

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅱ-1) ～プロジェクト概要～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (Ⅱ-1)

-Outline of the project -

横山彰一, 松田哲也, 三浦英明, 井上達也, 森田友輔, 江口諒, 大竹俊輔, 田邊肇, 佐藤伸治 (三菱電機);
東川甲平, 木須隆暢 (九大); 宮城大輔, 津田理 (東北大); 中村武恒, 白井康之 (京大)

YOKOYAMA Shoichi, MATSUDA Tetsuya, MIURA Hideaki, INOUE Tatsuya, MORITA Tomohiro, EGUCHI Ryo, OTAKE Syunsuke,
TANABE Hajime, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.); HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takano (Kyushu Univ.);
MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); NAKAMURA Taketsune, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体ヘリウムレスの医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を平成 28 年度より NEDO プロジェクトとして実施中である[1-3]。本プロジェクトでは、MRI システムへの実用化に向け超電導マグネットシステムを開発し、課題などを検討しており、今年度(H30)には 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットを試作し、MRI への適用を検証する。最終目標としては、全身用 3T-MRI マグネットと同等の最大経験磁場を有する 1/2 サイズアクティブシールド型 5T マグネットの試作である。

2. 研究開発ターゲット

本研究開発のターゲットは、大きく2つあり、1つは地球資源であるヘリウムガスの枯渇、供給不安への対策として大量に使用している液体ヘリウムを用いないMRIマグネットを開発すること。もう1つは現在多くの病院で使用されている 1.5T-MRI マグネットが将来 3T-MRI マグネットに置き換わる時に 1.5T 機と同等の形状、重量、漏れ磁場領域の 3T 機を提供することで容易に置き換えることができるマグネットの開発である。このために、従来の金属系超電導より高温かつ高磁場で使用できる高温超電導のマグネットを開発し、MRI に適用するための技術開発を実施している。

3. 高温超電導コイルの実用化技術開発

1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル設計に基づいて REBCO 超電導パンケーキコイルを製作[4]。Fig.1 のような内径 560mm のメインコイルおよび外径 1200mm のシールドコイルを必要量の 220 枚を越えるパンケーキコイルを製作した。これらのコイルは液体窒素温度にて単体試験を行い、超電導特性を確認した。幾つかのコイルで超電導特性が劣化し、良品率は 90%程度であった。コイル劣化要因を検討するため、非通電磁気計測による非破壊健全性評価技術について検討し、欠陥位置の可視化法の開発に成功した[5]。

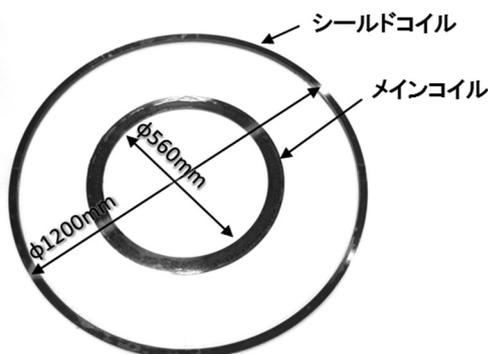


Fig.1 Photograph of REBCO superconducting pancake coils. Shielding coil on the outside and main coil on the inside.

コイルを冷却するためのクライオ構造を検討し、Fig.2 に示すようなマグネット構造とした。図のようにマグネット全高 1.8m、ボア径 480mm でコイルの初期冷却時間を短縮するために冷凍機を 2 台設置し、冷凍機の 1st ステージの冷凍能力を有効活用するために熱スイッチを 1st ステージと 2nd ステージの間に設置する。

4. 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

高磁場、高密度化により小型高温超電導コイルを実現するための検討を行う。高温超電導の特長である高磁場特性を活かすため、1/2 サイズアクティブシールド型 5T マグネットの設計諸元として最大経験磁界を 7T とし、コイル電流密度を 200A/mm² として設計を実施[6]、コイル内部の電磁力について検討を行っている[7]。

5. コイル保護・焼損対策手法の開発

ドライブモードにおけるコイル保護を検討するためにミニコイルを用いて焼損に至るモードを測定し、評価している[8]。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.76
2. T. Kawashima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.78
3. T. Karashima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.82
4. M. Oya, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.77
5. T. Kiss, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) 1A-a06
6. H. Miura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.17
7. H. Miura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) 1A-a02
8. M. Ide, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.157

