導のピン止め効果によって免震対象を磁気浮上させることで，水平方向振動の伝達を除去する装置である[1]。従来の装置では高温超電導(HTS)バルク体が用いられていたが，HTS バルク体の低コスト化や磁気力密度向上が課題となっていた。そこで、本研究では HTS バルク体の代わりに複数の HTS テープ線材を並べる方法について検討した。しかし，HTS テープ線材は超電導層が非常に薄く、少量の適用では十分な磁気力が得られない上に，HTS テープ線材の超電導層は銅やハステロイなどで覆われているため，HTS テープ線材を敷き詰めたとしても永久磁石レールが発生する全磁束を捕捉することは困難である。そこで，永久磁石レールの磁束を効率的に捕捉し，より大きな浮上力が得られる HTS テープ線材の配置方法について検討し，各配置方法で得られる浮上力を測定した。そして，HTS バルク体を使用した場合と比較することで，HTS テープ線材適用の有効性を検証した。

2. 実験方法

本実験で使用した HTS テープ線材は線材幅 5mm，線材厚さ 0.15mm，超電導層厚さ 2.5μm の Gd 系テープ線材である。長さ 60mm のテープ線材を Fig.1 の様に配置した場合の浮上力を測定した。なお，テープ線材は厚さ方向に 4 枚積層している。

浮上力測定に用いた実験装置の概略図を Fig.2 に示す。保冷容器の底部にテープ線材を固定後，自動ステージにより永久磁石レール上空 20mm の位置に設置してから液体窒素を注いで着磁をした。そして，着磁位置より永久磁石レール上空 5mm まで 1mm 間隔で変位させ，それぞれの位置における浮上力を測定した。

3. 実験結果と考察

各配置方法における浮上力の測定結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より，テープ線材の長手方向が永久磁石レールの幅方向と並行になる様にテープ線材を並べた場合((c))に浮上力が最大になることがわかった。この理由としては，以下が考えられる。超電導体に働く浮上力は，着磁位置と変位後の磁束密度の差と変位後における磁束密度勾配に大きく依存する[2]。また，Fig.1 のようなハルバッハ配列の場合，$B_y = 0$となりテープ線材が経験する磁束密度の大きさは，x方向には変化するもののy方向には変化しない。これに対して，テープ線材を並べて配置する場合は，テープ線材間に隙間が生じ，テープ線材境界付近の浮上力が低下する。このため，(c)ではx方向にテープ線材間の境界がないために，x方向に変化する全磁束を浮上力に活かすことができるが，(b)のようにテープ線材間の境界がy方向になる場合は，テープ線材間の境界部では，x方向に変化する磁束密度を浮上力に活かすことができない。したがって，ハルバッハ配列が生成する磁束を一番有効に活用できる(c)の浮上力が最大になったと考えられる。

また，テープ線材と底面積を一致させるようにϕ33m，厚さ 5mm の HTS バルク体 4 個を配置し，浮上力密度[N/mm^3]を(c)の場合と比較した。その結果，(c)のテープ線材の浮上力密度は HTS バルク体の約 1.86 倍となった。これより，複数 HTS テープ線材を永久磁石レールの長手方向と垂直に並べることで HTS バルク体使用時と同等以上の浮上力密度を低コストで得られることがわかった。

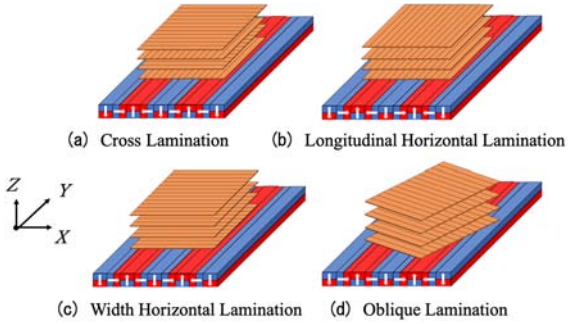


Fig. 1 Stacking method for HTS tapes.

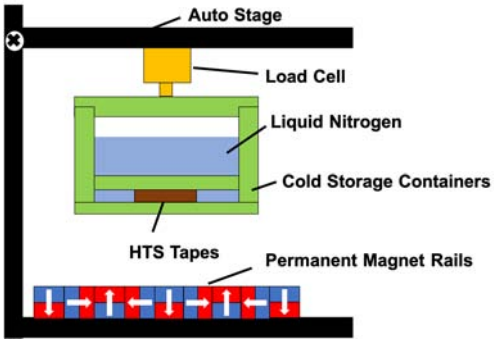


Fig. 2 Schematic diagram of levitation force measurement system.

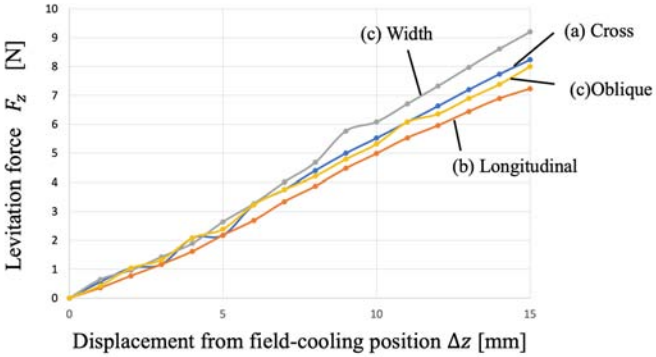


Fig. 3 Dependence of levitation force on HTS tape stacking method.

参考文献

1. M. Tsuda et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17(2007)2059-2062
2. M. Tsuda et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 14(2004)948-951

遮蔽性能向上に適した電磁誘導型超電導磁気シールドの構成方法

Structure method of electromagnetic induction type HTS shield for increasing shielding performance

長崎 陽, 花木 悠哉, 塚田 耀太, 津田 理(東北大学)
YOH Nagasaki, YUYA Hanaki, YOTA Tsukada, MAKOTO Tsuda (Tohoku Univ.)
E-mail: yoh.nagasaki.b2@tohoku.ac.jp

1. はじめに

本研究では, 宇宙放射線シールドへの適用に向けて, 1 T 程度の磁場をパッシブに遮蔽可能な高温超電導(HTS)テープ線材を用いた電磁誘導型高温超電導磁気シールド(HTS シールド)の研究開発を行っている。従来の超電導磁気シールドは, 超電導バルク体を用いた磁気シールドの検討が主であったが, 目的に応じたサイズや形状の磁気シールドを製作することは容易ではない。そこで, 線材表面が絶縁された HTS テープ線を互い違いに巻いて層構造にし, 両端部をはんだ接合することで閉ループ化した HTS シールドについて検討してきた[1]。しかし, これまでの電磁誘導型超電導磁気シールドは遮蔽性能が低く, 強磁場を十分に遮蔽するには遮蔽率を向上させる必要がある。本稿では, 超電導バルク体による磁気遮蔽を参考に, HTS 線材の層間にも電流パスが生じる無絶縁型の電磁誘導型超電導磁気シールドを提案し, 従来の絶縁型との遮蔽性能を比較検討した。

2. 実験方法

従来の層間をカプトンテープで絶縁した(絶縁型)HTS シールドと同構造の無絶縁型 HTS シールドを製作し, それぞれのシールド中心軸上における磁場を測定し, 磁気遮蔽性能を比較した。製作した絶縁型, 無絶縁型 HTS コイルの諸元を Table 1 に示す。また, 実験装置の概要を Fig. 1 に示す。外部磁場印加用コイルを用いて中心磁場 8.5 mT, 10 – 1500 Hz の交流磁場を印加した。また, 遮蔽率 SF(Shielding Factor)は, 以下の式(1)を用いて評価した。ここで B_{in}, B_{app} は, それぞれ HTS シールド内の磁場および外装コイルによる印加磁場である。

$$\text{Shielding Factor} = (1 - B_{in}/B_{app}) \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

絶縁型および無絶縁型の HTS シールドを用いた場合における, コイル中心軸上における遮蔽率の分布を Fig. 1, シールド中心における遮蔽率の周波数依存性の測定結果を Fig. 2 に示す。Fig. 1 より, 絶縁型では端部付近の遮蔽率が高く, シールド中心部においては遮蔽率が低下していることがわかる。一方, 無絶縁型ではシールド中心から端部に至るまで同程度の遮蔽率を維持していることがわかる。これは, 無絶縁型では層間に電流パスが生じることで, 超電導バルク体を用いた磁気シールド内の電流分布に近い電流分布を実現できたためと考えられる。また, Fig. 3 より, 全ての周波数において絶縁型の遮蔽率は無絶縁型の遮蔽率と比較して高く, 幅広い周波数において 99%以上の高い遮蔽率を達成できている。以上より, HTS シールドを無絶縁型で構成することで, 絶縁型と比較して高い遮蔽率が実現可能であることがわかる。しかしながら, 無絶縁型は周波数が低くなるにつれて遮蔽率の低下がみられた。これは, 層間抵抗による影響であると考えられるため, 今後層間抵抗が遮蔽率の減衰時定数に与える影響を明確化する必要がある。

Table 1 Specifications of HTS shield

Superconducting wire type	REBCO
HTS tape width	12 mm
Critical current of tape	500 A
Winding	Solenoid
Diameter of shield	30 mm
Length of shield	100 mm
Number of layers	2

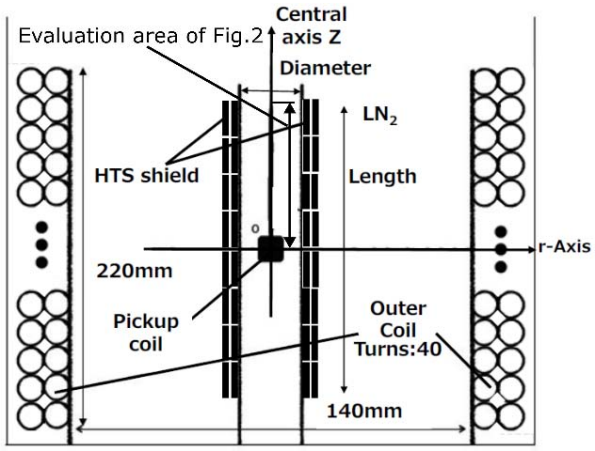


Fig.1 Experimental setup

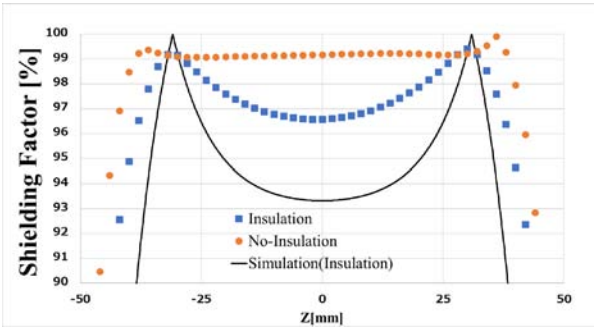


Fig.2 Shielding factor distribution along with central axis of insulation and no-insulation HTS shield (700 Hz)

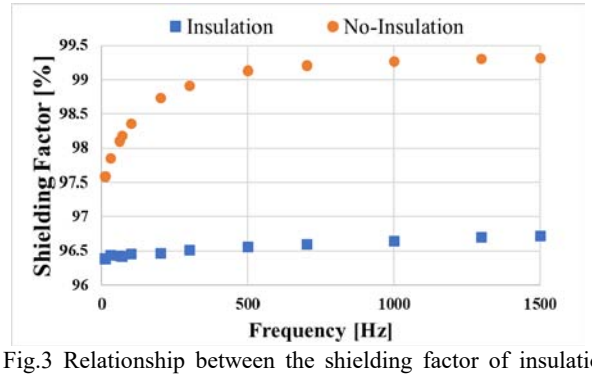


Fig.3 Relationship between the shielding factor of insulation and no-insulation HTS shield and frequency of applied magnetic field

参考文献

1. Y. Nagasaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (2018) 6601905

SMES 応用を想定した 無絶縁バンドル・ダブルパンケーキコイルの電流分布解析

Current distribution analysis in no-insulation bundle pancake coil for SMES applications

小笠原 友樹, 石山 敦士(早大)
OGASAWARA Tomoki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)
E-mail: o-tomoki@toki.waseda.jp

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置(SMES)には、長寿命で大電力の瞬時応答が可能であるといった利点がある一方で、電力貯蔵密度が極めて小さいという課題もある[1]。これについては、無絶縁コイル(NIコイル)を利用することで、SMESの高貯蔵密度化を実現することが可能になると考えられる。また、SMESは電力機器であるため、大電流・低インダクタンス設計が重要となる。そのため、我々は複数の無絶縁 REBCO 線材を集合導体化して巻線したコイル(バンドル NI コイル)の利用に着目した[2]。しかし、バンドルNIコイルでは、素線ごとにインダクタンスが異なることで起きる偏流が大きな問題となる。そこで今回は、バンドNIコイルを2段に積層した時(バンドル NI・ダブルパンケーキコイル)の電流分布、偏流の様子について解析評価を行ったので報告する。

2. 解析方法

解析には、Fig.1 に示す PEEC モデル[3]を拡張して作成したバンドル NI コイル用の数値モデルを、ダブルパンケーキコイル用に変更したものを用いた[4]。解析対象は、文献[4]の実験に用いた試作コイルと同じ内径 60 ㎜、ターン数 25 のコイルを 2 段に積層したダブルパンケーキコイルで、素線転位を行ったコイルと行っていないコイルの 2 つについて解析を行った。通電電流は、最大値 100A、最小値 80A の三角波とし[4]、上段コイルの外側から入力して下段コイルの外側から出力した。解析結果に関しては、充放電周期 3s で、充電開始から 0.75s (通電電流 90A)時点での電流分布を評価対象とした。層間電気抵抗値は 49.6μΩ・cm^2(実測値[4])とした。

3. 解析結果

はじめに、素線転位を行った場合のバンドル NI・ダブルパンケーキコイルの周方向電流分布を Fig.2 に示す。Fig.2 に示す通り、上段コイルの外側素線及び下段コイルの内側素線では、ターン数が増加するにつれ電流値も増加するのに対し、上段コイルの内側素線及び下段コイルの外側素線では、ターン数が増加するにつれ電流値は減少している。続いて、素線転位を行わなかった場合のバンドル NI・ダブルパンケーキコイルの周方向電流分布を Fig.3 に示す。この場合も、上段コイルでは素線転位を行った場合と同様の変化を示すが、下段コイルでは変化が逆になっており、素線転位の有無によって電流分布に違いがみられることが分かった。これは、素線転位を行わなかったことで、素線ごとのインダクタンス値の差により転流の様子が変化したためであると考えられる。また、バンドル NI・ダブルパンケーキコイルにおいても、転流による偏流が生じることが確認できた。

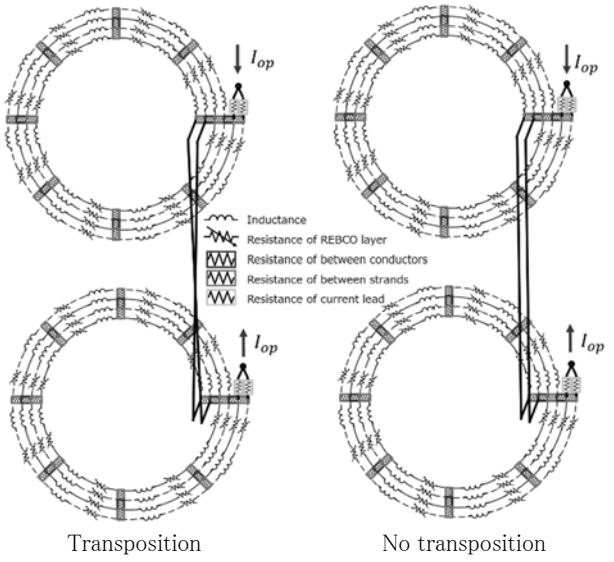


Fig.1 Analytical model of NI bundle double pancake coil

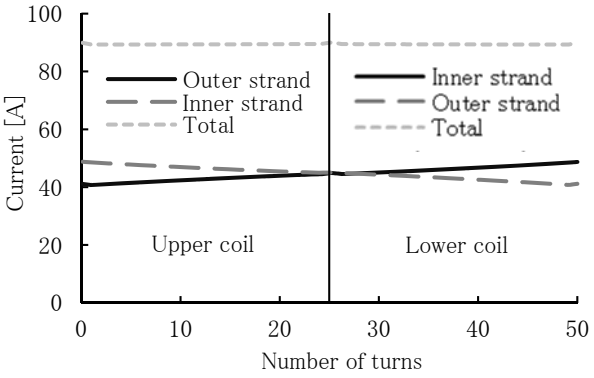


Fig.2 Circumferential current of NI bundle double pancake coil (Transposition)

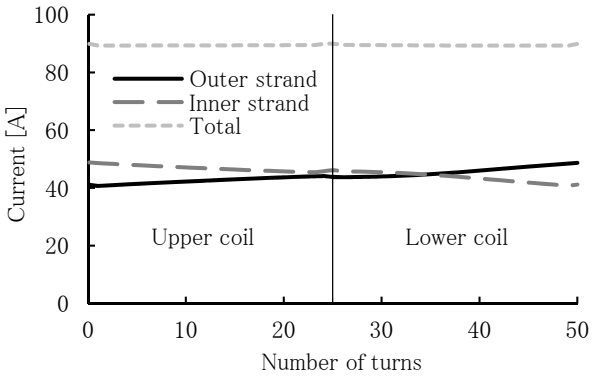


Fig.3 Circumferential current of NI bundle double pancake coil (No transposition)

参考文献

1. K. Shikimachi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19, 3, 2009, pp. 2012-2018
2. M.Omure, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31, 5, 2021, 5700105
3. T.Wang, et al.: *IEEE Trans. on Applied Supercond.*, 25, 2015, 7010920
4. Y.Miyamoto, et al.:*IEEE Trans. on Applied Supercond.*, 32, 6, 2022

無絶縁 REBCO コイルのためのコイル保護法に関する検討

Study on coil protection method for no-insulation REBCO coils

寺内 和, 濱田 一希, 長渕 大河, 結城 拓真, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力)
TERAUCHI Nodoka, HAMADA Kazuki, NAGAFUCHI Taiga, YUKI Takuma, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: non_w70@akane.waseda.jp

1. はじめに

高磁場 MRI や次世代医療用加速器への応用を目的として高温超電導コイルシステムの開発に取り組んでいる。二律背反の関係にある高熱的安定化と高電流密度化を両立する手段として、無絶縁(NI)コイル巻線技術を適用した REBCO コイルシステムの開発を行っている。

現在、NI コイルの応用・開発が進められている中、劣化・欠陥あるいは常電導転移時における信頼の高いコイル保護技術はまだ確立されていない。事故発生時のコイル保護方式として、以下の 3 つの状況を想定した。なお 1)は我々の先行研究において検討・報告している[1]。

1) 局所劣化発生:運転を継続する(継続可能条件の検討)
2) 冷却・真空系の故障等:電源制御のもと減磁動作を行う
3) 電源喪失等:コイル両端を開放する

本研究では、従来の外部保護抵抗による蓄積エネルギーの回収を、NI コイル巻線内の層間電気抵抗が担う方法(保護方法 3 つ目:事故時にコイル両端を開放)の可能性・有効性について検討している[2]。今回は、上記応用を想定して NI-REBCO パンケーキコイル巻線内に局所劣化が発生し、コイル両端を開放したとしたときの巻線内の電流・発熱・温度分布の時間変化を数値解析に基づき評価・検討を行ったので報告する。

2. 解析方法

今回の解析の対象としたコイルの諸元を表 1 に示す。また冷凍機による伝導冷却を想定した。解析は PEEC モデルによる電流分布解析と2次元有限要素法による熱伝導解析の連成モデルを用いた。また比較のため、外部保護抵抗 Rex を並列に接続した NI-REBCO パンケーキコイルについて、PEEC モデルに修正を加えたプログラムを用いて評価した。

以下の場合について解析を行った。

●Case1: PEEC モデルと並列に外部保護抵抗 Rex を接続して、コイルの両端を開放する場合
- ✓外部保護抵抗と層間抵抗の比(Rex/Rct)=1
- ✓外部保護抵抗と層間抵抗の比(Rex/Rct)=0.01

●Case2:外部保護抵抗無しでコイル両端を開放する場合
- ✓NI コイル劣化の有無
- ✓大口径(φ1000mm) NI-REBCO コイルの劣化の有無

表 1 無絶縁 REBCO コイルの諸元

Parameters	Values
REBCO conductor	
Overall width [mm]	4.0
Copper stabilizer thickness [μm/side]	20
Tape Ic @77K, self-field [A]	115
Coil	
Inner diameter [mm]	60,1000
Turn -to-turn contact resistance [Ω/cm^2]	2.00×10^{-3}
Number of Turns	100
Iop[A]	300
Cooling condition	Conducting cooling (30K)

3. 解析結果

例として、外部保護抵抗を接続していない場合、および PEEC モデルに並列に外部保護抵抗を接続し、外部保護抵抗と層間抵抗の比(Rex/Rct)=1 の場合、Rex/Rct=0.01 の場合においてコイル両端を開放したときの、巻線内の発熱・電流の時間変化を表したグラフをそれぞれ図 1,2,3 に示す。(ただし電流 Ir は中心から外向きを正とする。)

外部保護抵抗の有無にかかわらず、いずれも 0.5s 経過した時点で、径方向電流 Ir がほぼ0になる。また外部保護抵抗に大きな電流が流れても、コイル内部を流れる電流による発熱はほぼ均等に変化し、ホットスポットは生じない。

以上より、従来の保護技術と同様に外部保護抵抗を接続した場合, NI コイル内部のエネルギーは層間抵抗に対する比率で回収することができる。また Case2 についてもコイル全体が安全に蓄積エネルギーを回収できることがわかった。したがって層間の電気抵抗は外部保護抵抗の役割を果たすため, コイル両端の開放は有効なコイル保護手法のひとつと期待できる。

今後は、負荷率(Iop/Ic)や運転温度、層間接触が不良な領域がある場合等についてさらに検討を進める予定である。

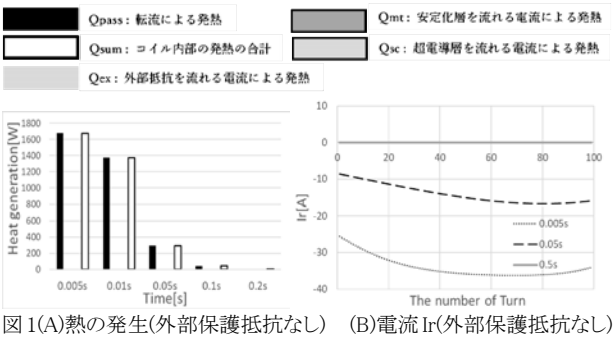


図 1(A)熱の発生(外部保護抵抗なし) (B)電流 Ir(外部保護抵抗なし)

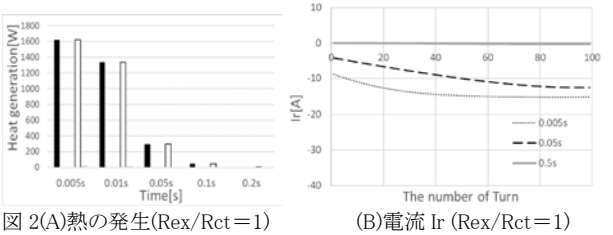


図 2(A)熱の発生(Rex/Rct=1) (B)電流 Ir (Rex/Rct=1)

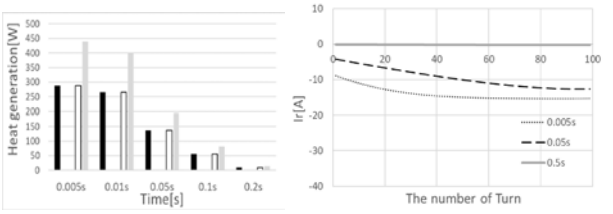


図 3(A)熱の発生(Rex/Rct=0.01) (B)電流 Ir (Rex/Rct=0.01)

本研究は、文部科学省の日本学術振興会科学研究費補助金 (No.18H05244) の支援を受けて実施した。

参考文献

[1] Y.Yoshihara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. , Vol.31 (2021) 4602005
[2] T.Oki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. , Vol.26 (2016) 7429748

双方向分割型回路解析手法を用いた 無絶縁コイルの遮蔽電流磁場解析(その1):定式化

Screening current-induced magnetic field analysis of No-Insulation coils which uses bidirectional split-circuit screening current magnetic field analysis(Part 1):Formulation

太田 海斗, 小久保 早希, 石山 敦士(早稲田大学);植田 浩史(岡山大学);野口 聡(北海道大学)
OTA Kaito, KOKUBO Saki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
UEDA Hiroshi (Okayama University);NOGUCHI Sou(Hokkaido University)
E-mail: yadokari75@akane.waseda.jp

1. はじめに

我々のグループでは、次世代医療用加速器や高磁場 MRI の実現に向け、無絶縁(NI)コイルの開発に関する研究を行っている。しかし NI コイルでは電流が径方向にも流れ、励磁遅れが発生してしまう。このことが磁場に影響を与えるため、径方向に流れる電流を考慮した遮蔽電流磁場解析を行う必要があるが、従来の手法[1]を用いると計算量が多く時間がかかってしまう。そこで今回は、解析時間の短縮を目的として電気回路のみを用いた NI-REBCO コイルの遮蔽電流磁場の簡易計算法を新たに考案・開発したので、まず(その1)としてその手法と定式化について報告する。

2. 従来の解析手法

従来は NI コイルの解析に PEEC モデルによる電流分布解析(Fig.1)を、遮蔽電流解析に3次元非線形過渡電磁場解析を用い、両者を連成して解く手法を用いていた[1]。この手法では一つのコイルに対してFig1で示した等価回路を当てはめる。すると以下の(1)式が成り立つ。

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

この式から周方向電流I_{θ}が導き出され、その電流によって発生する磁場$\frac{\partial B_0}{\partial t}$を計算する。この値を外部入力項として

$$\{\nabla\times\rho(\nabla T\times n)\}\cdot n+\frac{\mu_0 d}{4\pi}\frac{\partial}{\partial t}\int_S\frac{(\nabla T'\times n')\times R}{R^3}\cdot ndS'=-\frac{\partial B_0}{\partial t}\cdot n \qquad (2)$$

の右辺に入力し解を求める。

3. 径方向分割型解析手法[2]

Fig.2 のように一つのパンケーキコイルを 1～数十ターンごとに径方向に分割する。それらの各要素に等価回路を割り当てる。さらに各要素に、遮蔽電流に関する二次回路を適用する[3]。この等価回路において成り立つ等価回路を解くことで各要素の周方向電流及び遮蔽電流が導かれる。しかし、この手法では、REBCO テープ線材内への磁束の侵入が考慮することができない[4]。そこで計算時間を短縮しつつ磁束の侵入も考慮可能とすることを目的として以下の新手法を開発した。

4. 提案手法:双方向分割型回路解析手法

今回提案する手法は「双方向分割型回路解析手法」である。この手法では、まずFig3のように一つのパンケーキコイルを径方向(r 方向)に 1～数十ターンごとに分割する(図の例では 3 分割)。さらにそれらの要素ひとつひとつを z 方向(線材幅方向)に分割する。そして Fig4のように、この分割した要素それぞれに等価回路を当てはめる。これにより各要素において以下の(3)、(4)、(5)式が成り立つため、それらの回路方程式を解くことで遮蔽電流の影響を考慮した磁場が算出される。

$$\sum_{j=1}^{total_num} M_{ij}\frac{dI_{\theta j}}{dt}+\frac{R_{rei}R_{sti}}{R_{rei}+R_{sti}}I_{\theta i}-I_{cti}R_{cti}=0 \qquad (3)$$

$$\left\{\sum_{i=1}^{div_z}\left(I_{\theta i}+I_{cti}\right)\right\}-I_{op}=0 \qquad (4)$$

$$I_{cti}R_{cti}-I_{ct(i+1)}R_{ct(i+1)}=0 \quad (1\le i\le div_z-1) \qquad (5)$$

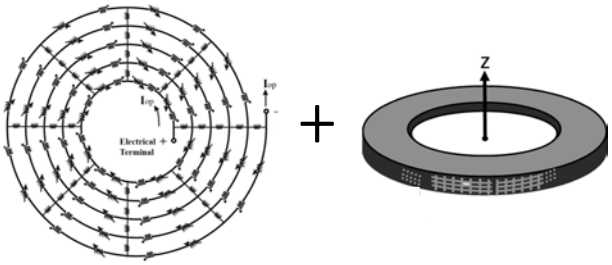


Fig1. PEEC model + 3Delectromagnetric computation

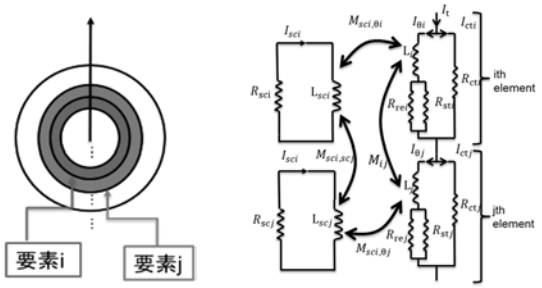


Fig.2. Equivalent circuit for radial division analysis method

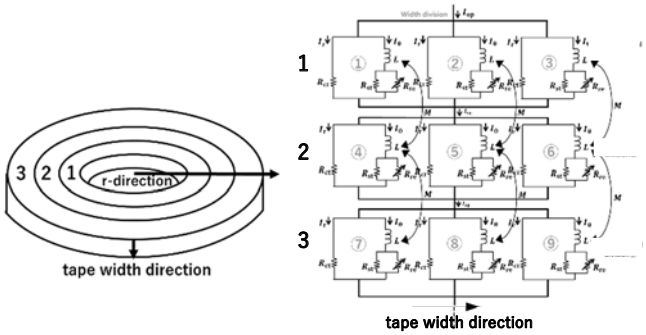


Fig.3. Image of new method Fig.4. Equivalent circuit of NI coil

参考文献

1. S.Ueda, et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.32, No.5, 2021, 4601405
2. 野口聡,植田浩史,石山敦士:無絶縁REBCOパンケーキ・コイルにおける数値解析技術―解析手法の比較及び解析事例―,低温工学,Vol.54,No.2,103-110,2019
3. 野口聡, HAHN Seungyong 岩佐幸和:REBCO パンケーキコイルの遮蔽電流磁場簡易計算手法―等価回路計算法 ―,2017 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集,20,1B-a01,2017
4. 太田海斗,小久保早希,石山敦士,植田浩史,野口聡, 2022 年度春低温工学・超電導学会, 1P-p07

双方向分割型回路解析手法を用いた 無絶縁コイルの遮蔽電流磁場解析(その 2):解析結果

Screening current-induced magnetic field analysis of No-Insulation coils which uses bidirectional split-circuit screening current magnetic field analysis(Part 2):Formulation

内山 誠士郎, 小久保 早希, 石山 敦士(早稲田大学);植田 浩史(岡山大学);野口 聡(北海道大学)
UCHIYAMA Seishiro, KOKUBO Saki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
UEDA Hiroshi (Okayama University);NOGUCHI Sou(Hokkaido University)
E-mail: sei.shieru@ruri.waseda.jp

1. はじめに

我々のグループでは、次世代医療用加速器や高磁場 MRI の実現に向け、無絶縁(NI)コイルの開発に関する研究を行っている。しかし NI コイルでは電流が径方向にも流れ、励磁遅れが発生してしまう。このことが発生磁場に影響を与えるため、径方向に流れる電流を考慮した遮蔽電流磁場解析を行う必要があるが、従来の手法[1]を用いると計算量が多く時間がかかってしまう。そこで今回は、(その1)に引き続き(その2)として、解析時間の短縮を目的として考案した電気回路に基づく遮蔽電流磁場簡易計算法について、従来の 3 次元非線形過渡電磁場解析に基づく手法との比較を行ったので報告する。

2. 双方向分割型回路解析手法

今回、我々が提案する手法は「双方向分割型回路解析手法」である。この手法では、まず Fig.1 のように一つのパンケーキコイルを径方向に 1～数十ターンごとに分割する。さらにそれらの要素ひとつひとつを線材幅方向に分割する。そして Fig.2 のように、分割した各要素に等価回路を当てはめる。これにより各要素において以下の(1)、(2)、(3)式が成り立つため、それらの回路方程式を解くことで遮蔽電流が導かれる。

$$\sum_{j=1}^{total_num} M_{ij}\frac{dI_{\theta j}}{dt}+\frac{R_{rei}R_{sti}}{R_{rei}+R_{sti}}I_{\theta i}-I_{cti}R_{cti}=0 \qquad (1)$$

$$\left\{\sum_{i=1}^{div_z}(I_{\theta i}+I_{cti})\right\}-I_{op}=0 \qquad (2)$$

$$I_{cti}R_{cti}-I_{ct(i+1)}R_{ct(i+1)}=0 \quad (1\le i\le div_z-1) \qquad (3)$$

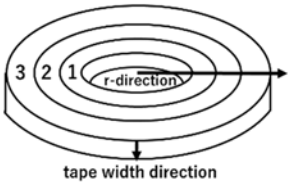


Fig.1. Image of new method

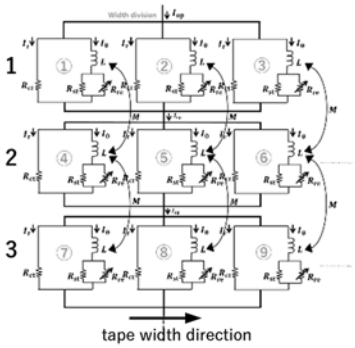


Fig.2. Equivalent circuit of NI coil

3. 解析対象

解析に使用したモデルコイルは, Fig.3に示す小口径のダブルパンケーキコイルシステムで、各コイルの巻数は240、これを半径方向に5分割(各分割要素コイル:48ターン)し、線幅方向を10分割した。発生磁場はコイル中心の磁場で計算・評価した。

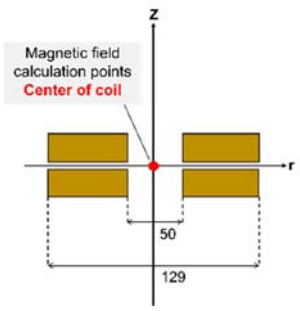


Fig.3. Coil system schematic diagram

4. 解析結果

(1)絶縁-REBCOコイル

遮蔽電流磁場のみを評価するため、同じ諸元の絶縁コイルについて、Fig.4に示す三角波通電を想定して計算した。Fig.5に示す遮蔽電流磁場の挙動(ヒステリシス)が得られ、3次元解析と双方向分割モデルの結果は定性的に一致した。

(2) NI-REBCO コイル

想定した通電電流波形と、中心磁場の計算結果をFig.6に示す。NIコイル特有の励磁遅れ現象と、遮蔽電流磁界の影響をほぼ再現できている。

各場合について、本解析手法と従来との計算時間の比較をTable.1に示す。特に今回の目的であるNI-REBCOコイルの場合に、本解析手法により計算時間が大幅に短縮された。

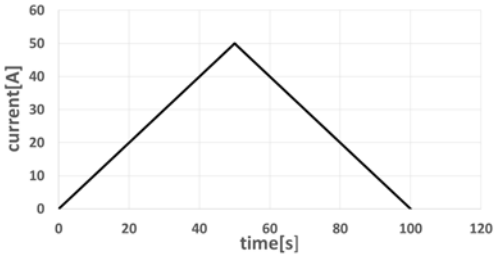


Fig.4. Current waveform-(1)

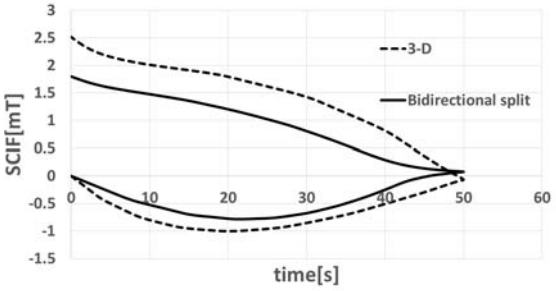


Fig.5. SCIF (Screening Current-Induced Field)-(1)

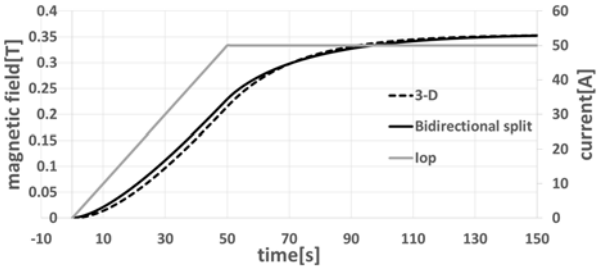


Fig.6. Excitation delay-(2)

Table.1 Calculation time for each method

Method	Insulated coil [m]	NI coil [m]
3-D	21	50
Bidirectional split	**19**	**22**

参考文献

1.S.Ueda, et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.32, No.5, 2021, 4601405

層間接触不良が無絶縁 REBCO パンケーキコイルの熱的安定性に及ぼす影響

The Effect of turn-to-turn electrically non-contact area on the Thermal Stability of No-Insulation REBCO Pancake Coils

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

1. はじめに

我々は高磁場 MRI や医療用加速器への応用を目指し、無絶縁(NI)コイルの研究を行っている。NI コイルでは、局所的劣化発生時に電流が劣化部を避けるように健全層に転流するため、継続運転できる可能性がある[1]。しかし、実際のコイル巻線では線材の表面が一様でなく、線材間に接触不良部分が生じる可能性があり、大口径コイルの場合は発生する可能性がより高まる。また、その接触不良領域に局所的劣化が発生した際には、層間の転流が起きないことから NI コイルの特長を生かせない可能性がある。そこで今回は接触不良領域が、局所的劣化が発生した層の片側の隣接層間に 1 周にわたり存在する REBCO パンケーキコイルにおいて、熱的・電磁的挙動について、数値解析に基づく評価を行い、継続運転の可能性を検証したので報告する。

2. 解析方法

解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。解析は PEEC モデルによる電流分布解析と FEM による熱解析を連成して行った[2]。解析では局所的劣化が発生した層の片側の隣接層との間に、1周にわたり集中的に接触不良領域が存在する場合を想定した。また接触不良は劣化部の内側層および外側層に存在する2パターンについて比較した。

解析(1)では、局所劣化が発生した要素が、接触不良領域の中心となる場合を想定した。

解析(2)では局所的劣化が発生した要素から接触不良領域が片側 1 周にわたる場合を想定した。局所的劣化はコイル中央に発生したとして、それぞれの場合についての挙動を解析・評価を行った。

Table.1 Specification of NI-REBCO pancake model coil

REBCO Tape	Ovevrall width [mm]	4.0
	Copper stabilizer thickness [μm/side]	20
	I_c @77K, self-field[A]	115
Coil	Inner diameter [m]	1.0
	Turn-to-turn contact resistance [Ω・cm^2]	2.0×10^{-3}
	Resistance of connection parts[μΩ]	*0.0121
	Turns	60
	Iop[A]	400
	Iop/Ic[%]	70
	External magnetic field [T]	10
	Cooling condition	30K-adiabatic

*Experimental value

3. 解析結果

例として解析(1)の結果を示す。接触不良領域が局所的劣化の内側層(Case(1))または外側層(Case(2))に存在するとき、それぞれの場合におけるNIコイルの通電開始3秒後の電流分布をFig.1、温度分布をFig.2に示す。電流は、Case(1)においては下側半周にわたり劣化部を避けるように隣接層へ転流をしており、Case(2)では、上側半周にわたり転流しており、転流は局所的劣化直前の層の接触部分で起きていることが分かった。どちらも転流の起きている部分で継続運転に影響のない程の僅かな発熱があった。また、NIコイルの各発熱量をFig3, Fig4に示す。Case(1)のほうがCase(2)と比べて発熱が多いが、転流による発熱が支配的であり、継続運転の可能性があることが分かった。

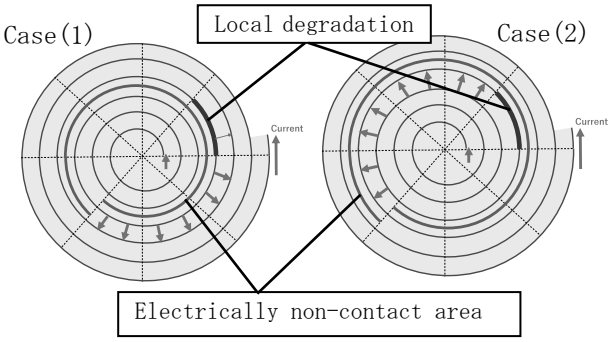


Fig.1 Current Distribution of NI Coil

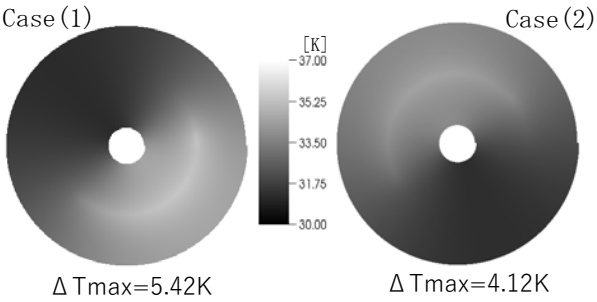


Fig.2 Temperature Distribution of NI Coil

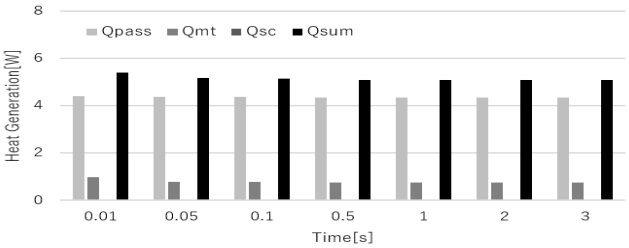


Fig.3 Heat Generation of NI Coil (Case(1))

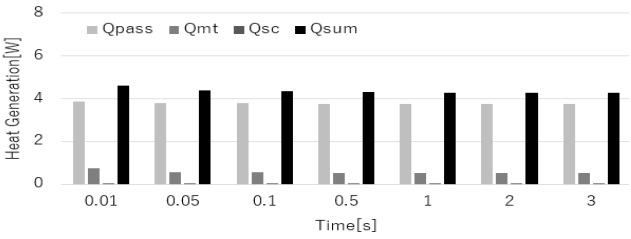


Fig.4 Heat Generation of NI Coil (Case(2))

本研究は、科研費(基盤S:18H05244)によった。

参考文献

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

液体水素冷却 REBCO コイルの通電試験に用いるスプリット型 REBCO 外部磁場コイルの液体ヘリウム中励磁予備試験

Preliminary excitation test of split-type REBCO field coil in liquid helium for understanding transport characteristics of REBCO coils immersed in liquid hydrogen

山川 友瑚, 村田 将一朗, 石田 悠人, 稙田 隆太, 大屋 正義(関西学院大);
今川 信作, 岩本 晃史(NIFS); 白井 康之(京大)
YAMAKAWA Yugo, MURATA Shoichiro, ISIDA Yuto, WASADA Ryuta, OHYA Masayoshi (Kwansei Univ);
IMAGAWA Shinsaku, IWAMOTO Akifumi (NIFS); SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: ics53687@kwansei.ac.jp

