



Abstracts of CSSJ Conference, Vol.102 (2021)

第102回 2021年度秋季

低温工学・超電導学会

講演概要集

2021年
12月14, 15日
オンライン開催

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

102回

2021 年度秋季低温工学・超電導学会

2021 年 12 月 14 日（火）～ 12 月 15 日（水）

会場： 完全オンライン開催（oVice プラットフォーム）

参加費： 正会員 * 5,000 円，賛助会員等 ** 6,000 円，学生 2,000 円，非会員（一般）10,000 円，
非会員（学生）2,500 円

（概要集のみ：正会員 2,500 円，賛助会員等 2,500 円，学生 1,500 円，非会員（一般）3,500 円）

* 65 歳以上で所定の手続きを終えた正会員は参加費 2,500 円

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

懇親会： 開催しません

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

会場配置図：oVice (<https://cssj.ovice.in/login>)



会場はバーチャル空間「oVice」となっています。次のリンクから（<https://cssj.ovice.in/login>）入場下さい。入場に先立って oVice への会員登録が必要となります。メールアドレスとパスワードのみで登録可能ですので所要時間は 1 分程度ですが，事前の登録をお願いします。なお，会員登録の際は参加申込時に入力したメールアドレスにて登録して下さい。会場への入場時の認証が参加申込時のメールアドレスで行われるためです。

入場すると，「会場入口」付近に自身のアバターが表示されます。アバターをクリックすると，名前，アバターに使用する画像，プロフィール（他者がアバターにカーソルを合わせた際に表示される）等を編集できます。他の参加者に分かりやすいよう各自で編集して下さい。

アバターが近づくことで会話できます。画面下のアイコン一覧にマイクの ON/OFF アイコンがありますので適宜変更して会話して下さい。アイコン左上の歯車をクリックすることでマイクの設定を変更できます。

講演概要集及び研究発表会のタイムスケジュールは，画面右上に用意されています。

講演会場は，A 会場と B 会場の 2 会場が用意されています。各会場へ入場する際は，会場内の一部をクリックして下さい。退場する際は，画面下のアイコン群の右端にある「」のアイコンをクリックするとロビーに戻ります。

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/2021a/>

口頭講演：A 会場，B 会場へ入場後は座長，発表者以外の参加者は音声をミュートにするようお願いします。ロビーとは異なり会場内の音声は全員に伝わります。

発表者は，マイクを ON にし，画面共有にて発表のスライドを表示のうえ講演を始めて下さい。カメラが有効であれば発表中は ON にすることを推奨します。

聴講者は，画面右上に表示される共有画面用のスクリーンを，拡大・縮小・位置変更することが可能です。質問の際は，マイクを ON にして直接質問して下さい。チャット機能を介しての質問も可能です。

2021 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
12 月 14 日 (火)	開場・操作説明 9:05 ～ 9:35	
	オープニングセッション 9:35 ～ 9:45	
	9:45 - 10:45 REBCO 通電特性 p. 1	9:45 - 10:30 デバイス p. 18
	11:00 - 12:00 臨界電流・ピンニング p. 5	10:45 - 12:00 小型冷凍機 p. 21
	昼食	
	操作説明 13:00 ～ 13:15	
	13:15 - 14:00 磁気浮上・磁気軸受 p. 9	13:15 - 13:45 冷却システム p. 26
	14:15 - 16:00 加速器・核融合 p. 12	
12 月 15 日 (水)	開場 9:00 ～	
	操作説明 9:45 ～ 10:00	
	10:00 - 11:15 HTS コイル p. 28	10:00 - 10:30 A15 線材 p. 43
		10:45 - 11:30 超電導接合 p. 45
	昼食	
	操作説明 12:30 ～ 12:45	
	12:45 - 14:00 安定性・保護 p. 33	12:45 - 14:15 バルク作製・着磁 p. 48
	14:15 - 15:30 超電導応用 p. 38	

※プログラムの詳細は <https://csj.or.jp/conference/2021a/> をご覧ください

2021 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 伴野 信哉 物質・材料研究機構

プログラム編成委員会（企画委員会）

委員長 伴野 信哉 学会運営担当 / 物質・材料研究機構

副委員長 井上 昌陸 プログラム編成担当 / 福岡工業大学

委員 岡村 崇弘 高エネルギー加速器研究機構

川越 明史 鹿児島大学

下山 淳一 青山学院大学

高田 卓 核融合科学研究所

田中 秀樹 株式会社 日立製作所

日高 睦夫 産業技術総合研究所

宮城 大輔 千葉大学

宮崎 寛史 九州大学

村上 陽之 量子科学技術研究開発機構

横山 和哉 足利大学

オブザーバー（前委員長）

古瀬 充穂 産業技術総合研究所

※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-a03：1 日目 A 会場の午前 3 番目

2B-p02：2 日目 B 会場の午後 2 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 14 日（火）

開場・操作説明 9:05 - 9:35

オープニングセッション 9:35 - 9:45

12 月 14 日（火） A 会場 9:45 - 16:00

REBCO 通電特性 9:45 - 10:45 座長：松本 明善

- 1A-a01 REBCO 線材の高電界下における電流輸送特性評価 (2) ----- 1
田中 祥貴，川崎 玄貴，立石 航也（福岡工大）；岩熊 成卓（九大）；井上 昌睦（福岡工大）
- 1A-a02 1 mm 幅 REBCO 線材の面内臨界電流密度分布と磁場中臨界電流特性 ----- 2
酒井 秀哉，中本 隼太郎，平原 永将（福岡工大）；山田 穰（中部大）；Yue Zhao,
Jiamin Zhu（上海超電導）；井上 昌睦（福岡工大）
- 1A-a03 10 kA 級高温超伝導 WISE 導体の外部磁場中での通電特性について ----- 3
成嶋吉朗，寺崎義朗，小野寺優太（NIFS）；宮澤 順一，柳 長門（NIFS，総研大）；平野 直樹，
濱口 真司，力石 浩，馬場 智澄（NIFS）
- 1A-a04 パルス電流による超伝導線材の臨界電流測定回路を用いた接触抵抗による発熱の低減 ----- 4
坂井 巖，土屋 雄司（名大）；水野 謙一郎（鈴木商館）；吉田 隆（名大）

休憩 10:45 - 11:00

臨界電流・ピンニング 11:00 - 12:00 座長：土屋 雄司

- 1A-a05 <110> および <100> 配向 REBCO テープの微細構造と臨界電流の歪依存性 ----- 5
長村 光造（応用科学研）；町屋 修太郎（大同大）；Damian P. HAMPSHIRE（University of Durham）
- 1A-a06 データを用いた超伝導線材の開発 — データ収集方法の検討 — ----- 6
松本 明善，松波 成行，伴野 信哉（NIMS）
- 1A-a07 BaHfO₃ 添加量及び成膜速度を変化させることによる REBa₂Cu₃O_y 線材の巨視的ピンニング力の変化 ----- 7
山本 拓実，土屋 雄司，吉田 隆（名大）
- 1A-a08 フッ素フリー MOD 法 Y123 薄膜への不純物添加による高 J_c 化 ----- 8
小澤 美弥子，元木 貴則，金泉 莉大，瀬川 雄大，下山 淳一（青学大）

昼食 12:00 - 13:00

操作説明 13:00 - 13:15

磁気浮上・磁気軸受 13:15 - 14:00 座長：内藤 智之

- 1A-p01 H- ϕ 法と A-V 法を組み合わせた有限要素法解析による超電導磁気軸受の回転損失についての検討 ----- 9
尾上 雄海，奥村 皐月，寺尾 悠，大崎 博之，桜井 雄基，松村 知岳，片山 伸彦（東大）
- 1A-p02 宇宙利用超電導磁気軸受の浮上ギャップ変動が回転損失に与える影響の測定 ----- 10
奥村 皐月，尾上 雄海，寺尾 悠，大崎 博之，桜井 雄基，松村 知岳，片山 伸彦（東大）
- 1A-p03 超電導永久電流による磁気吸引力を用いた吊り下げ磁気浮上の試作 ----- 11
小森 望充，簗田 輝，浅海 賢一（九工大）；根本 薫（古河電工）

休憩 14:00 - 14:15

加速器・核融合 14:15 - 16:00 座長：村上 陽之

1A-p04	バルク超伝導体アンジュレータのための3次元磁場分布計測システム -----	12
	紀井 俊輝 (京大)	
1A-p05	COMET 超電導冷却システムの建設状況 -----	13
	岡村 崇弘, 大中 政弥, 大畠 洋克, 黒澤 宣之, 吉田 誠, 角 直幸, 佐々木 憲一, 槇田 康博, 飯尾 雅実 (KEK); 館野亜紀子, 松尾正宏 (ジェック東理社)	
1A-p06	COMET 磁石とカレントリッドボックス通電試験結果 -----	14
	角 直幸, 吉田 誠, 飯尾 雅実, 佐々木 憲一, 槇田 康博, 岡村 崇弘, 大畠 洋克, 大中 政弥, 黒澤 宣之 (KEK)	
1A-p07	SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石 (QCS) 及び Belle ソレノイド冷凍システム用 モニタリングシステムのアップグレード -----	15
	青木 香苗, 大内 徳人, 宗 占国, 有本 靖, 王 旭東, 山岡 広, 川井 正徳, 近藤 良也 (KEK); 遠藤 友成 (日立テクノロジーアンドサービス); 櫻井 雅哉 (関東情報サービス)	
1A-p08	(取り消し)	
1A-p09	スケルトンサイクロトロン用 REBCO コイルシステムにおける電流制御による遮蔽電流磁場低減の検討 ----	16
	糸日谷 浩平, 白井 航大, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力); 福田 光宏 (阪大)	
1A-p10	ITER TF コイル用ダブル・パンケーキの全基完成成果 -----	17
	梶谷 秀樹, 中本 美緒, 諏訪 友音, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 中平 昌隆 (量研機構)	

12月14日 (火) B会場 9:45 - 13:45

デバイス 9:45 - 10:30 座長：山梨 裕希

1B-a01	斜め磁場下の面状ジョセフソン接合における臨界電流の磁気干渉 -----	18
	上田 天馬, 小田部 荘司 (九工大); 馬渡 康徳 (産総研)	
1B-a02	デジタル SQUID 用スタック型 SQUID 出力アンプの設計 -----	19
	内田 創埤, 今谷 純平, 成瀬 雅人, 明連 広昭 (埼玉大)	
1B-a03	SNSPD 応答信号読み出し用低タイミングジッタ DC/SFQ 回路の設計 -----	20
	佐々木 奨平, 成瀬 雅人, 明連 広昭 (埼玉大)	

休憩 10:30 - 10:45

小型冷凍機 10:45 - 12:00 座長：山口 作太郎

1B-a04	パルス管冷凍機の固体位相制御の比較 -----	21
	朱 紹偉, 郭 志敏 (同済大)	
1B-a05	サイズの異なる2台のGMコールドヘッドにおける4K冷凍能力比較 -----	22
	神代 彪瑠, 増山 新二 (大島商船)	
1B-a06	磁気遮蔽方式による磁気冷凍の可能性に関する研究 - YBCO 線材積層による磁気遮蔽能力評価 - -----	23
	平野 直樹, 小野寺 優太 (NIFS); 岡崎 陽大, 野口 正純, 高澤 拓海, 岡村 哲至 (東工大)	
1B-a07	励消磁過程中的の水の流動方向を変えるタイミングが磁気冷凍機の冷凍性能に及ぼす影響 -----	24
	澤矢 宏紀, 安部 勇汰, 岡村 哲至 (東工大); 裴 相哲 (サンデン)	
1B-a08	冷却部に熱交換器を用いた場合の磁気冷凍システムの冷却性能に関する研究 -----	25
	安部 勇汰, 岡村 哲至 (東工大); 裴 相哲 (サンデン)	

昼食 12:00 - 13:00

操作説明 13:00 - 13:15

冷却システム 13:15 - 13:45 座長：平野 直樹

- 1B-p01 液体水素タンク内部圧力の時間変化における充填率依存性----- 26
永廣 衛, 松田 竜之介, 武田 実, 前川 一真 (神戸大); 嶋根 義親 (トヨタ自動車)
- 1B-p02 ガス冷却ペルチェ電流リードの熱侵入量見積り ----- 27
イワノフ ユーリ, 渡邊 裕文, 筑本 知子, 山口 作太郎 (中部大)

12月15日 (水)

開場 9:00 ~

操作説明 9:45 - 10:00

12月15日 (水) A会場 10:00 - 15:30

HTS コイル 10:00 - 11:15 座長：藤田 真司

- 2A-a01 積層 REBCO 導体の AE センサを用いた劣化診断の可能性検討----- 28
青柳 晃太, 二ノ宮 晃, 野村 新一 (明治大); 小野寺 優太, 三戸 利行, 力石 浩孝 (NIFS)
- 2A-a02 エポキシ樹脂含侵 REBCO 超電導コイルの熱応力による剥離劣化に関する解析検討 ----- 29
大屋 正義 (関学); 三浦 英明, 服部 泰佑 (三菱電機)
- 2A-a03 粒子法による REBCCO テープ線の塑性変形シミュレーション----- 30
間藤 昂允, 野口 聡 (北大)
- 2A-a04 無絶縁 REBCO マルチコイルシステムにおける遮蔽電流磁場解析手法の比較 ----- 31
小久保 早希, 村上 将吾, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (岡山大); 野口 聡 (北大)
- 2A-a05 伝導冷却型 MgB_2 マグネットによる高速励磁試験および MRI 撮像試験----- 32
青木 学, 一木 洋太, 藤田 晋士, 児玉 一宗, 小瀧 博司, 鈴木 孝明, 田中 秀樹 (日立)

昼食 11:30 - 12:30

操作説明 12:30 - 12:45

安定性・保護 12:45 - 14:00 座長：王 旭東

- 2A-p01 無絶縁 REBCO コイル巻線内の劣化発生・拡大の監視法----- 33
結城 拓真, 津吉 杏佳, 根本 羽衣, 北村 真由, 石山 敦士 (早大)
- 2A-p02 絶縁・無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける銅安定化層厚の影響----- 34
長瀬 大河, 根本 羽衣, 北村 真由, 石山 敦士 (早大)
- 2A-p03 無絶縁 REBCO コイルの保護に関する検討 ----- 35
濱田 一希, 北村 真由, 津吉 杏佳, 根本 羽衣, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 渡部 智則,
長尾 重夫 (中部電力)
- 2A-p04 大口径 10 T 級 REBCO マグネット開発 (1) クエンチ保護 ----- 36
藤田 真司, 武藤 翔吾, 土屋 光揮, 平田 渉, 竹本 哲雄, 石井 雅晃, 大保 雅載 (フジクラ)
- 2A-p05 大口径 10 T 級 REBCO マグネット開発 (2) テストコイルの通電試験および解析----- 37
武藤 翔吾, 藤田 真司, 土屋 光揮, 大保 雅載 (フジクラ)

休憩 14:00 - 14:15

超電導応用 14:15 - 15:30 座長：谷貝 剛

- 2A-p06 数値解析による異なるコア径をもつ SCSC ケーブルの交流損失特性評価 ----- 38
八鳥 孝志, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之 (京大)
- 2A-p07 航空機用低温部材の熱応力測定 ----- 39
神田 昌枝, 栗本 敬太, 岩田 暢祐, 山口 作太郎 (中部大)
- 2A-p08 HTS テープ線材の短絡電流試験 - 1 ----- 40

山口 作太郎, 江口 実穂, 神田 昌枝, イワノフ ユーリ (中部大)

- 2A-p09 航空機用電動推進システムにおける超電導限流器導入の効果----- 41
齊藤 央樹, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)
- 2A-p10 アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発 (3) - 加熱試験の概要----- 42
伊東 徹也, 河島 裕, 緒方 康博, 正 孝幸, 杉本 志郎 (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)

12月15日 (水) B会場 10:00 - 14:15

A15 線材 10:00 - 10:30 座長: 淡路 智

- 2B-a01 直径 50 μm の極細線で作製した Nb_3Al 及び Nb_3Sn 燃線ケーブルの臨界電流測定 ----- 43
王 旭東, 土屋 清澄, 寺島 昭男 (KEK); 菊池 章弘, 飯嶋 安男 (NIMS)
- 2B-a02 ブロンズ法 Nb_3Sn 線材において Hf・Ta 添加はどのくらい効果があるのか----- 44
伴野 信哉 (NIMS); 森田 太郎 (上智大, NIMS); 谷貝 剛 (上智大)

休憩 10:30 - 10:45

超電導接合 10:45 - 11:30 座長: 小黒 英俊

- 2B-a03 耐熱 Nb 合金超伝導体を媒介にした Pb フリー NbTi-Nb₃Sn 超伝導接合 ----- 45
伴野 信哉, 小林 賢介, 内田 公, 北口 仁 (NIMS)
- 2B-a04 耐熱 Nb 合金超伝導体を媒介にした鉛フリー NbTi-Nb₃Sn 超伝導接合の接合抵抗評価----- 46
小林 賢介, 伴野 信哉, 内田 公, 北口 仁 (NIMS)
- 2B-a05 高強度 Bi2223 線材間超伝導接合における臨界電流特性の向上 ----- 47
中井 優亨, 稲葉 勇人, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 武田 泰明 (NIMS); 末富 佑,
柳澤 吉紀 (理研); 中島 隆芳, 山出 哲 (住友電工)

昼食 11:30 - 12:30

操作説明 12:30 - 12:45

バルク作製・着磁 12:45 - 14:15 座長: 紀井 俊輝

- 2B-p01 圧延加工による低温焼成部分拡散 ex-situ 法 MgB_2 バルクの開発 ----- 48
小池 亘, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)
- 2B-p02 DyBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性向上を目指した溶融プロセスの検討 ----- 49
三輪 将也, 元木 貴則, 仙波 実怜, 富久 琢磨, 笹田 廉陸, 下山 淳一 (青学大)
- 2B-p03 ex-situ SPS 法で作製した Nb_3Sn 超伝導バルク体の磁束ピン止め特性に対する各種IV
および V 族元素の添加効果----- 50
小山田 拓真, 内藤 智之 (岩手大)
- 2B-p04 低温合成した前駆体粉末を用いて SPS 法で作製した $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ バルクの超伝導特性 ----- 51
箱石 裕人, 内藤 智之 (岩手大)
- 2B-p05 無酸素銅板 / MgB_2 超伝導バルク積層のパルス着磁における無酸素銅の効果 II: 実験による検証 ----- 52
吉田 智貴, 内藤 智之 (岩手大)
- 2B-p06 パルス着磁における軟鉄ヨークとバルク磁石の捕捉磁場の関係----- 53
YU CONG, MAHMOUD ASAAD, 横山 和哉 (足利大); 岡 徹雄 (芝浦工大)

REBCO 線材の高電界下における電流輸送特性評価(2)

Current transport characteristics of REBCO coated conductors in high electric fields (2).

田中 祥貴, 川崎 玄貴, 立石 航也(福岡工大); 岩熊 成卓(九大); 井上 昌睦(福岡工大)

TANAKA Yoshiki, KAWASAKI Genki, TATEISHI Koya (Fukuoka Inst. Tech.);

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

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

1. はじめに

REBCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, RE=Rare Earth) 線材を用いた超伝導限流器のような電力機器の設計においては高電界下の電流輸送特性が必要な場合がある。しかし、一般的な通電測定では発熱のため電界基準程度の電圧状態までしか計測されていない。そこで、我々は高電界を含めた I - V 特性そのものの測定に取り組んでいる。前回の発表[1]では、厚さ $500\mu\text{m}$ の銅板を接合した REBCO 線材の電流-電界 (I - E) 特性から銅板に流れている電流を差し引くことにより、REBCO 線材単独の I - E 特性の抽出を行った。本研究では、厚さの異なる銅板を接合した REBCO 線材に対しても通電測定を実施し、 I - E 特性の解析を行った。

2. 実験方法

幅 2mm で銅コーティングされた REBCO 線材の表面に、厚さ $300\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ の銅板をはんだ接合してパルス通電法による電流電圧 (I - V) 測定を実施した。電流端子間距離は 30mm 、電圧端子間距離は $2\sim 3\text{mm}$ とした (Fig. 1)。

得られた I - V 特性から、電圧端子間距離を考慮して電流電界 (I - E) 特性に換算を行った。また、超伝導線材のみに流れる電流の算出を行い、REBCO 線材の I - E 特性を求めた。

3. 結果と考察

Fig. 2に、実験により得られた I - E 特性を示す。REBCO線材のみの測定 ($\circ$) では 107A 印加時に、 10^{-2}V/m の電界付近で焼損したが、銅板を接合した線材は 200A まで通電しても焼損しなかった。銅板を接合した線材の I - E 特性 ($\diamond$, $\triangle$) では、 10A 付近から線形に上昇する電圧が観察された。これは銅板と REBCO 線材間の界面を流れる電流によるものだと考えられる。 80A 付近から電圧が急激に上昇し、銅板の I - E 特性 ($\square$, ∇) に収束する様子が観察された。これは、REBCO 線材と銅板とに電流が分流しているためだと考えられる。そこで、銅板と REBCO 線材の並列回路を想定して REBCO 線材単独の I - E 特性の抽出を行った。その結果を比較したものを Fig. 3 に示す。同図より、抽出した I - E 特性は REBCO 線材単独の I - E 特性を再現していることがわかる。また、REBCO 線材単独での測定から 1 桁以上、電界基準からは 3 桁以上高い電界範囲にわたって I - E 特性が得られたことが確認できた。

謝辞

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務、JST-ALCA、並びに JSPS 科研費 JP18H01928 の結果得られたものである。

参考文献

1. Y. Tanaka, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 101 (2021) p. 39

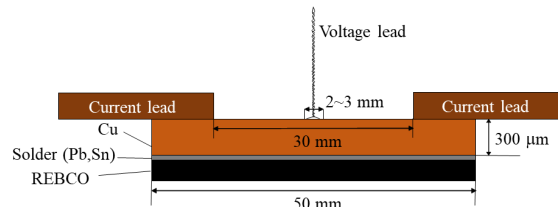


Fig. 1 Schematic of measurement sample.

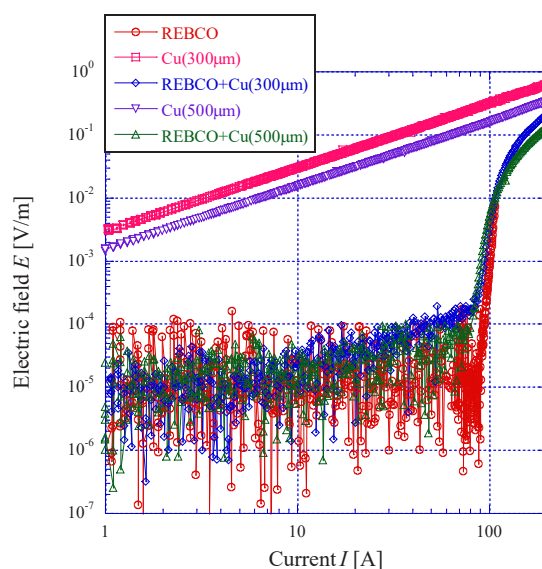


Fig. 2 Current transport characteristics at 77K, self-field.

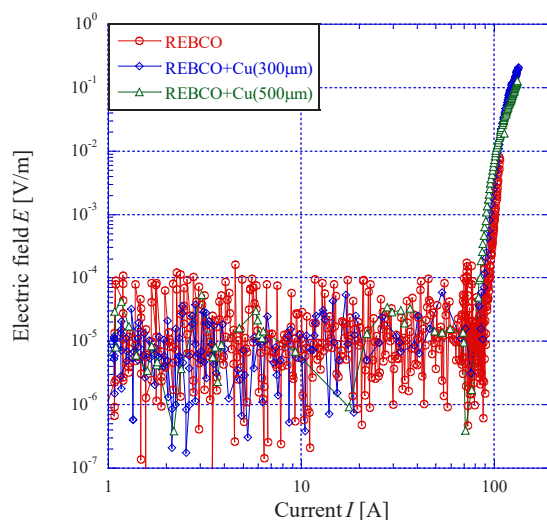


Fig. 3 Extracted I - E characteristics comparing with measured I - E ($\circ$).

1mm 幅 REBCO 線材の面内臨界電流密度分布と磁場中臨界電流特性 J_c distribution and in-field J_c of 1mm wide REBCO coated conductor

酒井 秀哉, 中本 隼太郎, 平原 永将 (福岡工大); 山田 穰 (中部大); Yue Zhao, Jiamin Zhu (上海超電導); 井上 昌睦 (福岡工大)

SAKAI Shuya, NAKAMOTO Shuntaro, HIRAHARA Eisuke (Fukuoka Inst. Tech.); YAMADA Yukata (Chubu Univ.); Yue Zhao, Jiamin Zhu (Shanghai Superconductor Technology); INOUE Masayoshi (Fukuoka Inst. Tech.)
 E-mail: mem21108@bene.fit.ac.jp

1. はじめに

近年, 交流損失の低減や導体の可とう性確保を目的とした REBCO 線材の細線化が進められている。細線化した線材では局所的な欠陥の影響が相対的に高くなることからその臨界電流密度 (J_c) 分布を調べるのが重要である。

本研究では, 長尺 1mm 幅線材の一部を切り出し, 面内 J_c 分布を走査型ホール素子磁気顕微鏡 (SHPM) で, 磁場中 J_c 特性を物理特性測定システム (PPMS) による直流磁化法で評価するとともに, 4mm 幅線材との J_c 特性の違いについても調べた。

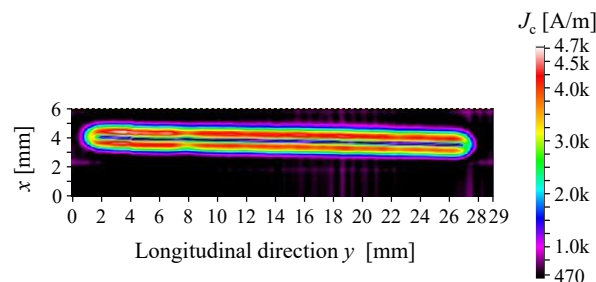


Fig. 1 J_c distribution of 1mm wide REBCO coated conductor.

2. 実験方法

パルスレーザー蒸着法で作製された 1mm 幅線材を長さ 25mm 程度に切り出し, SHPM を用いて面内 J_c 分布を測定し線材加工時の劣化について検証を行った。次に, PPMS による磁化曲線 (M - H) 測定と磁化緩和測定を行った。温度範囲は 60K~80K, 磁場範囲は ± 3 T とした。得られた結果から J_c の磁場依存 (J_c - B) 特性と電界-電流密度 (E - J) 特性を求め, 4mm 幅線材の特性と比較した。

3. 結果と考察

SHPM による面内 J_c 分布を Fig. 1 に示す。線材長手方向の J_c 分布を見てみると, 最大 J_c 値に対して 1 割ほど J_c の低い領域が観察された。次に, 線材幅方向の J_c 分布の揺らぎを確認するために J_c 分布の半値幅の長手方向分布を求めた。その結果を Fig. 2 に示す。 J_c の長手方向分布では, 1割程度の J_c の差が観察されたが, 線材幅方向の J_c 分布の半値幅は長手方向でそれほど変化していないことが分かる。このことは J_c 低下の原因が, 細線加工時の切断面の劣化ではなく線材内部の J_c 低下によるものであることを示唆している。

PPMS による M - H 測定の結果から求めた磁場中 J_c 特性を Fig. 3 に示す。この時の電界基準は約 4×10^{-6} V/m である。 J_c 値は自己磁場, 77K 中において 2.06×10^{10} A/m² であった。この値は Fig. 3 で破線で示している 4mm 幅線材の J_c 値 1.67×10^{10} A/m² と比べると 2 割ほど高い。1mm 幅線材は 4mm 幅線材を切断したものであることから, 4mm 幅線材において J_c 分布があることが考えられる。

面内 J_c 分布と磁場中電流輸送特性の詳細については当日報告する。

謝辞

本研究の成果は, JSPS 科研費 JP18H01928, 並びに JST-ALCA の結果得られたものである。

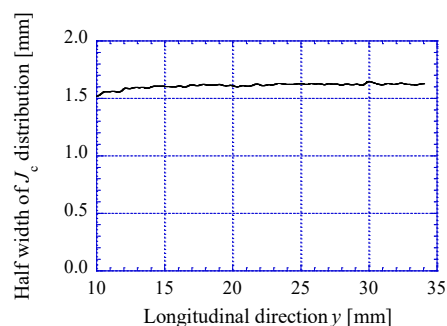


Fig. 2 Longitudinal distribution of half width of J_c distribution.

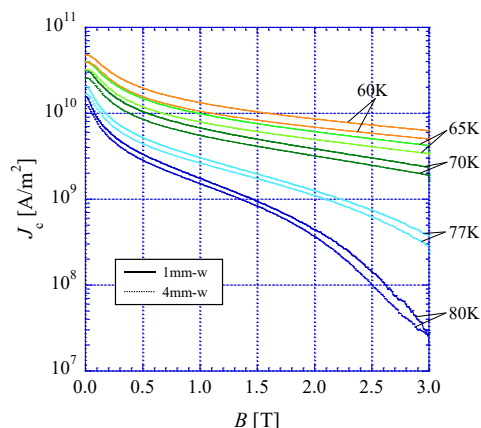


Fig. 3 J_c - B curves of 1mm and 4mm wide REBCO coated conductors.

10kA 級高温超伝導 WISE 導体の外部磁場中での通電特性について

Current-carrying characteristics of 10 kA class high-temperature superconducting WISE conductors in external magnetic field

成嶋吉朗、柳長門、宮澤順一（核融合研、総研大）

寺崎義朗、小野寺優太、平野直樹、濱口真司、力石浩孝、馬場智澄（核融合研）

NARUSHIMA Yoshiro, YANAGI Nagato, MIYAZAWA Junichi (NIFS, SOKENDAI); TERAZAKI Yoshiro, ONODERA Yuta, HIRANO Naoki, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hirotaka, BABA Tomosumi (NIFS)

E-mail: narushima.yoshiro@nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導 (HTS) 導体は、低温超伝導 (LTS) に比べて温度マージンが取れる可能性が高く、高磁場での臨界電流が大きいことから、次世代ヘリカル核融合装置のマグネットを製作する際の候補の一つとなっている。HTS-WISE (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes) 導体[1]は、積層された HTS テープ線を金属製のスパイラルチューブで束ね、巻いた後に低融点金属を含浸させた概念である。HTS テープ線材をヘリカル形状に巻き線する際、含浸前は自由に動けることからエッジひずみのない巻き線が可能である[2]。また、巻き線後に含浸させることで、従来の HTS 導体よりも柔軟にコイルを作ることができる。

2. 10kA 級 WISE 導体

図 1 に示すように、WISE-U と名付けられた U 字型の WISE 導体を製作した。WISE-U の全長は約 2m で、導体ジャケットは外径 19mm のアルミニウム製である。先端部は曲率半径 $R=35\text{mm}$ の U 字型ステンレスパイプで、超伝導導体部に常電導抵抗を含む接続構造を持たないようにしている。電流導入部は、OCF (無酸素銅) のブロックに接続されている。

3. 実験結果

臨界電流値の磁場・温度依存性を図 2 に示す。 $T=30\text{K}$ (▲) の実験データは、臨界電流ではなく、到達最大電流を示していることに注意が必要である。 $T=50\text{K}$ (■) では、 $I_c=5.4\text{ kA}$ ($B=8\text{ T}$) から $I_c=6.3\text{ kA}$ ($B=5\text{ T}$) の臨界電流が得られ、 $T=40\text{ K}$ (●) では、 $I_c=8.1\text{ kA}$ ($B=8\text{ T}$) から $I_c=10.8\text{ kA}$ ($B=5\text{ T}$) の臨界電流が得られた。 $T=30\text{ K}$ 、 $B=5\text{ T}$ では、電流リードに埋め込まれた HTS テープが焼損したが、超伝導部分のクエンチなしに最大電流 16.9 kA が得られた。この 16.9 kA は、 $j=60\text{ A/mm}^2$ の電流密度に相当する。磁場の中で大電流を流す核融合マグネットでは、EM (電磁) 力に耐えられるかどうか重要な要素の一つである。図 3 は、WISE-U が磁場の中で受ける EM 力を示したものである。最大の電磁力は、 $T=30\text{ K}$ 、 $B=8\text{ T}$ で $F=131\text{ kN/m}$ (13.4 tw/m) に達するが、WISE-U はこの電磁力に耐えることができた。

参考文献

1. 宮澤順一 他 特許第 6749541 号
2. N. Narushima, et al.: PFR, Vol. 15 (2020) 1405076

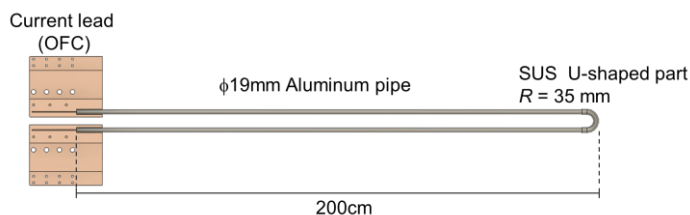


Fig.1 Overview of WISE-U conductor

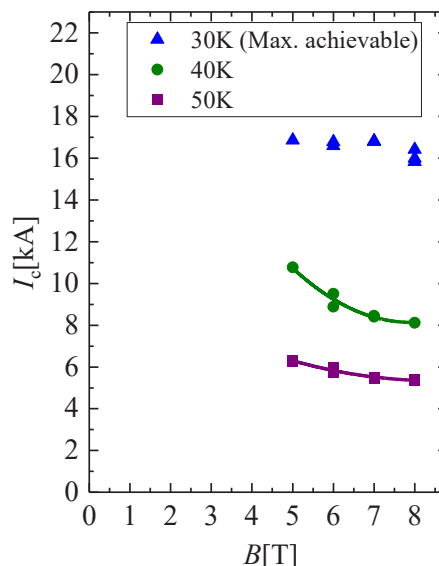


Fig.2 B and T dependence of critical current I_c (Square 50K and circles 40K) and maximum current (triangles 30K)

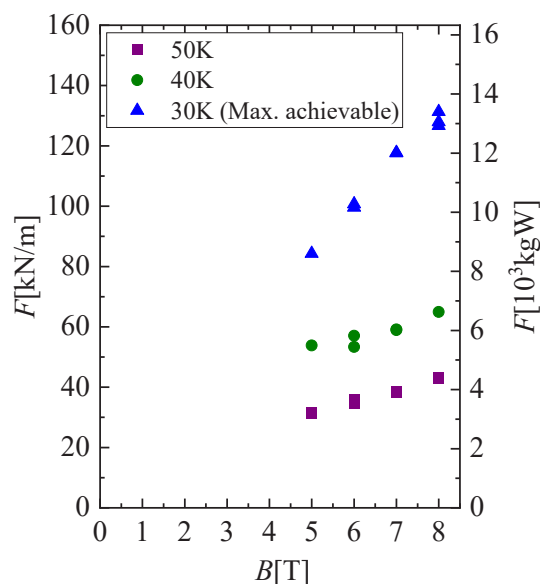


Fig.3 Electromagnetic force WISE-U experiences in magnetic field.

パルス電流による超伝導線材の臨界電流測定回路を用いた 接触抵抗による発熱の低減

Reduction of Heat Generation due to Contact Resistance Using a Critical Current Measurement by Pulsed Current Circuit

坂井 蔵、土屋 雄司(名大工)、水野 謙一郎(鈴木商館)、吉田 隆(名大工)

SAKAI Itsuki, TSUCHIYA Yuji(Nagoya University); MIZUNO Kenichiro(Suzuki Shokan); YOSHIDA Yutaka(Nagoya University)

E-mail: sakai.itsuki@k.mbox.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

近年、MRI、送電ケーブル、核融合炉など、様々な超伝導機器への超伝導線材の利用が期待されている[1]。超伝導線材の臨界電流の測定における問題の一つとして、接触抵抗による通電時の発熱が挙げられる[2]。直流で大電流を通電すると、接触抵抗による発熱の影響で臨界電流の低下、線材の焼損などが発生する。それに対しパルス電流を用いることで、接触抵抗による発熱を低減し、臨界電流測定への影響の抑制が可能である[3]。

本研究では、パルス電流を用いた超伝導線材の臨界電流測定を目的として、直流電流及びパルス電流を用いて高温超伝導 REBCO 線材の臨界電流を測定し、接触抵抗と焼損電流の関係を調べた。

2. 実験方法

直流電流及びパルス電流を用いた 4 端子法により、市販 REBCO 線材の 77 K における電流電圧特性を測定した。それと同時に、プローブの電流端子と市販 REBCO 線材の間の接触抵抗を測定した。パルス電流のパルス幅を 420 μ s、電流掃引速度を 5 A/ μ s とした。市販 REBCO 線材は、SuperPower 社製線材(SF4050-AP, 4 mm 幅、Ag 保護層、臨界電流 119 A)を用いた。接触抵抗を低減するため、電流端子と線材の間にインジウム箔を挟み、電流端子が REBCO 線材を押さえつける圧力を一定にして、電流端子と線材の接触面積を変化させることで接触抵抗を変化させた。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1(a)に、パルス電流を用いた、市販 REBCO 線材の電流電圧特性測定結果を示す。また、プローブの電流端子と市販 REBCO 線材間の電流電圧特性測定結果を示す。Fig. 1(a)の内挿図に 160 A 通電時の電流波形を示す。 $I = 0-100$ A における、プローブの電流端子と市販 REBCO 線材の間の電流電圧特性の傾きから接触抵抗を計算した。+側電流端子と REBCO 線材の間の接触抵抗が 8 $\mu\Omega$ 、-側電流端子と REBCO 線材の間の接触抵抗が 16 $\mu\Omega$ であった。市販 REBCO 線材の電流電圧特性は、 $I = 140-170$ A では、 V は I^{20} に比例した。174 A 通電時に+側電流端子近くで REBCO 線材が焼損した。

Fig. 1(b)に、直流電流及びパルス電流を用いた市販 REBCO 線材の 77 K における通電時の焼損電流と接触抵抗の大きさの関係を示す。接触抵抗が 10 $\mu\Omega$ 程度の時、直流電流通電時は焼損電流は臨界電流より 18 %大きい値であった。パルス電流通電時は焼損電流は臨界電流より 46 %大きい値であった。パルス電流の方が、直流電流と比べて焼損電流が大きくなるが示された。また、接触抵抗が大きくなるにつれて、焼損電流が小さくなる傾向が得られた。接触抵抗による通電時の発熱量が大きくなり、線材の温度上昇が早まったためと考えられる。

当日は、パルス電源の作製方法や、そのパルス電源を用いて市販 REBCO 線材の電流電圧特性を測定した結果について報告する予定である。

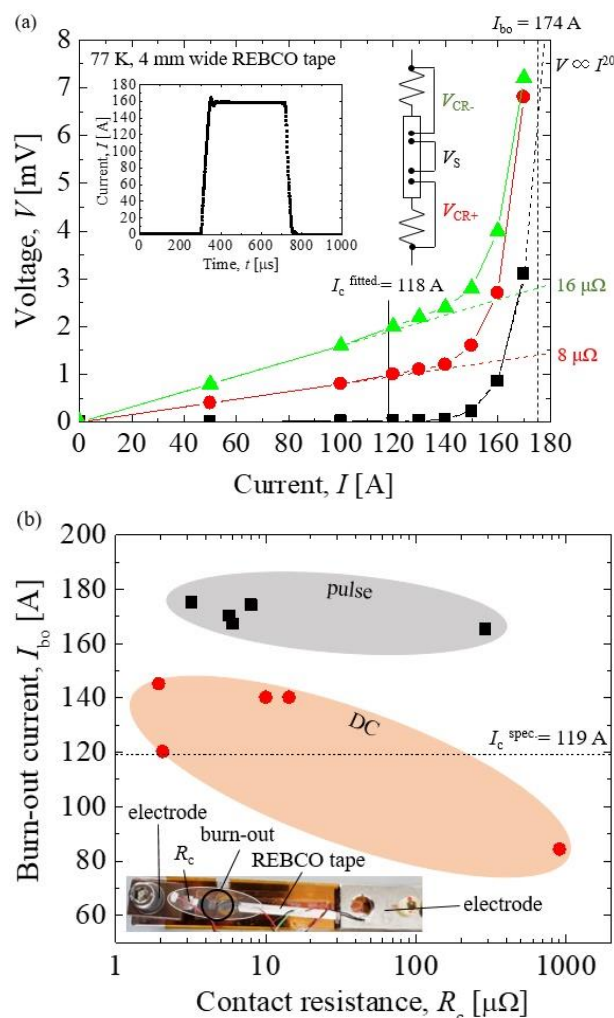


Fig. 1 (a) Current-voltage characteristic of a REBCO tape and contact resistance between a terminal and a tape at 77 K. Inset shows pulse current waveforms with a current of 160 A. (b) Contact resistance dependence of burnout current. Inset shows photographs of the burnt REBCO tape.

