

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 - 加振時の発熱評価 -

Development of REBCO HTS Magnet for Maglev - Evaluation of the heat load due to the vibration -

水野 克俊, 田中 実, 小方 正文(鉄道総研); 竹内 正基, 岸 直哉(RIMTEC); 岡村 哲至(東工大)
MIZUNO Katsutoshi, TANAKA Minoru, OGATA Masafumi (RTRI);
TAKEUCHI Masaki, KISHI Naoya (RIMTEC); OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)
E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、希土類系高温超電導線材(以下 REBCO 線材)の磁場中での優れた通電特性に着目し、浮上式鉄道への応用を検討している。液体ヘリウム等の寒剤が不要となり運用コストが低減されることに加え、断熱構造の簡素化や冷凍機の消費電力低減などから磁石も軽量化される。鉄道総研ではすでに実機大のレーストラック REBCO コイルを製作し、コイル温度 35 K において起磁力 700 kA, 32 K で 750 kA を実証している[1]。車載超電導磁石は走行振動を受けるため、高い耐振動性が求められる。そのため、製作した実機大 REBCO コイルに対して、機械加振試験を実施して発熱特性や通電特性の劣化の有無、周波数応答について評価したのでその結果を報告する。

2. コイル構造

実機大コイルはシングルパンケーキコイル 8 積層の構成となっており、フープ応力や地上コイルからの電磁力を考慮してアルミ合金(A7075)製のコイルケースに収められている(Fig. 1)。また、パンケーキコイルとコイルケースの空隙は樹脂で充填しており、充填する樹脂は熱応力によるクラックが発生しにくいだけでなく、充填時に気泡を残さないよう低粘度であることが望ましい。そこで、今回のコイル製作においてはノルボルネン系樹脂(PENTAM®)を用いた。ノルボルネン系モノマーは常温で 10 mPa·s 以下と極めて低粘度であるため、気泡が残りにくいだけでなく、コイルケースにパンケーキコイルを収めてから樹脂を流し込むことができ作業が容易である(特許出願中)。さらに、極低温における機械的性質にも優れており、エポキシ樹脂と同等の引っ張り強さを有し、伸び率も高い特徴がある[2]。

3. 加振試験

製作した REBCO コイルに対して、浮上式鉄道の走行振動を想定した加振試験を実施した。10 G を上回る振動加速度を与えるため、コイルは共振周波数で加振された。これは低温超電導磁石に対しても行われてきた手法である[3]。REBCO コイルはクライオスタット天板から吊下げられており、コイル外周の荷重支持部を加振点として、ロッドを介して動電型加振機に接続されている。(Fig. 2)

加振試験の一例として、コイルを 35 K で起磁力 700 kA 励磁した状態で、曲げ 1 次モードで最大振動加速度 15 G で加振した際のコイル両端電圧とコイル平均温度を Fig. 3 に示す。加振は 20 分間行っており、加振前との比較からも明らかとなり、コイル両端電圧に有意な変化は確認されなかった。そのため、局所的なコイルターン間の摩擦発熱などは発生していないと考えられる。コイル温度に関しては緩やかな上昇が確認され、温度上昇率や温度上昇による冷凍機の冷凍能力変化から発熱量を概算すると、2~3 W 程度となった。コイル全体への熱侵入と比較すれば大きな発熱ではなく、運用上問題とはならないことを確認した。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

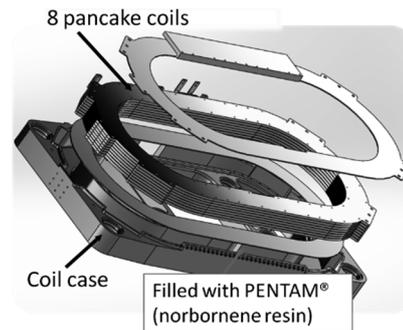


Fig. 1 Assembly of the real-scale REBCO coil.

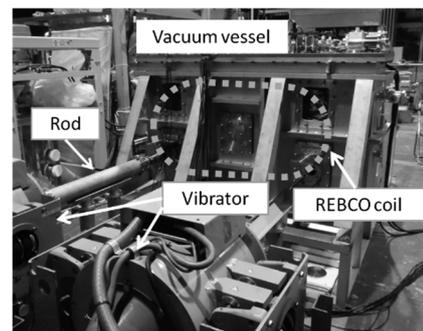


Fig. 2 Vibration test using 2 electrodynamic vibration generators.

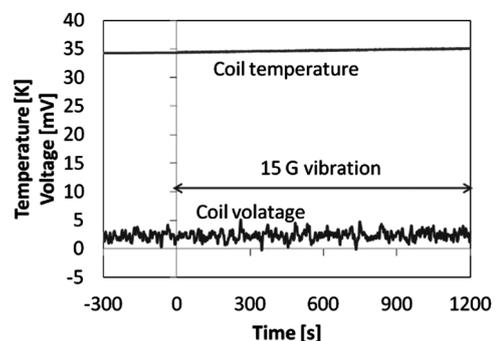


Fig. 3 Fluctuation of the coil voltage and temperature rise during 15 G vibration in bending mode.

参考文献

- [1] K. Mizuno, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2017) p. 9.
- [2] V. J. Toplosky, et al., Adv. Cryo. Eng., Vol. 52 (2006) pp. 219-224
- [3] E. Suzuki, et al., J. Cryo. Soc. Jpn., 29 (1994) pp. 524-529.

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -高温超電導コイル振動特性評価-

Development of REBCO HTS Magnet for Maglev -Evaluation of Dynamic Characteristics of REBCO HTS Coil-

田中 実, 水野 克俊, 小方 正文(鉄道総研)
TANAKA Minoru, MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi (RTRI)
E-mail: tanaka.minoru.96@rtri.or.jp

1. はじめに

浮上式鉄道用超電導磁石の高温超電導化を目標として、実機大の RE 系高温超電導コイル(以下 REBCO コイル)を製作し、35K で 700kA の起磁力を確認した[1]。超電導磁石を車載する場合、走行速度に応じた周波数で振動するため、REBCO コイルの振動特性の評価は重要である。そこで、コイルケースの隙間を樹脂で充填して振動対策をした REBCO コイルについて、インパルスハンマを用いた実験モード解析により固有モードを確認後、励磁中に共振させる機械加振試験を行ない、振動特性を評価したので報告する。

2. インパルスハンマを用いた実験モード解析

Fig.1 に示すように、REBCO コイルを天板から吊り下げて、厚さ方向を自由支持とし、インパルスハンマで打撃時の各部の振動加速度から周波数応答関数を求めた。さらに、アニメーションにより固有モードを確認した。309Hz(時速 500km 走行に相当)までの周波数域では、Fig.2 に示すねじりと曲げの固有モードがみられた。

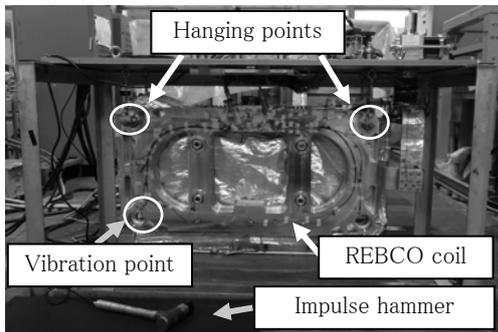
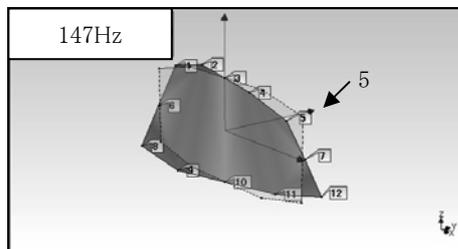
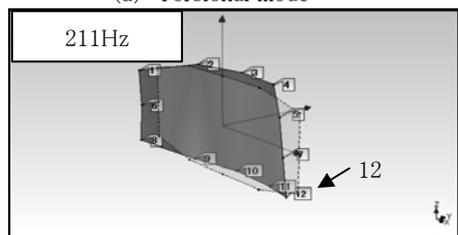


Fig.1 Impact testing of REBCO coil



(a) Torsional mode

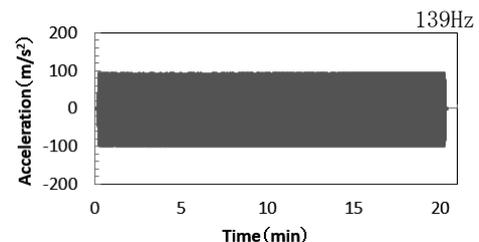


(b) Bending mode

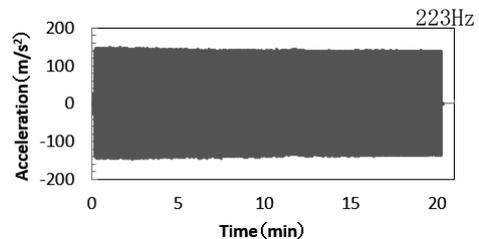
Fig.2 Natural vibration mode of REBCO coil

3. 連続加振試験による振動特性評価

超電導磁石は共振により発熱量が増加することが知られている[2]。そこで、REBCO コイルを真空容器内に設置し、伝導冷却で 35K まで冷却して、外部電源から常時通電で起磁力 700kA に励磁後、Fig.1 の加振点とロッドで接続した動電型加振機により、機械加振試験を行った。まず、周波数掃引により、ねじりと曲げの共振周波数を確認した(139Hz, 223Hz)。次に、最大振動加速度をねじりは 10G, 曲げは 15G となるように加振力を調整し、20 分間の連続加振試験を行った。Fig.3 に各モードの最大振動加速度の時間変化を示す。加振前後で振動特性に変化は見られなかった。また、20 分間の共振により、ねじりは 1.3K, 曲げは 0.6K 温度上昇したが、発生磁場や電圧に変化は見られず、起磁力 700kA を維持できることを確認した。



(a) Torsional mode (Fig.2(a) : 5)



(b) Bending mode (Fig.2(b) : 12)

Fig.3 Vibration acceleration of REBCO coil

4. まとめ

コイルケースの隙間を樹脂充填して振動対策をした REBCO コイルについて、機械加振試験により振動特性を評価した。起磁力 700kA で励磁中、ねじりは最大振動加速度 10G, 曲げは 15G で 20 分間共振させたが、加振前後で振動特性の変化は見られず、温度上昇はわずかで、起磁力 700kA を維持できることを確認した。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

1. K. Mizuno, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2017) p. 9.
2. H. Tsuchishima, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 29, No. 10 (1994) p.530-536.