1. はじめに

液体水素冷却 REBCO コイルの通電特性を解明するため、種々のコイルの通電試験を計画しているが、液体水素温度では臨界電流特性が高く、JAXA 能代ロケット試験場の既設電源を用いた通電試験が困難である。このため、Fig. 1 に示すようにダブルパンケーキ(DP)コイルを上下に 2 組ずつ積層したスプリット型 REBCO 外部磁場コイルを設計・製作し、中心空間に配置する試験コイルの線材面に垂直な磁場を印加することで、通電試験を可能にする。本発表では、液体窒素および液体ヘリウム中の予備通電試験結果について報告する。

2. 外部磁場コイルの製作

線材幅 4 mm、基板厚 50 μm、銅メッキ厚 20 μm の REBCO 線材(*Ic*=110~138 A)を用いて、内径 130 mm、外径 204 mm、440~450 ターンの DP コイルを 4 組作製した。各 DP コイルをステンレスケースに挿入した後、中心空間を 24 mm 設けて 2 組ずつ上下に積層し、外部磁場コイルを構築した。シングルパンケーキ(SP)コイル間は最内周を銅板で接続し、DP コイル間は端部を電極に固定した後に電極同士を銅板で接続した。

3. 外部磁場コイルの *I-V* 波形解析

SP1~8 を対象として、二次元円筒断面モデルの解析を実施した。各ターンの線材を幅方向に 20 分割した並列回路を想定し、35,520 点(20 分割×444 ターン×4DP コイル)の線電流に対する各点の磁束密度行列をビオ・サバール則により計算した。本行列を計算コードに組み込み、スイープ速度 0.1 A/s で通電した際の線材内電流分布と各ターンの発生電圧を解析した。コードには、REBCO 線材の *Ic-B-θ* 特性を記述できるフィッティング式[1]を組み込んだ。その結果、35.7 A 通電時に SP5 の最内周で 41 μV(1 μV/cm 相当)の電圧が発生した。本結果から 35.7 A を外部磁場コイルの目標電流値と定めた。

4. LN_2 および LHe 中の通電試験

製作した外部磁場コイルの健全性を確認するため、液体窒素で冷却し、通電電流を徐々に上昇・ホールドしながら発生電圧を測定した結果を Fig. 2 に示す。最初に電圧上昇した DP3 の I-V 波形測定結果が解析結果とほぼ一致したことから、コイルの通電特性に問題はないと判断した。

次に、液体ヘリウム中で定格 100 A までの予備通電試験を実施した結果を Fig. 3 に示す。電流ホールド時に電圧上昇は確認されず、今後の液体水素試験に供試できると判断した。

5. まとめ

スプリット型の REBCO 外部磁場コイルを製作し、液体窒素中で通電試験を実施した結果、実測結果と解析結果で電圧の立ち上がりがほぼ一致し、健全性が確認された。液体ヘリウム中で 100 A まで通電した結果、ホールド時に電圧上昇は確認されず、液体水素試験に供試できると判断した。当日は、液体水素試験結果についても発表する予定である。

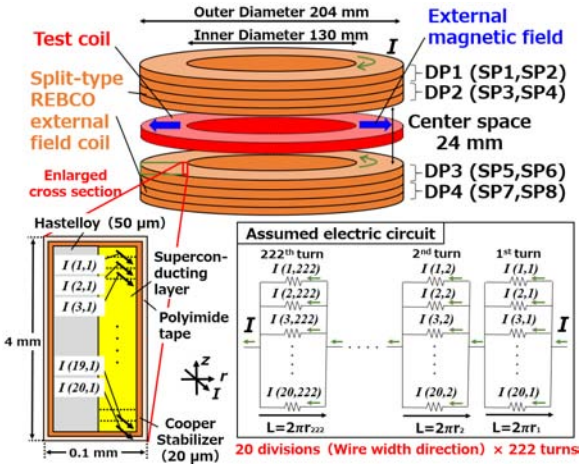


Fig. 1 Structure and simulation methods of split-type REBCO external field coil

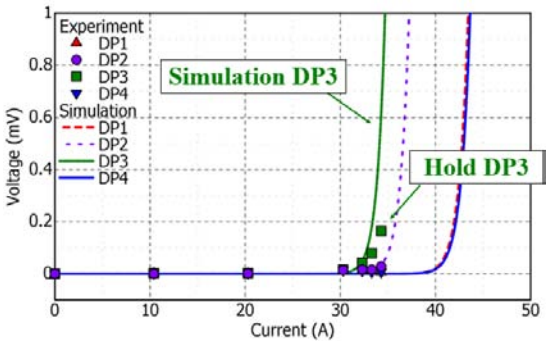


Fig. 2 Simulated and measured *I-V* characteristics of the field coil in LN2

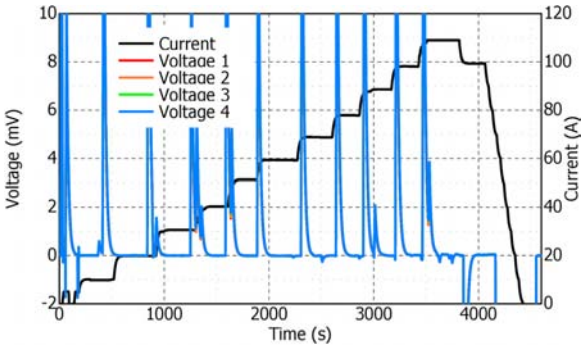


Fig. 3 Excitation test result of the Field coil in LHe

謝辞

本研究の一部は NIFS の LHD 共同研究として実施されたものである(NIFS20KOBA032)。

参考文献

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

スプリット型 REBCO 高温超電導コイルの励磁試験

Excitation test of split-type REBCO high-temperature superconducting coil

村田 将一朗, 山川 友瑚, 大屋 正義(関西学院大); 今川 信作(NIFS)
MURATA Shoichiro, YAMAKAWA Yugo, OHYA Masayoshi (Kwansei Univ); IMAGAWA Shinsaku (NIFS)
E-mail: gfr51685@kwansei.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材を用いたコイルは、高い臨界電流特性から強磁場マグネットへの応用が期待されているが、励磁した際に発生する電磁力による機械的な劣化が課題である。本課題に対して、コイルケースに挿入して補強したダブルパンケーキ(DP)コイルを上下に 2 枚ずつ積層したスプリット型コイルを試作し、上下逆方向に通電することで軸方向に電磁力を発生させ、耐電磁力特性を検証した。製作したスプリット型コイルを液体窒素中で通電して初期特性に問題がないことを確認した後、液体ヘリウム中で励磁試験を実施したので、それらの結果について報告する。

2. スプリット型コイルの試作

内径 130.2 mm、外径 207.8 mm、巻数 223 ターンのシングルパンケーキ(SP)コイル 2 枚をステンレス製のコイルケースに挿入し、計 4 組の DP コイルを製作した。使用した線材の緒元を Table 1 に示す。コイルとコイルケースの隙間はパラフィンで含浸した。その後、中心空間を 11.5 mm 設けて DP コイルを 2 組ずつ上下に積層し、スプリット型コイルを構築した。完成したスプリット型コイルの構造を Fig. 1 に示す。

3. スプリット型コイルの構造設計

コイルケースに挿入せず、単純に積層したスプリット型コイルに 200 A 通電した際の応力を解析すると、軸方向に過大な応力が発生し、臨界電流特性は低下すると想定される[1]。しかしながら、コイルケースで補強することで、解析上はコイルに発生する軸方向応力を 5 MPa 以下まで抑制できた。なお、コイルとコイルケース間はパラフィン含浸しているため、両者の熱収縮率差によって発生する熱応力は十分に小さい。以上の結果から、コイルケースで補強することにより、200 A までの通電が可能と判断した。

4. 液体窒素中での通電試験

製作したスプリット型コイルの健全性を確かめるため、液体窒素中でホールド試験を実施した結果を Fig. 2 に示す。本試験に使用したシングルパンケーキコイルは、内部に接続部が存在し、もとからエポキシ離型不良に起因して僅かに劣化しているため、微小な電圧上昇が確認されたが、本試験を実施するにあたって特性に問題はないと判断した。

5. 液体ヘリウム中での通電試験

コイルケースによる補強効果を検証するため、液体ヘリウムで冷却したスプリット型コイルに最大200 Aまで通電した結果をFig. 3に示す。電流をホールドしたときに発生している電圧はわずかであり、電磁力によってコイル特性が劣化しないことが確認された。

6. 結論

コイル通電時に発生する電磁力による機械的な劣化を抑制するためにコイルケースで補強したコイルの励磁試験を実施した。コイルの特性劣化を示唆するような電圧発生は確認されず、電磁力による劣化を抑制できることを確認した。本結果から、コイルケース補強は、電磁力によるコイルの機械的な劣化に対する対策になりうると考えられる。

Table 1 Specifications of REBCO wire

Wire width (mm)	4
Wire thickness (mm)	0.1
Thickness of Hastelloy substrate (μm)	50
Thickness of copper stabilizer (μm)	20

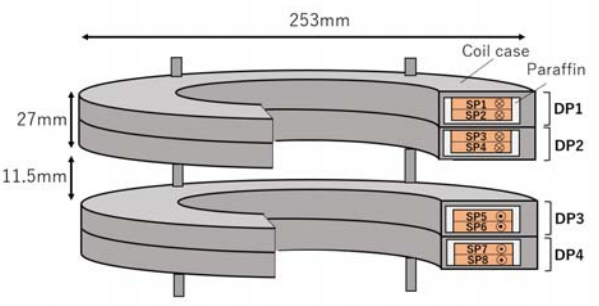


Fig. 1 Structure of split-type REBCO coil

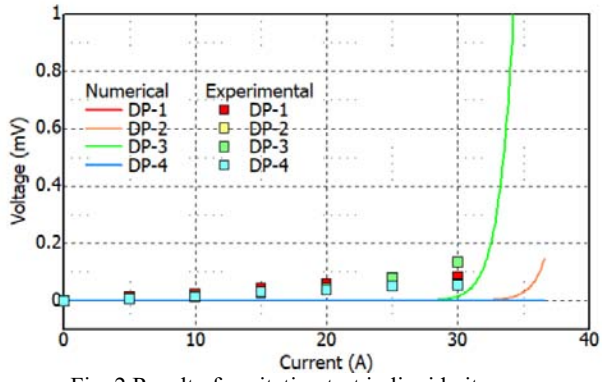


Fig. 2 Result of excitation test in liquid nitrogen

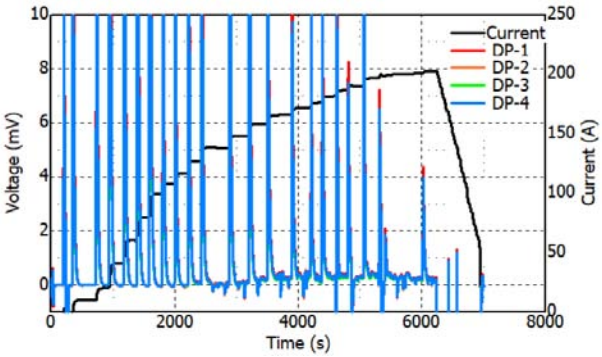


Fig. 3 Result of excitation test up to 200 A in liquid helium

参考文献

1. Y. Nagasaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31 (2021) #8400405

革新的技術による超電導コイル磁石励磁電源装置

Superconducting coil magnet excitation power supply with innovative technology

河島 裕, 杉本 志郎, 伊東 徹也(テラル)
KAWASHIMA Hiroshi, SUGIMOTO Shiro, ITO Tetsuya (TERAL INC.)
E-mail: kawashima02@teral.co.jp

1. はじめに

超電導コイル磁石の励磁電源装置には，永久電流スイッチの利用，フラックスポンプ，パルストランス，外電源装置接続等，様々な方式があるが夫々課題を抱えている。

我々は，NI(無絶縁)コイル磁石が要求する大きな励磁電流及び小さな許容端子電圧に対し，励磁用外部電源のクライオスタット内部での電流増幅及び，入力電圧の増幅が図れ，励磁の起動停止，励磁電流の増減制御が常時可能な電源装置の開発に取組んでおり紹介する。

2. 装置の計画概要

開発の励磁電源装置は Fig. 1 の通り，クライオスタット内部で，コイル電流を入力電源で駆動の複数のチョッパ回路[1]に分流させ，チョッパ回路を時分割で動作合流のことにした。

コイル励磁電流に対し入力電源電流を大幅に(1/チョッパ並列数)低減させ，チョッパ回路の時分割動作により，最大デューティが小さく(1/チョッパ並列数)なり，コイルの許容電圧に対し，電源電圧を高く(チョッパ並列数倍)出来る。

更に，低 ON 抵抗の MOSFETs[2]の多並列による短絡スイッチで，コイル端子間を直接短絡により，励磁電流保持条件での大幅な損失及び、励磁電力量の低減を図った。

3. アナログ回路シミュレーション

励磁電源装置の回路の成立，特に初期充電開始時の立上特性，チョッパ回路の電流バランス状況，定格電流到達後の損失補填動作について，LTspice[3]によるアナログ回路シミュレーションを実施，今回計画の 8 相並列多重のチョッパ回路の単独周波数は，10 kHz，8 相合計の周波数は，80 kHz の条件で確認を行い，初期充電の立上特性は Fig.2，定格 300 A での補填充電時の特性を Fig. 3 に示す。いずれの場合も，コイル電流の増加波形，チョッパ 8 相間の電流バランス，外部電源装置の出力電流等に問題の無い事を確認した。

4. 実機計画

本励磁電源装置の主回路部の配置は，2 段型冷凍機を採用のシステムでは，2nd ステージ側へ高温超電導電流リードによる断熱通電を行い，冷凍機冷却能力が高い 1st ステージ温度域に設置を計画，300A 用主回路モジュールを現状，Fig. 4 の通り，縦×横×高さが 150×150×40mm の計画とした。

クライオスタット内部で，電源側に接続される，常電導側の電流リードの負担電流は，電源電流の大幅低減と，初期充電時以外の短絡スイッチ損失の補填充電時間が短い事より，外部電源へ接続の常電導電流リードのサイズを大幅に低減出来，熱伝導による侵入熱量を大幅に低減の計画とした。

外部電源装置は，市販品の 6V×50A の 300W のスイッチング電源で対応が可能で，損失補填の電力量は僅かとなる。

5. まとめ

超電導コイル直流磁石用励磁電源装置として，時分割動作チョッパの多並列多重回路に，低抵抗の短絡スイッチを組合わせた新しい電源装置の考案及び成立に関するシミュレーションでの確認を実施した。今後，構成部品の極低温度特性の確認及び，実機の製作，室温及び極低温に冷却条件での動作検証を計画している。

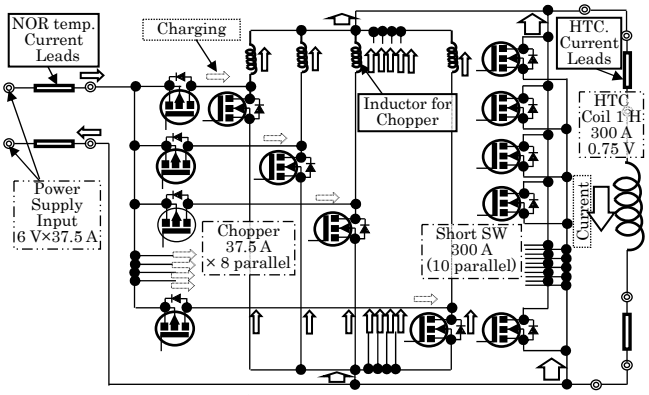


Fig.1 Schematic diagram of main circuit

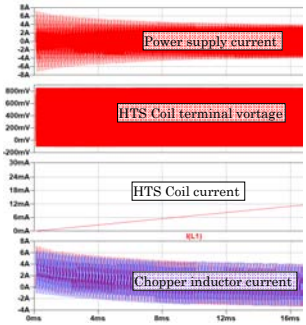


Fig.2 Simulated waveform during initial charging

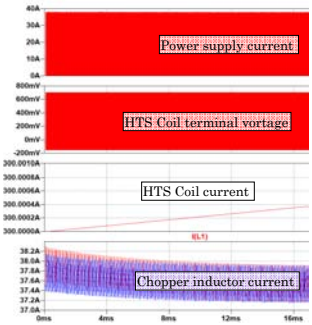


Fig.3 Simulated waveform during supplementary charging

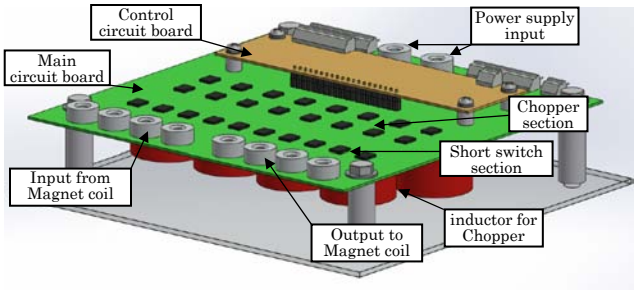


Fig.4 Schematic diagram of main circuit board

参考文献

1. Application Notes No. 12027EACY01 Inductor Calculation for Buck Converter IC, ROHM Co., Ltd. ,2012
2. Data sheet TPHR6503PL1 MOSFETs Silicon N-channel Toshiba Electronic Devices & Storage, 2020-06-26
3. LTspice is Analog circuit simulation software, Analog Devices, Inc.

プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発

Demonstration of a Triaxial Superconducting Cable in a Private Chemical Plant

塩原 敬, 佐藤 迪夫, 中西 達尚, 金山 諄志, 高橋 保夫, 長井 港太, 三堂 信博, 青木 裕治,足立 和久
(昭和電線ケーブルシステム株式会社)
SHIOHARA Kei, SATO Michio, NAKANISHI Tatsuhisa, KANAYAMA Atsushi, TAKAHASHI Yasuo, NAGAI Kota,
MIDO Nobuhiro, AOKI Yuji, ADACHI Kazuhisa
(SWCC SHOWA CABLE SYSTEMS CO. LTD.,)
E-mail: k.shiohara012@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

昨今、「省エネルギー化」ならびに地球温暖化対策としての「CO_2 排出量の削減」は、喫緊の課題となっている。超電導機器は省エネルギー効果が高く、この課題に対して大きく貢献できるものと期待されている。その中でも、超電導ケーブルは近い将来実用化が特に期待されている。

超電導ケーブルは抵抗がゼロになることから、「低電圧・大電流」での布設が適していると考えられる。弊社ではコンパクト化ならびに超電導線材の使用量低減により低コストである三相同軸ケーブル構造を選定した[1]。本ケーブルには弊社で製造した RE 系超電導線材を使用した。

一方、窒素ガスを使用しているプラントでは CE に液体窒素を貯蔵し、気化器でガス化していることが多く見られる。この既存冷熱を利用することで、超電導ケーブルの冷却に必要なエネルギーとコストを大幅削減する。これにより、「低コスト」かつ「高い省エネルギー効果」の実現を見込んでいる。

昭和電線ケーブルシステム株式会社、BASF ジャパン株式会社及び国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO)は、BASF ジャパン戸塚サイト（横浜市戸塚区）において、2020 年 11 月から 2021 年 9 月まで商用化学プラントの系統に設置した三相同軸超電導ケーブルシステムの世界初の実証試験を実施した。

本発表では、BASF における実証試験の結果と省エネルギー効果について報告する。

2. 実証試験状況ならびに三相同軸ケーブル

超電導ケーブルシステムの長期安定性や省エネルギー効果検証を目的とし、BASF ジャパン戸塚サイトにて超電導ケーブルシステムの実証試験を実施した[2]-[3]。布設イメージの鳥瞰図を図 1 に示す。布設したケーブルはケーブル終端部から高さ 6 m 垂直方向に立上り、中間接続を 2 ヶ所設け、総長約 200 m のケーブルシステムとなる。なお、立上り部を含め、曲がり部を 4 ヶ所（垂直方向 2 ヶ所、水平方向 2 ヶ所）含む布設形態となる。また、今回の実証試験に適用した RE 系超電導線材を用いた三相同軸超電導ケーブル[4]の概略模式図を図 2 に示す。当該ケーブル構造は内部流路のコルゲート管

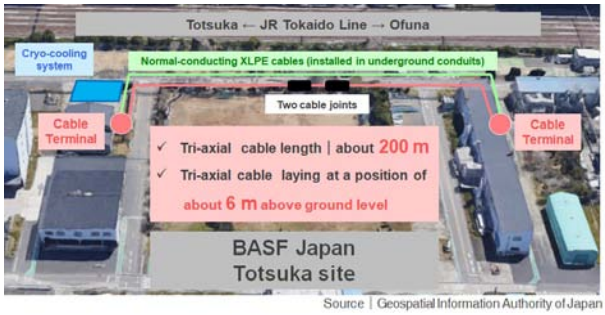


Fig.1 Bird's eye view of BASF Totsuka site

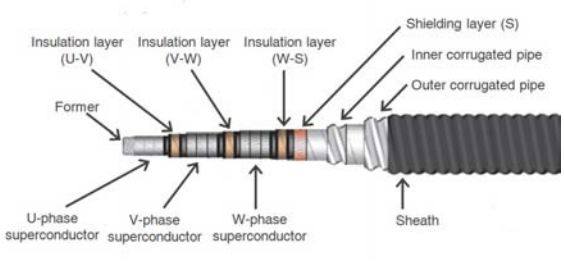


Fig.2 Schematic of the tri-axial HTS cable used in this work

の上に、三相の超電導導体と銅条の遮蔽層を同心軸上に配置し、その外側を真空断熱コルゲート管にて覆った構造である。なお、各導体間には絶縁紙による絶縁層を施している。

本事業では、「冷却コスト削減」という大きな課題を有する超電導ケーブルシステムについて、送電損失の主たる要因であるケーブル、終端、中間接続への外部からの熱侵入に着目し「ケーブルシステムへの熱侵入量低減」を技術課題の 1 つとして設定した。

3. 実証試験による妥当性検証

約 1 年間実施した実証試験にて、三相同軸超電導ケーブルシステムの安全性の妥当性検証を実施した。主たる検証項目としては「三相同軸超電導ケーブルと CV ケーブルの実通電データから分流把握」、「圧力・温度・液体窒素流量/液面の経時把握」、「冷却システムの運転/保守保全」、「実証試験後の残存性能確認」、「省エネルギー効果の算出」である。

超電導ケーブルとしての「冷却コスト削減」という大きな課題に対して、今回の実証試験の熱侵入量については、ケーブル内部温度ならびに冷却システムの消費電力は共に酷暑を含む 1 年間ほぼ一定値を示し、超電導ケーブルシステムの設計値と同等の実測値を確認した。その結果、送電損失は 30 MW 設備、ケーブル長 1km で検討した結果、CV ケーブルと比較して 1/20 以下を達成した。これらにより超電導ケーブルシステムとしての経済性と安定性が確認できた。

謝辞

この成果は、NEDO の助成事業（JPNP12004）の結果得られたものです。

参考文献

1. K.Shiohara, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31, 5, Article number 4801804, 2021. 03.
2. K.Adachi, et, al:SWCC review, Vol. 66, P10-15（2020）
3. K.Adachi, et, al:SWCC review, Vol. 67, P30-35（2021）
4. K.Kitamura, et, al:SWCC review, Vol. 63, P18-23（2017）

HTS テープ線材の短絡電流試験– 3

Short circuit experiment of HTS tape conductor for Superconducting DC power transmission (SCDC)–3

山口 作太郎, 江口 実穂, 川合 修平, イワノフ ユーリ, 神田 昌枝, 斎藤 涼夫(中部大), 二ノ宮 晃(明治大)
YAMAGUCHI Sataro, EGUCHI Miho, IVANOV Yury, KANDA Masae, SAITOH Suzuo (Chubu Univ.), Akira NINOMIYA (Meiji Univ.)
E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

超伝導ケーブルの短絡電流特性評価のために、テープ線材や複合導体の短絡電流実験を継続している [1, 2, 3]。用いる線材は Bi2223 線材(住友電工)と coated conductor 線材(SuNAM)の 2 種類であり、臨界電流は 190 A ~ 200 A 級である。今回は電源回路を増強して、通電時間を長くすると同時に短絡ピーク電流を大きくし coated conductor では焼損実験まで行った。ピーク電流は SuNAM で~2.5 kA, Bi2223 で~4.5kA まで上げた。通電時間は~5 ms (Bi2223), ~40 ms (SuNAM)となっている。したがって、臨界電流の 10 倍から 20 倍以上の電流を流したことになる。超伝導ケーブルの定格電流はケーブル臨界電流の 50% ~ 70%ほどにするため、定格電流との比較ではこの比はもっと大きくなる。

直流ケーブルではアルミや銅ケーブルでも短絡電流波形規格は特に決まっていない。一つは、負荷短絡があっても電力変換器は高速遮断ができるので、ケーブルに大電流が流れるとは限らないからである。このため、安全基準をどうするかを念頭に実験を進めている。

一方、既存の交流系では AC66 kV では定格電流の 20 倍の電流が 1 秒ほど流れる条件でケーブルが作られるが、最近の遮断器は~60 ms の高速遮断が可能になっている。特に、電鉄用直流遮断器は~1 ms である。これらを勘案しながら、超伝導ケーブルの短絡電流仕様を決めていくことになろう。

2. Coated Conductor& Bi2223 線材の短絡電流実験

コンデンサとサイリスターを利用した電源に超伝導テープ線材を接続し、短絡電流を流している。SuNAM 線材及び Bi2223/Copper 線材の電流電圧波形を Fig. 1 に示す。また、Bi2223 線材では線材接合部の電圧測定を行っている。コンデンサ電圧はそれぞれ 40 V, 45V である。線材部分(長さ 15 cm)を除いて、放電回路は変化がないため、波形の違いは線材特性による。波形から、SuNAM 線材はインピーダンスの中で抵抗が主たる成分であり、タップ電圧はピークで 20 V を越す。一方、Bi2223 線材はインダクタンス成分が主であり、タップ電圧は最大で 3 V であるが、ピーク電流は 4.5 kA を越した。このため、SuNAM 線材では発熱量が大きく、コンデンサ 45 V 放電では焼損した。

以上の実験パラメータなどをまとめて Table 1 に示す。コンデンサ充電をパラメータにして、ピーク電流と短絡電流試験回数、線材単位長当たりに入った熱量を見積もるために電圧と電流積の時間積分値を示した。尚、線材重量はそれぞれ 13.0 g/m(Bi2223), 4.5 g/m (SuNAM)である。

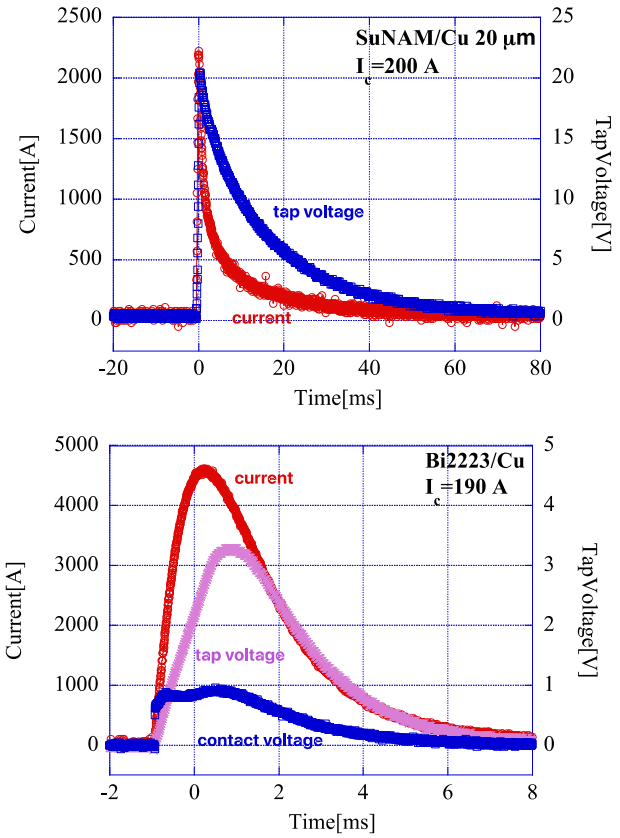


Fig. 1 Short circuit waveforms of voltage & current for SuNAM and Bi2223 tapes

3. 現状のまとめ

パルス幅が数 ms ~ 数十 ms で臨界電流の 10 倍以上の電流を流したが、臨界電流の劣化はそれほど顕著ではなかった。これは現状の遮断器の動作時間が 1 ms ~ 60 ms ほどであることを想定すると、線材単体としては、特に Bi2223 線材は十分に耐力があると思われる。

Table 1 Summary of Short Circuit Experiments

Sample	Peak Current (kA)	capacitor voltage (V)	Pulse duration (ms)	Number of discharge times	Product of voltage & current (J/cm)	Comments
Coated Conductor (SuNAM, 4.5 g/m)	1.63	30	~60	10	6.3	no degradation
	2.19	40	~60	5	14.0	same as above
	2.32	43	~60	1	13.6	small degradation
	2.37	45	~60	1	12.7	burn out
Bi2223 (Sumitomo, 13.0 g/m)	2.34	30	~10	10	0.5	no degradation
	4.61	45	~10	1	3.1	small degradation

参考文献

1. 山口, 神田, イワノフ,「航空機向け積層超伝導ケーブルの短絡電流試験」2020 年度春期低温工学・超電導学会講演概要集, 1B-a02.
2. 山口, 江口, 神田, イワノフ,「HTS テープ線材の短絡電流試験–1」2021 年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集, 2A-p08.
3. 山口, 江口, 神田, イワノフ, 二ノ宮,「HTS テープ線材の短絡電流試験–II」2022 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 2A-a08.

500m 高温超伝導直流送電ケーブルの通電試験及び電流分布（2）

Current test of 500m-long DC Superconducting power cable （2）

筑本 知子, 渡邉 裕文, イワノフ ユーリ, 日野 友明, 奥野 清, 井上 徳之（中部大）
CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, HINO Tomoaki,
OKUNO Kiyoshi, INOUE Noriyuki (Chubu Univ.)
E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

2013 年度からの経済産業省の委託事業により石狩新港地域に建設された高温超電導直流送電システム(SCDC)[1]のうち、太陽光～データセンタ間に建設された石狩回線 1 を用いて、第 3 回目の冷却試験を 2021 年 8 月末の約 1 ヶ月間にわたり実施した[2]。本試験は、2015 年に実施した第 2 回冷却試験から 6 年間の運転停止とその期間に発生した北海道胆振東部地震による影響の有無の確認ならびに SCDC の効率アップのための基礎データの取得を目的として行ったもので、前者については影響等がないことが確認されたことを既に報告した[2–5]。本報告では後者の実験の一環として、ケーブルの各素線への電流の分流状況について調べることを目的として実施した分流通電試験の詳細について報告する。

2. 石狩回線1のケーブル構成と端末接続

回線 1 の Bi 系超電導ケーブルコアの写真を Fig.1、仕様を Table. 1 にまとめる。本システムにおいては、端末部にペルチェ電流リード（PCL）[6]を用いており、Fig.2 に示すように超電導ケーブルコアの各素線は銅編組リード線、窒素フランジの電流端子を介して PCL に接続されている。また、実験中は Fig. 2 に示す各部の発生電圧の自動計測を行った[1]。

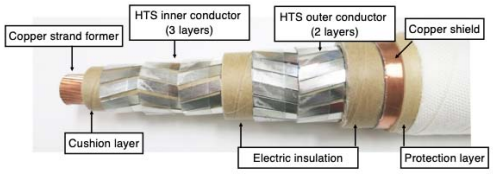


Fig.1 Structure of BSCCO cable core for Line 1.

Table.1 Specification of BSCCO SCDC cable (Line 1)

Rated current, voltage	5kA, ±10kV
Number and I_c of inner conductor	12+12+13 (3 layers), Ic≥6.6kA
Number and I_c of outer conductor	17+18 (2 layers), Ic ≥6.3kA
Insulating layer	PPLP
Outer diameter	42mm
Length	500m (200m+300m)
Number of joint	1

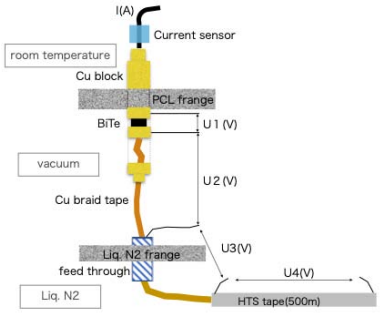


Fig. 2 Illustration of PCL and measurement point

3. 分流通電試験方法と結果

Fig. 2 で示す各 PCL はブスバーに接続され外部電源からの電流が供給されており、理想的な等価回路として Fig.3 が考えられる。本試験では外導体及び内導体の正極側の PCL とブスバーの結線を 60%, 80%, 86%取り外した状態で、所定の電流を流し、負極側の電流分布を測定した。測定時の冷却条件は本システムの標準冷却条件である冷凍機設定温度 (70K)、窒素流量 (40L/min) とした。

Fig.3(a)は内導体電流リード 37 本のうち正極側を 32 本外して 5 本（内導体 1 層目 2 本、2 層目 1 本、3 層目 2 本）つなげた状態で 500A 通電した時の負極側の電流分布である。ここで、7P09 は電流センサーの不具合があったためプロットから削除した。比較のために Fig.3(b)に正極側の PCL をすべて結線して 5kA 流したものを示す。どちらもほぼ均一に分流されているが、ばらつきの仕方に若干の差がある。当日は電流依存性等も含め議論する。

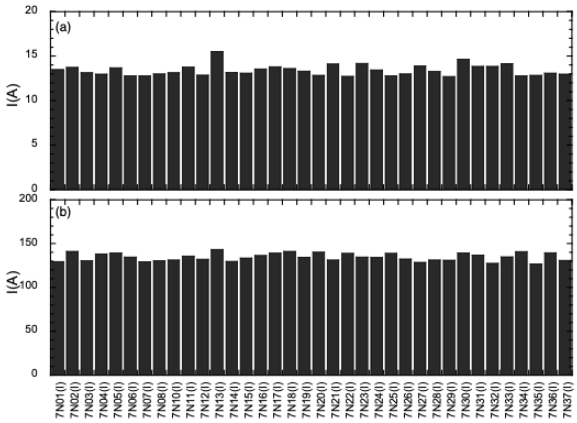


Fig.3 (a) Measured current distribution at inner conductor in the current diversion experiment. (Disconnect 86% of conductor at +pole, I_a=500A)
(b) Measured current distribution without disconnection, I_a=5000A

謝辞

本研究は石狩超電導・直流送電システム技術研究組合の研究活動の一環として、同組合が管理する経済産業省の設備を使用して実施した。

参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (2016) 5402204.
2. 令和 3 年度 石狩「回線 1」再稼働報告書: 石狩超電導・直流送電システム技術研究組合編著.
3. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.58.
4. H. Watanabe, et al.: *ibid.*, p.59.
5. 井上徳之他：電気評論 9・10（2022）pp.6-14
6. S. Yamaguchi et al. : *Physica* C471 (2011) pp. 1300-1303.

電力・水素複合エネルギー貯蔵システムの高精度変動補償に適したSMESシステムの構成

Suitable Configuration of SMES System for High Accuracy Fluctuation Compensation by Electric and Hydrogen Energy Storage Systems

大和田 智也, 深梅 正太郎, 長﨑 陽, 津田 理(東北大学)
OWADA Tomoya, HUKAUME Shotaro, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto(Tohoku univ.)
E-mail: owada.tomoya.p3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

再生可能エネルギーの導入拡大には，電力需給調整を可能とするエネルギー貯蔵システムの活用が有効である．エネルギー貯蔵装置には，即応性，大容量性などの特性が要求されるが，単一で全ての特性を満たすエネルギー貯蔵装置は存在しない．そこで，これまでに，大容量性とコンパクト性に優れる水素貯蔵システムと，応答性と耐久性に優れる電力貯蔵装置を組み合わせた「電力・水素複合エネルギー貯蔵システム[1](Hybrid Energy Storage System：以下，HESS)」を提案し，有効性を検証してきた．HESSの電力貯蔵装置は，小容量システムでは電気二重層キャパシタ(Electric Double Layer Capacitor：以下，EDLC)が適しているが，大容量システムでは，直並列数が多くなり，設置スペースが膨大になる上にユニット間の運転制御が難しくなり適していない．そこで，スケールメリットがある超電導磁気エネルギー貯蔵装置(Superconducting Magnetic Energy Storage:以下，SMES)の適用が有効と考えられる．しかし，SMESはエネルギーの入出力量を電流によって制御するため，電圧制御が可能なEDLCに比べて変動補償性能が低いという課題がある[2]．そこで，本研究では，大容量システムでの変動補償性能向上を可能とするSMESシステムの構成と運転制御方法を検討した．

2. 高精度変動補償に適したSMES構成方法と運転制御方法

Fig.1の様にSMESシステムの変動補償性能向上のために，SMESと直流母線の間に双方向DC-DCコンバータを導入することを考えた．しかしSMESの両端電圧をコンバータの動作範囲内に維持しながら需給調整に必要なエネルギー量を制御することは容易でない．そこで，コンバータとSMESシステムの間にキャパシタを接続し，その両端電圧をコンバータの動作範囲内に維持しながら，SMESコイルからキャパシタへのエネルギー入出量を制御する方法を検討した．また，その際のキャパシタ容量やSMESコイルの電流容量およびインダクタンスが変動補償運転に及ぼす影響について数値解析を用いて検討した．今回の解析に用いた，太陽光発電容量，負荷容量およびSMES容量をTable.1に示す．

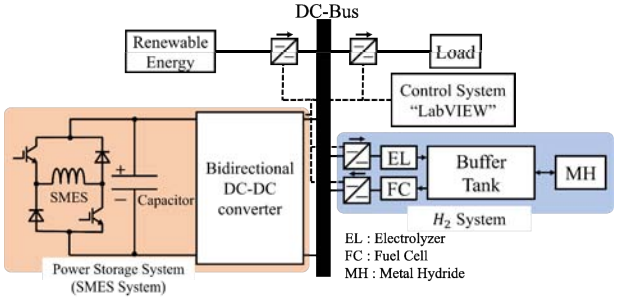


Fig. 1 Proposed Hybrid Energy Storage System (HESS)

Table.1 Configuration of large-scale renewable energy system

SMES Energy Storage [MJ]	300
Photovoltaic Capacity [MW]	860
Load capacity [MW]	43

キャパシタの両端電圧をコンバータの動作範囲内に維持しながら，短時間でキャパシタにエネルギーを供給するには，SMESシステムの即応性と大容量性を確保する必要がある．しかし，即応性と大容量性にはトレードオフの関係があり，コイルのインダクタンスが大きい場合は貯蔵容量を大きくできるが短時間放電に不向きであるのに対して，インダクタンスが小さい場合は，短時間放電に向いているものの貯蔵容量が小さくなり，キャパシタの両端電圧維持に必要なエネルギー量の長期間の連続供給が難しくなる．そこで，コイルを並列接続することを考え，Table.2 に示す条件下で，コイルの並列数がSMESシステムの変動補償運転に及ぼす影響を検討した．

Table. 2 Analytical conditions for SMES system

Capacitance of Capacitor [F]	0.215
Inductance per superconducting coil [H]	680
Initial current of superconducting coil [A]	479
Allowable voltage range of capacitor [kV]	±1.74

解析結果のうち，SMES システムの補償対象となる短周期変動成分と並列数が 2, 3, 4 の場合のキャパシタ電圧の時間変化をそれぞれ Fig.2 に示す．並列数が少ない場合はインダクタンスが大きく，キャパシタ電圧維持に必要なエネルギーを短時間で放出できずに，キャパシタ電圧が低下した．一方，並列数が多い場合は，インダクタンスが小さく即応性が高いためエネルギー貯蔵量が十分多い場合は問題ないものの，エネルギー貯蔵量が低下しやすく，長時間の運転継続が容易ではないことがわかった．なお，本解析では，並列数が3のときに，直流母線の電圧変動率が0.017 %とEDLCなどと同程度になり，長時間の高品質電力の安定供給が可能となった．

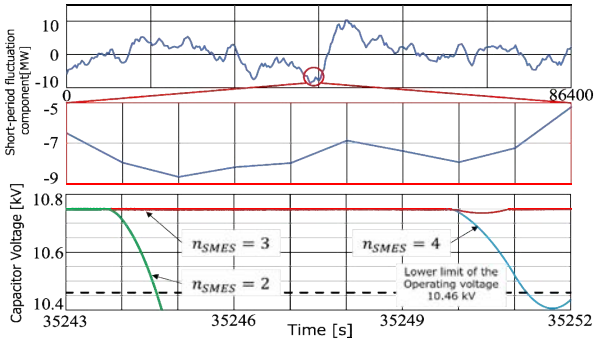


Fig. 2 Trade-off between immediacy and amount of stored energy

以上より，大容量HESSにSMESを適用する場合に高精度な変動補償を実現するには，HESSの直流母線とSMESシステム間に双方向DC-DCコンバータを，SMESシステムとコンバータ間にキャパシタをそれぞれ導入し，SMESシステムの即応性と大容量性を確保できるようSMESコイルを並列接続してインダクタンスを調整することが有効であることがわかった．

参考文献

1. T.Hamajima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.22, No.3, 5701704 (2012)
2. Z.Zhang, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.26, No.4, 5701005 (2016)

再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性（4）

Potential of Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Introduction of Renewable Energies (4)

東川 甲平, 井手 暁仁, 辺 文浩, 木須 隆暢 (九大)
HIGASHIKAWA Kohei, IDE Akihito, BIAN Wenhao, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

再生可能エネルギーの主力電源化にはその出力変動補償の成否が大きな鍵となっており、我々はその解決策としてエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの開発を行っている。これまでに、同ケーブルの概念設計[1]やマイクログリッドにおける運用方法[2]について報告してきた。本発表では、10 m 長の小型モデルケーブルを製作し、ハードウェア閉ループ試験による機能実証を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験方法

本超伝導ケーブルは、10 MW 級の直流マイクログリッドへの導入を想定しており、他の電力貯蔵技術では補償が困難な出力変動への対策として、少なくとも 40 MJ のエネルギー貯蔵量が必要であると見積もっている。この時に要求されるケーブルのインダクタンスは、定格電流を 10 kA とした場合に 0.8 H となり、総ケーブル長を 10 km とすると、1 m あたりで 80 μH のインダクタンスとなる。このようなインダクタンスを有する 10 m 長のモデルケーブルを、Fig. 1 右側に示すとおりに製作した。

一方、このモデルケーブルは実機とは長さも電流容量も異なるため、その機能実証は規模調整を通じたハードウェア閉ループ試験によって行った。その概略を Fig. 1 全体に示す。具体的には、リアルタイムデジタルシミュレータ（RTDS）内には実規模のマイクログリッドをモデル化し、その電流の瞬時値を電流容量の比でスケールダウンしてモデルケーブルに印加し、その際にモデルケーブルに発生する電圧を長さの比でスケールアップして RTDS にフィードバックした。これは、実機とモデルケーブル双方の電流密度と電界を一致させることに対応しており、超伝導線材（接続部も含む）の電流密度-電界特性を直接に実規模システムの挙動に反映させるものである。誘導成分については上記のみ等価性を保てないため、時間スケールの解釈によってその等価性を担保した。

3. 結果・考察

本超伝導ケーブルによる再生可能エネルギーの出力変動補償の高いポテンシャルを示すべく、極端な二つの状況についてその動作を評価した。まず、10 MW 級マイクログリッドにおいて、太陽光による発電量（p_{PV}）が 10 MW から瞬時に失われた場合の結果を Fig. 2(a)に示す。この瞬間、本超伝導ケーブルに流れる電流が下がり始め、これによる誘導電圧が発生している様子がわかる。これにより、同ケーブルからはエネルギーが負荷に供給され、負荷で受け取る電力（p_{load}）は瞬断もなくほぼ一定のままであることがわかる。また、逆に太陽光発電による発電量が 5 MA から瞬時に 10 MW まで増加した場合の結果を Fig. 2(b)に示す。この瞬間、本超伝導ケーブルに流れる電流が上がり始め、先ほどとは逆の誘導電圧が発生している様子がわかる。これにより、同ケーブルは充電動作を行っており、負荷で受け取る電力は太陽光発電の発電量の変化の影響を受けずに一定のままとなっている。以上のように、本超伝導ケーブルによれば、再生可能エネルギーの出力の急激な変化を完全に吸収できることを実験的に示すことができた。この他、蓄電池を不要とするエネルギー貯蔵量 1 GJ に対応した 2 mH/m のインダクタンスを有する小型モデルケーブルについても評価しており、詳細は当日に報告する。

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

参考文献

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

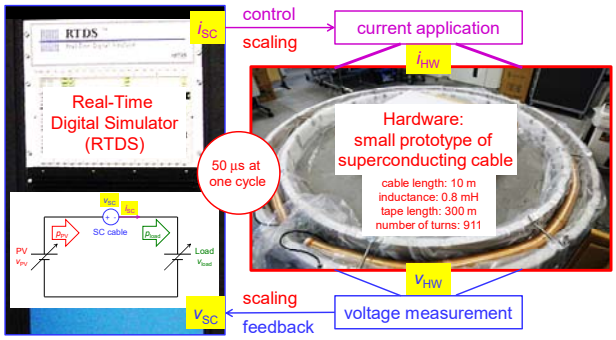
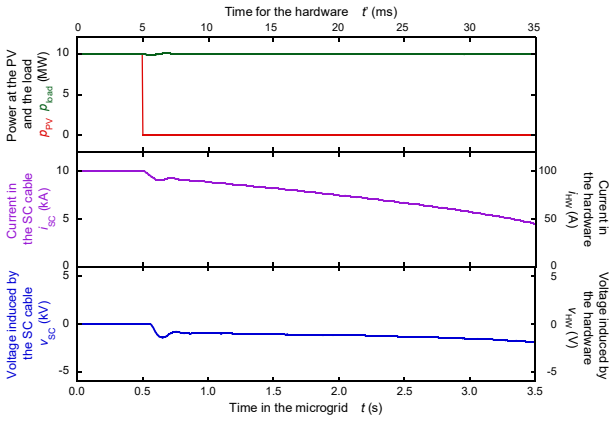
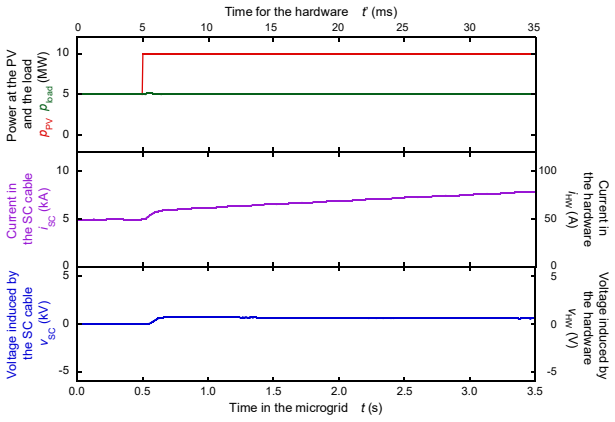


Fig. 1. Schematic diagram of the hardware-in-the-loop simulation using real-time digital simulator and a model cable.