4. 謝辞

本研究の一部は、名大-鈴木商館の共同研究、科学研究費補助金(20K15217)、JST-A-STEP、NEDO からの助成を受けて実施しました。

参考文献

- [1] W. H. Fietz *et al.*: Fusion Eng. Des. **88** (2013) 440-445.
- [2] W. Luan *et al.*: Physica C **386** (2003) 179-181.
- [3] M. Ciszczak and S. Trojanowski: Rev. Sci. Instrum. **82** (2011) 114701.

<110> および<100> 配向 REBCO テープの微細構造と臨界電流の歪依存性 Microstructure and strain dependence of the critical current in practical <110> and <100> oriented REBCO tapes

長村光造(応用科研); 町屋修太郎(大同大); Damian P. Hampshire (Univ. Durham)
OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); HAMPSHIRE P. Damian (Univ. Durham)
E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

テープ長手方向に<100>および<110>に配向した 2 系統の REBCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$, RE = Y and Gd) テープが市販されている。これらの双晶の配向性について中性子回折法により解析を行うとともに、配向性の臨界電流への影響を調査した。<100> に配向したテープでは上に凸のはっきりした一軸歪依存性が観測された。一方<110>配向したテープでは一軸歪依存性はほぼ認められなかった。このような一軸歪依存性について A, B ドメインの存在の割合に関連することを明らかにした。

2. 実験方法

本実験では表 1 に示すように [110] 配向を示すテープと、[100] 配向を示す 3 種類のテープを用いた。REBCO 超電導層の配向性と配向割合については Spring8 での回折実験のデータを定量的に解析して知見を得た。インストロン型引張試験機により Hampshire の提唱した治具を用いて臨界電流の一軸圧縮及び引張歪依存性を 77K で調べた。

Table 1 REBCO tapes investigated in the present study

Symbol	Manufacturer	Crystal axis parallel to the tape axis
A	Fujikura	[110]
B	Superpower	[100]+[010]
C	SuNAM	[100]+[010]
D	AMSC	[100]+[010]

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に規格化した臨界電流の一軸歪依存性の測定結果を示す。まずテープ A の臨界電流は歪依存性が小さく、

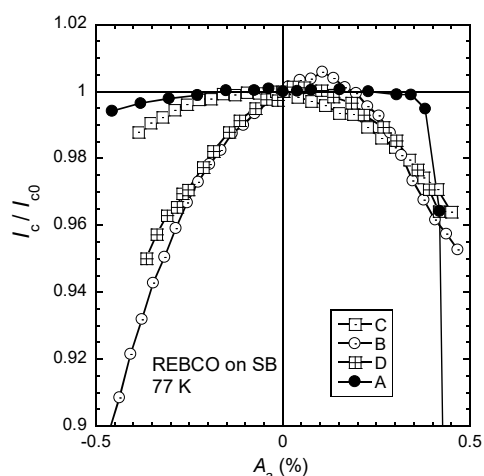


Fig. 1 Normalized critical current as a function of uniaxial strain for four kinds of REBCO tapes

引張歪が約0.4%を越えると超電導層の破断により急激に低下する。一方3種類の[100]配向のテープでは臨界電流の一軸

歪依存性は顕著であり、放物線的な歪依存性を示す。しかし最大臨界電流を示す歪の値は、試料により異なっている。テープ C では圧縮歪側に極大が現れる。テープ B, D では引張歪側に位置する。このような相違について以下考察した。

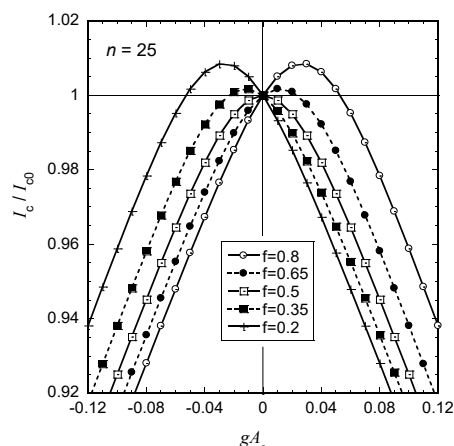


Fig. 2 Calculated critical current for the [100] oriented tapes with different population of A- and B-domains.

まず[100]配向テープの場合には電流方向に[100] (A) 配向ドメイン、[010] (B) 配向ドメインが交互に配向する双晶の状態にある(1)。この時 A配向のvolume fractionを f とする。Fig. 2に臨界電流の歪依存性の計算結果を示す。このように放物線状の歪依存性を示すのは歪に対して正の依存性を示すAドメインと負の依存性を示すBドメインが入り混じるからと示すことができた。これらよりFig. 1の歪依存性の極大の変化を説明することができる(2)。一方[110]配向の場合には局所電流の一軸歪依存性については計算上も顕著な変化は見られなくなる(3)。しかし高次の歪項に対してどうなるかは今後の検討が必要である。

さて次にこのような臨界電流の歪依存性に放物線状の極大が観察される系として Nb_3Sn 等のA15型超電導体が知られている。この場合には超電導相に負荷される局所歪がゼロに対応することが実験的に確かめられている(4)。この内部歪の問題はREBCOテープの場合にも相当するものがある。Cuをラミネートの有無によりREBCO超電導層の歪の状態が変化し、それを反映して臨界電流が最大となる一軸歪が変わることが示されている(3)。

以上の諸点について発表で議論を進めたい。

参考文献

- [1] K. Osamura, et al: IEEE Trans. Applied Supercond., 22(2012)8400809
- [2] K. Osamura, et al: SUST, 29 (2016) 065019
- [3] K. Osamura, et al: AIP Advances, 9 (2019) 075216
- [4] K. Osamura, et al: SUST, 28 (2015) 045016

データを用いた超伝導線材の開発-データ収集方法の検討-

Development of superconducting wires using data -Examination of data collection method-

松本 明善、松波 成行、伴野 信哉(NIMS)

MATSUMOTO Akiyoshi, MATSUNAMI Shigeyuki, BANNO Nobuya (NIMS)

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

1. はじめに

我々は物質・材料研究機構 (NIMS) に蓄積された超伝導材料線材におけるデータおよび関連する論文からのデータを集約することによって、プロセスインフォマティクス (PI) を利用した超伝導線材の開発を目指している。超伝導線材においては、新超伝導物質発見から材料化・応用化へのスピードが遅れていることが大きな課題の一つである。機器が要求するスペックは異なる。材料の出口としての応用機器からバックキャストした線材開発のためには、それぞれの機器に応じた特性が必要である。一方で、材料特性はプロセスに大きく依存するためプロセス最適化が必要になる。そこで、過去の NIMS で蓄積され、培われた様々なプロセスデータの再整理および実験データ構造化によって、制御因子と超伝導特性について、PI の手法を取り入れた研究開発を行うことが重要である。これらの PI を行うためにもデータの収集が最も重要な肝となる。今回は種々の方法及び線材で取得した電流-電圧カーブのデータ収集方法について検討を行ったので報告する。

2. 課題

多角的なデータを収集するに当たり超伝導線材において最も重要なデータが臨界電流である。臨界電流は、線材に電流を通電して微小電圧を測定した電流-電圧 (I - V) カーブから臨界電流値を決定し、線材の特性を知る。この I - V カーブは線材の微細組織に大きく依存し、組織を制御し最適化すると臨界電流が数桁オーダー向上することもある。これら微細組織は線材作製プロセスに大きく依存するが、このプロセスは出発材料の純度や粒度といった特性に始まり、伸線加工、種々の熱処理における各種条件、後処理(機械加工や焼鈍等)等、多くの条件から成り、多岐にわたる。真の組織最適化制御のためにはこれらの条件を全て最適化することが理想であるが、条件が増加すると人の手では追いつかなくなることがある。

実際に実験データを取得する方法としては物質・材料研究機構においても図 1 に示したように研究者によって種々の方法をとっているのが現状である。例えば、ペンレコーダーで取得する場合、直感的にわかるのと多数の試料を扱うときは圧倒的に早く取得が可能である。一方で、デジタルデータとして保存することが困難である場合が多く、解析が困難になる場合もある。また、デジタルデータだけで読み込んだ場合は測定後に別のグラフソフト等を利用して一つ一つ解析する必要がある手間がかかることが多い。

3. アプローチ

物質・材料研究機構ではデータ収集基盤の整備を行っており、ユーザーに提供されているサービスが始まっている。本研究ではそのサービスを利用することによって I - V データ収集基盤を構築し、ユーザーの測定の手助けとなるシステム構築を行う。下記にその 5 つのステップを示す。

①通信セキュリティを施したデバイス (IoT セキュリティデバイス) をそれまで非ネットワーク環境にあった計測装置などの制御 PC に装着することによって、その制御 PC からのデータはセキュアに転送させる。

②データは python 等の汎用スクリプト言語でコーディングされたデータ処理フローを通り、データ変換やデー

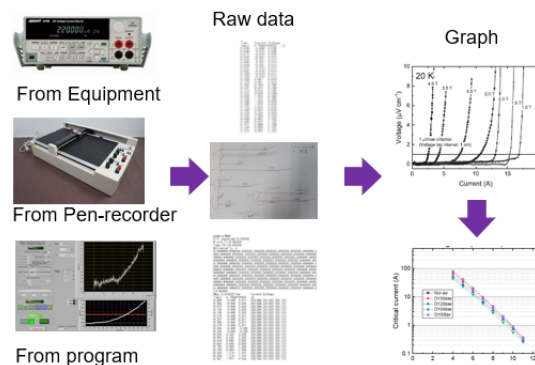


Fig.1 I - V curves obtained by various methods

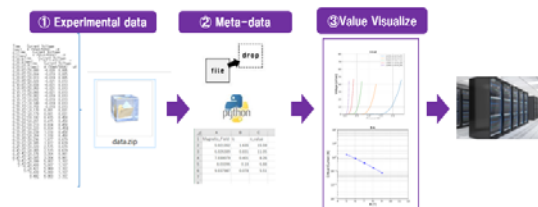


Fig.2 Overview of newly constructed data collection system

タ成形などの前処理を経てデータ構造化および可視化を行う。

③データに記載された計測条件などのメタデータも事前に定めたスキーマに基づいたパーサーによって抽出し、データと紐づけを行う。

④データ構造化されたファイル群は抽出されたメタデータとともに、特定の開発テーマや意味付けをもたせた「データセット」としてデータベースへ自動的に蓄積を行う。

⑤データセットはシステムに登録された利用者情報(認可情報)をもとにダウンロードが可能となる。

4. 結果

Fig.2 にデータ収集から一連のデータを収集する概念図を示す。実験で得られたデータは基本的には試料情報および I データおよび V データである。通常実験ではこれらの 1 つ 1 つのデータを種々の温度や磁場、磁場印可角度等を振りながらデータを集める。そのデータ群を 1 つの圧縮ファイルとして Python で組んだデータ処理フローを通過させる。実際はこの圧縮ファイルをネット上のサーバーに送るだけである。約 10 秒後にはそれらの解析結果を見ることが可能となる。そのときのデータは可視化され、かつ I_c や n 値が自動的に計算され、Fig.2 に示したように I_c - B カーブ等が作成できる。

5. 結言

超伝導材料線材におけるデータおよび関連する論文からのデータを集約することによって、プロセスインフォマティクス (PI) を利用した超伝導線材の開発を目指してデータ収集方法の検討を行い、実際にデータ収集を簡便に行うシステムを作成することが出来た。

BaHfO₃ 添加量及び成膜速度を変化させることによる REBa₂Cu₃O_y 線材の巨視的ピンニング力の変化

Macroscopic pinning force of REBa₂Cu₃O_y Coated conductors with varying the amount of BaHfO₃ and deposition rate

山本 拓実(名大工), 一野祐亮(愛工大) 土屋 雄司, 吉田 隆(名大工)
Takumi YAMAMOTO (NAGOYA UNIVERSITY), Yusuke ICHINO (AIT), Yuji TSUCHIYA,
Yutaka YOSHIDA (NAGOYA UNIVERSITY)
E-mail: yamamoto.takumi@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

1.はじめに

高温超伝導 REBa₂Cu₃O_y(REBCO)線材は、65 K 以上の液体窒素作動超伝導機器への応用を目指して磁場中の臨界電流密度 J_c の向上が検討されている。特に人工ピンニングセンター(Artificial Pinning Center : APC)として BaMO₃(BMO : M = Metal)ナノロッドを超伝導体内に導入する方法は、REBCO 線材の 77 K における磁場中 J_c を向上させる手段として多くの研究グループで報告されている[1]。Horide らの報告によると Pulsed Laser Deposition (PLD) 法を用いた 4.7vol.% BaHfO₃(BHO)添加 SrTiO₃(STO)基板上 YBa₂Cu₃O_y(YBCO)薄膜において、65 K, 5 T における巨視的ピンニング力 F_p が 50 GN/m³ 以上と報告している[3]。さらに Selvamanickam らの報告では、Metal Organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD)法を用いた 5%Hf 添加 (Gd, Y)BCO 線材において 65 K, 4 T 程度で F_p がおよそ 80 GN/m³ であったと報告している[4]。

本研究では、これまでの 77 K における磁場中 J_c の知見を踏まえ、基板温度や BMO 添加量の違いによるナノロッドの太さや数密度を制御し、65 K, 5 T 程度の高磁場中での特性向上を図る。特に、周波数の違いなどによる成膜速度を変化させた時のナノロッド成長機構の解明及び低温・高磁場領域における F_p 向上を目的とした。

2.実験方法

BHO 添加 YBCO 線材は、長さ 3 cm の IBAD-MgO 金属基板上に PLD 法を用いて作製した。BHO 添加量は 3, 5 及び 7 vol.% と変化させ、基板温度 $T_s = 850-900^\circ\text{C}$ 、酸素分圧 $P_{O_2} = 53\text{ Pa}$ 、エネルギー密度 $E = 2.6\text{ J/cm}^2$ 、レーザー繰返し周波数 $f_L = 20\text{ Hz}$ および 100 Hz とした。その際に膜厚を約 500 nm になるように成膜時間を 75-375 s と変化した。作製した線材の超伝導特性はカンタムデザイン社製の物理特性測定システムを用いて直流四端子法により温度 65 K-77 K 及び印加磁場 0-9 T の範囲で測定した。また膜厚測定には誘導結合プラズマ発光分光分析装置を用いた。

3.実験結果及び考察

Fig.1 に 3-7 vol.% の BHO 添加した YBCO 線材の 77 K 及び 65 K における磁場変化における J_c の変化を示す。また内挿図で 65 K, 5 T における J_c の角度依存性を示す。ここでは $f_L = 20\text{ Hz}$, $T_s = 880^\circ\text{C}$ とした。内挿図から $B//c$ 方向における J_c のピークが観察された。77 K における自己磁場下 J_c は 3-7 vol.% で約 1.0 MA/cm^2 であったが、5 及び 7 vol.% の試料では 3 vol.% 試料と比較して高磁場領域における J_c が向上した。

Fig.2 に BHO 添加量を 3-7 vol.% と変化した時の 65 K, 5 T における F_p の変化を示す。 $f_L = 100\text{ Hz}$ で作製した試料では BHO 添加量増加に伴い F_p が減少している。一方、 $f_L = 20\text{ Hz}$ で作製した試料は BHO 添加量増加に伴い F_p が向上し、周波数の違いによる最適 BHO 添加量に違いがあることが確認された。また同様の結果が 77 K, 1 T の F_p 変化でも確認された。シミュレーションなどの結果[4]から、 f_L

= 20 Hz で作製した試料はナノロッドとナノパーティクルが混在した組織であることが推察され、添加量増大に伴いナノロッド化したため F_p が向上したと考えられる。一方、 $f_L = 100\text{ Hz}$ で作製した試料は、ナノパーティクル形状の組織であり、添加量増大により界面のひずみが特性低下に影響したと推察される。

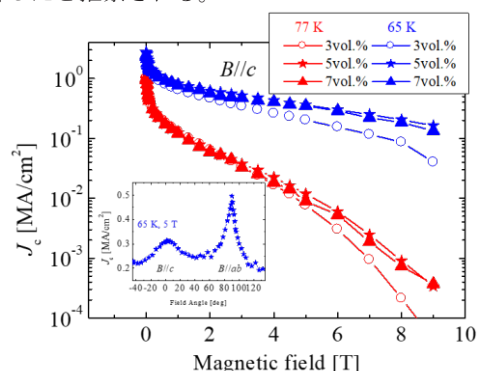


Fig.1. Magnetic field dependence of the J_c at 77 K or 65 K for 3-7 vol.% BHO-doped YBCO Coated conductors fabricated at 20 Hz and 880 °C. The inset shows the angle of dependence of J_c of 5 vol.% BHO-doped YBCO Coated conductors fabricated at 20 Hz and 880 °C

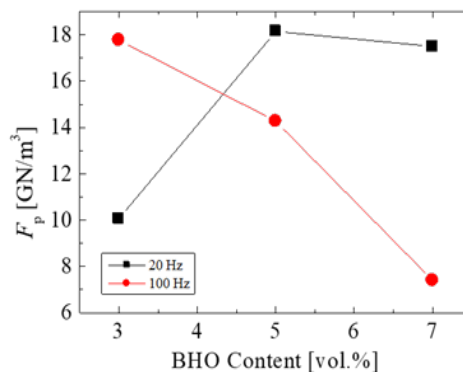


Fig.2 Variation of F_p at 65 K and 5 T with the amount of BHO added by changing the deposition rate at 880 °C.

4.謝辞

本研究の一部は、JST-A-STEP、科学研究費補助金(19K22154、20H02682、20K15217)、NEDO からの助成を受けて実施したものである。本研究で使用した IBAD-MgO テープは(株)フジクラ飯島康裕様より提供して頂いた。

参考文献

- [1] A. Tsuruta, *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., **53** (2014) 090304-1 - 090304-4.
- [2] T. Horide, *et al*, Supercond. Sci. Technol., **30** (2017) 074009.
- [3] V. Selvamanickam, *et al*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **31**, 5 (2021) 6600405.
- [4] Y. Ichino, *et al*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **27**, 4 (2017) 7500304.

フッ素フリーMOD 法 Y123 薄膜への不純物添加による高 J_c 化 Enhancement of J_c for fluorine-free MOD processed Y123 thin films by addition of impurities

小澤 美弥子, 元木 貴則, 金泉 莉大, 瀬川 雄大, 下山 淳一(青学大)

KOZAWA Miyako, MOTOKI Takanori, KANAIZUMI Rio, SEGAWA Yuta, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
E-mail: c5621052@aoyama.jp

1. はじめに

RE123 薄膜の作製方法の中でもフッ素フリー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、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[1]、工業化に有望な手法である。原料溶液に Cl を添加すると RE123 と高い格子整合性を有する $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$ ($\text{Ba}2342$) が膜中に生成し、RE123 の 2 軸配向を促進させるため、結晶性の高い 2 軸配向薄膜が成長する条件が拡大し、低磁場・高磁場下ともに臨界電流密度(J_c)が大きく向上する[2]。FF-MOD 法で作製する試料は高い結晶性を有するため、ピンニングセンターが少なく、他の手法に比べて磁場中 J_c が低いという課題がある。近年の研究では、Y123 薄膜に対して Cl と不純物金属($M = \text{Zr}, \text{Sn}, \text{Hf}$) を共添加することにより、膜中に微細な BaMO_3 (BMO) 析出物が生成し磁場中の J_c が向上することがわかっている[3]が、他の方法で作製された RE123 薄膜と比べて依然として J_c が低く改善の余地が大きい。以上の背景のもと、本研究は FF-MOD 法による Y123 薄膜の作製において金属組成を精密に調整した自作溶液を用い、Cl と不純物金属共添加によるさらなる臨界電流特性の改善を目的とし不純物金属添加量の最適化を試みた。

2. 実験方法

仕込組成比 $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} : \text{Cl} = 0.9 : 2 : 3 : 0.2$ 、不純物金属 M を Y に対して 0, 1, 3, 5, 8 mol% で混合した溶液を(Cl, M)共添加 Y123 原料とし、これを $\text{SrTiO}_3(100)$ 単結晶基板上にスピンコート法により塗布した後、有機物を分解するために仮焼を行った。この塗布と仮焼を 3 回繰り返し、設計膜厚が約 300 nm になるように制御した後、様々な焼成温度において本焼成を行い、酸素アニールにより酸素量を制御することで、(Cl, M)共添加 Y123 薄膜を作製した。得られた試料について、XRD による相同定、SEM による微細組織観察を行い、磁化特性は SQUID 磁束計により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した (Cl, Sn) 共添加試料の表面 2 次電子像を示す。異なる不純物金属添加量の (Cl, Sn) 共添加 Y123 薄膜を作製し微細組織観察を行ったところ、不純物金属添加量の増加に伴い表面が粗くなる傾向が見られた。Fig. 2 に作製した試料の Sn 添加量と $J_c(40 \text{ K}, \sim 4 \text{ T})$ の関係を示す。いずれの焼成条件においても Sn 添加試料は無添加試料と比べて磁場中で J_c が向上し、特に Sn 3 mol% 添加試料で最も高い J_c を示した。また、Fig. 3 に酸素アニール条件の異なる試料の M 添加量と $J_c(40 \text{ K}, \sim 4 \text{ T})$ の関係を示す。不純物金属の種類によって最適ドーピング量や J_c 改善効果に差が見られるものの、いずれも長時間かつ低温までの酸素アニールによってより J_c が上昇することがわかった。これは酸素量が増し、異方性が低下したことによると考えている。講演では、Tb や Pr など他の不純物金属を添加した Y123 薄膜の臨界電流特性についても報告する。

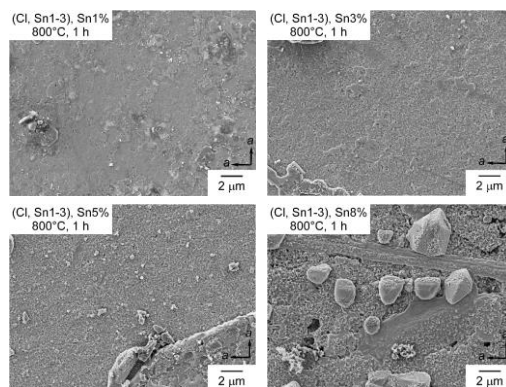


Fig. 1. SEM images of 1–8 mol% Sn-doped Y123 films.

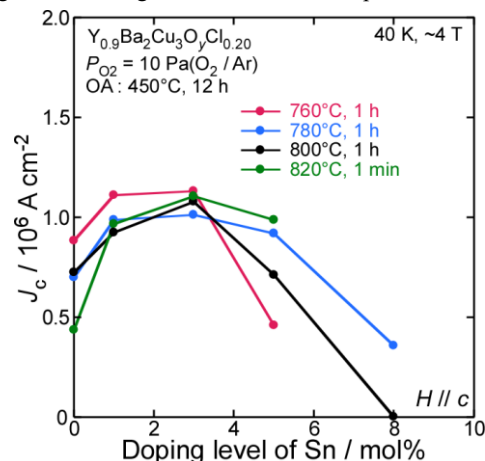


Fig. 2. Relationship between J_c (40 K, ~ 4 T) and doping levels of Sn for Y123 films sintered at various temperatures.

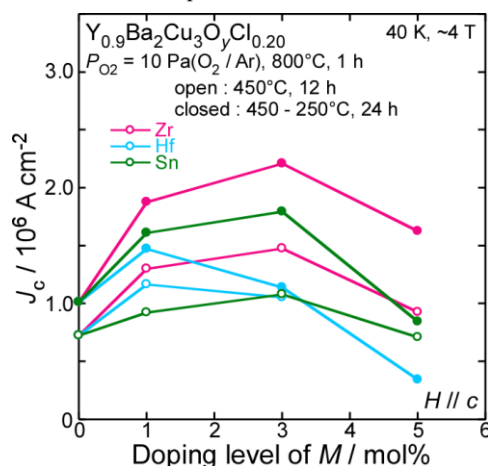


Fig. 3. Relationship between J_c (40 K, ~ 4 T) and doping levels of Zr, Sn and Hf for Y123 films annealed in flowing oxygen under different conditions.

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] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 015006.

H - ϕ 法と A - V 法を組み合わせた有限要素法解析による 超電導磁気軸受の回転損失についての検討

Study of rotational loss characteristics of superconducting magnetic bearings by FEM analysis using combined H - ϕ and A - V formulations

尾上 雄海, 奥村 卓月, 寺尾 悠, 大崎 博之, 桜井 雄基, 松村 知岳, 片山 伸彦 (東京大学)

Takemi Onoue, Satsuki Okumura, Yutaka Terao, Hiroyuki Ohsaki,

Yuki Sakurai, Tomotake Matsumura, Nobuhiko Katayama (The University of Tokyo)

E-mail: onoue-takemi231@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

超電導磁気軸受は非接触支持機構であることから低損失、長寿命、省メンテナンスといった特長をもつ。その応用先のひとつである、宇宙波背景放射の偏光変調器のための軸受では、4 mW という極低損失が要求され、最適設計に向けた研究が進められている [1]。

本研究では、超電導磁気軸受として、リング状に YBCO バルク超電導体を配列した固定子と、リング状永久磁石と鉄磁気回路から構成される回転子の構造について検討して、その損失特性の数値解析を進めている。

2. 解析手法

超電導磁気軸受の回転損失特性の有限要素解析では、 H - ϕ 法により永久磁石が発生する磁界および超電導体の電磁界解析を、 A - V 法により超電導電流が発生する磁界によって誘導される回転子中の渦電流の解析を行った。

有限要素法ベースの汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics [2] を用い、超電導体の E - J 特性として n 値モデルを用いている。損失解析では、3 段階に分けることで解析負荷の低減を図っている。ステップ 1 では ϕ 法 (ϕ : 磁気スカラーポテンシャル) を用いて永久磁石、鉄ヨークが作る静磁界の解析を行い、ステップ 2 で H - ϕ 法を用いての超電導電磁界解析を行った [3]。 H - ϕ 法においては Fig. 1 に示すように超電導体内の電磁界解析を H 法により、その周囲の領域の磁界解析を ϕ 法にて行った。ステップ 3 では A - V 法を用いて回転子における渦電流損失解析を行った。解析における基本パラメータを Table 1 に示す。また、解析モデルの構造を Fig. 2 に示す。重力等の影響によって回転子が沈み込み、その後回転するときの損失を解析した。

Table 1 Basic parameters for analysis

Critical current density J_c	1.6×10^8 [A/m ²]
Reference electric field E_c	1×10^4 [V/m]
n value	21
PM residual flux density	1.2 [T]
Relative magnetic permeability of steel yoke	100

3. 解析結果

超電導磁気軸受における損失として、回転体が沈み込んだ時の超電導体のヒステリシス損の解析結果を Fig. 3 に示す。ギャップが小さくなると超電導体内に電流が誘導され、最大 19.8 mW のヒステリシス損が生じるが、接近が済むと次第に小さくなっていく様子が確認できる。また、回転時には mW オーダーのヒステリシス損の発生を確認した。

4. まとめと今後の課題

超電導磁気軸受の損失解析を行った。今後、回転時の損失特性を解析すると共に、実験との比較により解析手法の評価を行う予定である。さらに、損失低減につながる最適な超電導磁気軸受構造の設計のための解析を進めていきたい。

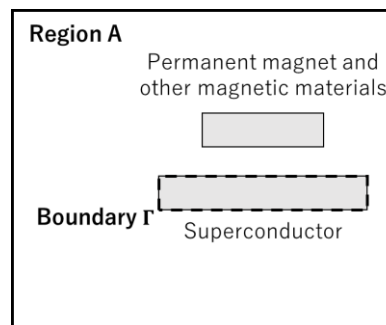


Fig. 1 Schematics of the analysis configuration

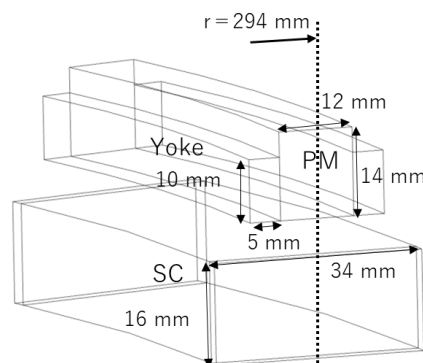


Fig. 2 Analysis model of SMB

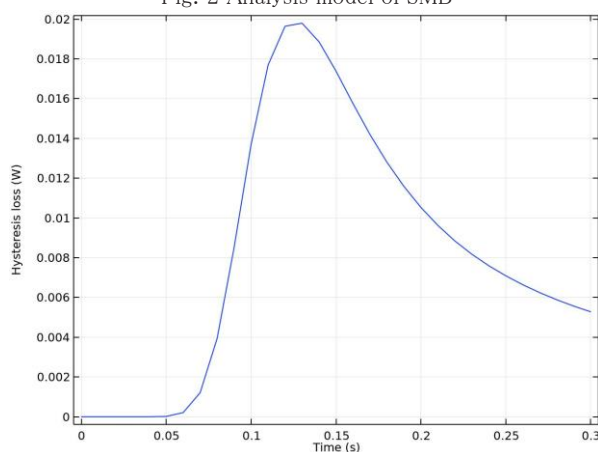


Fig. 3 Hysteresis loss in the process of decreasing the gap

参考文献

- Y. Sakurai et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28, No. 4, 2018, 3601404.
- COMSOL Multiphysics® Version 5.6, www.comsol.com
- A. Arsenault et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 31, No. 4, 2021, 6800609.

宇宙利用超電導磁気軸受の浮上ギャップ変動が回転損失に与える影響の測定

Measurement of the effect of levitation gap fluctuations of space-based superconducting magnetic bearings on rotational loss

奥村 皐月, 尾上 雄海, 寺尾 悠, 大崎 博之, 桜井 雄基, 松村 知岳, 片山 伸彦(東大)

Satsuki Okumura, Takemi Onoue, Yutaka Terao, Hiroyuki Ohsaki,

Yuki Sakurai, Tomotake Matsumura, Nobuhiko Katayama (Univ. of Tokyo)

E-mail: 8590180546@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

宇宙マイクロ波背景放射[1]の観測等において用いる超電導磁気軸受は回転側の永久磁石と固定側のバルク超電導体で構成されている。地上で超電導磁気軸受(以下, SMB)[2]の動作実験を行う際、重力によって永久磁石の位置が磁界中冷却の位置から変動するが、宇宙空間で運用する際、永久磁石の位置変動は起こらないと予想される。

本発表では重力によって永久磁石の位置が変化しない構造を付け加えた軸型 SMB のプロトタイプ小型実験装置を用いて浮上力と回転損失の測定を行い、考察した結果を報告する。

2. 実験装置

Fig. 1 に今回作製した実験装置を示す。本実験で用いたバルク超電導体は外径 95 mm, 内径 55 mm, 高さ 20 mm であり、永久磁石は外径 85 mm, 内径 75 mm, 高さ 10 mm である。Fig. 1 中の stage01 からシャフトで永久磁石を吊り下げることにより、上下方向の永久磁石の位置を固定する。また、stage01 とシャフトの連結部はスラストベアリングを用いており、stage02 の下の z 軸ステージによって永久磁石の位置を上下方向に変化させることが出来る。

本実験で用いる SMB の特性を調べるため、永久磁石とバルク超電導体のギャップを 0.1 mm ずつ z 軸ステージを用いて変化させた際に永久磁石に働く力をロードセルで測定した。本実験では各点において定常状態に落ち着かせるために十分な時間を置いてから測定を行った。測定結果を Fig. 2 に示す。横軸にギャップ[mm], 縦軸に浮上力[N]を表している。グラフは一往復を示しており、浮上力はヒステリシス特性を示した。これにより、重力による永久磁石の位置変動は約 0.5 mm であり、最大浮上力は約 5.5 N であることが分かる。

3. 回転損失測定

回転損失の比較を行うため、永久磁石とバルク超電導体のギャップを z 軸ステージで 0.1 mm ずつ変化させて spin down test[3]を行った。本実験では再現性を確認するために各距離において 3 回 spin down test を行った。

測定結果を Fig. 3 に示す。横軸に時間[sec], 縦軸に回転周波数[Hz]を示している。グラフは 1 回目の結果のみ示しているが、2 回目、3 回目もほぼ同様の減衰を示し、ギャップが小さくなるほど減衰曲線が緩やかになった。これはギャップが小さくなるほど浮上力の影響が大きくなるため、スラストベアリングにかかる荷重が小さくなるのが主な原因だと考えられる。スラストベアリングにかかる荷重-損失特性を測定することによって SMB の回転損失特性を評価する。また、回転周波数が 0.0 Hz 付近では回転方向が正方向と負方向を交互に繰り返す現象が見られた。これはバルク超電導体の特性が均一でないことが原因だと考えられる。

4. まとめと今後の課題

軸型 SMB のプロトタイプ小型実験装置を用いて浮上ギャップを変動させて、浮上力と回転損失を測定した。その結果、最大ギャップ変動は約 0.5 mm, 最大浮上力は約 5.5 N となり、浮上ギャップが小さくなるほど減衰曲線が緩やかになった。

今後は回転側の重さを変化させた場合の浮上力特性や回転損失特性を測定し、数値計算と比較することでさらなる考察を行っていく必要がある。

参考文献

1. Quéval L., et al., 2018, *Supercond. Sci. Technol.*, 31 084001.
2. Hull J. R., 2000, "Superconducting bearings," *Supercond. Sci. Technol.*, 13 R1.
3. Yuki S., et al., 2020, *J. Phys. Conf. Ser.*, 1590 012060

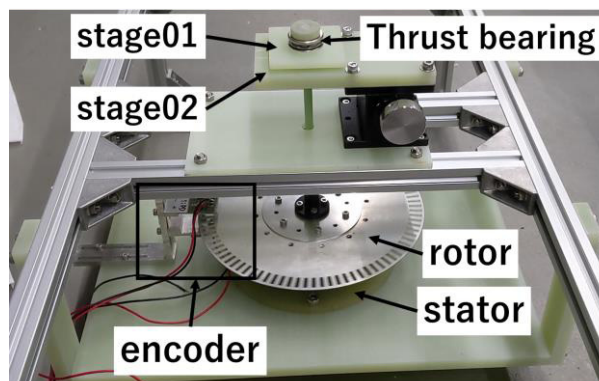


Fig. 1. Prototype small experimental setup for axial SMB

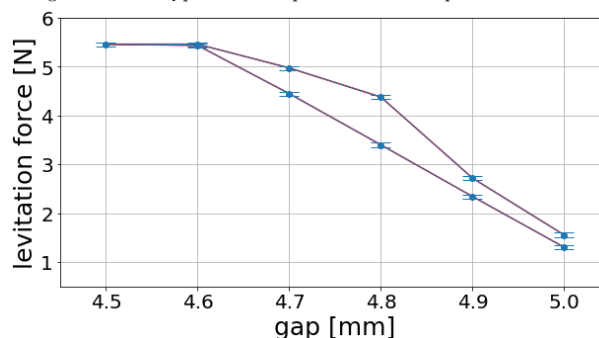


Fig. 2. Levitation force between a permanent magnet and a bulk superconductor

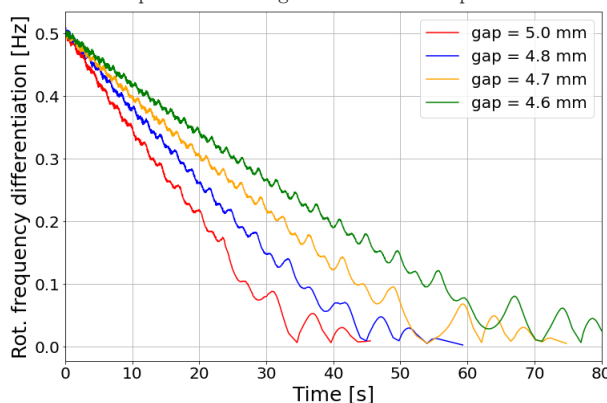


Fig. 3. the SMB spin down data

超電導永久電流による磁気吸引力を用いた吊り下げ磁気浮上の試作

Trial of suspension system using suspension force by persistent current

小森 望充, 簗田輝, 浅海賢一(九工大), 根本薫(古河)

KOMORI Komori, MINODA Akira, ASAMI Ken-ichi (Kyutech), NEMOTO Kaoru (Furukawa)

E-mail: komori_mk@yahoo.co.jp

1. はじめに

航空機などを設計する場合風洞試験を行う。Fig.1に風洞試験装置の概要を示す。モデルの支持に支柱などが用いるが、これによって気流が乱れ、正確な測定を行うことができない。そこで、電磁石に超電導コイルを用いることによって、コイルに大電流を流すことができるため大ギャップ化が見込める。

2. 実験装置

設計製作する磁力支持天秤装置の概要を Fig.1 に示す。図に示したように、液体窒素を満たした容器(Φ200mm×70mm)中に超電導コイルと銅コイルを配置している。それを、浮上体の上に設置する。上段の超電導コイルには浮上体の自重(0.7N)の吸引力を発生させるためのバイアス電流を流す。浮上体の高さに応じて、フォトセンサが受光する LED ライトからの光量に変化し、その変化量に応じた信号を PID コントローラで制御する。制御した信号はパワーアンプを介して、液体窒素中の銅コイルへ制御電流として流れる。これによって、浮上体を安定に浮上させる。超電導コイルの仕様を Table1 に示す。

3. 永久電流

永久電流 10～50A の測定結果を Fig.2 に示す。Fig.2 では永久電流値の減少はほぼ見られなかった。しかし、永久電流値を 60A より大きくすると測定開始直後の永久電流の減少が見られた。これは、超電導コイルに流れる電流が大きくなることで超電導線に加わる磁場が強くなり、電流減衰が大きくなったと考えられる。これを確かめるために超電導コイルの抵抗値の測定を行った。超電導コイルに 10～80A の電流を流し、このとき超電導コイルに印加する電圧の変化をボルトメータで測定し、超電導コイル全体の抵抗値を求めた。電流値が 60A を過ぎた辺りで抵抗値が急激に増加することが分かった。そこで、本研究では永久電流は 60A 以下で使用することにする。

浮上を行うための準備として、まず距離(ギャップ)を決める。先の実験から 60A より大きい永久電流では電流の減少があり、浮上実験には使用出来ない。そのため、永久電流が 60A 以下の浮上を試みる。釣り合いの関係からギャップ 43mm で浮上実験を行うこととした。

4. 浮上実験

超電導コイルにバイアス電流を流し、銅コイルの制御電流により浮上体の位置を制御する。超電導コイルにバイアス電流 40A を流し、ギャップ 43mm で浮上実験を行った。その結果を Fig.3 に示す。Fig.3 は浮上体の位置を測定したものである。浮上体はギャップ 43mm で安定して浮上し、制御電流は常に浮上体を持ち上げようとする方向に電流が流れていることが分かる。浮上体に浮上体軸方向からと半径方向から加振を行い、浮上体の振動を測定した。詳しくは当日発表する。

5. 結言

超電導コイルの永久電流の時間変化を調べた。その結果、超電導コイルは 60A 以下で安定な永久電流が流れることが分かった。また、バイアス電流 60A での吸引力を求め、本研究ではギャップ 43mm で浮上させることにした。実験結果から、永久電流による安定浮上が実現できることが分かった。

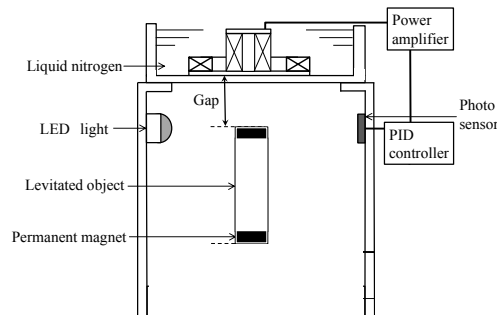


Fig.1 Experimental Setup for Levitation

Table1 Specifications

	超電導コイル	銅コイル
線材	BiSCCO	Cu
断面 [mm]	4.5×0.4	φ0.5mm
外形 [mm]	103.4	39
内径 [mm]	60	10
厚さ [mm]	10	32
巻き数 [巻き]	99.5	1000

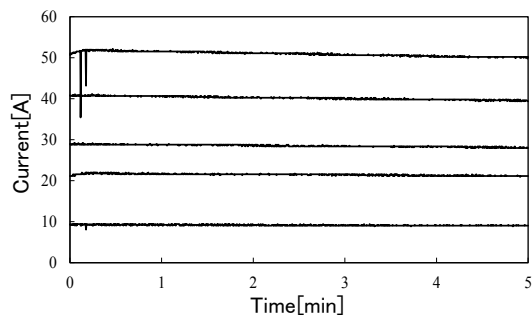


Fig.2 Persistent Current

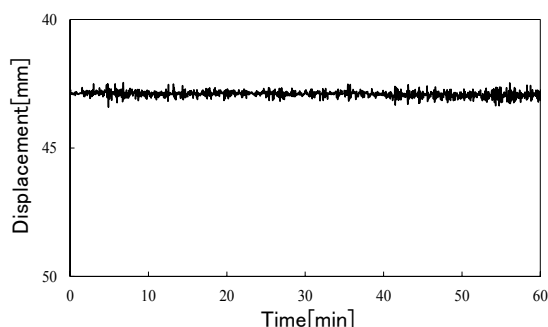


Fig.3 Persistent current

バルク超伝導体アンジュレータのための 3 次元磁場分布計測システム Three-Dimensional Magnetic Field Measurement System for Bulk HTS Undulator