RE 系大型レーストラックコイルの開発

Development of a large-scale racetrack coil wound with REBCO-coated conductor

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造(東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo (TOSHIBA)

E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

1. はじめに

RE系高温超電導コイルの実用化に向け、これまで線材の超電導特性を劣化させずにコイル化する技術の開発を進めてきた[1, 2]。今回、風力用の発電機やモータなどの回転機器、加速器用電磁石などに適用可能な大型のレーストラックコイルを開発した。本発表では、コイル製作方法および液体窒素中での通電試験結果の詳細について報告する。

2. コイル諸元

超電導コイルは、巻線部に1 mm程度の微小区間であっても線材の超電導特性が劣化すると、設計通りの通電特性が得られない。コイルが大型になるほど線材長が長くなるため、全長にわたって線材を劣化させずにコイル化することが困難になる。今回、RE系コイルの実機適用を目指して、線材長が約1 kmの大型レーストラックコイルを開発した。レーストラックコイルの外観をFig.1に示し、コイル諸元をTable1に示す。RE系線材は、比較のため、厚さ、臨界電流特性の異なる2種類の4 mm幅線材を使用し、2つの樹脂含浸シングルパンケーキ(#1, #2)を試作した。また、冷却時の熱応力による劣化対策として、フッ素樹脂でコーティングした絶縁テープを共巻きし、ターン間の接着を弱めている。樹脂硬化後、それぞれのコイルの巻厚寸法を測定した結果、直線部と半円部との寸法差は最大で0.4 mmであり、良好な寸法精度で巻線できていることを確認した。

3. 通電試験結果

試作したコイルを液体窒素温度で冷却し、77 K、自己磁場中での通電試験を実施した。励磁は、電圧発生するまでは5 A刻みで電流値をホールドし、電圧発生を確認したらホールド間隔を1 A刻みにして各電流値での電圧を取得した。コイル両端電圧が 10^{-8} V/cmを超えたのを確認後、測定を終了した。試験結果をFig.2に示す。コイル臨界電流値は、それぞれ115 A, 56 A(電界定義 10^{-6} V/cm)、コイルn値23, 24(10^{-9} ~ 10^{-8} V/cm)であり、 10^{-9} V/cmの低電界領域まで良好な超電導特性を有していることを確認した。また、磁場分布と77 Kでの短尺線材の臨界電流の磁場、角度依存性を用いて計算したコイル電流-電圧特性を同じくFig.2に示した。実験結果と計算結果は定量的に一致しており、どちらのコイルについても劣化がないことを確認した。

4. ヒートサイクル試験結果

熱応力の繰り返しに対する耐久性を評価するため、ヒートサイクル試験を実施中である。液体窒素中での通電試験後、一度、コイルを室温まで昇温し、再度液体窒素温度まで冷却して、繰り返し3回の通電試験を行った。各測定の間には約1カ月のインターバルがある。#1コイルのヒートサイクル試験結果をFig.3に示す。コイル臨界電流値とコイルn値は、1回目の結果とほぼ一致しており、ヒートサイクルによる超電導特性の低下がないことを確認した。

5. まとめ

風力用の発電機やモータなどの回転機器、加速器用電磁石等への適用に向けて、大型のレーストラックコイルを試作し、液体窒素中での通電試験により超電導特性を評価した。試

験の結果、短尺線材の臨界電流特性から予測される計算結果と一致すること、また、低電界領域まで良好な超電導特性を有していることを確認した。さらに、ヒートサイクル試験においても超電導特性の低下は見られず、熱応力に対しても高い耐久性を有することを確認した。今後は、引き続きヒートサイクル試験を継続するとともに、伝導冷却にて通電試験を実施し、低温での超電導特性を評価する予定である。

参考文献

1. S. Iwai, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.92 (2015) p.182
2. S. Iwai, et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.93 (2016) p.8



Fig.1 Photograph of large-scale racetrack coils (#1and #2)

Table 1 Specification of large-scale racetrack coils

| Coil No. | #1 | #2 |
|----------------------|------|-----|
| Tape width (mm) | 4 | 4 |
| Tape thickness (mm) | 0.17 | 0.1 |
| Tape length (m) | 978 | 945 |
| Inner diameter (mm) | 205 | 205 |
| Outer diameter (mm) | 286 | 257 |
| Straight length (mm) | 570 | 570 |
| Turns | 365 | 365 |
| Coil Ic (A) | 115 | 56 |
| Coil n-value | 23 | 24 |

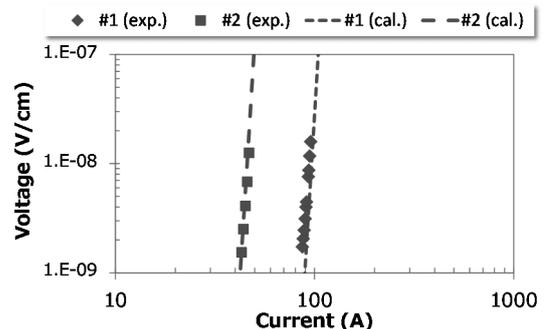


Fig.2 V-I characteristics of racetrack coils at 77 K

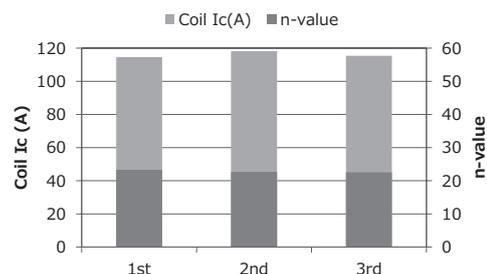


Fig.3 Thermal cycle test of racetrack coil #1

SUS 補強構造を有する Gd123 コイルの電磁力特性

Electromechanical properties of Gd123 coil with stainless-steel reinforcement structure

淡路 智, 高橋弘紀, 岡田達典(東北大金研); 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理(東北大工); 渡部智則, 長屋重夫(中部電力)
 AWAJI Satoshi, TAKAHASHI Kohki, OKADA Tatsunori (Tohoku Univ.); KATO Masahiro, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto
 (Tohoku Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
 E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Yoroi 構造と呼ばれるコイル補強方法は、高温超伝導マグネットを高電磁力下で用いる強磁場マグネットの補強の一つとして有効である [1, 2]。この構造は、パンケーキコイルを外側リングと円盤状の蓋で囲い込む構造を有し、外リングと円盤によってコイルを補強する。この考え方は、加速器などで用いられているリム構造に似ているが、パンケーキコイルを上下から挟み込む円盤が、外リングをさらに補強する点が特徴である。一方で、円盤がコイル内部に位置するため、これによる空間電流密度の減少が問題となる。今回は、円盤の厚みを極力まで薄くした、実際のマグネットに適用できる現実的な補強構造のテストコイルを作製し、その電磁力特性を評価した。

2. SUS 補強 Gd123 コイル

作製したコイルは内径 250 mm, 外形 265 mm, パンケーキあたり 55 ターンのダブルパンケーキコイルである。用いた線材はフジクラ製、幅 4mm の Cu メッキ GdBa₂Cu₃O_y テープである。ここに、ステンレス製の径方向厚み 5 mm の外リングと、外形 276 mm, 内径 240 mm, 厚み 0.5 mm の円盤を組み合わせたことで、補強構造とした。絶縁は 12.5 μm のポリミッドテープ共巻きを用い、パラフィン含浸を行った。実験は、11 T のバックアップ磁場中液体ヘリウム中で、通電により電磁力を印加した。最大 360 A までの通電によって、線材には最大で、線材換算で 1100 MPa, ハステロイ換算で約 1750 MPa の電磁力を印加した。

3. 電磁力試験結果

Fig. 1 に電磁力試験時のコイル最外面及び最内面のひずみ測定結果を示す。11 T のバックアップ磁場中で、最大 360 A まで通電した。コイルへの通電電流の増加にしたがって、コイル表面のひずみが增大していることが分かる。しかし、ひずみの値は場所によって異なっており、最大電流印加時には、小さい部分で 0.45%, 大きい部分で 0.6% を超えている。

補強構造を含むコイルの応力及びひずみ分布は、円筒モデルを仮定することで解析的に計算することができる。計算の結果、11 T, 350 A で最大ひずみは、内側で約 0.45%, 外側で約 0.4% となった。この値は、実験で得られた低い部分のひずみとほぼ一致する。このひずみが得られたのは、Fig. 2 挿入図にあるように、電極から遠い部分であることから、電極の影響のない部分でほぼ計算通りの補強効果が得られていると考えられる。一方で、電極近傍ではひずみが大きくなり、電極構造により補強が十分得られていない。これは、電極で外側補強リングが分割されていることによる。

一方で、電磁力によるひずみは最大で 0.6% であり、線材の引っ張りひずみ限界とされている約 0.5% を超えている。しかし、コイルからは低下に伴う電圧の発生は見られなかった。これは、コイルと SUS 補強の熱収縮差に伴う圧縮の熱ひずみが、予ひずみとして印加されているためと考えられる。

4. まとめ

コイルを円盤と外リングで覆う補強構造を現実的なマグネットに利用するために、薄い円盤を採用した構造で、電磁力試験を行った。その結果、薄い円盤でも十分な補強効果が得ら

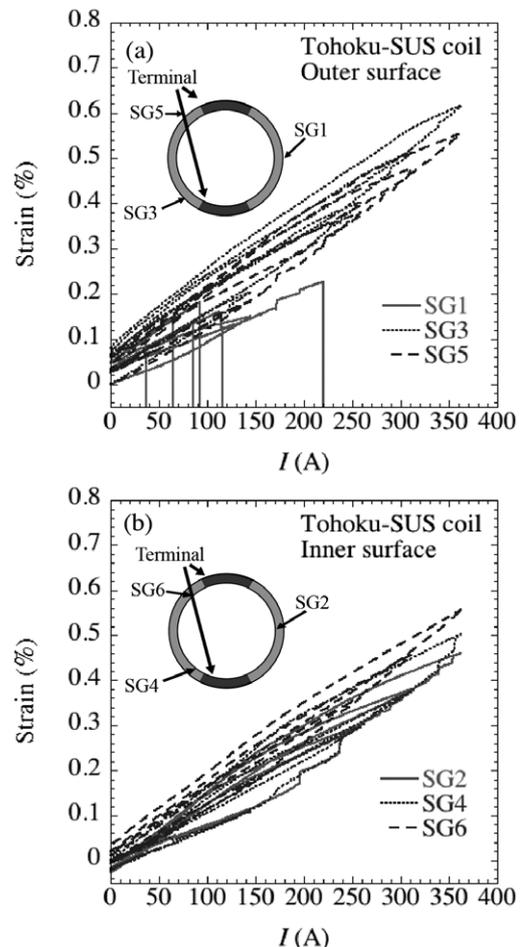


Fig. 1 Strains on Gd123 coil reinforced by SUS (a) outer surface and (b) inner surface of the coil.