(a)



(b)

Fig. 2. Output power fluctuation compensation behavior demonstrated by the model cable: (a) discharge and (b) charge.

高温超電導コイルを用いた直流遮断システムの限流・遮断特性

Current Limit and Cutoff Characteristics of DC Cutoff System Using HTS Coils

松田 智紀, 西山 花名子, 長﨑 陽, 津田 理 (東北大学)
MATSUDA Tomoki, NISHIYAMA Kanako, NAGASAKI Yoh, TSUDA Makoto(Tohoku Univ.)
E-mail: tomoki.matsuda.p8@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

直流給電システムは,これまでに鉄道や通信分野などにおいて使用されているが,今後は,2050 年のカーボンニュートラル実現に向けた再生可能エネルギー電源の普及促進に伴い,直流給電システムの導入が拡大していくことが予想される。しかし,直流給電システムでは,短絡事故時の大電流遮断が難しく,現在は,直流高速度遮断器が広く用いられているものの,アークを発生させて遮断することから,遮断失敗や寿命低下などが生じている[1]。そこで,これらの課題を解決するために,本研究では,高温超電導コイルを用いた直流遮断システムを提案し,短絡事故時の短時間での電流増加に対する限流・遮断特性について検討した。

2. 解析方法

直流給電システムの短絡事故時にアークレスで遮断するには,短絡事故発生後に電流のゼロ点を形成する必要がある。そこで,RLC 直列回路の過渡振動現象を活用し,短絡事故時の電流上昇を抑制して,電流のゼロ点を形成することを考えた。提案する直流遮断システムの基本構成を Fig.1 に示す。通常時は, L_1に電流が流れ,短絡事故発生時に C に転流することをきっかけに電流が振動して電流のゼロ点を形成し,遮断する。なお, L_1, L_2 のコイル抵抗が大きいとゼロ点の形成が難しくなるため, L_1, L_2のコイルは超電導コイルである必要がある。この提案システムの短絡事故時の限流効果や遮断特性を明らかにするために, 回路解析ソフト MATLAB Simulink を用いて事故電流解析を行った。解析では Fig.1 の可変抵抗を短時間で減少させることで短絡事故を模擬し, Table.1 の回路パラメータである L_1, L_2, C をそれぞれ変化させた時の電流振動の様子を比較した。なお,電源電圧は,1500 V,定常電流値は 100 A ,事故後の電流変化率は 80 kA/s とし,t=50ms に短絡事故が発生するとした。

3. 解析結果及び考察

解析結果のうち, L_1を変化させた場合, L_2を変化させた場合, Cを変化させた場合の電流振動の様子をそれぞれ Fig.2, Fig.3, Fig.4 に示す。Fig.2 より, L_1が大きいほどゼロクロスしやすいものの, 電流振動の周期に影響しないことがわかった。また, Fig.3 より C が大きいほどゼロクロスしやすいものの, 事故発生直後の電流増加量が大きくなり,ゼロクロスするまでに時間を要することがわかった。また,Fig.4 より, L_2が大きいほど,初期振動の振幅が小さくなるものの振動周期が大きくなりゼロクロスしにくくなることがわかった。以上より, 提案システムの各パラメータを適切な大きさに設定することで, 短絡事故発生後の電流上昇を抑制し,ゼロクロス点を実現でき,アークレスの直流遮断が可能となることがわかった。

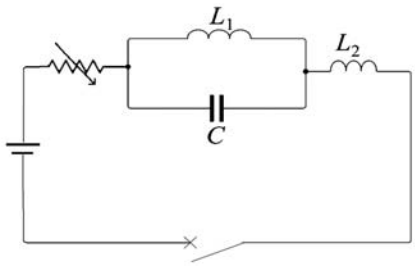


Fig.1 DC cutoff system using HTS coils

Table.1 Analysis conditions

	L_1[H]	C[mF]	L_2[H]
①	0.8, 1.0, 1.2	4.5	0.03
②	1.0	3.0, 5.0, 7.0	0.03
③	1.0	4.5	0.09, 0.05, 0.01

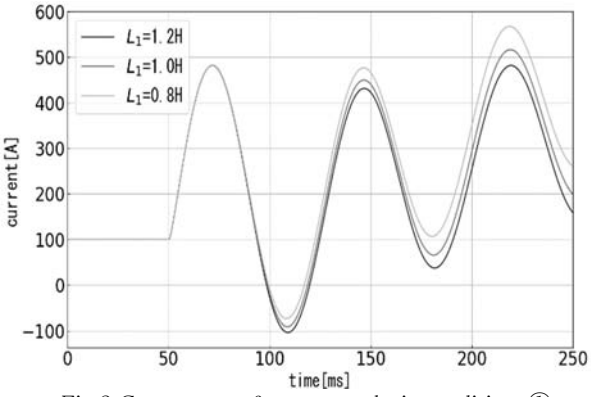


Fig.2 Current waveforms at analysis condition ①

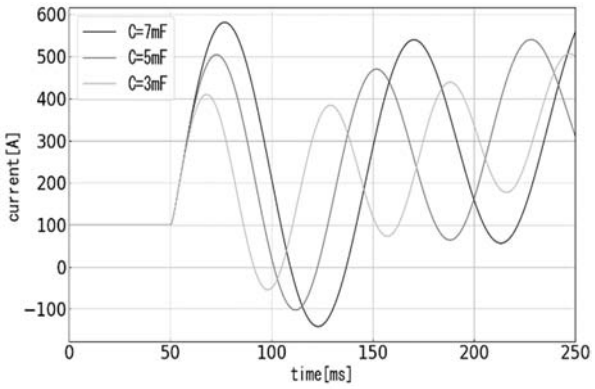


Fig.3 Current waveforms at analysis condition ②

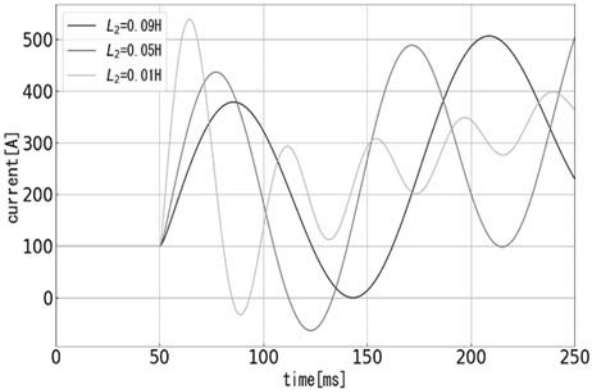


Fig.4 Current waveforms at analysis condition ③

参考文献

1. N. Tooya, et al.:High Speed Circuit Breaker for Railway Substation, Mitsubishi Denki giho, Vol.91(2017), pp.39-43

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年秋)(1):概要
Progress of R&D of SCSC cable in fall 2022 (1): overview

雨宮 尚之, 曽我部 友輔(京大);山野 聡士(古河電工);坂本 久樹(SuperPower Inc.)
AMEMIYA Naoyuki, SOGABE Yusuke (Kyoto U.); YAMANO Satoshi (Furukawa Electric); SAKAMOTO Hisaki (SuperPower)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、低交流損失でロバストな高温超伝導ケーブル(集合導体)である SCSC cable (double "SC" cable; Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor Cable)の研究開発を進めている。SCSC ケーブルは、交流損失低減のために薄膜高温超伝導線を多心化し、フィラメント間分流を可能にして局所的欠陥などに対するロバスト性を向上させるために銅を複合し、結合時定数を低減するために超伝導線を円形コアのまわりにスパイラル状に巻き付けた円形導体である。その構造は、ツイストされた低温超伝導線と類似していると解釈することもできる。大電流化・高電流密度化のために、多数本の線材を多層に巻きつける。相間、また、超伝導線材とコア間は絶縁されていないため、それらの間の電流分流も安定性・保護性を高める。

本発表では、研究開発の進捗の概要を報告する。

2. 多層化と銅撚り線コアの適用ならびに交流損失特性評価

これまで、スパイラル化による結合時定数低減と交流損失低減の原理検証のために、渦電流損失が発生しない GFRP コア単層ケーブルで磁化損失を評価してきた。しかし、巻線可能な柔軟なケーブルにするためには金属コアの適用が必要で、大電流化のためには多層化が必要である。今回は、多層化に関しては GFRP コアを用いて 8 層ケーブルを作製し、磁化損失特性について単層ケーブルと顕著な差がないことを明らかにした(3A-p02)。金属コアの適用に関しては、金属撚り線コアを用いて 4 層ケーブルを作製し磁化損失を測定した(3A-p03、Fig. 1)。コアの渦電流損失は無視でき、磁化損失は、フィラメントの結合が解けている場合についての Brandt, Indenbom の理論値と同水準であった。

また、実際のケーブルには電流が流れているので、インダクタンスの差により外層に偏って流れる交流電流の交流損失への影響可能性が指摘されているが、数値電磁界解析による評価の結果、偏流した通電電流が交流損失に与える影響は無視できる程度であることを明らかにした(3A-p05)。

3. 金属撚り線コア多層ケーブルの通電試験

コア回転・線材スプール固定型の短尺ケーブル作製機を用いて、長さ約 500 mm の銅撚り線コア 4 層ケーブル(線材幅 2 mm、フィラメント数 10、銅めっき厚さ 10 μm、各層線材数 2)を試作した(Fig. 2)。このケーブルに対して、LBL において開発された Higley's flute type terminal を取り付け、通電試験を実施した。電界電流特性を Fig. 3 に示す。1 回目の通電で約 190 A で熱暴走しているが、この値は、事前に測定したケーブルを構成する超伝導線の臨界電流の和にほぼ等しく(Fig. 4)、ケーブルの通電特性は良好であると判断できた。

4. 長尺ケーブル作製機の導入

リール・トゥ・リールで、コアやコアに線を巻き付けたケーブルを送って線を巻き付けることが可能な長尺ケーブル作製機を京都大学に導入した。これを用いることにより、今後、十分な量のケーブルを製作し、各種試験を進めていく。

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。また、ケーブルの電流端子作製技術の導入は、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)により可能となった。

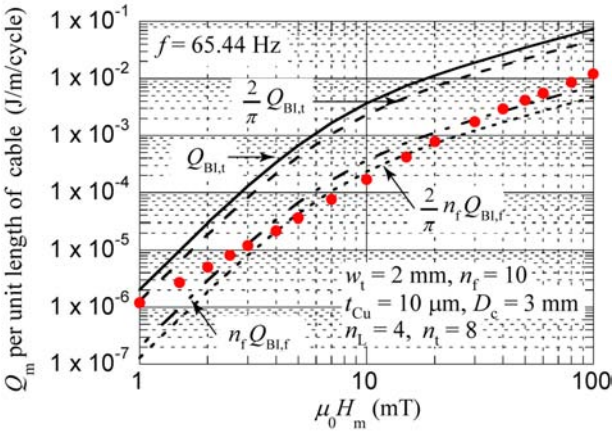


Fig. 1 Magnetization loss in a 4-layer cable with core of twisted bare copper wires.

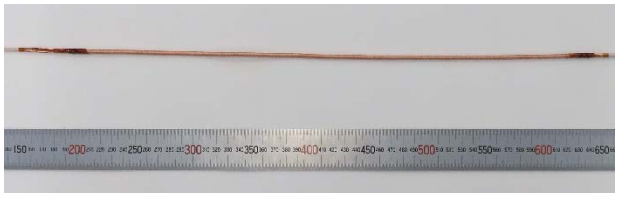


Fig. 2 4-layer cable with core of twisted bare copper wires.

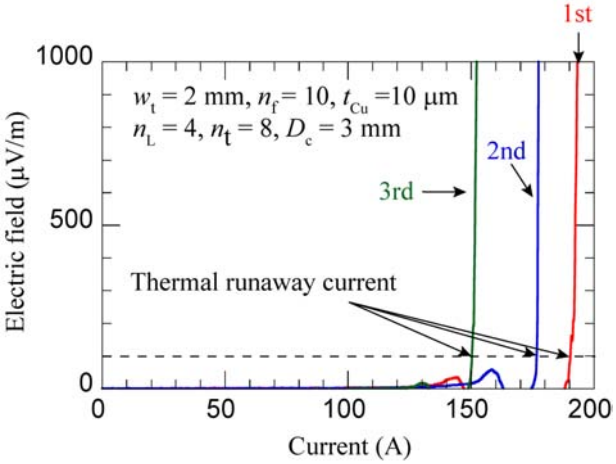


Fig. 3 Current transport characteristics of a 4-layer cable (E is per unit length of tape.).

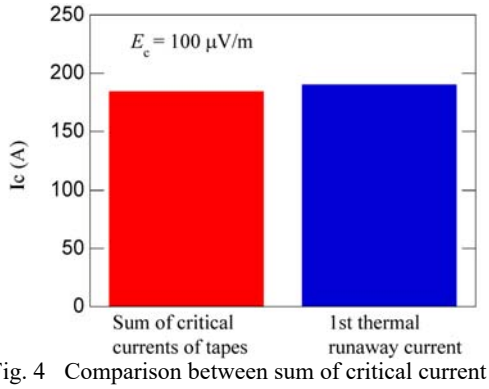


Fig. 4 Comparison between sum of critical current of tapes and the 1st thermal runaway current at which 100 μV/m appeared along tape (averaged length used).

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年秋)(2): 層数の異なる SCSC ケーブルの磁化損失測定

Progress of R&D of SCSC cable in fall 2022 (2): Magnetization loss measurements of SCSC cable with various number of layers

重政 茉於, 祖父江 卓哉, 曽我部 友輔, 高橋 明, 藤野 正人, 雨宮 尚之(京大)
SHIGEMASA Mao, SOBUE Takuya, SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, FUJINO Masato, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

We are developing SCSC cable, in which copper-plate multifilament coated conductors are spirally wound on a round core, as shown in Fig. 1, in order to confine the coupling current in a half of its spiral pitch and, then, to reduce the coupling time constant. Therefore, we can achieve both low ac loss and high robustness against normal transition. In order to examine the impact of number of layers on the magnetization loss of SCSC cables, we measured magnetization losses of spiral copper-plated multifilament coated conductors with various number of layers.

2. Sample Specifications and Experimental Method

The samples were copper-plated multifilament coated conductors which were spirally wound with various number of layers on 100 mm-long GFRP cores. The core diameter D_c was 3 mm, the conductor width w_t was 2 mm, the number of filaments n_f was 10, the copper thickness t_{Cu} was 10 μm, and the number of layer n_L was 1, 2, 4 and 8. The sample was cooled with liquid nitrogen, and then a transverse magnetic field was applied. We measured magnetization losses per unit length of conductor (tape) in one cycle of the sinusoidal change in the applied magnetic field, Q_m (J/m/cycle).

3. Experimental Results and Discussion

In Fig. 2 and Fig. 3, the measured magnetization losses of samples, whose number of layers are 1 and 8, respectively, are plotted against field amplitude, $\mu_0 H_m$. In Fig. 2 and Fig. 3, the theoretical magnetization loss of monofilament conductor with the same w_t as the sample, $Q_{BI,t}$, and those of multifilament conductor with the same filament width as the sample, $n_f Q_{BI,f}$, are also plotted. Here, $Q_{BI,t}$ and $n_f Q_{BI,f}$ are given as follows:

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

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

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

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

where I_c is the critical current of the conductor. At the frequency f of 112.5 Hz or lower, the measured Q_m were near to $2/\pi \times n_f Q_{BI,f}$ when the field amplitude was large. It suggests that the filaments of conductors of samples with any number of layers were almost decoupled.

When the filaments are almost decoupled, the magnetization loss, Q_m, can be approximated as follows:

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

where Q_h is the hysteresis loss, and Q_c is the frequency-dependent component which is dominated by the coupling loss between filaments. In Fig. 4, Q_m values of 8-layer sample are plotted against the frequency, along with fitting curves obtained by fitting the measured Q_m on eq. (5).

Acknowledgement

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

Reference

1. SHIGEMASA Mao et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 103, 1A-p01

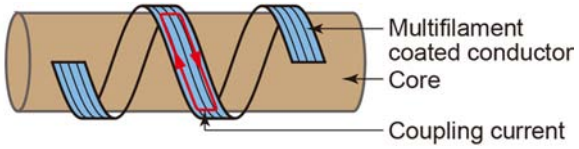


Fig. 1 Spiral coated conductor and the coupling current [1].

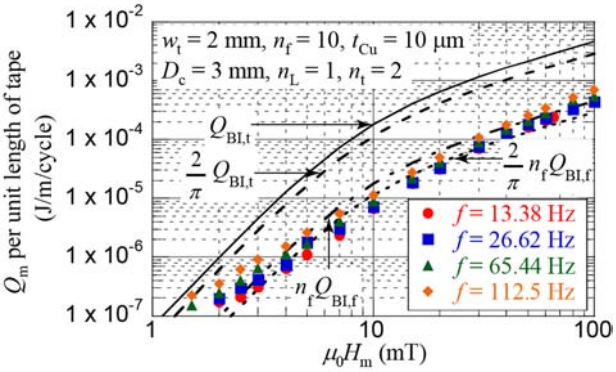


Fig. 2 Magnetization loss per tape of single-layer spiral coated conductor vs. magnetic field amplitude.

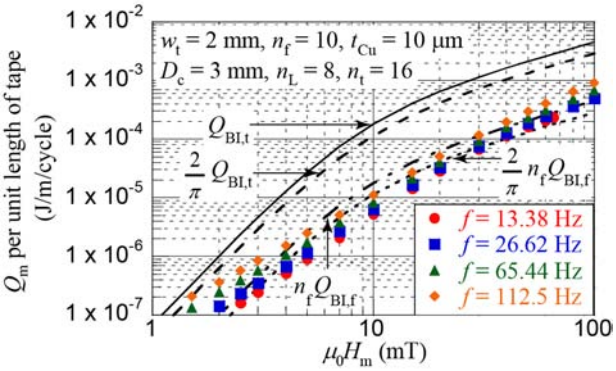


Fig. 3 Magnetization loss per tape of 8-layer spiral coated conductor vs. magnetic field amplitude.

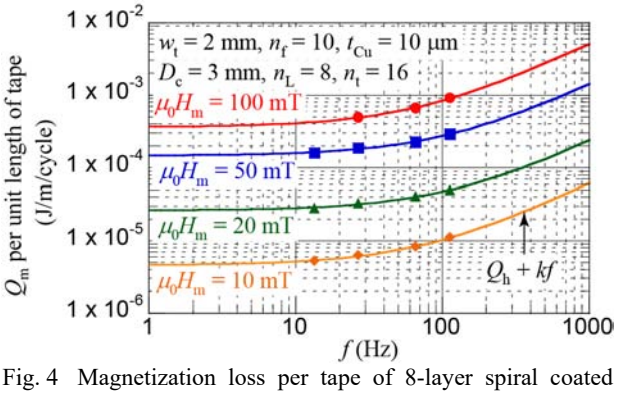


Fig. 4 Magnetization loss per tape of 8-layer spiral coated conductor vs. frequency.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(3): スパイラル銅複合多芯薄膜線材の磁化損失に与える金属コアの影響

Progress of R&D of SCSC cable in fall 2022 (3): Influences of metal cores on magnetization losses of spiral copper-plated multifilament coated conductors

祖父江 卓哉, 重政 茉於, 曽我部 友輔, 高橋 明, 藤野 正人, 雨宮 尚之（京大）
SOBUE Takuya, SIGEMASA Mao, SOGABE Yusuke, TAKAHASHI Akira, FUJINO Masato, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)
Email: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

SCSC cable is a high current, small ac loss, and robust cable, in which copper-plated multifilament coated conductors are wound spirally on a round core. We previously studied the loss reduction effect of its spiral structure by using such cables with GFRP rod cores in order to eliminate the influence of the eddy current losses of the cores [1]. We must replace GFRP rod cores with metal cores in practical SCSC cables, because GFRP cores are so rigid that we could not wind coils using cables with GFRP cores.

Fig. 1 shows various types of cores. The core of single soft copper wire, which is used in CORC® cables/wires, is preferred from the viewpoint of current sharing for quench protection, but its possible large eddy current loss is a concern. Eddy current losses could be small in the core of single SUS304 wire and that of twisted insulated copper wires, but such cores do not allow current sharing during quench or thermal runaway. Low eddy current loss and current sharing might be compatible in the core of twisted bare copper wires. In this study, we evaluated the influence of the cores of twisted copper wires on the magnetization loss of SCSC cable.

2. Experimental method and samples

The coated conductor used in this study was the copper-plated multifilament coated conductor manufactured by Furukawa Electric Co., Ltd. and SuperPower Inc. The width of the coated conductor w_t was 2 mm, the number of filaments n_f was 10, and the thickness of copper t_{Cu} was 10 μm.

We prepared three samples, in which we wound 4 layers of 2 coated conductors on three different cores: GFRP rod, twisted bare copper wires, and twisted insulated copper wires whose outer diameters were about 3 mm. The length of each sample was 100 mm. We cooled the samples in liquid nitrogen and applied transverse magnetic field of 13.38 Hz, 26.62 Hz, 65.44 Hz or 112.5 Hz for the range of $\mu_0 H_m$ = 1 mT to 100 mT. Then, we measured magnetization losses by using a linked pick up coil [2].

3. Experimental results and discussion

In Fig 2, the magnetization losses of the three samples at 65.44 Hz normalized by $Q_0 = (\mu_0 H_m)^2 \pi w_t^2 n_t / \mu_0$ are plotted against the normalized magnetic field amplitude H_m/H_c to eliminate the influence of the difference in the critical current of the samples, where n_t is the number of conductors and $H_c = I_c/\pi w_t$. The normalized magnetization losses of the three samples are almost same. These results indicate that the eddy current losses in the core are negligible as compared to the magnetization losses in coated conductors even if the copper wires are bare.

In Fig 3, the magnetization losses of the sample with the core of twisted bare copper wires measured at 4 frequencies are plotted along with the analytical values of hysteresis loss: $Q_{BI,t}$ of w_t = 2 mm, $n_f Q_{BI,f}$ of w_f = 0.2 mm and the values multiplied by a factor of $2/\pi$ considering spiral geometry [1]. The measured values roughly follow $n_f Q_{BI,f}$ or $\frac{2}{\pi} n_f Q_{BI,f}$ even at 112.5 Hz. These results show that the measured magnetization losses are dominated by hysteresis losses.

Acknowledgments

This work was supported in part by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1.

References

1. N. Amemiya, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 35 (2022) 025003
2. Z. Jiang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 17 (2004) 371

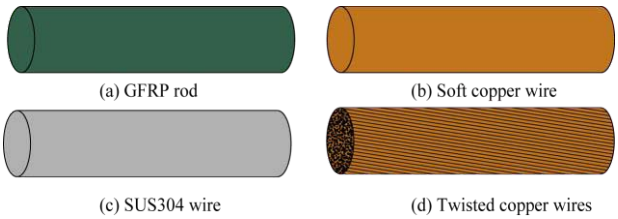


Fig 1 Various cores for SCSC cable.

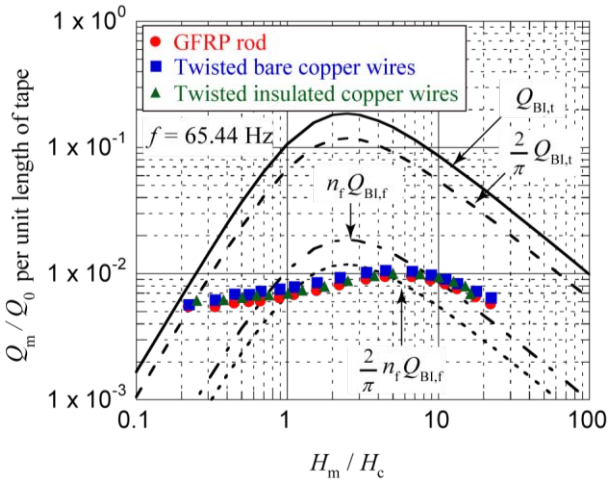


Fig. 2 Measured normalized magnetization losses of the samples with the various cores (symbols) together with normalized analytical values by Brandt and Indenbom (lines) are plotted against normalized magnetic field amplitude H_m/H_c.

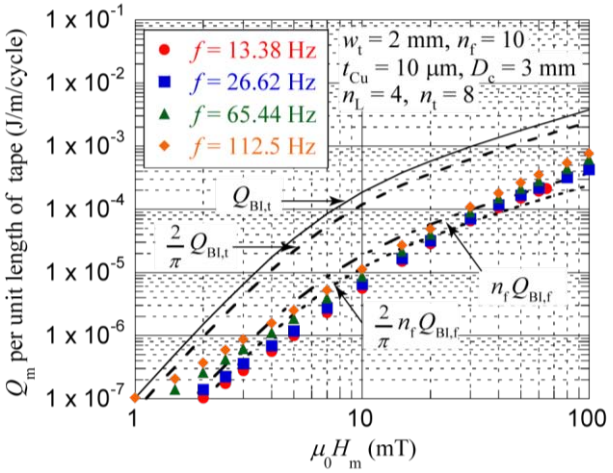


Fig. 3 Measured magnetization losses of the sample with the core of twisted bare copper wires (symbols) together with analytical values by Brandt and Indenbom (lines) are plotted against field amplitude $\mu_0 H_m$.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(4)：スパイラル銅複合多芯薄膜線材のクエンチ過程における金属コアへの電流分流の測定

Progress of R&D of SCSC cable in fall 2022 (4): Measurements of current sharing by metal core in quench process of spiral copper-plated multifilament coated conductors

許 光煒，曽我部 友輔，雨宮 尚之（京大）
XU Guangwei, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

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

2. Experimental method and samples

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

The sample was conduction-cooled at 30 K as the typical value. The normal zone was generated by a small resistive heater attached at the center of each spiral coated conductor.

We reported the experimental result under the operating current of 160 A in 2022 spring. Quench did not occur and the normal voltage recovered after about 80 s. This time we increased the operating current to excite quench and observe the current-sharing by the core when quench occurred.

3. Experimental results and discussion

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

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

where T_{core} is the core temperature, T_{tape} is the tape temperature, and T_{op} is the initial temperature (30 K).

We conducted the calculation by using $\alpha = 0.5$ and $\alpha = 1$ model, the results also show that the currents are almost independent with α, so we only show the result of α=1 as the example. Fig. 2 was the current and temperature distribution calculated by using experimental results, which shows that almost all current flowed in the core when quench was detected.

Fig. 3 shows the Comparison of tape current between operating current 330 A and 160 A in each section. In case of 160 A operating current, most of the current was shared to the core in section 3-4, while almost no current was shared to the core in section 5-6, which means the current was mainly shared through the contact resistance in section 2-5 within about 50 mm of the sample, and almost no current was shared through the current terminals. As for the case of 330 A operating current, there was little difference in the current-sharing in each section, which means the current was mainly shared from the terminals.

We considered that current-sharing will occur over a longer section as the operating current increases, so all the current will be shared through the contact resistance in a long section rather than from the current terminal in case of 330 A operating current if the sample is long enough.

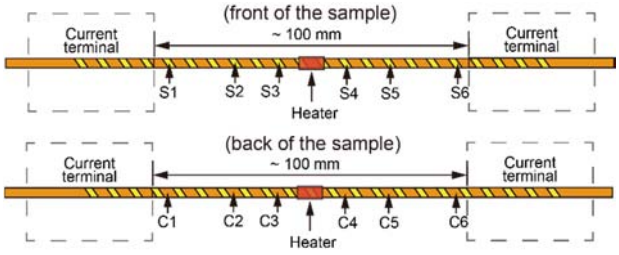


Fig. 1 Positions of voltage taps set on the sample.

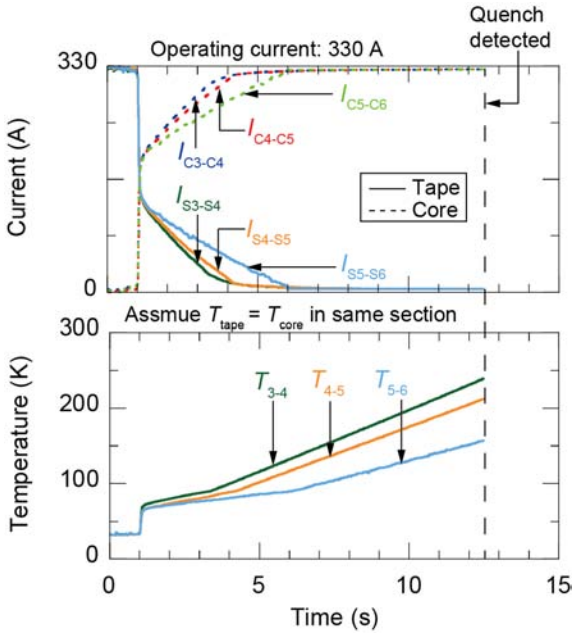


Fig. 2 Current and temperature distribution (calculated by using experimental results).

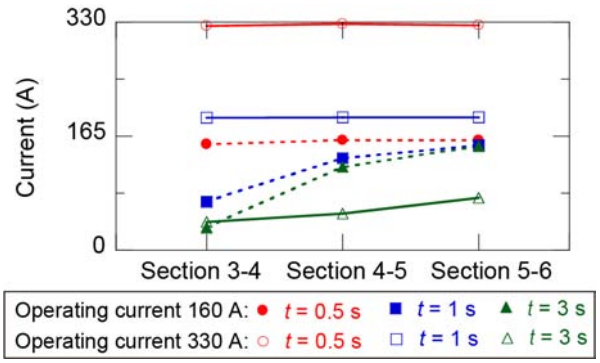


Fig. 3 Comparison of tape current between operating current 160 A and 330 A in each section.

Acknowledgments

This work was supported in part by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1, JSPS KAKENHI Grant Number JP22H00142, and Japan-U.S. Science and Technology Cooperation Program in High Energy Physics.

SCSC ケーブルの研究開発の進捗（2022 年秋）(5)：層間偏流を考慮した SCSC ケーブルの全損失解析

Progress of R&D of SCSC cable in Autumn 2022 (5): Numerical analyses of ac losses in SCSC cables carrying ac transport current in ac magnetic field

江崎 友哉，曽我部 友輔，雨宮 尚之（京大）
EZAKI Yuya, SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

SCSC cable have a multilayer structure in which the HTS tapes are wound radially to increase current capacity. In multilayer SCSC cable, current tend to concentrated in outer layers due to different self-inductance of each layer and mutual inductances between layers. Non-uniform current distribution among layers may lead to larger ac loss compared to it with uniform current distribution among layers. However, it is difficult to measure the total ac loss of SCSC cables with the non-uniform current distribution among layers due to the restriction of length of sample in actual measurement setup.

In this presentation, we will report on the ac loss analysis method for SCSC cables carrying non-uniform ac current under ac magnetic field.

2. Analysis method

In our analysis method, the HTS tapes composing each layer were regarded as a parallel circuit, and a circuit model was constructed as shown in Fig. 1 [1]. In the circuit model, L_n was the self-inductance of each layer, M_{mn} was the mutual inductance between each layer, $R_{sc,n}$ was the equivalent resistance of the HTS tapes in each layer, and R_t was the terminal resistance, respectively. $R_{sc,n}$ was calculated by power-law model considering the critical current density J_c–magnetic field B characteristic. In circuit model, the current in each layer at each time was calculated by giving the time variation of the current in the entire cable I_{cable} and the time variation of the external magnetic field B_{ext}.

Using the obtained time variation of the current in each layer as a boundary condition, a numerical electromagnetic field analysis using a finite element method [2] was performed to estimate the ac losses of the multilayer SCSC cable considering non-uniform current distribution among layers.

3. Analysis conditions and results

Analyses were performed on a 4-layer SCSC cable, with 2 tapes per layer. The cable length was 10 m, the frequency of I_{cable} and B_{ext} was 50 Hz. We used the Kim-model as J_c–B characteristics, and its parameters were decided by fitting with measured I_c–B characteristic of an HTS tape at 77K.

The time evolution of current in each layer at I_{cable} = 160 A, B_{ext} = 0.5 T is shown in Fig. 2. Current is concentrated in the third and fourth layers. When the currents in outer layers approach to I_c, the currents in outer layers are limited due to increasing R_{sc}, and the currents in the inner layers are increased.

The dependence of total ac losses on I_{cable} and B_{ext} are shown in Fig. 3. The total ac losses are nearly identical despite of the different I_{cable}. This is because the ac loss in the SCSC cable is almost magnetization loss by B_{ext} and hardly affected by $I_{t,cable}$. Namely, the ac losses of SCSC cables carrying ac current under ac magnetic field could be reduced by multifilament structure. Moreover, although the non-uniform current distribution should appear in the SCSC cables with practical length, their ac losses is not influenced by the non-uniform current distribution.

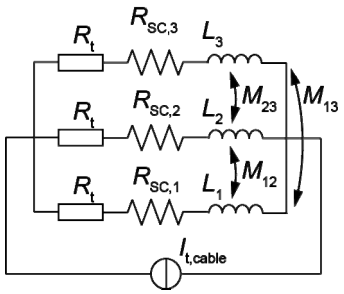


Fig 1. Circuit model

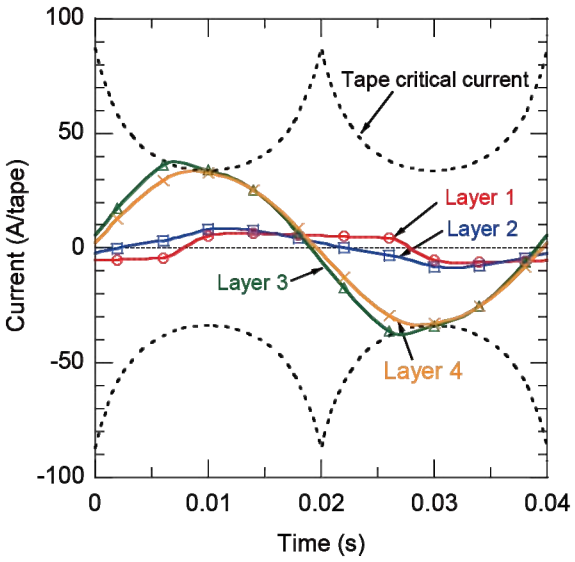


Fig. 2 Time evolution of current in each layer

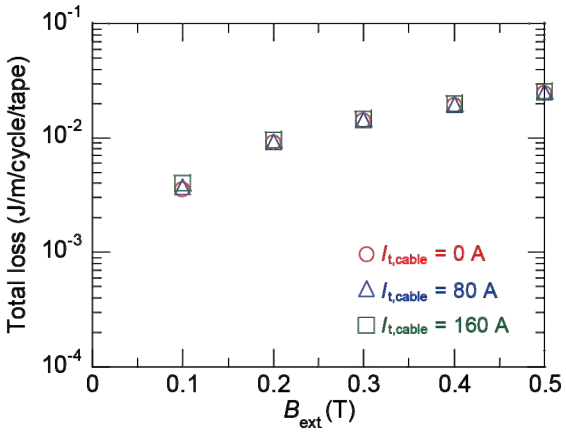


Fig. 3 Total ac losses in the SCSC cable

Acknowledgments

This work was supported in part by JST-Mirai Program Grant Number JPMJMI19E1, Japan, in part by JSPS KAKENHI Grant Number JP22K14238, and in part by Support for Promotion of Research Activities by The Kyoto University Foundation.

References

1. F. Grilli, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 14 (2004) p. 94
2. T. Mifune, el al.: Supercond. Sci. Technol., Vol.32 (2019) 094002

SCSC ケーブルの研究開発の進捗(2022 年秋)(6): 銅複合多芯薄膜線材の熱暴走解析と実験の比較

Progress of R&D of SCSC cable in fall 2022 (6): Comparison of simulations and experiments of thermal runaways in copper-plated multifilament coated conductors

曽我部 友輔, 沈 靖宇, 雨宮 尚之(京都大学)
SOGABE Yusuke, SHEN Jingyu, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto U.)
E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

薄膜高温超伝導線を多芯化し銅分流層を複合した銅複合多芯薄膜線材は、あるフィラメントが常伝導転位した場合に他のフィラメントへの分流が可能となることから、クエンチ・熱暴走に対するロバスト性が高い線材として期待される。しかし、分流現象が発生した場合に線材幅方向の電流による付加的なジュール発熱が発生するなど、単芯線と比較して複雑な熱的現象が発生する。我々は、銅複合多芯薄膜線材を対象とした熱ー電磁界連成解析手法を構築し、人為的に欠陥を生じさせた線材を対象とする実験結果と、同様の条件における解析結果を比較した。

2. 熱暴走解析手法

二次元熱解析モデルと回路モデルを組み合わせ、銅複合多芯薄膜線材の熱暴走解析を実現した。二次元熱解析モデルでは、薄膜線材の長手方向(x 方向)と厚さ方向(z 方向)を解析対象とし、試料の薄膜線材だけではなく、実験時に試料の線材を固定するために使用していた GFRP 板を考慮に入れた。回路モデルの模式図を Fig. 1 に示す。各フィラメントは超伝導層に対応する等価的な抵抗と銅層の抵抗の並列抵抗としてモデル化され、各フィラメントが幅方向の銅層の抵抗で接続されているとした。

3. 実験及び解析対象

ここでは、羅らが行った銅複合多芯薄膜線材を対象とした熱暴走実験[1]を比較対象とし、実験と解析結果を比較した。この実験では単芯線と多芯線における熱暴走特性を比較しており、Fig. 2 に示すように、両者の熱暴走開始電流は同じであることが示されている。一方、熱暴走開始電流である 205 A においては多芯線の方が早く熱暴走を開始しており、これには横断電流が寄与していると考えられる。

測定・解析対象の試料は 5 フィラメント、20 μm の銅分流層を複合した 4 mm 幅の銅複合多芯薄膜線材であり、30 K、2 T での臨界電流 I_c は 240 A である。実験では特定のフィラメントに人為的に I_c 低下箇所を形成し、熱暴走を発生させた。

4. 解析結果

通電電流 205 A における線材長手方向電圧及び幅方向電圧の測定・解析結果を Fig. 3 に示す。この結果から、構築した熱暴走解析モデルは実験結果をよく再現していることが確認された。

熱暴走が発生した通電電流 205 A での、電圧が局在している位置における各電流成分による発熱の計算結果を Fig. 4 に示す。長手方向に流れる電流による発熱は超伝導層よりも銅層の方が大きくなっている一方で、全 Joule 発熱のうち 5%が銅層中の横断電流によって発生していた。この結果から、横断電流による Joule 発熱が熱暴走特性に影響していることが示され、羅らの実験結果を説明することができた。

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. X. Luo, et al.: *IEEE-TAS*, 32, 6600609, 2022.

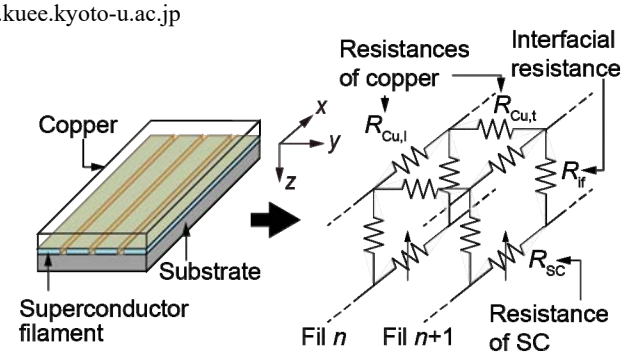


Fig. 1 Schematic of circuit model.