紀井 俊輝 (京大)

Kii Toshiteru (Kyoto University)

E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

京都大学では次世代放射光施設で期待されている短周期で強力な周期交替磁場を生成するバルク超伝導体スタガードアレイ型アンジュレータの開発を進めている。現行試作機においては、高さ 4 mm・幅 14 mm の矩形断面を持つ狭い空間に周期交替磁場を生成可能である。この空間内における 3 次元磁場分布計測のために複数のホール素子を組み合わせた 3 次元磁場走査システムを構築し、感度校正と 3 次元磁場計測試験を実施した。

2. バルク超伝導体スタガードアレイ型アンジュレータ

放射光施設や自由電子レーザー加速器施設では、ほぼ光速にまで加速した高輝度電子ビームを周期交替磁場を発生させるアンジュレータ中を通し、さまざまな波長の光を発生させている。現在、アンジュレータはネオジム永久磁石を用いたものが主流となっているが、放射光の短波長化や輝度向上の潜在的な要求にこたえるために、周期交替磁場の短周期化・強磁場化にむけた研究が進められている。京都大学では、バルク超伝導体をソレノイドコイル中に周期的に配置して、超伝導転移後にソレノイドにより外部から磁場を変化させることでバルク超伝導体内部にループ状の誘導電流を流し、誘導電流により周期交替磁場を生成する新しいタイプのバルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータを提案し開発を行っている[1]。Fig. 1 に新型アンジュレータの構造模式図を示す。

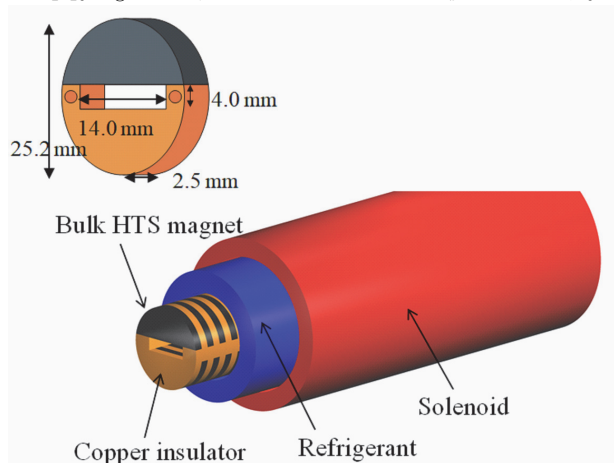


Fig. 1 Schematic drawing of Bulk HTSC SAU

これまでに、2 T ソレノイドおよび希土類銅酸化物系超伝導体を用いた試験機で、磁極間隔 4 mm、周期 10 mm の条件で 0.85 T の周期交替磁場の生成に成功している[2]。

3. ホール素子アレイ

より強力な周期交替磁場の生成を実現するために 6 T ソレノイドを新規導入したが、あわせて内部空間の 3 次元磁場分布計測用ホール素子アレイの改良を行った。高さ 4 mm の空間内で磁場分布計測を行うためには小型の素子が必要であるため、AREPOC 社の HHP-MUS 型カスタム仕様の GaAs 低温用高リニアリティホールプローブ (素子サイズ 3×4×1 mm)

3 個 および HLP-NP 型 (素子サイズ 5×7×1 mm) 1 個を用いた。Fig. 2(a), (b) にホール素子アレイの写真を示す。

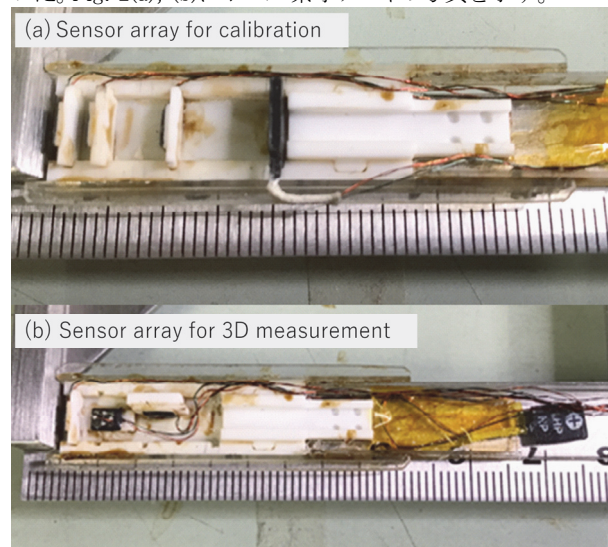


Fig. 2 (a) Hall sensor array for calibration and (b) for 3D measurement

HHP-MUS の性能保証範囲が 5 T までであったため、30 T まで保証されている LHP-NP と積層してソレノイド中央の磁場強度がほぼ均一な領域にアレイ (Fig. 2 (a)) を設置して温度範囲 18 K から 77 K および室温において線形性の確認を行った。ソレノイド電流 93.2 A での計測結果を 6 T とするように校正を行った。Fig. 3 に温度 20 K で感度校正を行った際のホール電圧とソレノイド電流との関係を示す。0 T から 6 T において良好な線形性を示すことが確認できた。校正後に 3 次元計測のために素子を Fig. 2(b) のように組み換え、ステッピングモータを用いた駆動系の先端にアレイを固定しアンジュレータ磁場計測試験を実施した。周期磁場計測の結果については、紙面の都合上割愛する。

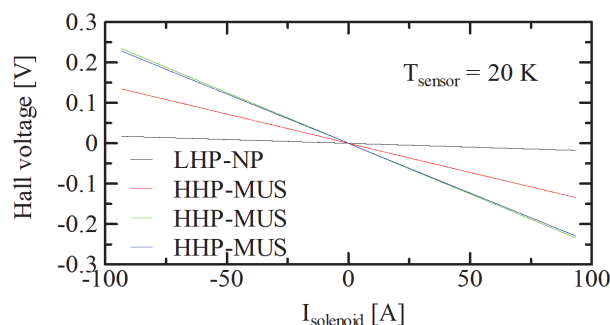


Fig. 3 Hall voltage measured at 20 K

参考文献

1. T. Kii, et al.: Proc. FEL2006 (2006) p. 653
2. R. Kinjo, et al.: APEX Vol. 6 (2013) 042701

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H01127 の助成を受けたものである。

COMET 超伝導冷却システムの建設状況

Construction status on cryogenic cooling system for the COMET experiment

岡村 崇弘, 大中 政弥, 大畠 洋克, 黒澤 宣之, 吉田 誠, 角 直幸, 佐々木 憲一, 榎田 康博, 飯尾 雅実 (高エネ研),
館野 亜希子, 松尾 正宏 (東理社)

OKAMURA Takahiro, OONAKA Masaya, OHHATA Hirokatsu, KUROSAWA Noriyuki, YOSHIDA Makoto,
SUMI Naoyuki, SASAKI Ken-ichi, MAKIDA Yasuhiro IIO Masami (KEK),
TATENO Akiko, MATSUO Masahiro (JECC Torisha)
E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

1. はじめに

現在 J-PARC において大強度陽子ビームを用いてミュオンが電子に転換する事象を探索する COMET (Coherent Muon to Electron Transition) 実験のための超伝導磁石システムが建設中である。このプロジェクトで用いられる超伝導磁石は大別してパイオン捕獲ソレノイド, ミュオン輸送ソレノイド, 検出器ソレノイドから構成される。前者2つはヘリウム冷凍機から供給される二相強制対流を用いて間接冷却されるとともに HTS リードを内蔵するカレントリードボックスを介して通電励磁される。ガス冷却電流リードを用いずに HTS リードを採用した理由は冷凍能力と想定熱負荷がほぼ同等であることによる。本報では昨年度製作した 3 kA 等複数の HTS リードを内蔵する捕獲ソレノイド用カレントリードボックス(以下捕獲 CLB と略)の構造ならびに冷却試験結果に加えて他の低温機器の開発製作状況についても紹介する。

2. 捕獲用カレントリードボックスの構造

Fig.1 に捕獲 CLB インサート全体構成を示す。また Fig.2 は 3 kA リードの室温端から低温端までの構造を示す。捕獲 CLB には 3 kA 用が2本, 250 A 用が2本, 500 A 用が1本の合計5本の HTS リードが内蔵されており, SUS バイパスがそれぞれの HTS リードに並列に設けられている。HTS リードの高温端は 40 K ステージに熱アンカーされ, 一方で低温端は 4 K ステージに熱アンカーされている。40 K ステージはサーマルシールドと熱的にリンクされており1段 GM 冷凍機 3 台(CH-110)に加え, ヘリウム冷凍機 (TCF-50) から供給される 40K シールドガスにより間接冷却される。一方で 4 K ステージはヘリウム冷凍機から供給される 4.5 K 近傍の気液二相流配管と熱的にリンクされている。300 K 室温電流リードから HTS 高温端まではクランク構造をした銅ブスバーにより接続され, HTS 低温端からは銅ブロック介して NbTi 超伝導線群と接続されている。これら超伝導線は全長 10 m ほどの断熱輸送配管内のヘリウム二相流配管と電気絶縁を確保しつつ熱的にリンクされ, 全長に渡り 4.5 K に冷却される構造となっている。これらの超伝導線は最終的に捕獲ソレノイドとジョイントされる。今回は捕獲 CLB の特に HTS 電流リードの非通電時ならびに長時間通電時における冷却特性を検証するために, HTS 低温端は NbTi 超伝導線によりバイパスした短絡通電試験を実施した。

3. 捕獲用カレントリードボックスの冷却試験結果

冷却試験は合計3回実施した。1, 2回目の通電試験では定格 2916A 通電ならびに 2700A 長時間通電できることも確認したが, HTS リード高温端および低温端でジュール発熱による温度上昇がみられた。そこで2回目通電試験終了後熱リンクを追加するなどの改良を施し3回目の試験を10月に実施した。Fig.3 に 2700 A 通電時の HTS 高温端温度 (Fig.2 中 TPC247, 248) ならびに HTS 低温端温度 (Fig.2 中 TCX254, 255)を示す。改良後の通電試験では HTS 低温端側, 高温端側それぞれにおいて温度上昇は抑えられていることが確認できた。当日は連報で捕獲 CLB の構造概要から試験結果の詳細等について報告する。

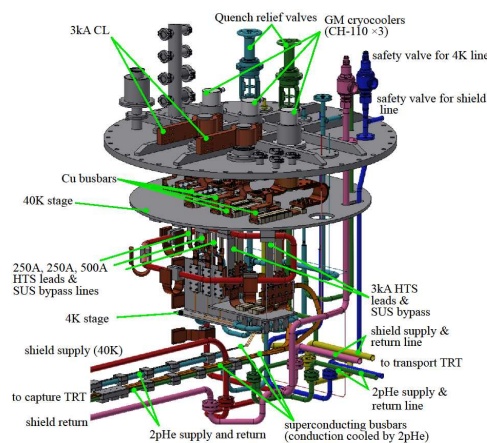


Fig.1 Overview of capture CLB.

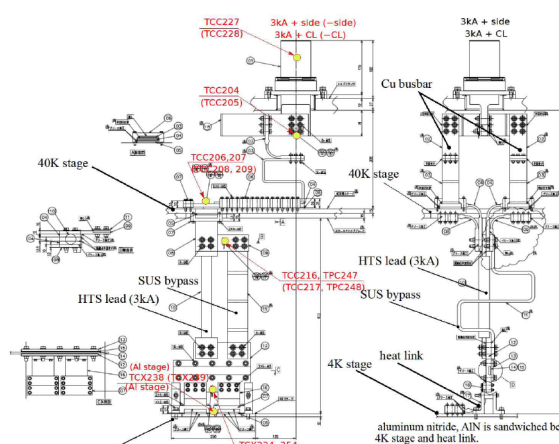


Fig.2 Cooling structures on HTS lead for 3 kA

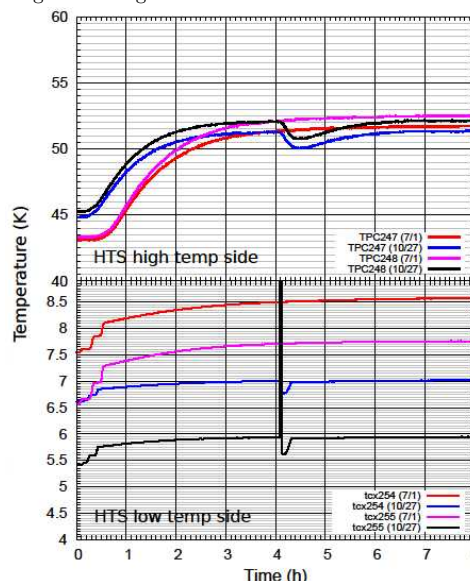


Fig.3 Temperature increase during 2700 A operation.

COMET磁石とカレントリードボックス通電試験結果 COMET magnet and Current Lead Box energization test results

角 直幸, 吉田 誠, 飯尾 雅実, 佐々木 憲一, 槇田 康博,
岡村 崇弘, 大島 洋克, 大中 政弥, 黒澤 宣之 (高エネ研)

SUMI Naoyuki, YOSHIDA Makoto, IIO Masami, SASAKI Kenichi, MAKIDA Yasuhiro,
OKAMURA Takahiro, OHATA Hirokatsu, ONAKA Masaya, KUROSAWA Noriyuki (KEK)

E-mail: nsumi@post.kek.jp

1. はじめに

素粒子の標準模型では許されていないが、標準模型を超える新しい物理によって起こると期待されているミュオンの稀な崩壊現象を探索するために、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設J-PARCにて実験準備が進んでいるCOMET実験(Fig.1)[1]では、陽子ビームを標的に入射して生成されたパイオン、ミュオン、電子を収束、輸送、検出するために超伝導磁石を並べた専用のビームラインを建設中である。

本講演ではCOMET超伝導コイルの製作状況とコイルへの電流導入部の通電試験の結果について報告する。

2. パイオン捕獲ソレノイド

パイオン捕獲ソレノイド(PCS)は、最大5 Tの磁場でパイオンを収束して下流へ導く大型のソレノイド磁石である。現在組み立ての最中でありコイル巻線を含浸して一体とした被冷却体にヘリウム冷却配管、リード線や各種配線を施工し真空断熱容器に収める段階である。来年度に完成予定で、完成後はカレントリードボックス(CLB)との繋ぎ込みと冷却・励磁試験を控えている。

3. ミュオン輸送ソレノイド

ミュオン輸送ソレノイド(MTS)は、3 Tの湾曲した磁石で、実験に用いる特定の運動量のミュオンを選択的に輸送するためにソレノイドとダイポールを組み合わせた磁石である。既に磁石本体は完成しCOMET実験の建屋に設置されているが、後述のカレントリードボックスの健全性が確認された後に、接続工事を行い冷却・励磁試験と磁場分布の測定を実施する予定である。

4. PCSカレントリードボックス

超伝導コイル励磁用の大電流を電源の常温部からコイルの低温部へ温度勾配を設けて接続する役割を持つのがカレントリードボックス(Fig.2)である。COMET実験では冷凍能力の節約のために高温超伝導体(HTS)を用いて短距離で大きな温度勾配を設けつつ熱侵入を抑える設計になっている。3000 AクラスのHTSリードを間接冷却で

用いた例は少なく、その実現可能性を確認するためにCLB単体での冷却・通電試験を実施した。

2021年7月に試験を実施し、目標としている2916 Aまでの短時間通電と2700 Aでの長時間連続通電を達成した。しかし、常温端からHTS高温端までの銅リードが長く発熱が想定よりも大きくなってしまったことと、HTS低温端での発熱により超伝導線部分の温度が上昇したことから2916 Aでの長時間通電は保留した。銅リードを適切な長さに変更し、HTS低温端での冷却経路を強化する改修工事を行った。2021年10月に再度試験を実施し2916 Aでの長時間通電を達成した。また、一部のコイルに流れる電流を微調整するためのトリム線(定格 250 Aおよび 500 A)にもHTSリードが使用されておりこちらも同様に長時間定格電流値で通電が可能であることを確認した。

5. MTSカレントリードボックス

ミュオン輸送ソレノイド用のCLBもPCSのものと同様にHTSリードを使用している。冷却・通電試験を実施したがHTSリードの臨界電流が製造時より低下し定格を満たさないことが判明した。使用しているHTSはPCSのものと異なり長期安定性が保証されていない物であったため、PCSで使用しているものと同じモデルに交換を行い再度冷却・通電試験を行う予定である。

6. まとめ

MTS CLBの健全性が確認された後にPCS CLBとの接続作業を行い、次に超伝導コイルと接続してコイルの冷却・励磁試験へと移行していく。

参考文献

1. The COMET Collaboration, PTEP, Volume 2020, Issue 3, March 2020, 033C01

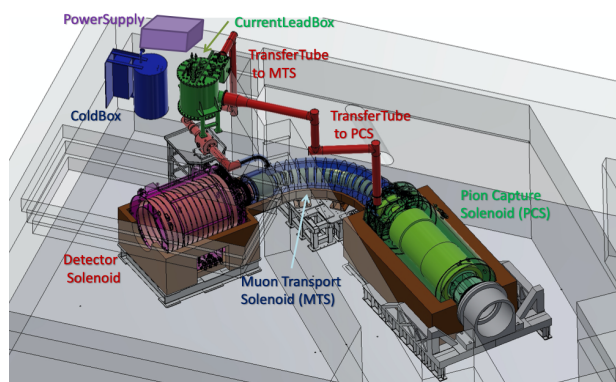


Fig. 1 COMET Superconducting magnet system

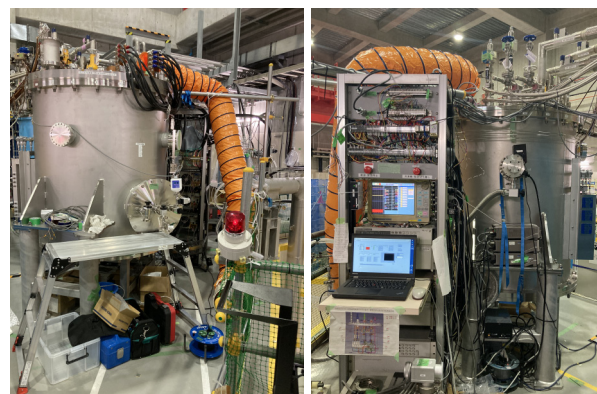


Fig. 2 PCS Current Lead Box

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石(QCS)及び
Belleソレノイド冷凍システム用モニタリングシステムのアップグレード
Upgrade of the remote monitoring system
for the SuperKEKB QCS and Belle solenoid cryogenic system

青木 香苗, 大内 徳人, 宗 占国, 有本 靖, 王 旭東, 山岡 広, 川井 正徳, 近藤 良也(KEK);
遠藤 友成(日立テクノロジーアンドサービス); 櫻井 雅哉(関東情報サービス)

AOKI Kanae, OHUCHI Norihito, ZONG Zhanguo, ARIMOTO Yasushi, WANG Xudong, YAMAOKA Hiroshi, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari (KEK); ENDOU Tomonari (Hitachi Technologies and Services); SAKURAI Masaya (Kanto Information Service)
E-mail: kanae.aoki@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、高エネルギー物理学における標準理論を超えた物理の探求のため、2016年2月より SuperKEKB 加速器(電子陽電子衝突型シンクロtron加速器)及び Belle II 測定器の運転を開始した(Phase 1)。2019年3月からは物理ラン(Phase 3)が開始され現在に至っている。

ビーム衝突点近傍には、測定器用超伝導ソレノイド (Belle ソレノイド) 及び加速器ビーム最終集束用超伝導電磁石システム (QCSL 及び QCSR) が位置している。我々は、この超伝導電磁石群及びヘリウム冷凍システム用リモートモニタリングシステムの開発 [1] に当たって、オープンソースソフトウェアの集合体である EPICS (Experimental Physics and Industrial Control) を採用した。このモニタリングシステムは 2018 年 3 月 (Phase 2) より実働しており、3 設備のリアルタイム表示、データのアーカイブに役立ってきた。

この初期に開発されたモニタリングシステムは、EPICS アーカイバソフトウェアとして CSS Archiver を利用していた。しかし、2015 年ごろから新しく SLAC を中心に開発された Archiver Appliance [2] が登場した。近年では、Belle II 検出器で採用、又 SuperKEKB においても Archiver Appliance への置き換えが進んでいる。

Archiver Appliance の長所としては、次のようなものがある。

- データ読み出しが高速であること。
- データサイズが小さい。(Google Protocol Buffers を用いたバイナリ形式を採用している)
- Archiver Appliance は再起動無しにデータの追加等の操作が可能である。

このため、我々のモニタリングシステムにおいても CSS Archiver から Archiver Appliance への切り替えを行った。

本発表においては、我々のシステムにおいて、Archiver Appliance へのアップグレードに際してのメリットとデメリット、これまでの CSS Archiver との比較について報告する。

2. 超伝導電磁石及び冷凍システム制御系とモニターの関係

機器構成については、以前に報告したものと変化はない。

衝突点に Belle ソレノイド、QCS 超伝導電磁石群(QCSL、QCSR; 加速器ビーム最終集束用超伝導 4 極電磁石と超伝導補正磁石群)が設置されており、3 台のクライオスタットに分かれて、それぞれが専用のヘリウム冷凍機で冷却、超伝導状態維持が行われている。

これらの冷凍運転は、総合計装システム日立 EX-8000 によって制御されており、3 設備は専用のネットワーク上に置かれている。我々が開発したリモートモニタリングシステムは、EX-8000 専用ネットワーク上の GWU(Gate Way Unit)から、Ethernetを介してデータを読み込み、機構内のローカルネットワークにおいて超伝導磁石とヘリウム冷凍機の状態をモニター可能としたものである (Fig.1)。

3. アップグレード部分

EPICSは、分散化されたプログラム構造を持つリアルタイムコントローラーを実現するソフトウェア集合体であり、次の要素から構成される。

- ① EPICS IOC (IO Controller)
- ② EPICS アーカイバー (Fig.1 の色付き部)

我々が今回アップグレードしたのは、②部分である。

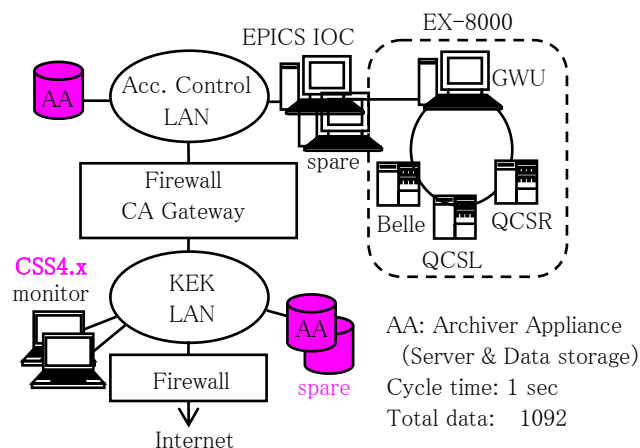


Fig.1 The remote monitoring system

又、Archiver Appliance で記録したデータをユーザーが読み出すために、各人の PC に CSS4.3 以上のクライアントをインストールした。(これまで CSS Archiver 用には CSS3.x を使用していた)

4. 既存のグラフ等の変更とこれまでのデータ形式の変更

これまで CSS Archiver とクライアントとして CSS3.x の組み合わせで作成してきたグラフやグラフィックス(モニター画面)はマイナーな変更が必要であった。

また、これまで CSS Archiver (PostgreSQL 形式) で保存してきた記録を Archiver Appliance (Google Protocol Buffers 形式) に変更した。これには、機構内で開発され GitHub サイトにアップロードされているツールを利用した。QCS に関しては、2017 年 2 月から 2020 年 12 月末までのデータ、Belle solenoid に関しては、2015 年と 2016 年に断続的に記録していたデータも含めて 2020 年 12 月末までのデータを形式変更した。この作業にはおよそ一ヶ月ほどかかった。

ユーザーとしては切り替え時の変更に手間取ったが、実現された速い読み出しはトラブル対処の参照に役立っている。

参考文献

1. K. Aoki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p123
2. The EPICS Archiver Appliance:
[https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver docs/](https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver/docs/)

スケルトンサイクロトロン用 REBCO コイルシステムにおける電流制御による 遮蔽電流磁場低減の検討

Examination on reduction of screening current-induced magnetic field by current control method for REBCO coil system of Skelton Cyclotron

糸旦谷 浩平, 白井 航大, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡山大);
野口 聡(北大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力); 福田 光宏(阪大)

ITOHIYA Kohei, SHIRAI Kodai, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.);
FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.)
E-mail: itohiya.waseda@ruri.waseda.jp

1. はじめに

我々は、進行がん治療に効果が期待されている α 線核医学治療のための α 線放出 RI(^{211}At) を安定的に製造・供給できる超小型・高強度・エネルギー可変の加速器として、「高温超電導スケルトンサイクロトロン (HTS-SC)」の開発に取り組んでいる⁽¹⁾。

HTS-SC では、粒子加速面において空間的・時間的に高精度・高安定な磁場分布が要求されるが、使用を想定する REBCO 線材はテープ形状のために、磁場変動に伴い遮蔽電流が顕著に誘導される。そしてこの遮蔽電流によって発生する不整磁場の影響が非常に問題になっている。遮蔽電流低減法の 1 つに電流制御法がある。

我々は HTS-SC の小型実証モデルである Ultra-Baby Skeleton Cyclotron (UBSC) を 2021 年度に試作、2022 年度に実験を実施し、電磁的・熱的・機械的振る舞いを評価する予定である。

今回は UBSC を対象に、通電パターンを変化した場合の解析を行い、遮蔽電流磁場の影響評価を行ったので報告する。

2. 解析対象及び解析方法

Fig.1 に示す円形のコイル 4 対 8 コイルと非円形のセクターコイル 3 対 6 コイルから成る UBSC を解析対象とし、REBCO 線材の超電導層幅は 6mm、厚さを 1.6 μm とした。Table1 にコイルの諸元を示す。解析手法として、我々が開発した有限要素法、境界積分方程式法および高速多重極法に基づく 3 次元非線形電磁界解析プログラムを用いた⁽²⁾。

3. 解析結果

運転電流値 540A、励磁速度 1A/s で励磁し、励磁完了時点での粒子加速面での遮蔽電流磁場分布を計算した。(a)メインコイルとセクターコイルを同時に励磁、(b)メインコイルを励磁後にセクターコイルを励磁、(c)セクターコイル励磁後にメインコイルを励磁、(d)メインコイルとセクターコイルを同時に 10% overshoot 励磁、(e)メインコイルを overshoot 励磁後にセクターコイルを overshoot 励磁、(f)セクターコイルを overshoot 励磁後にメインコイルを overshoot 励磁の 6 つのパターンの解析を行った。これら 6 パターンについて、粒子加速面での最大と最小遮蔽電流磁場を図 2 に示す。(d)パターンにおいて、遮蔽電流磁場を最も抑えることができた。

本研究の一部は、科研費基盤研究 S(18HD5244)に依ったことを付記する。

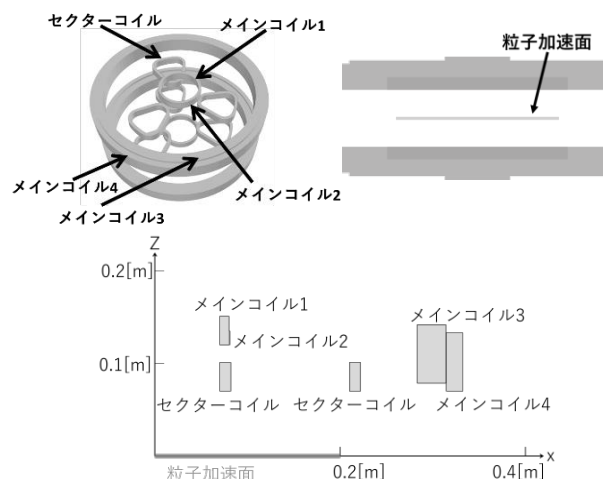


Fig.1 Schematic of the REBCO coil system of UBSC

Table.1 Specifications of UBSC coil

コイル種類	メインコイル1	メインコイル2	メインコイル3	メインコイル4	セクターコイル
内半径(mm)	70	80.1	283.13	314.37	非円形
外半径(mm)	79.8	80.94	314.33	332.63	非円形
絶縁物厚(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(MA/m ²)	367.347	685.714	92.308	201.117	450

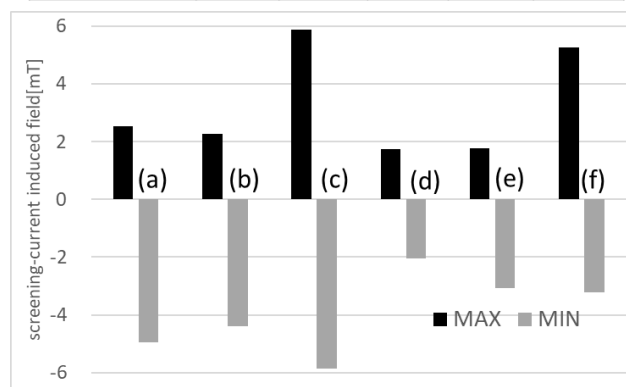


Fig.2 Maximum and minimum screening current-induced field on the particle acceleration surface

参考文献

1. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.29, 4101105 (2019)
2. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.23, 4100805 (2013)

ITER TF コイル用ダブル・パンケーキの全基完成成果

Completion of all of double-pancakes for ITER Toroidal Field coils

梶谷 秀樹, 中本 美緒, 諏訪 友音, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 中平 昌隆(量研機構)

KAJITANI Hideki, NAKAMOTO Mio, SUWA Tomone, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka (QST)

E-mail: kajitani.hideki@qst.go.jp

1. はじめに

日本は ITER 計画において 9 基の ITER Toroidal Field (TF)コイルの調達を担っている。TF コイルの巻線部(WP)は、7 基のダブル・パンケーキ(DP)から構成されるため、DP としては全 63 基製作する必要がある。DP 製作においては、Fig.1 に示す通り、まず Nb₃Sn 導体を D 型に巻線し、超伝導生成のための熱処理やラジアルプレート(RP)へのトランスファー、電気絶縁などの工程があり、高精度の製作技術が求められる。量研機構は、TF コイル製作メーカと協力して、DP 製作技術確立し、DP 全基を完成させた。本講演では、これらの成果について発表する。

2. DP 熱処理

導体と RP のトランスファーを行うためには、導体長と RP 溝周長を高精度で一致させる必要がある。しかし、Nb₃Sn 導体の場合、超伝導層となる Nb₃Sn レイヤーを生成する熱処理によって、その導体長が伸びるため、このような変化も予測して、導体長を管理する必要がある。そのため、この伸び率を考慮して、熱処理前の巻線工程では、予め小さめに巻線し、熱処理によって、DP の設計寸法に合わせる手法を確立した。熱処理後の導体周長と RP 溝周長を比較した結果を Fig.2 に示す。縦軸は両者の誤差及び横軸は DP 番号を示す。また、凡例は TF コイル番号(全 9 基分)を示す。トランスファーを行うためには、導体周長と RP 溝周長の誤差を $\pm 0.023\%$ 以内にする必要があるが、このように、全 DP において誤差を十分小さくできた。

3. DP 絶縁

WP は DP を 7 枚積層することで構成されるが、WP の電流中心線(CCL)の観点からは、各 DP の平面度のバラつきが大きいと、積層した際の WP の CCL の誤差も大きくなるため、DP 単体では、高さ 15m 及び幅 9m の DP に対して、平面度を 2mm 以内にする必要がある。これを達成するために、DP 面全体を圧縮し、平面度を矯正しながら含浸硬化させる手法を確立した。含浸後の DP 平面度結果を Fig.3 に示す。縦軸は DP 平面度を示しており、Fig.2 と同様の図スタイルである。このように、全 DP において、平面度を 2mm 以内にする事ができた。また、絶縁後の耐電圧試験においても、良好な結果を得ることができ、DP を完成させた。

4. まとめ

上記以外にも[1]～[3]に示す技術開発を行い、全 63 基の DP を完成させることができた。

参考文献

1. H. Kajitani, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.34
2. T. Suwa, et al., TEION KOGAKU 55 (2020) 319-327
3. M. Iguchi, et al., TEION KOGAKU 55 (2020) 328-337

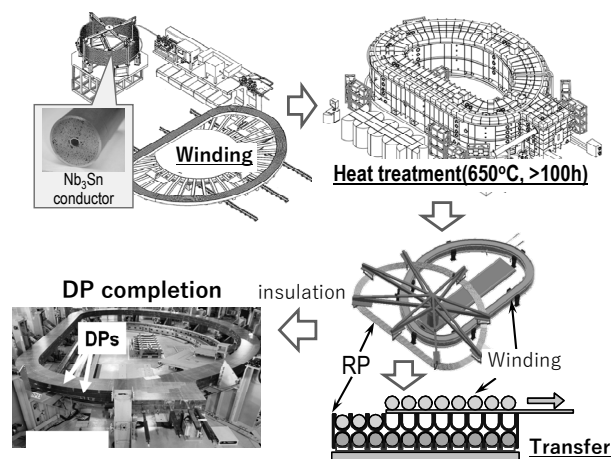


Fig.1 Schematic view of DP manufacturing

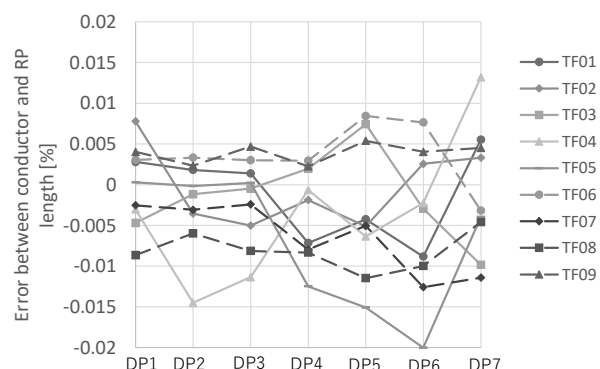


Fig.2 Error between conductor length after heat treatment and RP groove length for all of DPs

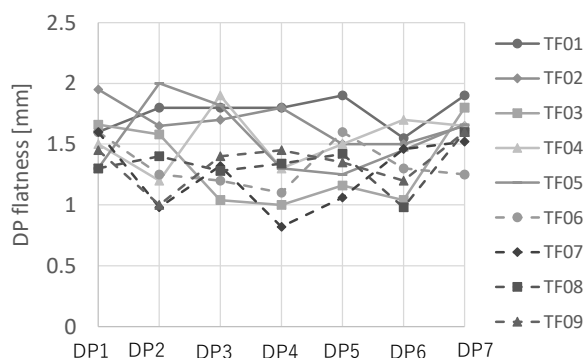


Fig.3 Result of DP flatness after insulation

斜め磁場下の面状ジョセフソン接合における臨界電流の磁気干渉

Magnetic interference in critical currents of planer Josephson junctions in oblique magnetic fields

上田 天馬, 小田部 荘司(九工大情工); 馬渡 康德(産総研)
 UEDA Tenma, OTABE Edmund Soji (Kyusyu Inst. of Tech.); MAWATARI Yasunori (AIST)
 E-mail: ueda.tenma378@mail.kyutech.jp

1. はじめに

薄い絶縁膜を挟んだ二つの超伝導体間に、それらの位相差に応じて直流の超伝導トンネル電流が流れる。この直流ジョセフソン効果において、ゲージ不変な位相差が磁場の影響を受けて、臨界電流はフラウンホーファー回折の干渉パターンに似た磁場依存性を示す。

十字型接合に垂直磁場を印加した場合は、磁場の増加とともに臨界電流は単調に減少するが[1]、オーバーラップ型接合の場合は、垂直磁場中で臨界電流に干渉パターンが現れる[2,3]。

本研究では、垂直磁場中の面状ジョセフソン接合における臨界電流について理論解析を行い、接合の幾何学的形状が磁気干渉に及ぼす影響について、接合面内の電流分布との関連を踏まえて考察した。

2. 十字型接合とオーバーラップ型接合

十字型ジョセフソン接合(Fig.1)について、垂直磁場 H_z の関数として臨界電流を導出した。また、接合面内のジョセフソン電流密度を計算した。

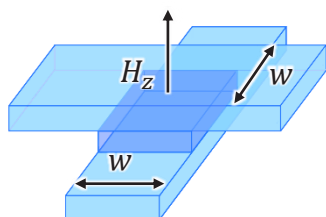


Fig.1 Cross-type Josephson junction.

オーバーラップ型ジョセフソン接合(Fig.2)について、垂直磁場 H_z の関数として臨界電流を導出、重なり長さ l が十分小さい極限($l \ll w$)について、磁気干渉パターンをプロットした。

なお、磁気遮蔽自己磁場の影響は無視できるものと仮定した。

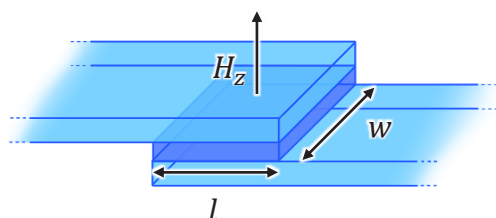


Fig.2 Overlap-type Josephson junction.

3. 計算結果と考察

垂直磁場を印加したときの十字型接合(破線)、オーバーラップ型接合(実線)の臨界電流のプロットを Fig.3 に示す。縦軸はゼロ磁場中の臨界電流 I_{c0} で規格化した臨界電流 I_c であり、横軸は、磁束量子 ϕ_0 で規格化した垂直磁場に関する磁束 $\Phi_z = \mu_0 H_z w^2$ である。ここで μ_0 は真空透磁率である。

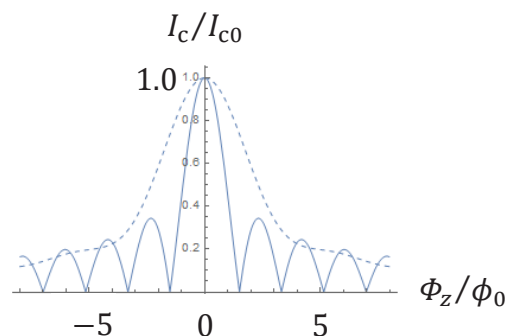


Fig.3 Normalized critical currents of cross-type (dashed) and overlap-type (solid) Josephson junctions.

垂直磁場中の臨界電流について、十字型接合では干渉パターンは現れないが、オーバーラップ型接合では干渉パターンが現れる。このような接合の幾何学的形状の効果と、接合面内の電流分布との関連について、講演にて報告する。また、平行磁場を含む斜め磁場の場合も、オーバーラップ型接合における臨界電流や接合面内の電流分布は、十字型接合とは大きく異なることが予想される。

4. まとめ

十字型およびオーバーラップ型の面状ジョセフソン接合について、垂直磁場中の臨界電流の解析を行った。

斜めの磁場をかけたときのオーバーラップ型ジョセフソン接合の振る舞いや、接合面内の電流分布の調査が今後の課題である。

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. S. L. Miller, K. R. Biagi, J. R. Clem, and D. K. Finnemore, Phys. Rev. B 31, 2684 (1985).
2. I. Rosenstein and J. T. Chen, Phys. Rev. Lett. 35, 303 (1975).
3. A. F. Hebard and T. A. Fulton, Phys. Rev. Lett. 35, 1310 (1975).

デジタル SQUID 用スタック型 SQUID 出力アンプの設計

Design of Stacked SQUID Output Amplifier for Digital SQUID Magnetometers

内田 創坪, 今谷 純平, 成瀬 雅人, 明連広昭(埼玉大)

UCHIDA Sohei, IMATANI Junpei, NARUSE Masato, MYOREN Hiroaki (Saitama Univ.)