れることが分かった。また、熱ひずみによると考えられるひずみ限界の向上が示唆される結果が得られた。当日は補強構造の応力分布についても報告する。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤B 15H03586)の助成を受けています。

参考文献

1. T. Watanabe *et al.*, IEEE Trans Appl. Supercond., 23 (2013) 4601204.
2. S. Awaji *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) 26.

ボルト固定や電極を考慮した Yoroi-coil 構造の応力伝達特性に関する検討

Study on Stress Transmission Characteristic of Yoroi-coil Structure Considering Bolt Fixing and Electrode

加藤 雅大, 宮城 大輔, 津田 理, 高橋 弘紀, 淡路 智(東北大)

KATO Masahiro, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, TAKAHASHI Kohki, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: masahiro.kato.r2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

強磁場は新現象発見の宝庫と考えられており、銅マグネットよりもコンパクトかつ省電力な超電導マグネットを用いた強磁場生成が試みられている。しかし、強磁場化に伴い、コイルの拡張方向に作用する電磁力が大きくなり、超電導線材には強力なフープ応力が作用するため、超電導線材が破壊する恐れがある。これに対して、強力な電磁力に耐えうる構造として、Yoroi-coil 構造が提案されている[1]。しかし、これまでは、電極構造など、実用化を想定した詳細検討は十分に行われていない。そこで、本検討では、電極構造やボルト固定構造を考慮した応力分布解析を実施し、これらの構造が Yoroi-coil の応力低減効果に及ぼす影響について検討した。

2. 解析方法

解析対象とした Yoroi-coil の諸元を Table 1 に示す。また、解析モデルの上面図および断面図を Fig.1 に示す。コイル構造の対称性を考慮して 1/8 モデルを作成した。解析モデルでは、電極構造を考慮し、ボルトに見立てた円柱ジオメトリを配置することによりボルト固定構造を模擬した。また、超電導コイルを一体物として扱い、コイル外周面と補強構造部の接触面および各ボルトと補強構造部の接触面に接触条件を適用することで応力の伝達を模擬した。コイルには、バックアップ磁場として z 軸正方向の 11T の磁場が印加されているとし、コイル電流が 100 A の場合の応力分布を、三次元有限要素法により解析した。

3. 解析結果及び考察

電極構造を2本のボルトで固定した場合の超電導コイルに働くフープ応力分布を Fig.2 に示す。同図より、ボルトの周辺部において、フープ応力が増加していることがわかる。また、電極から離れた場所では 130 MPa 程度のフープ応力が働いているのに対して、電極付近では、最大 300 MPa 程度のフープ応力が働いていることが確認された。電極部には補強材が設けられていないため、電極固定用ボルトの周辺では超電導コイルが曲げられ、応力値が増加したと考えられる。そこで、この超電導コイルの曲げを抑制するために、電極中央部にボルトを1本追加した場合について解析した。このときの超電導コイルに働くフープ応力分布を Fig.3 に示す (Fig.2 と Fig.3 のカラーバーが異なることに注意)。これより、電極付近でフープ応力値が増加するものの、電極付近の応力値が 240MPa 程度と、ボルト追加前よりも 60 MPa 程度減少することがわかった。以上より、Yoroi-coil 構造を実際に構成する場合には、ボルト周辺部でフープ応力が増加するとともに、電極付近において、フープ応力が大きく増加することがわかった。このうち、電極付近の最大フープ応力については、電極固定用のボルト数を増やすことにより低減することが可能である。以上の様に、Yoroi-coil 構造を採用する場合には、多くのボルトを配置するなど、電極部の補強を強化することが重要となる。

謝辞

本研究は、科研費(15H03586)の助成を受けて検討したものである。

Table 1 Specifications of a Yoroi-coil.

| | |
|------------------------------|------------------|
| Superconducting wire type | PLD-GdBCO-IBAD |
| HTS tape width | 4.1 mm (Average) |
| HTS tape thickness | 131 μ m |
| Wire length | 50 m |
| Inner/Outer diameter of coil | 250 / 265 mm |
| Number of turns | 55/PC |
| Frame and plates | SUS316L |
| Separating plate and bobbin | G-FRP |

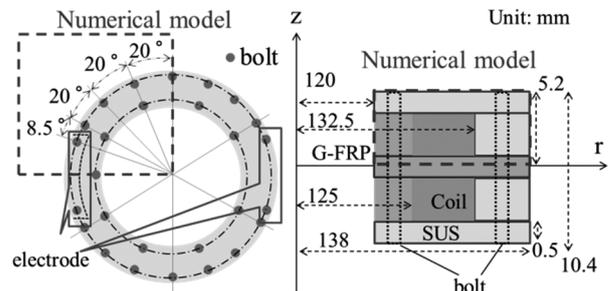


Fig.1 Analytical model of a Yoroi-coil.

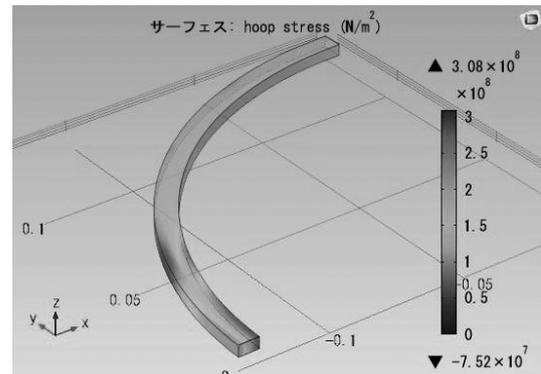


Fig.2 Hoop stress distribution of a coil with the electrode fixed by two bolts.

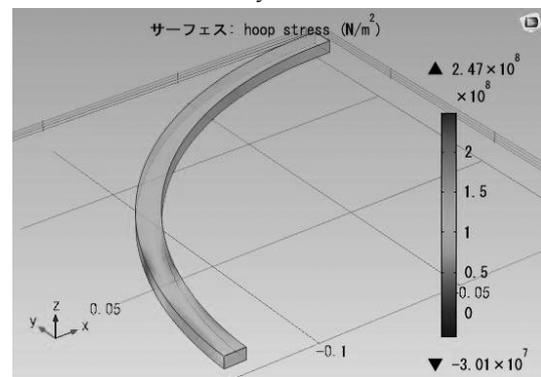


Fig.3 Hoop stress distribution of a coil with the electrode fixed by three bolts (one additional bolt).

参考文献

1. 渡部智則・長屋重夫・平野直樹・淡路智・小黒英俊・石山敦士・王旭東:「高強度パンケーキコイル構造(Yoroi-coil)の開発」, 低温工学, Vol.48, No.5 pp.213-219 (2013)

銅メッキ付き多芯 REBCO テープ線材で 巻線された高温超電導コイルの遮蔽電流評価実験と解析

Experiment and numerical simulation on diffusion process of screening current in HTS coil wound with copper-plated multifilamentary REBCO tape

植田 浩史(岡山大); 石山 敦士(早大); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 超電導線材を用いた高磁場コイルを NMR などに応用する研究・開発が進められている。高均一・高安定な高磁場が要求される NMR に適用する際に問題になるのが、遮蔽電流磁場である。遮蔽電流は、REBCO 線材がテープ形状をしていることに起因しているため、REBCO 線材をマルチフィラメント化することで、抑制される可能性がある。しかし、マルチフィラメント化 REBCO 線材は、機械的強度や熱的安定性を確保するため、銅メッキが施されるが、その結果、励磁の際に結合電流がフィラメント間を流れることになり、遮蔽電流分布や磁場に影響を与えることになる。そこで、本発表では、マルチフィラメント化 REBCO 線材をレイヤー巻あるいはパンケーキ巻で巻線した高温超電導コイルを対象に、巻線内電流分布、結合電流の特性長や磁場の減衰時定数について電磁場解析に基づいて評価したので報告する。

2. コイル諸元

解析対象のコイルには、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm(超電導層 1.5 μm)の REBCO 線材を用いた。Coil 1, Coil 2 はそれぞれモノフィラメント、4 フィラメントの線材をレイヤー巻したもの、Coil 3, Coil 4 はそれぞれモノフィラメント、4 フィラメントの線材をダブルパンケーキ巻したものである。いずれのコイルも内径 80 mm、外径 81 mm である。運転温度は 4.2 K で、電流を 300 A まで 6.67 A/s で励磁し、その後一定として、中心磁場の時間変化を評価した。

3. 遮蔽電流磁場解析

REBCO 線材の厚み方向で電磁場が一様とする近似を用いて、積分方程式、高速多重極法や超電導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた三次元電磁場数値解析を用いて遮蔽電流磁場の計算を行った[1]。上述の設計に対して、解析では、実際の巻線法を考慮して、超電導層にのみ電流が流れるとした。 n 値は 35 一定とした。Fig. 1 に計算結果を示す。レイヤー巻とパンケーキ巻では、明らかに磁場のドリフトの時定数が異なることがわかる。

巻線の電流密度分布の展開図を Fig. 2 に示す。この図はコイル下端から巻線長手方向の線材内の電流分布を一部を示している。テープ端部からスリット部に磁束侵入していく様子がわかる。この磁場の拡散・侵入が Fig. 1 の磁場のドリフトを起こしている。

遮蔽電流磁場の影響と、結合電流の特性長や磁場の減衰時定数の関係および実験結果との比較の詳細は当日報告する。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 C (25420253)に依ったことを付記する。

参考文献

1. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.26 (2016) 4701205.
2. T. Ueno et al. "The coupling time constant for a multi-filamentary REBCO coated-conductor solenoid", Applied Superconductivity Conference 2016, 3LP01L-05.

Table 1. Specifications of model magnet

| | Coil 1 | Coil 2 | Coil 3 | Coil 4 |
|---------------------|------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| Coil winding | Layer wound | Layer wound | Pancake wound | Pancake wound |
| REBCO tape | Mono-filament | 4-filament | Mono-filament | 4-filament |
| Inner diameter (mm) | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Outer diameter (mm) | 81 | 81 | 81 | 81 |
| Height (mm) | 94.8 | 94.8 | 97.3 | 97.3 |
| Number of turns | 23×4 layers = 92 | 23×4 layers = 92 | 4×11 double pancake = 88 | 4×11 double pancake = 88 |

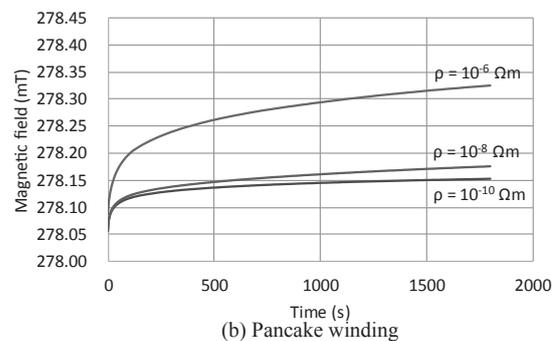
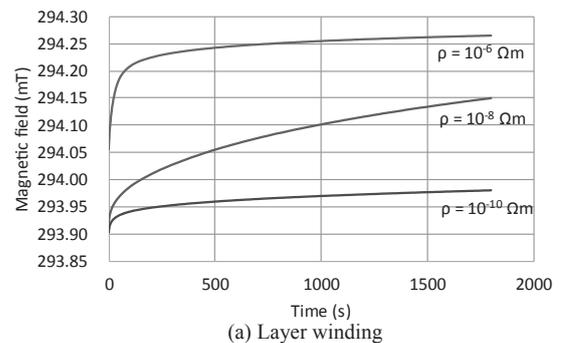


Fig. 1. Magnetic field in coil 2 and 3 with various transverse resistivity between filaments.