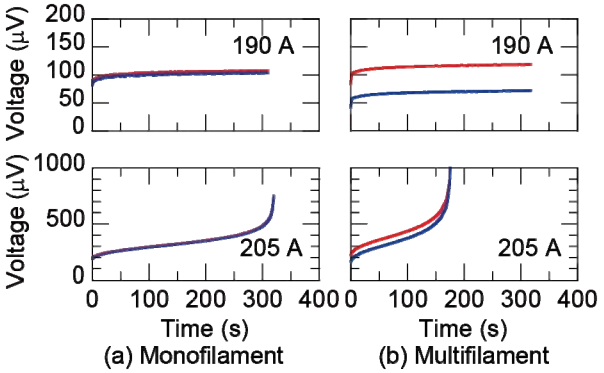


Fig. 2 Measured longitudinal voltage in (a) monofilament and (b) multifilament coated conductor.

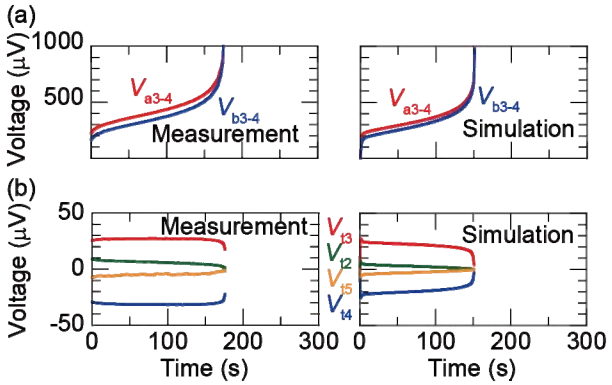


Fig. 3 Comparison of measurement and simulation results at 205 A; (a) longitudinal and (b) transverse voltages.

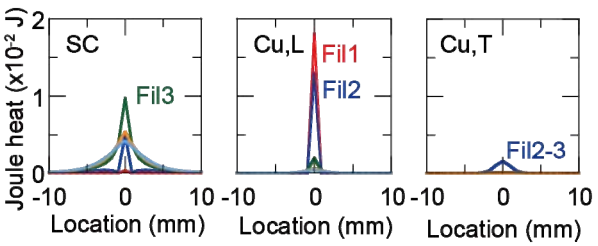


Fig. 4 Calculated Joule heating generated by currents in superconductor filaments (SC), copper layer in longitudinal direction (Cu,L), and copper layer in transverse direction (Cu,T) at t = 150 s.

HTS-SQUID を用いた高感度な磁気ナノ粒子の交流磁化特性評価装置の開発

Development of highly sensitive evaluation system for AC magnetization characteristics of magnetic nanoparticles using HTS-SQUID

黒田 滉人, 守屋 列神, 山本 泰起, 岸本 航平, 山下 慶, 王 璡, 堺 健司, 紀和 利彦（岡山大）
KURODA Hiroto, MORIYA Rekka, YAMAMOTO Taiki, KISHIMOTO Kohei, YAMASHITA Kei,
WANG Jin, SAKAI Kenji, KIWA Toshihiko (Okayama Univ.)
E-mail: pd961eut@s.okayama-u.ac.jp

1. 研究背景

磁気ナノ粒子(MNPs：magnetic nanoparticles)と呼ばれるナノサイズの磁性体粒子を用いた医療・バイオ分野での応用技術の開発が進んでいる. 本研究では, 磁気免疫検査法の実現に向けて, MNPs の交流磁化特性を高感度計測可能な装置を開発した. 磁気免疫検査法は, 不透明な検体を液相のまま測定可能であるため前処理工程が少なく, 短時間での検査が可能であり, 病気の新規診断法として実用化が期待されている. 検出方法は, 抗体が修飾された MNPs に目的の抗原を結合させ, 体積増加によるブラウン緩和時間を交流磁化特性の変化で検出する[1].

高精度な検査を実現するためには, 事前に MNPs 溶液の基礎特性として交流磁化特性評価が必要である. 加えて, 実際の免疫検査では, 低濃度の MNPs 溶液が使用されるが, 濃度と溶媒種によって MNPs の凝集状態が変化することで, 交流磁化特性が変化する可能性もある. そのため, 高感度な交流磁化特性計測装置が必要となるが, 現状の超高感度計測装置は周波数帯域が限定され, 装置も大型である. 著者らはこれまでに超高感度磁気センサの高温超伝導量子干渉素子(HTS-SQUID)を用いた卓上型の高感度直流磁化特性装置の開発を行い[2], 本研究では開発した装置をさらに発展させ, 低濃度領域における MNPs の交流磁化特性評価装置を開発したので報告する.

2. 開発したシステムと測定方法

Fig. 1 に, 本研究で開発した計測装置のシステム構成図を示す. PC 制御により 0.13 mT の磁場を発振器とバイポーラ電源を用いて試料に印加した. 印加磁場により試料は磁化され, 試料から発生した 2 次的な磁場を検出コイルで検出した. 印加コイルは直径 0.3 mm の Cu 線を用いており, 高さ 60 mm, 内径 37 mm, 巻き数は 4000 回とした. また, 検出コイルは直径 0.2 mm の Cu 線を用いており, 高さ 38 mm, 内径 11.8 mm, 巻き数は 1800 回である. 印加コイル, 検出コイル, 試料は, 同軸上に配置されている.

印加磁場や環境磁場ノイズを低減するため, 検出コイルは同一の 2 つのコイルを互いに逆向きで直列に配置したグラジオメータ構造とした. HTS-SQUID と磁気的に結合した超伝導入力コイルと検出コイルを直列に接続することで検出コイルからの信号を HTS-SQUID で検出した. 検出コイルと HTS-SQUID は磁気シールド内に設置し, ロックインアンプを用いて SQUID の出力信号から検出磁場強度 Rと印加磁場に対する位相差 θを測定した.

測定した R と θから, 信号の実部と虚部を算出した. 実部は磁気モーメントの大きさ, 虚部はエネルギー損失を表す. 測定では, 目的の MNPs からの磁気信号以外に. 反磁性体である希釈溶媒や試料ケースからの磁気信号をも検出し, 測定結果に反映される[3]. 本研究では, 予め MNPs を含まない希釈溶媒のみを計測し, Rと θを取得することで, 補正を行った.

3. 測定試料

磁気ナノ粒子は, MRI 用肝臓造影剤として利用されている Resovist®（富士フィルム RI ファーマ製）を用いた. この Resovist®を純水で希釈し, 溶液量 500 µl としたのちマイクロチューブに入れて測定を行った. Resovist®は粒子径が約 65 nm であり, 交流磁化特性は, 実部は約 100 Hz で減衰し始め, 虚部は約 1.5 kHz でピークを示すことが知られている.

4. 測定結果

Fig. 2 に鉄濃度を 2.4 mg/ml に調製した試料を用いて, 本研究で開発した装置で測定した実部と虚部の結果を示す. これらの特性は, Resovist®特有の交流磁化特性と一致した. さらに鉄濃度を低くした結果, 開発した装置で鉄濃度 27.9 µg/ml 溶液の交流磁化特性を測定できることが示された.

5. まとめ

本研究では HTS-SQUID を用いて高感度交流磁化特性評価装置を開発した. 開発した装置を用いて MNPs の周波数特性を測定した結果, 鉄濃度 27.9 µg/ml の低濃度 MNP 溶液の測定に成功した.

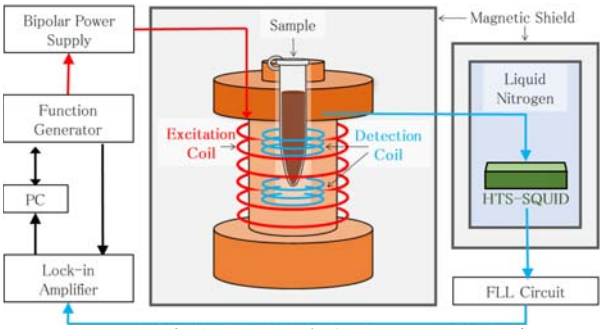


Fig.1 交流磁化特性評価装置のシステム構成

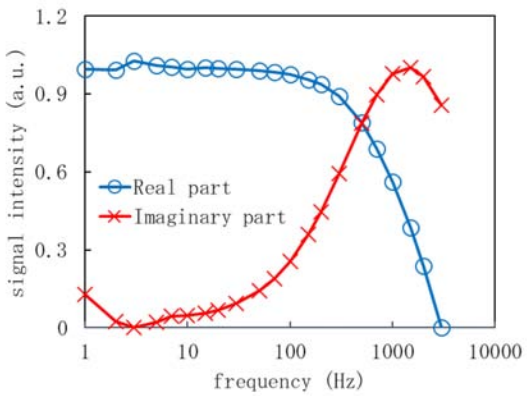


Fig.2 Resovist®の周波数特性測定結果

参考文献

1. K. Enpuku et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 023002
2. 一色等, 第 93 回低温工学・超電導学会秋季講演概要集 (2016) p. 53
3. K. Jinno et al., AIP Advances 9 (2019) 125317

ハードウェア記述言語を用いたデジタル SQUID 磁束計のレイアウト設計

Layout design of Digital SQUID magnetometer using hardware description language

今谷 純平, 成瀬 雅人, 明連 広昭(埼玉大院)
IMATANI Jumpei, NARUSE Masato, MYOREN Hiroaki (Saitama Univ.)
E-mail: j_imatani@super.ees.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導デバイスは, エレクトロニクスの諸分野で応用研究されており, 中でも超伝導量子干渉素子(Superconducting Quantum Interference Device : SQUID)は高感度磁気センサに応用できる。我々は, サブ磁束量子分解能を実現できる間接フィードバックと, 高ダイナミックレンジを実現できる直接フィードバックを組み合わせることによって, 高ダイナミックレンジかつサブ磁束量子分解能を持つデジタル SQUID を設計してきた[1]。

これまで提案されてきたデジタル SQUID[1]は, アナログ回路シミュレータ xic(WRspice)[2]を用いてレイアウト設計, シミュレーションを行ってきた。しかし, アナログシミュレーションではジョセフソン接合の位相差などの微分方程式解いていくためにシミュレーションに大きく時間がかかってしまう。本研究では, シミュレーション時間を大きく短縮させるため, デジタルシミュレーションを行うことができる Verilog-XL[3]を利用したデジタルSQUIDのレイアウト設計を行った。

設計には, 臨界電流密度 10kA/cm^2 の HSTP(Highspeed Standard Process)[4]を仮定している。

2. レイアウト設計

SFQ 論理回路では, セルベース設計法を採用している。セルベース設計法とは, あらかじめ論理ゲートや配線などの要素回路を一定のルールのもと設計を行い, それらを組み合わせて大規模な回路の設計を行う手法である。本研究では CONNECT(Cooperation of Nagoya, NEC, CRL, Teams with Yokohama Nation)セルライブラリ[5]を用いて, 回路の設計を行った。CONNECT セルライブラリでは, 1 辺の長さが 40μm に規格化されており, セルはこの長さの整数倍の正方形, または長方形で設計される。

SFQ を伝搬する基本回路である JTL の CAD によるレイアウト図, xic によるレイアウト図を図 1 に示す。

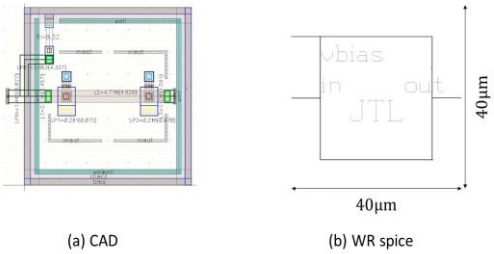


Fig. 1 Layout diagram of JTL

3. デジタルSQUID磁束計のレイアウト図

設計したレイアウト図は Fig. 2 のようになった。縦 1040μm, 横 1640μm となり, これは実際の作製を反映させた設計となっている。

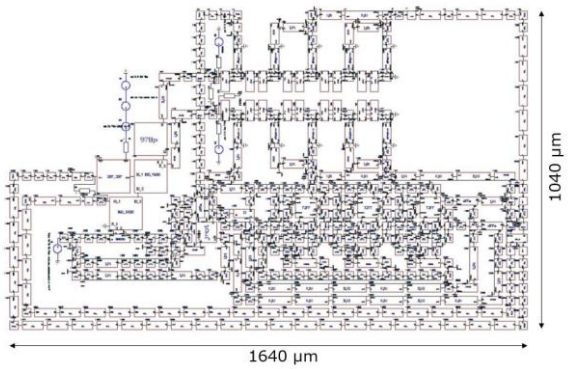


Fig. 2 Layout design of Digital SQUID

4. シミュレーション結果

デジタル SQUID のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。上段が入力電流, 中段が Feelback loop に流れる電流, 下段が Main loop に流れる電流の波形を表している。Main loop に流れる電流が一定になるように Feedback をかけているため, 正常な動作を確認できた。動作周波数は 5GHz となった。

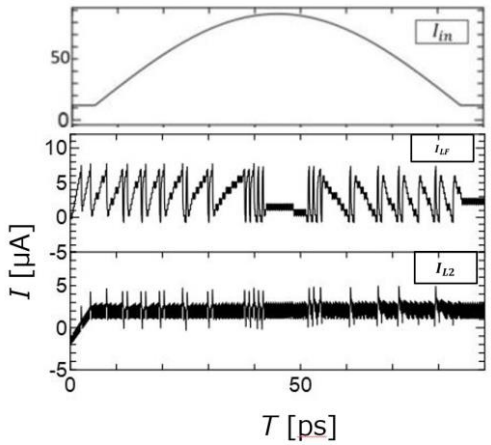


Fig. 3 Simulation Result

参考文献

1. H. Myoren, K. Takatoku, M. Naruse and T. Taino, Design and Magnetic Field Noise of Magnetometer using Digital SQUID with Sub-Flux Quantum Feedback, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 26, no. 5 (2016) , p.1-p.5
2. Whitely Research, Inc., [Online] Available; http://www.wrcad.com.
3. V. Adler, Chin-Hong Cheah, K. Gaj, D. K. Brock and E. G. Friedman, A Cadence-based design environment for single flux quantum circuits, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.7 no.2 (1997) p.3294-p.3297
4. M. Tanaka et al., Bit-SerialAdder Based on 10 kA/cm Niobium Process. IEEE Trans. Appl. Supercond. And Novel Magn, Vol. 21, no. 3, (2011) p.792-p.796
5. S. Yorozu, Y. Kameda, H. Terai, A. Fujimaki, T. Yamada and S. Tahara, A single flux quantum standard logic cell library, Physica C, Vol.378 - 381 (2002) p.1471-1474

外部制御電流で書き込み可能な超伝導メモリセルの小型化

Miniaturization of Superconductor Memory Cell Reconfigured by External Control Currents

山梨 裕希, 細谷 岳哉, 吉川 信行(横浜国大)
YAMANASHI Yuki, HOSOYA Takuya, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama National University)
E-mail: teion@csj.or.jp

1. はじめに

ルックアップテーブル(LUT)は再構成可能な素子の一つであり、再構成することによって任意の論理関数出力を実現できることから FPGA 等に用いられる。我々は超伝導単一磁束量子(SFQ)回路によるLUTのために、2次元状に並べられたメモリセルの内部状態を外部制御電流する方式を提案してきた[1, 2]。本研究ではLUTの大規模化、高密度化のためにメモリセルの小型化を検討した。

2. 小型化されたメモリセルの設計

従来のメモリセルは、状態を非破壊読み出しできるフリップフロップの入力部に磁気結合型 DC/SFQ 変換回路[3]を用いていた。メモリセルのジョセフソン接合の数は 9 個、産業技術総合研究所の 10 kA/cm^2 Nb High-Speed Standard Process (AIST-HSTP)[4]を用いて設計した回路の面積は 40 μm×80 μm であった[1]。

図1に小型化したメモリセルの等価回路図を示す。図1の回路では、非破壊読み出しフリップフロップの磁束保持ループに外部電流を直接結合させている。2 つの制御電流 I_x と I_y が同時に入力されると、磁束保持ループに磁束量子が1つ入力され、メモリセルの内部状態は'1'になる。内部状態が'1'の時に初期化用の制御電流 I_{reset} が入力されると、ジョセフソン接合 J_3 がスイッチし、磁束保持ループ内の磁束量子が放出され、内部状態は'0'になる。図2に入力制御電流 I_x と I_y から換算した入力磁束を変化させたときのメモリセルの動作領域を示す。動作点を動作領域の中央とすると、入力磁束Φ_x は 0.31Φ_0-0.77 Φ_0、入力磁束Φ_y は 0.25Φ_0-0.83 Φ_0 の範囲で正常動作が得られることがわかった。

このメモリセルは従来のメモリセルで使われていた 2 個の磁気結合型 DC/SFQ 変換回路をなくしている。このため、ジョセフソン接合の数は 7 となった。これを反映して、AIST-HSTP を用いて設計したメモリセルの面積は 40 μm×40 μm となり、従来のメモリセルの半分の面積でメモリセルを実装できる。回路シミュレーションによって得られた電源電圧マージンは、設計値である 2.5 mV を 100%とすると 82.8%-120.3%である。

3. 小型化されたメモリセルの低速測定結果

設計、試作したメモリセルを液体ヘリウム温度である 4.2 K において測定した。図 3 に低速測定によって得られた測定波形の例を示す。制御電流 I_x と I_y の同時入力によってメモリセルの内部状態が'1'に遷移し、その後クロック(clk)入力に同期して'1'が dout より出力されている。連続する clk 入力に対し、'1'を出力し続けていることから、内部状態の非破壊読み出しができていることがわかる。初期化電流 Ireset の入力により内部状態が'0'に初期化された後はクロック(clk)入力をしても出力は得られない。測定によって得られた電源電圧マージンは 85%-110%であった。

謝辞

本研究はJSPS科研費18K04280、22H01542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(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において、AIST-HSTPプロセスを用いて作製された。

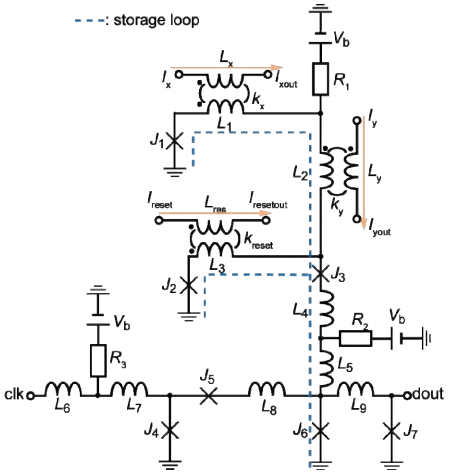


Fig.1 Equivalent Circuit of Miniaturized Memory Cell.

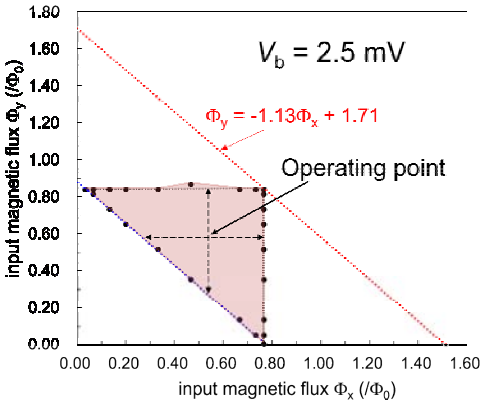


Fig.2 Input Current Margin of Miniaturized Memory Cell.

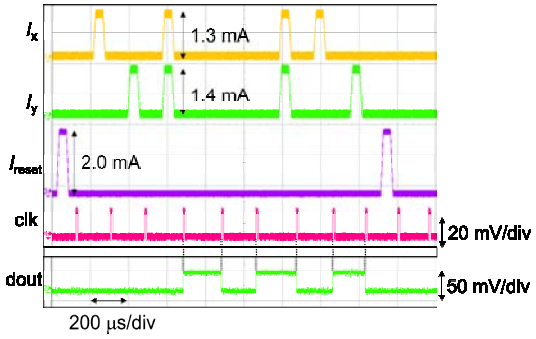


Fig.3 Waveform Obtained by Low-Speed Test of Miniaturized Memory Cell.

参考文献

1. T. Hosoya, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 31 (2021) 1300406
2. Y. Terai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 32 (2022) 1301305
3. H. Terai, et al: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 19 (2009) p. 350
4. M. Hidaka and S. Nagasawa: IEICE Trans. Electron., Vol. E104-C (2021) p. 405

力学インダクタンス検出器用フィルターバンク方式 SFQ 信号処理回路の設計

Design of SFQ Signal Processing Circuit for KID using Filter Bank Method

藤江 和輝, 成瀬 雅人, 明連 広昭(埼玉大院)
FUJIE Kazuki, NARUSE Masato, MYOREN Hiroaki(Saitama Univ.)
E-mail: k.fujie.593@ms.saitama-u.ac.jp

1. まえがき

半導体検出器では難しい波長の長い電波の検出を行うために超伝導体を用いた検出器であるマイクロ波力学インダクタンス検出器(Microwave Kinetic Inductance Detector: KID)が、電波天文や放射能の検出に使用されている。現在このMKIDからの信号はアナログ回路やFPGAを用いて信号処理している。[1] これを、高速動作が可能な単一磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)論理回路と、FIRフィルターとデシメーションフィルターで構成されるフィルターバンク構造を用いることによって、高速化、量子化ノイズの低減、高周波数分解能化が可能になる。[2]

本研究では、MKIDからの信号をデジタルSQUIDによるデルタ型 A/D 変換回路で処理することを仮定し、得られたデジタル信号(Data 信号)をダウンコンバージョンするためのデジタルミキサーの設計、オーバーサンプリングのためのデシメーションフィルターの設計、FIR フィルターの構成要素である乗算器の設計、実装のための検討を行った。

2. デジタルミキサーとデシメーションフィルター

Data 信号と LO 信号を掛け合わせることによって、周波数のダウンコンバージョンを行う回路がデジタルミキサーである。本研究では、MKID からデジタル SQUID によるデルタ型のA/D 変換した信号を GHz の帯域から MHz の帯域に下げるために、1 bit デジタルミキサーを設計した。[3]

また、アナログからデジタルに変換する際に量子化ノイズが発生するため、本研究では 1 次 sinc 型のデシメーションフィルターを用いてオーバーサンプリングしたデータに対して量子化ノイズの低減を行った。

CONNECT セルライブラリを用いて設計したデジタルミキサーとデシメーションフィルターのレイアウトを以下の図 1 に示す。

レイアウトサイズは640 μm×1080 μmであり、消費電力は0.225 mW であった。Verilog-XL でシミュレーションを行い、32 GHz で正常に動作することが確認できた。

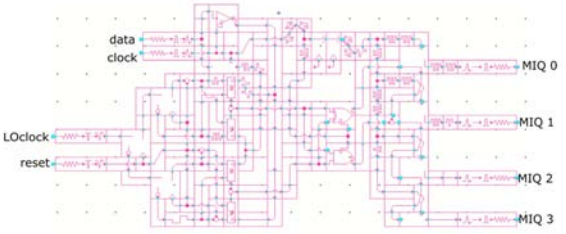


Fig.1 Layout of digital mixer and decimation filter

3. FIR フィルターのための乗算器

デシメーションフィルターからの信号を周波数分割するために FIR フィルターを利用します。FIR フィルターには 4 bit×10 bit の乗算器が必要になり、本研究では、乗算器は AND 回路を用いて部分積を生成し、HA と FA を用いて乗算器を設計した。

CONNECT セルライブラリを用いて設計した乗算器のレイアウトを以下の図2に示す。

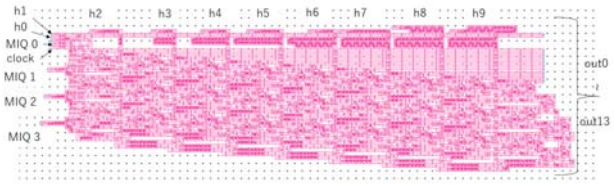


Fig.2 Layout of multiplier

レイアウトサイズは 1520 μm×5480 μm、消費電力 3.78 mW となった。この乗算器では、消費電力が大きくなってしまうことがわかった。回路の抵抗値と電源電圧を 1/5 に下げることによって、消費電力を 1/5 に下げることができるため、この乗算器を改善した。[4]

まず、乗算器に使用したセルのレイアウトを抵抗 1/5 に変更し、scope を用いてタイミングパラメータを抽出した。 これによってそれぞれの素子の遅延が変わるため、乗算器のタイミング調整を行い、レイアウト設計をし直した。抵抗を 1/5 にした乗算器は、レイアウトサイズは変更前と同じで、消費電力は 0.76 mW となった。Verilog-XL でシミュレーションを行い、4 bit ×10 bit の乗算を 8 GHz で正常に動作することが確認できた。

4. まとめ

本研究では、MKID 用のデジタル信号処理回路の設計を行った。デジタルミキサー・デシメーションフィルタのレイアウト設計を行い、デジタルミキサーと同時にシミュレーションを行い、32 GHz で正常に動作することが確認できた。FIR フィルターを設計するための乗算器の設計をし、消費電力が大きかったため、抵抗と電源電圧を 1/5 にした乗算器の設計を行った。シミュレーションを行い、設計した乗算器が 8 GHz で正常に動作することが確認できた。

参考文献

1. Mazin, B. A., et al: "ARCONS: A 2024 pixel optical through near-IR cryogenic imaging spectrophotometer." Publ. Astro. Soc. Pac., 125.933 (2013) 1348.
2. Price, Danny C. "Spectrometers and polyphase filterbanks in radio astronomy." The WSPC Handbook of Astronomical Instrumentation: Volume 1: Radio Astronomical Instrumentation (2021)159-179.
3. Filippov, Timur V., et al. "Multi-bit mixers for digital-RF receivers." IEEE Trans. Appl. Supercond., 21.3 (2010): 818-822.
4. Tanaka, Masamitsu, et al: "Low-energy consumption RSFQ circuits driven by low voltages." IEEE Trans. Appl. Supercond., 23.3 (2013) 1701104 -1701104.

単一磁束量子論理回路によるトポロジカル量子ビット用ブレイディング操作回路の設計

Design of SFQ Control Circuit for Braiding Operation of Topological Quantum Bits

大場 来、船澤卓朗、成瀬雅人、明連広昭（埼玉大学院）

Kitaru Oba, Takuro Funazawa, Masato Naruse, Hiroaki Myoren (Saitama Univ.)

E-mail:k.oba.080@ms.saitama-u.ac.jp

1. まえがき

万能型量子コンピュータは、量子アルゴリズムを駆使して最適化問題や機械学習などといった特殊な問題を高速で処理する事が出来る。現在、万能型量子コンピュータの量子ビット数は 100 ビット程度を達成しているが、エラーを検出し訂正しながらスーパーコンピュータの能力を凌駕する「誤り耐性機能付き量子コンピュータ」の実現には 100 万量子ビットを集積する必要があるとされている。2 準位系を用いる量子コンピュータでは外乱などのノイズに弱く、エラーが発生しやすい。これを訂正するための量子誤り訂正回路が膨大になるため 100 量子ビット以上の実現が難しいとされている。

そこで、本研究では、磁束に束縛されたマヨラナ準粒子をエニオン（イジングエニオン[1]）としてその位置交換を行う(ブレイディング操作)事で、量子ビット操作を行う。エニオンの特徴は粒子の交換が行われた際に、その粒子の波動関数の位相差が任意の値で変化し，その量子情報を保持する。これを利用することで、量子ビットを操作し、量子ゲートを実現していく。ここで、エニオン同士の位置交換は極低温下において安定性があるとされているため、エラーが発生しにくい。これらを利用すればエラー訂正回路の小規模化を見込め、「誤り耐性機能付き量子コンピュータ」の実現の可能性が見いだせる。本発表ではその概要とそれを操作するための SFQ 回路による制御回路の提案ついて発表する。

2. トポロジカル量子計算(TQC 回路)

3次元トポロジカル絶縁体に超伝導薄膜を堆積して、近接効果でトポロジカル超伝導を発生させ、そこに磁束量子の格子を生成するとマヨラナ準粒子が束縛されエニオンを生成する。Twente 大学では、トポロジカル JJ アレイの JJ ループに磁束量子が固定され電流パルスで位置交換ができることを理論的に報告した[2]。そこで我々は、ブレイディング操作を単一磁束量子論理に基づく回路で行う研究を行っている。[3]

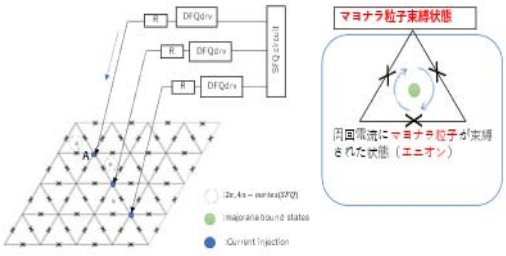


図 1(a) （左図）：ブレイディング操作のシーケンス
図 1(b)（右図）：トポロジカル（JJ ループ）によるエニオンの保持

3. ブレイディング操作用の SFQ 回路概要

図2に TQC 回路を SFQ 回路によってトポロジカル量子ビット操作をさせる回路の概要図を示す。これらの回路を実装することで、将来的に任意の量子ビットに対してブレイディング操作が可能となる回路を目指す。

(a)では input(室温入力)に対しての最初の処理を行っている。CMOS memory では、予め用意した量子演算を行うためのシーケンスを保存させる。また Address-converter では、シーケンスに入っている命令と input から来た TQC 回路の格子点情報を組み込むという動作をさせる。これによって任意の量子ビットを選択する事が出来る。(b)では、(a)から得られたシーケンスを 10bit の shit-register(段数は未定)に一時保存し、Bit-counter と Output に繰り返し命令と、その時 TQC 回路の格子点情報 6bit を(c)に送る。(c)では(b)から送られてきた 6bit の情報を元として、TQC 回路のどの格子点、そしてどちら向きの電流を流すかをデマルチプレクサで選択する。格子点を選ぶ事によって、どのエニオンを移動させるかを選択し、電流の向きによってエニオンが時計回りに移動するのか、反時計回りに移動するのかを選択できるようになっている。

以上で、任意の量子ビットに対してブレイディング操作が可能となる。

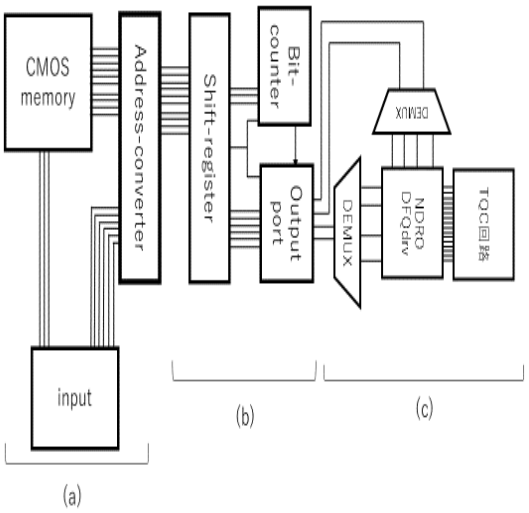


図2：TQC 回路を SFQ 回路によってブレイディング操作をさせる回路の概要図

参考文献

1. X. MA, C.J. REICHHARDT, C. REICHHARDT, Braiding Majorana fermions and creating quantum logic gates with vortices on a periodic pinning structure, Phys. Rev. B, vol.101, p. 024514 (2020).
2. M. LANKHORST et al., Majorana bound state manipulation by current pulses, Supercond. Sci. Technol., Vol.34, No.3, p.035024 (2021).
3. Takuro Funazawa, Masato Naruse and Hiroaki Myoren Braiding Operations for a Topological Josephson Junction Array using SFQ Current Pulses, J. Phys.: Conf. Ser. vol.2323, p.012035 (2022).

希釈冷凍機下における窒化ニオブジョセフソン接合特性の評価

Evaluation of Characteristics of Niobium-Nitride Josephson Junctions in a Dilution Refrigerator

上田　伴春, 田中　雅光, 堀　裕貴, 中山　彪之助(名古屋大学);山下　太郎(東北大学);藤巻　朗(名古屋大学)
UEDA Tomoharu, TANAKA Masamitsu, HORI Hiroki, NAKAYAMA Toranosuke (Nagoya University);
YAMASHITA Taro (Tohoku University); FUJIMAKI Akira (Nagoya University)
E-mail: masami_t@ieee.org

1. 背景

超伝導量子ビットは集積に適した固体素子であるため，量子コンピュータを実現するハードウェアの有望な候補として盛んに研究されている．我々は，将来の大規模化を念頭に，超伝導転移温度が高く，雑音源となるアモルファス酸化物を含まないNbN/AlN/NbN接合を用いた量子ビット［1］と，量子ビットの制御に用いる単一磁束量子回路などの超伝導ディジタル回路［2］を同一チップに作製する，モノリシック実装を目指して研究を行っている．

超伝導回路の動作には，チップの十分な冷却や，電源や信号線からの雑音抑止が必須となる．今回我々は，BlueFors社製の希釈冷凍機LD400の20 mKステージに超伝導回路を実装するためのチップパッケージを開発し，これらの評価を目的に窒化ニオブジョセフソン接合の特性評価を行った．

2. 測定

チップパッケージをFig. 1に示す．電源や低周波信号を用いた試験に用いる信号線(DCライン)が上下にそれぞれ24本，計48本配置されている．Micro-D-subコネクタからNbTi製のツイスト線により，4 Kステージに設置した低域通過フィルタ(カットオフ周波数50 kHz)に接続し，室温へはCu製のツイスト線を用いている．12本のツイスト線をまとめてステンレス製のシールドで覆い，外部からの雑音混入を抑制した．

今回，このチップパッケージの DC ラインを用いてNbN/AlN/NbN ジョセフソン接合の電流-電圧特性を測定した．希釈冷凍機の到達温度は 13m K，測定時は 17m K まで上昇した．Fig. 2 に直径 10 μm の円形接合を測定した結果を示す．臨界電流値 I_c は約 25 μA であった．TABLE Ⅰ に，異なる寸法の接合の臨界電流値を，4 K ステージの低域通過フィルタの有無を変えて評価した結果を示す．フィルタを使用しない場合，10 μm 以下の接合においてはジョセフソン電流を観察できなかった．このことから，室温から 4K ステージまでの経路からの雑音流入に対する対策が重要であると考えられる．

回路の動作には，外部磁場の遮蔽も重要となる．今回は，Fig. 1のチップパッケージ全体を覆うように2重の低温磁気シールドを設け，さらに室温において真空チャンバを2重の磁気シールドで囲った．これらの効果については，今後，超伝導量子干渉素子や単一磁束量子回路の測定を行い，評価を進める予定である．

謝辞

本研究は JSPS 科研費(JP19H05615, JP18H05211)の支援を受けて実施した．チップの作製と評価にご協力いただいた，(国研)情報通信研究機構の寺井弘高氏及び名古屋大学の Pham Doung 氏に感謝する．

参考文献

1. S. Kim *et al.*, Commun. Mater., vol. 2 (2021) p. 98
2. E. Leonard *et al.*, Phys. Rev. Appl., vol. 11 (2019) p. 014009

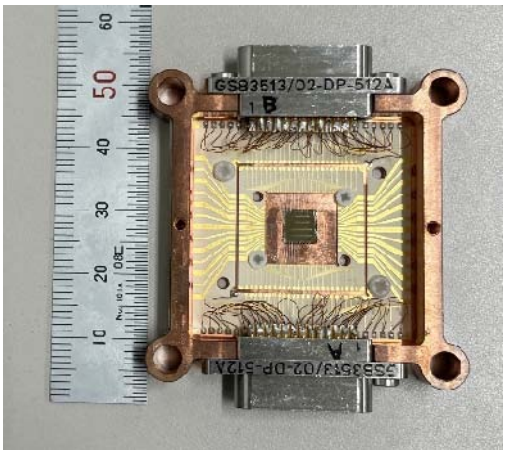


Fig. 1. Chip package for dilution refrigerator.

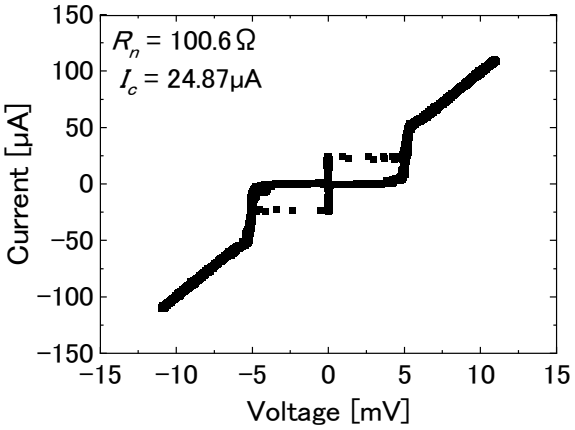


Fig. 2. Current-voltage characteristic of 10-μm ϕ NbN/AlN/NbN junction at 20mK stage.

TABLE Ⅰ Critical currents of Josephson Junctions.

フィルタ	Φ40μm (μA)	Φ20μm (μA)	Φ10μm (μA)	Φ4μm (μA)
有	499.0	122.8	24.87	1.255
無	468.0	34.73	×	×

×: 観察できず

磁束線の運動を利用した超電導リザバーによる音声認識

Speech recognition using superconducting reservoirs based on the motion of magnetic flux lines

有田 拳, 上田 天馬, 小田部 荘司, 宇佐美 雄生, 田中 啓文(九州工業大学); 松野 哲也(有明高専)
ARITA Ken, UEDA Tenma, OTABE Edmund, USAMI Yuki, TANAKA Hirofumi (Kyutech); MATSUNO Tetsuya (NIT-Ariake)
E-mail: arita.ken229@mail.kyutech.jp

1. はじめに

物理リザバーコンピューティングは、非線形な物理現象を利用して様々な時系列データの予測を行うことができる AI (Artificial Intelligence)技術の一種である [1]。第 2 種超伝導体は、ピンの入れ方によって電流密度と電界との間にある非線形性を変化させることができるという特徴から、様々なタスクに適したリザバーを実現させ得る可能性を持っている。本研究では、AFI (Affine Integrator) [2]を用いた TDGL (Time-dependent Ginzburg Landau)方程式の数値シミュレーションにより用意した超電導リザバーを用いて、まず、いくつかのリザバーコンピューティングの基礎的なタスクに対して、超電導体中に入れるピンの数によってタスクの予測結果に変化が生じるかどうかを調査した。続いて、超電導リザバーを用いた音声認識のタスクを行いどれほどの精度が得られるか調査した。

2. 計算方法

まず、一定の磁束密度B_zがかけられ時間的に変化する電流密度J_yが与えられている場合の 2 次元超電導体について、AFI 法により TDGL 方程式を解き、磁束線の運動を可視化した。オーダーパラメータ Ψ に関する初期条件と境界条件を与え、時間刻み幅 τ ごとに座標(i,j)におけるΨ_{ij} を更新し、大きさと位相の情報を持たせてその描画を行った。同時に、超電導体内部の磁束密度、電流密度、電界についても描画を行った。その際、超電導体に与える電流密度は、正弦波的に時間変化させた。また、超伝導体内に入れるピンの数を 0 から 10 ずつ 50 まで変化させ、それぞれの場合に対してシミュレーション領域から 50 個の点を無作為に選びその点での電界値の時間変化を計算した。また、ピンの数を 10 に固定してその配置を、左右の境界付近に 5 個ずつ、上下の境界付近に 5 個ずつ、中心付近に 10 個と変えそれらの場合に対しても電界値を計算した。

続いて、得られた電界値を用いてリザバーコンピューティングのタスクを行った。本研究では、入力である正弦波から作ることができる波形である三角波や矩形波を再現することができるかという波形生成タスクを行った。まず、ピンの数が 0 個の場合から 50 個の場合それぞれに対してこのタスクを行い、予測精度の変化を計算しグラフにまとめた。また、ピンの配置を変えた場合に対しても同様にタスクを行った。精度には R Squared (R^2)を採用した。

続いて、音声時系列データを電流密度として超電導リザバーに与え、得られた電界値のデータを用いて、誰が話したものか分類する話者分類と、同一人物が 0 から 9 までを発音した際、どの数字を話したのか分類する数字分類を音声認識のタスクとして行い正解率を計算した。

3. 結果と考察

まず、波形生成タスクに関して、ピンの数を変化させた場合の結果を Fig. 1 に示す。これは、矩形波を再現したときの精度である。ピンの数が 30 のときが最も精度が悪く、50 のときが最も良いという結果になった。ピンの数が多くなるほど精度が良くなったり、少なくなるほど良くなったりなどというようにはならなかったため、超電導体中に入れるピンの数とリザバーコンピューティングのタスクの精度との間には相関はないと考えられる。しかし、ピンを入れることで精度に変化は生じているため、ピンが精度になにかしらの影響を与えているということは考えられる。

続いて、ピンの配置を変えた場合の結果を Table. 1 に示す。ピンを上下の境界付近に配置した場合が最も精度が低く、次いで中心付近、左右の境界付近に配置した場合が最も精度が高いという結果になった。このことより、高精度を目指すにはピンは左右境界付近に電流に平行な向きで配置するのがよいと考えられる。左右境界付近が最も精度が良くなった理由としては、磁束線の運動は中心付近よりも左右境界付近の方が激しく、その部分にピンを置くことで磁束線の運動に大きな変化が生じ、より強い非線形性を生み出すことにつながったからであると考える。

音声認識に関しての結果は、話者分類、数字分類それぞれに関しての正解率を示した図を発表当日に報告する予定である。

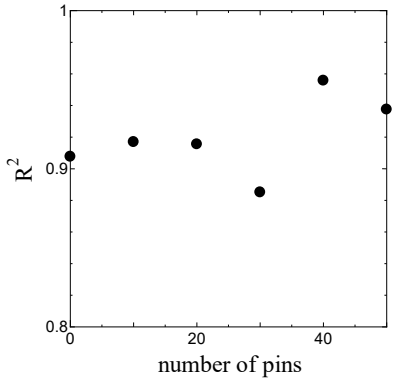


Fig. 1 Accuracy R^2 with respect to the number of pins

Table. 1 Accuracy R^2 for pin placement

Pin Placement	Accuracy R^2
Center	0.905
Up and Down	0.856
Left and Right	0.966

4. まとめと今後の展望

超電導体に入れるピンの数や配置がリザーバーコンピューティングの精度に与える影響について調査するとともに、超電導リザバーによる音声認識を行った。ピンの数ではなく、配置が精度に影響することが明らかになった。

今後は、超電導リザバーに関するほかの応用研究も行っていく予定である。

参考文献

1. K. Tanaka, R. Nakane, A. Hirose. Reservoir Computing – Theory and Hardware of Fast Machine Learning for Time Series Pattern Recognition. Morikita Publishing Co. 2021.
2. T. Matsuno, E.S. Otabe, Y. Mawatari, J.Phys. Soc. Japan 89 (2020) 054006.