E-mail: s_uchida@super.ees.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

SFQ フィードバックを用いたデジタル SQUID 磁束計は高いスループットと広いダイナミックレンジを有する[1]。デジタル SQUID に付属した SFQ フィードバック回路が発生するデジタル信号の後段の信号処理を FPGA で行うためには、SFQ 回路が出力する微弱な電圧を数 mV 程度に増幅させる必要がある。一方でデジタル SQUID を無冷媒小型冷凍機で動作させるために小規模な回路設計が求められるが、電圧増幅に伴う回路規模増大が課題となる。

そこで本研究では出力アンプが最小となるように超伝導シミュレーションソフト WRspice[2]で電圧増幅をシミュレーションし、レイアウト設計では回路規模を削減し、スタック型出力アンプを設計した。

2. データリンク回路

我々は、回路規模を抑えることを念頭に置き、極低温下でデジタル SQUID、デシリアライザやデシメーションフィルタなどの低速多ビット変換器、出力アンプを配置し、信号を室温機器へ送信することを目指す。小型冷凍機での使用を想定したデジタル SQUID 磁束計の実現に向け、極低温回路が 7mm 角に収まるサイズを目標とし、デジタル SQUID を 8GHz で動かす、16bit のデシリアライザで 500MHz まで間引きを行い、出力アンプの目標電圧を 4mV として設計した[3]。

3. アンプのシミュレーション

スタック型出力アンプは基本となる回路の SQUID 部分を連結させていき、SQUID を接続させた分だけ電圧増幅を得る。基本回路には SFQ 保持回路であるエスケープ接合付き DFF ゲート(DFFE)[4]を用いた。電圧増幅のための接続によって単純に回路規模が大きくなってしまったため、基本回路1つあたりの電圧を大きくする必要がある。そのために、SQUID ループのインダクタンスの最適化と、二重 SQUID 構造[5]を利用した。当初、4mV を超えるために基本回路を 12 段直列接続させる必要があったが、最適化の結果、5 段まで段数を削減し、アンプ一個あたりのサイズは半分以下となった。電圧増幅のシミュレーション波形は下図のようになる(Fig.1)。DFFE としての正常動作と基本回路の段数を増やすことによる電圧増幅を確認できた。

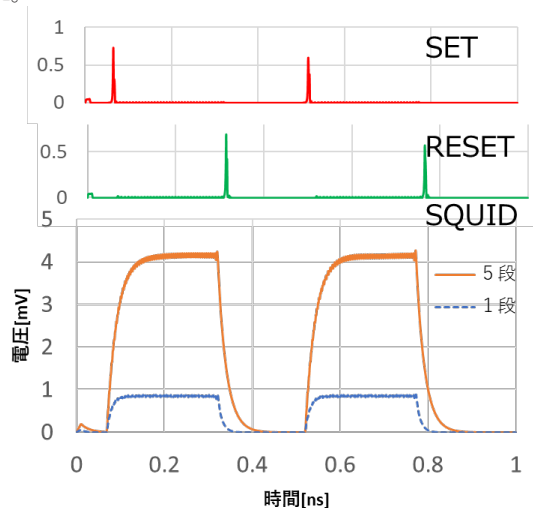


Fig.1 Simulation result for voltage amplification

4. レイアウト設計

7mm 角のチップに実装可能なサイズのレイアウトを設計する。そのために可能な限りレイアウト面積を削減した。具体的には DFFE の clk 入力为上からになっており、各 DFFE 間に $40\mu\text{m}$ のスペースができてしまっていたため、clk の入力を右からに変更し、スペースを排除し縦幅を大きく削減した。更に DFFE の余白に右横の SINK セルを導入することで横幅も削減した。出力アンプ一個あたりのサイズは縦 $360\mu\text{m}$ 、横 $760\mu\text{m}$ となった(Fig.2.(a))。これを 16bit デシリアライザ[6]に接続させたレイアウトを設計し、7mm 角に配置できることが示された(Fig.2.(b))。

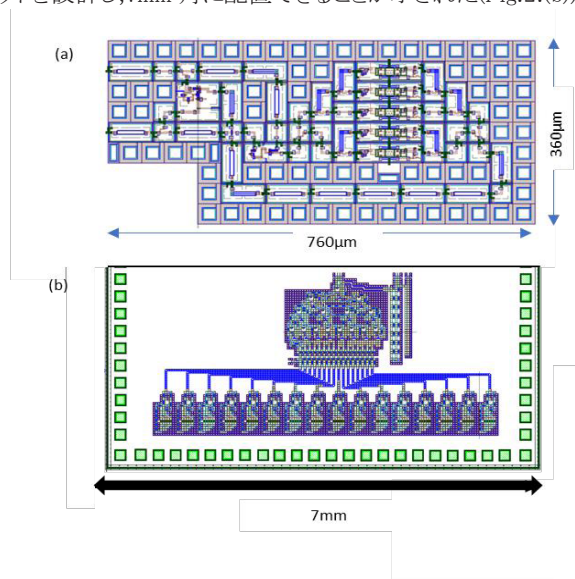


Fig.2 (a)Layout schematic of output amplifier and (b) 16bit deserializer connected to 16 output amplifiers

5. まとめ

本研究では、小型冷凍機での使用を想定したデジタル SQUID 磁束計の実現に向け、室温機器が受信可能な電圧まで極低温下で動作するスタック型 SQUID アンプの設計を行った。基本回路を 5 段スタックさせることで 1 つのアンプが構成され、シミュレーションでは 4.1mV を達成した。アンプのレイアウトは 1 つあたり縦 $360\mu\text{m}$ 、横 $760\mu\text{m}$ で設計し、16bit 並列読み出しの規模を最小限に抑えた。これにより、デジタル SQUID 磁束計の実現に向けた指針を得ることができた。

参考文献

1. V. K. Semenov, "Digital SQUIDs: new definitions and results," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, pp. 747-750, 2003.
2. WRspice is available from the website at <http://www.wrcad.com>.
3. D. Gupta, et al.: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 29, NO. 5, AUGUST 2019
4. Yorozu S, Kameda K, Terai H, Fujimaki A, Yamada T and Tahara S 2002 Physica C 378-381 1471-1474
5. K. Higuchi, et al.: IEICE Electronics Express, Vol. 16, No. 14, 1-4
6. R. Matsunawa, et al.: 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1590 012039

SNSPD 応答信号読み出し用低タイミングジッタ DC/SFQ 回路の設計

Design of DC/SFQ Gate with Low-Timing Jitter for SNSPD SFQ Readout Circuit

佐々木 奨平, 成瀬 雅人, 明連 広昭(埼玉大学大学院)
 SASAKI Shohei, NARUSE Masato, MYOREN Hiroaki(SUGS)
 E-mail: s_sasaki@super.ees.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

SNSPD からの応答信号を SFQ 論理回路によって低タイミングジッタで読み出す回路について研究を行い, 読み出し回路の中で最もタイミングジッタが大きい DC/SFQ 変換回路のタイミングジッタ低減について検討を行った. 従来の MC 型 DC/SFQ 変換回路では入力部ループ内のジョセフソン接合の臨界電流値がいずれも $100\ \mu\text{A}$ であったが, 今回は左側の臨界電流値を大きくして, 入力部ループ内に磁束を保持した状態で動作させ, SNSPD からの出力電流を増幅することでジョセフソン接合を通過する電流パルスを急峻にし, 熱雑音による接合のスイッチング揺らぎによって発生するタイミングジッタの低減を試みた.

2. MC 型 DC/SFQ 変換回路のタイミングジッタ

MC 型 DC/SFQ 変換回路[1]の動作原理を説明する. SNSPD からの出力電流パルスは L_{in} (Input coil), L_w (Washer coil) によって適切な値のパルスに増幅され, ジョセフソン接合 J_2 に流れ込む. そのパルスの立ち上がりによって, 臨界電流値付近にバイアスされている J_2 がスイッチすることで SFQ パルスに変換され, 回路右側に伝搬される. その際 J_2 の左側の接合である J_1 , L_w , J_2 からなるループ内に磁束が保持され, Φ_0/L のループ電流が流れる. その後パルスの立下りによって, J_1 に流れる電流が大きくなると, J_1 がスイッチして, ループ電流が 0 になり初期状態に戻る.

この MC 型 DC/SFQ 変換回路では熱雑音によって発生する電流により J_2 のスイッチングに揺らぎが発生し, SNSPD からの出力パルスの立ち上がりに対して SFQ パルスに変換するタイミングにずれが生じる. このタイミングジッタが生じることで SNSPD が光子を検出したタイミングを正確に伝搬することができず, 当研究室で提案している DAND ゲートによって HOM 干渉を測定する回路に影響を与えてしまう. ここでは回路全体のジョセフソン接合に接続されたシャント抵抗に 4.2K の熱雑音を与え, J_2 がスイッチする電流値付近の振幅のパルスに対するスイッチング確率が $10\%\sim 90\%$ となるグレーゾーンを求め, SNSPD からの出力電流パルス(振幅 $50\ \mu\text{A}$, 立ち上がり 500ps)に対するタイミングジッタを算出した. なお, 後述するシミュレーションは全て接合の臨界電流密度が $10\text{kA}/\text{cm}^2$ である産総研 HSTP プロセス[2]を用いて作製することを前提として行った. Fig.1 に現状使用している MC 型 DC/SFQ 変換回路 ($L_{in}=1300\text{pH}$, $L_w=12\text{pH}$, $J_1=J_2=100\ \mu\text{A}$, $k=0.5$) の入力電流の増加に対する J_2 のスイッチング確率を示す. このグレーゾーン幅から算出したタイミングジッタは 5.8ps であった.

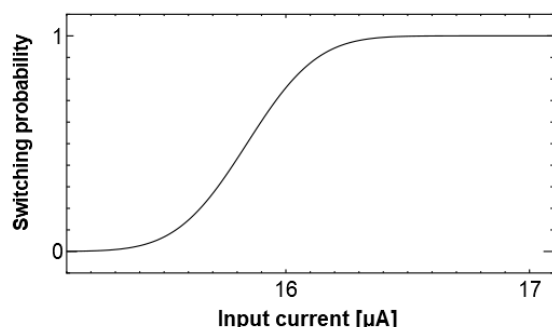


Fig.1 Switching probability vs Input current

3. 低タイミングジッタ DC/SFQ 変換回路の設計

SNSPD からの出力電流パルスを増幅し, J_2 に流れる電流の傾きを急峻にすることでタイミングジッタを低減することができる. しかし, 電流パルスの傾きを大きくすることで, 1つのパルス入力に対して SFQ パルスを複数個放出する問題が発生する. そこで, J_1 の臨界電流値を入力部に流れるループ電流より大きい値に設定しておくことで, 入力部ループ内に磁束を保持することができ, J_2 に流れる電流と反対向きの電流が常に流れることになるため, 出力電流パルスを従来の磁束を保持しない型より増幅することができる. L_w に流れる増幅電流の傾きによるタイミングジッタを Fig.2 に示す. J_1 の臨界電流値は磁束を1つ保持して動作させるとき $200\ \mu\text{A}$, 2つ保持して動作させるとき $350\ \mu\text{A}$ とし, J_2 の臨界電流値は $100\ \mu\text{A}$, L_w の値は 12pH , 結合定数 $k=0.5$ として L_{in} の値のみを変化させシミュレーションを行った. Fig.2 に示すように従来の磁束を保持しない型より, 磁束を保持し J_2 に流れ込む電流の傾きを大きくした型の方がタイミングジッタが小さくなることが確認できる. しかし, $L_{in}=4000\text{pH}$, 傾き $0.6\ \mu\text{A}/\text{ps}$ からタイミングジッタは 3ps 程度に落ち着いた.

最後に, この結果を踏まえ回路の設計を行った. L_{in} の値が 4000pH 付近からタイミングジッタの変化があまり見られなかったことから L_{in} の値は 5000pH , L_w の値は 12pH として Washer 型のトランスを用いて設計を行ったところ, ホール直径 $230\ \mu\text{m}$, 12 回巻きで $L_{in}=5273\text{pH}$, $L_w=11.8\text{pH}$, $k=0.65$ と実現可能であることを確認し, 磁束を保持して動作させる低タイミングジッタ DC/SFQ 変換回路の可能性を示した.

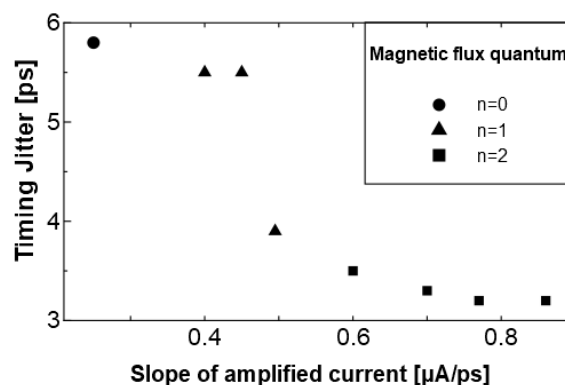


Fig.2 Timing Jitter vs Slope of amplified current

4. まとめ

MC型DC/SFQ変換回路についてタイミングジッタの低減の検討を行った. J_1 の臨界電流値を大きくして, 磁束を保持することで, SFQパルスを生成する接合 J_2 を通過する電流パルスを増幅しても複数パルスを放出せず, タイミングジッタの低減を行えることを確認した.

参考文献

1. H. Terai, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol.52 No.5 (2017) p.341-342
2. M. Hidaka, S. Nagasawa: J.Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 52 No.5 (2017) p.315-322

パルス管冷凍機の固体位相制御の比較

Comparison of solid phase shifters of pulse tube refrigerator

朱 紹偉, 郭 志敏(同济大学)

ZHU Shaowei, GUO Zhimin (Tongji University)

E-mail: swzhu2008@yahoo.com

1. INTRODUCTION

Comparison with double inlet and inertance tube, gas driving displacer, linear motor driving displacer and moving plug could be called solid phase shifter for pulse tube refrigerator. The fundamental of their moving is compared theoretically from their moment equations.

2. STRUCTURE

Figure 1 is the schematic of the pulse tube refrigerator. The displacer could be operated with or without linear motor and orifice.

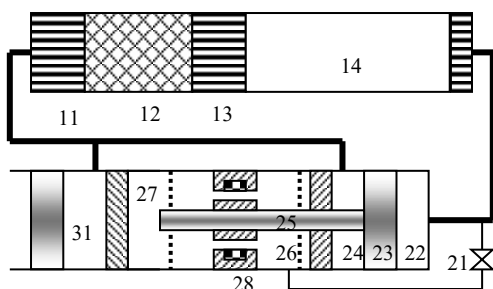


Figure 1 Schematic of pulse tube refrigerator

11. After cooler 12. regenerator 13. cold heat exchanger
14. pulse tube 21. orifice 22. displacer front space
23. displacer 24. displacer back space 25. displacer rod
26. displacer spring 27. displacer buffer 28. Linear motor
31. compression space

3. THERETICAL COMPARISON

The governing equations for the displacer are

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + kx = iB + F$$

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 [(1 - \beta^2)(P_C - P_D) + \beta^2(P_B - P_D)]$$

If only consider first order harmonic

$$x = x_0 \sin(\omega t)$$

$$i = i_1 \cos(\omega t) + i_2 \sin(\omega t)$$

$$F = F_1 \cos(\omega t) + F_2 \sin(\omega t)$$

Then

$$x_0 C \omega = i_1 B + F_1$$

$$k - m \omega^2 = (i_2 B + F_2) / x_0$$

m is mass, x is displacement, C is friction factor, k is spring stiffness, i is current, B is motor force factor, F is the force on the displacer due to compressor pressure P_C , displacer pressure P_D and buffer pressure P_B , D is displacer diameter, β is rod diameter ratio of d/D , d is rod diameter, ω is angle frequency, t is time, subscript 0, 1, 2 means amplitude.

If the orifice is not opened, it works as an active displacer pulse tube refrigerator with linear motor. For a given cold head, there is an optimum displacement x for efficiency. Then we can adjust current, displacer mass or spring stiffness and rod diameter ratio to make the displacer move as what we want. Assume i_2 is 0 which means linear motor is on resonant point (if not, i_2 can be used as electrical magnetic spring). If rod diameter ratio is 0, the linear motor should input power, because the pressure ratio of the back space is higher than that of the front space due to the pressure drop of the regenerator and heat exchangers, and the PV power of the back space is higher than that of front space. If rod diameter ratio is 1, linear

motor should take off the PV power of the pulse tube because there is no energy feedback to the compressor. Then the linear motor becomes a linear generator. When rod diameter ratio changes from 1 to 0, current changes from positive to negative. There is a rod diameter ratio with which the linear motor current is 0, or the displacer becomes a gas driving displacer. We may call this rod diameter ratio is optimum rod diameter ratio. This means that gas driving displacer can get the same performance as linear motor drive type. Above analysis also shows that displacer could not move as required without rod, or rod less displacer is not good enough. Rod less type may be better than rod type if gas leakage through the rod is too large. When energy is transferred from front space to back space, a little mechanical power is costed to overcome mechanical loss by friction factor C . If there is no linear motor, and the rod diameter ratio is 1, orifice must be open, it is a moving plug which generates standing wave for phase shifting. If the rod diameter ratio decreases from 1, part of the expansion power is recovered, and part is consumed by the orifice. The orifice is no need to open if reaching optimum rod diameter ratio. If rod diameter ratio is less than optimum rod diameter ratio, open orifice may generate bad effect. A little smaller rod diameter ratio with linear motor, or a little bigger rod diameter ratio with orifice is convenient for adjustment in laboratory.

4. DESIGN METHOD

Above analysis also gives a partly theory design method for displacer pulse tube refrigerator. The first step is to get optimum performance with optimum volume of displacer and compressor with 1D or CFD simulation by double piston model. The second step is to choose parameters of displacer, such as rod diameter ratio and spring stiffness to let it move as required with force calculated from pressures. The amplitude of the displacement and diameter of the displacer could be chosen based on manufacture technology. The third step is the linear compressor design. It could be considered as a displacer with rod diameter ratio 1. Its volume is the compression volume from the first step minus the volume of the back space of the displacer from the second step. Its PV power is got similarly. Based on voltage and PV power, current and motor force factor are got after chosen displacement amplitude. After getting moving mass of the linear compressor, required spring stiffness of the compressor is got. This method is simpler than fully simulation method¹, which including linear compressor, cold head and displacer.

For a linear compressor, F_1 could be considered as a design parameter of the linear motor, F_2/x_0 is gas spring which can be increased by piston diameter. It indicates that linear compressor operation frequency could be increased by a bigger piston diameter with a bigger dead volume and small phase angle difference between piston displacement and pressure.

5. CONCLUSION

Displacer with linear motor can move to get the optimal performance with a matched displacement as we want by any rod diameter ratio, while gas driving displacer has an optimum rod diameter ratio to meet the requirement. Moving plug can meet the phase shifting with orifice, too.

REFERENCES

1. SW Zhu, M Nogawa, Cryogenics 50(2010), 320-330

サイズの異なる 2 台の GM コールドヘッドにおける 4 K 冷凍能力比較

Comparison of 4 K cooling capacity of two GM cold heads of different sizes

神代 彪瑠, 増山 新二 (大島商船高専)

KOSHIRO Takeru, MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College)

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

1. はじめに

一般的に、4 K 蓄冷式冷凍機は、圧縮機の消費電力が大きくなるにつれて、その冷凍能力が大きくなる傾向にある。これは、冷凍能力に影響を及ぼすコールドヘッドの膨張空間と蓄冷器サイズに見合ったヘリウムガス流量を圧縮機から導入する必要があるが、消費電力の大きな圧縮機ほど、ガス吐出量が大きくなるためである。

このような状況に反し、われわれは、低消費電力 (おおむね 2.5 kW 以下) で高出力・高効率を目指した 4 K-GM 冷凍機の開発を行っている[1~2]。低消費電力の圧縮機の吐出量をカバーするためのポイントとして、通常、60 または 72 rpm で動作しているディスプレイサを低速動作させることで、圧縮比の低下を抑え、コールドヘッドへの入力仕事を大きく低減させることである。そこで今回は、サイズの異なる 2 台の 2 段 GM コールドヘッドを同一の圧縮機にそれぞれ個別で接続したときの 4.2 K での能力を比較した。

2. GM コールドヘッドと圧縮機

試験に使用された 2 台の 2 段 GM コールドヘッドは

(1) RDK-408D2 (1.0 W at 4.2 K, 6.9/7.9 kW (50/60 Hz))

(2) RDK-305D (0.4 W at 4.2 K, 4.2/5.1 kW (50/60 Hz))

で、いずれも SHI 製である。ここで、かっこ内の数値は、カタログスペックによる 4.2 K の冷凍能力と、通常組み合わせられる圧縮機消費電力の 50、60 Hz における平均値である。外形図面から 2 段目シリンダ (冷却ステージも含む) の体積を比較すると約 2.3 倍、(1) が (2) より大きい。いずれのコールドヘッドとも、高温側から Pb, HoCu₂, Gd₂O₃S 球が 50、20、30%の体積割合で充填された 2 段目蓄冷器が使用された (当然ながら、充填分量は異なる)。コールドヘッドの動作速度は、別途設置したインバータで制御された。

圧縮機は、低消費電力用として

・SA115 (1.6/1.9 kW (50/60 Hz), ULVAC CRYOGENICS)

また、比較用として

・SSC-3700 (6.3/7.5 kW (50/60 Hz), SUZUKISHOKAN)

を準備した。なお、本研究の試験はすべて 60 Hz で行われた。

3. 冷凍能力試験結果

冷凍能力試験は、電気ヒータにより 1 段目ステージ温度を最低到達温度から 70 K 程度まで変化させ、その時の 4.2 K の 2 段目ステージ冷凍能力を測定した。

Fig. 1 は消費電力の大きい SSC-3700 と組み合わせた結果である。なお、ヘリウムガスの初期封入圧は 1.6 MPa とした。1 段目ステージの温度上昇に伴い、サイズの大きい RDK-408D2 は凸型となり、冷凍能力の最大値は 1.6 W (%カルノー: 1.7%)、(以後、カッコ内の数値は%カルノーを示す)、一方、サイズの小さい RDK-305D は減少傾向にあり、最大値は 0.94 W (0.89%) となっており、両者の冷凍能力に大きな差が生じている。また、圧縮機の質量流量は 4.5 g/s 程度と見積もられ、1.6 W 発生時の消費電力は 6.8 kW であった。

Fig. 2 は低消費電力の SA115 との組み合わせである。ここで、初期封入圧は 2.0 MPa とした。いずれのコールドヘッドとも、大きな冷凍能力が得られた動作速度 36、48 rpm をピックアップしてある。結果から、RDK-408D2 の能力が RDK-305D を上回り、最大値は 0.68 W (2.6%) であった。一方、RDK-

305D の最大値は 0.50 W (1.7%) であった。圧縮機の質量流量は 1.7 g/s 程度であり、SSC-3700 のそれより 62% 少ない。また、0.68 W 発生時の消費電力は 1.9 kW であった。

4. まとめ

サイズの異なる 2 台の GM コールドヘッドと消費電力の異なる 2 台の圧縮機をそれぞれ組み合わせた時の 4 K 冷凍能力を比較した。低消費電力圧縮機 (SA115) の吐出流量を考慮すると、体積の小さいコールドヘッド (RDK-305D) との組み合わせがマッチすると予想していたが、それとは反対の結果となった。本結果から、低消費電力でさらに高出力・高効率を狙うのであれば、RDK-408D2 よりも体積の大きなコールドヘッドが適しているのかもしれない。

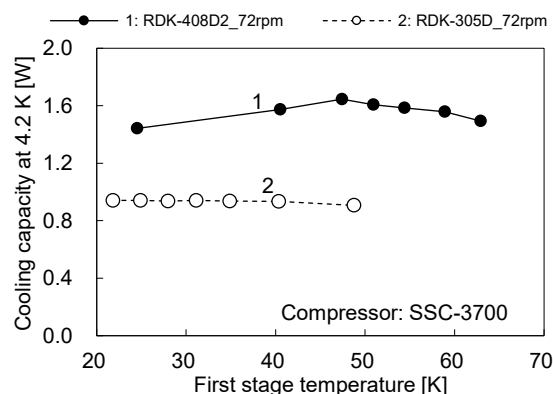


Fig. 1. Comparison of 4.2 K cooling capacity of two types of cold heads with SSC-3700 compressor. Initial charging pressure of 1.6 MPa.

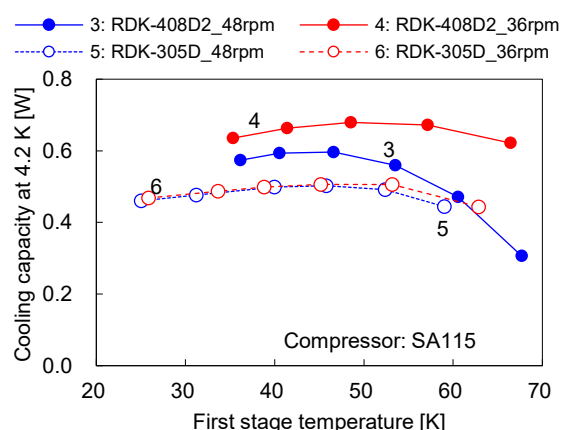


Fig. 2. Reciprocating speed dependence of 4.2 K cooling capacity of two types of cold heads with SA115 compressor. Initial charging pressure of 2.0 MPa.

【参考文献】

1. 関光正輝, 竹塚幸輝, 増山新二: Abstracts of CSSJ conference, Vol. 100 (2020) p. 46
2. S. Masuyama, K. Kamiya, T. Numazawa: CEC21 (2021), (virtual conference)

磁気遮蔽方式による磁気冷凍の可能性に関する研究

— YBCO 線材積層による磁気遮蔽能力評価 —

Research on the Possibility of Magnetic Cooling Technology using Magnetic Shields - Evaluation of magnetic shielding ability of laminated YBCO wires -

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

HIRANO Naoki, ONODERA Yuta (NIFS)

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

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

1. はじめに

高温超伝導材料の研究開発の進展と、近年のヘリウム供給問題から、ヘリウムに頼らなくとも極低温を維持できるシステムの研究開発を行っている。その一方式として、高温超伝導コイルの冷却に、発生する磁場と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進めている。磁気遮蔽により磁気熱量効果が制御できることを確認する原理検証試験を行うとともに、超伝導材料を磁気遮蔽材料として用いることの可能性について検討し、YBCO 膜を400枚ほど積層することで、3 T の磁場を遮蔽できる計算結果が得られている[1]。超伝導材料による磁気遮蔽効果は、用いる材料の厚みに依存することが示唆されることから、厚みのあるバルク体の磁気遮蔽効果について前報[2]で報告した。今回は、高温超伝導薄膜を積層し、その磁気遮蔽効果を確認したので報告する。

2. YBCO 線材積層の磁気遮蔽効果

高温超伝導コイルの冷却に、発生する磁場と磁気冷凍技術を組み合わせることで冷却をアシストする手法として、磁場発生源と磁気作業物質の隙間に磁気遮蔽体を繰り返し挿抜することで磁場変化を得る方式を検討している。YBCO 膜を積層することで磁気遮蔽体を構成した場合、2 mm ほどの厚みがあれば 20 K で 3 T の磁場が遮蔽できる計算結果が得られている。YBCO 線材を積層し、その磁気遮蔽効果を計測することで、超伝導材料を磁気遮蔽材料とした磁気冷凍システムの実現可能性を検討した。

YBCO 線材は、SuperOx Japan 社製の幅 12mm、厚み 0.1mm の線材を用いた。この線材を十字に合わせて 100 層積層し、磁場中に設置することで積層線材で遮蔽できる磁場を Bell 社のホール素子 (BHA921) で計測した。計測は液体窒素中で行った。磁場は、室温ボア径 100 mm の冷凍機伝導冷却超伝導マグネットを用いた。Fig.1 に実験サンプルの概略図と写真を示す。

磁場を 3 T まで印加した場合の YBCO 積層線材の磁気遮蔽効果を Fig.2 に示す。本測定結果は、ホール素子の片面側に磁気遮蔽体を配置した結果となっている。2.5 T 以上では計測値にノイズが重畳したため、今回の結果からは除外している。磁場の変化速度は、装置の制約から 0.01 T/s で行っており、この変化速度に対して、ホール素子の検出遅れはないことを確認している。Fig.2 に示すように、外部磁場を増やしていくと、0.5 T 付近にピークを持つ磁気遮蔽効果が計測された。磁気遮蔽効果は約 0.13 T であった。

YBCO 線材の積層枚数を増やすことで遮蔽効果が増加することは確認している。

また、以下の解析式を用い、線材の J_c 特性を考慮して解析した結果も Fig.2 に合わせて示す。

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

J : Current density [A/m²] V : Voltage [V]

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

A : Vector potential [T·m] σ : electrical conductivity [S/m]

3. まとめ

YBCO 積層線材の磁気遮蔽効果を液体窒素温度で確認し、100 mT 程度の磁気遮蔽効果があることを確認した。薄膜積層による計算結果と実験で得られた結果は、その挙動がよく一致することが確認された。テープ線材に占める YBCO 層の厚みは 1 μ m ほどであり、100 枚積層しても 0.1mm に過ぎないことを考慮すると、数 mm の厚みを持つバルク体に比べて効率よく磁気遮蔽している可能性がある。今後は、今回の結果を基に、20 K における遮蔽効果を推察し、超伝導コイル冷却をアシストできる磁気冷凍システムの実現可能性を検討する。

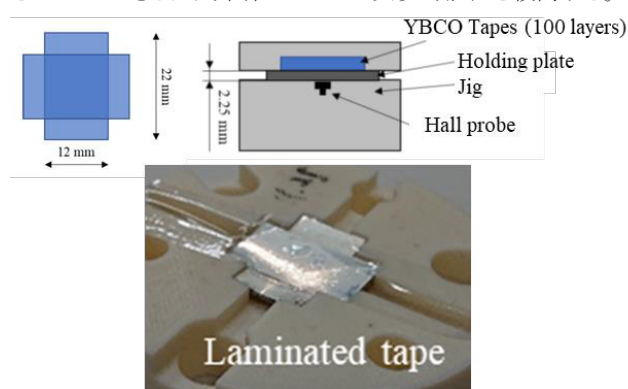


Fig.1 Magnetic shielding effect experiment sample using laminated YBCO wires.

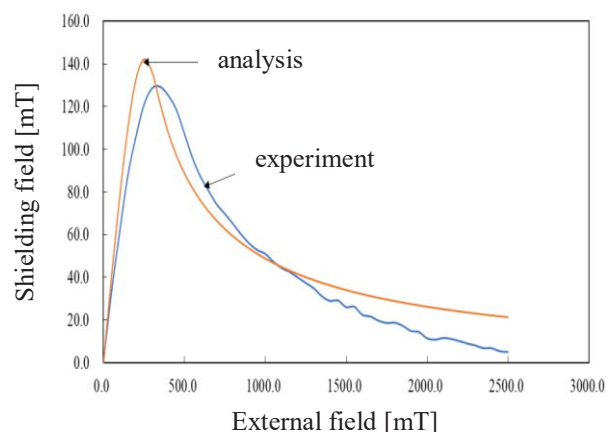


Fig.2 Magnetic shielding effect for laminated YBCO wires.

謝辞

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

参考文献

- [1] N. Hirano, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 31, 5, (2021) <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2021.3055994>
- [2] N. Hirano, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol.101 (2021) p.32

励消磁過程中の水の流動方向を変えるタイミングが 磁気冷凍機の冷凍性能に及ぼす影響

The effect of flow direction changing timing of water during magnetizing/demagnetizing process
on the performance of the magnetic refrigerator

澤矢 宏紀, 安部 勇汰, 岡村 哲至(東工大); 裴 相哲(サンデン AT)

SAWAYA Hiroki, ABE Yuta, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (SANDEN AT)

E-mail: sawaya.h.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

室温磁気冷凍機は、連続的な冷却効果を得るため、磁性材料の励消磁に合わせて熱輸送媒体(水)の流動方向を切り替える必要がある。本研究では、磁性材料の励消磁過程中に水の流動方向を変えるタイミングが磁気冷凍機の冷凍性能へ及ぼす影響を調べた。

2. 冷凍能力測定実験

図1に実験装置の概略を示す。磁性材料を充填したダクトに対して、永久磁石の回転によりダクトへ磁場が印加され、さらにその励消磁に合わせて熱輸送媒体の流動方向を制御する実験装置を用いた。ダクト寸法は断面積 145mm²、長さ 75mm である。また、各ダクトには、平均粒径 0.45mm の球形状をしたランタン系水素強化材の磁性材料を 12.5mm ずつ 6 種類充填した。磁性材料のキュリー温度は、1℃、3℃、5℃、7℃、9℃、11℃である。実験は、磁石の回転周波数は 1.5Hz、水流量は 2L/min、ヒートシンクと環境温度は 12℃にて実施した。なお、実際の装置はダクトを 11 本使用している。

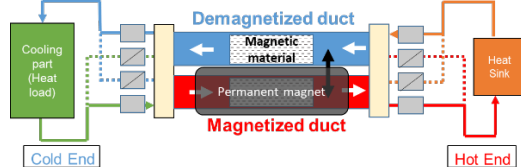


Fig.1 Outline of experimental equipment

図2にダクトにかかる磁場及び熱輸送媒体の流動方向を示す。現状の実験装置では、ダクトに最大の磁束密度がかかるのが高温側に水を流す時間の中心に来るように設定されている。また、使用している磁石の形状に起因して励磁・消磁の時間が不均一になっており、励磁されている時間が消磁されている時間より短くなっている。

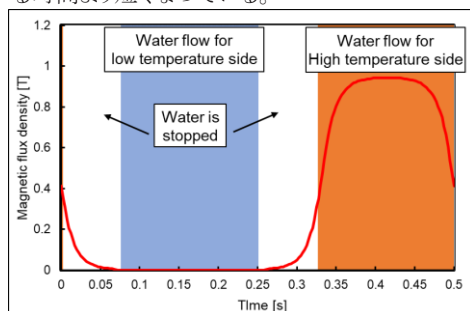


Fig.2 Water flow direction and magnetic flux density

装置を駆動させると磁性材料の磁気熱量効果が発生する。弁の操作により励磁されたダクトの水はヒートシンク側に流れ、消磁されたダクトの水は冷却部に流れる。その結果、冷却部の温度が低くなっていき、ダクトの高温端と低温端の間に温度差が付く。低温端温度が定常になったらヒーターによる熱負荷を段階的に増やしていき、最終的に高温端と低温端の温度差がなくなったところで実験を終了する。ヒーターで与えた熱負荷を冷凍能力、ダクトの高温端と低温端の間の温度差を

ダクト温度スパンとし、上記の条件についてダクト温度スパンに対する冷凍能力を評価した。

3. 冷凍能力測定解析

図3に数値解析モデルを示す。数値解析では、1次元伝熱数値解析を解いた。数値解析モデルは、実験装置を基にして、2本のダクトの低温端をパイプでつないだモデルとして計算している。このモデルに対して、以下に示すような熱輸送媒体と磁性材料の1次元エネルギー保存方程式を解いた。

$$\text{Fluid: } \rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = \frac{h_{eff}(T_r - T_f)S}{V_f}$$

$$\text{Material: } \rho_r c_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + \frac{h_{eff}(T_r - T_f)S}{V_r} + \frac{\rho_r c_r \Delta T_{ad}}{\Delta t V_r}$$

本研究では磁石の磁束密度変化の間、熱輸送媒体の流動するタイミングをずらすことで、弁開閉切り替え時の磁束密度や、弁開時の平均磁束密度が冷凍性能に与える影響を調べた。図2に示す基準条件の結果を図4の②で示す。また、①は流動のタイミングが基準条件よりマイナス側に0.05周期、③はプラス側に0.05周期ずらした結果である。なお、プラス・マイナスの方向については図2に示す。

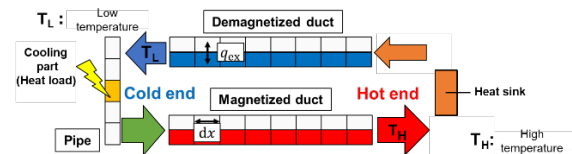


Fig.3 One dimensional analysis model

4. 冷凍能力実験及び解析結果

図4に実験及び解析結果を示す。②の解析値は実験値を15%の誤差と精度良く予測している。また、基準条件の解析結果に比べて、正の方向に流動のタイミングをずらした場合はほとんど冷凍能力を得られないことがわかる。さらに、負の方向にずらした方がより良い冷凍能力を示すことがわかる。この条件で性能向上できた理由は、基準条件に比べて高温側の弁が開いた時の磁束密度と低温側の弁が開いた時の磁束密度の差がより大きくなったことであると考えられる。

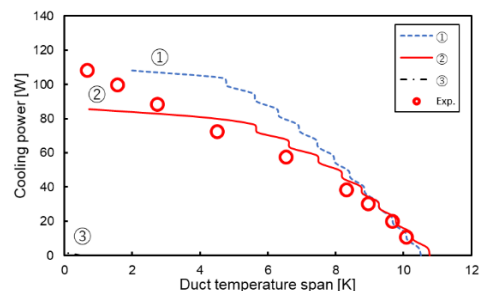


Fig.4 Analysis and experimental results of cooling power

5. まとめ

ダクトにかかる励磁消磁の時間が同じでない磁気冷凍機において、水の流れる方向のタイミングをずらすことで、冷凍能力を大きくできる可能性が示唆された。

冷却部に熱交換器を用いた場合の磁気冷凍システムの冷却性能に関する研究

Research on the cooling performance of magnetic refrigeration system

which use the fin tube heat exchanger for cold side

安部 勇汰, 岡村 哲至(東工大); 裴 相哲(サンデン AT)

ABE Yuta, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (Sanden AT)

E-mail: abe.y.aq@m.titech.ac.jp

1. はじめに

冷凍空調機器のノンフロン化を実現するため、磁性材料の持つ磁気熱量効果を利用した室温磁気冷凍機の研究が行われている。本研究は、磁気冷凍システムを構成する要素機器のうち、清涼飲料水用のケースで言えば、庫内にあたる部分の熱交換器と磁気冷凍機における能動的再生器 (AMR) に注目した。Fig.1 のように冷却室内の空気と AMR から流出する低温の水が熱交換する熱交換器を接続した磁気冷凍システムにおいて、熱交換器内における交換熱量と AMR の冷却能力の関係等について冷媒の流量や熱交換器内を流れる風速を変化させて考察する。

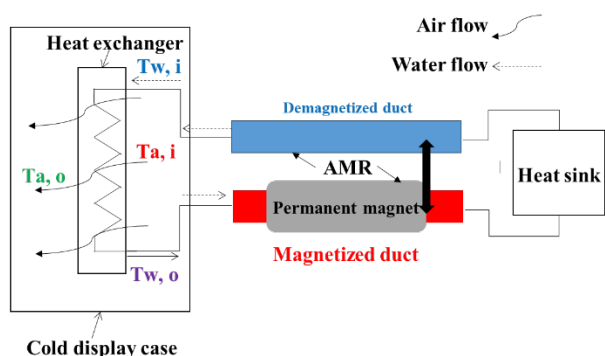


Fig.1 Schematic diagram of magnetic refrigeration system

2. 熱流動解析

Fig.2 に示すように今回対象にしたフィン・チューブ型の熱交換器は、AMR から全体の半分のチューブに流入した水が左端のプールで合流し、残りの半分のチューブを通して AMR に戻る 2 パス構造を想定した。熱交換器の奥行×高さ は 200mm×50mm とし、幅は 1000mm と 50mm の 2 種類について検討した。水配管径 8mm、配管厚み 1mm、フィン厚み 1mm とした。これらの値は一般に存在するものから選んだ。変化させる物理量は、システムを流れる水の流量、熱交換器を通過する風速、励消磁の周期とする。

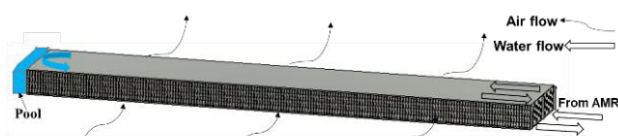


Fig.2 Schematic of tube·fin heat exchanger
(W:D:H=1000mm:200mm:50mm)

Fig.3 は、冷却を開始して磁気冷凍システム内の温度分布が定常になってから、冷却室の扉を 10 秒間開放した後に閉めたときの熱交換器内の流体の温度変化の一部である。(a) は幅 1000mm の場合、(b) は幅 50mm の場合で扉開放時とその前後の温度変化のみを表した)扉開放時は、熱交換器における空気の入入口温度が 26℃となり、励磁ダクトには Heat sink から常に 26℃の水が供給されるとした。Ta,i, Ta,o, Tw,i,

Tw,o は、Fig.1 で示された場所の空気および水の温度である。Fig.4 は、幅 1000mm のときの励磁ダクトの高温端と消磁ダクトの低温端の温度差(再熱器温度差)に対する扉開放中の熱交換器の交換熱量と AMR の冷凍能力の比較を表している。図中の破線矢印は、交換熱量の時間によりどのように変化しているかを示している。初めは、扉が閉まっていて、システム全体が徐々に冷却されるため①から②へ変化する。扉が開くと水の温度と空気の温度差が急に高くなることにより交換熱量も急上昇するため②から③へと変化する。扉開放中は空気の入り口温度が一定のまま水の温度が上昇していくので、交換熱量が下がるので、④まで変化する。扉を閉めると、空気が水と共に冷却されるため、やがて空気と水の温度差が低くなり、⑤まで変化する。そして最後は②と同じ位置に当たる⑥まで変化する。幅が1000mmの熱交換器は熱交換性能が高く、冷却室内の冷却完了までに要する時間は短くなるが、扉開放時の外部からの侵入熱と AMR の冷凍能力の差が大きくなり、水の温度は高くなる。

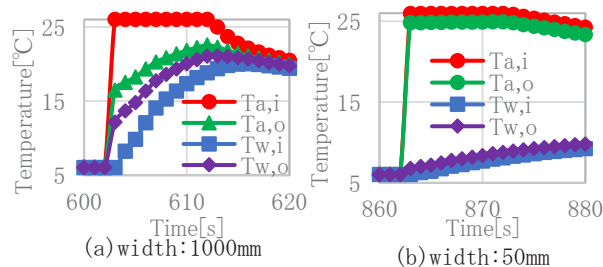


Fig.3 Temperature traces
at the each point on a heat exchanger

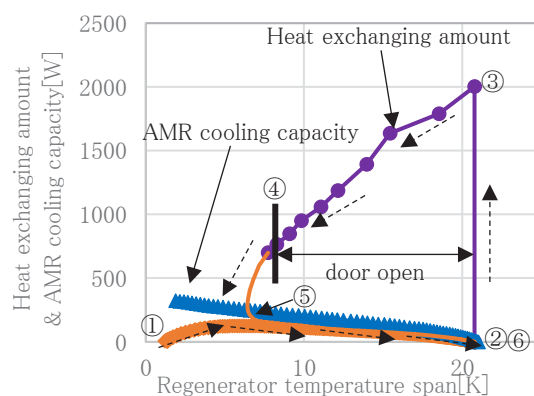


Fig.4 Heat exchanging amount & AMR cooling capacity vs. regenerator temperature span (width:1000mm)

3. 結論

性能の高い熱交換器を用いると、扉開放時の交換熱量と AMR の冷凍能力の差が大きくなり、AMR 内の水の温度は高くなるが、扉を閉めたときに庫内の温度を早く下げることができることが示唆された。

液体水素タンク内部圧力の時間変化における充填率依存性

Filling ratio dependence of time variation of pressure inside liquid hydrogen tank

永廣 衛, 松田 竜之介, 武田 実, 前川 一真(神戸大)

NAGAIRO Mamoru, MATSUDA Ryunosuke, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)

E-mail: m.nagahiro628@gmail.com

1. はじめに

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

これまでの研究では、液体水素の貯蔵における液体水素タンク内部圧力の時間変化に関する研究を行ってきた[1]。しかし、貯蔵時の充填率の違いによる圧力変化への影響についての研究は、まだ行われていなかった。そこで、本研究では充填率をパラメータとした際の、液体水素タンク内部の時間経過による液面・温度・圧力挙動の詳細を明らかにすることを目的とする。また、タンク内部圧力変化予測式についても検討したので報告する。

2. 実験装置

Fig. 1 に実験装置概要図を示す。本実験では液体水素用光学クライオスタット、防爆型圧力トランスミッタ、CCS 温度計(T1~T6)、超伝導 MgB₂液面センサー(B1)を使用した。光学クライオスタットは全高 1327 mm、液体水素槽(約 20 L)、液体窒素槽(約 15 L)、断熱真空槽で構成された貯蔵容器である。液体窒素槽より下には 77 K アルミシールドが取り付けられ、熱侵入を防いでいる。

3. 実験方法

2000 L 液体水素タンクとクライオスタットをトランスファチューブで接続し、圧力差を利用して液体水素槽に液体水素を充填した。充填後、大気圧下・自然入熱にて放置し、所定の液面高さに調節した。その後、バルブを閉め密閉し、タンク内圧 0.4 MPaG まで蓄圧を続け、タンク内部の温度・圧力の測定を行った。蓄圧時の実験条件は、充填率の違いが圧力上昇に与える影響を調査するために次のように設定した。1) 液体状態は成層状態(タンク壁面からの自然入熱のみ。液相には温度分布が存在する状態。)。2) 充填率は 75、60、50、30、25、10%。

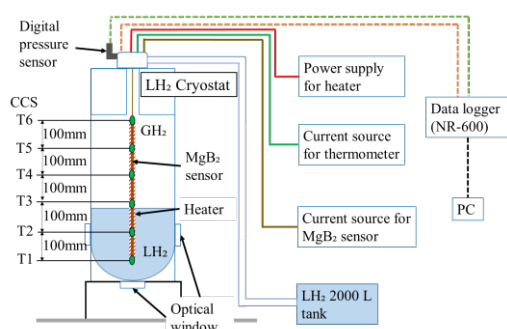


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup.