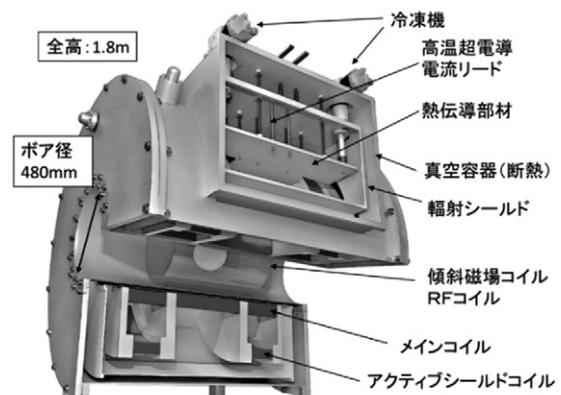


Fig.2 Structure drawing of the half size active shield type 3T magnet.

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅱ-2) ～1/2 サイズ3T コイル試作ならびに5T コイル設計～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (Ⅱ-2)

-Manufacture of half-size 3T coil and Design of half-size 5T coil-

三浦英明, 大屋正義, 松田哲也, 井上達也, 森田友輔, 大竹俊輔, 田邊肇, 横山彰一, 佐藤伸治(三菱電機)
MIURA Hideaki, OYA Masayoshi, MATSUDA Tetsuya, INOUE Tatsuya, MORITA Yusuke, OTAKE Shunsuke,
TANABE Hajime, YOKOYAMA Shoichi, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Miura.Hideaki@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

高温超電導体を応用し, 液体ヘリウムを必要としない医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を行っている[1]。現在, 実機の 1/2 サイズの 3T マグネットの製作及び 1/2 サイズの 5T マグネットの設計を実施している。1/2 サイズ 5T コイルは実機サイズの 3T コイルと同等の負荷を再現し, 比較検討するために試作するものである。

今回, 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネット用に製作したシングルパンケーキコイルの性能評価試験結果と, 1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルの磁気設計結果について報告する。

2. 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル試作

1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルは, メインコイルとシールドコイル合わせて 220 枚のシングルパンケーキコイルで構成される。コイル諸元を Table 1 中央列に示す。2017 年度より, 大口径(外径 1200 mm)のシールドコイルの製作を開始した。シールドコイルはメインコイルと同様, コイル巻高さ方向の巻線精度を±0.1 mm 以下とし, エポキシ樹脂の真空加圧含浸を行っている。Fig.1 にシールドコイル製作の様子を示す。

シングルパンケーキコイルの単体性能評価は, 液体窒素中で設計値から算出した臨界電流値まで通電する試験と, 接続抵抗値を測定する試験の 2 種類を実施し, 良品・不良品の判定を行った。良品率は約 90 %であった。

単体試験を完了次第, コイルを積層し, クライオスタットへ組み込む予定である。

3. 1/2 サイズ 5T 高温超電導コイルの最適磁気設計

1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導マグネットを製作するため, コイル最適配置を設計した。最適化手法は Simulated Annealing 法を用い, その目的関数は磁場均一度の最小化とした。最適化パラメータを各ダブルパンケーキコイルのコイル高さとした[2]。

まず 1/2 サイズ 3T コイルと同様に, メインコイルを 6 群(3 対), シールドコイルを 2 群(1 対)として最適化し, コイル配置を Fig.2(a)に示す[3]。設計したコイルの電磁力を計算した結果, 軸(Z)方向電磁応力は最大 135 MPa となり, 1/2 サイズ 3T コイルの最大軸方向電磁応力 30 MPa を超える値となった。コイル設計において電磁力による超電導特性劣化を防止するため, 線材にかかる電磁応力を低減する必要がある。そこで, メインコイルを 8 群(4 対)構成とし, 軸方向電磁力が最も大きい外側のコイル群の電磁力を機械的に支持する構造を検討した。このときの最適配置を Fig.2(b)に示す。点線部のコイル群の電磁力を機械的に支持し, コイルにはたらく最大軸方向電磁応力を 30 MPa とした。コイル諸元を Table 1 右列に示す。磁場均一度は 1.7 ppm(250 mmDSV)であり, 目標の 2 ppm 以下を満たす見込みを得た。