仕込金属組成を変えた Bi2223 線材の キャリアドープ状態と磁場中臨界電流特性

Relationship between carrier doping state and critical current properties in magnetic fields of Bi2223 tapes starting from various cation compositions

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

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

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

E-mail: c5621061@aoyama.jp

1. 緒言

実用的な高い臨界電流特性を有する$(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$ [Bi2223]線材は DI-BSCCO®として量産され広範な用途に使われている。しかし、Bi2223 の大きな電気的磁気的異方性に由来した本質的に弱いピンニング力のため、高磁場応用は極低温域に限定されている。これに対し、電気的磁気的異方性の低減を伴う Bi サイトへの Pb 置換量の増大[1]と金属組成比を 2 : 2 : 2 : 3 に近づけることがこの課題の軽減に有効であるという方針が示されているが、これらの実現には系統的な研究が必要である。我々はこれまでに仕込金属組成を変えた Bi2223 二次圧延線の試作を行い、Pb-rich 組成において Bi2223 相生成のための最適焼成温度が低下する傾向、および Fig. 1 に示した Pb-rich, *AE*-Cu-rich 組成において Bi2223 相分率が低下することから Bi2223 の相生成反応が遅れていることを報告してきた[2]。以上の背景のもと本研究では中温域高磁場中においても優れた磁場中臨界電流特性を示す Bi2223 線材の開発を目的として、一次焼成条件を変えて Bi2223 相分率を高めた仕込金属組成の異なる二次圧延線を試作し、金属組成、キャリアドープ状態と磁場中臨界電流特性の関係を調べている。

2. 実験方法

仕込金属組成を変えた二次圧延後の Bi2223 線材(X : Y = 0.171 : 3.53, 0.176 : 3.63, 0.180 : 3.73, 0.197 : 3.53 ; X = Pb/(Bi+Pb), Y = (Sr+Ca+Cu)/(Bi+Pb))に対して様々な条件で二次焼成し、450°C-12 h＋350°C-12 h の酸素アニールによりキャリア濃度を制御した。XRD、SEM、EPMA により構成相や微細組織、Bi2223 結晶の金属組成を調べ、超伝導特性は SQUID 磁束計による磁化測定により c 軸に平行に印加した磁場下で評価した。

3. 結果と考察

Fig. 2 に仕込金属組成 X, Y が異なる二次焼成後および酸素アニールを行った Bi2223 線材フィラメントの表面 XRD パターンを示す。二次焼成後の両試料には Bi2212 の残存および Pb3221 などの不純物相に由来したピークはみられなかった。また、酸素アニールを行った試料では c 軸が短縮し、キャリアドープが進んだことを確認できた。現在これらの試料の磁場中臨界電流特性の評価を進めている。講演では、仕込金属組成を変えた 4 種類の Bi2223 線材の微細組織、Bi2223 相分率、Bi2223 結晶中の金属組成比と磁場中臨界電流特性の関係について報告する。

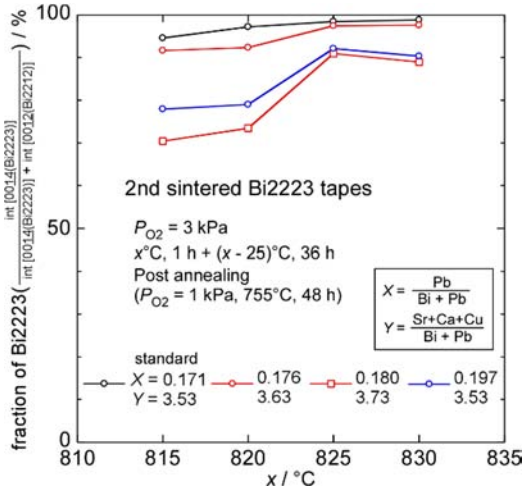


Fig.1 Relationship between phase fraction of Bi2223 and 2nd sintering temperature for Bi2223 tapes staring from various cation compositions.

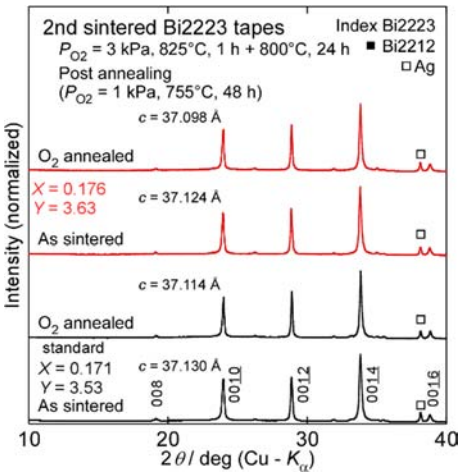


Fig.2 Surface XRD patterns of 2nd sintered Bi2223 tapes starting from various cation compositions before and after O_2 annealing.

参考文献

[1] T. Nakashima *et al*., Cryogenics **52** (2012) 713.

[2]宮本能伸ほか、第 103 回 2022 年度春季低温工学・超電導学会 2A-a01

結晶方位データに基づく超伝導電流輸送のフローネットワーク解析

Flow network analysis of superconducting current transport based on crystal orientation data

浅井 俊樹 （東京農工大），嶋田 雄介 （東北大），山本 明保 （東京農工大）
ASAI Toshiki (Tokyo Univ. of Agri. and Tech.), SHIMADA Yusuke (Tohoku University),
YAMAMOTO Akiyasu (Tokyo Univ. of Agri. and Tech.)
E-mail: s217763s@st.go.tuat.ac.jp

1. 背景

多結晶超伝導材料はランダムな結晶方位を持つ結晶粒から構成されており、作製が容易であることから線材やバルク等への応用が期待されている。多結晶超伝導材料では、粒界弱結合の影響によって隣接する結晶粒間の結晶方位差に応じて臨界電流密度が指数関数的に減少することが報告されている[1]。多結晶超伝導材料の材料組織と臨界電流密度の関係を明らかにするために、結晶粒形状に基づくモデル化[2]や平均場近似を用いたモデル化[3]による解析等が行われている。本研究では、実験的に取得した材料組織に対してフローネットワークを用いたモデル化を行い、粒界弱結合が臨界電流輸送に及ぼす影響を数値計算により評価した。

2. 方法

鉄系超伝導体 Ba122 試料の EBSD 像[4](電子線後方散乱回折法)を Fig.1(a)に、一部領域の拡大像を Fig.1(c)に示す。得られた情報をもとに、1249 個のノードとノードに割り当てられた結晶方位データ、2734 本のアーク、粒界の長さ w から構成されるフローネットワークを構築した(Fig.1(b))。

アークの両端のノード i ,j の結晶方位$(\theta, \varphi, \omega)$をもとに、面外の結晶方位差として、

$$\theta_{\mathrm{GB}c} = \arccos\left|\sin\theta_i \cos\varphi_i \sin\theta_j \cos\varphi_j + \sin\theta_i \sin\varphi_i \sin\theta_j \sin\varphi_j + \cos\theta_i \cos\theta_j\right|$$

面内の結晶方位差として、$\theta_{\mathrm{GB}ab} = |\omega_i - \omega_j|$を算出し、両者の大きい方を方位差$\theta_{\mathrm{GB}}$と定義した。粒界弱結合の影響として、アークの初期容量C を$C = w \exp\left(-\frac{\theta_{\mathrm{GB}} - \theta_c}{\theta_c}\right)$ ($\theta_{\mathrm{GB}} > \theta_c$、$\theta_c$は臨界傾角)、 $C = w$ ($\theta_{\mathrm{GB}} < \theta_c$)と定義した。

系の一端上に存在する全てのノードを始点、その反対端上に存在する全てのノードを終点と結んだとして、始点から終点まで電流を流したと仮定した。始点から終点を結ぶ経路上の全てのアークに空き容量がある最短経路 k を探索し、経路上の各アークの容量をその経路上の最小の容量 F_k だけ減らす。これを空き容量のある経路が無くなるまで繰り返し、全経路の本数 l の和 $\sum_{k=1}^{l} F_k$ を系の最大フローF として求めた。F を系の一辺の長さで除して規格化した値をコネクティビティK として定義した。

3. 結果

EBSD 像の結晶方位データをもとにした系の計算結果として、系全体における各アークのフローを Fig. 1(b)に、Fig.1(c)に対応する領域の各アークの容量、フロー、アークの使用率をそれぞれ Fig. 1(d), (e), (f)に示す。図中のノード 1, 2 間は方位差が 83.60°で初期容量は 1.915×10^{-5} と小さく、フローも同じ 1.915×10^{-5} になっており、Flow/Capacity は 1 で、初期容量の小ささが輸送を制限していると捉えられる。一方、ノード 1, 3 間は方位差が 28.68°で、初期容量は 1.414×10^{-2} と大きいが、フローは 3.208×10^{-4} に留まっており、Flow/Capacity は 2.269×10^{-2} と低く、アークが効率よく使用されていない。系全体のコネクティビティは $K = 2.86\times10^{-3}$ と見積もられた。講演では

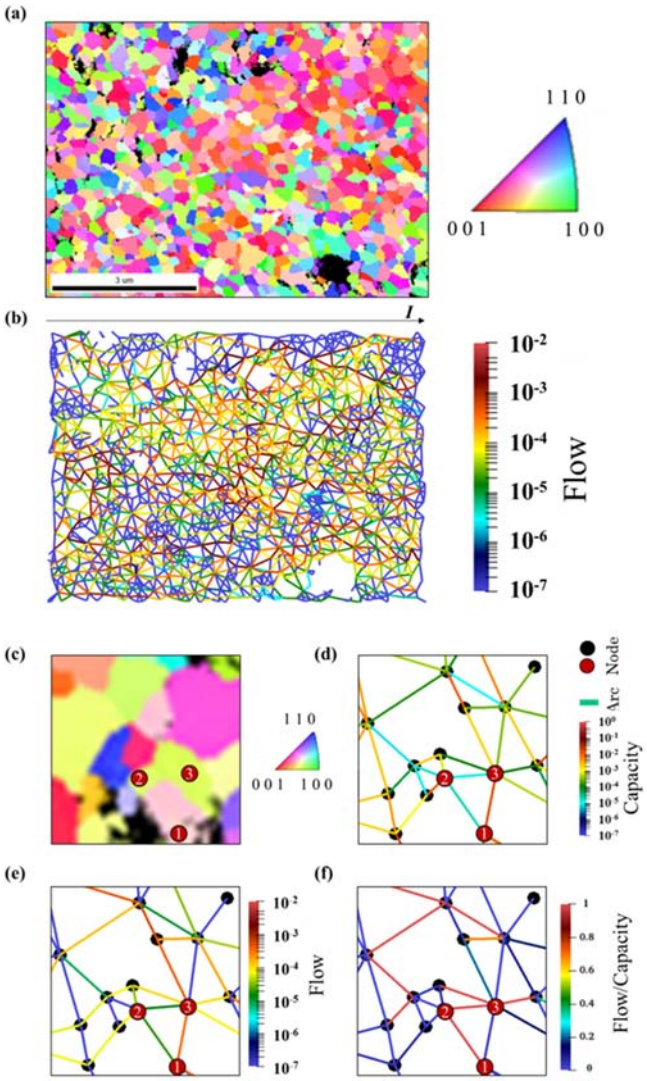


Fig. 1 (a), (c) EBSD of the sample discussed in this study. (b), (e) Distribution of flow on each arc. (d) Distribution of initial arc capacities on each arc. (f) Distribution of flow divided by initial arc capacities on each arc.

EBSD 像の結晶方位データをもとにした系とシミュレーションにより生成したランダムな系との比較結果についても議論する。

参考文献

1. T. Katase, *et al*., *Nat. Commum*., **2**, No.409 (2011) p.1-6
2. L. N. Bulaevskii, *et al*., *Phys. Rev. B*, **45**, No.5 (1992) p2545-8
3. M. Eisterer, *Phys. Rev. B*, **99**, No.9 (2019) 094501
4. Y. Shimada, *et al*., *Supercond Sci Technol*. **32**, No.8 (2019) 084003

バルクピンのない第二種超伝導体における縦磁場中の臨界電流

Critical currents of type-II superconductors without bulk pinning exposed to longitudinal magnetic fields

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

1. はじめに

対破壊電流密度は、超伝導状態で流すことのできる電流密度の理論限界である。Ginzburg-Landau 理論に基づく対破壊電流密度の明快な解説が教科書[1]にあり、また微視的理論を含めた解説が低温工学誌[2]にもある。

Ginzburg-Landau 理論のオリジナル論文[3]でもすでに対破壊電流密度に関して考察されており、これとほぼ同様の考察が論文[4]にも示されている。これらの論文[3,4]では、通電電流と外部磁場が平行な縦磁場中の超伝導平板における臨界電流密度について考察されており、十分薄い薄膜におけるゼロ磁場中の臨界電流密度が対破壊電流密度に達することが導かれている。ただし、その考察では、コヒーレンス長 ξ が磁場侵入長 λ より十分大きい(すなわち $\lambda/\xi \ll 1$ である)極端な第一種超伝導体が仮定されており、臨界電流密度が大きい多くの第二種超伝導体($\lambda/\xi \gg 1$)ではその考察の妥当性が不明である。

本研究では、Ginzburg-Landau の理論[3,4]による臨界電流密度に関して、第二種超伝導体($\lambda/\xi \gg 1$)の場合について再考した。文献[3,4]と同様に、超伝導体はバルクピンがなく、量子化磁束線が存在しない Meissner 状態が安定である通電電流密度の上限として臨界電流密度を定義した。さらに、縦磁場中の臨界電流だけでなく、磁場方向が通電電流の方向に対して垂直である横磁場中の臨界電流密度についても解析し、両者の違いについて考察した。

2. 一次元 Ginzburg-Landau モデル

Fig. 1 のように、yz 面に平行な無限に広い超伝導平板に対して、z 方向に輸送電流 I_t を通電し、かつ yz 面(平板面)に平行に磁場 B_a を印加する場合を考える。磁場方向と z 軸(通電方向)とのなす角を θ とし、$\theta = 0$ が縦磁場、および $\theta = \pi/2$ が横磁場の場合である。任意の θ に対して、B_a は常に平板面に平行であることに注意されたい。

超伝導体内に量子化磁束線が存在しない Meissner 状態では、秩序パラメータ $\psi = \psi(x)$ およびベクトルポテンシャル $\boldsymbol{A} = A_y(x)\hat{\boldsymbol{y}} + A_z(x)\hat{\boldsymbol{z}}$ は、x のみの関数であり、次の一次元 Ginzburg-Landau 方程式と Maxwell 方程式を満たす[3,4,5]。

$$\xi^2 \frac{d^2\psi}{dx^2} = -\left(1 - \psi^2 - \left|\frac{2\pi\xi}{\phi_0}\boldsymbol{A}\right|^2\right)\psi, \tag{1}$$

$$\lambda^2 \frac{d^2\boldsymbol{A}}{dx^2} = \psi^2\boldsymbol{A} \tag{2}$$

ここで、ξ はコヒーレンス長、λ は磁場侵入長、および ϕ_0 は磁束量子である。ただし、ψ は実数とする(位相を固定した)ゲージをとっている。方程式(1),(2)を、通電電流 I_t、外部磁場 B_a、および磁場角度 θ に関わる境界条件のもとに解いて、Meissner 状態における電磁場を求め、臨界電流について考察する。横磁場 $\theta = \pi/2$ の場合は、$A_y = 0$ であるが、縦磁場を含めた一般の場合は $A_y \neq 0$ である。

3. 第一種超伝導体における臨界電流

Ginzburg-Landau 論文[3,4]では、$\lambda/\xi \ll 1$ である極端な第一種超伝導体を想定して、次のように(1),(2)式の近似的な解析解が導かれている。ψ は一定であるとして(2)式を $\boldsymbol{A}$ について解析的に解き、その解に現れる ψ が、(1)式を空間平均した条件式と無矛盾となるように ψ を決定する。ただし、ある上限 I_c を通電電流 I_t が超えたときは、ψ を決定する条件式の解が存在しない。すなわち、$I_t > I_c$ では一次元モデルで記述することができる Meissner 状態は不安定であり、量子化磁束線が発生することを示唆するが、この I_c を臨界電流と定義する。膜厚が十分薄いとき($d_s \ll \lambda \ll \xi$)、臨界電流密度が次で与えられることが示された[3,4]。

$$J_d \equiv \frac{\phi_0}{3\sqrt{3}\pi\mu_0\lambda^2\xi} \tag{3}$$

これは対破壊電流密度であり、教科書[1]では、Ginzburg-Landau 理論に基づいた J_d の明快な導出が示されている。

4. 第二種超伝導体における臨界電流

第二種超伝導体 $\lambda/\xi \gg 1$ の場合、de Gennes [5] の手法を用いて(1),(2)式を近似的に解くことができる。この場合、$\boldsymbol{A}$ と同様に ψ も λ のスケールで空間的に変化するため(1)式左辺を無視することができ、次を得る。

$$\psi^2 = 1 - \left|\frac{2\pi\xi}{\phi_0}\boldsymbol{A}\right|^2 \tag{4}$$

これを(2)式に代入して、次のような $\boldsymbol{A}$ に関して閉じた非線形微分方程式を得る。

$$\lambda^2 \frac{d^2\boldsymbol{A}}{dx^2} = \left(1 - \left|\frac{2\pi\xi}{\phi_0}\boldsymbol{A}\right|^2\right)\boldsymbol{A} \tag{5}$$

この方程式の解が存在する I_t の上限として、臨界電流 I_c が得られる。簡単な状況での解析解、および一般的な場合の数値解をもとに、I_c の B_a および θ 依存性について考察した。その結果は講演で述べる。

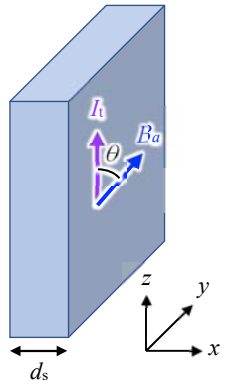


Fig. 1: Superconducting plate parallel to the *yz* plane exposed to the transport current I_t and the applied magnetic field B_a. I_t is parallel to the *z* axis, and B_a is parallel to the *yz* plane.

本研究は、JSPS科研費20K05314の助成を受けて行われた。

参考文献

[1] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed. (McGraw-Hill, New York, 1996).
[2] 久保毅幸, 低温工学 **56**, 277 (2021).
[3] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **20**, 1064 (1950); *Collected Papers of L. D. Landau*, D. ter Haar ed. (Pergamon, Oxford, 1965), p. 546.
[4] V. L. Ginzburg, Dokl. Akad. Nauk SSSR **118**, 464 (1958).
[5] P. G. de Gennes, Solid Stat. Commun. **3**, 127 (1965).

縦磁界下における REBCO 線材の表面電界の評価

Evaluation of surface electric field of REBCO wire under longitudinal magnetic field

島田 涼平, 木内 勝(九工大)
SHIMADA Ryohei, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. of Tech.)
E-mail: shimada.ryohei787@mail.kyutech.jp

1. はじめに

超伝導線材の電流Iの通電方向と平行に外部磁界Bを加える縦磁界下$(B//I)$では、一般的な横磁界下$(B \perp I)$と比較して臨界電流密度J_cが増加する。ただし、この縦磁界下でのJ_c決定機構のメカニズムはまだ十分に理解されていない。

一方で、縦磁界下でのJ_c以上の磁束フロー状態における磁束線の運動が、超伝導体の表面の電界構造から議論された。特に、円柱状の金属超伝導体の表面の電界は、“正”と“負”となる領域がらせん状に存在し、磁束線もらせん運動することが明らかになった[1]。さらに、矩形形状の金属超伝導体においても同様な電界構造が観測されている[2]。したがって、縦磁界下でのJ_c機構解明のためには、縦磁界下で磁束線がどのように移動しているのかを明らかにする必要がある。

近年、作製技術の向上により高特性を有する REBCO 線材が開発され、縦磁界下でのJ_c増加も報告される[3]ようになってきたが、金属超伝導体のJ_c増加に比べて大きな増加でない。また、酸化物超伝導体は、複雑な結晶構造を有する等、金属超伝導体と異なる点が多い。そこで、REBCO 線材の縦磁界下での表面電界に注目し、臨界電流特性と電界構造を調べた。

2. 実験方法

測定に用いたのはフジクラ社製の人工ピンなし REBCO 線材である。線材の幅は 4 mm で、超伝導層の厚さ d は 2 μm である。この線材を 75 mm の長さに切り出し、電圧端子として 20 ピンの IC コネクターを用いて、低温度はんだで線材の両面に Fig. 1 のように取り付けた。各々の電圧端子間距離は 2.5 mm である。ここでは超伝導層のある面には f 面、基板層がある面は b 面とした。

表面電界及び臨界電流密度J_cは、液体窒素中における直流四端子法を用いた電界E −電流 I 特性から評価した。磁界は Bi-2223 超伝導コイルを用いて、電流通電方向に平行に加えた。

3. 結果と考察

Fig. 2 の挿入図に線材中央部の端子 4-5 及び端子 4-14 の f 面と b 面のE-I 特性を示す。f 面の端子 f4-5 及び端子 f4-14 では、I の増加と共にEは正の方向に増加する。他の端子でも同様な傾向を示した。同様に b 面の端子 b4-5 も I の増加と共に、Eは正の方向に増加するが、端子 b4-14 のみが負の方向へ増加した。一般の横磁界では、電流通電方向に平行な端子では I の増加と共にEは正の方向に増加するが、縦磁界下での垂直な端子では正や負の電界が観測され[1]、本測定でも縦磁界下特有の負の電界が観測された。また、このE-I特性から、$|E_c| = 1.0 \times 10^{-4}$ V/mの電界基準を用いて決定した J_c特性の縦磁界依存性を Fig. 2 に示す。0.1 T 近傍でJ_cが小さなピークを示し、f 面と b 面でJ_cは良く一致した。

Fig. 3 の挿入図に示すように電流に対して平行方向の電界E_pと垂直方向の電界E_nから電界ベクトルEを評価し、電界ベクトルEの線材軸からのずれ角度θ_Eを求めた。f面では正の角度となるが、b 面では負の角度が得られた。このような正や負の電界領域が表れるのは、縦磁界下では磁束線が横磁界下と異なる運動を行っているためである。なお、金属超伝導体のような大きなθ_E値にならないのは、外部から加えている縦磁界に比べ REBCO 線材の自己磁界が小さいためである。

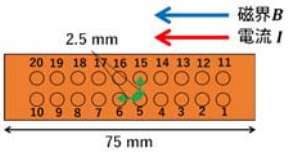


Fig. 1 Schematic diagram of voltage terminal positions.

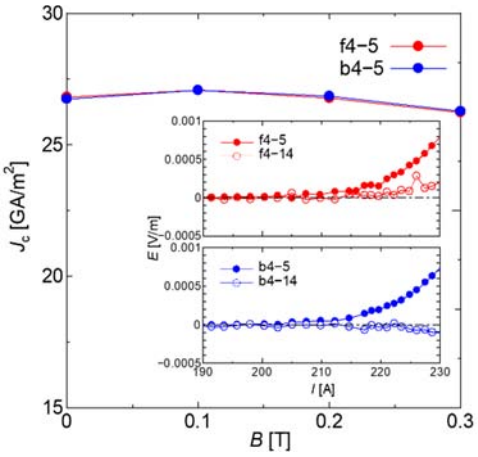


Fig. 2 Magnetic field dependence of the critical current density J_c in the central part of the wire. The inset shows the electric field E- current I curves for the front and back surfaces of the central part of the wire.

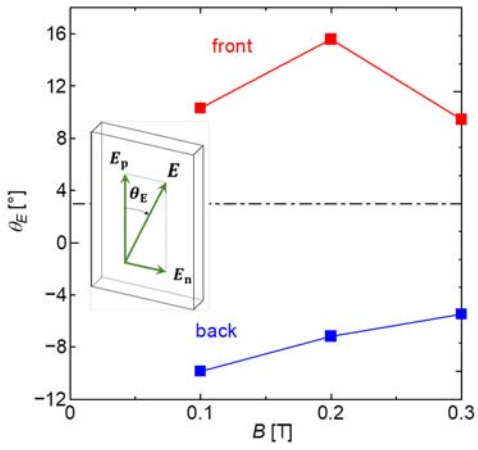


Fig. 3 Magnetic field dependence of the electric field angle θ_E on the front and back surfaces of the central part of the wire.

謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(21H01872)の助成により実施したものである。

参考文献

1. T. Ezaki, et al.: JPS, Vol. 40 (1976) p.382
2. T. Matsushita et al.: Physica C, Vol. 298 (1998) p.115
3. A. Tsuruta, et al.: JJAP, Vol. 53 (2014), 0768003

局所フィラメント損傷に基づく Bi2223 線材の I_c-ひずみ特性の考察

Consideration on Ic-strain characteristics of Bi2223 tapes based on local filament damages

岡田 達典, 淡路 智 (東北大)
OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: tatsunori.okada.d8@tohoku.ac.jp

1. 背景と目的

高強度 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$（Bi2223）テープ線材（DI-BSCCO Type HT-NX）[1] は大きな不可逆応力を有するが、更なる強磁場発生には一層の機械特性の向上・理解が必要である。前回、我々は住友電工との共同研究にて、Ni 補強合金を厚く（$\simeq 30\ \mu$m $\rightarrow \simeq 100\ \mu$m）した“Type HT-NX100”テープ線材を対象に臨界電流 I_c の印加ひずみ ε_{app} 依存性を調べた [2,3]。その結果、

(1) ピークひずみ $\varepsilon_{peak} \simeq -0.05\%$ からキンクひずみ $\varepsilon_{kink} \simeq +0.5\%$ 間で I_c は可逆的かつ線形に変化する
(2) 伸長ひずみ $\varepsilon_{app} > \varepsilon_{kink}$ では I_c が不可逆的に急落するのに対し、圧縮ひずみ $\varepsilon_{app} < \varepsilon_{peak}$ では不可逆だが緩やかに I_c 低下する

ことなどを報告した。(1) での線形なひずみ依存性は、臨界温度 T_c のひずみ依存性に基づくモデル [4,5] の帰結と整合する。一方、(2) で観測した、$\varepsilon_{app} > \varepsilon_{kink}$ および $\varepsilon_{app} < \varepsilon_{peak}$ における不可逆挙動の違いについては、$T_c(\varepsilon_{app})$ の可逆変化に基づくモデル [4,5] の範疇を超えている。この点に関して、伸長・圧縮ひずみ印加による Bi2223 フィラメントの局所損傷が $I_c(\varepsilon_{app})$ に与える影響を理解することが本研究の目的である。

2. モデル

フィラメント損傷（Weibull 分布を仮定）と $I_c(\varepsilon_{app})$ の不可逆挙動との対応づけが提案されている [6,7]。今、フィラメントの損傷を回避できた場合には上述 (1) の可逆領域における $I_c(\varepsilon_{app})$ の線形変化が維持されると仮定し、厚さ方向 v 番目の層にあるフィラメントの臨界電流密度を $J_c^{(v)}(\varepsilon_{app}) = [1-\alpha\varepsilon^{(v)}]J_{c0}$（$\varepsilon^{(v)}(\varepsilon_{app})$ は ε_{app} 印加時の v 層におけるひずみ値）とした。フィラメント損傷の進展を、Weibull 型の信頼関数を適用した

$$R_W^{(v)}(\varepsilon_{app}) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_{peak}-\varepsilon^{(v)}}{\bar{\varepsilon}_C}\right)^{m_C}\right] & (\varepsilon^{(v)} < \varepsilon_{peak}) \\ 1 & (\varepsilon_{peak} \le \varepsilon^{(v)} \le \varepsilon_{kink}) \\ \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon^{(v)}-\varepsilon_{kink}}{\bar{\varepsilon}_T}\right)^{m_T}\right] & (\varepsilon^{(v)} > \varepsilon_{kink}) \end{cases} \quad (1)$$

（$m_{C/T}$: 形状因子、$\bar{\varepsilon}_{C/T}$: 尺度因子）を介して導入することで、テープ線材の I_c は

$$I_c(\varepsilon_{app}) = \sum_{v=1}^{N_{lay}} N_{fil}^{(v)} w_{fil} t_{fil} J_c^{(v)}(\varepsilon_{app}) R_W^{(v)}(\varepsilon_{app}) \quad (2)$$

（N_{lay}: 層数、$N_{fil}^{(v)}$: v 層のフィラメント数、w_{fil}: フィラメント幅、t_{fil}: フィラメント高さ）と与えられる。

本研究では、損傷の幾何・統計との対応を探るべく、フィラメントの損傷深さ $t_{dam}^{(v)}(\varepsilon_{app})$、損傷長さ L_{dam}、損傷数 $N_{dam}^{(v)}(\varepsilon_{app})$ を導入し、

$$R_W^{(v)}(\varepsilon_{app}) = 1 - \frac{N_{dam}^{(v)}(\varepsilon_{app}) t_{dam}^{(v)}(\varepsilon_{app})}{L_{tot}/L_{dam}} \quad (3)$$

（L_{tot}: フィラメント全長）との表現を得た。

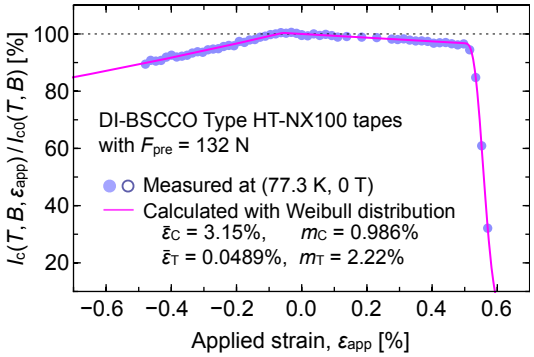


Fig.1 ε_{app} dependence of critical current of DI-BSCCO Type HT-NX100 with $F_{pre} = 132$ N (50 K, 1 T). Solid curve is a fitted result of (2).

3. 結果と考察

Fig.1 に DI-BSCCO Type HT-NX100 の規格化 $I_c(\varepsilon_{app})$[2,3] と (2) 式のフィット結果を示した。$I_c(\varepsilon_{app})$ の測定データは $m_C \simeq 1$ と $m_T \simeq 2$ でよく再現しており、[7] 内のデータもやはりこれらの尺度因子でよく再現できる。つまり、伸長側・圧縮側における $I_c(\varepsilon_{app})$ の不可逆挙動の違いには、フィラメント損傷の Weibull 分布における $m_{T/C}$ の違いが本質的な役割を果たしている。

詳細は割愛するが、(3) 式に基づく損傷の幾何・統計との対応から、伸長側では深く狭い損傷が多数寄与し、圧縮側では浅く広い損傷が少数寄与している場合に、上記の尺度因子に相当する状況が得られる。それぞれ亀裂・破断と座屈が対応すると考えられる。

4. まとめ

伸長・圧縮側で異なるフィラメント損傷を仮定したモデルで $I_c(\varepsilon_{app})$ の測定データをよく再現でき、Weibull 分布の尺度因子として伸長側 $m_T \simeq 2$ と圧縮側 $m_C \simeq 1$ が本質であると示唆された。また、損傷の幾何・統計との対応から、伸長側では亀裂・破断、圧縮側では座屈を想定することで、上記の Weibull 分布曲線を再現できる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費（若手研究: JP21K14192）の支援を受け遂行しました。

参考文献

1. G. Osabe et al.: SEI Tech. Rev., Vol. 84 (2017) p.15.
2. 岡田達典ら: 低温工学・超電導学会 度春季研究発表会 (2022) 2A-a03.
3. T. Okada et al.: *submitted to SuST (2022)*.
4. D.C. van der Laan et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol.24 (2011) p.032001.
5. T. Okada, K. Sakai, and S. Awaji: Supercond. Sci. Technol., Vol.34 (2021) p.025017.
6. T. Kiss et al.: IEEE-Trans. Appl. Supercond. Vol.11 (2001) p.3888.
7. P. Gao and X. Wang: Chin. Phys. Lett. Vol.31 (2014) p.047401.

REBCO 線材の機械特性の銅めっき厚依存性

Dependence of mechanical properties of REBCO coated conductors on copper plating thickness

藤田 真司, 武藤 翔吾, 土屋 光揮, 平田 渉, 大杉 正樹, 大保 雅載（フジクラ）
FUJITA Shinji, MUTO Shogo, TSUCHIYA Koki, HIRATA Wataru, OSUGI Masaki, DAIBO Masanori (FUJIKURA)
E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_y$ (REBCO)線材は高い磁場中 J_c 特性と機械特性により高磁場マグネット等への適用が期待されている. フジクラでは IBAD および hot-wall PLD プロセスにより, 長尺かつ高品質な REBCO 線材を製造しており[1], これまでに磁場中 J_c 特性[2]や機械特性[3,4]についても調査してきた. 通常, REBCO 線材には安定化層として外周に銅めっきが施されるが, 今回銅めっき厚が一軸引張特性に与える影響について調査した.

2. 実験方法

今回評価した REBCO 線材の諸元を Table 1 に示す. すべて線材幅は 4 mm であり, Hastelloy 基板上に IBAD-MgO 層を含む中間層を形成し, hot-wall PLD 法により REBCO 層を形成, Ag を蒸着後に線材外周に銅めっきを施したものである. 人工ピンなしタイプ（FYSC）の線材は Hastelloy 厚が 75 μm, REBCO 層が GdBCO, 人工ピンタイプ（FESC）の線材は Hastelloy 厚が 50 μm, REBCO 層が EuBCO+BHO である. 銅めっき厚は片側あたり 20～80 μm とした.

これらの線材に対して, LN_2 中（77 K）で引張試験を実施した. 歪は歪ゲージで測定し, 応力はロードセルで測定した試験力を線材の断面積で割って算出した. ここで, 線材の厚さは銅めっきのドッグボーンを含む線材全体の厚さの実測値とした. 最初に無負荷状態で I_c を測定し（I_{c0}）, 引張負荷を印加して I_c 測定（I_{c1}）, 除荷後に I_c 測定（I_{c2}）という手順を I_{c2} が大きく低下するまで引張負荷を大きくしながら繰り返した. $I_{c2} / I_{c0} = 0.99$ となる歪を不可逆歪 ε_{irr}, 応力を不可逆応力 σ_{irr} として定義した.

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に 77 K での不可逆応力の銅めっき厚依存性を示す. FYSC, FESC ともに銅厚が増加すると不可逆応力は減少した. これは Hastelloy よりもヤング率の低い銅の断面積が増加することによる. FYSC と FESC の差は Hastelloy の厚さが異なるためであり, FESC の方が銅に対する Hastelloy の断面積比が小さいためである.

Fig. 2 に 77 K での不可逆歪の銅めっき厚依存性を示す. FYSC と FESC の不可逆歪に差があるが, これは REBCO 層の厚さの違いが要因と考えられる. 不可逆歪は REBCO 層厚が増加すると体積効果により減少し[3], 膜厚が 2 μm から 2.5 μm に増加すると不可逆歪は約 5 %低下する. これは Fig.2 の FYSC と FESC の不可逆歪の差と定量的に一致する. 一方で, 不可逆応力とは逆に, 不可逆歪は銅めっき厚の増加に従って増加する結果が得られた. この原因の一つとして, Hastelloy と銅の線膨張係数の差による熱応力が考えられる. 銅の線膨張係数は Hastelloy よりも大きいため, 室温から 77 K へ冷却すると, REBCO 層を含む Hastelloy には銅から圧縮応力を受ける. 従って, 銅めっきがある場合には 77 K で無負荷の状態でも REBCO 層は圧縮側に歪んでおり, その圧縮歪分だけオフセットがかかる. 銅めっき厚が増加すると, このオフセットが大きくなるため不可逆歪が増加すると考えられる. 当日は熱応力解析の結果についても紹介する.

Table 1 Specifications of REBCO tapes.

Type	FYSC	FESC
Hastelloy thickness [μm]	75	50
REBCO layer (thickness [μm])	GdBCO (~2.0)	EuBCO+BHO (~2.5)
Copper plating thickness [μm]	20, 40, 60, 80	20, 40
Tape width [mm]	4	4

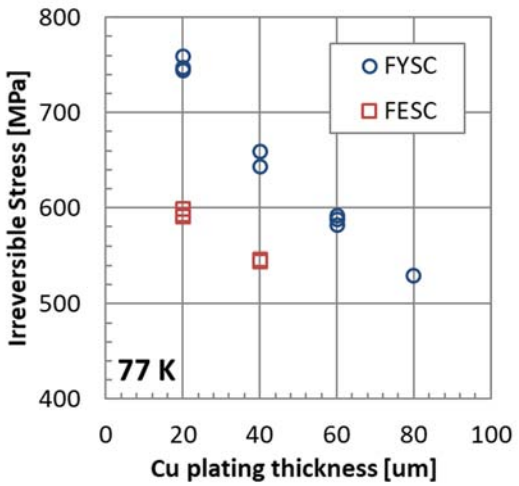


Fig. 1 Copper plating thickness dependence of irreversible stress at 77 K.

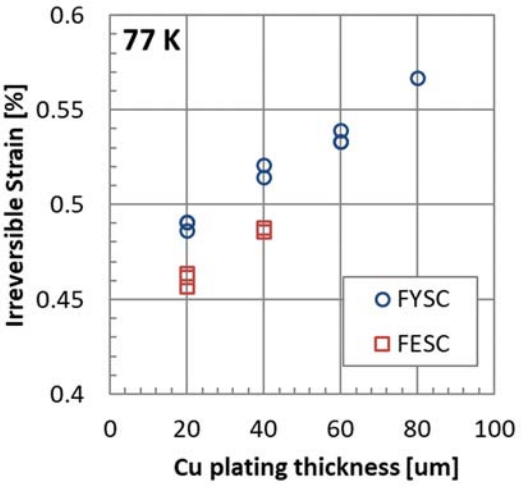


Fig. 2 Copper plating thickness dependence of irreversible strain at 77 K.

参考文献

[1] S. Fujita *et al.*, *IEEE TAS*, 28 (2018) 6600604.
[2] S. Fujita *et al.*, *IEEE TAS*, 29 (2019) 8001505.
[3] S. Fujita *et al.*, *IEEE TAS*, 30 (2020) 8400205.
[4] S. Fujita *et al.*, *IEEE TAS*, 31 (2021) 4601305.

高温超電導テープの臨界電流の限界曲げ歪の評価

Assessment of Degradation Strain Limit of Critical Current in High-Tc SC Tapes

長村光造(応用科研); 町屋修太郎(大同大); 山根昇悟(大同大)
OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); YAMANE Shougo(Daido Univ.)
E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

高温超電導テープの臨界電流の曲げ歪依存性を平曲げ法および縦曲げ法により調べた。曲げ半径が小さくなると臨界電流が劣化し始めるが、その原因について材料組織学的な観点から考察した。曲げにより超電導相に発生する歪量はマトリックスと接する外周部で最大となる。この歪量と臨界電流の変化によい相関が見出された。図1に示す平曲げおよび縦曲げで得られた限界曲げ歪は同じ傾向となることを示す。

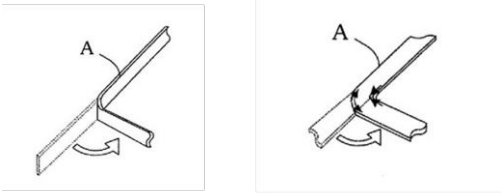


図1 テープ試料に対する曲げ試験方法

2. 実験方法

本研究では住友電工製の厚さの異なり、補強層を付加しない・した BSCCO-2223 テープとフジクラ製のピンニング粒子を付加しない・した REBCO テープを用いた。図 1 に示すようにテープ全体を同一半径に曲げるために半円状の治具にテープ試料を沿わせるように巻き、その後引張負荷を印加した。曲げた試料に電流を流し、電圧が 1μV/cm に達した時に臨界電流 I_c(A/cm)と定義した。

3. 実験結果と考察

図２に REBCO テープについての規格化された臨界電流の曲げ直径依存性を示す。平曲げの場合には曲げ直径がほぼ 10mm になると劣化が見られる。一方縦曲げでは 400ｍｍ程度より劣化が始まる。ここで劣化開始の基準は規格化された臨界電流が 95%になるときの直径とした。

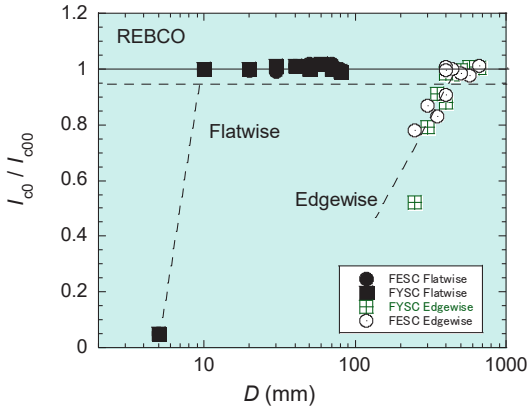


図2 REBCOテープの臨界電流の曲げ直径依存性

一方 BSCCO テープでは図３に示したように平曲げでは 50mm, 縦曲げでは 1200ｍｍ程度で劣化が始まる。

このように曲げによる劣化は(1)曲げる方向、(2)材料の違い、(3)積層構造、厚さ等のテープの幾何学的構造等の要因で曲げ依存性が異なる。以下に各テープの積層構造の違いの影響を主に考察する。

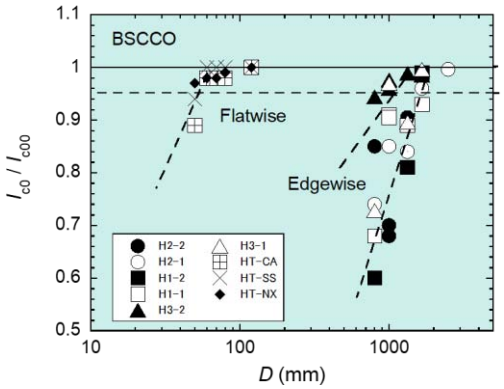


図3 BSCCOテープの臨界電流の曲げ直径依存性

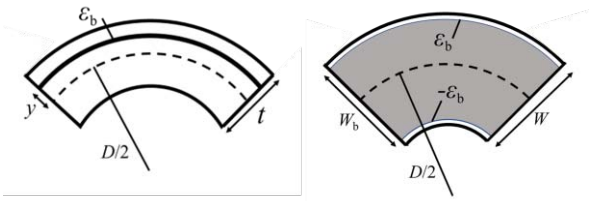


図４ REBCOテープについての平曲げと縦曲げにおける超電導層の配置

図4にREBCOテープの場合の超電導層の配置を示す。左図は平曲げの場合であり、厚さ(t)の向きに曲げると、中心軸からyだけ離れた位置にある超電導層に引張の曲げ歪が発生する。一方右図の縦曲げの場合には超電導層は幅 W_bで示されるように広く分布する。いずれにしても曲げによる最大の歪(ε_b)は図4に示すように超電導層の外縁に発生する。

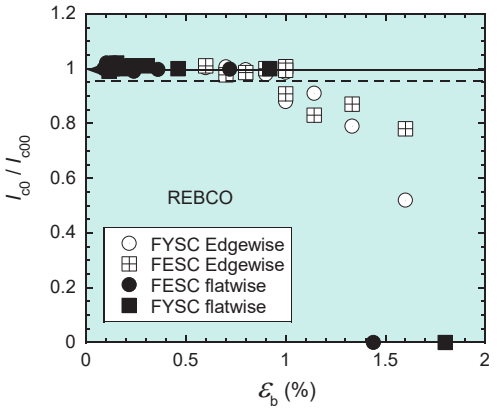


図5 REBCOテープの臨界電流の最大曲げ歪依存性

曲げ直径に対応して最大曲げ歪が決まるので、図２の関係を図5に示すように最大曲げ歪依存性の関係に整理しなおすと、平曲げ、縦曲げに関わらず、同じ曲げ歪依存性に帰着する。

このように臨界電流の限界曲げ歪はテープの積層構造や材料の違いに拘わらずいわゆる最大曲げ歪と一致する。

希土類系高温超伝導線材の転移曲線に与えるひずみ効果

Strain effects on the transition curves of $REBa_2Cu_3O_x$ coated conductor

長谷川 凌也, 小黒 英俊(東海大学); 淡路 智(東北大学)
HASEGAWA Ryoya, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: 1cajm33@mail.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導線材(REBCO 線材)は、超伝導特性が高く、基板のハステロイが機械的に強いため、特に強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている。しかし、ひずみを加えることで、超伝導特性が変化することが知られており[1]、応用で使う際にこの現象が問題になる。また、線材に印加する磁場の方向を変えても、超伝導特性が変化することがよく知られている。この 2 つの特徴を議論することが超伝導マグネット応用には重要だが、その測定が難しいため、ほとんど調べられていない[2]。また、REBCO 線材の超伝導特性がひずみで変化する理由として、結晶構造の変化の影響[3]と、結晶粒界の影響[4]が考えられるが、その詳しいメカニズムは分かっていない。

これらの問題に対して、本研究室では REBCO 線材の曲げひずみ下での臨界電流の磁場角度依存性評価を行ってきた[5]。その中で、ひずみ印加した際に異方性が変化する可能性があることがわかってきた。これは、結晶粒界ではなく、結晶構造変化の影響であると考えられ、REBCO 線材のひずみ効果のうち、結晶構造変化による影響の一つを理解する手がかりになると考えられる。

本研究では、REBCO 線材の上部臨界磁場(B_{c2})を確認することで、ひずみにより異方性にどのような変化が生じるかを調べることを最終目的としている。今回は、転位曲線へのひずみの影響を調べることから、B_{c2} へのひずみの影響を調べたので報告する。

2. 実験方法

REBCO 線材には、市販されている SuperOx 社製のものを使用した。この線材を用いて、低温強磁場中曲げひずみ下での電気抵抗測定を行った。線材を約 1.5 cm に切り、測定用ホルダーに設置した。この際、曲げジグを用いることで、0.1 %、0.2 %のひずみを印加した。これを、東北大学金属材料研究所強磁場センターの 18 T 超伝導マグネットに設置して実験を行った。それぞれのひずみにおいて、18 T 以下の磁場中で、c 軸と平行方向及び垂直方向に磁場を印加し、88 K、90 K における電気抵抗の磁場依存性を測定し、それぞれの B_{c2} を評価した。B_{c2} は転位曲線のオンセットとオフセットをそれぞれ外挿法で求めた。さらに、臨界温度 T_c を求めるため、ゼロ磁場において電気抵抗の温度依存性を測定した。

3. 結果および考察

Fig. 1 に c 軸方向平行に磁場を印加した際の、オンセット及びオフセットから求めた B_{c2} の温度依存性を示した。この結果より、ひずみによって B_{c2} が変化することがわかった。Fig. 2 には、B_{c2} のひずみ依存性を示した。Fig. 2 より、オンセットから求めた B_{c2} はひずみによって高くなることがわかった。これに対し、オフセットから求めた B_{c2} は 90 K では高くなり、88 K では低くなっていく傾向が見えた。c 軸方向に垂直に磁場を印加した結果に関しては、90 K、曲げひずみ 0.1%のみしか測定できなかったためグラフに示していないが、B_{c2} はひずみによって高くなる c 軸平行方向虹場を印加した際と同様に、B_{c2} はひずみによって高くなる。また、磁場ゼロの値が T_c であるが、その値はひずみによってピークをもつ形となった。B_{c2} と T_c とでひずみに対する振る舞いが異なることがわかったが、現状ではこのような振舞いの原因を明らかにできるほどの結果がないため、今後も測定を継続し、結果を精査していく必要がある。

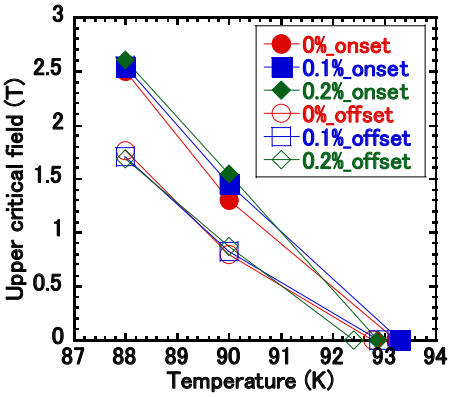


Fig. 1 Upper critical field B_{c2} as a function of temperature for REBCO coated conductor. The closed symbols are the onset B_{c2} and the open symbols are the offset B_{c2}.