4. 実験結果と考察

Fig. 2 に充填率 50%からの蓄圧試験の測定結果を示す。蓄圧開始時点での液相内部の平均温度は 20.0 K と、飽和温度 20.3 K に近い値となった。蓄圧完了時点(0.4 MPaG)での液相内部の平均温度は 25.1 K となり、0.4 MPaG 下の飽和温度 27.1 K よりも低い値となった。蓄圧が進むにつれ、液相内部はサブクール状態となることが確認された。圧力上昇については、充填率 75~43%の試験では、蓄圧開始から 500 s 付近まで高い圧力上昇率を示す挙動が確認された。充填率 50%では蓄圧時間が最も長くなり、充填率 75%が最短になることが確認された。

次に、タンク内部圧力変化予測式について説明する。「熱侵入 Q_w のみが発生する閉じた一定容量 V の極低温タンクの圧力変化率の方程式」である式(1)を参考に[2]、時間経過における圧力変化を予測した。ここで ϕ はエネルギー導関数である。

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{hsp} = \frac{\phi Q_w}{V} \quad (1)$$

時間経過に伴う圧力変化において、予測式と実験結果と比較すると、成層状態・充填率 25%の試験と最も一致する結果となった。

5. まとめ

液体水素タンク蓄圧試験において、充填率をパラメータとしてクライオスタット内部の温度・液面・圧力の計測を行った。結果として高い充填率では、蓄圧開始直後は圧力上昇率が高く、また蓄圧時間は短くなることが確認された。また、圧力変化予測式は充填率 25%の圧力上昇曲線と最も一致することが分かった。

今後の課題は、計測できなかった充填率での蓄圧試験や、タンクに振動を加えた際の蓄圧試験に加え、より広い範囲の充填率における圧力変化予測式の構築を目指す。

最後に、トヨタ自動車(株)からのご支援に感謝いたします。

参考文献

1. M.Nagahiro et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) p. 47
2. C.-S. Lin et al.: "A Pressure Control Analysis of Cryogenic Storage System", Joint Propulsion Conference, Vol. 27 (1991) p. 1-8

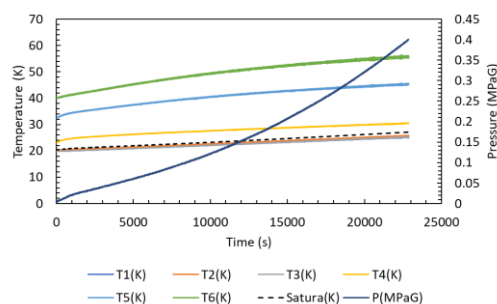


Fig.2 Time chart of temperature and pressure inside the LH₂ cryostat with filling ratio of 50%.

ガス冷却ペルチェ電流リードの熱侵入量見積り Heat leak estimation of gas-cooled Peltier current leads

イワノフ ユーリ、渡邊 裕文、筑本 知子、山口 作太郎 (中部大学)

IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)

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

1. Introduction

The amount of heat that enters cryogenic zone from the environment determines the economic efficiency of the HTS devices. Heat flows through the thermal insulation, as well as through the so-called thermal bridges (supports, suspensions, pipelines, and current leads). The balance between the heat flow through the current lead and the Joule heat generation determines the optimal form factor providing a minimum heat leak of about 50 W/kA at operating current. In our approach, Peltier element, which is sequentially built into the current lead, creates counteraction to the natural flow of heat reducing the heat leak by about 30%. A further reduction can be achieved by cooling the current lead with an evaporating coolant. The experimental study of gas-cooled current lead combined with the Peltier element was carried out for the first time. An additional 30% reduction in heat leak was confirmed.

2. Experimental set up

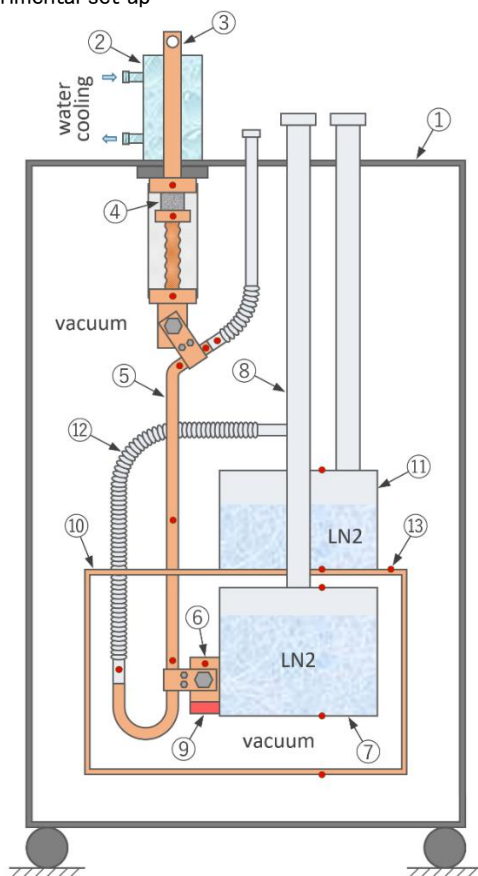


Fig. 1. The design of the test bench adapted for cooling copper conductors with evaporating nitrogen.

Test bench shown in Fig. 1 operates as follows. The electric current enters cryostat 1 through the water-cooled 2 copper rod 3. The Peltier element(s) 4 operates as heat pump, partially preventing the penetration of heat through the rod conductor 3. Then the current goes through the copper pipe

5 to the copper block 6, which simulates the superconductor, and then through the second same circuit (not shown) returns to the external current source. Heat entering the copper block 6 evaporates liquid nitrogen (LN2) in the lower tank 7. Cold nitrogen escapes through the pipe 8. The heat leak is determined by measuring the nitrogen gas flow rate. Heater 9 is used for calibration. To provide high-quality thermal insulation of the measuring tank 7, the heat shield 10 is cooled by LN2 contained in the upper tank 11. The pipe 8 passes through the upper tank 11 to prevent conductive heat inflow into the lower tank 7. In addition, superinsulation (not shown) is used. If the outlet of the pipe 8 is closed, then the outgoing through the stainless steel pipe 12 cold gas will enter the copper pipe 5 reducing the heat leak to the copper block 6. Red dots 13 show the location of the thermocouples.

3. Results

With standard design of the PCL (i.e. when cold gas exits through the stainless steel pipe 8), the minimum heat leak is 38.4 W/kA at 85 A. Additional gas cooling (i.e. when cold gas passes through the copper pipe 5) reduces heat leak by 30% to 26.8 W/kA at 99 A (Fig. 2), which is a record figure. It is instructive to note that the PCLs have a significant advantage over the standard cryogenic current leads if the system is de-energized from time to time. In this case, the low thermal conductivity of the Peltier elements interfere with the conductive heat inflow through the metal rod. The efficiency of the gas-cooled PCL can be increased by improving the heat transfer in the pipe. In the simplest case, internal finning can be applied. When designing a commercial PCL, it is necessary to avoid the use of rigid structures that could mechanically damage Peltier elements when the system cools down.

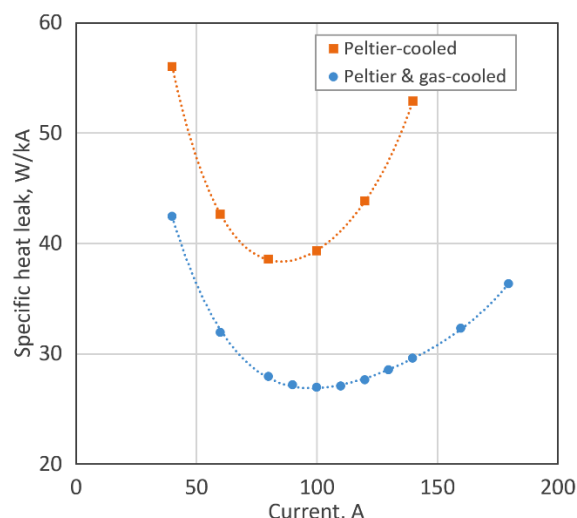


Fig. 2. Specific heat leak of standard and gas-cooled PCLs.

References

1. S. Yamaguchi et al.: *Rev. Sci. Instr.* **75** (2004) 207-212
2. Y. V. Ivanov et al.: *Phys. Procedia* **81** (2016) 187-190

積層 REBCO 導体の AE センサを用いた劣化診断の可能性検討 Possibility study on Degradation Diagnosis of Laminated REBCO Conductors Using AE Sensors

青柳 晃太, ニノ宮 晃, 野村 新一 (明治大); 小野寺 優太, 三戸 利行, 力石 浩孝 (NIFS)

AOYAGI Kouta, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ); ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki, CHIKARAISHI Hiroataka (NIFS)

1 REBCO 線材を用いた大電流導体の研究開発

現在, 次世代の核融合実験装置に向けた大電流容量の高温超電導導体が研究開発されている [1]. 核融合用高温超電導導体は大電流容量に対応する必要がある, 交流損失の低減や導体の電流分布を均一にするために複数の線材を組み合わせた導体構造が提案されている. 現在, NIFS(核融合科学研究所)では, FAIR (FSW, Al alloy jacket, Indirect cooling, REBCO tapes) 導体の研究開発が行われている. FAIR 導体は REBCO 線材と高純度アルミニウム板を交互に積層し, 円柱状のアルミニウムジャケットに収め, 蓋を摩擦攪拌接合 (FSW) したものである. この導体は製造工程の最後に電流分布と機械的特性を均一にするために導体を捻る. しかし, 研究開発過程において均一な FSW を行えなかったことにより REBCO 線材が局所的に強固に固定されている部分とされていない部分ができまわっていた. そのため, 導体を液体窒素温度にまで冷却する際にアルミと REBCO 線材の熱収縮率の違いによって REBCO 線材に局所的に大きな圧縮ひずみがかかり, REBCO 線材が座屈し, 期待していた電流容量が得られないといった問題が発生していた [2]. これまで極低温環境下での HTS 導体の磁化特性から劣化状態を評価する手法が試みられているが, 室温環境下でも線材内部の傷を比較的容易に直接計測できる有効な手段を見出すことも重要であると考えられる. 本研究はアコースティックエミッション (AE) センサを用いて超電導線材内部の状態を推定する手法の確立を目的としている. 講演では, REBCO 線材による積層を想定したサンプルを作成し, 超音波伝播特性から導体内部の欠陥を検出する手法の可能性を試みた結果について報告する.

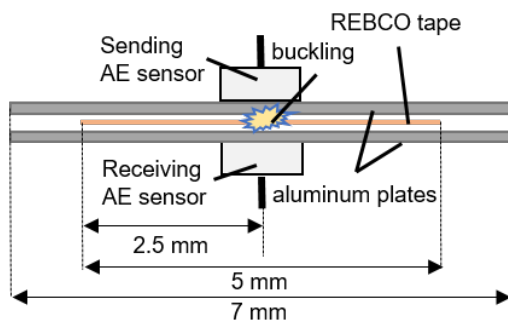


Fig. 1. Deterioration diagnosis method using AE sensor

2 AE センサを用いた超音波劣化診断

REBCO 線材を積層したサンプルとして REBCO 線材を厚さ 1.5 mm のアルミニウムプレート 2 枚で挟んだものを 2 つ用意した. この 2 つのサンプルのうち 1 つの REBCO 線材には圧縮応力を加え, 座屈させた. そして Fig. 1 のように AE センサをサンプルに対向配置した. 送信用の AE センサからパルス波を送信し, サンプルを挟んで受信用の AE センサで受信する. この操作を健全なも

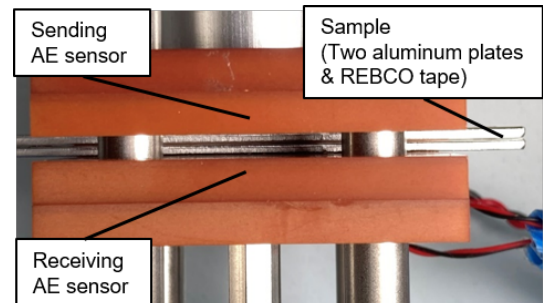


Fig. 2. Scenes from Degradation Diagnosis

のと座屈させたものの 2 つのサンプルで行った. そしてそれらの受信波形を 40 dB 増幅し, FFT 解析を行った. その際, 周波数領域の波形を 10 回の加算平均処理を行った.

3 内部診断結果

Fig. 3 に超音波劣化診断を行った健全及び座屈サンプルのリニアスペクトル波形及び, コヒーレンス関数値を示す. リニアスペクトル波形を見ると座屈を入れることによって特定の周波数のスペクトル値が減少するという結果が見て取れる. また, コヒーレンス関数値の値からもこれらの周波数帯は入力ノイズとは別の要因での減少ということもわかる. 本講演にてこれらの結果によって AE センサを用いた高温超電導導体に対する劣化診断の可能性について報告する.

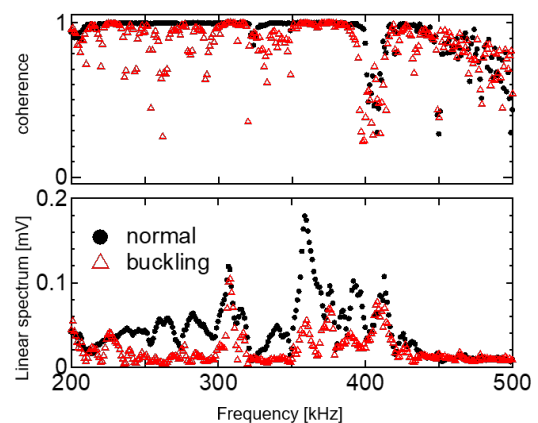


Fig. 3. Frequency dependence of linear spectrum and coherence

参考文献

- [1] 柳長門ほか: “核融合炉マグネットへの適用をめざした大電流高温超伝導導体の開発” 低温工学 (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.) Vol.54 No. 1 (2019)
- [2] Toshiyuki Mito *et al.*: “Improvement of I_c degradation of HTS Conductor (FAIR Conductor) and FAIR Coil Structure for Fusion Device” IEEE Trans, VOL. 31, NO.5, AUGUST 2021

エポキシ樹脂含浸 REBCO 超電導コイルの熱応力による剥離劣化に関する解析検討

Numerical study of delamination degradation of epoxy-impregnated superconducting coils wound with REBCO tapes caused by thermal stress

大屋 正義(関学); 三浦 英明, 服部 泰佑(三菱電機)

OHYA Masayoshi (Kwansei Univ.); MIURA Hideaki, HATTORI Taisuke (MELCO)

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

1. はじめに

液体ヘリウムを使わない医療用 MRI 向け超電導マグネットが NEDO プロジェクト (FY2016-2020) において開発され[1]、REBCO 線材を用いた 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットの試作が行われた。主要なシングルパンケーキコイルの内径は 560mm、外径は 670mm であったが、約 200 枚のコイルを製作して液体窒素中で単体通電試験を実施した結果、良品率は約 80%であった[2]。劣化コイルの詳細な解体調査の結果、線材のエポキシ樹脂含浸に対する離型不良により、冷却時に発生する熱応力によって超電導層が周期的に剥離することを究明した[3]。既に、対策を施した線材を用いてコイルを試作して改善効果を検証済みである[4]。

しかしながら、疑問として残るのは、たとえ離型不良が存在しても、内外径比 1.2 のコイルでは熱応力による剥離劣化は起こり難い点である[5]。本疑問を解消するため、コイルの詳細構造を考慮した熱応力解析を行って、熱応力の発生原因について検討を行った。

2. 解析モデル・条件

解析対象としたシングルパンケーキコイルの諸元を表 1 に、解析モデルを図 1 に示す。線材の Hastelloy 基板は 75 μ m 厚、超電導層と中間層はまとめて 4 μ m 厚、銀層は 2 μ m 厚、銅メッキ層は 20 μ m 厚でモデル化した。

コイルの上下面には異なる厚さのエポキシ樹脂層と FRP 板を設け(図 1 参照)、表 2 に示す 5 ケースについて、300K から 77K まで冷却したときの熱応力を解析した。樹脂厚が上下で異なるのはコイルを寝かせて含浸する工程に起因しており、FRP 板を張り付けたのは冷却時に発生するコイルの反りを抑制するためである。

3. 解析結果

解析結果の概要を以下にまとめる。

- A) 上下の樹脂厚が等しいと、収縮時にコイルは反らない。
 - B) 上下の樹脂厚が異なると、樹脂が厚い側に反る。
 - C) 樹脂の厚い面に FRP 板を張り付けると、逆向きに反る。
 - D) 樹脂の薄い面に FRP 板を張り付けると、反りが増加する。
 - E) 両面に FRP 板を張り付けると、反りは僅かに小さくなる。
- 本結果は、構成材の熱収縮率 (FRP < コイル < 樹脂) とヤング率によって説明できる。

5 ケースの解析結果について、線材幅方向中心 ($z=0$) における径方向の熱応力 (各線材の基板と超電導層の界面の応力を抽出) を比較して図 2 に示す。理想的なコイル A に対して、上下の樹脂厚が異なるコイル B では反りは発生するが応力は同等である。しかしながら、FRP 板を片面に張り付けたコイル C と D では最大 15MPa、両面に張り付けたコイル E では最大 30MPa 程度の応力が発生し、超電導層が剥離して劣化する可能性が高い。FRP 板を張り付けたことで内外径比 1.2 のコイルでも過剰な熱応力が発生したと推察する。

4. まとめ

エポキシ樹脂含浸コイル上下面の樹脂厚差によって冷却時に発生するコイルの反りを解析で再現した。反りを抑えるために FRP 板をコイルに張り付けた場合、コイルと FRP の熱収縮

率差に起因して径方向の熱応力が増加する。両面に張り付けた場合の最大応力は 30MPa を超える。線材離型不良と FRP 補強が重なったことで、冷却時に過剰な熱応力が発生して超電導層が剥離し、コイルの良品率が低下したと考える。

Table 1 Specifications of single-pancake coil

Inner diameter (mm)	560
Outer diameter (mm)	760
Height (mm) *w/ upper and lower epoxy layers	4.4
Turn number	200

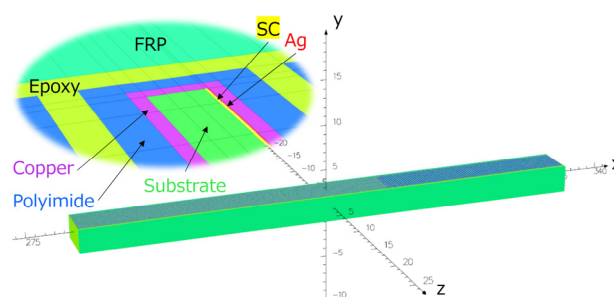


Fig.1 Numerical model of single-pancake coil (1/720 division model in circumferential direction)

Table 2 Thickness of each layer attached to coil surface

	A	B	C	D	E
Upper FRP plate (mm)	-	-	0.2	-	0.2
Upper epoxy layer (mm)	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25
Lower epoxy layer (mm)	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05
Lower FRP plate (mm)	-	-	-	0.2	0.2

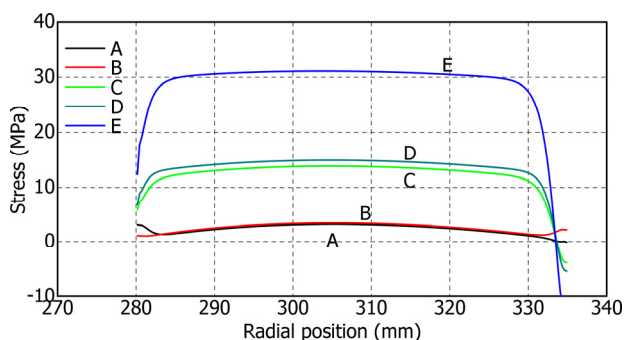


Fig.2 Radial stress at axial center ($z=0$) of each coil

参考文献

1. T. Hattori, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 100 (2020) p.91
2. H. Miura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.132
3. T. Kiss, et al.: "Hybrid microscopy to clarify failure mechanisms of REBCO tapes in meter-class pancake-coils", presented at MT27 (2021)
4. H. Miura, et al.: "Study of the basic properties of meter-class REBCO high-temperature superconducting coils for MRI", presented at MT27 (2021)
5. H. Miyazaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015) #6602305

粒子法による REBCO テープ線の塑性変形シミュレーション Simulations on Plastic Deformation of REBCO Tape by Particle Methods

間藤 昂允, 野口 聡(北大)

MATO Takanobu, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

E-mail: mato@em.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

無絶縁 REBCO 内挿マグネットによる 45.5 T 発生実験後, REBCO テープ線に塑性変形が見られた[1]. この実験以外にも, 多くのマグネット実験で塑性変形が観測されている. そして, このような塑性変形が励磁時に生じている可能性が指摘されている. 20 T 超の高磁場下で運転する REBCO 内挿マグネットには, 電磁力により非常に大きな応力が作用する. その結果, 塑性変形や座屈が生じ, テープ線に永久ひずみが生じたと考えられる. マグネットのさらなる高磁場化に向け, 塑性変形がどのように生じるかを明らかにする必要があり, 世界中で変形解析のモデル化も進められている[2].

我々は, 塑性変形を考慮した粒子法による REBCO テープ線の機械解析手法を開発し, 励磁時における短線 REBCO テープ線の塑性変形解析を行ったので, 報告する.

2. 解析モデル・解析結果

電流解析は遮蔽電流を高速に精度良く計算できる三次元 PEEC モデルで実施した[3]. 塑性変形解析には, 大変形および塑性変形の表現力が高い粒子法を採用し[4], 電流解析と連成することで機械的振舞いの調査を行った. REBCO テープ線材は Hastelloy および銅の複合材として TABLE I に示される機械特性を有しており, 完全塑性体として振る舞うとした[5].

本講演では図 1 に示される REBCO 短線試料の塑性解析を行う. REBCO 単線試料の両端がクリップで固定され, 外部マグネットにより, テープ線と 18 度の角度をなす磁場を 1.0 T/min の速度で 2 T まで増加させる. なお, テープ線に強制電流は流していない.

120 秒の解析結果を図 2 に示す. 遮蔽電流はテープ面の上下端から徐々に侵入し, 外部磁場の増加とともに電磁力は増大する. 60 秒経過時, テープ上下面に 130 N/mm² の電磁力が広く作用し, 図 3 に示されるように REBCO テープ面内に大きなせん断力が作用する. 図中赤色の部分は塑性領域であり, テープ固定端およびテープ面中心から塑性変形が進行する. 90 秒(外部磁場 1.5 T)ではテープ面中心部の塑性領域が伸びを続け, 初期状態と逆向きの磁場が鎖交し始める. 結果, 変形を戻すような向きに電磁力が働き, テープ線の幅方向と外部磁場が同じ方向を向くように変形し続ける.

有限要素法による解析結果と比べると[4], 励磁初期の弾性変形量が少ないが, 実験により得られたテープの S 字断面が再現されている. 詳細は当日発表する.

参考文献

[1] S. Hahn *et al.*, *Nature*, **570**, 496–499, 2019.

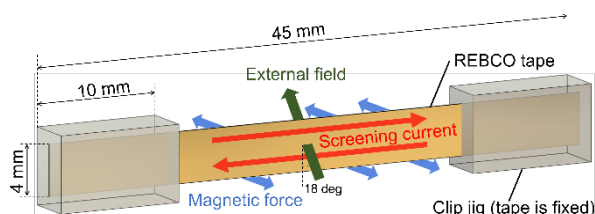


Fig. 1. REBCO tape during magnetic field excitation. A large magnetic force works to tape due to screening current as depicted in the right side of figure.

- [2] Xinbo Hu *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **33**, 095012, 2020.
[3] S. Noguchi *et al.*, *Abstract of CSSJ Conference*, **101**, 3A-a04, 2021.
[4] G. R. Liu and M. B. Liu, World scientific publishing, 2003.
[5] C. C. Clickner *et al.*, *Cryogenics*, **46**(6), 432–438, 2006.
[6] S. Noguchi *et al.*, *Abstract of CSSJ Conference*, **101**, 3A-a05, 2021.

TABLE I
REBCO TAPE SPECIFICATIONS, MATERIAL PROPERTIES,
AND SIMULATION CONDITIONS

Parameters	Value
REBCO Tape	
Tape width [mm]	4.0
Tape thickness [mm]	0.050
Tape length [mm]	45
Tape clip length (both edge) [mm]	10
Material Properties	
Mass density [kg/m ³]	8890
Young's modulus [GPa]	182
Shear modulus [GPa]	68
Yield strength [MPa]	800 [5]
Simulation Conditions	
Operating temperature [K]	4.2
Field angle [deg]	18
Field sweep rate [T/min]	1.0

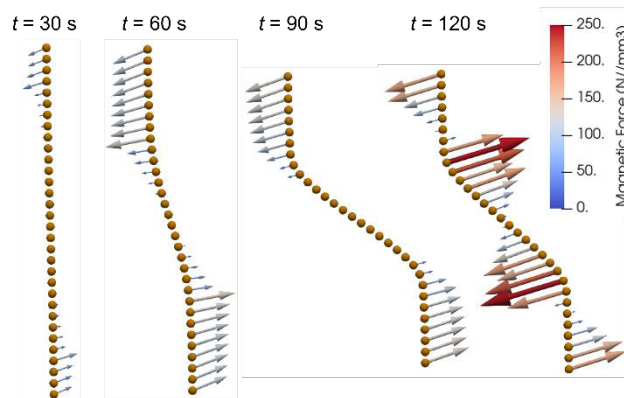


Fig. 2. REBCO tape deformation of middle part in cross view. Arrows show magnetic force.

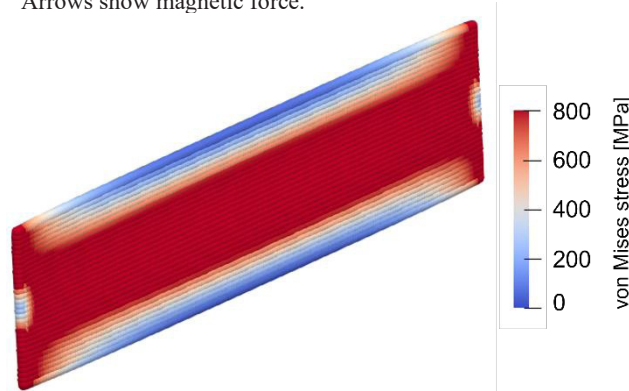


Fig. 3. Distribution of von Mises stress in REBCO tape at $t = 60$ s. Plastic regime regions starts to spread from fixed edge, followed by middle part of tape.

無絶縁 REBCO マルチコイルシステムにおける遮蔽電流磁場解析手法の比較

Comparison of screening current-induced magnetic field analysis methods in No-Insulation REBCO multiple coil system

小久保 早希, 村上 将吾, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡山大); 野口 聡(北大)

KOKUBO Saki, MURAKAMI Shogo,

ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI Sou (Hokkaido Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々の研究室では、次世代医療用加速器や高磁場 MRI の実現を目指し、無絶縁(No-Insulation)REBCO 超電導コイル(NI コイル)の開発に関する研究を行っている。これらの応用においては、時間的・空間的に高い磁場精度が求められるが、REBCO 線材がテープ形状のため、磁場変動に伴って誘導される遮蔽電流によって磁場精度が悪化することが問題となる。そこで無絶縁 REBCO コイルの特性(励磁遅れ)を考慮した遮蔽電流解析を開発し、磁場精度を向上させる方法を模索してきた。今回は、遮蔽電流解析に必要な計算時間を短縮するため、電気回路に基づく遮蔽電流磁場簡易計算手法を適用し、これまで用いていた 3 次元電磁場解析手法(有限要素法+高速多重法)との比較・評価を行ったので報告する。

2. 解析方法

解析対象は先行研究[1]で試作・実験した 10T 級マルチ絶縁 REBCO コイルで、その概略図を Fig.1 に示す。

2.1 3次元電磁場解析手法(有限要素法+高速多重法)

遮蔽電流解析は以下の(1)式で示す支配方程式に基づくプログラムを用いており、有限要素法と高速多重法を適用した 3 次元線形遮蔽電流解析[2]である。また Fig.1 に示される解析対象のマルチコイルシステムの等価回路から導かれる(2)式の回路方程式を解き、周方向電流を算出して、その電流による磁場を(1)式の右边に入力した。

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

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

2.2 遮蔽電流磁場簡易計算手法

径方向分割型解析手法[3]に対して、[4]で提案された遮蔽電流磁場の簡易計算手法を適用する。Fig.2 に示すように、径方向分割計算手法の各要素に対し、灰色網掛けで示す二次回路を設けることで磁束変化に伴う誘導・遮蔽電流解析を行う。このとき要素 i における等価回路について式(3)が成り立ち、要素 i の二次回路については式(4)が成り立つ。これらを全要素について連立して解くことで、各要素の周方向電流及び遮蔽電流を計算することができる。

$$\sum_{j=1}^m M_{ij} \frac{dI_{\theta j}}{dt} + \sum_{j=1}^m M_{sci, \theta j} \frac{dI_{scj}}{dt} + \frac{R_{rei} R_{sti}}{R_{rei} + R_{sti}} I_{\theta i} = R_{cti} (I_t - I_{\theta i}) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m M_{sci, \theta j} \frac{dI_j}{dt} + \sum_{j=1}^m M_{sci, scj} \frac{dI_{scj}}{dt} + R_{sci} I_{sci} = 0 \quad (4)$$

3. 解析結果

解析結果については、発表当日に報告する。なお本研究の一部は科研費(基盤 S : 18H05244)によった。

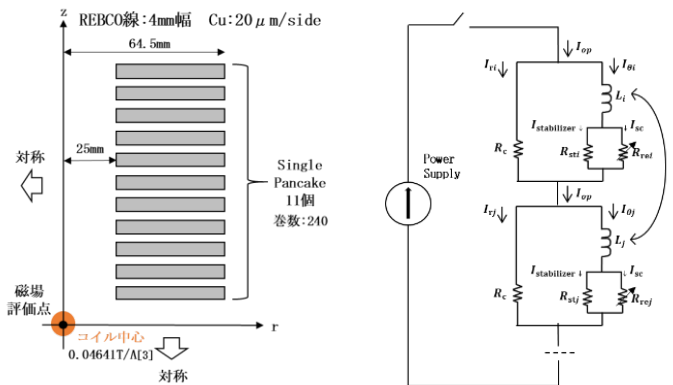


Fig.1 NI model pancake coil schematic and equivalent circuit

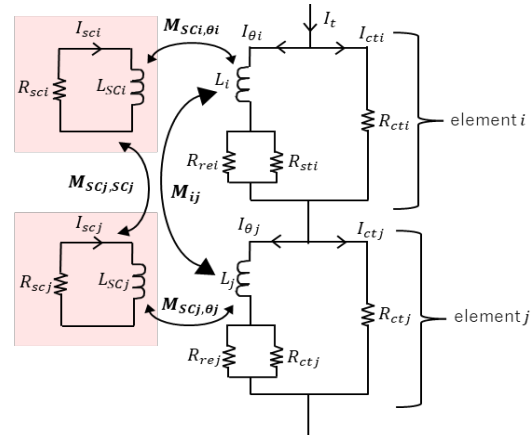


Fig.2 Equivalent circuit in An Equivalent Electrical Circuit Model

参考文献

1. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23(2013),3, 4100805
2. X. Wang, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, 26(2013), 035012
3. 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
4. 野口聡, HAHN Seungyon, 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

伝導冷却型 MgB₂ マグネットによる高速励磁試験および MRI 撮像試験

Fast ramp-up test and MR imaging test using a conduction-cooled MgB₂ magnet

青木 学、一木 洋太、藤田 晋士、児玉 一宗、小瀧 博司、鈴木 孝明、田中 秀樹(日立)

AOKI Manabu, ICHIKI Yota, FUJITA Shinji, KODAMA Motomune, KOTAKI Hiroshi, SUZUKI Takaaki, TANAKA Hideki
(Hitachi, Ltd.)