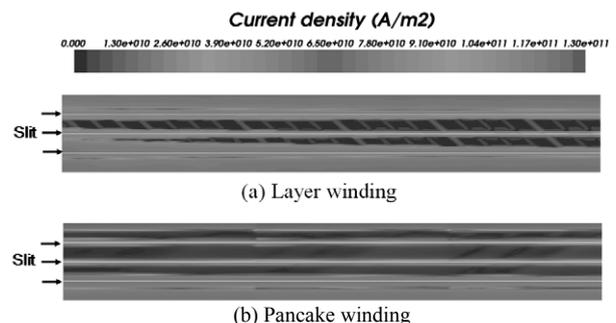


Fig. 2. Current distribution in a longitudinal direction of coil winding with 4-filamentary tape at ramp-rate of 6.67 A/s and transverse resistivity between filaments of $10^{-6} \Omega\text{m}$.

銅メッキ付き多芯 REBCO 線材における 遮蔽電流による不整磁場の低減効果

Effect of transverse resistivity on screening current distribution in copper-plated multifilamentary REBCO tape

武藤 優真, 石山 敦士(早稲田大学); 小泉 智暉, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大学); 野口 聡(北海道大学)

Yuma MUTO, Atsushi ISHIYAMA, Tomoaki KOIZUMI, Hiroshi UEDA, SeokBeom KIM, So NOGUCHI

E-mail: green-day@ruri.waseda.jp

1. はじめに

REBCO 超電導コイルを NMR, MRI, 加速器などに応用する研究・開発が進められている。これらの応用では、超電導マグネットは高精度・高安定な高磁場を発生することが要求されるが、REBCO 線材がテープ形状をしているため、遮蔽電流が誘導され、発生磁場が乱されることが知られている。この遮蔽電流は、REBCO 線材をマルチフィラメント化することで、抑制される可能性がある。しかし、マルチフィラメント化 REBCO 線材は、機械的強度や熱的安定性を確保するため、銅メッキが施されるが、その結果、励磁の際に結合電流がフィラメント間を流れることになり、遮蔽電流分布に影響を与えることになる。そこで、本発表では、銅メッキ付き多芯 REBCO 線材で巻線された高温超電導コイルを対象に、フィラメント間抵抗が線材内電流分布や遮蔽電流磁場に与える影響について三次元電磁場解析[1]に基づいて評価した結果を報告する。

2. 解析条件

解析モデルとした REBCO コイルの諸元を Table 1 に示す。4mm 幅の REBCO 線材を 50 ターン巻きした内直径 50mm のパンケーキコイルを 6 個積層し、中心磁場 0.85T を発生するものと仮定した。

マルチフィラメント化モデルについては、幅 4.0mm のテープをカットし、幅 2.0mm のテープ 2 本並列で配置するとした。そしてマルチフィラメント化した線間の溝が絶縁されている場合と、溝が銅で埋められていると仮定した場合について解析を行った。このとき、銅の抵抗率の影響も解析・評価した。また、マルチフィラメント化の効果を確認するため、マルチフィラメント化していない線材(4mm 幅)についても解析を行った。励磁条件については励磁速度 1 A/s で 150A まで励磁し、2000 秒間ホールドするものとした。

Table 1 Specifications of REBCO model coil

| | |
|--------------------------|-----------|
| Tape width | 4 mm |
| Thickness of REBCO layer | 1 μ m |
| Inner diameter | 50 mm |
| Number of turns | 50 |
| Number of pancake | 6 |
| Operating current | 150A |
| Ramp rate | 1 A/s |
| Central field | 0.85T |

3. 解析手法

解析には有限要素法 (FEM) と高速多重極法 (FFM) から成る三次元電磁場解析手法を用いた[1]。支配方程式を式 (1) に示す。これはビオサバルの法則、ファラデーの電磁誘導の法則、オームの法則により導出されている。

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

また、REBCO 線材の厚み方向の電流を無視する薄膜近似を用いた。そのため銅メッキはマルチフィラメント化した線材の溝部分にのみ施したと仮定している。

4. 解析結果・考察

全コイルが中心につくる遮蔽電流磁場の時間変化を Fig.1 に示す。今回の解析モデルにおいては、まず、線材間が電気的に絶縁されたモデルでは、遮蔽電流磁場の低減効果が現れている。一方、溝が銅で埋められたモデルでは、銅の抵抗率が小さい場合、励磁中の低減効果はほとんど見られないが、電流ホールド後、徐々に絶縁モデルの結果に漸近していつている。一方で銅の抵抗率が大きい場合、今回の解析モデルでは絶縁モデルの結果と同等のマルチフィラメント化の効果が得られた。

この解析結果から銅メッキ付き多芯 REBCO 線材ではフィラメント間抵抗が遮蔽電流磁場に影響を及ぼすことが分かった。また、銅メッキの抵抗率を大きくすることでマルチフィラメント化による低減効果を十分に得られることが分かった。これは銅メッキによって溝部分に侵入する外部磁場が変化するためだと考えられる。

本研究は科研費基盤研究 A(No. 26249036)によった。

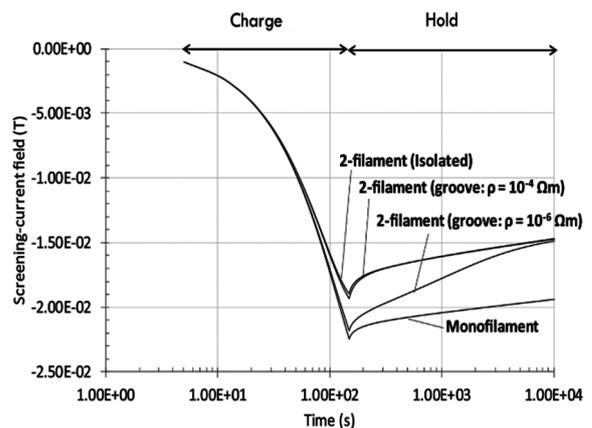


Fig. 1 Temporal drift of screening-current field in coils wound 2-filament REBCO tape with the groove of various resistance.

参考文献

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

パッシブシールド型 1.5 T プレクリニカル MRI 用高温超伝導マグネットの 軸対称モデルによる遮蔽電流磁場解析

Analyses of shielding-current-induced field

in passively-shielded pre-clinical 1.5 T REBCO MRI magnet using axisymmetric model

李 陽, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大); ベン パーキンソン, グランヴィル サイモン(ウェリントン・ヴィクトリア大学)

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

PARKINSON Ben, GRANVILLE Simon (Victoria University of Wellington)

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

1. Introduction

A 1.5 T magnetic resonance imaging (MRI) system to image human extremities was constructed in New Zealand in 2013 [1]. It is based on a 240 mm room-temperature bore coil system, which was designed and manufactured using coated conductor made by AMSC with a magnetic substrate [2]. The influence of the magnetic substrate on magnetic fields was evaluated by using electromagnetic analysis software JMAG. We focused on the normal magnetic field component to the superconductor layer of each coated conductor which induces the shielding current as well as the magnetic field in the room-temperature bore.

2. Model and conditions

The MRI magnet consists of 32 pancake coils and a room-temperature iron yoke. We adapted an axisymmetric model, whose 1/4 cross-section and cylindrical coordinates are shown in Fig.1. Each turn of the coils was modelled by a layer of the magnetic substrate (NiW) and a layer of the superconductor (YBCO).

We assumed that the designed coil current of 130 A flowed uniformly in the superconductor layer. Two kinds of analysis were then conducted: an analysis where the magnetic substrate was considered; and for the comparison, an analysis where the magnetic substrate was replaced with air.

Prior to the electromagnetic field analyses, we measured the magnetic property of the substrate using a PPMS (Quantum Design). The B - H curve of a piece of the coated conductor, whose superconductor layer was removed, was measured as shown in Fig. 2. The B - H curve of the iron yoke was given by a typical B - H curve of iron in the database of JMAG.

3. Results

The magnetic substrate causes a decrease of magnetic field in the room-temperature bore by 0.04% as seen in Fig. 3. As shown in Fig. 4, for the innermost conductor of the top pancake in Fig. 1, the magnetic field component normal to the superconductor layer, which is the most important factor in determining shielding currents, changed by about 7% due to the magnetic substrate. The influence of the magnetic substrate is small enough that we can ignore it when conducting the electromagnetic field analyses to calculate the shielding current.

4. Analyses of the shielding-current-induced field

We plan to conduct analyses of the shielding current using the following steps:

- 1) Axisymmetric analyses where the iron yoke is ignored;
- 2) Axisymmetric analyses where the iron yoke is considered;
- 3) Asymmetric analyses where the asymmetric geometry of the magnet is considered.

The results of 1) will be presented in the conference.

References

1. Benjamin J. Parkinson *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013, Art. no. 4400405.
2. Martin W. Rupich *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013, Art. no. 6601205.