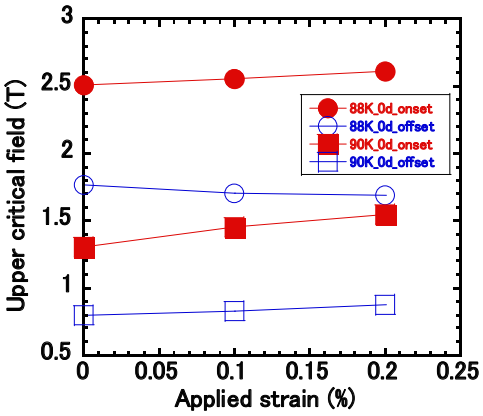


Fig. 2 Upper critical field as a function of bending strain for REBCO coated conductors at 90 K and 88 K.

まとめ

本研究では、低温強磁場中曲げひずみ下でB_{c2}とT_cを評価した。その結果、オンセットから求めたB_{c2}はひずみによって高くなり、オフセットから求めたB_{c2}は90 Kでは高くなり、88 Kでは低くなっていく傾向が見えた。現状ではこのような振舞いの原因が分からないため、今後も測定を継続し、精査していく。

謝辞

本研究は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの課題(202112-HMKGE-0041)の一部として行われた。

参考文献

1. M. Sugano et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 085013
2. D. C. van der Laan et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 072001
3. T. Okada et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) 094014
4. D. C. van der Laan et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 103 (2009) 027005
5. Y. Kurihara et al., Abstract of CSSJ Conference, Vol. 101 (2021) p. 38

リスク物質処理のためのステンレス球磁気フィルタを用いた分離・回収プロセスの検討

Basic study on separation and recovery process using stainless steel ball magnetic filter for risk substance treatment

江村 寛, 吉田 弦, 井原 一高(神戸大学);梅津 一孝(帯広畜産大学)
Emura Hiroshi, YOSHIDA Gen, IHARA Ikko (Kobe University); UMETSU Kazutaka (Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine)
E-mail: 221a003a@stu.kobe-u.ac.jp

1. 研究背景

畜産廃水中の動物用抗菌剤等のリスク物質の環境拡散は，生態系に対して悪影響を及ぼす懸念がある。リスク物質の環境拡散防止は急務であり，リスク物質を廃水中から分離し，無害化処理のために回収することが求められる。本研究では，対象水からリスク物質を分離・回収する技術として磁気フィルタを用いた高勾配磁気分離に着目した。磁気フィルタへ分離した対象物質に対し，洗浄水を用いることでフィルタからの回収が実現する。しかし，磁場の解除後も残留磁化等の影響により，分離した物質の回収率が低いことが指摘されている[1]。回収においては，洗浄液量を極力抑制し，対象水に対して高い濃縮率を実現することが無害化処理には望ましい。すなわち，磁気フィルタからの高回収率と高濃縮率を両立させる分離・回収プロセスの開発が必要である。本研究では，模擬物質として磁性粒子を用いて，高濃縮率条件下における磁気分離・回収プロセスについて検討した。

2. 実験方法

模擬廃水として溶液量 1.8 L，磁性粒子濃度 50 mg/L の溶液を作成した。磁性粒子として，マグネタイトもしくはヘマタイトを用いた。キャニスタに磁気フィルタとして SUS440C 球を装填したモジュールを作成し，ネオジム磁石による磁場空間を持つ磁気分離装置(最大中心磁場 0.6 T)を実験に使用した。磁性粒子溶液を循環させ磁性粒子の分離試験を行った(Fig.1)。印可磁場を解除し脱磁操作を行った後，濃縮倍率が30 倍となるように回収液量を設定し磁性粒子の回収試験を行った。濃縮率 C(-)は式(1)から算出した。

$$C=b/s \quad (1)$$

ここで b は磁性粒子溶液量(L)，s は回収液量(L) である。

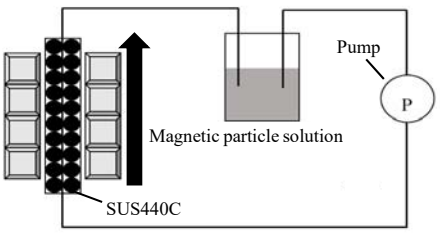


Fig.1 Apparatus for magnetic separation

原子吸光光度計を用いてサンプル中の鉄濃度を測定した。溶液量から磁性粒子量に換算し，式 (2) および式 (3) から分離率 S(%) と回収率 R(%) を算出した。

$$S=c/i \quad (2)$$

$$R=r/c \quad (3)$$

ここで c は分離試験によってフィルタで捕捉された磁性粒子分離量 (g)，i は分離試験に供試した溶液に含有する磁性粒子量 (g)，r は回収試験でのフィルタからの磁性粒子回収量 (g) である。

3. 結果および考察

マグネタイトを用いて磁気分離試験を行った。分離流量 5.4 mL/s と比較すると，21 mL/s ではマグネタイト分離率 99%までの所要時間は短縮された(Fig. 2)。分離流量の増大は磁気分離プロセスの高速化に寄与すると考えられる。しかし分離流量を過大にすると，粒子に作用する流れ由来のドラッグ力が増大し磁気分離が困難になる可能性があり，留意が必要である。ヘマタイトを用いた場合，マグネタイトよりも大幅に低い分離率となった(Fig.2)。ヘマタイトは磁化率が小さいため，磁気力による分離が困難になったと考えられる。

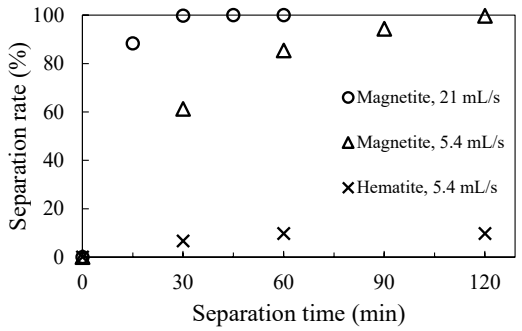


Fig. 2 Circular separation of magnetic particles

濃縮倍率を 30 倍としたマグネタイトの回収試験において，回収流量 12 mL/s では 3.0 mL/s，5.4 mL/s と比較してマグネタイト回収率は 84.8%と高くなったが，流量増大に伴う回収率の増加は鈍化した。また分離流量 21 mL/s での分離後の回収において回収率は 31.5%と低くなった。分離条件も回収に影響を与えることが示唆された。回収率向上のためには，より低い分離流量での磁気分離が好ましいが，より長い分離時間を必要とすることに留意が必要である。ヘマタイトの回収では，マグネタイトよりも高い回収率 89.5%を示した。ヘマタイトはマグネタイトよりも磁化率が小さいため，回収液由来のドラッグ力によって，より多くのヘマタイトがフィルタから剥離されたと考えられる。

4. まとめ

分離流量の増大によって分離時間は短縮された。回収流量だけでなく分離流量も回収率に影響を与えた。高い分離流量を維持しながら更なる回収率の向上を達成するためには，磁気分離装置や回収方法の改良が必要である。

謝辞

本研究は文科省科研費20H03107の支援を得て行われた。

参考文献

1. P. Kampeis, et al.: Einsatz von Magnetfiltern in der Bioverfahrenstechnik Teil 1: Vergleich verschiedener Verfahren zum Rückspülen der Magnetfilter, Chemie Ingenieur Technic, 81(3) (2009), pp.275-281

発電プラント配管中のクラッド分離用高勾配マグネットフィルターに関する検討

Research on high gradient magnetic filters for crud separation in power plant pipes.

三島史人, 長濱葵, 野村直希, 西嶋茂宏, (福井工業大学)
MISHIMA Fumihito, NAGAHAMA Aoi, NOMURA Naoki and NISHIJIMA Shgehiro(Fukui University of Technology)
E-mail: f-mishim@fukui-ut.ac.jp

1. はじめに

日本における原子炉は加圧型(PWR)と沸騰水型(BWR)が主流である。その原子炉の構成材料は、主として耐食性の高い金属が選ばれるが、それらは高温環境においてわずかに腐食する。冷却材中の腐食生成物は系内を循環し、炉心部に付着すると、そこで中性子の照射を受けて放射化される。放射化した腐食生成物が剥離し、再び系内を循環し配管等に付着する。炉水中の腐食生成物あるいは配管系に付着した腐食生成物はクラッドと呼ばれ、放射化したクラッドは系内の放射線量を上昇させ、定検時の原子炉やその周辺機器の保守や点検に支障をきたし、作業従事者の被ばくの大きな要因となっている。また、クラッドの付着は熱交換効率を低下させる弊害ともなる。よって、稼働状態の原子炉のみならず、運転開始から 40 年前後が経過したプラントの廃止措置作業においても、クラッドの除去と回収は重要であり、そのための新たな技術が望まれている[1] [2]。

これらのクラッドは常磁性や強磁性の磁気的性質を示し、回収に必要な物理的外力として磁気力に着目した。本研究では高温高圧流体中に混入しているクラッドを直接ろ過できる方法として、高勾配磁気分離法を提案し、基礎的な実験を行い、その適用可能性について検討したので報告する。

2. 磁気分離理論

磁気分離とは、物理的外力として粒子に作用する磁気力の差を利用した分離手法である。分離対象となる粒子に作用する主な力として、磁気力$\boldsymbol{F}_M$とドラッグ力$\boldsymbol{F}_D$がある。磁気力とドラッグ力は一次元表示すればそれぞれ以下のようになる。

$$F_M = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \frac{X}{\mu_0} B \frac{dB}{dx} \qquad (1)$$

$$F_D = 6\pi\eta r_p (v_f - v_p) \qquad (2)$$

ηは媒体の粘性係数、 r_pは粒子径、$\mathbf{v}_f$は流体の速度、$\mathbf{v}_p$は粒子の速度、μ_0は真空の透磁率、B:磁束密度、χは粒子の体積磁化率を表す。$\boldsymbol{F}_M > \boldsymbol{F}_D$を満たすと磁気分離可能である。

3. 高勾配磁気分離実験

本研究では多くの作業被ばくの要因とされるコバルト60を模擬し、コバルト酸化物(Co_2O_3:体積磁化率1.8×10^{-3})について検討した。PWRの1次系の水質管理値のpH7～8付近を参考に、本実験では、懸濁液をpH7.5とした。顕微鏡写真より、pH3では粒子は分散性が良く、平均粒子径1～3μm程であり、pH7.5では粒子の凝集も確認され、粒子径30μm程のものと1μm程の混在状態であった。

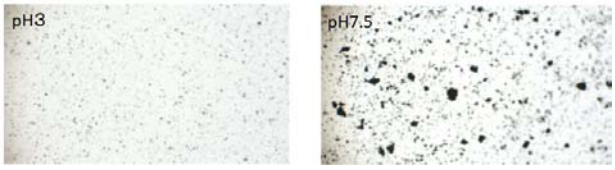


Fig. 1 Photomicrograph of Co_2O_3 suspension pH7.5 (right) and pH3.0 (left)

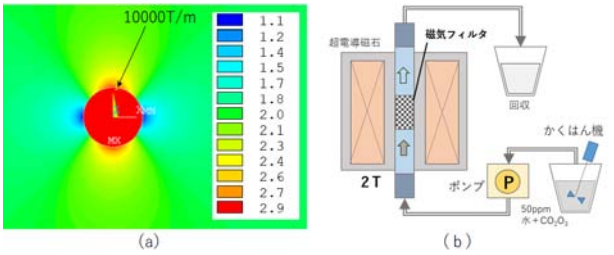


Fig. 2 (a) Magnetic field analysis results for a magnetic filter made of sus430 with a wire diameter of 0.3 mm (b) Schematic illustration of superconducting high gradient magnetic separation device.

磁気分離が可能な磁気力を見積もるため、高勾配磁気分離用の強磁性細線(SUS430)線径Φ0.3mmの磁場解析を行い、細線近傍の磁場勾配を決定し、粒子径を1μm付近のCo_2O_3として、平均流速を1cm/s程と決定した(図2-a)。

高勾配磁気分離試験は、内径20mm、長さ20cmの透明な塩化ビニールパイプ管の中に強磁性細線(SUS430)線径0.3mm、20メッシュ(磁気フィルタ)を100枚装填した高勾配磁気分離流路を、磁場発生源として、ソレノイド型超電導磁石(最大印加磁束密度2〔T〕)の磁場領域に設置し、磁気分離流路内に、pH7.5のCo_2O_3懸濁液 (50ppm)を定量送液ポンプにより流速1cm/sで通水した。通水後、磁気フィルタを通過した液を回収し、吸引ろ過し、その乾燥重量を磁気フィルタで捕捉されなかった粒子として測定した。Co_2O_3粒子の初期投入量を100とし、磁気フィルタを通過した粒子重量を引いて、分離率を算出した。その結果として、分離率94％と良好な結果を得た。

しかし、分離後に回収した液は薄い灰色をしており、今回の実験条件では、小粒径の粒子(粒子径1μm以下の粒子)が磁気分離できていないことも確認された。小粒子径を磁気分離するためには、今後は強磁性細線の線径や処理流速を変更することで、改善可能であると考える。

4. まとめ

本研究ではPWRプラントの模擬クラッドとしてCo_2O_3粒子を対象に超電導高勾配磁気分離を実施し、磁気分離可能なことを示した。

今後は、実際のクラッドの粒子径とそれに伴う放射能についての詳細な調査・検討が必要となる。それにより、作業被ばく低減を可能とする磁気分離装置を設計可能となる。磁気分離に必要な処理量と放射能を考慮し、分離すべき粒子径のしきい値についての決定をしてゆく予定である。

参考文献

1. 石榑 顕吉 他,「原子力発電プラントの水化学管理の実績と将来展望」,日本原子力学会誌, Vol. 37, No.10 (1995)
2. 原子炉水化学ハンドブック 7章 PWR1次冷却系の水化学管理 日本原子力学会編 P120

常磁性粒子の淘汰管を用いた高勾配磁気分離の基礎研究

Basic study on high gradient magnetic separator using the selection tube for paramagnetic particles

長濱葵, 野村直希, 西嶋茂宏, 三島史人;(福井工業大学)
NAGAHAMA Aoi, NOMURA Naoki, NISHIJIMA Shgehiro and MISHIMA Fumihito;(Fukui University of Technology)
E-mail: aoi246911@gmail.com

1. 緒言

現在、我々は常磁性体に対して低磁場で使用できる磁気分離装置の開発を進めている。福島原子力発電所事故により発生した汚染土壌の減容化や、発電所の給水設備からのスケールの分離など、粒径の小さな常磁性粒子の磁気分離法が望まれている。常磁性体の磁気分離は7T以上では効果は大きいものの現地(現場)に設置するには導入・管理コストや自動運転化や管理の面でも問題があり、できる限り強磁場を使用せず常磁性粒子の分離効率を上げることが工業的には求められている[1]。そこで、比重分離の淘汰管と磁気分離を組み合わせた磁気分離システムを提案し、淘汰管磁気分離システムについて、従来の淘汰管分級との分級性能および処理速度の比較を行い、その有効性を示したので報告する。

2. 淘汰管の原理

淘汰管とは、Fig.1に示すように、液中に懸濁した粒子に作用する合力を利用して、微粒子を粒径によって選別する装置である。淘汰管内の粒子には、流体によるドラッグ力 $\mathbf{F}_D$、浮力、重力が働く。粒子に作用する合力を式(1)に示す。

$$\mathbf{F} = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f) - 6\pi\eta r(\boldsymbol{v}_f - \boldsymbol{v}_p) \qquad (1)$$

ここで、r は粒子半径 [m]、ρ_p は粒子の密度 [kg/m^3]、ρ_f は媒質の密度 [kg/m^3]、η は流体の粘度 [Pa・s]、v_f は流体の速度 [m/s]、v_p は粒子の速度 [m/s]である。v_f を0としたときに導かれる粒子の沈降終端速度 v_s を式(2)に示す。

$$v_s = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_f)g}{9\eta} \qquad (2)$$

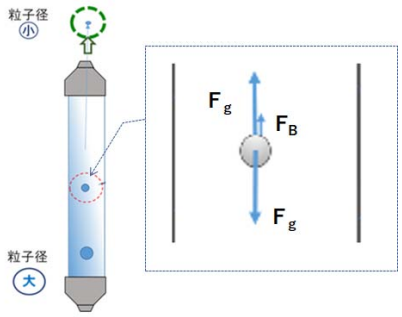


Fig.1 Schematic illustration and photo of selection tube.

3. 磁気分離理論

分離対象の粒子には磁場発生源に引き寄せられる磁気力F_Mと, 流体からの抵抗力であるドラッグ力F_Dが作用する。F_Mは式 (3)で表される。

$$\mathbf{F_M} = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\chi}{\mu_0}(\mathbf{B}\cdot\nabla)\mathbf{B} \qquad (3)$$

ここでの**B**は外部磁場 [T], rは分離対象粒子の粒子半径[m], χは体積磁化率、μ_0は真空の透磁率[H/m]である。

磁気力がドラッグ力より大きければ、磁気分離可能となるが、淘汰管内では粒子が浮遊しているので、磁気力に対するドラッグ力がほぼ無いと考えられ(厳密には磁気けん引する際のドラッグ力は発生する)、弱い磁気力においても磁気分離可能となる。

4. 常磁性粒子を分離するための淘汰管磁気分離の検討

先の実験において、淘汰管に高勾配形成磁気フィルターを適用した淘汰管磁気分離を実施し、0.5T (625T^2/m)で常磁性粒子を示す色ガラスの磁気分離が可能であった[1]。そこで淘汰管内に停留状態の粒子に同様の高勾配磁場を印加した場合、分離領域において、粒子に作用する(1)式のドラッグ力と、(3)式の磁気力の差分を計算し、粒子の停留状態の変化について検討した。

本研究では超電導磁石の高磁場領域内に停留する常磁性粒子(体積磁化率3.14×10^{-4})を磁気けん引する体系とした。管内の流速は、式(2)から粒子径75～240μmの粒子が停留する平均流速、35mm/sとした。管内の径方向位置(管壁から管中心)の流速分布を区分化し、その流れ場のみと流れ場+磁気力場で停留する粒子径の変化をFig.2に示した。

計算結果では、磁気力を作用させることで、淘汰管内に停留可能な粒子径の分布の幅が小さくなり(粒子サイズをより精密分級制御することが可能)、磁気力を用いることにより処理量の拡大(2T印加時約50倍)が可能であることが分かった。

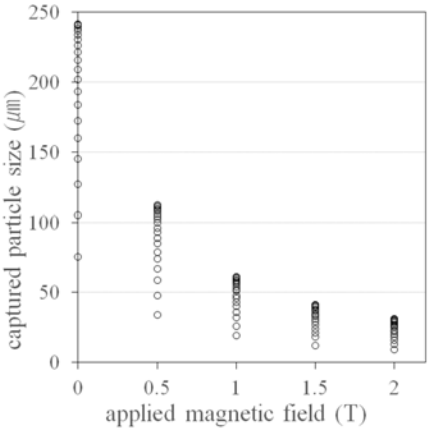


Fig.2 Particle size that can be captured in the separation tube.

5. まとめ

本研究では淘汰管に高勾配磁気分離を適用した系の計算を行った。その結果、従来の淘汰管よりも、高勾配磁場適用時には、高精度に粒子を分級制御可能であり、処理流速も上昇し、処理量の拡大が期待できることが分かった。

今後は、超電導ソレノイド磁石を用いた低磁場印加条件での確認実験を行い、高勾配磁場形成のための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を検討してゆく予定である。

参考文献

1. N.Nomura, F.Mishima, S.Nishijima, “Development of Novel Magnetic Separation for Paramagnetic Particles Using the Selection Tube”, IEEE Trans.on Appl.Supercond. (2022) | Vol.32, (6) PP.1-4

細孔加工したバルク体における軟鉄ヨークが捕捉磁場特性に及ぼす影響

Influence of soft-iron yoke on trapped field characteristics in a hole-processed bulk

YU Cong, SHANG Jiahao, 横山　和哉(足利大);岡 徹雄(芝浦工大)
YU Cong, SHANG Jiahao, YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)
E-mail: g21609@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

REBCO バルク磁石の実用化において，強磁場化と着磁の簡便化が課題である。これまでに，磁束の侵入を容易にするために，バルク体に細孔を加工することで意図的に超伝導特性の低い部分を作り，そこから選択的に磁束を侵入させる手法を提案し，その有効性を確認してきた。現在，軟鉄ヨークが捕捉磁場特性に及ぼす影響を調査しており，大きさや形状を変えた軟鉄ヨークを製作し，パルス着磁実験を行っている。本文は，細孔加工したバルク体と円柱型及びクロス型軟鉄ヨークの効果を組み合わせて，着磁特性の向上を試みる。直径 2mm の細孔を結晶成長領域(GSB)の端部に加工したバルク体を用いて，温度及び印加磁場の大きさを変えてパルス着磁実験を行い，着磁特性を評価する。

2. 実験方法

Fig. 1 に，φ60×20 mm の GdBCO バルク体(日本製鉄製)の結晶成長境界(GSB)の外周近傍に，直径 2 mm の細孔を加工し，さらに機械的な補強のためにハンダを充填した試料の写真を示す。このバルク体に対し，クロス型ヨークを試料の結晶成長領域(GSR)に配置した場合，GSB に配置した場合，さらに円柱型ヨークを用いた場合の着磁特性を比較する。細孔加工したバルク体を 2 段 GM 冷凍機(RM20，アルバック製)の 2nd ステージに取り付けたサンプルフォルダに取り付ける。着磁コイルを取り付けて 3.8～5.4 T のパルス磁場(立ち上がり時間:10 ms)を 1 回印加し，試料表面に貼り付けたホールセンサ(BHT-921)及びセルノックス抵抗温度計(CX-1030-SD)により，着磁中の磁束密度及び温度の時間変化を測定した。真空断熱した後，20～50 K に冷却する。着磁コイルを取り付けて 3.8～5.4 T のパルス磁場(立上時間:10 ms，全パルス幅:100 ms)を 1 回印加し，試料表面の中央部に貼り付けたホールセンサ(BHT-921)により，着磁中の磁束密度の時間変化を測定した。着磁コイルを取り外した後，磁極表面(試料表面から約 4 mm)の磁束密度分布を，三次元ホールセンサ(BH-703)を用いて測定した。また，実測した磁場分布から，総磁束量を算出した。

3. 結果及び考察

Fig. 2 に 20 及び 50 K における印加磁場 B_{app} が 3.8，4.6，5.4 T の時の磁束密度分布を示す。いずれの結果もひし形の磁場分布となっており，細孔部分の影響が表れている。20 K の結果において，GSR 配置の時に高い捕捉磁場となっており，GSB 配置と円柱型ヨークの結果は類似している。50 K では，ヨーク及び配置による大きな差は確認されない。

Fig. 3 に，20 及び 50 K における総磁束量の印加磁場依存性の比較を示す。20 K においては，GSB 配置の結果最も低く，GSR 配置と円柱型ヨークの結果ほぼ一致している。50 K においては，いずれの結果もほぼ一致している。当初，クロス型ヨークにより，細孔からの磁束の侵入が促進されて捕捉磁場が向上することを予想していた。しかし，実際には GSR 配置することにより，細孔部分からの磁場侵入と，クロス型ヨークによる GSR からの磁場侵入が加わって捕捉磁場が大きくなったことが考えれる。

4. まとめ

本文は，REBCO バルク磁石のパルス着磁の効率化を目指して，細孔加工したバルク体と形状を変えた軟鉄ヨークを組み合わせた場合の着磁特性を評価した。その結果，GSR 配置することで，円柱型ヨークに比べて低い印加磁場で捕捉磁束密度が大きくなっており，効率的に着磁できる可能性が示唆された。なお，本研究は JSPS 科研費 20K04449 の助成を受けたものである。

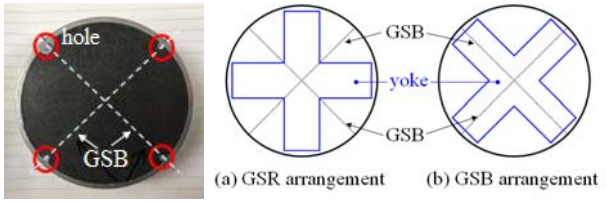


Fig. 1. Photograph of bulk superconductor with small holes, and arrangement of cross-shaped yoke.

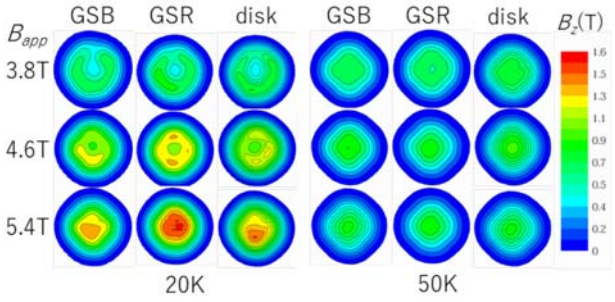


Fig. 2. Comparison of trapped field distributions between GSB and GSR arrangements, and disk-shaped yoke.

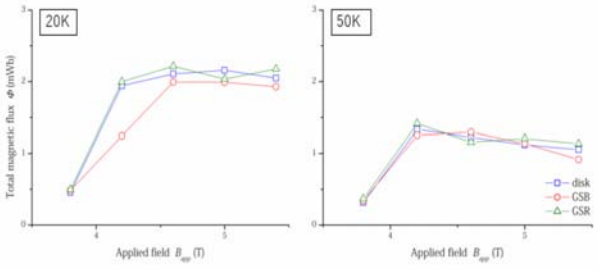


Fig. 3. Comparison of total magnetic flux, Φ, between GSR and GSB arrangements and disk-shaped yoke.

MVT 法 MgB_2 超伝導バルクの大型化に向けた捕捉磁場電磁界解析

Investigation of the Trapped Magnetic Field by Finite Element Method towards Fabrication of Larger MgB_2 Bulks by MVT Process

池田 直生, 田中 里佳, 白旗 知暉, 川崎 玲, 山本 明保（東京農工大）
IKEDA Nao, TANAKA Rika, SHIRAHATA Tomoki, KAWASAKI Rei, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)
E-mail: s215628y@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 超伝導体は高い臨界温度 T_c = 39 K を有することから、液体ヘリウムを必須としない 20 K 近傍での応用が期待されており、線材やバルク磁石等への材料化が進められている。本研究室で開発された MVT(Magnesium Vapor Transport)法[1][2]は、ホウ素源ペレットに対してマグネシウムの金属蒸気を輸送・拡散させることで高純度な MgB_2 バルクを得る手法である。私たちは、熱処理時に高圧力印加が不要である点に着目をして、大型化に向けた検討を行っている[3]。本研究では、MVT 法で作製した MgB_2 バルクの捕捉磁場特性について、実験により得られた J_c-B 特性を考慮した電磁界解析計算を行い、サイズやアスペクト比を変化させた場合の捕捉磁場形状依存性を検討した。また、*in-situ* 法で作製した MgB_2 バルクとの比較も行った。

2. モデリング方法

円盤形状バルクの直径 D を 20 mm に固定して、厚みを t = 1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 20, 40 mm と変化させた仮想バルク、および、厚み t を 2 mm に固定して直径 D = 1, 2, 5, 10, 20, 30 mm と変化させた仮想バルクに対して JMAG-Designer 21.0 を用いて電磁界解析を行った。支配方程式にはマクスウェル方程式から導かれる式を用い、超伝導体の非線形性は(1)式

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^n \quad \cdots\cdots (1)$$

に示す $E-J$ 特性を用いて考慮した。ただし、n = 50 とした[4]。

J_c-B 特性は実験[2]から得られた T = 20 K におけるデータを基に以下の式でフィッティングしたものを用い、比較として *in-situ* 法で作製されたバルクについても同様に近似した[4]。

$$J_c(B) = J_{c0}\exp\left(-\left(\frac{B}{B_0}\right)^{\gamma}\right) \quad \cdots\cdots (2)$$

着磁は実験[2]と同様に磁場中冷却着磁(FCM)を仮定した。

3. 結果と考察

厚みを 2 mm に固定した場合の、シミュレーションによる 20 K における捕捉磁場の直径依存性を Fig. 1 に示す。なお、MVT 法バルクの捕捉磁場の実測値は厚みが 2.3 mm のバルクに対するものである。実測値と計算値との差はバルク内部での J_c-B 特性の不均一性に由来すると考えられる[5]。捕捉磁場は直径の増加にともない増加していく傾向を示し、MVT 法バルクでは D = 30 mm 程度で 2 T 以上の捕捉磁場が薄型円盤で得られると予想された。

シミュレーションにより得られた、直径 D = 20 mm、厚み t = 2, 5, 20 mm の MVT 法バルクと *in-situ* 法バルクの断面における電流密度分布を Fig. 2 に示す。電流はバルク表面付近に集中して流れる傾向がみられた。電流集中部の電流密度は MVT 法バルクが 2.5×10^9 A/m^2 以上と高いが、これは MVT 法バルクの J_c-B 特性が *in-situ* 法バルクよりも優れていることに由来する。計算から、捕捉磁場は厚み増加にともない増加するが、飽和していく傾向がみられた。MVT 法バルクの場合、t = 5 mm では t = 40 mm での捕捉磁場の約 95%に相当する 2.17 T に達した。厚みを増加させた場合、体積増加に対して捕捉磁場が効率的には増加しない要因の一つに、バルク内部では J_c-B 特性に由来して電流密度が抑制されていることが挙げられる。

MgB_2 バルク、とくに MVT 法バルクでは薄型円盤形状を維持しつつ大型化していくことが、効率的により高い捕捉磁場を実現することに寄与すると考えられる。

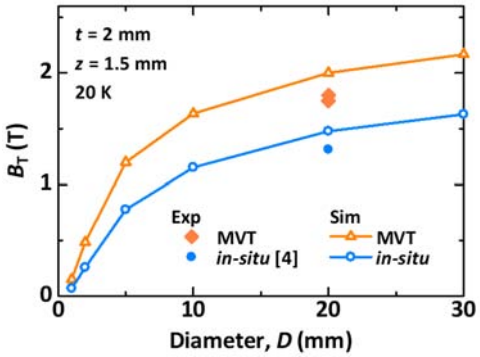


Fig.1 Diameter dependence of trapped magnetic field B_T at 20 K for MgB_2 bulks fabricated by MVT and *in-situ* method (thickness t = 2 mm).

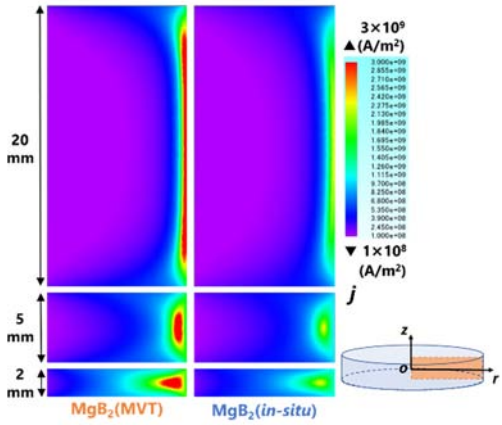


Fig.2 Current density j distribution in half cross sections of MVT and *in-situ* MgB_2 bulks (diameter D = 20 mm, thickness t = 2, 5, 20 mm).

参考文献

1. Y. Sanogawa, et al.: J. Japan Inst. Met. Master, Vol. 83, No. 9 (2019) p. 341-345
2. R. Tanaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 101 (2021) p.78
3. 白旗知暉ら、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 22p-A302-5 (2022)
4. M. D. Ainslie, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 32 (2022) p. 6800504
5. N. Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 103 (2022) p.69

謝辞

本研究はJSPS科研費(JP18H01699, JP21H01615)、並びに科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業CREST (JPMJCR18J4)の支援を受けて行ったものである。

軟鉄ヨークの形状がパルス着磁特性に及ぼす影響の数値解析による評価

Numerical evaluation of the influence of the shape of soft-iron yokes on pulsed-field magnetization characteristics

SHANG Jiahao, YU Cong, 横山 和哉(足利大);岡 徹雄(芝浦工大)
SHANG Jiahao, YU Cong, YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)
E-mail:g22608@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石は小型・軽量な装置で強磁場を発生できるため，航空機や大型船舶用の電気推進装置への応用が検討されている。それらの応用においては単位重量当たりの出力である出力密度が重要なパラメータであり，装置の軽量化が求められている。著者らは，これまでにパルス着磁の際に用いられる軟鉄ヨークに注目し，その形状を変更することで高い捕捉磁場を維持しつつ，軽量化する検討を行ってきた。円柱型，円筒型，クロス型ヨークを用いて実験を行った結果，クロス型ヨークで優位性を確認した。本文は，前述のパルス着実験に基づく数値解析による検討を行い，シミュレーションにより実験結果を再現することを目的とする。

2. 解析モデル

Fig. 1 に，本研究室のバルク PFM システムに基づく，円柱型，円筒型及びクロス型ヨークを用いた三次元シミュレーションモデルをそれぞれ示す。解析において，バルク体の非線形電気特性には n 値モデルを，臨界電流の磁場依存性には Kim-Anderson モデルをそれぞれ用いた。さらに，バルクの温度変化を考慮するために，熱伝導方程式を用いた。なお，解析ソフトには有限要素法による動磁場及び温度の過渡応答解析ソフト Photo-Eddy/Thermo(PHOTON 社)を用いた。

3. 解析結果

Fig. 2 に 20 K における総磁束量の印加磁場依存性について，解析結果と実験結果の比較を示す。解析結果の方が総磁束量の値が大きくなっているが，変化の傾向はいずれの結果も一致している。絶対値の違いは，実験では上部の軟鉄ヨークを取り外して磁場分布を測定しているが，解析では上部のヨークを配置したままとなっているためと考えられる。

Fig. 3 に，バルク表面における半径方向の磁束密度，B_T，の時間変化を示す。中心部(r = 0)の B_Tの値は，円柱型が最も大きく，円筒型とクロス型は若干小さいが，クロス型は減少が少ない。また，クロス型において，ヨークがある場所とない場所で B_Tの値が異なっており，不均一に磁束が侵入していることを示している。

4. まとめ

本文は，本研究室のバルク PFM システムに基づく解析モデルを構築し，円柱型，円筒型，及びクロス型ヨークを用いた場合について，これまでの実験結果と解析結果を比較した。総磁束量の印加磁場依存性について，両者に絶対値に差はあるものの変化の傾向は一致することを確認した。また，磁束密度の時間変化を調べることにより，クロス型ヨークで不均一に磁束が侵入していることが確認できた。なお，本研究は JSPS 科研費 20K04449 の助成を受けたものである。

JSPS 科研費 20K04449

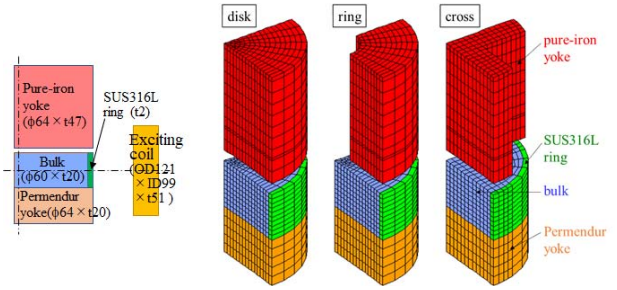


Fig. 1 Three-dimensional simulation model of the bulk PFM system when using disk-, ring-, and cross-shaped yoke

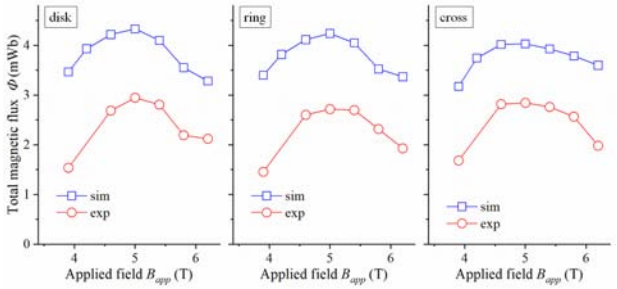


Fig. 2 Comparison of applied field dependence of total magnetic flux between numerical and experimental results at 20 K

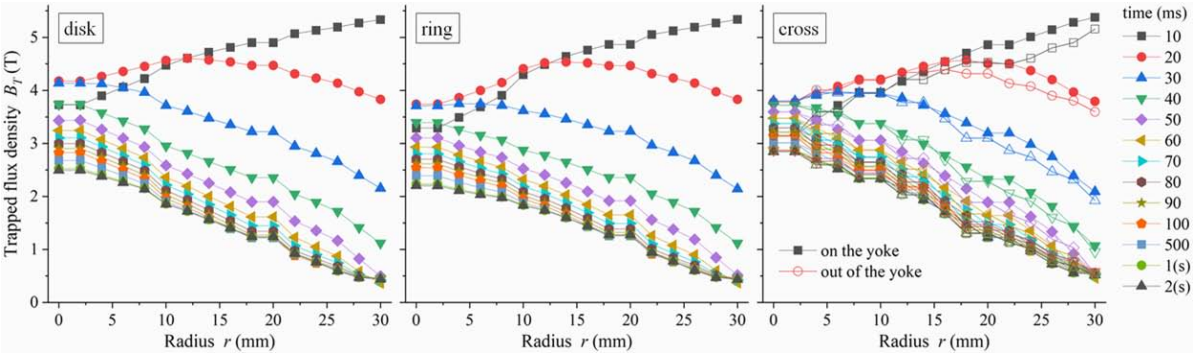


Fig. 3 Time changes of trapped flux density, B_T, in the radial direction on the bulk surface

バルク体の不均一性を考慮したパルス着磁の数値解析

Numerical analysis on pulsed-field magnetization considering inhomogeneity of bulk material properties

横山　和哉, YU Cong, SHANG Jiahao（足利大）; 岡 徹雄（芝浦工大）

YOKOYAMA Kazuya, YU Cong, SHANG Jiahao (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: yokoyama.kazuya@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

REBCO バルク磁石の実用化において，捕捉磁場の向上と同時に着磁の簡便化が重要な課題である。これまでに，パルス着磁の際に用いる軟鉄ヨークが着磁特性に及ぼす影響を実験的に検討してきた。本研究の最終目標は，ヨークの最適な形状や大きさを検討することであり，現在，本研究室のバルクPFMシステムに基づく三次元解析モデルを作成して簡単な数値解析を行っている。本文は，数値解析をさらに実モデルに近づけるために，バルク体の結晶成長境界（GSB）と結晶成長領域（GSR）の特性の違いを考慮したモデルを作成し，詳細な解析を行う。