この設計結果を基に, 1/2 サイズ 5T コイルを試作し, 全身用 3T 高温超電導マグネットで想定される負荷を考慮した検証試験を進める。

謝辞

本研究は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. S. Yokoyama, et.al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 96(2018) 1A-a01
2. T. Matsuda, et.al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 92(2015) p. 8
3. H. Miura, et.al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 95(2017) p. 17

Table 1 Specifications of a half-size 3T coil and 5T coil

	A half-size 3T coil	A half-size 5T coil
Inner diameter of a main coil	560 mm	560 mm
Outer diameter of a shield coil	1200 mm	1200 mm
Current density of coils	120 A/mm ²	200 A/mm ²
Center magnetic field	2.9 T	5.0 T
Maximum experience magnetic field	4.2 T	6.7 T
Magnetic homogeneity (250 mmDSV)	1.7 ppm	1.7 ppm
0.5 mT fringe field	R2.5 m x Z3.4 m	R2.5 m x Z2.9 m

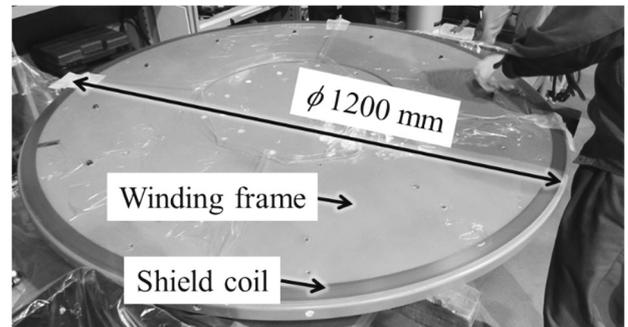


Fig. 1 Production process of a shield coil.

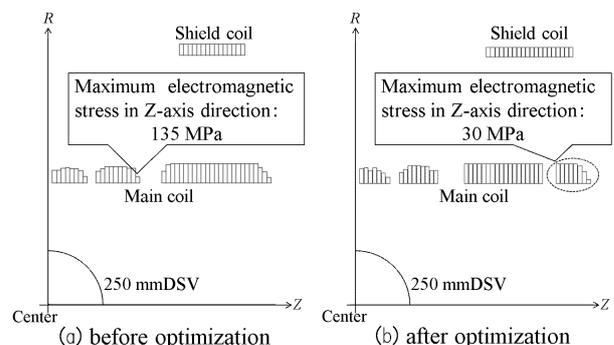


Fig. 2 1/4 cross sectional views of a half-size 5T coil.

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(II-3) ~高温超電導 MRI マグネット励磁システム設計のための等価回路の検討~

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (II-3)
 - Equivalent circuit of HTS-MRI Magnet for power supply system design -

川嶋健之、北田悟史、白井康之(京都大);横山彰一(三菱電機)

KAWASHIMA Takeshi, KITADA Satoshi, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric corp.)

E-mail: shirai@energy.kyoto-u.ac.jp

1.はじめに

高温超電導(HTS)MRI マグネットでは、線材の超電導接続が容易でなく、超電導スイッチも開発途上であり、永久電流モードでの運用が現在のところ難しい。解決策のひとつとして高安定の電源励磁による運用の可能性を検討している。

MRI イメージングに必要な磁場安定性を得るには、テープ線材の遮蔽電流と電源自体の出力変動によるコイル磁場への影響を抑える必要がある。遮蔽電流の影響の低減は、設定電流を一旦越え若干の消磁過程を加えるオーバーシュート励磁法で、32H-HTS マグネットを用いてある程度の効果を確認し報告した[1]。また、電源の安定性については、励消磁電源と電流保持電源を分離した高安定電源システムを提案し、実験によりその効果を確認した[2]。さらに、電源の電流制御ループに微小電流補正制御を追加し、0.7ppm/hr の磁場安定度を達成している[2]。