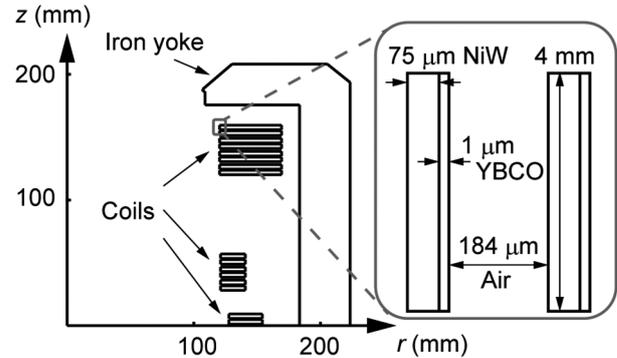


Fig.1 1/4 cross-sectional of the coil system and the iron yoke

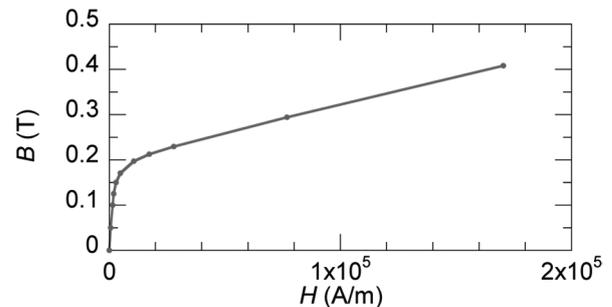


Fig.2 Magnetic property of the magnetic substrate

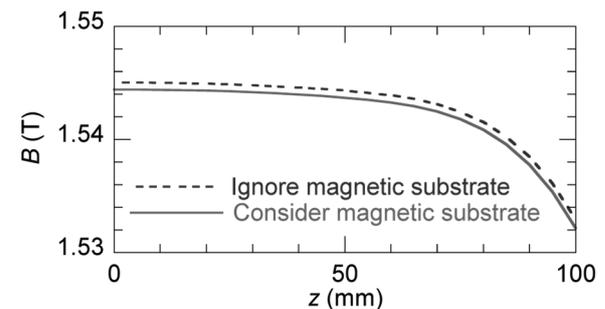


Fig.3 Influence of the magnetic substrate on the magnetic field in the room-temperature bore

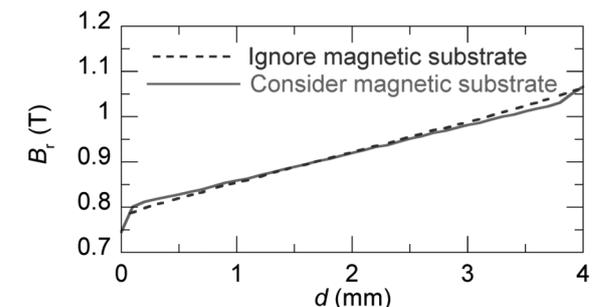


Fig.4 Normal magnetic field component to the superconductor layer of a conductor

REBCO パンケーキコイルの遮蔽電流磁場簡易計算法

A facile method to calculate screening current-induced fields in REBCO pancake coils

宮尾 亮介 (北大); 植田 浩史 (岡山大); 石山 敦士 (早大); Hahn Seungyong (ソウル大); 野口 聡 (北大)
 MIYAO Ryosuke (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 HAHN Seungyong (Seoul National Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)
 E-mail: miyao@em.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

REBCO パンケーキコイルを用いた高磁場 NMR/MRI マグネット開発は期待を集めるとともに、遮蔽電流による不正磁場が大きな問題となっている。設計にあたって、その不正磁場を見積もることが必要となってくるが、見積もるためには有限要素法などの高度なシミュレーション技術[1]が必要とされる。そこで、本研究では高度なシミュレーション技術を要せずに、簡易的に REBCO コイル内に誘起される遮蔽電流および遮蔽電流の作る不正磁場を見積もる手法を提案する。有限要素法ほどの計算精度は期待できないが、設計時などに必要な計算精度は十分に期待できる。

2. 遮蔽電流磁場簡易計算法

まず、遮蔽電流に対する REBCO テープ巻線のインダクタンス L を求める。図 1 のようにシングルパンケーキコイルを展開した複数枚シートを仮定すると、そのインダクタンス L_{SC} は以下の式から求められる。

$$L_{SC} = \frac{\mu_0 N^2 S_{av}}{d} \quad (1)$$

ここで、 μ_0 , N , S_{av} , d はそれぞれ真空透磁率、ターン数、1ターンあたりの平均テープ面積、REBCO シングルパンケーキコイルの厚さである。また、テープ面を垂直に貫く平均磁場を B_{av} とすると、テープ面を垂直に鎖交する全磁束量 Φ は、

$$\Phi = B_{av} S_{av} \quad (2)$$

となる。以上の式から、REBCO テープ内に誘導せれる遮蔽電流量 I_{sc} は、以下の式より求めることができる。

$$I_{sc} = N \frac{\Phi}{L} = \frac{B_{av} d}{\mu_0 N} = \frac{b_{av} d}{\mu_0 N} I_{op} = \alpha I_{op} \quad (3)$$

ここで、 I_{op} は運転電流であり、 b_{av} は運転電流あたりの平均磁場 ($B_{av} = b_{av} I_{op}$) である。また、 α を遮蔽電流定数とする。以上の式により、REBCO テープ内に誘導される遮蔽電流を求めることができる。

次に、遮蔽電流によって生じる磁場を求める。ここで、遮蔽電流は REBCO シングルパンケーキコイルの上端下端それぞれに閉ループで流れると仮定する。上端を流れる電流を I_{sc}^+ 、下端を流れる電流を I_{sc}^- とすると、これらの電流は図 2 のように円形コイルとして振る舞う。これらの円形コイルによって生じる磁界 B^+ , B^- は、それぞれ以下の式によって求められる。ただし、シングルパンケーキコイルの厚みは無視している。

$$B^+ = \frac{\mu_0}{2} \frac{I_{sc}^+ r_{av}^2 N}{\left\{ (h^+)^2 + r_{av}^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} = \beta^+ I_{sc} \quad (4)$$

$$B^- = \frac{\mu_0}{2} \frac{I_{sc}^- r_{av}^2 N}{\left\{ (h^+)^2 + r_{av}^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} = -\beta^- I_{sc} \quad (5)$$

ここで、 h^+ , h^- , r_{av} , β^+ , β^- はそれぞれ I_{sc}^+ , I_{sc}^- の z 座標、円形コイルの平均半径、不正磁場定数である。

続いて、コイル臨界電流 I_c^{coil} を上回る運転電流 I_{op} が流れている時に、遮蔽電流は零であるという仮定を設ける。また、臨界電流特性は非常に複雑な現象であるが、ここでは線形近似を採用する。すなわち、図 3 に示すように、運転電流が臨

界電流の 2 分の 1 を上回る場合に、遮蔽電流によって生じる磁場が線形で減少すると仮定する。以上の仮定をもとに、遮蔽電流磁場 B_{sc} は以下の式で求めることができる。

$$B_{sc} = \begin{cases} (\beta^+ - \beta^-) \alpha I_{op} & (I_{op} \leq \frac{1}{2} I_c^{coil}) \\ -(\beta^+ - \beta^-) \alpha (I_{op} - I_c^{coil}) & (I_{op} > \frac{1}{2} I_c^{coil}) \end{cases} \quad (6)$$

上式を用いることで、REBCO テープ内に誘導される遮蔽電流および遮蔽電流によって生じる不正磁場を容易に見積もることができる。発表当日には提案手法による計算結果と、有限要素法シミュレーション結果、実験結果との比較を報告する。

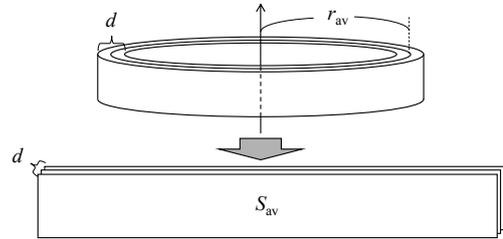


Fig. 1. REBCO single pancake coil with parameters, and the development view.

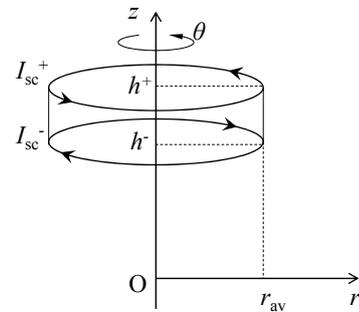


Fig. 2. Assuming screening currents I_{sc}^+ and I_{sc}^- flow along the top and bottom edges of REBCO single pancake coil with an average radius of r_{av} .

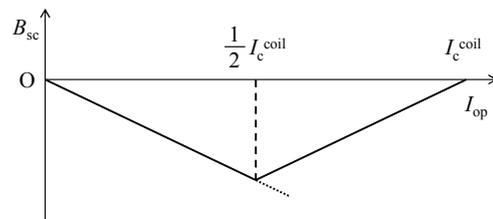


Fig. 3. A linear approximation of screening current-induced field B_{sc} against operation current I_{op} . It is assumed that B_{sc} linearly decreases when I_{op} exceeds the half of coil critical current I_c^{coil} .

参考文献

1. H. Ueda *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24**, 4701505, 2014

薄膜高温超伝導線材の E - J 特性と磁場変化率が マグネットの遮蔽電流磁場に与える影響

Influence of E - J characteristics of coated conductors and field ramp-up rates on the shielding-current-induced fields of magnets

李 陽, 曾我部 友輔, 菊池 嵩, 雨宮 尚之(京大)

LI Yang, SOGABE Yusuke, KIKUCHI Takashi, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

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

1. 背景と動機

励・消磁時の誘導起電力により遮蔽電流は誘起されること、超伝導線は有限の E - J 特性を有することを考えれば、誘起される遮蔽電流の流れ方は励磁速度と E - J 特性に影響されるはずである。励磁後のフラットトップにおいては、励磁時に誘起された遮蔽電流が減衰していくので、遮蔽電流が線材の E - J 特性(抵抗率)に依存するのはもちろんであるが、フラットトップ到達直後の遮蔽電流が励磁速度に依存するという点で、励磁速度にも依存するはずである。今回は、フラットトップにおける遮蔽電流磁場を電磁場解析によって検討した。

2. 解析条件

幅 4 mm、厚さ 0.1 mm の線材を線材間距離 0.025 mm で巻いた内径 50 mm、ターン数 30 のパンケーキコイルを 20 個重ねた軸対称コイルを対象に解析を行った。 E - J 特性は n 値モデルで表現した。ここでは、Fig. 1 に示す 10^{-4} V/m で定義される臨界電流密度は一定値に保って n 値を変化させた 3 つの E - J 特性を用いた解析結果について説明する。 $E = 1.0 \times 10^{-6}$ V/m で n 値を変えている。コイル電流を一定の変化率で 0 A から 250 A まで立ち上げ、その後 1000 s 間保持した。250 A 通電時の中心磁場は 1.19 T、負荷率は約 52% である。

3. 解析結果

遮蔽電流磁場 ΔB は電磁場解析により得られた磁場と一様電流分布を仮定した場合の磁場の差として求めた。

E - J 特性を変えたときのフラットトップにおける ΔB の時間変化の比較を Fig. 2 に示す。 $t < 10$ s においては、 $|\Delta B|$ は $A \approx C < B$ となっている。フラットトップ到達直後において、コイル中のほとんどの線材で電界は 1.0×10^{-6} V/m 以上 1.0×10^{-4} V/m 以下となっている。この電界域では A と C では E - J 特性は同じであるため、Fig. 3 に示したように線材幅方向電流分布も同じであり、 ΔB も同じになる。一方、 B では同じ電界に対する電流密度が大きくなり、Fig. 3 に示したように線材幅方向電流分布が A, C とは異なってくるため、 $|\Delta B|$ は大きくなる。 $t > 10$ s では A と C の ΔB が異なってくる。遮蔽電流の減衰が進み、つまり電流密度の低下が進み電界が 1.0×10^{-6} V/m 以下の領域が増えてくると A, C の E - J 特性が同一でなくなり電流分布が異なってくるためである。