E-mail: manabu.aoki.ek@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂ は 10 ～20 K 程度の中温域で使用可能な超電導体であり、冷凍機による伝導冷却にて運用することで希少資源であるヘリウムの使用量を低減することが期待されている。また、従来の低温超電導コイルと比較して、銅やステンレスに代表されるコイル構成材料の比熱が 10 倍以上大きな温度領域で運転可能なことから励消磁に伴う交流損失による温度上昇を抑制でき、伝導冷却型マグネットにおいても高速な励消磁が可能なが期待されている[1]。そこで本研究では、中心磁場 0.4T の伝導冷却型マグネットを製作し、数分程度の高速励磁が可能か検証した。

また、PIT法(Powder in tube method)にて製作される MgB₂ 線材は、MgB₂ 素線を断面内に多数配置した多芯構造とツイスト加工とが実現可能なことから、遮蔽電流による磁場ドリフトを抑制可能なことも期待される[2]。これにより、1ppm/hr 以下にも及ぶ高い磁場安定度が要求される MRI 装置への応用も期待される。そこで、MgB₂ マグネットの磁場安定度を評価するとともに MRI 撮像を実施して、MRI 装置への適用可能性も検証した。

2. 伝導冷却型 MgB₂ マグネットおよびMRI撮像装置

Fig.1 に示すように伝導冷却型マグネットは直径 1100 mm の MgB₂ コイル 2 個と C 型リターンヨークからなるオープン型マグネットである。定格電流 168A を通電することで、磁石中心に位置した直径 200mm の球空間に 0.4T の磁場を生成可能である。運転はドライブモードにて実施した。C 字リターンヨークまで含めたマグネットのインダクタンスは約 4H である。

MgB₂ コイルの製作には巻線後に熱処理して MgB₂ を生成するワインドアンドリアクト法を採用した。使用した MgB₂ 線材は in-situ PIT 法にて製作した素線数 10 の多芯線材で、その臨界電流は温度 15K で 349A/mm²@3T である。

MRI 撮像には永久磁石タイプ MRI 用の撮像システムを特に改造せずに使用した。ただし、MRI 撮像する際には遮蔽電流による磁場ドリフトに加えて励磁電源起因の磁場変動を抑制する必要がある。そこで、MRI 撮像時には 3 分で 0.3ppm 以下の時間安定度を有する高安定電源 (Danfysik 社 Model354) を使用した。

3. 試験結果

Fig.2 に高速励磁試験の結果を示す。試験はコイル温度と電圧を監視しつつ、励磁速度を段階的に早めていく方式にて実施した。結果、励磁速度を 2A/s まで早めてもコイル温度上昇は 3.8K 程度であり、本マグネットの臨界温度 25K に対して 10K 以上の裕度を有することが確認できた。これにより、本マグネットは磁場がゼロの状態から少なくとも 84 秒にて 0.4T の磁場を生成可能なが確認できた。

中心磁場の変動を NMR センサを測定した結果、磁場変動は 0.2ppm/hr 以下であり、MRI 撮像に十分な磁場安定度を有することを確認した。また、電磁ノイズ対策が不十分といった要因から臨床レベルの画質には及ばなかったが、Fig.3 に示すように人体の脳を対象とした MRI 撮像が伝導冷却型 MgB₂ マグネットにて可能なことも確認した。

Receiver coil for MRI C shaped return yoke

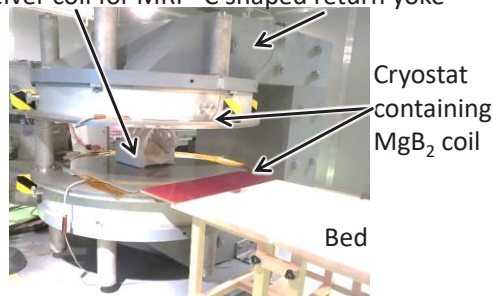


Fig1. External view of MgB₂ superconducting magnet

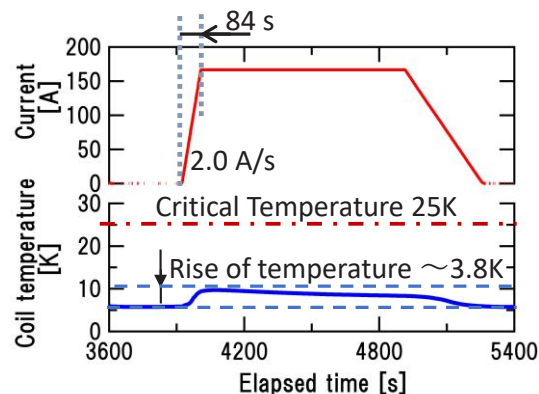


Fig2. Fast ramp-up test

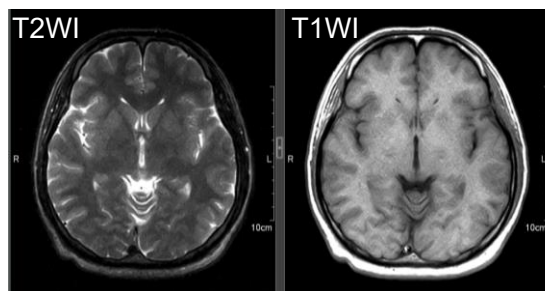


Fig.3 Example of MR images

4. まとめ

従来の低温超電導コイルと比較して高い運転温度で運用でき、高速な励消磁が可能なが期待される伝導冷却型 MgB₂ マグネットを開発した。製作した MgB₂ マグネットは少なくとも 84 秒の所要時間で 0.4T の中心磁場を生成可能であることを確認した。また、MRI 装置にも適用可能な 0.2ppm/hr 以下の磁場安定度も有し、人体の脳を対象とした MRI 撮像が可能なが確認した。

参考文献

1. Kodama M et al 2021 Supercond. Sci. Technol. 34 025018
2. Y. Yanagisawa, et al.: Journal of CSJ, Vol. 48 (2013) p.165

無絶縁積層 REBCO コイル巻線内の局所発生・拡大の監視法

結城 拓真*, 津吉 杏佳, 根元 羽衣, 北村 真由, 石山 敦士(早稲田大学)

Detection of local deterioration in no-insulation REBCO coils

Takuma Yuuki, Kyouka Tsuyoshi, Ui Nemoto, Mayu Kitamura, Atsushi Ishiyama(Waseda University)

E-mail: bear0619@fuji.waseda.jp

1. はじめに

我々は、高磁場 MRI や次世代医療用加速器をターゲットとした高温超電導コイルシステムの開発に取り組んできた。二律背反の関係にある高熱的安定化と高電流密度化を両立する手段として、電気絶縁を施していない REBCO 超電導線を巻線した無絶縁コイル(NI コイル)に着目した^[1]。NI コイルでは周方向だけでなく径方向にも電流が流れるため、従来の絶縁コイルに比べて複雑な電磁現象が起きる。そして NI コイル内の局所劣化に対する適切な検出法・基準はまだ確立されていない。熱的安定性の高い NI コイルでは、局所劣化が発生した場合においても継続して運転できる可能性が示されている^[2]。しかし一方で実運転を想定すると、新たな局所劣化の発生や劣化領域の拡大などに対する検出法(コイルの健全性の監視法)に関しても十分な検討を行う必要がある。先行研究では、無絶縁 REBCO コイル内の劣化発生をコイル両端電圧に加え、ピックアップコイルにより計測する方法について実験と解析の両面から評価した^[3]。今回は、励磁と減磁の繰り返しなどにより新たに発生・拡大した劣化・欠陥の影響がコイル両端電圧の変化にどのように現れるかについて数値解析に基づき評価したので報告する。

2. 解析手法・条件

解析には、PEEC モデルによる電流分布解析と二次元有限要素による熱解析のモデルを用いた^[4]。この時のコイル諸元と I_c 劣化部分の位置を図 1 に示す。コイルは REBCO ダブルパンケーキコイルとし、内径は 40mm、運転温度 30K の伝導冷却とし、外部磁場は 10T とした。冷凍機の冷凍性能は 30K で 64W であると仮定した。また層間の接触電気抵抗値は $29.4\mu\Omega$ とした。そして、コイル励磁中に、上側パンケーキコイル中に健全な状態での臨界電流の 30、60、90%に臨界電流値が低下した局所劣化が発生したとしたときの、NI コイルの振舞い・コイル両端電圧の変化について解析・評価した^[5]。

3. 解析結果

劣化 NI コイル、劣化 INS コイル、正常 NI コイルそれぞれについて、 I [A/s]で励磁した時の解析結果の一例を図 2 に示す。横軸が時間、左縦軸が電圧、右縦軸が電流である。図 2 より、劣化 NI コイル、劣化 INS コイル、正常 NI コイルはそれぞれ、657[A]、380[A]、832[A]で熱暴走することがわかった。まず、劣化 INS コイルを見ると 380[A]で電圧が急激に上昇している。これは、周方向電流が最も I_c の低い 30%劣化に差し掛かったため、抵抗が発生し、熱暴走したのだと考えられる。次に、劣化 NI コイルを見ると、劣化 INS コイルが熱暴走した 380[A]付近から電圧が上昇し始め、最終的に 657[A]で熱暴走している。詳しい特性評価結果については当日報告する。なお、本研究の一部は科研費(基盤 S: 18H05244)による。

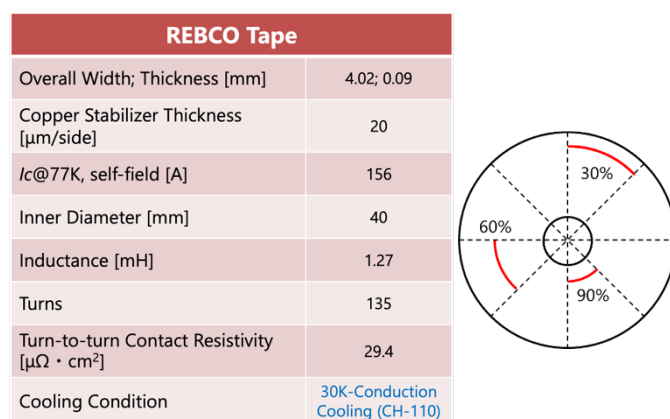


図 1 解析条件と I_c 劣化の箇所

Fig.1 Analysis conditions and I_c deterioration points

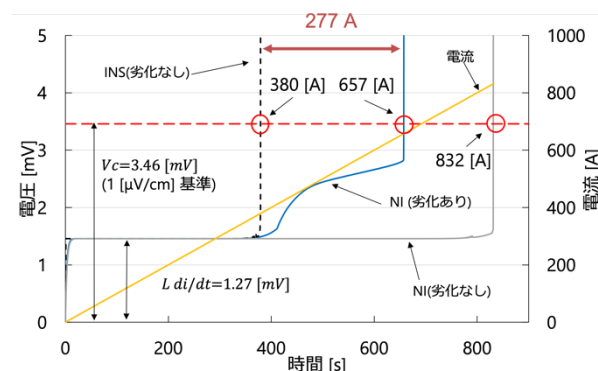


図 2 小口径 NI コイルの励磁解析結果

Fig.2 Excitation analysis results

参考文献

- [1] S. Hahn et al., Supercond Sci Technol, vol. 29, no. 10, Sep.2016, Art. no. 10517.
- [2] Y.Yoshihara, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.31 (2021) 9381674
- [3] 矢代他:2016 年度春季低温工学・超電導学会,1A-p06
- [4] T.Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 27, no. 4, June. 2017, Art. no. 0601206
- [5] Y. Kakimoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 4603005.

絶縁・無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける銅安定化層厚の影響

Effect of Cu-stabilizer thickness on transient stability in insulation
and no-insulation REBCO pancake coils

長瀬 大河、根本 羽衣、北村 真由、石山 敦士(早大)

NAGAFUCHI Taiga, NEMOTO Ui, KITAMURA Mayu, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は医療用加速器や全身用 MRI への応用を目指して、無絶縁 (NI) コイルの研究を進めてきた。巻線に用いる REBCO 線材は高温・高磁場下で高い臨界電流特性を持つが、劣化しやすく焼損事故につながる恐れがある。NI コイルは隣接層の銅安定化層を共有できるため、絶縁 (INS) コイルより銅安定化層を薄くすることで、REBCO 線材の優れた特性を活かしつつ安定性の確保と高電流密度化の両立が期待できる。また、図 1 に示すように、上記応用を想定した m 級大口径の NI コイルでは銅安定化層での発熱の影響が小さいことが示されており[1]、さらなる銅安定化層厚の削減が可能であると考えられる。そこで今回は、これまで行ってきた INS と NI コイルにおける銅安定化層厚の影響についての検討・評価をまとめ整理したので報告する。

2. 評価対象・方法

2.1 INS コイル：参考文献[2]で提案・報告した絶縁 REBCO コイルの銅安定化層の厚さの決定法を用いた評価結果を紹介する。この決定法は、常電導転移発生に伴う銅安定化層でのジュール発熱により断熱的に温度上昇したとして、設定した最高到達許容温度（例えば 200K）以下に抑えるための銅安定化層の厚さを求めるという方法である[2]。

2.2 NI コイル：表 1 に示す Case(1)~(3)の NI コイルの熱的安定性について解析を行った。熱的安定性の評価については、局所的な常電導転移が発生した時の銅安定化層での発熱 Q_{MT} に対し、常電導転移領域を回避して隣接層に転流する際に生じる発熱 Q_{PASS} （隣接層との層間電気抵抗によるジュール発熱）の割合が支配的であれば、ホットスポットの発生を回避でき熱的に安定であるという基準[3]のもと、銅安定化層を数 μm まで薄くしたときの影響評価を行った。

3. まとめ

例えば、INS コイルについての文献[2]の解析・評価の例（負荷率 70%：通電電流 350A）では、必要となる銅安定化層の厚さは $70\mu\text{m}/\text{side}$ であった。結果として電流密度が低下し、REBCO 線材の特性を活かすことが難しい。また今後 REBCO 線材の臨界電流特性が向上し、より多くの電流を流すことが可能になった場合、INS コイルでは I^2R の発熱量により銅安定化層をさらに厚くする必要がある。これに対し NI コイルでは、銅安定化層を共有できるため銅安定化層厚を削減しても安定性が保たれ、REBCO 線材の高い臨界電流

特性を活かしつつコイル保護が可能となると考えられる。さらに医療用加速器や全身用 MRI への応用を想定した内径 500mm 以上の大口径 NI コイルでは、 $2\mu\text{m}/\text{side}$ の銅安定化層厚でも熱的安定性が保たれることが示された[3]。本研究は科研費基盤研究 S (No.18H05244) に依った。

表 1 評価に用いた NI コイルの諸元

Table.1 Parameters of NI coil for assessment

Parameters	Assumed Values
REBCO conductor	
Overall width [mm]	4
Copper stabilizer thickness [$\mu\text{m}/\text{side}$]	Case(1),(2): 20, Case(3): 2
Tape I_c @77K, self-field [A]	115
Coil	
Turns per pancake	50
i.d. [mm]	Case(1): 60, Case(2),(3): 500
Height [mm]	10
Turn-to-turn contact resistivity [$\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$]	21
Analysis	
I_{op} [A]	345
I_{op}/I_c [%]	70
Operating Temperature [K]	30
Cooling condition	Adiabatic
External magnetic field in the z-direction, B_{ex} [T]	10

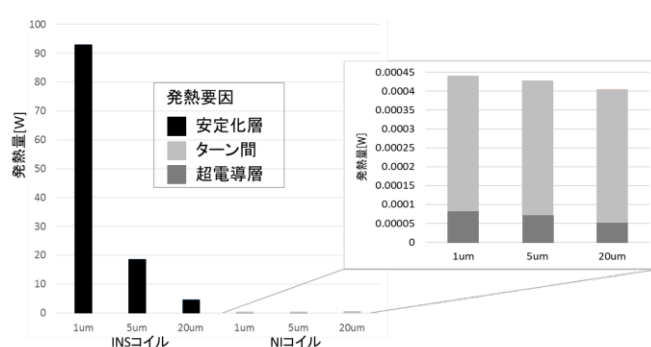


図 1 銅安定化層厚に対する INS・NI コイルの発熱量[1]

Fig.1 Heat generation of INS and NI coils on Cu-stabilizer thickness

参考文献

1. 池田他:2015 年秋季低温工学・超電導学会, 2A-a05
2. A. Ishiyama, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17(2007), pp.2430-2433
3. H. Onoshita, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 30(2020), 9001187

無絶縁 REBCO コイルの保護に関する検討

A study on the protection for no-insulation REBCO coils

濱田 一希, 北村 真由, 津吉 杏佳, 根本 羽衣, 石山 敦士 (早大); 野口 聡 (北大); 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力)

HAMADA Kazuki, KITAMURA Mayu, TSUYOSHI Kyoka, NEMOTO Ui, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: kazuki.hamada@akane.waseda.jp

1. はじめに

我々は高磁場全身用 MRI^[1]やがん治療用サイクロトロン加速器^[2]への応用を目的として、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、国内外で NI コイルの応用開発が進められているが、劣化・欠陥あるいは常電導転移時の NI コイルに適したコイル保護技術についてはまだ未確立の状況にある。今回は、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 (事故時にコイル両端を開放)^[3]の可能性・有効性を検証するため、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

解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。解析は PEEC (部分要素等価回路) モデルによる電流分布解析と FEM による熱解析を連成して行った^[4]。今回はコイル中央 25 ターン目の位置に、局所的な常電導転移 ($I_c=0$) が発生した場合を想定した。そして常電導転移発生から 0.1 秒経過した時点で電源を遮断した場合のコイル巻線内の過渡的な挙動を解析した。なお、冷却条件は断熱条件とした。また実応用を想定して、巻線内に層間接触不良領域が存在する場合についても、解析・評価を行った。

3. 解析結果

常電導転移発生 (0s) から 0.1 秒後に電源を遮断した場合の周方向電流分布を Fig.1 に示す。同図より、①常電導転移発生前、周方向電流は通電電流に等しく、隣接層に転流することなく流れる。②常電導転移発生後かつ電源遮断前、劣化が発生したターンの周方向電流値は減少し、その隣接層では周方向電流値が増加している。これは電流が劣化箇所を回避するように隣接層に転流しているからである。③電源遮断後、時間経過とともに周方向電流値が小さくなるのがわかった。これは NI コイル巻線内の層間電気抵抗によって蓄積エネルギーが回収されるからである。またこの時、ホットスポットの形成は見られず、NI コイル全体でほぼ均等に温度上昇することが確認された。以上より、事故時にコイル両端を開放することは NI コイルの保護技術として有効な手段である可能性が示された。

表1 無絶縁 REBCO パンケーキモデルコイルの諸元

Table.1 Specification of NI-REBCO pancake model coil		
REBCO Tape	Overall width [mm]	4.0
	Copper stabilizer thickness	20
	[μ m/side]	
Coil	I_c @77K, self-field[A]	115
	Inner diameter [mm]	60
	Turn-to-turn contact resistivity	200×10^{-6}
Coil	[$\Omega \cdot \text{cm}^2$]	
	Turns	50
	lop[A]	350
	lop/ I_c [%]	60
	External magnetic field [T]	10
Cooling condition		adiabatic

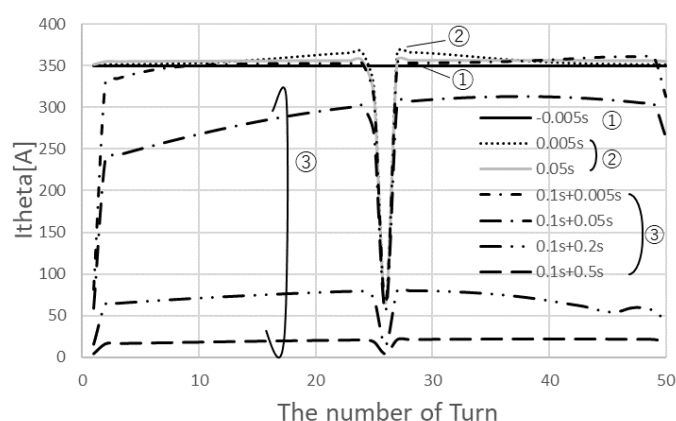


図1 劣化発生後の周方向電流分布

(①劣化発生前 ②電源遮断前 ③電源遮断後)

Fig.1 Time change of distribution of Azimuthal current
(① before defect occurred ② before opening coil ends
③ after opening coil ends)

本研究は、科研費・基盤研究 S(No.18H05244)に依った。

参考文献

1. H.Miyazaki, et al.: Supercond. Sci. Technol. 29(2016) 104001
2. H.Ueda et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.29 (2019) 4101105
3. T.Oki et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 26, (2016) 4702905
4. T. Wang et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, (2015) 4603409

大口径 10T 級 REBCO マグネット開発(1)クエンチ保護

Development of a 10T class large bore REBCO magnet (1) Quench protection

藤田 真司, 武藤 翔吾, 土屋 光揮, 平田 渉, 竹本 哲雄, 石井 雅晃, 大保 雅哉 (フジクラ)
 FUJITA Shinji, MUTO Shogo, TSUCHIYA Koki, HIRATA Wataru, TAKEMOTO Tetsuo, ISHII Masaaki, DAIBO Masanori
 (FUJIKURA)
 E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

REBCO 線材は優れた磁場中 J_c 特性と機械特性により、高磁場マグネットへの適用が期待されている。しかし、蓄積エネルギーが MJ 級の高温超電導マグネットではコイル保護が課題である。2013 年に我々が開発した大口径 5T-REBCO マグネットでは安定化銅を厚くすることでクエンチ保護を可能にしている[1]。今回、同様の保護思想で 10T 級の大口径マグネットの実現可能性を検討した[2]。

2. クエンチ保護検討

大口径 5T マグネットと同じ内径 260 mm で中心磁場 10 T のコイル設計を検討した。線材は 50 μm 厚基板, 4 mm 幅, 20 μm 厚銅めっきの人工ピン線材 (FESC-SCH04) とベースとし、それに 4 mm 幅の銅テープを貼合わせた構造の線材を想定した。外径 482 mm のシングルパンケーキコイルを 52 枚積層したコイルで、運転電流は 300 A、インダクタンスは 34 H、蓄積エネルギーは 1.5 MJ となった。保護回路を工夫することで遮断時の減衰時定数を 4.4 秒まで短くした結果、0.3 mm 厚の銅テープを貼合わせることでクエンチ時の最大温度を断熱計算で 300 K に抑えることができた。

銅テープの貼合わせ面について検討し、線材の超電導層がある面ではなく、基板側の面に貼合わせた構造を採用した。これは、巻き線時に超電導層により大きな圧縮歪を印加できる等の理由による。ただしこの場合、クエンチ時に銅テープに電流がうまく分流して発熱を抑える効果があるか検証する必要がある。そこで、0.3 mm 厚の銅テープを超電導層側に貼合わせた場合と基板側に貼合わせた場合で、短尺線材によるヒータークエンチ実験を伝導冷却下で行った (Fig. 1)。結果は Fig. 2 に示すように、どちらの面に貼合わせた場合もクエンチ後の到達温度は同等であった。そのため、基板側に貼合わせた場合でもクエンチ保護は可能であると考えられる。

銅を厚くすることで熱的安定性は向上するが、コイル電流密度が低下するため、所定の磁場を発生させるために必要な線材量は増加する。しかしながら口径が大きいコイルの場合、線材量の増加は口径が小さい場合ほど深刻ではない。銅を厚くするメリット・デメリットはあるが、確実にクエンチ保護できることは大きなアドバンテージであると考えられる。

3. 小口径 10 T 級コイル試作

0.3 mm 厚銅テープを貼合わせた構造の線材を用いて、10T 級の磁場を発生させた場合の挙動や、クエンチ特性、遮蔽電流特性を調査する目的で、小口径の 10 T 級コイルを試作した。使用した線材は、FESC-SCH04 に 0.3 mm 厚の銅テープを Sn で貼合わせた試作線であり、離形のためにフッ素コートポリイミドテープで絶縁したものである。作製したコイルの諸元を Table 1 に示す。コイルは最内ターンで接続したエポキシ樹脂含浸の 2 層パンケーキコイルであり、内径は 50 mm、外径は試験装置の都合 150 mm 以下になるようにした。2 層コイルを 16 個積層し、2 層パンケーキコイルごとに冷却用の銅板を挿入し、ボア内にはホール素子を設置した。完成したコイルの外観を Fig. 3 に示す。液体窒素中での通電試験の結果、 I_c , n 値ともに良好であった。伝導冷却による各種試験の結果および解析結果については次発表 2A-p05 で報告する。

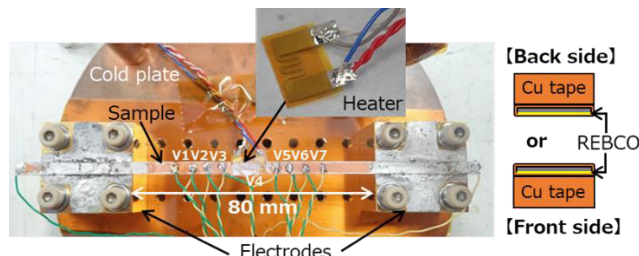


Fig. 1 Experimental Setup for quench tests of short samples.

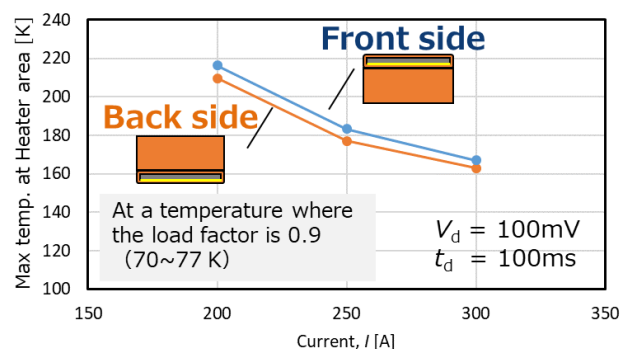


Fig. 2 Quench test results for samples laminated with Cu tape on the front side and back side.

Table 1 Specifications of REBCO tape and coil

REBCO tape	
Type	FESC-SCH04-FPI (laminated with 0.3mm thick Cu tape)
Tape dimensions	4.1 mm $\times$ 0.47 mm (with insulations)
REBCO coil	
Inner diameter	50 mm
Outer diameter	146 mm
Coil height	166 mm
No. of turns / pancake	93
No. of pancakes	32 (2 $\times$ 16)
I_c (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$) at 77 K	44.5 A
n -value at 77 K	24

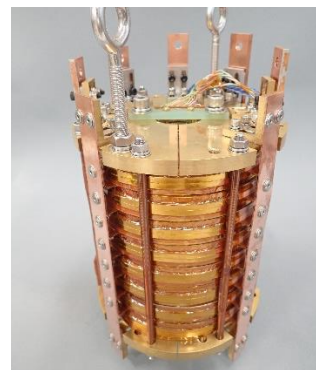


Fig. 3 Appearance of a 10T class test coil with a small bore.

参考文献

- [1] M. Daibo *et al.*, *IEEE TAS*, 23 (2013) 4602004.
- [2] S. Muto *et al.*, presented in *MT27*, THU-OR4-704-04 (2021).

大口径 10T 級 REBCO マグネット開発(2) テストコイルの通電試験および解析 Development of a 10T class large bore REBCO magnet (2) Evaluation and analysis of a test coil

武藤 翔吾, 藤田 真司, 土屋 光輝, 大保 雅載 (フジクラ)

MUTO Shogo, FUJITA Shinji, TSUCHIYA Koki, DAIBO Masanori (Fujikura Ltd.)

E-mail: shogo.muto@jp.fujikura.com

1. はじめに

我々は 2013 年に安定化銅を厚くすることでクエンチ保護を可能とする, 大口径 5 T-REBCO マグネット開発した[1]. 今回, 同様の保護思想で, 銅めっき REBCO 線材に銅テープを貼り合わせた線材を試作し, 10 T 級の大口径マグネットの実現可能性の検討を行っている[2]. その一環として, 小口径ボアの 10 T 級テストコイルを設計, 作製した. 小口径コイルについて通電試験と数値解析を行ったのでその内容について報告する.

2. 通電試験

作製したコイルをクライオスタットに取り付け通電試験を行った. まず, 32–77 K において通電し, コイルの臨界電流(I_c)を評価した. 電流-電圧(I - V)カーブを Fig. 1 に, I_c の磁場依存性を Fig. 2 に示す. 丸印が実験結果で, 実線が解析である. 実験結果は得られたコイル全体の I - V カーブから接続抵抗によるリニアな電圧成分を除いたものを示している. 解析結果は, 各線材の 77 K 自己磁場の I_c と, 代表的な短尺線材にて測定した温度, 磁場, 角度依存性を用いて導出した[3]. 実験と解析結果を比較すると良い一致が得られていることがわかり, 高い精度で線材 I_c からコイル I_c を予測することが可能であることがわかった.

次に, 最大定格電流である 500 A の通電を行った. 通電プロファイルを図 3 に示す. 初期温度 4 K にて通電を開始し, 途中ホールドしながら 500 A に達した. 500 A ホールド時のコイルの温度は約 10 K であり, コイル中心磁場は 9.48 T であった. 設計値は 9.78 T / 500 A であるので, 差分の 0.3 T は遮蔽電流磁場による影響と考えられる. また, 500 A 通電前後で 77 K の I_c を測定したが, 特性には変化がなく, 正常に励磁できることを確認した.

3. 遮蔽電流磁場評価

遮蔽電流磁場を定量的に評価するため, 実験と数値解析を行った. 数値解析は, 各ターンを同心円のリングと見なし, それをさらに線材の幅方向に分割して, コイル全体について各要素の相互作用を解く形で計算を行った[4-5]. 今回はコイル上下対称とし, 幅方向に 20 分割, 全体で約 3 万要素にて計算を実施した. 超電導層は薄板近似を行い, 電界電流特性は n 値モデルを用いて計算した.

Fig. 4 に 20 K, 275 A にて 1 時間ホールドしたコイル中心における遮蔽電流磁場の実験結果と数値解析結果を示す. 遮蔽電流磁場 dB は, ホール素子によって測定した実測磁場 B_{mes} と, 室温にて測定したコイル定数により計算した磁場 B_{cal} の差分($dB=B_{mes}-B_{cal}$)を取ることで計算した. 実線に実験結果を, 破線に数値解析結果を示している. 両者は良く一致しており, 数値解析によって遮蔽電流磁場を精度よく見積もることができた.

4. まとめ

大口径 10 T マグネットの開発にあたり, 設計の妥当性を確認するため小口径ボアの 10 T 級テストコイルの作製および評価を実施した. 最大定格 500 A, 9.5 T の励磁を行い, 電圧発生なく正常に動作することを確認した. また, 線材の I_c からコイル I_c を定量的に予測することが可能であり, 遮蔽電流磁場も数値解析結果と一致することがわかった. 今後はこのコイルにおいてクエンチ試験を実施する予定である.

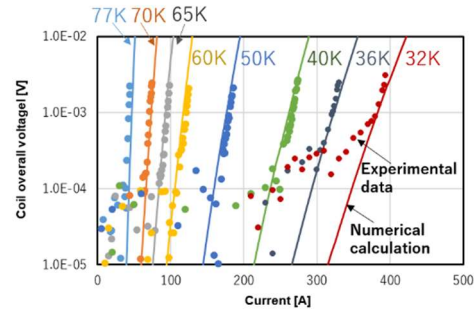


Fig. 1 Results of Current - Voltage curve at 30 – 77 K.

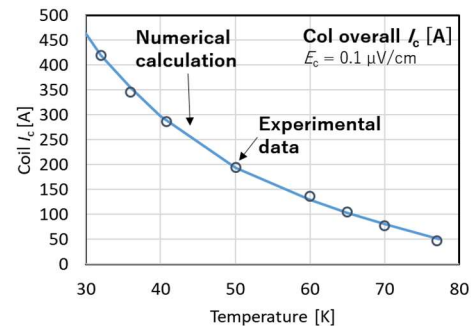


Fig. 2 Temperature dependence of critical current (I_c).

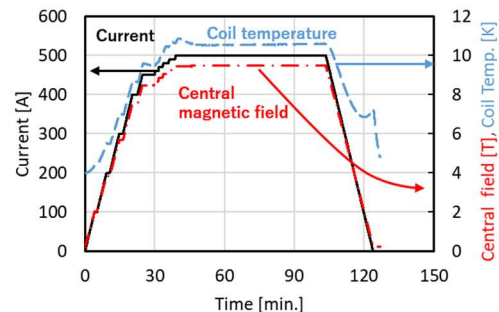


Fig. 3 History of current, central magnetic field and coil temperature during loading test up to 500 A.

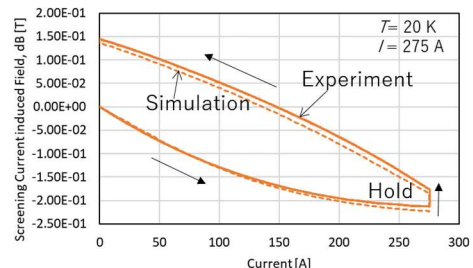


Fig. 4 Current dependence of the screening current-induced magnetic field at the center of the coil.

参考文献

- [1] M. Daibo, *et al.*, IEEE TAS, **23**, no. 3, (2013) 4602004
- [2] S. Muto, *et al.*, 27 th Int. Conf. Magn. Technol., THU-OR4-704-04
- [3] S. Muto, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, **98** (2019) 124.
- [4] E. H. Brandt, Phys. Rev. B, **54**, no. 6, (1996) 4246
- [5] L. Lai, *et al.*, SuST, **34**, no. 1, (2020) 015003.

数値解析による異なるコア径をもつ SCSC ケーブルの交流損失特性評価

Evaluation of ac loss characteristics of SCSC cables with different core diameter

by numerical electromagnetic field analyses

八鳥 孝志, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京都大学)

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

E-mail: hattori.takashi.64r@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

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

2. 解析対象

本報告では、コア径の異なる二種類の SCSC ケーブルを対象として解析を行う。解析対象の SCSC ケーブルの諸元を Table 1 に示す。これらの SCSC ケーブルは外径 5.18 mm 以下、かつ温度 40 K、外部印加磁界 2.1 T の条件下で通電可能電流 2.5 kA 以上として設計されており、巻き角度は 45 度から 55 度の間で素線間隔が適当な広さとなるように各層で異なる値に調節されている。また、超伝導層側を銅コア側に向けて巻き付けている。

3. 解析手法とモデル

本研究では、電流ベクトルポテンシャル T を未知数とした解析を行った。薄膜超伝導線材はその超伝導層の断面アスペクト比が非常に大きく、その断面における二次元的な要素分割を考えると、扁平な要素形状を避けるには要素数が多くなりすぎて解析が現実的でなくなってしまうが、本モデルでは薄板近似を用いることで要素数増大の問題を回避する。なお薄板近似を適用した場合、数学的には二次元問題となるが、超伝導層は三次元空間内の曲面としてモデル化されることから、SCSC ケーブルの三次元構造を考慮することができる。また、薄板近似を銅分流層複合マルチフィラメント線に適用することにより、フィラメント間をまたぐ結合電流の経路が変化するが、フィラメント間に存在する常伝導部の導電率を調整することによって実際の銅分流層複合マルチフィラメント線の特性を再現可能である[1]。

これらの要素を含んだ解析は自由度百万を超える極めて大規模なものとなることから、高速及び省消費メモリな計算を実現するために階層型行列法を適用した。加えて、超伝導体と常伝導体が隣接して混在する解析対象であることに起因する収束性の悪化を回避するため、代数マルチグリッド法による前処理を適用した[2]。

4. 解析結果

構築した大規模数値電磁界解析技術を適用し、コア径の異なる二つの SCSC ケーブルの交流損失を評価する。解析対象のケーブルのうち、コア径 2.5 mm の SCSC ケーブルの外観を Fig. 2 に示す。本解析では、SCSC ケーブルの各層に流れている電流値は等しいと仮定し、同位相の交流電流(ピーク値 65 A:2.5 mm コア、66 A:3.5 mm コア)及び交流磁界(ピーク値 2.1 T)が印加されている条件で、周波数を変えて解析を行う。

発表では、コア径が異なる SCSC ケーブルにおける電流分布や磁化分布、交流損失密度分布の差異、また発生交流損失の時間変化を比較し、通電電流あり、外部印加磁界ありの実用的条件化における SCSC ケーブルの交流損失特性を比較した結果を示す。

謝辞

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

参考文献

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

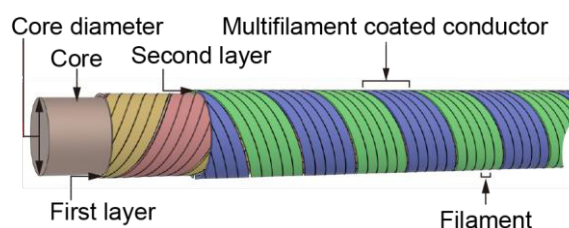


Fig. 1 Schematic view of SCSC cable.

Table 1 Specifications of analyzed SCSC cables.

Cable structure		
Core diameter	2.5 mm	3.5 mm
Number of layers	12	9
Number of tapes	39	38
Cable critical current	4.56 kA	4.45 kA
Outer diameter	4.74 mm	5.17 mm
Length of cable	50 mm	
Tape structure		
Coated conductor width	2 mm	
Filament width	0.36 mm	
Number of filaments	5	
Width of groove	50 μm	
Thickness of superconductor layer	1.75 μm	
Thickness of copper layer	10 μm	
Thickness of substrate	30 μm	
Thickness of coated conductor	55 μm	
Conductivity of groove	3.0×10 ⁹ S/m	



Fig. 2 Side view of an analyzed SCSC cable with 2.5-mm core diameter.

航空機用低温部材の熱応力測定

Measurement of thermal stress of cryogenic materials for aircraft

神田 昌枝, 栗本 敬太, 岩田 暢祐, 山口 作太郎 (中部大学)

KANDA Masae, KURIMOTO Keita, IWATA Yousuke, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

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

1. 緒言

近年、航空機・制御系は運航性能(燃費)、整備性、安全性の向上から航空機の電気・電動化(MEA: More Electric Aircraft)が進んでいる。そこで本研究では航空機への適用を目指し、超伝導ケーブルの研究開発を行っている[1]。超伝導ケーブルは、液体窒素温度で冷却するため、クライオスタットが必要になる。現在の真空断熱二重管は地上用で、外管に炭素鋼直管を使用し、超伝導ケーブルが設置される内管には低温脆性がないステンレス直管を用いている。このため真空断熱二重管は重く、航空機にそのまま搭載することができない。そこで、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)よりも軽量のMg-Li合金を用いた断熱二重管の開発を進めている。通常、航空機用材料として使われているAlの比重が2.69 g/cm³、CFRPの比重が1.6 g/cm³であるが、Mg-Li合金は1.36 g/cm³と従来の航空機用材料よりも比重が小さい。過去にはMg-Li合金の低温下におけるシャルピー衝撃試験を実施し、強度が低下しないことが分かった。そこで材料の低温での熱応力測定を開始した。低温で歪ゲージ測定を行うと、「真の歪」の他に「みかけの歪」も同時に測定されるため、「みかけの歪」と「真の歪」を分離する手法を用いた。また、4端子測定法を用いることで、歪ゲージ抵抗の精密測定を行った。

2. 実験試料・方法

本実験で用いた試料は、Mg-Li合金(旧株式会社三徳, LAX1430, 40×10×1 mm)で、比較対象としてSUS(TS50-50-01, 50×25×0.1 mm)、Al(013323, 50×20×0.10 mm)、GFRP(G-10, 53×19×0.3 mm)を使用した。その後、各試料に歪ゲージ(株式会社共和電業, KFGS-1-120-C1-120, ゲージ率K_s=2.11)とゲージ端子を接着剤で固定した。各試料の室温と低温での抵抗値を4端子測定法で測定した。また、各試料に荷重を加えることで、「真の歪」を計測した。

3. 実験結果・考察

図1にMg-Li合金の室温と低温での歪ゲージ抵抗測定結果を示す。この状態では応力をかけてないため、この抵抗差は全て「みかけの歪」となる。また、歪みは下記の式で与えられる。

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \times \varepsilon$$

ΔR :室温と低温の抵抗値差[Ω], R :歪ゲージ抵抗値[Ω],

K_s :ゲージ率, ε :歪

なお、Mg-Li合金の $\Delta R/R$ は2.72%であった。他の材料も繰り返し室温と低温での歪ゲージ抵抗測定した。その結果、SUSの $\Delta R/R$ は2.21%、Alの $\Delta R/R$ は2.37%、GFRPの $\Delta R/R$ は2.42%とMg-Li合金と同様な傾向が得られた。

また、室温にて重りを用いて実際にMg-Li合金の試験片に荷重をかけた時の抵抗値差から歪を算出した結果を図2に示す。荷重を加えると徐々に歪が大きくなっており、精度よく測定ができた。以上の結果から、試料に荷重を加えることで、「真の歪」を計測し、実際に働いている応力を求めることが可能となる。従来の方法では歪ゲージを温度毎や材料毎に選定する必要があったが、今回の新しい計測方法では、材料毎に歪ゲージを変える必要がなくなる。

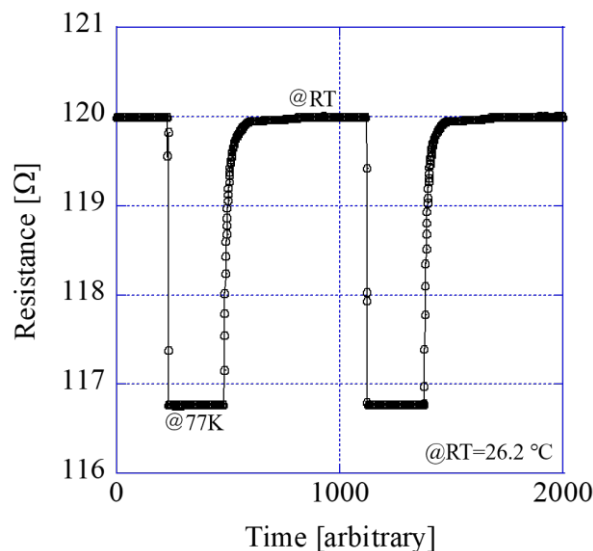


Fig.1 Resistance of Mg-Li alloy.

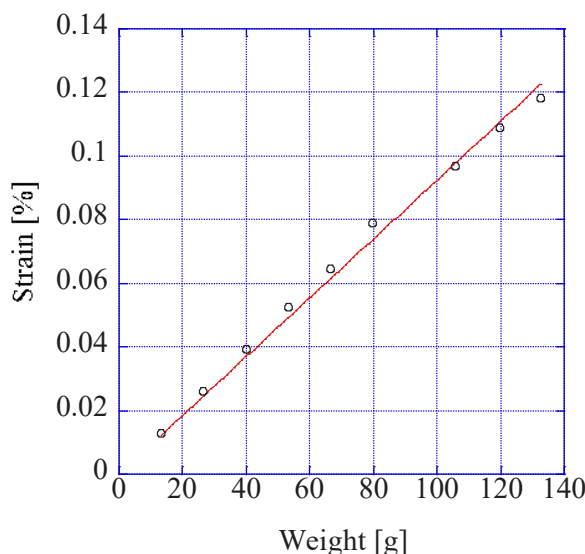


Fig.2 Strain at each weight of Mg-Li alloy at room temperature.