2. 解析モデル

Fig. 1 に着磁コイルを取り付けたバルク PFM システムの概要，バルク体の GSB 及び GSR を考慮したモデル，及び disk 型，ring 型，cross 型ヨークを用いた場合の三次元シミュレーションモデルをそれぞれ示す。解析において，バルク体の非線形電気特性には n 値モデルを，臨界電流の磁場依存性には Kim-Anderson モデルをそれぞれ用いた。さらに，バルクの温度変化を考慮するために，熱伝導方程式を用いた。なお，解析ソフトには有限要素法による動磁場及び温度の過渡応答解析ソフト Photo-Eddy/Thermo（PHOTON 社）を用いた。

3. 解析結果

Fig. 2 に 20 K における総磁束量の印加磁場依存性の解析結果と実験結果の比較を示す。試料の不均一性を考慮することにより，それを考慮しない場合と大きな差があることがわかった。特に，高い印加磁場において総磁束量が大きく減少しており，特性の低い GSR 部で磁束フローが発生することを再現することができた。

Fig. 3 に磁場印加後 60 秒における一次元磁束密度分布を示す。GSBとGSRの特性の違いを考慮することにより，捕捉磁場分布の形が大きく異なっていることがわかる。また，クロス型ヨークにおいては，バルクの GSB 部にヨークを配置した方が，GSR 部に配置するよりも捕捉磁場が大きくなる結果となった。

4. まとめ

本文は，バルク磁石のパルス着磁において，より詳細な解析を行うために，試料の不均一性を考慮したモデルを作成した。さらに disk 型，ring 型，cross 型ヨークを用いた場合について，温度と印加磁を変えて数値解析を行った。GSB と GSR の違いを考慮することにより，実験結果を再現できることを確認した。また，cross 型ヨークにおいて，バルク体の GSB 部にヨークを配置する方が，着磁特性が高いことが確認された。なお，本研究は JSPS 科研費 20K04449 の助成を受けたものである。

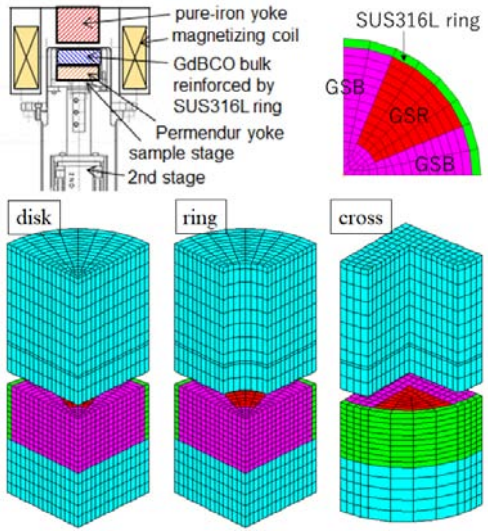


Fig. 1 Schematic of bulk PFM system, bulk model with inhomogeneity, and three-dimensional simulation models

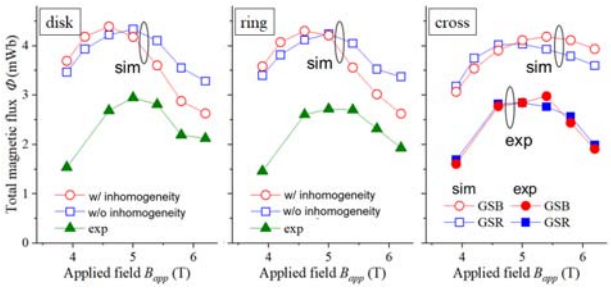


Fig. 2 Applied field dependence of total magnetic flux (20 K)

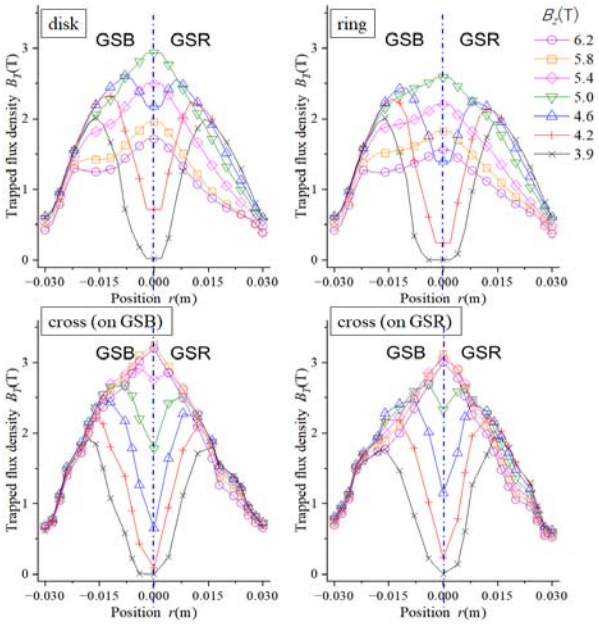


Fig. 3 One-dimensional magnetic field distributions (20 K)

一方向溶融成長(SDMG)法による高均質 REBCO 溶融凝固バルクの育成と物性

Fabrication of highly homogeneous REBCO melt-textured bulks by Single-Direction Melt Growth (SDMG) method and their physical properties

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

1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは、強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。溶融凝固バルクは通常、Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法などに代表されるバルク上面に設置した種結晶を起点として徐冷による溶融凝固で育成されるため、種結晶から鉛直方向に成長した *c*-growth 領域と動径方向に成長した *a*-growth 領域を含む。この結晶成長方向が異なる領域間には非超伝導析出物の分布や結晶性に違いがあるため、非対称な捕捉磁場分布になりやすい。これまで我々は全体が単一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの作製が可能な Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた[1,2]。本手法は、希土類元素の異なる REBCO の包晶温度(T_p)の差を利用して、高 T_p の既製の TSMG バルクを板状に切り出して seed plate とし、その上に載せたバルクを鉛直方向に一次元的に結晶成長させる手法である。

2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO 溶融凝固バルクを[001]方位が鉛直方向になるよう切り出した平板を seed plate とし、その上に DyBCO 焼結体ペレットを設置し、seed plate の T_p 以下で結晶成長させることでバルク全体が *c*-growth 領域からなる SDMG 法溶融凝固バルクを作製した。なお、REBCO ペレットには、TEP 社製混合粉(RE123:RE211 = 7:3)に T_p を低下させるため 10 wt%の Ag_2O を、RE211 の微細化のため 0.5 wt%の CeO_2 をそれぞれ混合したものを用いている。一軸プレス(~100 MPa)により原料粉末をペレット成型し、高温熱処理により緻密化した後、SDMG 法で溶融凝固バルクを育成した。すべてのバルクについて、seed plate から切り離した後、1%O_2/Ar フロー中 850–900°C での還元アニールを行い、425°C で長時間の酸素アニールを行った。一部のバルクでは、再度の還元雰囲気下, 900°C の高温アニール(HTPA)と酸素アニールを行い、超伝導特性の変化を評価した。捕捉磁場特性は液体窒素浸漬下で 2 T までの磁場中冷却後、ホールプローブにより評価した。

3. 結果と考察

はじめに、HTPA 効果について評価した。これまでの酸素アニールのみを行った試料では、長時間のアニール後でも超伝導転移が seed 界面から離れるほどブロードになる傾向が見られた。一方、HTPA と再度の酸素アニールを追加したバルクでは、Fig. 1 に示すようにバルクの切り出し位置に依らず鋭い超伝導転移を示した。また、HTPA 後のバルクは 200 h 以下の酸素アニールでも十分にバルク全体に酸素拡散が進行し、さらに顕著な捕捉磁場特性の改善効果も見られたことから、HTPA 過程の導入がバルク全体の高均質化・高機能化に重要な役割を担うことを明らかにした。このような SDMG 法と後熱処理プロセスの最適化を通じて、Fig. 2 に示すような同心円状かつ 77 K で 1 T を超える高い最大捕捉磁場を示すバルクの再現性の良い育成が可能となりつつある。当日は、高再現性と大型化の両立を目指したペレットと seed plate 間の接触面の均一化に向けた取り込みについても報告する予定である。

[1] T. Motoki *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13**, 093002 (2020)
[2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35** 094003 (2022)

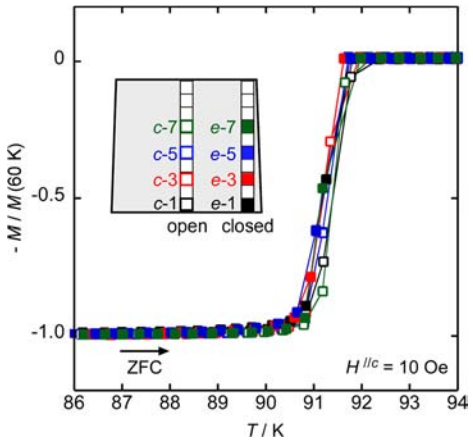


Fig. 1. Temperature dependences of magnetization for DyBCO samples cut 1, 3, 5 and 7 mm apart from the seed side. Open and closed symbols represent samples cut from center and edge part of the bulk, respectively.

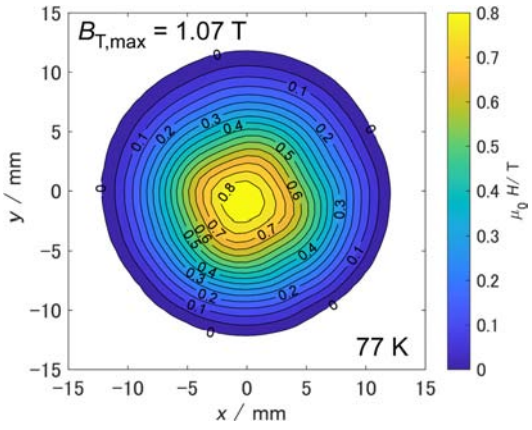


Fig. 2. Trapped field distribution at 77 K above the surface of the seed side of the SDMG-processed 24.4 mmϕ DyBCO bulk

謝辞

本研究は、NEDO 未踏チャレンジ 2050 (22M1C01Y) の助成を受けたものである。

REBCO 溶融凝固バルク間超伝導傾斜接合の開発

Development of oblique superconducting joints connecting REBCO melt-textured bulks

三輪 将也、元木 貴則、仙波 実怜、近藤 莉帆、下山 淳一(青学大)
MIWA Masaya, MOTOKI Takanori, SEMBA Mirei, KONDO Riho, SHIMOYAMA Jun-ichi
E-mail: c5621062@aoyama.jp

1. はじめに

$REBa_2Cu_3O_y$ (RE123, RE : 希土類元素)は液体窒素温度 77 K を超える高い T_c を有し、高磁場下においても高い J_c を示す。REBCO 溶融凝固バルクは内部を周回する永久電流により永久磁石を大きく超える高磁場の捕捉が可能であり、強力超伝導磁石を用いた卓上 NMR などへの応用が期待されている[1]。この REBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性の向上には大型化が有効である。しかし、単一の種結晶による REBCO 溶融凝固バルクの育成ではバルクの大型化に伴い、育成時間が大幅に増大し、均質性や再現性が低下する。そこで、主にマルチシードを用いた大型バルク育成の研究開発が行われているがドメイン間の臨界電流特性の低下が課題となっている。一方、既製の溶融凝固バルクに対する超伝導接合による大型化が考えられ、本研究では、低包晶温度の REBCO を介した超伝導接合に着目した。しかし、これまでに報告されているバルク間超伝導接合は、*c* 軸に平行に切り出したバルク間の *ab* 面方向のみの成長を利用した接合法では、接合界面でのクラックの集中や不純物の堆積によってやはり接合部の臨界電流特性低下が課題となっていた。そこで、本研究ではバルク間の強固な超伝導接合形成を目的に、*c* 軸に対して傾斜をつけてバルクを切り出し、低包晶温度 REBCO を介して *ab* 面内と *c* 軸方向の 3 次元的な中間層の結晶成長による傾斜接合を試みている。

2. 実験方法

自作の DyBCO 溶融凝固バルクを *c* 軸に対して傾斜をつけて切断し、切断面を研磨した後に再度接合することを試み、接合中間層には DyBCO より包晶温度の低い YBCO を選択した。機械的強度向上と包晶温度の低下のために Ag_2O を 5 wt%加えた Y123 : Y_2BaCuO_5 (Y211) = 7 : 3 のモル比の TEP 社製混合粉末を、粘度制御のため PVB を添加した EtOH、BuOH 混合溶媒に入れ、ボールミル混合を行うことで接合用スラリーを調製した。接合中間層の厚さは、接合面へのスラリー塗布と乾燥を繰り返すことにより制御し、DyBCO の包晶温度以下での熱処理により超伝導接合形成を試みた。この熱処理後、RE/Ba 固溶抑制のため 1%O_2 気流中, 850°C, 24 h で還元アニールを施し、最後に長時間の酸素アニールにより酸素量を制御し、物性を評価した。

3. 結果と考察

接合部の研磨過程がなく、中間層の YBCO 層が薄い DyBCO 溶融凝固バルク接合体の表面の 77 K における捕捉磁場分布を Fig. 1,(a)に示す。YBCO 層を跨ぐ電流が流れていないことを反映した捕捉磁場のピークの分裂が確認できた。また、Fig. 1,(b)に示す接合部の元素分布からは Ag が接合界面に凝集し、超伝導接合の形成が部分的に阻害されていることを確認した。次に接合部を研磨し、中間層の YBCO 層を厚くした DyBCO 溶融凝固バルク接合体の表面の 77 K における捕捉磁場分布を Fig. 2,(a)に示す。ピークは一つになり、YBCO 層を介して DyBCO 溶融凝固バルク全体に超伝導電流が周回していることがわかった。また、Fig. 2,(b)からも接合形成を阻害するような Ag の凝集はなく、良好な接合を形成できることが明らかになった。このような接合部を持つバルク試料の捕捉磁場分布およびその解析による接合部の臨界電流特性についても報告する予定である。

参考文献

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

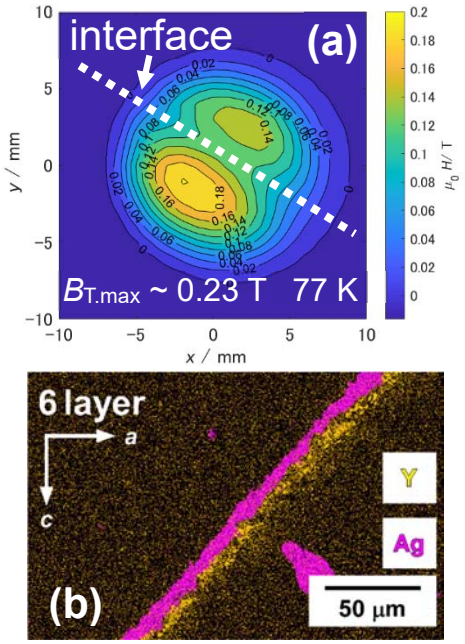


Fig. 1. (a) Trapping field distribution and (b) element distribution map around the joint between DyBCO melt-textured bulks without surface polishing connected by a thin YBCO intermediate layer.

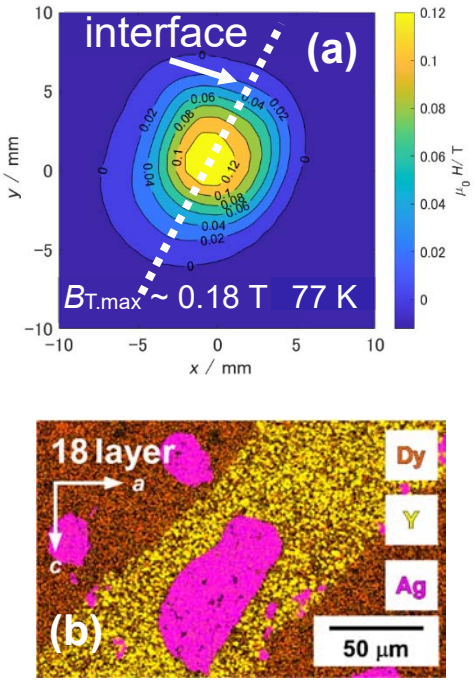


Fig. 2. (a) Trapping field distribution and (b) element distribution map around the joint of DyBCO melt-textured bulks with polished surface connected by a thick YBCO intermediate layer.

ボールミル粉砕した Gd211 粉末を用いて作製した GdBCO バルクの磁束ピン止め特性 -ボールミル材由来の不純物混入の影響-

Vortex pinning characteristics of GdBCO bulks fabricated using a ball-milled Gd211 powder -An effect of impurity contamination from a ball-milling media-

箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)

HAKOISHI Hiroto, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: g0321137@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 超伝導バルクはコンパクトな強磁場発生源であり、卓上型 NMR 装置、モータおよびドラックデリバリーなどへの応用が期待されている 。REBCO バルクの捕捉磁場向上や高温運転には J_c 向上が必要であり、J_c 向上には微細な RE211 を使用することが有効であることが知られている[1]。これまでの Gd211 の微細化の報告例はメディアからのコンタミを考えて耐摩耗性に優れる ZrO_2 を使用したボールミル粉砕がほとんどであり、その他のボールミル材での報告例はほとんど無い。そこで本研究では Gd211 粒子のボールミル粉砕に安価なステンレス材を選択し、REBCO バルクの超伝導特性にステンレス材が及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

Gd123とGd211はGd_2O_3,$BaCO_3$,CuOを使用した固相反応法により作製した(900℃24hx2回)。作製したGd211粉末は遊星式ボールミルによりエタノールを使用した湿式粉砕を施した。ボールミルの容器およびボールはマルテンサイト系ステンレスを使用し、ボールサイズは3/8 inchであった。回転数は200, 300, 400rpmとし、粉砕時間は1時間とした。得られた粉末を100wt%[Gd123:Gd211 = 7:3 (モル比)]+0.5wt% CeO_2となるよう秤量、混合した後、大気中でTSMG法によりGdBCOバルクを作製した。成長したバルクは400℃の酸素中で酸素富化処理を150 h行った。

試料の評価は、Hall 素子を用いた捕捉磁場測定および SQUID 磁束計を用いた磁化測定を行った。臨界電流密度 J_c は磁化データより拡張型ビーンモデルを用いて算出した。また SEM による微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

Fig.1 に各種 Gd211 粉末の SEM 像を示す。回転数の上昇により微細化は進行し、低回転である 200rpm においても微細な Gd211 粒子は確認された。高回転である 400rpm では数 100nm の超微細な Gd211 が得られた。しかしながら、400rpm においても粗大な Gd211 粒子が残留しているため、均一なサイズの微細 Gd211 を得るためにはボールサイズの選定や粉砕時間の長時間化が必要である。

Fig.2 に各種 Gd211 粉末を使用して作製した GdBCO バルクの磁化の温度依存性を示す。回転数上昇に従って T_c は低下していくことが確認できる。Gd211 粒子にネオジム磁石を近づけたところ、粉末が磁石に吸着したことからボールミル材由来のステンレス(鉄)の混入が考えられる。Y123 において鉄は Cu-O 鎖の Cu を置換し、T_c が低下することが報告されている[2]。Gd123 においても同様の現象が発生していると仮定すると、回転数上昇により鉄の混入量が増え T_c が低下したと考える。

Fig.3 に各種 GdBCO バルクの J_c の磁場依存性を示す。200rpm 試料は自己磁場での J_c 向上に加え、1 T 付近にピーク効果が確認された。これはいわゆる鉄の希薄ドープによる特性向上と考えている。400rpm 試料では Gd211 粒子の微細化効果より T_c 低下が大きく、J_c は著しく低下した。

講演では微細組織観察、低温における J_c 特性および捕捉磁場特性と併せて報告する.

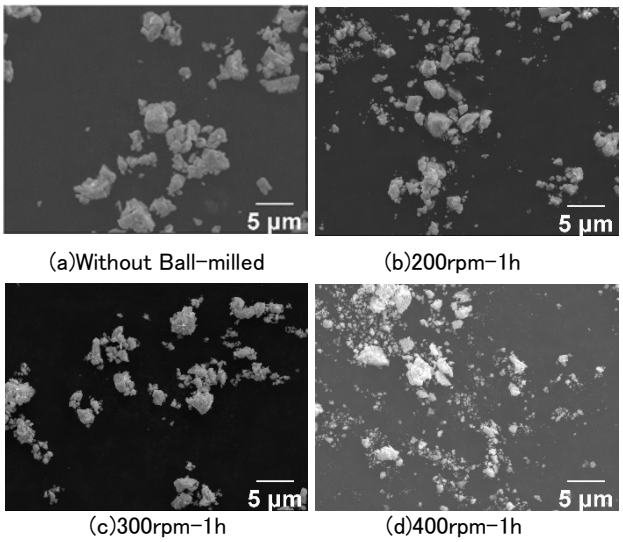


Fig.1 SEM images of Gd211 particles

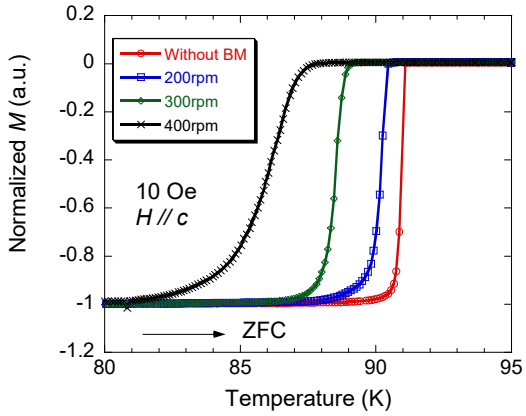


Fig.2 Temperature dependence of magnetization of GdBCO bulks.

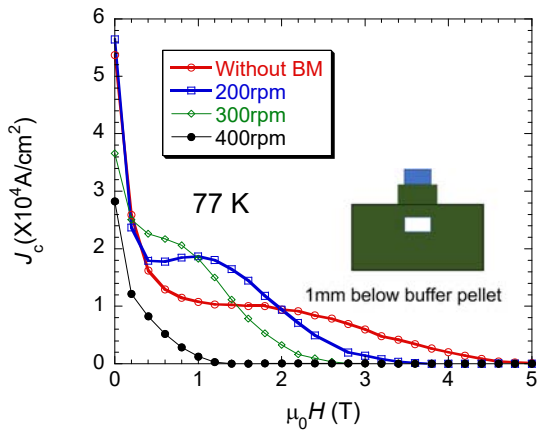


Fig.3 Magnetic field dependence of critical current density of GdBCO bulks at 77 K

参考文献

1. S. Nariki et al.,Supercond.Sci.Technol. **15** (2002) 679-682

2. Y. Ishii et al.,App.Phys.Lett. **89** (2006) 202514

高エネルギー混合法 Coドープ Ba122 多結晶バルクの マクロ/ミクロ超伝導特性評価

Macroscopic and Microscopic Superconducting Properties of Co-doped Ba122 Polycrystalline Bulk by High-energy Milling

長谷川 友大(東京農工大), 卞 舜生, 為ヶ井 強(東京大), 菊池 慎次郎, 石渡 翔大, 山本 明保(東京農工大)
HASEGAWA Yuta(TUAT), PYON Sunseng, TAMEGAI Tsuyoshi(Tokyo Univ.), KIKUCHI Shinjiro, ISHIWATA Shota, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)
E-mail: s218293r@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

$BaFe_2As_2$(Ba122)は鉄系高温超伝導体の母物質の一つであり、元素置換(キャリアドープ)により超伝導が発現する[1]。Ba122は臨界温度 T_cと上部臨界磁場 H_{c2}が高く、高磁場応用が期待されている。一方で多結晶材料においては結晶粒界や組織欠陥が輸送電流に支配的な影響を及ぼすため、組織制御に向けたプロセス設計指針を得ることが課題の一つである。最近我々はCoドープ系で従来の約3倍の J_cを持つ多結晶バルクの作製に成功した[2]。本研究では、高エネルギー混合条件を系統的に変化させた前駆体粉末を用いて SPS 法により焼結した試料に対して、磁化測定と磁気光学観察により、マクロ及びミクロスケールで超伝導特性を評価した。

2. 実験方法

$Ba(Fe_{0.92}Co_{0.08})_2As_2$の化学組成となるように秤量した単体金属に対して、遊星式ボールミル混合の混合条件(E_{BM})を変化させて前駆体粉末を作製した。作製した前駆体粉末をSPS型に充填し、50 MPaの一軸圧力下において+50°C/minの速度で700°Cまで昇温後、室温まで炉冷し、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(6.52 g/cm^3[3])に対する相対密度はいずれも96%以上を示した。さらに作製した試料から切り出した小片試料に対し、MPMSによる磁化測定、四端子法による電気抵抗率測定、磁気光学観察[4]を行った。

3. 結果・考察

電気抵抗率の温度依存性から T_cはすべての試料で26 K以上であり、単結晶の T_c(25 K[5])を上回った。5 Kで測定した磁化ヒステリシスループから求めた自己磁場下における J_cの混合エネルギー依存性をFig.1に示す。E_{BM} = 100–150 MJ/kgの試料の自己磁場下 J_cは常圧合成[6]やHIP法[7]で作製した試料と比較して約3倍の4.9×10^4 A/cm^{2}に達した。これは単結晶試料で報告されている値の約10%に相当する[8]。Fig.2(a)に E_{BM} = 100 MJ/kgの試料をゼロ磁場冷却後、5 Kで1600 Oeの外部磁場を印加し、除去した後の残留磁場の磁気光学像を示す。ルーフトップパターンが確認でき試料内を巨視的にバルク電流が循環していることが示唆された。また、Fig.2(b)にFig.2(a)から得られた磁束密度ラインプロファイルと、磁化測定による J_cの外部磁場依存性を用いた電磁界解析の結果を示す。試料中心における磁束密度はよく一致しており、この結果は磁気光学観察と磁化測定による J_cがほぼ一致し、磁化測定による J_cが試料全体を循環していることを示す。一方で、実験結果は試料中心に対して x 軸方向でわずかに傾いており、試料の厚みが均一でなかったことに由来すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、高エネルギー混合法とSPS法を組合せてCoドープBa122試料を合成し、磁化測定、輸送測定と磁気光学観察により超伝導特性を評価した。磁化測定と磁気光学観察の独立した2種類の方法で、従来の約3倍の高い J_cが得られたことを確認した。また、磁気光学観察結果より、試料内を循環する超伝導電流の均一性が高いことが示唆された。

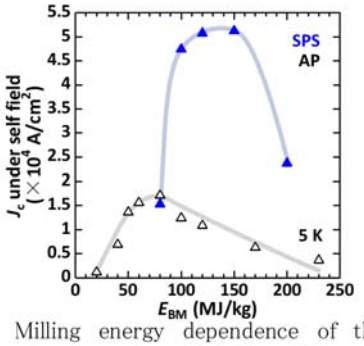


Fig.1 Milling energy dependence of the critical current density under self-field at 5 K.

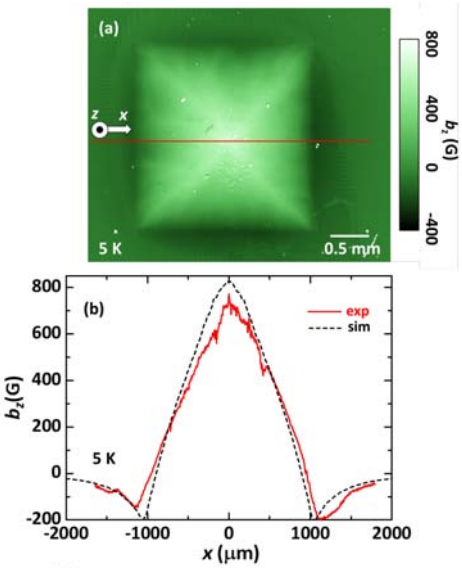


Fig.2 (a) Magneto-optical image in the remanent state of the sample at 5 K. (b) Flux density profile along x axis $b_z(x)$ and result of electromagnetic field analysis.

参考文献

1. H. Hosono, et al.: Mat. Today, Vol.21 (2018) p.278
2. 長谷川友大ら: 第 83 回応用物理秋季学術講演会予稿集,22p-A302-4 (2022)
3. N. Ni, et al.: Phys. Rev. B, Vol.78 (2008) p.214515
4. T. Tamegai, et al.; IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25 (2015) p.7300504
5. Y. Nakajima, et al.: J. Phys. Soc. Jpn, Vol.78, (2009) p.023702.
6. S. Tokuta, et al.; APL Mater, Vol 7 (2019) p.111107
7. J. D. Weiss, et al.:Nat Mater, Vol.11, (2013) p.682
8. A. Yamamoto, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol.94 (2009) p.062511.

Zr をパターニングした基板上での MOD-YBCO 薄膜の結晶配向の膜厚依存性

Thickness dependence of crystal orientation of MOD-YBCO films deposited on Zr-patterned substrates

藤本大貴, 寺西 亮 (九大), 大井修一, 松本明善 (NIMS)
FUJIMOTO Hiroki, TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.); OOI Shuuichi, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS)
E-mail: fujimoto.hiroki.779@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

$YBa_2Cu_3O_y$ (YBCO) 線材の交流損失の低減には、YBCO 層内の幅方向の磁束線の移動範囲を狭めるマルチフィラメント化が有効である[1-5]。我々は新たなマルチフィラメント化の方法として、予め基板上にYBCOとの整合性の低い物質を意図的に細線状にパターニングしバンク構造化したのち YBCO を成膜する手法を提案している。これまで Zr をバンク構造化した基板上に YBCO を成膜し、YBCO 薄膜の結晶配向制御によるマルチフィラメント化を行っている。

本報告ではZrをバンク構造化した基板上でのYBCO薄膜の結晶配向の膜厚依存性を調査し、その結果を示す。

2. 実験方法

MOD には、Y : Ba : Cu = 1 : 1.5 : 3 のオクタノン溶液を幅 5〜10 μm の Zr を 100〜500 μm の間隔で細線状にパターニングした $SrTiO_3$(100)基板上にスピンコートし、703 K での仮焼と 1053K での 150 分の本焼を施した。試料は、1 回塗布膜(Sample1 と表記。スピンコート 6000 rpm × 2 分)と 3 回塗布膜(Sample2 と表記。スピンコート 3000 rpm × 2 分)の 2 種類を用意した。得られた試料を XRD にて θ-2θ 測定、SEM にて二次電子像観察を行い、結晶構造の同定と膜厚の違いによる Zr バンク近辺の結晶組織の違いについて調査した。

3. 結果と考察

Fig.1 に示す XRD θ-2θ 測定結果から、Sample1, 2 の双方で YBCO 00/ ピークおよび 200 ピークが確認された。また Sample2 では配向していない YBCO のピークも確認された。このことから両試料で結晶は c 軸配向しているが、Sample2 では配向が乱れた結晶も存在していることが分かった。Fig.2 に示す両試料の配向していない YBCO のピーク強度の和の YBCO 005 ピーク強度に対する割合比較から、Sample1 より Sample2 の方が約 8 倍、大きくなっていることが確認された。Fig. 3 (a), (b)はそれぞれ Sample1,2 の二次電子像である。Sample1 では観察視野の左側で一様な結晶の拡がりが観察され、右側では上下方向に結晶が乱れていることが観察された。一方 Sample2 では観察視野全体で結晶が乱れていることが観察された。

以上の結果より、膜厚が薄いときは Zr 直上のみで配向が乱れ、膜厚が大きくなると配向が乱れは Zr 直上のみならず平面方向に拡がり、c 軸配向した結晶を覆ってしまうと考えられる。すなわち Zr をバンク構造化した基板上での YBCO 薄膜の結晶配向は膜厚に依存性を示すことが明らかになった。このことから、本手法におけるマルチフィラメント化では膜厚によってバンクの高さを変化させる、あるいはバンクのない領域における結晶の 2 軸配向制御が重要となることが分かった。

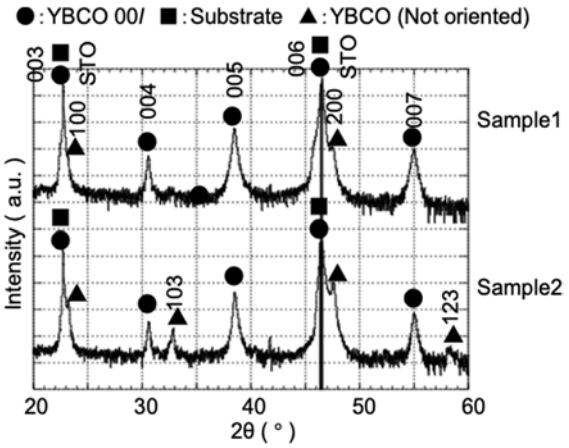


Fig. 1 Results of θ-2θ measurement

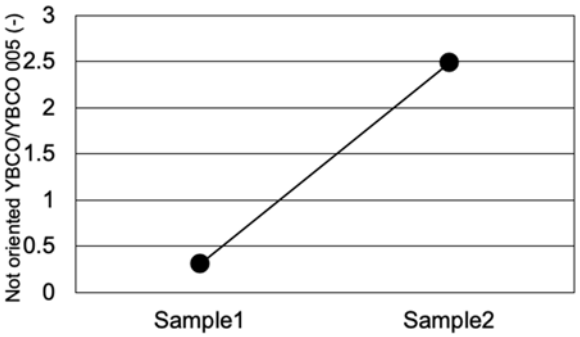


Fig. 2 Peak intensity ratio of non-oriented YBCO

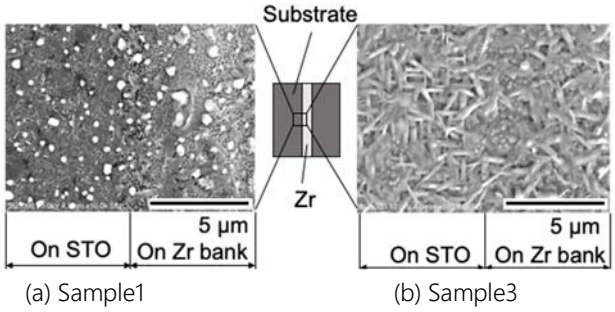


Fig. 3 SEM images of the sample surface

謝辞

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

参考文献

[1] 雨宮 尚之 低温工学, 45, 8 (2010) 376386.
[2] 町敬人 他, 低温工学, 50, 10 (2015) 476482.
[3] Y. Shiohara et al., Jpn. J. Appl. Phys., 51 (2012) 010007.
[4] T. Machi et al., Supercond. Sci. Technol., 26 (2013) 105016.
[5] X. Cai et al., IEEE TAS., 23, 3 (2013) 6603005.

著者索引　第 104 回低温工学・超電導学会　2022 / 12　長良川国際会議場（岐阜県）

（太字の頁番号は講演 / ポスター発表 ）
※ 所属は講演申し込み時のものです。

A

阿部 充志　（KEK）　**72**
安部 勇汰　（東工大）　49
足立 和久　（昭和電線）　20, 120
赤坂 和紀　（東大）　**61**
赤坂 友幸　（鉄道総研）　54
赤塚 創多　（玉川大学）　**98**
天野 一樹　（早大）　**116**
天瀬 洸太　（岩手大）　95
雨宮 尚之　（京大）　3, 4, **126**, 127, 128, 129, 130, 131
青木 和之　（KEK）　50
青木 裕治　（昭和電線）　20, 120
有本 靖　（KEK）　50
有田 拳　（九工大）　**138**
有園 若葉　（上智大）　65
浅井 俊樹　（東京農工大）**140**
淡路 智　（東北大）　6, 19, 22, 78, 83, 84, 97, 143, 146

B

伴野 信哉　（NIMS）　**97**
辺 文浩　（九大）　124

C

力石 浩孝　（NIFS）　70
筑本 知子　（中部大）　15, **122**
CIVALE Leonardo（ロスアラモス国立研）83
CONG Yu　（足利大）　**150**, 152, 153

D

大保 雅載　（フジクラ）　99, 144
土井 俊也　（京大）　99

E

江口 実穂　（中部大）　121
江村 寛　（神戸大）　**147**
江崎 友哉　（京大）　**130**

F

淵野 修一郎　（東大）　6, 93
藤江 和輝　（埼玉大）　**135**
藤巻 朗　（名大）　137
藤本 大貴　（九大）　**158**
藤野 正人　（京大）　127, 128
藤田 真司　（フジクラ）　**144**
深梅 正太郎　（東北大）　123
福田 光宏　（阪大）　104
福井 良磨　（量研機構）　69
福井 聡　（新潟大）　108
福本 祐介　（鉄道総研）　54
福岡 美穂　（室蘭工大）　24, 25, 26, **27**
福島 武人　（東芝エネルギーシステムズ）40
舩木 修平　（島根大）　**101**
船澤 卓朗　（埼玉大）　136
古瀬 充穂　（産総研）　108
二村 宗男　（秋田県立大）46, **109**
府山 伸行　（広島総技研）108

G

GARFIAS-DAVALOS Diego（総研大）　70
GENCER Ali　（Ankara 大）　38
GOMBOJAV Nandintsetseg（神戸製鋼）**59**
後藤 拓也　（NIFS）　71

H

箱石 裕人　（岩手大）　**156**
濱田 一希　（早大）　103, 113, 116
濱田 一弥　（量研機構）　69
濱口 真司　（NIFS）　1, 70
濱島 高太郎　（東北大）　56
濱岡 遼真　（東工大）　49
花木 悠哉　（東北大）　111
原 由子　（成蹊大）　23
長谷川 凌也　（東海大）　**146**
長谷川 友大　（東京農工大）**157**
林 和彦　（Kyoto Future Medical Instruments）91, 92
東川 甲平　（九大）　16, 17, **124**
日野 友明　（中部大）　122
平井 寛一　（大陽日酸）　93
平野 直樹　（NIFS）　47, **48**, 56, 57, 70, 93

平野 優友 （金沢大） **31**
平田 渉 （フジクラ） 144
平塚 善勝 （住重） 36, **37**, 93
平山 貴士 （住重） **45**
弘川 昌樹 （大陽日酸） 91
本田 元気 （住友電工） 22
宝野 和博 （NIMS） 33
堀 裕貴 （名大） 137
堀江 征生 （金沢大） 31
堀口 佳吾 （青学大） 85
星野 壮太 （上智大） 56
星野 勉 （明星大） **9**
細谷 岳哉 （横浜国大） 134

I

衣斐 顕 （産総研） 23, 84
市口 勝治 （NIFS） 71
井手 暁仁 （九大） 124
伊賀 介星 （室蘭工大） 24, 25, 26, 27
五十嵐 柚依 （金沢大） 31
井原 一高 （神戸大） 147
飯島 康裕 （フジクラ） 99
飯嶋 安男 （NIMS） 76, 77, 96
飯沼 裕美 （茨城大） 72
池田 直生 （東京農工大） **151**
池内 正充 （前川） 91, 92, **93**
生田 勝利 （関西学院大） **106**
今川 信作 （NIFS） **1**, 68, 117, 118
今村 和孝 （九大） 17
今谷 純平 （埼玉大） **133**
稲葉 勇人 （青学大） 80, **81**
稲垣 充 （住友電工） 22
猪俣 涼 （上智大） 56
井上 昌睦 （福岡工大） 51, 52, 58, 99, 100
井上 徳之 （中部大） 122
石田 清 （JASTEC） 67
石田 悠人 （関西学院大） 117
石渡 翔大 （東京農工大） 157
石山 敦士 （早大） 103, 104, 112, 113, 114, 115, 116
伊藤 悟 （東北大） 70
伊藤 聡 （JASTEC） 91, **92**, 93
伊東 徹也 （テラル） **108**, 119
糸日谷 浩平 （早大） 104
IVANOV Yury （中部大） 121, 122
岩知道 大樹 （室蘭工大） 24, **25**, 26, 27
岩熊 成卓 （九大） 51, 62, 63
岩本 晃史 （NIFS） 1, 117
岩崎 響 （青学大） 79
和泉 輝郎 （産総研） 20, 23, 28, 84

J

JIAHAO Shang （足利大） 150, **152**, 153

K

柁川 一弘 （山理大） 73
梶田 慎也 （大同大） 87, **102**
上岡 泰晴 （コールドテック） 38
神谷 宏治 （NIMS） 29, **30**, 31, 32
神谷 祥二 （川崎重工） **91**, 92, 93
金尾 憲一 （住重） 36, 37
金谷 和長 （東芝エネルギーシステムズ） 40
金山 諄志 （昭和電線） 120
金沢 新哲 （室蘭工大） 24, 25, 26, 27, **82**
神田 昌枝 （中部大） 42, 121
神田 朋希 （東大） 19
蟹江 澄志 （東北大） 22
片山 伸彦 （東大） 12
加藤 康之 （東大） 83
河江 達也 （九大） **89**
川越 明史 （鹿児島大） 48
川合 修平 （中部大） 121
河野 雅俊 （明興双葉） 50, 76, 77
川﨑 玲 （東京農工大） 151
川崎 理香子 （京大） 41
河島 裕 （テラル） 108, **119**
川嶋 慎也 （神戸製鋼） 67, 97
河田 浩一郎 （島根大） 101
菊池 章弘 （NIMS） 50, **76**, 77, 95, 96
菊池 慎次郎 （東京農工大） 157
木下 康秀 （鈴木商館） 93
岸川 創紀 （九大） 16
岸本 航平 （岡山大） 132
木須 隆暢 （九大） 16, **17**, 124
北口 仁 （NIMS） 80
北澤 英明 （NIMS） 29
木内 勝 （九工大） 142
紀和 利彦 （岡山大） 132
小林 弘明 （JAXA） 7, 8
小林 宏泰 （千葉大） 2, 66
小林 賢介 （NIMS） 80
小林 慎一 （住友電工） 22

小林 倫香 （上智大） 69
公文 麻人 （九大） **62**
児玉 一宗 （日立） 41, 75
古賀 大揮 （福岡工大） 52
小濱 芳允 （東大） 18, 19
公平 龍之介 （青学大） 139
小久保 早希 （早大） 104, 114, 115
駒込 敏弘 （前川） 56
小松 航 （東工大） **49**
小湊 健太郎 （JASTEC） 67
近藤 莉帆 （青学大） 154, 155
小瀧 博司 （日立） 75
小澤 美弥子 （青学大） **85**
久我 響暉 （福岡工大） 52
熊谷 塁 （早大） **104**
熊倉 浩明 （NIMS） 76, **77**
栗山 透 （東芝エネルギーシステムズ） 40
黒田 滉人 （岡山大） **132**
黒川 穂高 （横浜国大） 83
草野 海成 （室蘭工大） 24, 25, **26**, 27