励磁速度を変えたときのフラットトップにおける ΔB の時間変化の比較を Fig. 4 に示す。 $t = 0$ において、10 A/s のときの $|\Delta B|$ は 1 A/s のときの $|\Delta B|$ よりずっと大きくなっている。これは、10 A/s の場合、励磁中により大きな誘導起電力により、より高い電流密度で遮蔽電流が誘起されているためである (Fig. 5 の $t = 0$)。しかし、時間の経過とともに、10 A/s で励磁した場合の $|\Delta B|$ は、1 A/s の場合のそれより速く減衰し、 $t = 100$ s 以降は、両者は同程度となっている。これは、10 A/s で励磁した場合、Fig. 5 に示すように、 $t = 0$ において高電流密度の領域が広く存在するが、そのような領域では等価的な抵抗率 (Fig. 5 の Max Res.) も大きく電流密度の低下が速く進む、換言すれば遮蔽電流が速やかに減衰するためである。

謝辞

本研究は科研費基盤研究 A (JP16805140) の支援によって行われた。

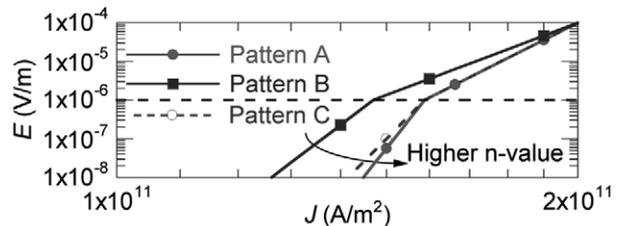


Fig. 1 E - J characteristics of the superconductor.

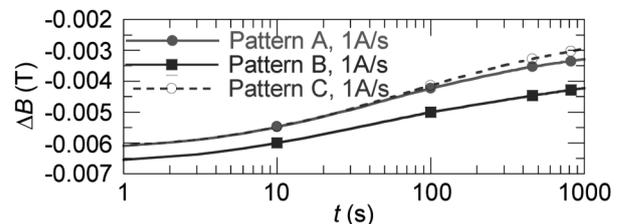


Fig. 2 Influence of the E - J characteristics on the magnetic fields at the coil center. The flat top starts at $t = 0$.

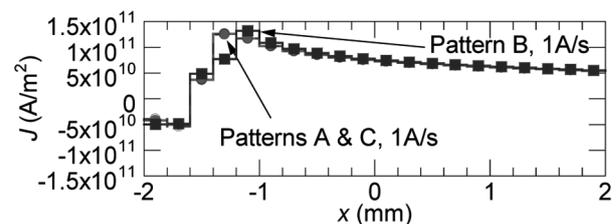


Fig. 3 Current distributions of the innermost turn of the uppermost coil with different E - J characteristics at $t = 0$ of Fig. 2.

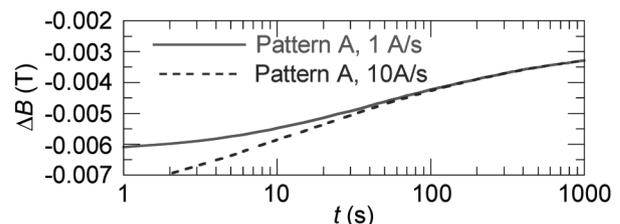


Fig. 4 Influence of the field ramp-up rate on the magnetic fields at the coil center. The flat top starts at $t = 0$.

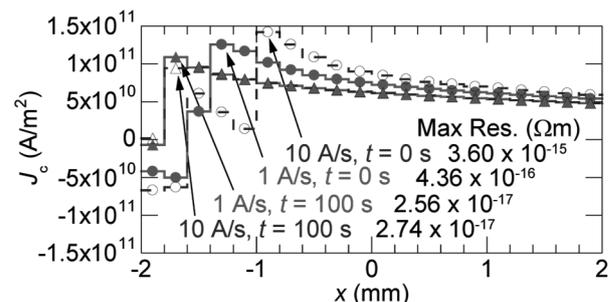


Fig. 5 Current distributions of the innermost turn of the uppermost coil with the different field ramp-up rates of Fig. 4.

HTS 内層コイルを使用した永久電流 NMR の開発(1) ～取り組みの概要～

Development of a persistent NMR using HTS inner coils (1)

- The overview of development activity -

前田 秀明, 柳澤 吉紀(理研); 永石 竜起(住友電工); 濱田 衛(JASTEC)

MAEDA Hideaki, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); NAGAIISHI Tatsuoki (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);

HAMADA Mamoru (JASTEC)

E-mail: hideaki.maeda@riken.jp

1. はじめに

わが国は2014年に、Bi-2223内層コイルを用いた1.02 GHz (24.0 T) LTS/HTS NMR 磁石の開発に成功し、通電モードで高分解能 NMR 計測を実証した[1]。しかしながら、通電モード運転には、磁石運転が複雑、停電対策が必要、熱侵入が多い等の課題がある(Table 1 参照)。幅広い波及の観点からは、永久電流モード運転が望ましい。この目的意識のもと、①永久電流に必要な高温超電導線材の超電導接合技術、②1.3 GHz (30.5 T) NMR 磁石設計検討、③超高磁場 NMR 利用研究に関するワーキンググループを形成し、FSを進めてきた。

本報(1)では、1.3 GHz NMR 磁石の永久電流運転に必要な接合技術の要求と、これに向けた超電導接合技術 FS の取り組みを概括する。続く2報では、(2)REBCO 線材同士の超電導接合技術の製造法・77 Kにおける通電特性・SEM/TEMによる接合断面微細構造観察、(3)REBCO 線材の超電導接合体の接合抵抗評価と磁場中臨界電流特性(0-10 T, 4-77 K)を述べる。

2. 1.3 GHz (30.5 T) NMR に求められる HTS 線材の接合技術

Table 2 に外層 LTS コイル、中層 Bi-2223 コイル、内層 REBCO コイルを用いた 1.3 GHz NMR 磁石の第1次設計案の主要諸元を示す。全コイル直列の永久電流運転を想定した場合、要求される磁場減衰率(0.01 ppm/h)を満たすには、回路抵抗の合計値を 10^{-9} Ωレベルに抑える必要がある。必要な接合数を考慮すると、HTS 線材同士の接合(HTS-HTS 接合)には 10^{-11} Ωレベル(できるなら 10^{-12} Ω)、HTS 線材と LTS 線材の接合(HTS-LTS 接合)には 10^{-10} Ωレベル(できるなら 10^{-11} Ω)の抵抗値が求められる(Table 3 参照)。

3. 400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR 磁石における実証

上述の通り、1.3 GHz NMR 磁石の永久電流運転には、REBCO, Bi-2223 含めた HTS-HTS 接合と、HTS-LTS 接合の開発が必要である。我々は、次報[2]で示すように高い再現性を示す REBCO 線材同士の超電導接合技術の開発に成功している。この技術を用いて、1.3 GHz NMR 磁石に向けた開発の第一歩として、400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石の開発を進めている。この磁石では、超電導接合を用いた REBCO 内層コイルと、LTS 外層コイルとを、液体ヘリウム中で個別に永久電流運転する。REBCO コイルの運転電流は 134 A で、超電導接合は <1 T の磁場中において $<10^{-11}$ Ωが必要である。現在 REBCO コイルの製作を進めているが、単体評価の後、永久電流の NMR 磁石として組み上げ、NMR 計測を通じた評価を行う。

謝辞

本研究の一部は文部科学省 先端研究基盤共用促進事業 NMR 共用プラットフォームにおける、「NMR の高度化に資する調査」の一環として実施した。1.3 GHz NMR 磁石の設計案の検討には、この事業による高温超電導磁石技術ワーキンググループの委員の方々の協力を頂いた。

参考文献

- [1] K. Hashi, et al., J. Mag. Res. 256 (2015) 30-33
[2] 大木他, 2017 年度春季低温工学超伝導学会, 1A-p07

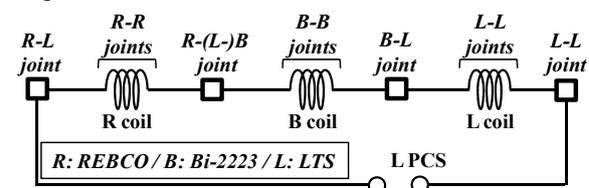
Table 1 The driven mode and the persistent mode

| | Driven mode | Persistent mode |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Field fluctuation | Large, while it can be stabilized | Small |
| Magnet operation | Complicated | Easy |
| Heat leak to 4.2 K | Larger | Smaller |
| Power line failure | Countermeasure is required | Countermeasure is unnecessary |

Table 2 Parameters of a 1.3 GHz NMR magnet design

| | REBCO (inner) | Bi-2223 (middle) | LTS (outer) |
|------------------------------|---------------|------------------|-------------|
| Field contribution (T) | 7.54 | 16.9 | 6.44 |
| Total conductor length (km) | 8.6 | 62 | 110 |
| Approximate number of joints | 16 | 60 | 30 |
| Operating current (A) | 183 | | |
| Inductance (H) | 1098 | | |

Table 3 The permissible joint resistance for a 1.3 GHz NMR magnet



| | Joint resistance (Ω) | Number of joints | Total resistance (Ω) |
|---------------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| R-R joint | 1.00E-11 | 16 | 1.60E-10 |
| B-B joint | 1.00E-11 | 60 | 6.00E-10 |
| R-L joint | 1.00E-10 | 1 | 1.00E-10 |
| B-L joint | 1.00E-10 | 1 | 1.00E-10 |
| R-(L)-B joint | 1.00E-10 | 1 | 1.00E-10 |
| L-L joint | 1.00E-12 | 30 | 3.00E-11 |
| R coil | - | - | 5.00E-10 |
| B coil | - | - | 5.00E-10 |
| L coil | - | - | 1.00E-10 |
| Total resistance R_{overall} | | | 2.19E-09 |

HTS 内層コイルを使用した永久電流 NMR 磁石の開発(2) ～REBCO 線材の超電導接合～

Superconducting joint of REBCO-coated conductors

大木 康太郎, 山口 高史, 永石 竜起(住友電工); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研);
加藤 丈晴, 横江 大作, 平山 司(JFCC); 幾原 雄一(東大)

OHKI Kotaro, YAMAGUCHI Takashi, NAGAISHI Tatsuo (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);

YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (Riken);

KATO Takeharu, YOKOE Taisaku, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC); IKUHARA Yuichi (Univ. Tokyo)