4. 結言

本研究では、航空機用超伝導ケーブルの低温部材の熱応力測定を行うため、4端子測定法を用いてMg-Li合金、SUS、Al、GFRPの室温と低温での抵抗値を測定し、温度変化における「みかけの歪」と「真の歪」の分離実験を行った。さらにMg-Li合金に荷重を加えることで、「真の歪」を計測し、実際に働いている応力を求めることが可能となった。従来の方法では歪ゲージを温度毎や材料毎に選定する必要があったが、今回の新しい計測方法では、材料毎に歪ゲージを変える必要がなくなることを目指している。

参考文献

1. Yamaguchi et al., Superconductor Science and Technology, Vol.34 (2021) 014001.

HTS テープ線材の短絡電流試験-1

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

山口 作太郎, 江口 実穂, 神田 昌枝, イワノフ ユーリ(中部大)
 YAMAGUCHI Sataro, EGUCHI Miho, KANDA Masae, IVANOV Yury
 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行っている¹⁾。直流ケーブルでは現状のアルミや銅ケーブル等でも短絡電流波形が規格として決まっていないため、交流系の規格に準じて実験を進めている。66 kV 交流系では定格電流の 20 倍ほどの電流を短期間流すため、取りあえず 10 倍ほどを短絡ピーク電流として ~1 ms 通電している。利用している線材は Bi2223 線材(住友電工)と coated conductor 線材(SuNAM 社)の 2 種類であり、臨界電流は共に ~200 A 級であり、短絡電流ピークは 2 kA ~ 2.5 kA で試験を行っている。ケーブルを模擬するために PPLP 若しくはクラフトテープを巻き付け、液体窒素中に浸漬冷却し、実験を行っている。この時、重要なことは線材(ケーブル)の温度上昇である。温度上昇は短絡電流が流れている短い時間で生じるが、それは電流が流れる導体のみ(構造によってはフォーマーを含む)であり、絶縁物等は短時間で温度上昇しない。一方、温度上昇によってテープ線材は熱膨張するため、大きな温度上昇ではテープ線材の座屈を想定しなければならない。また、温度上昇によって冷媒ガスが発生し、ケーブル内圧力が上昇することも検討課題の一つである。したがって、現時点では、線材の温度上昇がどの程度であるかについての見積もりが主なテーマとなる。

2. 短絡電流実験及び線材抵抗測定

Fig. 1 に SuNAM 社のテープ線材に流した電流及び電圧波形を示す。尚、電圧タップ間距離は 150 mm である。尚、このような波形で数回通電後、臨界電流特性の試験を行っているが、臨界電流の低下などは観察されていない。

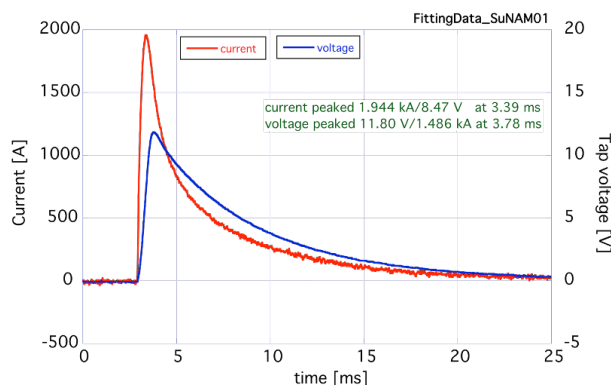


Fig. 1 Waveforms of voltage & current of short circuit experiment for SuNAM HTS tape

また、Fig. 2 に線材の抵抗測定結果を示す。線材を温度制御ができるクライオヘッドにとりつけ、一定電流(~100 mA)を流し、電極間距離 15 mm で電圧測定を行っている。これから、臨界温度が得られ、 $T_c = 93.1 \sim 93.2 \text{ K}$ と推測される。

線材には大電流が流れるため、臨界電流以下でも超伝導状態は破れている。20 ms 以下の短い時間では、テープ線材で発生した熱の大部分は液体窒素まで直ぐに伝わることはなく、断熱温度上昇に近いと思われる。

テープ線材のこの温度上昇を見積もるためには、液体窒素温度から臨界温度までの大電流通電時の線材抵抗を推測し、発熱量を求める必要がある。Fig. 2 の実験結果から、臨界温度以下でテープ線材の抵抗を求める必要がある。

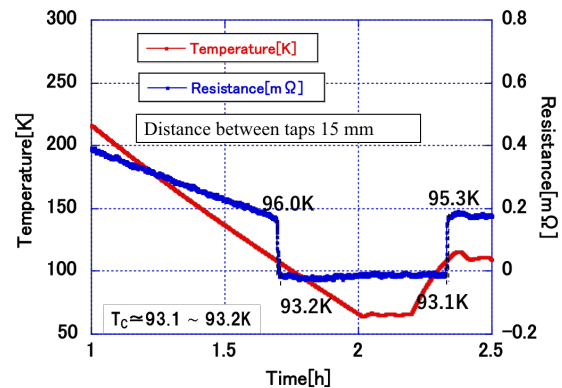


Fig. 2 Time history of temperature and resistance of HTS tape (SuNAM)

幸い、電気抵抗の変化は 300 K からほぼ線形であるため、実験データから電気抵抗 R と温度 T の関係を最小二乗法で求め、これを 77 K まで外挿し、温度見積もりを行う。

$$R = -0.1904 + 6.754 \times 10^{-2} T \text{ [m}\Omega\text{]} \quad (1)$$

3. 現状のまとめ

式(1)を用いて、電流ピーク時(@3.39 ms)の線材抵抗から線材温度を見積もると 92 ~ 94 K であった。つまり、短時間に ~15 K 温度上昇した。尚、電流ピークでの見積もりは、電圧にインダクタンス分が含まれないからである。現在、インダクタンス分を含んだ時の通電中の線材温度見積もりを行っているが、電圧タップ間距離が短いため、大きな違いは生じないと考えている。また、この線材では 10 ms 以上でも線材温度上昇が続き、常温付近まで上昇していると推測している。

一方、Bi2223 線材の実験はかなり様相が異なる。短絡電流ピーク値は少し高い(= ~2.5 kA)が発生電圧は 1/10 以下となり、発熱量は 1 桁以上少ない。これはテープ線材を構成するマトリックス材の銀や安定化材の銅テープの断面積合計が SuNAM 線材に比べて 3 倍ほど多いからである。実際、open cryostat のビデオ観察では、通電によって発生するガス量はかなり少ない。現在、Fig. 2 に対応する実験データを取得中であるが、これを使ったデータ解析ではパルス通電が終了に近づき(@ >10 ms)電流値が下がると、超伝導状態に復帰するように見える。

参考文献

- 山口, 神田, イワノフ, 「航空機向け積層超伝導ケーブルの短絡電流試験」 2020 年度春期低温工学・超電導学会講演概要集, 1B-a02.

航空機用電動推進システムにおける超電導限流器導入の効果

Effects of introducing superconducting fault current limiters in electric propulsion system for aircraft

斉藤 央樹, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東京大学)

SAITO Hiroki, TERAOKA Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: saito.hiroki20@ae.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

航空機の電動推進システムにおいて短絡事故の影響を抑制するために超電導限流器を挿入することを検討している。分散電動推進システムの場合、直流部のインバータに近い部分で短絡事故が起こった際、迅速な切り離しを行わないと同一システム内の他のモータや他システムに影響を及ぼし重大な事故につながる可能性が高い。本研究では超電導限流器の中でも抵抗型超電導限流器をモデリングし、航空機用電動推進システムにおいて解析を行った。

2. 解析モデルと解析方法

解析対象として、NASA が検討を進めている N3-X を参考にモデルを作成し、使用した [1, 2]。N3-X の電動推進システムには発電機が4基、モータが16基搭載されており発電機1つに対してモータ4つの4系統で構成されているが、本研究においてはそのうちの1系統について検討した。解析に使用したモデルの概念図を Fig.1 に示す。発電機が1台、コンバータが1台、インバータが4台、モータを模擬した負荷が4台である。これらを MATLAB Simulink で解析した。

本研究では抵抗型超電導限流器を Fig.1 の SFCL で示す位置に挿入し、短絡事故は Fig.1 の Fault の位置で発生すると仮定した。

また、限流器の超電導線材として (Re)BCO 線材を想定しており、Fig.2 のように超電導層、銅層、銀層、ハステロイ層の各層を並列抵抗とみなしモデリングした。限流器の超電導抵抗を模擬した式を式(1)-(3)に示す。

$$V_{SC} = \begin{cases} E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \times l & (I \leq I_c, n = 20) \\ E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \times l & (I \geq I_c, n = 12) \end{cases} \quad (1)$$

$$I_c = I_{c0} \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_0} \right)^{1.5} \quad (2)$$

$$R_{SC} = \frac{V_{SC}}{I} \quad (3)$$

ここで、 V_{SC} は超電導層にかかる電圧、 E_c は臨界電流基準値、 I は通電電流、 I_c は臨界電流、 I_{c0} は T_0 における臨界電流、 l は線材一本当たりの長さである。

また、限流器を模擬した回路に流れる電流やかかる電圧から発熱量を計算する。このようにして得られた温度から温度特性を超電導特性や安定化層のそれぞれの層に与えている。

3. 解析結果

超電導限流器モデルを挿入しない場合と比べて、挿入した場合は短絡電流の量を限流できることを確認した。また複数の臨界電流を設定しそれらについて解析を行った。

4. まとめと今後の課題

今回の検討においては航空機の電動推進システムに抵抗型超電導限流器を挿入し電流の抑制効果について複数の臨界電流について検討を行った。今後の課題としては、今回の検討を用いて最適な設計パラメータを決めていきたいと考えている。

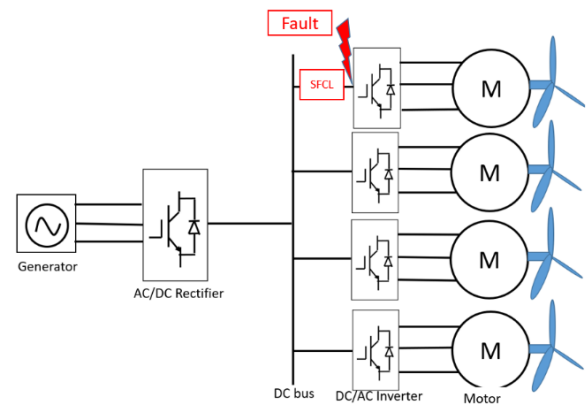


Fig.1: Conceptual diagram of the model considered in this study

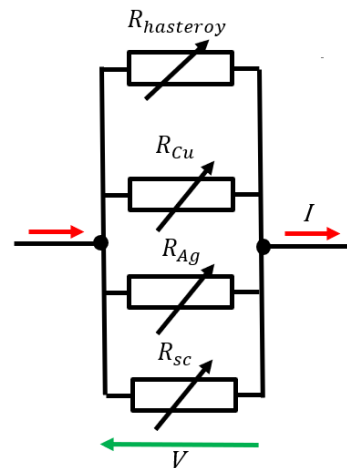


Fig.2: Analytical model of a superconducting fault current limiter

参考文献

- [1]: Michael J. Armstrong, et al. "Architecture, Voltage, and Components for a Turboelectric Distributed Propulsion Electric Grid Final Report" NASA/CR, 2015-218440
- [2]: H Alafnan, et al. "Analysing Faults and SFCL Response in Electric Aircraft" Journal of Physics: Conference Series 1559 (2020) 012103

アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(3)－加熱試験の概要

Development of induction heating device for aluminum extrusion molding using HTS magnets

(3) – Overview of the heating test –

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, 杉本 志郎(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, 縄椎 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, SUGIMOTO Shiro (TERAL Inc.);

FURUSE Mitsuho (AIST); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.);

MORISHITA Yuki, NAGAOKA Takashi, FUYAMA Nobuyuki, NAWACHI Norio (HiTRI)

E-mail: ito00@teral.co.jp

1. はじめに

前報[1][2]で報告したとおり、現在我々はアルミ押出加工用のアルミビレット加熱装置を開発している。この装置では、HTS コイルにより生成した直流磁場中でアルミビレットを回転させることで、アルミビレットを加熱する。これまでに、HTS マグネットの開発、及びアルミビレットの把持・回転機構に関する開発を実施し、それらを組み合わせ、小容量(22 kW 電動機)での加熱予備実験も完了した。アルミビレット把持・回転機構及び加熱予備試験の概要を報告する。

2. アルミビレットの把持・回転機構

アルミビレットを強磁場中で回転させると、アルミビレット内部に磁場強度及び回転速度に対応した誘導電流(渦電流)が流れ、回転に対するブレーキ力が発生する。これに対抗しアルミビレットを回転させるために、駆動機よりアルミビレットに回転力を与える必要がある。アルミビレットは押出品質を確保するため、外周及び先端部への傷は許容されない。このためアルミビレットを両端より挟み込み、その片端面より回転トルクをアルミビレットに伝達する設計とした。

本機の仕様は、最大加熱能力 400 kW、回転速度 900 min⁻¹ であるため、所要伝達トルクは約 4.2 kN・m である。これをビレット端面から伝達するための必要把持力(ビレット軸方向の押付力)を 500 kN と算定し、装置設計を実施した。把持部の最大伝達トルクは、実験により押付力 490 kN にて約 6.3 kN・m あることを確認した。

また、加熱による昇温に伴い、アルミビレットの機械強度が大きく低下することから、押出の主要材料である A6063 材の高温物性取得を実施した。

3. 加熱予備試験

HTS マグネットとアルミビレット把持・回転機構とを組合せ、小容量(22 kW)の電動機を用いて加熱予備実験を実施した。600 mm のアルミビレットを用い、コイル電流 40 A、加熱領域中心部磁場約 0.22 T、回転速度 900 min⁻¹ にて室温から最高点が 500 °C になるまでの所要時間は 14 分であった。アルミビレットの発熱が HTS コイル温度に与える影響はほぼ無視できる程度であった。アルミビレットの熱膨張に伴う把持力制御も問題なく機能した。

4. 今後の計画

今後、実証機の電動機を 400 kW に載せ替え、コイル電流も定格の 200A まで通電し加熱試験を実施する。

謝辞

本研究開発の一部は、令和元年度～令和3年度戦略的基盤技術高度化支援事業及び科学研究費補助金(19K04347)により実施した。

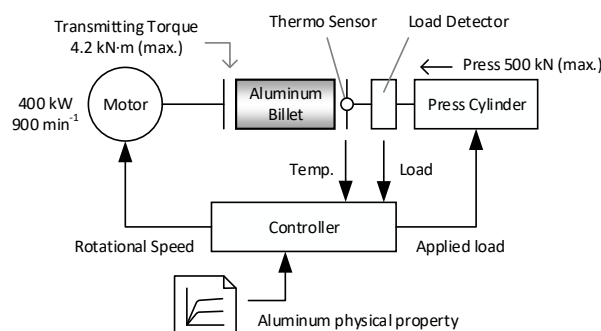


Fig.1 Billet grasping system

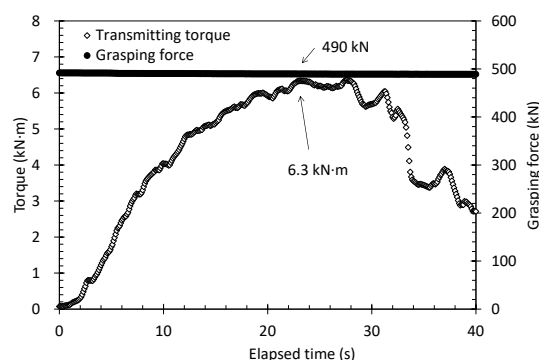


Fig.2 Transmitting torque of grasping mechanism

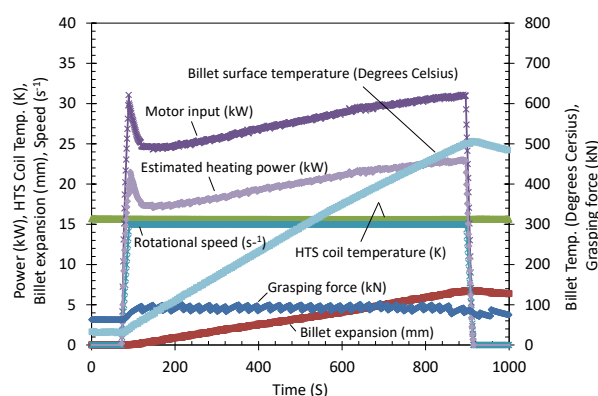


Fig.3 Pretest of heating using 22kW motor

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

直径 50 μm の極細線で作製した Nb₃Al 及び Nb₃Sn 撚線ケーブルの臨界電流測定 The Critical Current Measurement of the Nb₃Al and Nb₃Sn Stranded Cables Made by an Ultra-fine Strand with 50 μm in Diameter

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); IJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

超極細径の Nb₃Al 線材と Nb₃Sn 線材を用いた加速器や核融合用超伝導コイルの大電流ケーブルの開発を行っている[1, 2]。線材外径を極細化にすることで優れた可撓性が得られるため、それを撚線加工した大電流ケーブルでリアクト・アンド・ワインド法による超伝導コイルの製作が期待できる。今回は、直径 50 μm の Nb₃Al と Nb₃Sn のストランドを撚線加工し、直線形状で熱処理した後に直径 15mm、20mm、30mm の 3 種類の G10 ボビンに巻き付けて、液体ヘリウム中 (4.2K) で 18T 以下の外部磁場下の臨界電流測定結果を報告する。

2. 測定サンプルと実験装置

測定サンプルは、直径 50 μm で銅比 1 のストランドを用いて、7 本撚りの Nb₃Al ケーブルと 49 (7 $\times$ 7) 本撚りの Nb₃Sn ケーブルを用意した。Nb₃Al と Nb₃Sn 撚線ケーブルの諸元を Table 1 に示す。ストランドの直径は両者ともに 50 μm であり、Nb₃Al は 40 μm のモノフィラメント、Nb₃Sn は 3 μm のフィラメントを 19 本ツイストした構造である。銅とそれ以外の比率は 1 である。ストランド間には絶縁を施していない。測定用スタンドとサンプルホルダーを Fig. 1 に示す。各サンプルは、直状で熱処理後にホルダーに巻き付けて、端部を銅電極に半田接続した。端部銅電極以外が G10 で構成された ϕ 15 mm、20 mm、30 mm の 3 種類のホルダーを準備し、サンプルの曲げ特性を調査した。サンプル中心部の約 100–130 mm 区間に電圧タップを設けて I_c 評価部とした。測定用スタンドを NIMS 強磁場ステーションの 18 T ソレノイド磁石 (口径 52 mm) のクライオスタット内に挿入して、4.2 K で 18 T 以下の磁場下で各サンプルの I_c 測定を行った。

3. 実験結果

測定した I - V 曲線から I_c (1.0 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準) と n 値 (I_c 近傍) を評価し、外部印加磁場との関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、Nb₃Al と Nb₃Sn ケーブルの I_c は ϕ 30 mm から ϕ 15 mm に曲げ直径を小さくすると劣化が見られた。曲げによる劣化は Nb₃Sn ケーブルの方が顕著であった。これは、Nb₃Al の方が Nb₃Sn より曲げひずみ劣化が少ないという先行研究と符合する[3]。Nb₃Al ケーブルの n 値は、 ϕ 30 mm の測定では 20–114 であり、外部磁場の減少とともに増加し、3–4 T 付近でピークとなり、その後、減少する傾向を示す。一方、Nb₃Sn ケーブルの n 値は ϕ 30 mm の測定結果で 8–28 であり、外部磁場の減少とともに増加し続ける。両者ともに曲げにより n 値は大幅に低下する。今後は、曲げ直径の異なるサンプルホルダーを増やして、より詳細な曲げ特性の評価を行っていく予定である。

曲げなしと ϕ 30 mm 曲げのサンプルホルダーで測定した Nb₃Al と Nb₃Sn ケーブルの 50 μm ストランド I_c と Non-Cu J_c の磁場依存性を Fig. 3 に示す。曲げなしと ϕ 30 mm 曲げの結果が一致していることから、両者ともに ϕ 30 mm までの曲げによる劣化がない。4 T における両者のストランド I_c と Non-Cu J_c はほぼ同じで、それぞれ約 2.2 A と約 2225 A/mm² であった。然し、外部磁場の増加とともに Nb₃Sn ケーブルの特性は Nb₃Al のそれを越える傾向を示している。

Table 1 Parameters of Nb₃Al and Nb₃Sn cables

Parameters	Nb ₃ Al	Nb ₃ Sn
Strand		
Manufacturing method	Jelly-roll process	Bronze process
Diameter	50 μm	50 μm
SC filament	40 $\mu\text{m} \times 1$	3 $\mu\text{m} \times 19$
Cu/Non-Cu	1.0	1.0
Cable		
No. of strands	7	49 (7 $\times$ 7)
Heat treatment	800°C 10hr	650°C 240hr

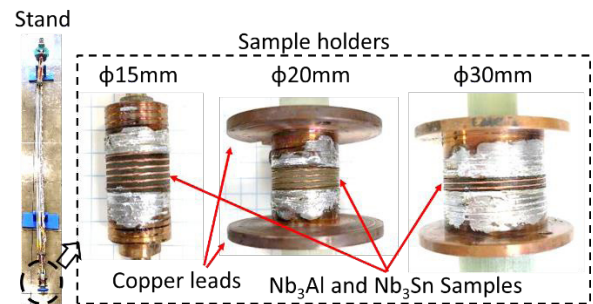


Fig.1 Measurement stand and sample holders.

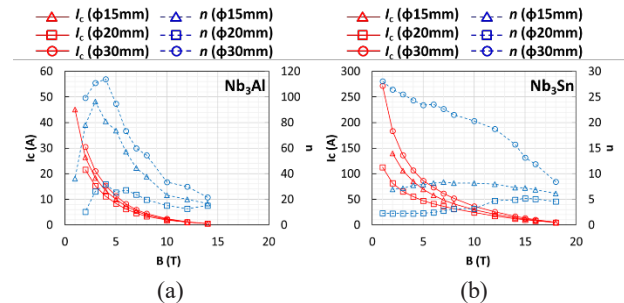


Fig. 2 Field dependence of I_c and n -values of (a) Nb₃Al cable (7 strands) and (b) Nb₃Sn cable (49 strands) at 4.2 K.

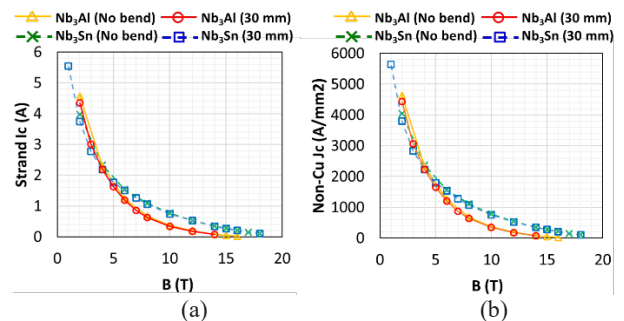


Fig. 3 Field dependence of strand I_c and non-Cu J_c of (a) Nb₃Al cable (7 strands) and (b) Nb₃Sn cable (49 strands) measured with no bend and ϕ 30 mm bend at 4.2 K.

参考文献

- [1] A. Kikuchi, K. Tsuchiya, *et.al.*, *IEEE TAS*, 31 (2021) 6000105.
- [2] A. Kikuchi, K. Tsuchiya, *et.al.*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 756 (2020) 01201631.
- [3] J. W. Ekin, *Adv. Cryo. Eng.* 30, 823-836 (1984).

ブロンズ法 Nb₃Sn 線材において Hf・Ta 添加はどのくらい効果があるのか How effective is the addition of Hf and Ta to bronze-route Nb₃Sn wires?

伴野信哉(物材機構), 森田太郎(上智大学, 物材機構), 谷貝 剛(上智大学)
BANNO Nobuya (NIMS), MORITA Taro (Sophia Univ., NIMS), YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 線材への Hf・Ta 添加は、 B_c2 を維持しつつ Nb₃Sn 結晶粒径を劇的に微細化できるということで、Nb₃Sn 線材開発において非常に大きな話題となっている。これまで効果が確認されているのは、主にパウダーインチューブ法[1]、内部スズ法[2]においてであるが、結晶粒微細化は当然、ブロンズ法線材にも効果があると考えるのがふつうである。我々はそれを確認するため、従来ブロンズ法に加えていくつかの Hf 添加ブロンズ法 Nb₃Sn 線材を作製し、SEM、EDS、EBSD 解析を行って、結晶粒径、組成分布、層厚等を比較した。一連の解析の結果、ブロンズ法では、Hf 添加に比べて Ti の影響がより支配的になりやすい傾向が見られた[3, 4]。

2. 実験方法

誘導加熱炉を用いて、Cu-14wt%Sn および Cu-14wt%Sn-0.2wt%Ti のブロンズ合金、アーク溶解にて Nb-4at%Ta-1at%Hf、Nb-2at%Ti-1at%Hf を溶製した。加えて純 Nb、Nb-0.8wt%Ti を購入した。これらの部材を組み合わせ、以下の単芯素線を作製した。

- ① Nb/Cu-14Sn-0.2Ti: N-C14S02Ti
- ② Nb-0.8Ti/Cu-14Sn: N08Ti-C14S
- ③ Nb-4Ta-1Hf/Cu-14Sn: N4Ta1H-C14S
- ④ Nb-2Ti-1Hf/Cu-14Sn: N2Ti1H-C14S

試料①は、Ti をブロンズ側に添加した従来ブロンズ線材、②は Ti を Nb 側に添加した従来ブロンズ線材、③は Ta-Hf を Nb 側に添加するが Ti 添加がないブロンズ線材、④は Ti-Hf を Nb 側に添加したブロンズ線材の構成である。

単芯素線は、外径/内径=9.8/5.4mm のブロンズ管に外径 5.3mm の Nb もしくは Nb 合金ロッドを挿入し、スエーピングとダイス伸線により $\Phi 0.8$ mm まで縮径して作製した。途中適宜中間焼鈍を施した。伸線後、真空中にて 685 ~ 700°C × 100h の熱処理を施し、Nb₃Sn 層を生成させた。

3. 実験結果と考察

Fig. 1 に、例として N-C14S02Ti と N4Ta1H-C14S の 700°C 熱処理後における Nb₃Sn 層の EBSD 解析マップ (結晶粒+形状) を比較する。また Fig. 2 に、全試料の結晶粒径解析結果を比較する。これらの結果を見ると、700°C では全試料で結晶粒径に大きな差が見られない。

Fig. 3 には、Nb₃Sn 層の生成面積 (層厚にほぼ比例) を比較した。このうち、Ti をブロンズに添加した従来のブロンズ線材 (N-C14S02Ti) の層厚が飛び抜けて大きく、Nb に Ti と Hf を添加した N2Ti1H-C14S がやや小さい値を示した。一方で Layer J_c @14T は、N-C14S02Ti が最も高く (2020A/mm²)、N2Ti1H-C14S (1760A/mm²) と N4Ta1H-C14S (1740A/mm²) がほぼ同じで、N08Ti-C14S (1370A/mm²) が最も低い特性となった。今のところブロンズ法では、Ta-Hf 添加のみでは劇的な結晶粒微細化の効果は見られなかった。

この結果を見るにあたり、Ta-Hf の効果が見られなかったと考えるよりは、Ti 添加の効果がより大きな寄与をしているのではないかと考えている。詳細は発表の際に述

べるが、まず第一に Ti をブロンズ母材に添加することで、Sn 拡散駆動力が劇的に上がっている (それにより層厚が増大している) と考えられる。これらは他グループでの研究結果とも一致した見解である。結晶の核生成は、定性的には、Nb 母相の内部歪みエネルギー、Sn 拡散駆動力の影響を受けると考えられ、今回の結果では、Ti 添加効果が Ta-Hf 添加よりも相対的に非常に大きく寄与したことがうかがえる。Layer J_c の観点では、N-C14S02Ti が最も高かったが、粒径が劇的に微細化されていたわけではなかった。おそらく Ti による Nb₃Sn 層の Sn 濃度の改善により、 B_c2 向上したことが大きいと考えている。

- [1] S. Barachandran et al., *SUST*, v32, 044006, 2019.
[2] N. Banno et al., *Scripta Materialia*, v199, 113822, 2021.
[3] N. Banno et al. presented at MT-27, 2021, Fukuoka
[4] T. Morita et al. presented at MT-27, 2021, Fukuoka

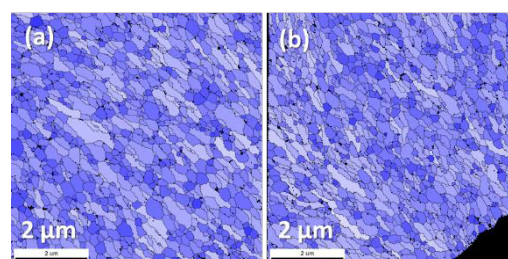


Fig.1. EBSD grain maps on Nb₃Sn layer of (a) N-C14S02Ti and (b) N4Ta1H-C14S after 700 °C × 100 h. Contrast indicates aspect ratio.

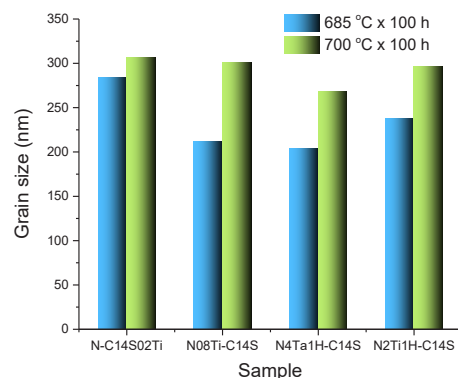


Fig.2. Comparison of grain size between all samples after heat-treatment at 700 °C × 100 h.

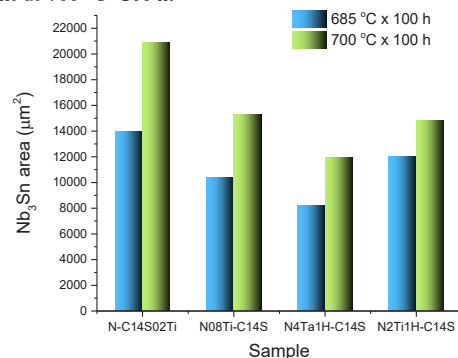


Fig.3. Comparison of Nb₃Sn area between all samples after heat-treatment at 700 °C × 100 h.

耐熱 Nb 合金超伝導体を媒介にした Pb フリー NbTi-Nb₃Sn 超伝導接合 Pb-free Superconducting joint between NbTi and Nb₃Sn using high-temperature-tolerable Nb-alloy superconductor intermedium

伴野信哉, 小林賢介, 内田 公, 北口 仁(物材機構)

BANNO Nobuya, KOBAYASHI Kensuke, UCHIDA Akira, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

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

1. はじめに

Pb 系超伝導はんだによる NbTi-Nb₃Sn 超伝導接合は、1990 年頃に開発されて以来 30 年以上もの間、永久電流運転を必要とする NMR マグネット等に幅広く使用されている。これは主に、Nb₃Sn 超伝導体の機械的特性や NbTi の超伝導特性が高温に曝されると著しく低下する等の理由によるものである。しかしながら、Pb は環境負荷物質として環境規制の中で厳しく使用が制限されている（除外申請に大きな手間とコストがかかっている）。こうした背景の中、Pb フリー超伝導接続の新規開発は長年強く切望されていた。

本研究は、上記の問題点を解決するために、Pb 系はんだに代わり高温耐性の Nb 超伝導合金を媒介材料とすることで、化学反応プロセスを利用した新しい接合手法を開発し、Pb 系はんだを一切用いない NbTi-Nb₃Sn 接合の実証に成功した[1, 2]。従来の Pb 系はんだ接続を一掃する可能性があり、大きな波及効果が期待される。

2. 実験方法

本手法では、高温耐性（高温でも結晶組織の回復が起こらず、緻密な組織を維持する特性）の Nb 超伝導合金を見出すことが重要である。緻密な組織が磁束ピン止め点となる。近年、Nb₃Sn 線材開発では、Nb への Ta-Hf 添加で Nb₃Sn 結晶粒が微細化されることが報告されているが、そうした一連の研究の中で、Hf 添加 Nb 母相組織そのものが高温でも粗大化しないことが指摘されていた。こうした研究から、特定の元素を Nb に添加することで、Nb に高温耐性を発現させ、それによって化学反応プロセスで Nb₃Sn との超伝導接合が可能ではないかと考えたことが本研究の発想である。高温耐性の Nb 合金を探るにあたり、周期律表 4A-6A 族の Nb 周囲の遷移元素を微量添加した。

試験した Nb 合金のうち、特性の良いものをテープ状の媒介材料として NbTi/Nb 合金/Nb₃Sn 超伝導接続を作製した。ステップ 1 として、まず Nb 合金テープの片端と Nb₃Sn 線との接合を実施した。接合処理の前に、Nb₃Sn 線の安定化銅を化学腐食で除去し、拡散バリア層を機械研磨で除去する。未反応の Nb 芯が露出した状態で、それを Nb 合金テープの片端で包み、プレスする。その後 685°C×100h で熱処理し、界面に Nb₃Sn 層を生成させる。ステップ 2 として、Nb 合金テープのもう一方の片端と NbTi 線とを良金属の延性を利用して機械的に接合する。接合処理の前に、NbTi 線の銅マトリクスを化学腐食で除去する。それを Nb 合金テープで包み、プレスする。これにより、最終的に Nb 合金を媒介にした NbTi/Nb₃Sn 超伝導接合が実現される。

3. 実験結果と考察

いくつかの Nb 合金の 685°C×100h（典型的な Nb₃Sn 生成条件）前後の Cu 被覆 Nb 単芯テープの I_c - B 特性を Fig. 1 に示す。比較のため、NbTi 標準試料（NBS）の熱処理後の特性も示す。試験した添加元素の中で、W もしくは Hf 添加 Nb テープにおいて、熱処理後も急峻な I_c - B 特性が見られた。これは結晶組織が熱処理後も緻密な結晶組織が

維持されたことによる。ただし W の場合にはそれほど大きな臨界磁場の向上はみられなかった。Hf の場合には臨界磁場 1.15T まで向上した。

Fig. 2 には Nb-3at%Hf 媒介による接合試料の I_c - B 特性を示す。Nb-3Hf/Nb₃Sn 接合の歩留まりはほぼ 100%で特性のばらつきも少なかった。一方、Nb-3Hf/NbTi 接合では特性の大きなばらつきが見られた。X 線 CT スキャンによって、特性の低い試料では NbTi フィラメントに多数のクラックが入っていることが確認された[2]。プレス工程の最適化が今後の課題である。電流減衰法による抵抗測定の結果は、次の講演（2B-a04）にて報告する。

本研究の一部は J S T、未来社会創造事業、JPMJMI17A2 の支援を受けたものです。

[1] N. Banno et al., “High-temperature-tolerable superconducting Nb-alloy and its application to Pb- and Cd-free superconducting joints between NbTi and Nb₃Sn wires”, Journal of Materials Science, (2021), <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06585-8>, Open Access

[2] N. Banno et al., presented at MT-27 (Fukuoka).

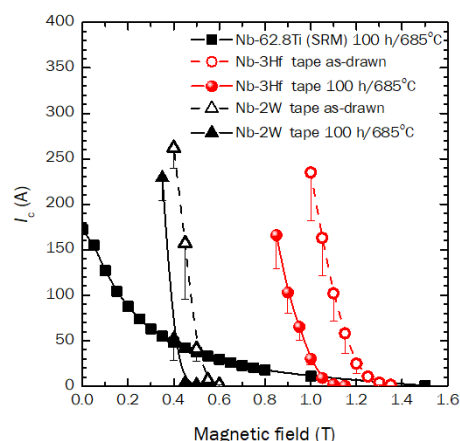


Fig.1. I_c - B characteristics of Nb-2W and Nb-3Hf composite single-core tapes with a standard NbTi wire ($\phi 0.6$ mm) [1].

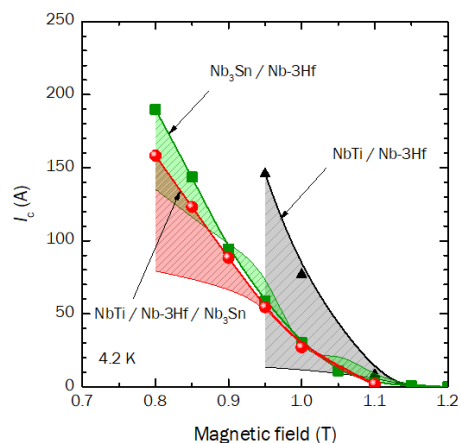


Fig.2. I_c - B characteristics of joint samples with NbTi/Nb-3Hf, Nb₃Sn/Nb-3Hf and NbTi/Nb-3Hf/Nb₃Sn [1].

耐熱 Nb 合金超伝導体を媒介にした鉛フリーNbTi-Nb₃Sn 超伝導接合の 接合抵抗評価

Joint resistance evaluation of Pb-free superconducting joint between NbTi and Nb₃Sn

小林 賢介(NIMS), 伴野 信哉(NIMS), 内田 公(NIMS), 北口 仁(NIMS)

KOBAYASHI Kensuke (NIMS), BANNO Nobuya (NIMS), UCHIDA Akira (NIMS), and KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: kobayashi.kensuke@nims.go.jp

1. はじめに

NMR などの永久電流運転を行う超伝導マグネットでは、NbTi と Nb₃Sn の接続に鉛系はんだによる超伝導接合が用いられている。しかし、鉛は環境負荷物質として使用が制限されており、代替となる超伝導接合技術の開発が長年に渡り重要な課題となっている。これまでに、鉛を含まないはんだを用いた接合方法も提案されてきたが、低い B_{c2} や I_c のため実用化には至っていない。本研究は、最近提案された鉛系はんだに代わり、高温耐性の Nb 超伝導合金を媒介材料とする新しい接手法[1]について、我々が開発した超低抵抗・超伝導接合試料の評価に特化した装置[2]を用いて行った接合特性の詳細な評価結果について報告する。

2. 実験方法

我々の接合抵抗評価装置は、冷凍機を用いて任意の温度へ試料を冷却し、電流減衰法で接合抵抗を評価している。そのため、試料は閉ループである必要があり、NbTi、Nb₃Sn を Hf 添加 Nb を介して接合した 1 回巻きループ試料を作製した。NbTi-Nb-3at%Hf 接合が 2 個、Nb₃Sn-Nb-3at%Hf 接合が 2 個の計 4 個の接合を含んでいる。接手法の詳細については、前講演にて説明されているため割愛する。試料冷却は冷凍機を用いているが、接合部全体を銅燃線で包むことで、試料内における温度差は 0.1 K 程度だった。

接合抵抗は、誘導コイルを用いて試料へ誘導された電流の減衰をホールセンサーで検出し、 $V_{Hall}(t) = A + B \exp\{-t/(L/R)\}$ でフィッティングすることで回路抵抗 R として評価した。ここで、 A 、 B はフィッティングパラメーター、 L は自己インダクタンスである。 L は同型試料の実測値 $0.47 \mu\text{H}$ を用いた。試料へ誘導された電流は、ホールセンサーを校正して求めている。接合抵抗評価は接合部温度 4.2 K において実施した。また、接合部に対して平行に印加した磁場中でも特性評価を行った。

3. 結果と考察

Figure 1 に 4.2 K、自己磁場中における電流減衰測定結果を示す。初期誘導電流($I_{injected}$)を 17 A から増加していった結果、全ての測定で永久電流が確認できた。しかし、~56 A 以上で電流誘導直後に急減が発生しており、接合部の I_c を超えたことを示唆している。接合部 I_c に相当すると考えられる 1 時間後の残留電流は 52 A 程度だった。

Figure 2 に 4.2 K、自己磁場中、 $I_{injected} \sim 49$ A における接合抵抗評価結果を示す。1000-3000 秒の電流減衰データに対するフィッティングから得られた回路抵抗は、 $8.2 \times 10^{-14} \Omega$ だった。この値は 4 個の接合全ての合計値であり、Hf 添加 Nb を介して NbTi と Nb₃Sn の超伝導接合が実現していることを確認できた。

講演では、磁場中の接合抵抗評価結果と接合作製条件を変えた試料の結果についても報告する予定である。

謝辞

本成果は、JST 未来社会創造事業[JPMJMI17A2]によって得られたものです。

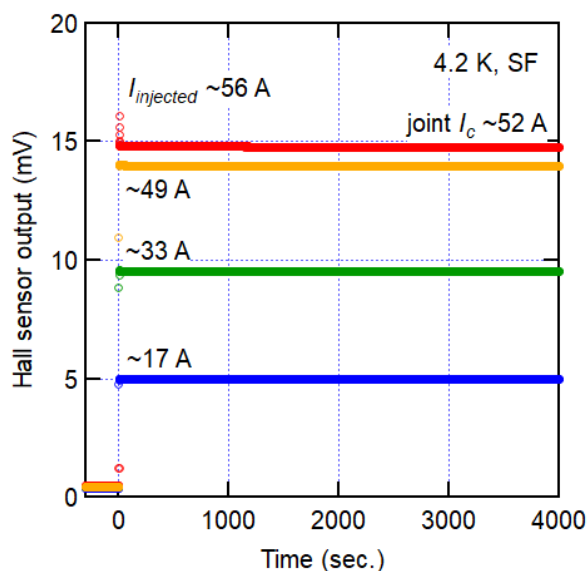


Fig. 1 Current decay measurements for a loop sample with NbTi wire/Nb-3at%Hf tape/Nb₃Sn wire joints at 4.2 K in self-field.

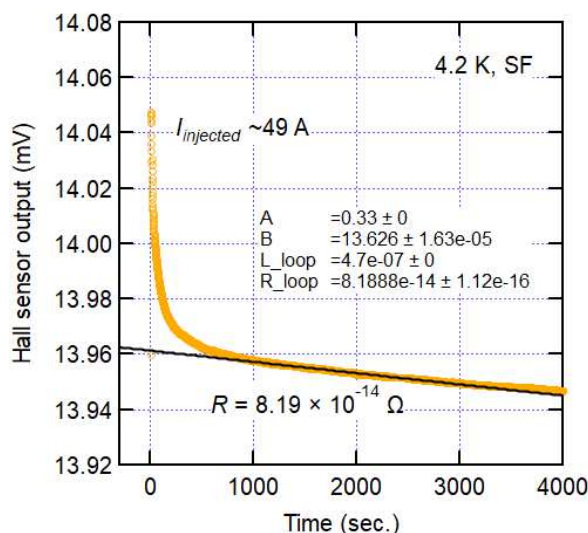


Fig. 2 Evaluation of circuit resistance for $I_{injected} \sim 49$ A measurement at 4.2 K, self-field.

参考文献

- [1] N. Banno *et al.*, *J. Mater. Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06585-8>, **Open Access** (2021).
- [2] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30**, 9000204 (2020).