L

LAI Jiawei （NIMS） 33
李 陽 （京大） **3**
呂 高泰 （東大） **107**

M

町 敬人 （産総研） **28**
町屋 修太郎 （大同大） 53, **87**, 102, 145
間所 風地 （室蘭工大） 24, 25, 26, 27
前田 京剛 （東大） 83
前川 一真 （神戸大） 88
MAIOROV Boris （ロスアラモス国立研） 83
槇田 康博 （KEK） 56, 91, 92, 93
間宮 広明 （NIMS） 29
増田 孝人 （住友電工） 92, 93
増田 陽平 （九大） 62
増山 新二 （大島商船高専） 29, **38**
松田 智紀 （東北大） **125**
松本 明善 （NIMS） 6, 75, **99**, 100, 158
松本 郁哉 （京大） 41
松本 宏一 （金沢大） 29, 30, 31
松本 拓也 （JASTEC） 59
松村 知岳 （東大） 12
松永 啓吾 （金沢大） 31
松野 哲也 （有明高専） 138
松岡 杏祐 （東海大） 78
松下 哲哉 （青学大） 86
馬渡 康徳 （産総研） 6, **141**
三部 勉 （KEK） 72
三堂 信博 （昭和電線） 120
三島 史人 （福井工大） **148**, 149
三戸 利行 （NIFS） 48, 93
三浦 英明 （三菱電機） 7, 8
三浦 正志 （成蹊大） 11, 23, **83**, 84
三浦 茂男 （秋田県立大） 46
三浦 峻 （九大） 62, 63
三輪 将也 （青学大） 154, **155**
美和 虎之介 （名大） **21**
宮城 大輔 （千葉大） 2, 66
宮井 玲 （大陽日酸） 91, 92, 93
宮川 一慶 （九大） 89
宮本 能伸 （青学大） **139**
宮﨑 寛史 （九大） 62, 63
宮崎 佳樹 （鉄道総研） **13**
水口 皓平 ; （金沢大） 31
水野 彰人 （名大） 55
水野 謙一郎 （MTL） 19
森江 孝明 （住重） 45
森下 勇樹 （広島総技研） 108
守屋 列神 （岡山大） 132
元木 貴則 （青学大） 79, 80, 81, 85, 86, 139, **154**, 155
村上 陽之 （量研機構） 69
村上 幸伸 （JASTEC） 67
村田 将一朗 （関西学院大） 117, **118**
武藤 翔吾 （フジクラ） 144
明連 広昭 （埼玉大） 133, 135, 136

N

鍋島 冬樹 （東大） 83
長渕 大河 （早大） 103, 113, 116
長濱 葵 （福井工大） 148, **149**
長井 港太 （昭和電線） 120
永石 竜起 （住友電工） 22
長岡 孝 （広島総技研） 108
長﨑 陽 （東北大） 2, 66, 74, 110, **111**, 123, 125
長屋 重夫 （中部電力） 108, 113
内藤 智之 （岩手大） 94, 95, 156
仲田 悠馬 （千葉大） 2, **66**
中川 優 （上智大） 56

中川 久司 （産総研） **90**
中井 優亨 （青学大） **80**, 81
中村 一也 （上智大） 14, 69
中村 幸太 （上智大） **14**
中村 新一 （TEP） 154
中村 太郎 （早大） **103**
中西 啓太 （関西学院大） 106
中西 達尚 （昭和電線） 120
中岡 晃一 （産総研） 20
中島 隆芳 （住友電工） 80, 81, 139
中内 正彦 （鉄道総研（当時）） 91
中山 彪之助 （名大） 137
楢崎 勝弘 （新居浜高専） 37
成瀬 雅人 （埼玉大） 133, 135, 136
成嶋 吉朗 （NIFS） 70
夏目 恭平 （NIMS） 30
縄稚 典生 （広島総技研） 108
新津 遥都 （青学大） 86
二ノ宮 晃 （明治大学） 121
西島 元 （NIMS） 29, **32**, 75
西嶋 茂宏 （福井工大） 148, 149
西宮 伸幸 （NIMS） 29
西山 花名子 （東北大） 125
西山 諒 （関西学院大） 106
仁田 旦三 （東大） 57
野口 聡 （北大） 103, 104, 113, 114, 115, 116
野口 隆志 （池上技術） 93
野島 渉平 （東北大） **74**
野村 直希 （福井工大） 148, 149
野村 新一 （明治大） 57
沼澤 健則 （NIMS） **29**, 30, 31, 32, 34

O

大場 来 （埼玉大） **136**
尾花 哲浩 （NIFS） **105**
小笠原 友樹 （早大） **112**
緒方 康博 （テラル） 108
小川 純 （新潟大） 11, 108
大木元 勇貴 （成蹊大） 84
萩津 透 （KEK） 72
小黒 英俊 （東海大） **44**, 78, 146
大橋 克也 （東海大） **78**
大橋 義正 （アイシン精機） 93
大畑 翔 （秋田県立大） 109
大井 修一 （NIMS） 99, 158
及川 敏之 （秋田県立大） **46**
大池 章太 （千葉大） **2**
岡 徹雄 （芝浦工大） 150, 152, 153
岡田 達典 （東北大） 19, 22, 83, 84, **143**
岡出 祐汰 （九大） 63
岡井 敬一 （JAXA） 7, 8, 61
岡本 洋 （秋田県立大） 46
岡村 哲至 （東工大） 47, 48, 49
大久保 忠勝 （NIMS） 33
奥村 皐月 （東大） **12**
奥野 清 （中部大） 122
大倉 大佑 （中部大） **15**
恩地 太紀 （鉄道総研） 54, 56
小野寺 優太 （NIFS） 48, 70
逢坂 昇汰 （東工大） 47
大崎 瑛介 （青学大） 85
大崎 博之 （東大） 12, 60, 61, 107
尾崎 優一 （福岡工大） **58**
長村 光造 （応用科学研） 53, 87, 102, **145**
押本 夏佳 （山梨大） **10**
大杉 正樹 （フジクラ） 144
太田 海斗 （早大） **114**
小田部 荘司 （九工大） 138
大坪 正人 （明興双葉） 76
大塚 清見 （住重） 36, 37
大内 徳人 （KEK） **50**
大和田 智也 （東北大） **123**
大矢 輝 （京大） 41, **43**
大屋 正義 （関西学院大） **7**, 8, 106, 117, 118
小山 駿 （東大） 72
小山田 拓真 （岩手大） **94**, **95**
尾崎 壽紀 （関西学院大） 55, 84

P

卞 舜生 （東大） 157

S

鷺山 玲子 （東大） 92, 93
齋藤 晶文 （青学大） 86
齋藤 明子 （NIMS） 29, 30, 33, 34
齋藤 寛晃 （成蹊大） **23**
齋藤 圭太 （東北大） 110
齊藤 直人 （KEK） 72
斎藤 涼夫 （中部大） 121
坂井 厳 （名大） **18**, 19
堺 健司 （岡山大） 132

酒井 秀哉　（福岡工大）**100**
坂井 秀成　（青学大）85
坂本 久樹　（SuperPower Inc.）126
坂本 泰明　（鉄道総研）13
坂本 宜照　（量研機構）97
作間 啓太　（山梨大）10, 11
櫻井 裕也　（NIMS）29
桜井 雄基　（岡山大）12
早乙女 英夫　（千葉大）2, 66
佐々 滉太　（九大）62, 63
笹川 卓　（鉄道総研）5
佐々木 憲一　（KEK）72
笹崎 修司　（住重）35
佐竹 真介　（NIFS）71
佐藤 明　（秋田県立大）109
佐藤 迪夫　（昭和電線）**20**, 120
佐藤 更　（神戸大）**88**
佐藤 誠樹　（九大）62
関口 直希　（青学大）**79**
関根 ちひろ　（室蘭工大）82
關谷 尚人　（山梨大）10, 11, 83
仙波 実怜　（青学大）154, 155
SEPEHRI-AMIN Hossein（NIMS）**33**
沈 靖宇　（京大）131
重政 茉於　（京大）**127**, 128
島田 涼平　（九工大）**142**
島田 卓弥　（住重）**35**
嶋田 雄介　（東北大）140
島本 知輝　（総研大）**68**
清水 禎　（NIMS）29
下村 浩一郎　（KEK）72
下山 淳一　（青学大）79, 80, 81, 85, **86**, 139, 154, 155
新郷 正志　（川崎重工）91
新冨 孝和　（KEK）56, 57
塩原 敬　（昭和電線）**120**
塩見 天哉　（中部大）42
塩津 正博　（京大）41, 43
白旗 知暉　（東京農工大）151
白井 毅　（NIMS）30
白井 康之　（京大）1, 7, 8, 41, 43, 91, 92, 93, 117
白石 和輝　（山理大）**73**
正 孝幸　（テラル）108
祖父江 卓哉　（京大）127, **128**
曽我部 友輔　（京大）3, **4**, 126, 127, 128, 129, 130, **131**
SOMJAIJAROEN Natthawirot（九大）17
園田 翔梧　（上智大）14, **69**
末富 佑　（理研）**64**, 65
菅野 未知央　（KEK）6
杉原 弥悠加　（神戸大）88
杉本 昌弘　（古河電工）97
杉本 志郎　（テラル）119
杉田 萌　（原子力機構）72
鈴木 孝明　（日立）41, 75
鈴木 匠　（成蹊大）23, **84**

T

立木 実　（NIMS）99
多田 紘規　（名大）72
田口 秀之　（JAXA）7, 8, 61
太 子周　（九大）89
高田 卓　（NIFS）68, 70
高木 紀和　（東芝エネルギーシステムズ）**40**
高橋 明　（京大）127, 128
高橋 政彦　（東芝エネルギーシステムズ）40
高橋 正希　（福岡工大）**51**
高橋 保夫　（昭和電線）20, 120
高畑 一也　（NIFS）**39**, 70
高野 義彦　（NIMS）34
高尾 智明　（上智大）14, 64, 65
高田 弘樹　（九大）89
高澤 拓海　（東工大）**47**
武田 実　（神戸大）88, 93
武田 宗一郎　（住友電工）139
武田 泰明　（NIMS）80, 81
武田 良彦　（NIMS）29
竹下 直　（産総研）93
竹屋 浩幸　（NIMS）29, 30, 34
為ヶ井 強　（東大）157
田村 仁　（NIFS）**71**
田中 秀樹　（日立）6, **41**, **75**
田中 啓文　（九工大）138
田中 雅光　（名大）**137**
田中 里佳　（東京農工大）151
田中 陶冶　（東大）72
田中 祥貴　（福岡工大）51, **52**
田中 湧也　（上智大）64, **65**
TANG Xin　（NIMS）33
寺西 亮　（九大）99, 158
寺尾 悠　（東大）**6**, 7, **8**, 12, 60, 61, 107

寺島 昭男 （KEK） 96
寺内 和 （早大） **113**
寺崎 拓也 （九大） 17
富田 優 （鉄道総研） 13, 54
殿岡 俊 （三菱電機） 7, 8
豊嶋 健瑠 （島根大） 101
土屋 清澄 （KEK） 50, 96
土屋 光揮 （フジクラ） 144
土屋 雄司 （東北大） 18, **19**, **55**
津田 理 （東北大） 2, 66, 74, 110, 111, 123, 125
辻上 博司 （岩谷産業） 92
塚田 耀太 （東北大） 111
塚原 柊弥 （福岡工大） 52
塚本 修巳 （横浜国大） 14
恒松 正二 （住重） 36, 37
鶴田 彰宏 （産総研） 55

U

内田 公 （NIMS） 30, 31, 80
内田 考紀 （山梨大） **11**
内山 誠士郎 （早大） **115**
植田 浩史 （岡山大） 103, 104, 114, 115, 116
上田 紘司 （東芝エネルギーシステムズ） 40
上田 天馬 （九工大） 138
上田 伴春 （名大） 137
上村 宗二郎 （住重） 45
上野 航生 （東芝エネルギーシステムズ） 40
海野 峻太郎 （京大） 43
宇佐美 雄生 （九工大） 138
宇藤 裕康 （量研機構） 97

W

脇 耕一郎 （鉄道総研） **5**
王 璡 （岡山大） 132
王 旭東 （KEK） 50, **96**
稙田 隆太 （関西学院大） 117
渡邉 裕文 （中部大） **42**, 122
渡邊 浩行 （神戸製鋼） 59
渡部 智則 （中部電力） 108, 113
呉 澤宇 （九大） **16**, 17

X

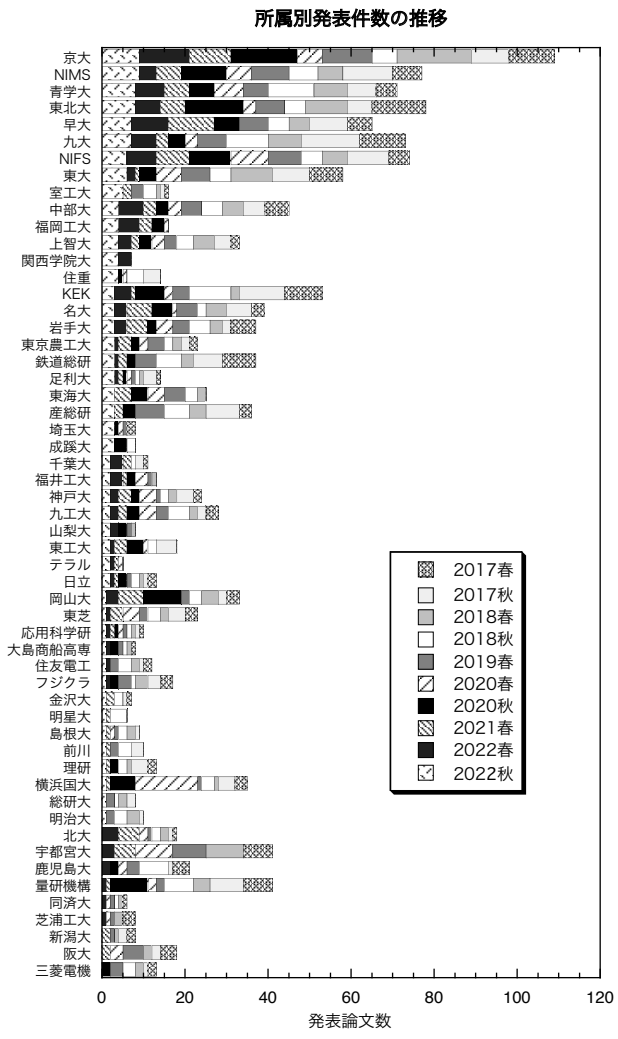
許 光煒 （京大） **129**
許 航 （明治大） **57**

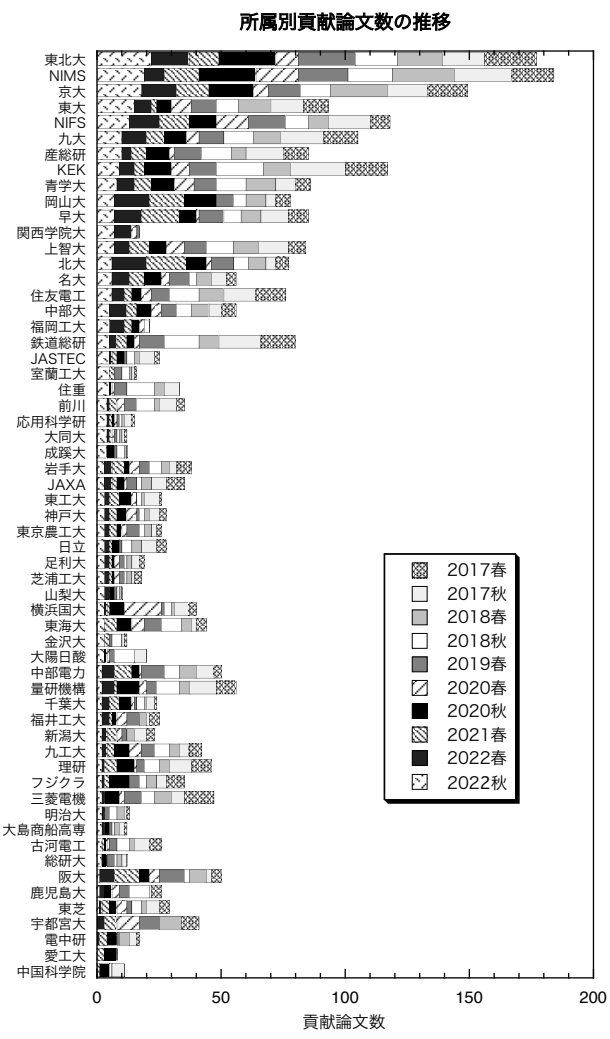
Y

谷貝 剛 （上智大） **56**, 57, 97
山田 容士 （島根大） 101
山田 純弘 （東海大） 44
山田 穣 （中部大） 52
山出 哲 （住友電工） 80, 81, 139
山口 裕之 （NIFS） 71
山口 作太郎 （中部大） 15, 42, **121**
山口 章 （青学大） 80, 81
山川 友瑚 （関西学院大） **117**, 118
山本 明保 （東京農工大） 140, 151, 157
山本 春海 （鉄道総研） **54**
山本 優 （明興双葉） 50, 76, 77
山本 泰起 （岡山大） 132
山本 貴史 （NIMS） **34**
山梨 裕希 （横浜国大） **134**
山根 昇悟 （大同大） **53**, 87, 145
山野 聡士 （古河電工） 126
山崎 亮斗 （九大） **63**
山下 慶 （岡山大） 132
山下 太郎 （東北大） 137
山下 知久 （鉄道総研） 13
柳 長門 （NIFS） **70**, 71
柳澤 吉紀 （理研） 65, 64
安田 仰 （住重） **36**
横山 和哉 （足利大） 150, 152, **153**
横山 彰一 （JASTEC） **67**
吉田 弦 （神戸大） 147
吉田 幸市 （九大） 62, 63
吉田 茂 （元九大） 93
吉田 良行 （産総研） 6
吉田 隆 （名大） 18, 19, 21, 55
吉原 健彦 （住友電工） **22**
吉川 信行 （横浜国大） 134
吉川 翔馬 （室蘭工大） **24**, 25, 26, 27
吉村 創 （東北大） **110**
結縄 ことみ （上智大） 69
結城 拓真 （早大） 103, 113, 116

Z

張 志宇 （東大） **60**
宗 占國 （KEK） 50


所属別発表件数の推移
京大
NIMS
青学大
東北大
早大
九大
NIFS
東大
室工大
中部大
福岡工大
上智大
関西学院大
住重
KEK
名大
岩手大
東京農工大
鉄道総研
足利大
東海大
産総研
埼玉大
成蹊大
千葉大
福井工大
神戸大
九工大
山梨大
東工大
テラル
日立
岡山大
東芝
応用科学研
大島商船高専
住友電工
フジクラ
金沢大
明星大
島根大
前川
理研
横浜国大
総研大
明治大
北大
宇都宮大
鹿児島大
量研機構
同済大
芝浦工大
新潟大
阪大
三菱電機
2017春
2017秋
2018春
2018秋
2019春
2020春
2020秋
2021春
2022春
2022秋
0
20
40
60
80
100
120
発表論文数


所属別貢献論文数の推移
東北大
NIMS
京大
東大
NIFS
九大
産総研
KEK
青学大
岡山大
早大
関西学院大
上智大
北大
名大
住友電工
中部大
福岡工大
鉄道総研
JASTEC
室蘭工大
住重
前川
応用科学研
大同大
成蹊大
岩手大
JAXA
東工大
神戸大
東京農工大
日立
足利大
芝浦工大
山梨大
横浜国大
東海大
金沢大
大陽日酸
中部電力
量研機構
千葉大
福井工大
新潟大
九工大
理研
フジクラ
三菱電機
明治大
大島商船高専
古河電工
総研大
阪大
鹿児島大
東芝
宇都宮大
電中研
愛工大
中国科学院
2017春
2017秋
2018春
2018秋
2019春
2020春
2020秋
2021春
2022春
2022秋
0
50
100
150
200
貢献論文数

複 写 を さ れ る 方 に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は，公益社団法人 日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り，著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人 学術著作権協会　〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル

TEL 03-3475-5618　FAX 03-3475-5619　E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような，複写以外の許諾は，直接本学会へご連絡下さい。

本誌に掲載された講演概要の著作権は低温工学・超電導学会が所有しています。

第 104 回 2022 年度秋季

低温工学・超電導学会講演概要集

2022 年 12 月 7 日　発行

発行／**公益社団法人　低温工学・超電導学会**

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-12-8 パレドール本郷 302 号

電話 03-3818-4539　FAX 03-3818-4573

E-mail: cssj@csj.or.jp　URL: http://csj.or.jp/

銀行口座 みずほ銀行 本郷支店

普通 1012705 公益社団法人 低温工学・超電導学会

郵便振替口座 00140-8-192430 公益社団法人 低温工学・超電導学会

印刷／松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438 番地

Beyond Imagination










株式会社ジェック東理社

埼玉県川越市芳野台２丁目８番５２号

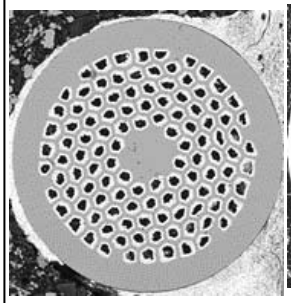
Tel: 049-225-7555　FAX: 049-225-7558

http://www.jecctorisha.co.jp/

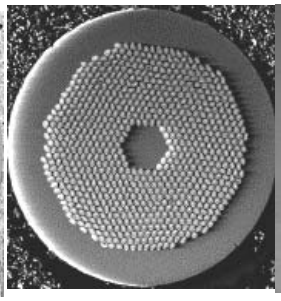
Hyper Tech

MgB2 超電導線・超伝導コイル

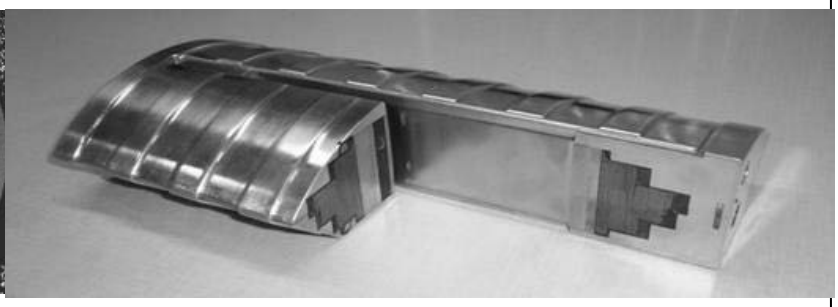
米国Hyper Tech社は、アプリケーションや研究用途に合わせ様々なMgB2線をご提供いたします。
またMgB2　マルチフィラメント線を使用したソレノイドコイルを設計及び製作も可能です。NbTi、Nb3Sn、MgB2、BSCCO、(RE)BCO超電導体を用いた伝導冷却超電導コイルもご提供できます。



DC & AC MgB2 wire



High Jc Nb3Sn wire



MgB2 rotor coil for 2 MW high speed, 15000 rpm motor

スターリング式冷凍機

SUNPOWER　AMETEK®

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	MT	CT	GT
Nominal Lift @77K	1.8W	5W	11W	16W
Nominal Cooler input power	45W	80W	160W	240W
重量	1.2Kg	2.1kg	3.1kg	
最低到達温度	40K			
平均故障時間（時間）	120,000(goal)	200,000		

日本代理店
仁木工芸株株式会社

URL http://www.nikiglass.co.jp

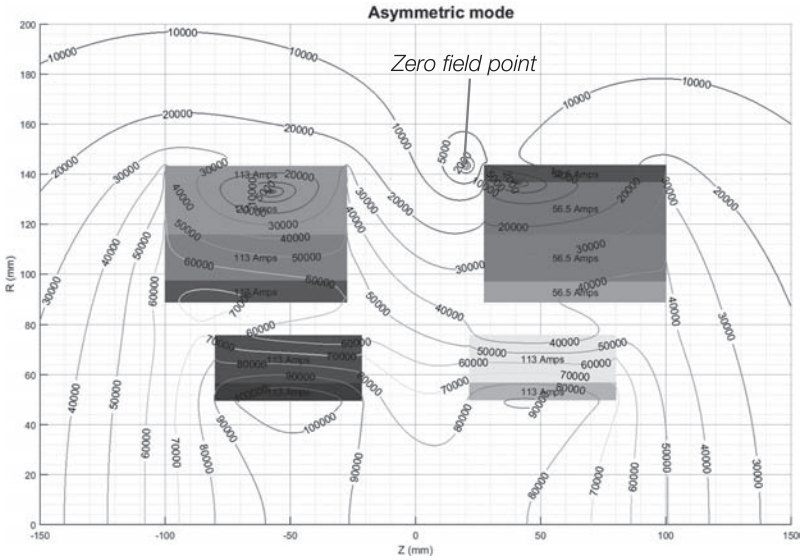
東京支社　〒140-0011　東京都品川区東大井5-26-22
大阪営業所　〒532-0011　大阪府大阪市淀川区西中島3-18-21

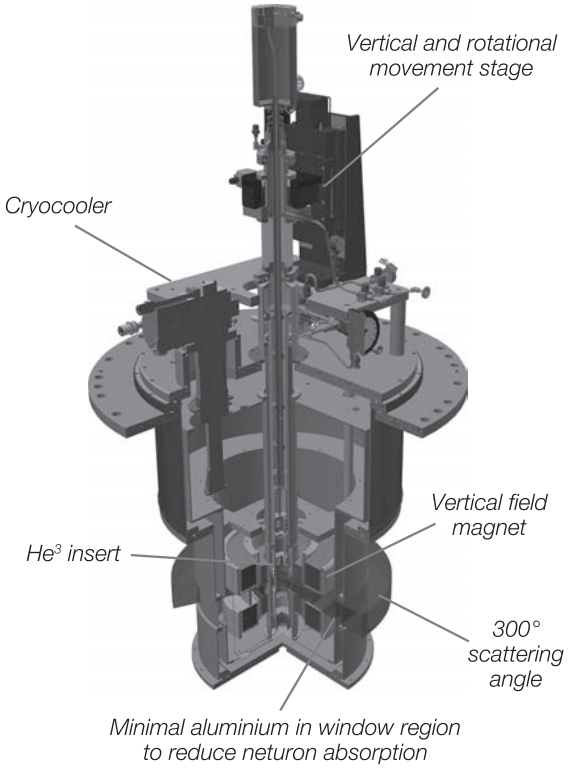
TEL : 03-4218-4700　FAX : 03-4212-3423
TEL : 06-6390-3220　FAX :06-6390-3221

CRYOGENIC
CRYOGENIC LIMITED

中性子散乱研究用無冷媒垂直磁場対称 / 非対称スプリットペアマグネットシステム







- 10T対称磁場マグネットモード運転
- 8.4T非対称磁場マグネットモード運転
  （ゼロ磁場点が磁場中心面（Z=0）から20mm移動）
- 中性子吸収を最小限に抑えるために最適化されたマグネットコイル巻枠
- 試料空間は<1.6 Kから375 Kまでの温度制御が可能
- 300mKまでの温度に対応する^{3}Heインサート
- ±180°回転方向、±15mm鉛直方向の移動が可能なマニピュレーションステージ

日本代理店　http://www.naccjp.com　nacc-c@naccjp.com
日本オートマティック・コントロール株式会社 理科学システムグループ
東京営業所　〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-4
TEL 03-5434-1600　FAX 03-5434-1630

最先端テクノロジーを支える!!

大陽日酸
The Gas Professionals

大陽日酸の極低温機器システム

ヘリウム液化装置

Helium Liquefier

*Linde*社製　高効率新型膨張タービンを搭載



ニーズに応える高性能高信頼性を実現

- コンパクト設計
- ダイナミックガスベアリング式膨張タービン採用
- コンピュータ制御による全自動運転
- 8,000時間以上の連続運転
- 数多くの納入実績
- 万全のメンテナンス体制
- 消費電力が小さく、ランニングコストが低い
- 圧縮機をガス設備とすることが可能

主な仕様

機　種		L70	L140	L280
圧力1.0MPaG※1未満時の保証液化能力※2 （　）内はLN_2予冷なし	周波数 50Hz	32～63L/h (14～29L/h)	79～108L/h (34～50L/h)	153～233L/h (76～115L/h)
	周波数 60Hz	40～63L/h (18～29L/h)	79～107L/h (33～49L/h)	143～216L/h (69～106L/h)
概略寸法(mm)		φ×H	1,100×2,600	1,300×2,600	1,600×2,600
消費電力(kW) (液化用圧縮機)	50Hz		42～76	89～114	141～210
	60Hz		51～75	91～113	133～224

※1:1.0MPaG以上も可能。
※2:液化能力は純He使用時のものです。

※標準仕様以外にも、御要望により各種設計・製作致します。

写真
Model type L280

■　大陽日酸株式会社　■
オンサイト・プラントユニット
プラント事業部　宇宙・低温機器営業部
〒210-0861　川崎市川崎区小島町6-2(京浜事業所)
Tel:044-288-6937　Fax:03-6866-0111

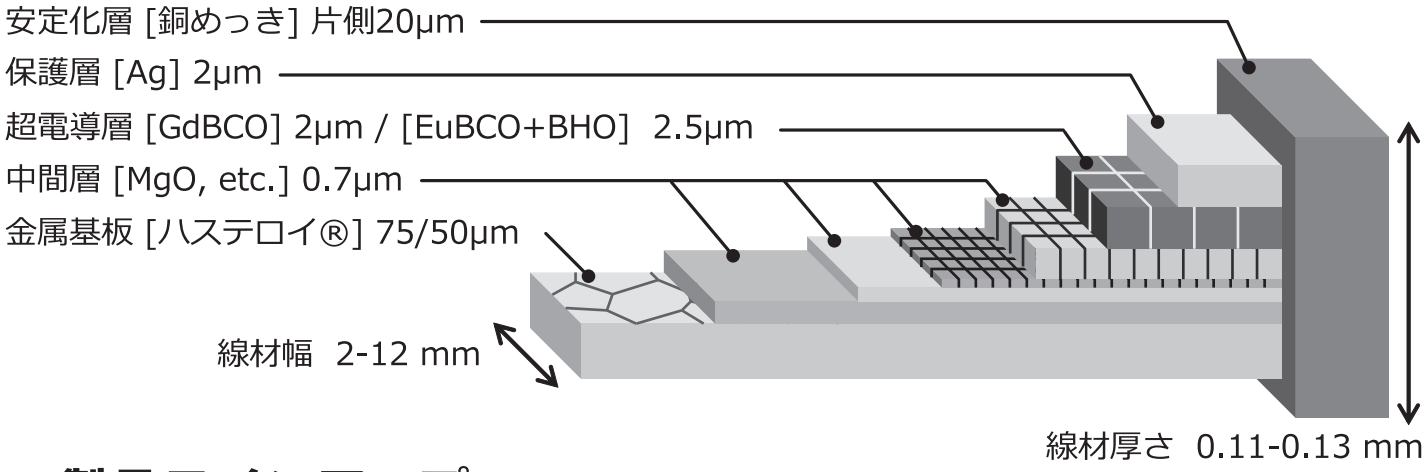
Fujikura レアアース系高温超電導線材

■ 特徴

- マグネット応用に適した高機械強度・高臨界電流特性
- フジクラ独自の主要製造技術：IBAD・PLD法
- 人工ピン導入により低温・高磁場での磁場中臨界電流特性を向上



■ 線材構造



■ 製品ラインアップ

型番	線材幅 [mm]	線材厚さ [mm]	金属基板 [μm]	安定化層 [μm]	臨界電流 [A]		備考
					77K, S.F.	20K, 5T *3	
FYSC-SCH04	4	0.13	75	20	≥ 165	368	人工ピンなし
FYSC-SCH12	12	0.13	75	20	≥ 550	1,104	人工ピンなし
FYSC-S12	12	0.08	75	—	≥ 550	—	人工ピンなし
FESC-SCH02	2	0.11	75	20	≥ 30	257	銀保護層 *1
FESC-SCH03	3	0.11	50	20	≥ 63	497	人工ピン *2
FESC-SCH04	4	0.11	50	20	≥ 85	663	人工ピン *2
FESC-SCH12	12	0.11	50	20	≥ 250	1,990	人工ピン *2
FESC-S12	12	0.06	50	—	≥ 250	—	銀保護層 *1

*1 銀保護層線材は12mm幅のみ提供しております。
*2 人工ピン仕様は低温・高磁場におけるマグネットアプリケーション用途でのご使用を推奨しております。
*3 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 超電導事業推進室 TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472
〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440 E-mail ask-sc@jp.fujikura.com
www.linkedin.com/company/fujikura-superconductor

HELIALは進化しています。

忘れてませんか？ AIR LIQUIDEを

フランスの物理学者ジョルジュ・クロードが液体空気の製造に成功し、彼と実業家ポール・デロルムによりエア・リキードが設立されたのが1902年。5年後の1907年には早くも日本での酸素製造事業がスタートして、さまざまな極低温の経験と最先端技術ノウハウを集結して高品質と高効率の製品を生み出しています。



HELIAL	SL	ML	LL	XL
Capacity range with LN2	20 L/h to 85 L/h	100 L/h to 175L /h	200 L/h to 400 L/h	500 L/h to 600 L/h
Comp motor rated power	＜90 kW	＜160 kW	＜315 kW	＜500k W

自社（AIR LIQUIDE社）製のタービンを採用しています。
また、液化効率を引き出すためにエア・リキード社は最先端技術を基に研究開発を重ねてます。

Air Liquide
creative oxygen

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/

ガスから液化・冷凍装置まで

技術の 小池

極低温のトータル・システムサプライヤー

Linde 社製　ヘリウム液化・冷凍装置

トータルシステムで対応します

小池酸素は、1976年にヘリウム液化機を販売して以来、多くの大学・研究機関に種々のヘリウム液化機および関連装置を納入させていただいております。

納入にあたっては、さまざまなニーズに対応できる当社システムエンジニアが、回収・精製・液化のリサイクルシステムの設計・制作・据付けにあたり、トータルに行なっております。



L70、140、280タイプ

- 15～280 ℓ／hの標準液化装置
  膨張タービンとスクリューコンプレッサーの採用、精製器内蔵などによる高効率、高信頼性のシステム
- 標準および特殊仕様の冷凍装置



250L　100L　50L

クライオサーム社製

液体ヘリウム容器

- HELIOS 50A
- STRATOS 100SL-J
- IONOS 250

その他必要に応じて御対応いたします。

◘ その他　取扱品目　ヘリウムガス精製器、各種クライオスタット、各種真空配管
ヘリウムガス回収用機器（高圧圧縮機、長尺容器、ガスバッグ）

リンデ社ヘリウム液化装置国内販売代理店
小池酸素工業株式会社
KOIKE 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

住友電工
SUMITOMO ELECTRIC

Bi-2223 WIRE (DI-BSCCO®)

DI-BSCCO®	Type H	Type G	Type HT-SS	Type HT-CA	Type HT-NX
	大電流密度線材	低熱伝導率線材	異なる補強材を用いた高強度線材		
応用例		電流リード	マグネット	電力ケーブル	高磁場マグネット
補強材 (厚さ)	–	–	ステンレス (0.02mm^t)	Cu 合金 (0.05mm^t)	Ni 合金 (0.03mm^t)
平均幅	4.2+/- 0.2mm	4.2+/- 0.2mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.1mm	4.5+/- 0.2mm
平均厚さ	0.23+/- 0.01mm	0.23+/- 0.01mm	0.29+/- 0.02mm	0.35+/- 0.02mm	0.31+/- 0.03mm
許容引張強度* 77K, Ic 維持率 95%	130 MPa *	130 MPa *	270 MPa *	250 MPa *	400 MPa *
許容両曲げ直径* RT, Ic 維持率 95%	80mm *	80mm *	60mm *	60mm *	40mm *
臨界電流, I_c 77K, 自己磁場	170A, 180A, 190A, 200A				

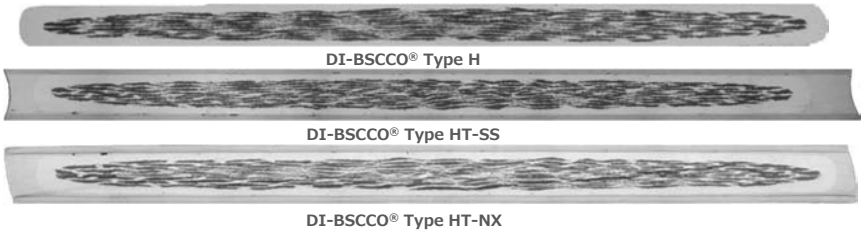
* 参考値

DI-BSCCO® 線材断面

DI-BSCCO® Type H, Type G

DI-BSCCO® Type HT-SS, HT-CA

DI-BSCCO® Type HT-NX



DI-BSCCO® Type H

DI-BSCCO® Type HT-SS

DI-BSCCO® Type HT-NX

e-mail : hts@info.sei.co.jp https://sumitomoelectric.com/jp/products/super

低温工学・超電導学会 発行誌
広告のご案内

【 低 温 工 学 】

普通）1色1P ¥65,000 1色1/2P ¥40,000

【 春・秋大会・講演概要集 】

後付）1色1P ¥65,000 1/2P ¥40,000

※金額は税別です。

広告ご掲載についてのお問い合わせ・お申込み

MEIHOSHA ADVERTISING AGENCY

株式会社 明 報 社

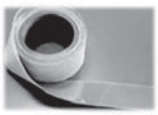
〒104-0061 東京都中央区銀座7-12-4 友野本社ビル
TEL(03)3546-1337 FAX(03)3546-6306
E-mail:info@meihosha.co.jp HP: www.meihosha.co.jp

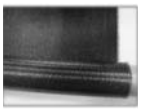
「織る」「塗る」「形づくる」のコア技術で
Dreams to Reality を実現します

複合材料総合メーカーのアリサワが
これまで培ってきた極低温超電導技術で
様々なご要望にお応えします

《取り扱い品目》

1. 絶縁材料（耐放射線性含む）　超電導コイル用絶縁テープ、スペーサー
2. 各種複合材料及び加工製品（耐放射線性、非磁性含む）
   プリプレグ、CFRP・GFRP・AFRP、積層板、FWパイプ、3次元加工品、接着組立品


絶縁テープ


プリプレグ


スーパー
インシュレーション


積層板


CFRP


クロス巻き
パイプ


FWパイプ


オートクレーブ
成形品


3次元加工品


インサートデュワ

《採用実績》

核融合実験炉、素粒子加速器・検出器
非磁性クライオスタット
小型コイル巻き線

お問い合わせは、㈱有沢製作所 東京支店まで

TEL　：03-3861-2141
E-mail：denzetsu@arisawa.co.jp

株式会社 有沢製作所

低温での電気・磁気・熱特性を自動測定
液体ヘリウム不要！

完全無冷媒・低温材料物性自動測定システム CFMS

CRYOGENIC
CRYOGENIC LIMITED

お問い合わせNo：**CG01**

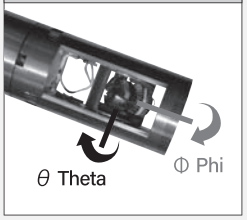
他にない先進機能

- 試料温度1.6 K～高温（700 K / 1100 K）に対応
- 完全無冷媒超伝導マグネットを5～18 Tから選択可能
- 試料ロードロック室を採用し、簡易で素早い試料交換

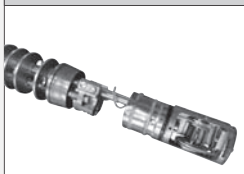
測定モード（用途）

- 磁気特性
- 電気特性
- 比熱特性
- 熱輸送特性

2軸ローテーター



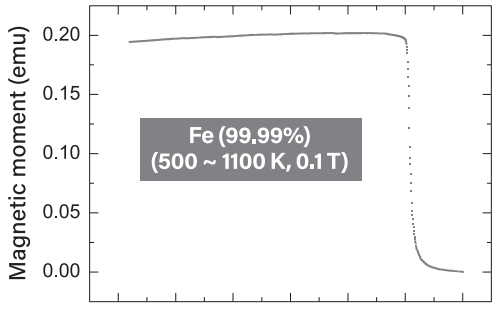
Heプローブ（300 mK）ローテーター付き



最高：700 K 高温電気的測定プローブ



最高：1100 K　高温VSMプローブ





インサートタイプの希釈冷凍機、優れた冷却性能

希釈冷凍機インサート

お問い合わせNo：**LCG02**

特長

- 冷却性能：100 μW@100 mK
- 最低温度：<30 mK

用途・アプリケーション

- スピントロニクス材料
- 超伝導材料
- トポロジカル物質
- 量子コンピューター



Leiden Cryogenics
Leader in Low Temperature Techniques

無冷媒式クライオスタットにも対応可！

東京インスツルメンツ
TOKYO INSTRUMENTS

本　　社：〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-18-14 T.I.ビル　☎03-3686-4711
大阪営業所：〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原4-1-46 新大阪北ビル　☎06-6393-7411
https://www.tokyoinst.co.jp　sales@tokyoinst.co.jp

TII Group Company　－ グローバルにネットワークを広げ、最先端の科学をお客様に提供 －

UNISOKU TII Group
超高真空・極低温走査型プローブ顕微鏡
高速分光測定装置、クライオスタット

LOTIS TII
Nd:YAGレーザー、Ti:Sレーザー
OPOレーザー

SPECS™ - TII
Enviro ESCA（準大気圧XPS）
ARPESなど

TPG-21047-9312-0

大陽日酸
The Gas Professionals

ヘリウム再凝縮装置

- **既存のクライオスタットへ直接取り付けることによりヘリウムロスの削減が可能です。**
- **ヘリウムの継ぎ足し作業が不要となり、自動制御による無人運転が可能です。**

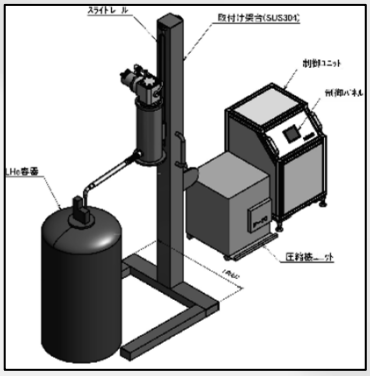


*DS*シリーズ

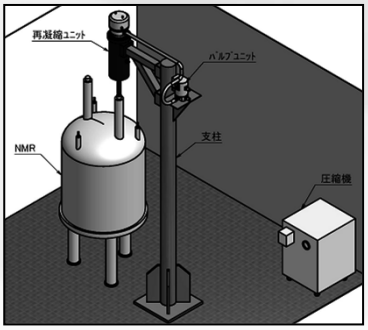
*GM*冷凍機モデル

型式	TRG-375DS	TRG-340DS
再凝縮能力 ※1)	18 liter/day	10 liter/day
電源	3相 200V ,50/60 Hz	
電力 ※2)	13.2/15 kW, 50/60 Hz	
冷却水 ※2),※3)	14-20L/min (28℃)	
メンテナンスサイクル	制御盤：10,000時間/毎 冷凍機：10,000時間/毎 圧縮機：30,000時間/毎	

※1) 300Kのヘリウムガスを使用した場合となります。
※2) 冷凍機、圧縮機2台分の容量となります。
※3) 空冷タイプも対応可能です。
※4) 仕様は予告なく変更する場合がございます。



TRG-330PTモデル



TRG-305PTモデル

*PT*シリーズ

パルスチューブ冷凍機モデル(低振動)

型式	TRG-330PT	TRG-305PT (NMR用)
再凝縮能力 ※1)	6 liter/day	1 liter/day
電源	3相 200V ,50/60 Hz	
電力	7.7 / 9.1 kW @50/60 Hz	6.6 / 7.5 kW @50/60 Hz
冷却水 ※2)	7-10L/min (28℃)	
メンテナンスサイクル	制御盤：10,000時間/毎 ※3) 冷凍機：20,000時間/毎 圧縮機：30,000時間/毎	

※1) 300Kのヘリウムガスを使用した場合となります。
※2) TRG-305PTは空冷タイプも対応可能です。
※3) TRG-305PTでは含まれません。
※4) 仕様は予告なく変更する場合がございます。

・お問い合わせ・

大陽日酸株式会社 工業ガスユニット ガス事業部 営業開発部
〒142-8558 東京都品川区小山1-3-26
TEL:03-5788-8610 URL http://www.tn.sanso.co.jp Email U04200@tn-sanso.co.jp