E-mail: ohki-kotaro@sei.co.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_x (以下、REBCO と略す) 線材は、4.2 K において高磁場中で高い臨界電流を有し、機械強度に優れることからマグネットへの応用が期待されている。現状の REBCO 線材を使用した NMR あるいは MRI 用マグネットは、長時間安定した磁場を維持するために外部接続された高安定化電源の使用を使用している¹⁾。しかし、高安定化電源の使用は、それ自体の費用や、電源ターミナルからの熱侵入による液体ヘリウムの消費量増加、停電や電源故障時への対策により更なるコストの増加につながる。REBCO 線材においても永久電流モードでの運転が望ましく、永久電流モードの実現に向けた REBCO 線材の直接接続について、各機関で開発が進められている^{2,3)}。今回、独自に開発した REBCO 線材の簡便な接続方法で超電導接続を実現したので本接続技術と基本特性について報告する。

2. 線材の接続構造及び接続方法

本研究では、Ag 保護層 / GdBa₂Cu₃O_x / CeO₂ / YSZ / Y₂O₃ / Ni / Cu / SUS からなる REBCO 線材を使用した。線材幅は 4 mm 幅である。線材の接続箇所の Ag 保護層を除去し、超電導面を露出させた後、2 つの線材を並列して配置し、それらの線材端部を橋渡しするように接続用の超電導膜(以降、Joining CC と表記)を超電導面同士が接触するように配置した (Fig. 1)。Joining CC の基本構造は超電導線材と同じであるが、超電導層表層に REBCO 微結晶層を有する点が異なり、Joining CC と線材の超電導層を接触させた状態で熱処理することで接続する。具体的には、線材と Joining CC を SUS 製の治具で固定し、機械的圧力を印加した状態で 800℃ の熱処理を行った。接続後の酸素アニール処理は、1 atm の酸素雰囲気中で 500℃ から 200℃ まで 6 時間掛けて行った。

3. 接続を含む線材の I-V 特性

接続箇所の I-V 特性の評価は、通常の REBCO 線材の I_c 評価と同様の四端子通電法で行った。各線材の端に電流端子をはんだで接続し、接続箇所の両側に電圧端子を配置して測定した。測定は液体窒素 (77.3 K) 中で行った。

接続する前の線材と、接続箇所を含む 2 線材間で測定した I-V 特性の一例を Fig.2 に示す。線材の I_c は 158 A である。Joining CC を用いずに接触した状態で固定し、熱処理を施したものは線形的な I-V 特性を示し、10⁻⁸ Ω 程度の抵抗が発生していたが、本接続技術を用いて接続処理を行ったものは、超電導線材と同様の I-V 特性を示した。電圧端子間距離を 1 cm として 1 μV/cm の閾値で接続した線材の I_c を求めると、接続 I_c = 71 A であった。ヒートサイクル試験として 17 日後に再測定したが、同程度の I_c であり、大幅な劣化は見られなかった。他の例として、接続 I_c = 107 A が得られている⁴⁾。

接合界面付近の断面を SEM で観察すると、接合された領域の他に界面付近に空隙や析出相が見られたが、接合部は接合境界の判別が困難な程、綺麗な接合状態であった。

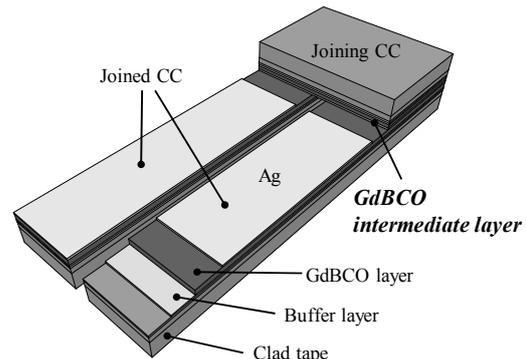


Figure 1. schematic drawing of joined CC.

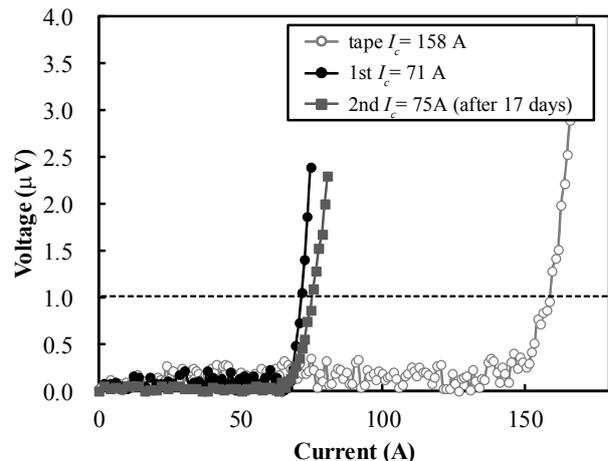


Figure 2. I-V characteristics.

4. まとめ

REBCO 線材の超電導体同士を直接接続するために、微結晶 REBCO 層を表面に有する Joining CC を治具で固定した状態で熱処理するという簡便な接続方法を開発した。本手法は、酸素導入を含めた接続プロセス時間が 24h 程度であり、実用的な接続技術として期待できる。今後、NMR における永久電流モードでの運転実証と、NMR 信号を取得するためのコイル試験を予定している。

参考文献

1. M. Takahashi, et al.: TEION KOGAKU, Vol. 51 No. 7 (2016) 335-341.
2. J.Kato, et al.: Physica C, 445-448 (2006) 686-688.
3. H. Park, et al.: NPG Asia Materials, 6 (2014).
4. T. Nagaishi, et al.: Abstracts of 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, 3A-p02 (2016).

HTS 内層コイルを使用した永久電流 NMR の開発 (3) ～REBCO 線材の超電導接合体の永久電流評価と I_c -B 特性～

Development of a persistent NMR using HTS inner coils (3)

– Evaluations of persistent coil field decay and I_c -B characteristics on a REBCO superconducting joint –

柳澤 吉紀(理研); 北口 仁(NIMS); 上野 健志, 山岸 風摩, 高尾 智明(上智大);

大木 康太郎, 山口 高史, 永石 竜起(住友電工); 朴 任中, 前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);

UENO Takeshi, YAMAGISHI Kazama, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);

OHKI Kotaro, YAMAGUCHI Takashi, NAGAISHI Tatsuoki (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);

PIAO Renzhong, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: yoshinori.yanagisawa@riken.jp

1. はじめに

HTS 内層コイルを用いた永久電流 NMR 磁石の実現には、超電導接合の抵抗値と、磁場中での臨界電流特性の把握が必須である。本報ではこの観点から、前報[1]の REBCO 線材同士の超電導接合体について、1) 小型ダブルパンケーキコイルによる永久電流減衰による接合抵抗評価と、2) I_c -B 特性の評価を行った。

2. 永久電流コイルによる接合抵抗の評価

終端を前報の技術で接合した REBCO ダブルパンケーキコイルを製作し、液体窒素中で 10 A (負荷率 13%)まで励磁した後、永久電流の磁場減衰をホール素子で測定した。コイルのパラメータを Table 1 に示す。Fig. 1 に示す通り、中心磁場は、運転開始からしばらくは指数関数的に減衰し、 $t = 5$ h における特性抵抗 R_c は $3 \times 10^{-12} \Omega$ であった。その後は対数関数的な減衰を示し、運転終了時における R_c は $5 \times 10^{-13} \Omega$ にまで小さくなった。この振る舞いは、接合抵抗を含む回路の特性抵抗が定数ではなく、長時間領域では磁束クリープなどの現象に支配されることを示唆している。

3. 接合体の I_c -B 特性

77 K 自己磁場における I_c が 17.5 A の接合体について、4.2, 50 K, 77 K の温度において、0 - 10 T の磁場中での臨界電流を NIMS において計測した。

外部磁場がない状態では、4.2 K における接合体の I_c は、77 K と比べ約 7 倍、 n 値は約 5 倍高かった。すなわち、4.2 K 運転は接合の通電特性にとって非常に有利に働く。また、磁場の強度依存性・異方性は線材とは異なり、接合内に複数の超電導電流パスをもつことが示唆された。詳細なデータと、物理的な解釈は学会にて報告する。

4. まとめ

77 K 自己磁場において得られた接合抵抗は $3 \times 10^{-12} - 5 \times 10^{-13} \Omega$ であった。この値は、1.3 GHz NMR 磁石において HTS-HTS 接合に要求される $10^{-11} \Omega$ レベル[2]を下回っており、有望である。ただし、今後 4.2 K 外部磁場中における接合抵抗を、永久電流 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石によって評価する必要がある。

超電導接合の I_c , n 値は、4.2 K において大きく向上し、永久電流運転に対して有利に働くことが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は文部科学省 先端研究基盤共用促進事業 NMR 共用プラットフォームにおける、NMR の高度化に資する調査の一環として実施した。

参考文献

- [1] 大木他, 2017 年度春季低温工学超伝導学会, 1A-p07
[2] 前田他, 2017 年度春季低温工学超伝導学会, 1A-p06

Table 1 Parameters of a persistent REBCO coil for evaluating the joint resistance

| | Unit | Value |
|------------------------------|---------|----------------|
| Conductor | | |
| Conductor width : thickness | mm | 4.0 : 0.14 |
| Copper stabilizer | - | None |
| Insulation | - | None |
| Conductor I_c at 77 K | A | 160 |
| Conductor length | m | 3.9 |
| Coil | | |
| Winding | - | Double pancake |
| Impregnation | - | None |
| OD : ID | mm | 40.0 : 42.1 |
| Coil height | mm | 8.0 |
| Number of turns | - | 30 (15 × 2) |
| Coil I_c at 77 K (meas.) | A | 77 |
| Joint I_c at 77 K (meas.) | A | 140 |
| Self-inductance, L (calc.) | μ H | 53.5 |
| Coil constant (calc.) | mT/A | 0.87 |

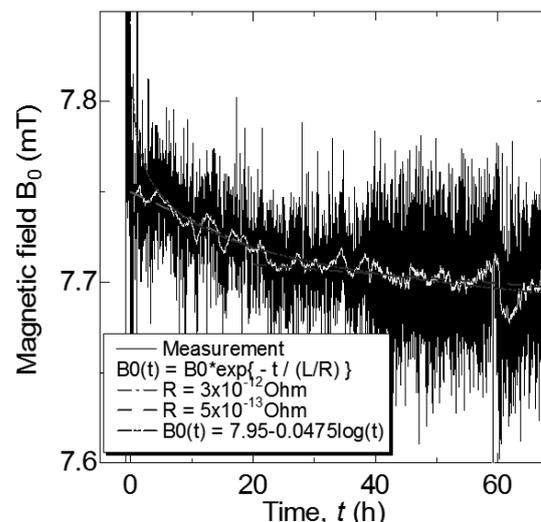


Fig. 1 Measured decay of the central magnetic field of the persistent REBCO double pancake coil charged to 10 A in liquid nitrogen. The white curve is averaged data of the measured data indicated by the solid line. The dashed-dotted line and the dashed double-dotted line are exponential fitting lines of $B_0 \exp\{-t / (L/R_c)\}$ where R_c is characteristic resistance. The dashed-double dotted line is a logarithmic fitting line.