高強度 Bi2223 線材間超伝導接合における臨界電流特性の向上

Improvement of critical current properties of superconducting joints connecting the reinforced Bi2223 tapes

中井 優亨、稲葉 勇人、元木 貴則、下山 淳一 (青学大); 武田 泰明 (NIMS); 末富 佑、柳澤 吉紀 (理研); 中島 隆芳、山出 哲 (住友電工)

NAKAI Ukyo, INABA Hayato, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (NIMS), SUETOMI Yu, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (SEI, Ltd)

E-mail: c5621057@aoyama.jp

1. はじめに

Ag シース (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y[Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO®^[1])は高い臨界電流特性と優れた量産性から、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 の各線材を直列に超伝導接合した永久電流 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]。これまでに我々は、Bi2223 多結晶中間層の導入により補強材のない Bi2223 線材 (DI-BSCCO® Type H) 間の超伝導接合を試み、多芯線材間の接合において初めて実用的な接合臨界電流を実現した^[4]。一方で、高磁場発生が可能な超伝導磁石作製では、強い電磁力によって劣化しない高強度 Bi2223 線材 (DI-BSCCO® Type HT-NX) の使用が不可欠であり、Type HT-NX 線材間における接合技術の確立が必要である。そこで、本研究では高強度 Bi2223 線材の臨界電流特性の向上を目的として、補強材を半田の除去をはじめ接合工程の各条件の最適化を試みた。

2. 実験方法

接合試料の作製は、DI-BSCCO® Type HT-NX 線材 [121 芯、 $\sim 4.5 \text{ mm} \times \sim 0.25 \text{ mm}$, $I_c (77 \text{ K, self-field}) > 170 \text{ A}$] から作製した。補強材である Ni 合金テープは温風で半田を融かすことにより、線材上に残った Sn を含む半田は電気分解により除去した。補強材と半田を除去した Type HT-NX 線材を、線材表面に対して $\sim 0.4^\circ$ の浅い角度で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、住友電工社製 Bi2223 仮焼粉末、Bi2223 単相粉末と所定量のエタノール、ブタノールを加え、ボールミルにより混合することにより調製したものである。その後、拌み合わせ型接合を構成し、Ag 箔に包み 200 MPa で一軸プレスし、 $P_{O_2} = 3 \text{ kPa}$ 下で、810-825 °C で熱処理した。

作製した接合試料は液体窒素浸漬下で直流四端子法を用いて、通電測定を行った。接合部の微細組織は通電測定後の試料断面を研磨し SEM により観察した。

3. 実験結果

Fig. 1 に Type H 線材および Type HT-NX 線材間の接合試料の I - V 特性を示す。Type HT-NX 線材間の接合では同様な条件で作製したにもかかわらず、中間一軸プレス・二次焼成による効果がみられず、Type H 線材間の接合と比べて低い接合 I_c となった。

Fig. 2 に焼成温度を変えて作製した接合試料の I - V 特性を示す。815 °C の焼成で 100 A 級の超伝導接合試料が得られた。このことは、焼成温度を上げることで接合中間層の Bi2223 結晶が成長し接合界面の結合性が改善したことを示唆している。発表では試料の接合界面の断面微細組織と臨界電流特性の関係について議論する。

謝辞

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

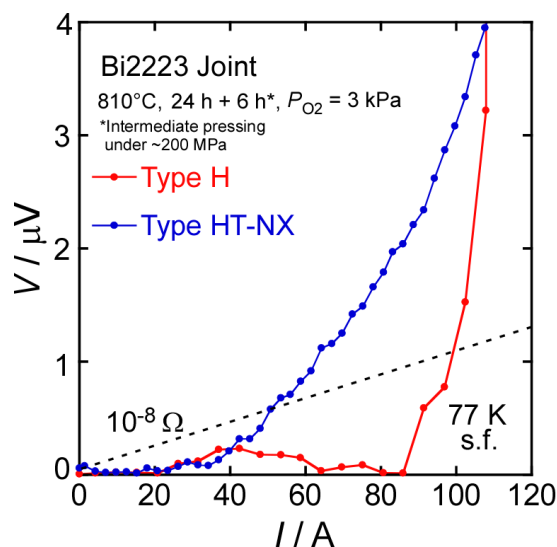


Fig. 1 I - V curves at 77 K in self-field for a superconducting joint between DI-BSCCO® Type H tapes and that between Type HT-NX tapes, both of which were heat-treated at 810 °C.

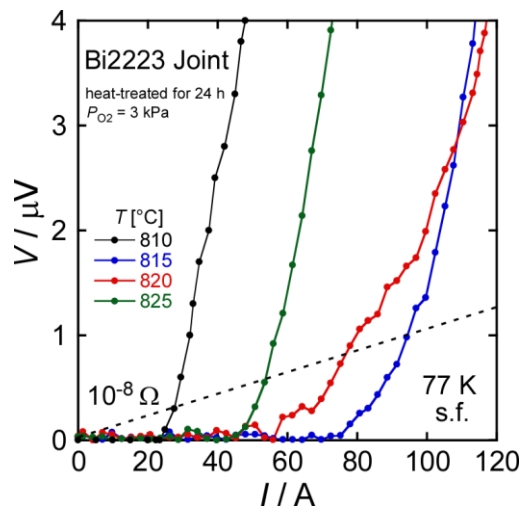


Fig. 2 I - V curves at 77 K in self-field of superconducting joint samples connecting reinforced Bi2223 tapes (Type HT-NX) heat-treated at different temperatures

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. Y. Takeda *et al.*, *Appl. Phys. Express* **12** (2019) 023003

圧延加工による低温焼成部分拡散 *ex-situ* 法 MgB_2 バルクの開発

Development of partial diffusion *ex-situ* MgB_2 bulks by low temperature sintering through flat rolling process

小池 亘, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

KOIKE Wataru, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5620050@aoyama.jp

1. 緒言

MgB_2 超伝導体は、実用線材に用いられている他の高温超伝導体と比べ上部臨界磁場 H_{c2} と不可逆磁場 H_{ir} が低く、臨界電流密度 J_c が磁場中で急激に減衰する。磁場中臨界電流特性の改善には支配的なピンニングセンターである粒界の高密度化、つまり MgB_2 結晶の微細化が重要な指針の一つとなる。さらに、有効電流経路の増加による高 J_c 化には充填率の改善が有効である。*ex-situ* 法は既製の MgB_2 粉末を材料形状に成型し焼結する手法で、均一な組織を持つ多結晶体が得られる。この手法では微細な結晶が高密度に充填した成型体を結晶成長させずに焼結することが高 J_c 化の戦略となる。現在、先行研究において高温長時間焼成試料において高い J_c が報告されているが^[1]、線材開発において、高温長時間焼成による金属シース材との反応が課題となるため、焼成温度の低温化が必要である。以上の背景から、本研究では *ex-situ* 法により作製した MgB_2 バルクの高 J_c 化、また、線材熱処理時の金属シース材との反応抑制のために焼成温度 600 °C 台への低温化を目的とした。本研究独自の戦略として、高密度化のための高圧プレス、結晶成長を抑制するため少量の B 添加を試みた。この手法は *ex-situ* 法でありながら、これまで 900 °C 以上^[1]であった焼成温度を低くしても臨界電流特性に優れることが特長である^[2]。今回はさらに、熱処理前に緻密化と反応性を高めるために高圧プレス後にロール圧延工程を追加し、さらなる焼成温度の低温化を目指した。

2. 実験方法

MgB_2 バルクの作製は MgB_2 粉末(フルウチ化学製, 99%, #100)に少量の B(Pavezyum 製、粒径 250 nm)を $\text{MgB}_2 : \text{B} = 1 : 0.5$ のモル比で混合し、外部から Mg を拡散させる部分拡散 *ex-situ* 法^[2]により行った。具体的には、一端をプレスした SUS316 管に Mg(#100)、 MgB_2 と B の混合粉、そして Mg(粒径 1 mm)の順で充填し、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試料厚さ d は~1.03 mm であり、ロール圧延により、試料厚さ d を最も薄い試料で~0.85 mm まで加工した。熱処理は石英封管内、600~800 °C で行った。微細組織は SEM 観察、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定により評価した。 J_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、焼成時間を 48 h に固定して焼成温度を系統的に変えて作製した、圧延加工により $d \sim 0.85$ mm とした試料の 20 K における $J_c - H$ 特性を示す。圧延による強加工によって反応性が向上し、焼成温度 650 °C の試料は高い J_c を示したが、焼成温度 600 °C の試料の臨界電流特性は著しく劣化した。Fig. 2 に圧延工程追加試料の、焼成温度と最大ピンニング力密度 $F_{p, \max}$ の関係を示す。圧延を施していない試料では焼成温度の低下に伴い $F_{p, \max}$ が低下したが、

圧延工程を加えた試料では低温焼成による $F_{p, \max}$ の低下が抑制され、 $d \sim 0.85$ mm まで圧延した場合には低温焼成でむしろ $F_{p, \max}$ が向上する傾向が認められた。発表では、600 °C 焼成試料の粒間結合改善の試みと、炭素置換 MgB_2 バルクの超伝導特性についても報告する。

参考文献

- [1] S. Mizutani *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 114001
- [2] W. Koike *et al.*, *abstract of CSSJ conference*, Vol. 100 (2020)

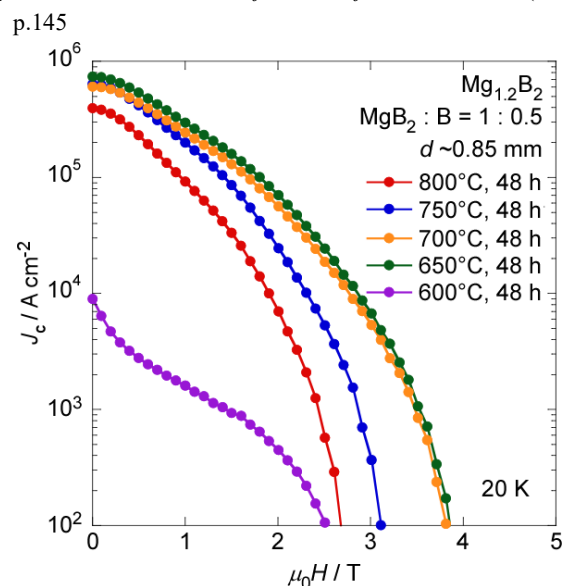


Fig. 1 $J_c - H$ curves at 20 K of MgB_2 bulks prepared by partial diffusion *ex-situ* method with additional flat rolling process.

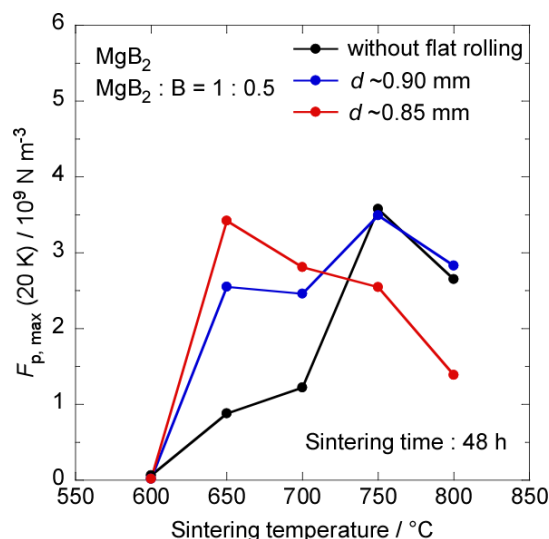


Fig. 2 The relationship between the maximum pinning force density $F_{p, \max}$ and sintering temperature of MgB_2 bulks.

DyBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性向上を目指した溶融プロセスの検討

Investigation of melt-texturing processes for improving field-trapping properties of DyBCO melt textured bulks

三輪 将也、元木 貴則、仙波 実怜、富久 琢磨、笹田 廉陸、下山 淳一(青学大)

MIWA Masaya, MOTOKI Takanori, SEMBA Mirei, TOMIHISA Takuma, SASADA Rempei, SHIMOYAMA Jun-ichi

E-mail: c5621062@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE123, RE: 希土類元素) 銅酸化物超伝導体は Cu-O_{1.5}鎖に酸素不定比性を有し、酸素欠損量δが0.07付近において90 Kを超える高い臨界温度 T_c と液体窒素温度77 Kにおける高い臨界電流密度 J_c を示す。しかし、短い超伝導コヒーレンス長、大きな電氣的・磁氣的異方性、超伝導の d 波対称性のため、結晶方位が異なる結晶粒界は弱結合となり、粒間の J_c は粒内の J_c に比べて極めて低い。弱結合の問題を回避する手法としてREBCO溶融凝固バルク材料が開発されてきた。REBCOを部分溶融状態から徐冷し種結晶を核として結晶成長させることで得られる溶融凝固バルクは単一ドメインの大型擬似単結晶とみなすことができる。そのためバルク内部を周回する永久電流により永久磁石を超える高磁場の捕捉が可能であり、強力超伝導磁石を用いた卓上NMRなどへの応用が期待されている[1]。REBCO溶融凝固バルクの捕捉磁場特性の向上には高 J_c 化と大型化が有効である。さらに、等磁場線が同心円状となる捕捉磁場分布の実現には、組織に乱れの無い均質な結晶成長が求められる。そこで今回は大型で均質なバルクの育成を目指した溶融凝固プロセスの最適化を試みた。

2. 実験方法

本研究では、REにDyを選択し、Dy123: Dy₂BaCuO₅ (Dy211)=7:3のモル比のTEP社製混合粉末を用いた。この粉末に機械的強度向上のためにAg₂Oを10 wt%、Dy211析出物の微細化のためにCeO₂を0.5 wt%添加した。これを一軸プレスにより25 mmφのペレットに成型し、短時間溶融熱処理を行った後、Nd123単結晶を種結晶としてペレットの上面中央に置き、底面加熱式の電気炉を用いて部分溶融状態からの長時間の徐冷で結晶成長させた。結晶成長後、RE/Ba固溶抑制のため1%O₂気流中、800°C、24 hで還元アニールを施した後、酸素気流中での長時間のアニールを行い、酸素量を制御した。これらの試料に対して、ホールプローブを用いて捕捉磁場分布を調べ、SQUID磁束計を用いた磁化測定より超伝導特性を評価した。

3. 結果と考察

育成したDyBCO溶融凝固バルクの外観をFig. 1に示す。4回対称のファセットラインが見られ、外観からはバルク端部まで単一ドメインの結晶が成長したように見える。しかし、Fig. 2(a)の上面研磨写真に見られるように、徐冷時に外周部ほど過冷度が大きくなることによって、外周部からの核生成の影響で多数のクラックが生じていることが分かった。そこで、大型で均質なバルクの育成を目指した溶融凝固プロセスの最適化を試み、徐冷過程の途中から一定温度で長時間保持するプロセスに変えることでFig. 2(b)の上面研磨写真に見られるような端部までほとんどクラックの無いDyBCO溶融凝固バルクの育成に成功した。このバルクの、1 T磁場中冷却で着磁した77 Kにおける捕捉磁場分布をFig. 3に示す。バルク体の大型化による捕捉磁場特性の改善が見られたが、まだ捕捉磁場分布の円形度は低く改善の余地が大きいことが分かった。講演では、バルク体の大型化に向けた異なるアプローチとして低包晶温度REBCOを介したバルク間超伝導接合の試みについても報告する。

参考文献

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

Fig. 1. Appearance of DyBCO melt-textured bulk grown from a Nd123 single crystal placed at the top surface.

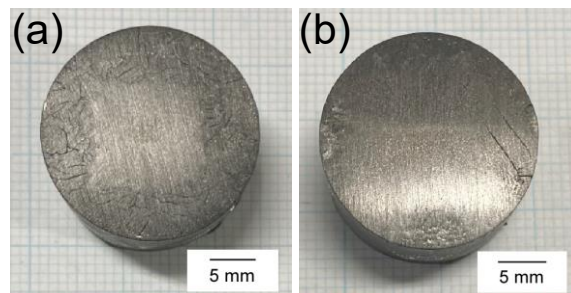


Fig. 2. Appearance of the polished surface of the DyBCO melt textured bulks grown under temperature patterns of typical slow-cooling (a) and constant temperature (b).

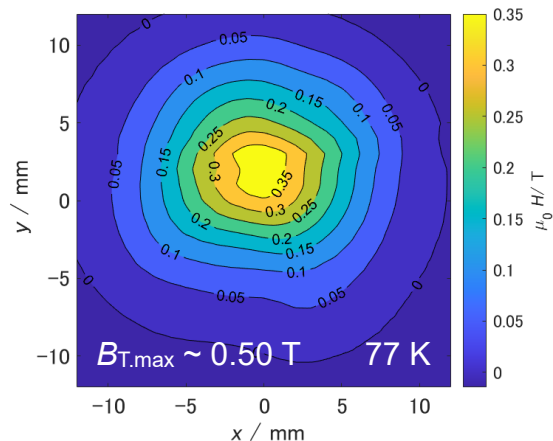


Fig. 3. Trapped field distributions of the DyBCO melt textured bulk (Fig. 2 (b)), which exhibited the maximum trapped field of ~0.5 T at 77 K.

ex-situ SPS 法で作製した Nb₃Sn 超伝導バルク体の磁束ピン止め特性に対する 各種IVおよびV族元素の添加効果

Doping effects of various IV and V group elements on flux pinning properties of
Nb₃Sn superconducting bulk fabricated by an *ex-situ* SPS method

小山田拓真, 内藤智之(岩手大)

OYAMADA Takuma NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

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

1. はじめに

Nb₃Sn 超伝導体の上部臨界磁場 $H_{c2} = 24$ T (4.2 K) [1] は MgB₂ の $H_{c2} = 10 \sim 20$ T (4.2 K) より高く、臨界電流密度 J_c の磁場依存性が小さい。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。先行研究より、ホットプレス法により作製したバルク体を用いて 11 K において 1.15 T の捕捉磁場が得られた [2]。また、前回の学会において Cu を添加した *ex-situ* SPS 法 Nb₃Sn バルク体において、10 K で 3 T 級の捕捉磁場を得たことを報告した [3]。これは Cu 添加による Nb₃Sn 生成の促進のためである一方、Cu の他に Nb₃Sn 超伝導線材において各種IVおよびV族元素を添加することで超伝導特性が向上することが報告されている [1]。例として Ti、Ta、Hf の添加ではこれらの元素が Nb サイトに置換することで T_c 、 B_{c2} が向上する。また、Zr では結晶粒の微細化により J_c が向上する [1]。このことから、本研究では SPS 法で作製した Nb₃Sn バルクの磁束ピン止め特性に対する Ti および Ta の添加効果について報告する。

2. 実験方法

原料粉末には Nb 粉末(純度 99.9%, 粒径 43 μ m 以下)、Sn 粉末(純度 99.9%, 粒径 38 μ m 以下)、Cu 粉末(純度 99.9%, 粒径 75 μ m)、Ti 粉末(純度 99.9%, 粒径 45 μ m)、Cu 粉末(純度 99.9%, 粒径 46 μ m 以下)を用いた。まず Nb と Sn を化学量論比の 3 : 1 で秤量し、Nb₃Sn の生成温度低下の効果を得るために Cu を 1 wt% 添加した。その後自動乳鉢で 30 分混合し、Ar 雰囲気中で 950°C × 24 時間の熱処理を行った。この Nb₃Sn 前駆体を粉砕し 30 分混合した後、SPS 法によりバルク体を作製した。SPS 条件は 900°C × 20 分で行い、Ti は熱処理を行う前と SPS 直前の 2 通りで添加し、Ta においては熱処理前に添加した。

作製した Nb₃Sn バルク体は X 線回折 (XRD) によって結晶相を同定し、磁場中冷却着磁 (FC) 法で着磁を行って捕捉磁場の評価した。

3. 実験結果

Fig. 1 に SPS 条件が 900°C × 20 分で、熱処理前に Ti を 1 at% 添加したバルクと SPS 前に Ti を 1, 2, 3 at% 添加したバルクの XRD パターンを示す。どのバルクでも主相は Nb₃Sn であるが、僅かに不純物である Nb₆Sn₅ のピークが見られた。このことから Cu 添加による熱処理温度低下の効果は得られたが、Nb₆Sn₅ の生成は Nb への Sn の拡散が不十分であったと考えられる。

Fig. 2 に各試料の捕捉磁場の温度依存性を示す。3 at% Ti added precursor bulk において約 3 T の捕捉磁場を得られた。また、1 at% Ti contained precursor bulk では約 2.4 T しか得られなかった。このことから、SPS 前に添加したことで Ti がピン止め点になったと考えられる。

また、講演では Ti および Ta 添加 Nb₃Sn バルクの電気抵抗率測定から得られた T_c や臨界電流密度についても報告する予定である。

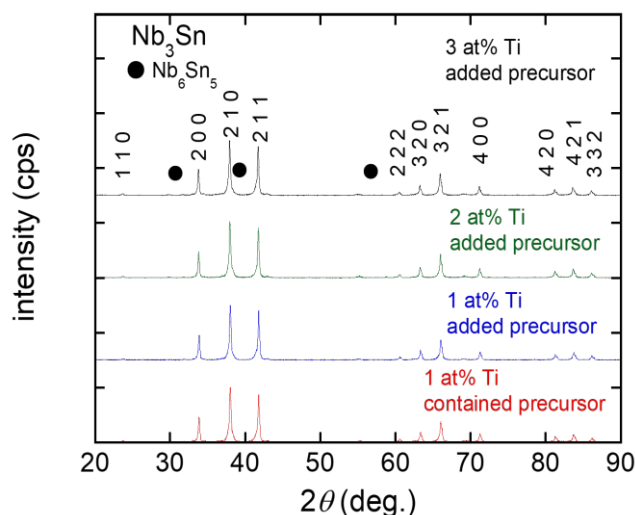


Fig.1 XRD patterns of Ti-doped bulks after SPS

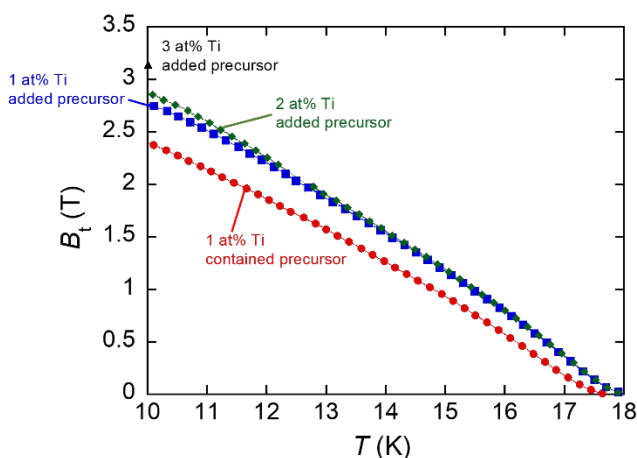


Fig.2 Temperature dependence of trapped magnetic field in Ti-doped bulks

参考文献

- 1 K. Tachikawa, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 45 No. 3 (2010) 88 - 98
- 2 K. Amase *et al.*: Abstract of ACASC/ICMC/CSSJ Joint Conference, (2020) p.102
- 3 T. Oyamada *et al.*: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 101 (2020) p. 81

低温合成した前駆体粉末を用いて SPS 法で作製した CaKFe₄As₄ バルクの超伝導特性

Superconducting properties of CaKFe₄As₄ bulks

fabricated by a SPS method from precursor powders synthesized at low-temperatures

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

2008 年に発見された鉄系超伝導体は、高い上部臨界磁場 H_{c2} を持つことから高磁場応用が期待されている。特に 122 系はその高い T_c や H_{c2} 、低い異方性から多結晶体での研究が進められており、その性能は実用化レベルである $J_c \sim 10^5$ A/cm² を得ている[1]。更なる J_c 向上を達成するため、122 系の合成条件の最適化に加えて、新たな材料探索も行われている。2016 年に産総研より報告された CaKFe₄As₄ (CaK1144) は 122 系と同等の超伝導特性を持つことに加え、定比化合物であるという 122 系には無い強みを持つ[2]。しかしながら、合成条件がシビアであること、線材のシース材である銀と反応すること、高温で分解することなどの問題点を抱えている。我々はこれまでに 122 系および 1144 系によるバルク磁石の開発を行ってきたが、上記の問題からテスラ級を捕捉させるに至っていない[3]。このような問題に対し、最近、メカノケミカル反応を利用した CaK1144 の比較的合成条件に寛容な低温合成法が報告された[4]。そこで本研究では、低温合成法により合成した前駆体粉末から SPS 法でバルク体を作製し、その超伝導特性からバルク磁石化の可能性を調べた。

2. 実験方法

多結晶 CaK1144 粉末は単体元素 Ca, K, Fe, As を用いて合成した。Ar 雰囲気グローブボックス中でこれらの原料を秤量し、ボールミル混合を行い、外径 10 mm、内径 8 mm のステンレスパイプに Ar 雰囲気中で封入した後、熱処理を行った。熱処理は 150°C/h で昇温し、600, 700, 800, 900°C で 12 時間保持することで焼成温度の最適化を行った。得られた多結晶粉末から SPS 法を用いてバルク体を作製した。SPS 条件は Ar 雰囲気、印加圧力 50 MPa、昇温レート 50°C/min とした。

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

3. 結果と考察

Fig.1 に異なるボールミルパラメータで混合し、600°C 12 時間の熱処理を施した CaK1144 前駆体粉末の XRD パターンを示す。混合エネルギーが小さい 600rpm 2 時間の試料では CaK1144 のピークは確認されなかったが、混合エネルギーを増していくと CaK1144 のピークが出現し、その割合が増えていくことが確認できる。これはエネルギーの増加に伴い、前述のメカノケミカル反応が進行していることに由来する。

Fig.2 に 600, 700, 800, 900°C で 12 時間焼成を行った CaK1144 前駆体粉末の XRD パターンを示す。すべての焼成温度で CaK1144 のピークが確認でき、CaK1144 ピーク強度は温度上昇に伴い強くなった。しかし 800, 900°C 試料では高温相である CaFeAs₃ の生成に伴った組成ずれが発生したことにより多数の不純物が生成し、900°C 試料ではピーク強度が低下した。CaK1144 が定比化合物であることを考慮すると、不純物抑制の観点から焼成温度は 700~800°C が最適であると考えられる。

講演では前駆体粉末および SPS バルクの各種超伝導特性の特性について報告する予定である。

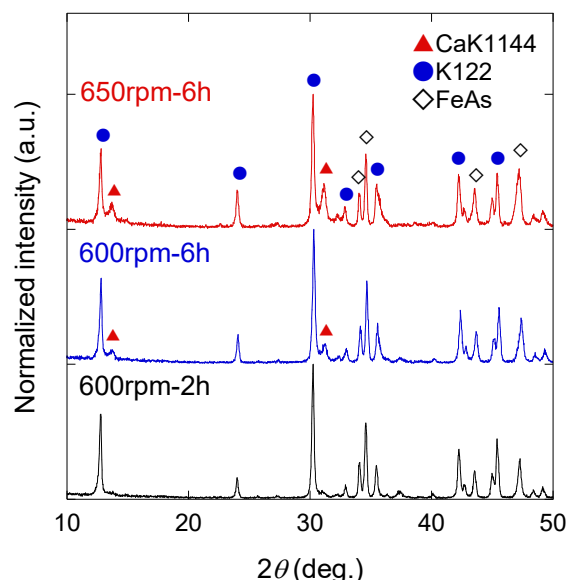


Fig.1 XRD patterns of the samples normalized by the intensity of (103) peak of K122.

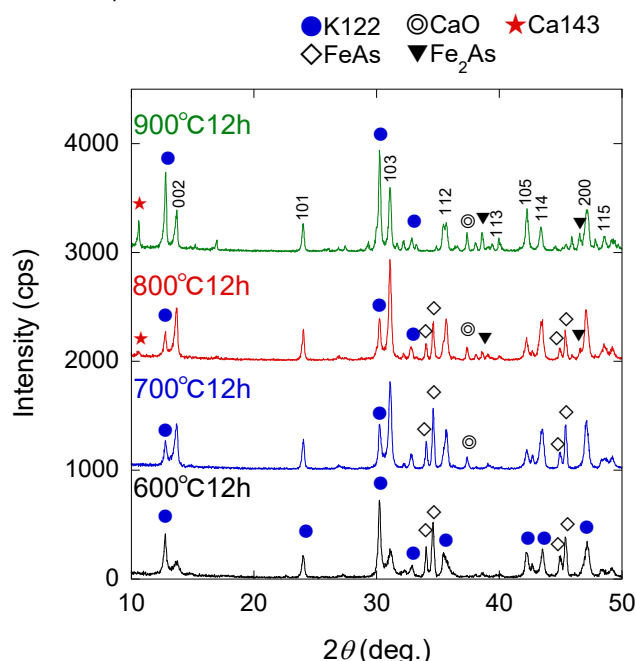


Fig.2 XRD patterns of the samples synthesized at various temperatures.

1. Z.Gao *et al.*, Supercond.Sci.Technol., **30** (2017) 095012
2. A.Iyo *et al.*, J.Am.Chem.Soc., **138** (2016) 3410-3415
3. H.Hakoishi *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol.101 (2021) p.79
4. A.Masi *et al.*, Supercond.Sci.Technol., **33** (2020) 074003

無酸素銅板/MgB₂超伝導バルク積層のパルス着磁における 無酸素銅の効果Ⅱ:実験による検証

An effect of OFC plates on the pulsed-field magnetization process
for OFC-plates/MgB₂-bulks stacking: experimental verification

吉田 智貴, 内藤 智之 (岩手大)

YOSHIDA Tomoki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

E-mail: g0321179@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂超伝導体は弱結合の問題が無く、軽量かつレアアースフリーであるためバルク応用に適した材料であるが、動作温度である20 K以下における比熱 C が小さく、熱的に不安定な材料である。そのため、着磁中にフラックスジャンプが発生しやすく応用上の大きな障壁となっている。着磁法の一つであるパルス着磁(PFM)では着磁中の温度上昇が大きいため、MgB₂バルクの着磁には不向きであるとされていた。しかし、我々の研究グループでは MgB₂リングバルクと無酸素銅板を積層し、リング内部に軟磁鉄 Yoke を挿入した複合構造において、PFM 法による MgB₂バルクの捕捉磁場としては最高の 1.61 T を達成した[1]。

前回の学会では、未解明であった無酸素銅板が捕捉磁場特性に与える影響を明らかにし、有限要素法を用いた解析結果を報告した。[2] 解析では、無酸素銅板の発熱がバルクの発熱よりも大きく、無酸素銅板からバルクに熱が伝播することで捕捉磁場を低下させるという結果が得られた。

本研究では、前回までに得られた解析結果を実験的に検証する。

2. 実験方法

浸透法で作製した MgB₂リングバルク(外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 9 mm)2 枚を一体化させ試料として用いた。また、2 枚の無酸素銅板(外径 60 mm、内径 20 mm、高さ 0.5 mm)をリングバルク上下面に積層させた。これらをそれぞれ、w/o Cu plate、w/ Cu plate と呼ぶ。着磁コイルとしてスプリットコイル(内径 72 mm、外径 124 mm、高さ 35 mm)を用いて外部磁場を印加し、その内部には軟磁鉄 Yoke を設置した。バルクは真鍮ホルダーを介してコールドステージに固定し、GM(Gifford McMahon)冷凍機によって初期温度 $T_s = 20$ K まで冷却した。着磁中の捕捉磁場はバルク表面のホールセンサで測定した。また、温度測定は $\phi 76 \mu\text{m}$ のクロメル-コンスタンタン熱電対を用いて行った。熱電対はバルク表面、または無酸素銅板表面に 2 箇所(T1,T2)、真鍮ホルダー先端に 1 箇所(T3)設置した。Fig.1 に着磁装置の概略図とバルク表面のセットアップを示す。着磁後の捕捉磁場分布はバルク表面 4 mm 上方でホールセンサを走査することで測定した。

3. 実験結果

Fig.2 に w/o Cu plate、 $T_s = 20$ K、 $B_{\text{ex}} = 1.0$ T における T1 の温度上昇の時間依存性を示す。磁束の侵入に伴いバルクは発熱し、最大温度 $T_{\text{max}} = 55$ K であった。これは解析により得られたデータと概ね一致する。実験ではバルク表面に熱電対を設置することでより正確な温度上昇を観測することが出来る。これにより、無酸素銅板の発熱が捕捉磁場特性に与える影響を実験的に検証することが可能となる。

当日の発表では、w/o Cu plate、w/ Cu plate の捕捉磁場特性について、磁場と温度上昇の観点から解析結果と併せて議論する予定である。

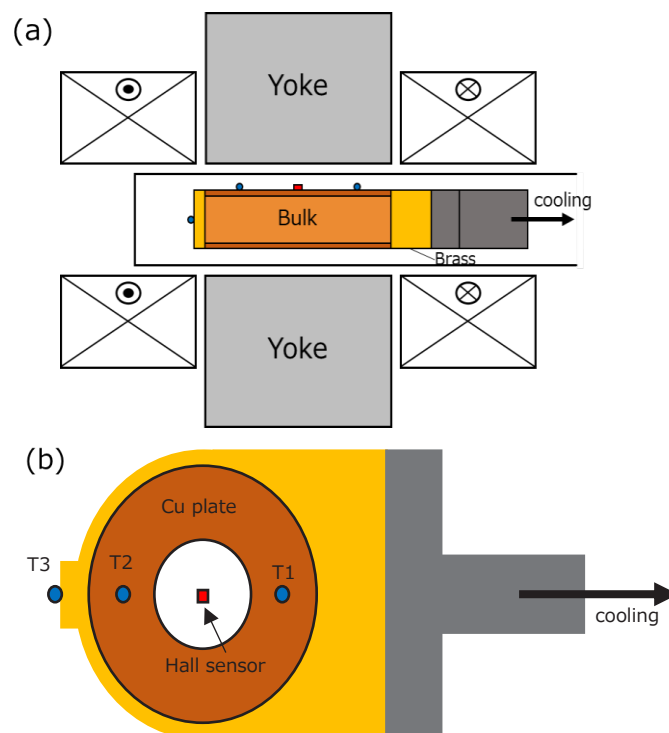


Fig.1 (a) Experimental setup around the bulk and the magnetizing coil. (b) The positions of temperature(T1-T3) and trapped field measurements on the bulk surface.

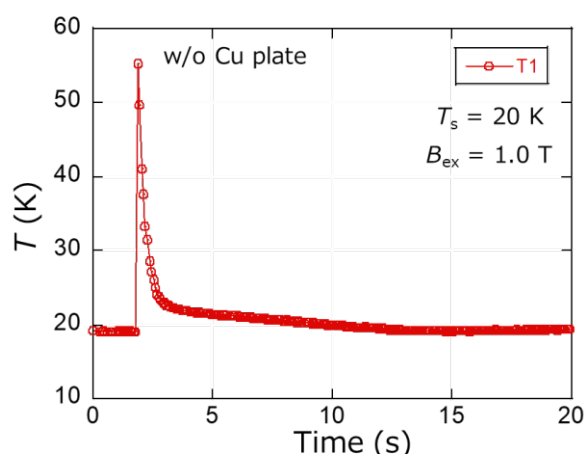


Fig.2 The time evolution of temperature T1 at $T_s = 20$ K after applying the pulse field of 1.0 T.

参考文献

- [1] T. Hirano, et al.: *Supercond. Sci. Technol.* **33** (2020) 085002 (10pp)
- [2] T. Yoshida, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 101* (2021) p.115

パルス着磁における軟鉄ヨークとバルク磁石の捕捉磁場の関係

Relationship between trapped field performance and soft-iron yoke on bulk magnet excited by pulsed-field magnetization

YU CONG, MAHMOUD ASAAD, 横山 和哉(足利大); 岡 徹雄(芝浦工大)

YU CONG, MAHMOUD ASAAD, YOKOYAMA Kazuya, (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: g21609@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石は、小型・安価な装置で既存の永久磁石や電磁石を超える強い磁場を発生させることができる。そこで、大型風力用の発電機、航空機や大型船舶用のモーター等への応用が検討されている。これらの装置において、バルク磁石を磁化するには、電機子のコイルを使用してオンサイトで着磁する必要があり、着磁方法としては短時間で作業できるパルス磁化法が現実的である。発電機やモーター応用の際には、磁気回路を形成するためにバックヨークが用いられるが、着磁の際にはバルク体に磁場をより長く曝露して、捕捉磁場を大きくする役割もなしている。この時、ヨークが大きい方が捕捉磁場を大きくすることができるが、一方で軟鉄が多くなるため重量が大きくなる。前述の発電機やモーター応用の場合、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る。そのため、捕捉磁場を維持しつつ、ヨークを小型・軽量化することが必要である。本研究は、軟鉄ヨークの厚みが捕捉磁場の大きさに及ぼす影響を実験により検討する。

2. 実験方法

Fig. 1(a)に、着磁コイルを取り付けたバルク磁石の磁極部分の概要、及び軟鉄ヨークを付けた着磁コイルの写真を示す。バルク体を軟鉄ヨークで挟む形状となっており、試料とサンプルステージの間のヨークは、 $\phi 64 \times 20$ mm のパーメンジュール、着磁コイルに取り付けてある試料上部のヨークは軟鉄である。本研究では、上部のヨークを Fig. 1(b)に示す $\phi 64$ mm で厚みの異なるディスク形状のもの、同図(c)に示す $\phi 64$ mm で幅が 15 mm のクロス形状で厚みの異なるヨークを製作した。

実験は、厚さ 2 mm の SUS316L 製のリングを取り付けた $\phi 60 \times 20$ mm の GdBCO バルク体(日本製鉄製)を、2 段 GM 冷凍機(RM20, アルバック製)のコールドヘッドの先端に接続したサンプルステージに配置し、20, 50 K に冷却する。各温度において 3.9~6.2 T のパルス磁場(立上時間: 10 ms, 全パルス幅: 100 ms)を 1 回印加し、試料表面の磁束密度及び温度の時間変化を測定する。着磁後、コイルを取り外して磁極表面(試料表面から約 4 mm)の磁束密度分布を測定し、実測データから総磁束量を算出する。

3. 結果及び考察

Fig. 2 に 20 及び 50 K における総磁束量の印加磁場依存性を示す。ヨークが薄いほど、低い磁場で総磁束量の最大値をとり、その絶対値は低い。ヨークが厚いほど総磁束量は大きい、20 K では t47 と t30 が、50 K では t47, t30, t20 の差がわずかという結果となった。これらの結果から、ヨークの厚みは捕捉磁場に大きく影響することが示された。

4. まとめ

本研究は、捕捉磁場を維持しつつ装置の軽量化を図ることを目的として、バルク磁石のパルス着磁の際に用いられる軟鉄ヨークに注目し、その厚さが着磁特性に及ぼす影響を調査した。ディスク形状のヨークにおいては、その厚さが捕捉磁場の大きさに大きく影響することが示された。現在、クロス型ヨークについても実験を進行中であり、発表当日に実験結果を報告する予定である。なお、本研究は JSPS 科研費 20K04449 の助成を受けたものである。

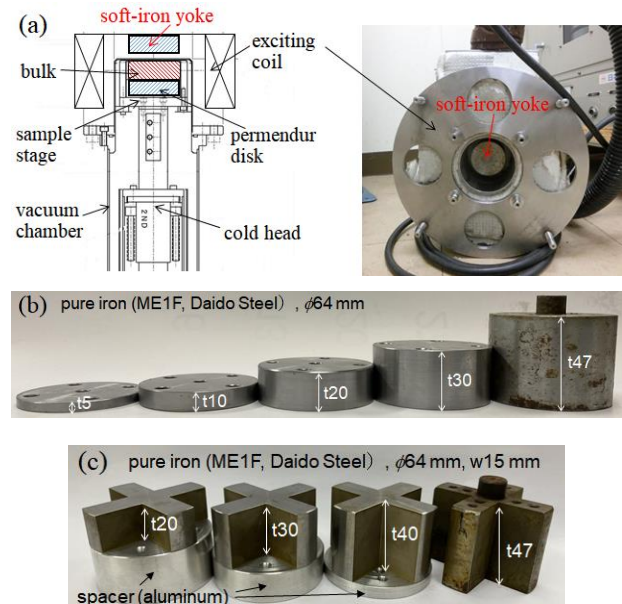


Fig. 1. (a) Schematic of the magnetic pole part of bulk magnet when setting an exciting coil. (b) Disk-shaped yokes with different thickness. (c) Cross-shaped yokes with different thickness.

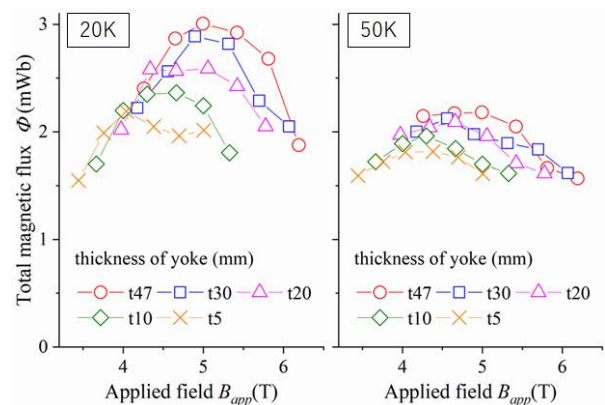


Fig. 2. Comparison of the total magnetic flux, Φ , as a function of the applied field when using t47, t30, t20, t10, and t5 yokes at 20 and 50 K.

複 写 を さ れ る 方 に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、公益社団法人 日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人 学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル

TEL 03-3475-5618 FAX 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本学会へご連絡下さい。

本誌に掲載された講演概要の著作権は低温工学・超電導学会が所有しています。

発行／公益社団法人 低温工学・超電導学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 6-12-8 バレドール本郷 302 号

電話 03-3818-4539 FAX 03-3818-4573

E-mail: cssj@csj.or.jp URL: <https://csj.or.jp/>

銀行口座 みずほ銀行 本郷支店

普通 1012705 公益社団法人 低温工学・超電導学会

郵便振替口座 00140-8-192430 公益社団法人 低温工学・超電導学会

第 102 回 2021 年度秋季

低温工学・超電導学会講演概要集

2021 年 12 月 14 日 発行