CJMB 法による Gd123 線材間の超伝導接合と永久電流コイル測定

Superconducting joint between Gd123 coated conductor by CJMB method and measurement of persistent current coil

金 新哲(室工大);柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

Xinzhe Jin (Muroran-IT.); Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda (RIKEN)

E-mail: shin_kin@mmm.muroran-it.ac.jp

1. はじめに

本研究では、室蘭工業大学と理化学研究所間の共同研究の下で、Gd123 線材間の超伝導接合技術と永久電流コイルの開発を行っている。近年我々は、Yb123 または Y123 のバルクを中間媒体として、Gd123 線材間を結晶的につながった接合(CJMB 法)をし、超伝導特性が得られている[1]。これまでの実用線材の実験では0.5A以下の臨界電流になっていたが、今回は大幅な臨界電流が得られたので、それについて発表する。なお、永久電流コイルの測定評価も行い、今回の学会で発表する予定である。

2. CJMB 法と固相拡散法の原理の違い

現在 RE123 テープ線材間を接続する技術方法としては、主に我々が開発した熔融バルクによる結晶的な接合(Crystalline Joint by Melted Bulk, CJMB)と固相拡散法がある。CJMB 法は、接合面にバルクなどの中間媒体を使用し、熔融などの拡散により、結晶をつなげる単位成分となる原子・分子レベルの粒子を入れ込み、界面両側の結晶を成長させながらつなげ合わせることを意味する。勿論結晶成長より、つなげ合わせる事が本意であるが、その現象のメカニズムはまだ解明されていないところがある。この方法の特徴は、接合部の機械強度が実用に十分であるが、高い臨界電流を得るには加熱温度と酸素分圧における精密制御が必要である。

他方、固相拡散法による接合は分子・原子より大きなサイズである微結晶の積集により点的につながっていることと考えられ、123 相を保持する面では高い臨界電流が得られるが、微結晶間に弱い結合力が働くので経時特性と機械強度などにおける実用評価が必要であると思う。

3. 接合体と永久電流コイルの作製と評価

RE123 線材は住友電工製の幅 4mm の臨界電流 200A (77K) 以上のタイプを使用し、接続用バルクは最高温度 890°C で固相法により作製した Yb123 バルクを用いた。接続用加熱装置は部分加熱ができる赤外線導入加熱装置を利用した。

今回作製した接合体の形状を Fig. 1 に示した。両側の線材表面の銅層と銀層を除去した後に、Gd123 間にバルクを挟んで熔融接合を行った。接合したサンプルは酸素中で十数時間アニールし、液体窒素温度で電気特性の測定を行った。線材の表面処理から、接合処理を経て、電気測定の測定まで1日のみかかった。

コイルの仕様は、内径 30mm のダブルパンケーキ構造で、両端を CJMB 法により接合した。Fig. 2 に永久電流コイルを示す。今回の実験では、測定評価を簡便にするため、PCS ユニートを別途設けず、永久電流の測定を行った。測定方法は、まず接合部のみを液体窒素に浸けて臨界電流を測定し、次は、コイルのみを液体窒素に入れて臨界電流より低い外部電流を印加し、その後、接合部も液体窒素に含浸した。最後に外部電流をゼロにし、永久電流の測定を行った。具体的には、通電電流を 4A まで上げてから外部電流を遮断し、コイル内部の永久電流の磁場減衰から抵抗を求めた。

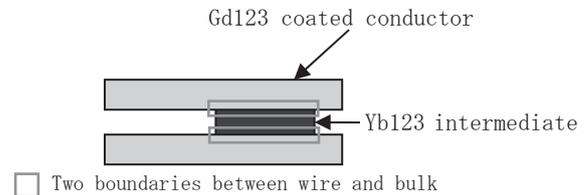


Fig. 1 Joint configuration in in this study.

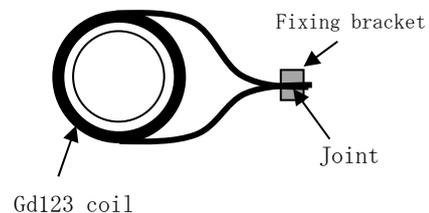


Fig. 2 Persistent current coil prepared without PCS unit.

4. 結果

これまでの結果に比べ、臨界電流において10倍以上の大幅の向上が得られた。永久電流コイルの測定結果から、接合部の抵抗が $10^{-12} \Omega$ 以下の実用レベルに達していた。今後は、さらなる臨界電流の向上と経時特性などの実験研究を進める予定である。

謝辞

本研究は平成28年度文部科学省卓越研究員事業の一環として行った。RE123線材を提供していただいた住友電気工業(株)に深く感謝する。

参考文献

- [1] Xinzhe Jin, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda and Yoshiki Takano, "Development of a superconducting joint between a $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -coated conductor and $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bulk: towards a superconducting joint between RE (Rare Earth) $Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ -coated conductors", Superconductor Science and Technology **28** (2015) 075010 (6pp)

金属ナノペーストによるRE系超電導線材接続 Jointing of coated conductors by using nano-particle metal pastes

町 敬人, 和泉輝郎(産総研); 加藤文晴(JFCC)
Takato MACHI, Teruo Izumi (AIST); Takeharu Kato (JFCC)
E-mail: t.machi@aist.go.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材を応用する場合には、どのような機器であっても、線材の接続を行わなければならない。例えば、MRIなどの超電導マグネット応用においては、複数のコイル同士を接続する必要があり、現在行われている接続方法は半田接続である。半田接合の抵抗は50-100nΩと高く、接合強度は700-800 Nである[1]。それに対し、銀拡散接合による抵抗値は6-10nΩと半田接合よりも低いが、接合時に300-400℃の熱処理を酸素気流中で行わなければならない、そのため接合後に12時間以上の酸素アニールが必要である[2]。Parkらが報告した超電導接続の場合にはさらに高い温度(~850℃)での接合であるためREBCOの酸素は完全に抜けてしまい、さらには超電導層同士を接合しているため酸素欠損を補うための接合後の酸素アニールは2週間以上と非常に長い時間を必要とする[3]。そのため、簡便な半田接合が未だに主流な接合方法となっている。

そこで、我々は、半田接合のような簡便さと銀拡散接合程度の抵抗値を目指して、金属ナノペーストによる接合を行った。金属ナノペーストは、高い比表面積を有するために低温でも金属同士の接合を実現できる可能性がある。ナノ粒子同士が凝集を生じないように、ナノ粒子の表面には分散剤が存在し、加熱によって溶剤や分散剤が気体となって飛散して接合が可能となることを期待して実験を行った。

2. 実験方法

(1) 金属ナノペースト

接合には、ULVAC Inc.製のAU NANOMETAL(Auナノペースト)とL-Ag1 TeH(Agナノペースト)を用いた。

(2) 接合試料と接合方法

接合に用いた線材試料は、GdBCO pure線材およびEuBCO pure線材であった。接合の手順は、2つの線材の接合部分に金属ナノペーストを塗り、face-to-faceで重ねて、上下から金属プレートで挟み込み、このプレートをネジ止めするという方法であった。接合面積は、4cm²から16cm²とした。熱処理は、大気開放の恒温槽を用い、100℃から250℃とした。接合時間は、1-3時間であった。

(3) 接合評価

接合の評価は、液体窒素、自己磁場中でのI-V測定および、室温での引っ張り試験を行った。また接合部の断面SEM観察を行った。

3. 実験結果および考察

図1に接合面積8cm²で1時間のAuナノペースト接合した線材のI-V特性を示す。接合前のI_cは約370A(基準1μV/cm)であり、150℃および200℃で接合した場合にはI_cに変化はないが、250℃ではI_cの低下が観測された。これは、250℃では酸素欠損が生じ始めているためと考えられる。I-V曲線の傾きより、接続抵抗は150℃接合で6nΩを下回った(抵抗率は48nΩ)。これは銀拡散接合の接続抵抗と同程度であり、大気中での簡便な方法によって接合抵抗が下げられた。

図1から得られた接続抵抗と、引っ張り強度の熱処理温度依存性を図2に示す。接続抵抗は100℃と150℃でそれほど差がなかったが、半田の引っ張り強度800Nよりも低かった。これは、100℃での熱処理では分散剤が完全に抜けなかったと考えられる。引っ張り強度は150℃以上で1kNを越え、金属ナノペースト接合は銀拡散接合同等の抵抗値と半田以上の引っ張り強度を有する接続法であることが分かった。同様の結果は、Agナノペースト接合においても得られた[4]。

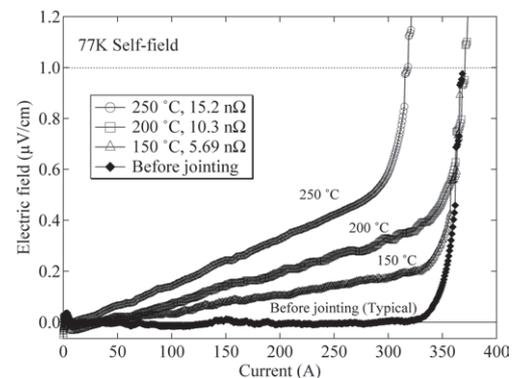


Fig. 1 I-V curves between the voltage taps stepping over the joints in the specimens jointed at different jointing temperatures [4]

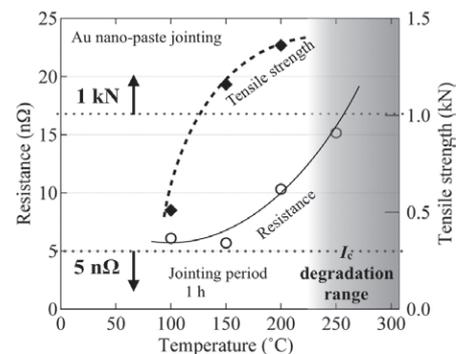


Fig.2 Temperature dependence of the joint resistance and tensile strength jointed by Au nano-pastes [4]

今後は、本接合技術を用いたコイルを作製してMRI用のマグネットを構築する場合に必要な1pΩ以下の接続抵抗を目指して研究を行う予定である。

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構およびNEDOの委託により実施したものである。

参考文献

- [1] M. Sugano *et al.* "Stress tolerance and Fracture Mechanism of Solder Joint of YBCO Coated Conductors", ASC 2006.
- [2] J.Y. Kato, *et al.*, Physica C445-448(2006)686.
- [3] Y. Park, *et al.*, NPG Asia Materials (2014) 6, e98.
- [4] T. Nakanishi, *et al.*, Physics Procedia 81 (2016) 105.