しかしあるマグネットを励磁した場合に遮蔽電流の減衰がどの程度発生するか予測することは容易ではないため、電源システムによる適切な励磁手法を検討・評価するためには、簡易的に遮蔽電流の減衰を予測できる等価回路モデルを構築する必要がある。本稿では、励磁システム設計を目的として、遮蔽電流や接続抵抗を考慮した簡単な等価回路を設定し、実験結果からパラメータの推定を行ったので報告する。

2.等価回路の提案

高温超電導テープ線材を用いたマグネットでは、テープ線材に誘導された遮蔽電流が長時間にわたり減衰することで磁場が変化し、マグネットの磁場安定度に大きく影響する。開発した 32H-HTS マグネットを励消磁電源で 1.5 T (66 A) まで励磁し、そのままホールドした後の中心磁束密度の時間変化を調べると、概ね一定の時定数で遮蔽電流磁場が減少して主磁場が回復してきていることがわかった。この遮蔽電流はコイルの自己磁場の変化により線材に誘導されることから、コイルの自己インダクタンス L_1 と遮蔽電流ループのインダクタンス L_2 が相互インダクタンス M で結ばれているとして簡易的に Fig.1 のような等価回路モデルで表せるとした。図の点線内にマグネットシステムで、電流リード抵抗と相互インダクタンスでカップリングした遮蔽電流回路を二次回路に持つ変圧器等価回路で表している。遮蔽電流回路には、磁束クリーブやフローによる等価抵抗成分 R_{scn} を挿入している。

3.等価回路定数の推定

電流源は、一次遅れの PI 制御で出力電流を指令値となるように制御する。配線抵抗を $1\text{ m}\Omega$ 一定とし電流リード抵抗を電流に比例するとして $2\text{ m}\Omega \times I_{out}/67$ とした。 L_2, M, R_{scn} は実験結果からフィッティングして求めた。

Fig.3 に HTS-MRI (32H) マグネットを励消磁電源で 67A に励磁し、その後保持電源に切替て 66 A でホールドした励磁運転の実験結果を示す。この運転に対して Fig.1 の回路でシミュレーションした結果も併せて示している。ほぼシミュレ

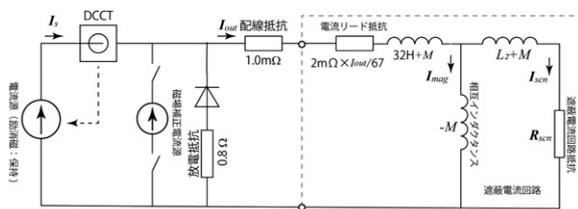


Fig.1 Equivalent circuit of exciter system and HTS-magnet considering the screening current.

シオン結果は実験結果を表すことができています。

上段は励磁電源で励磁し 67 A でホールドしたときの磁束密度の変化、中段は保持電源に切り換えて 66 A でホールドしたときの磁束密度変化を示す。遮蔽電流の効果による磁場の変化を示している。このデータにフィッティングするように、以下のように L_2, M, R_{scn} を決定した。

$$L_2 = 6.0\text{ mH}, \quad M = 8.0\text{ }\mu\text{H}$$

$$R_{scn} = \begin{cases} 46\text{ }\mu\Omega & \dots\dots\dots (t < T_{ex}) \\ 45\text{ }\mu\Omega \cdot \exp\left(-\frac{t - T_{ex}}{24}\right) + 1\text{ }\mu\Omega \cdot \exp\left(-\frac{t - T_{ex}}{250}\right) & \dots\dots\dots (t \geq T_{ex}) \end{cases}$$

ここで T_{ex} は、励磁終了時間である。

4.まとめ

HTS コイルの電源設計のための等価回路表現の検討を行った。簡単な等価回路モデルで、運転磁場を固定して典型的な励磁パターンの実験結果から回路定数を推定し、推定した等価回路モデルで、オーバーシュート励磁運転[1]や微小電流補正制御実験[2]のシミュレーションを行い、概ね実験結果を説明することができた。これにより、励磁電源の制御設計が可能であることが確かめられた。

謝辞

本研究は、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施した。

参考文献

1. T. Yachida, et al.: Abstracts of CSJ Conference **93** (2016) 120
2. T. Yachida, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **27** 4 (2017)

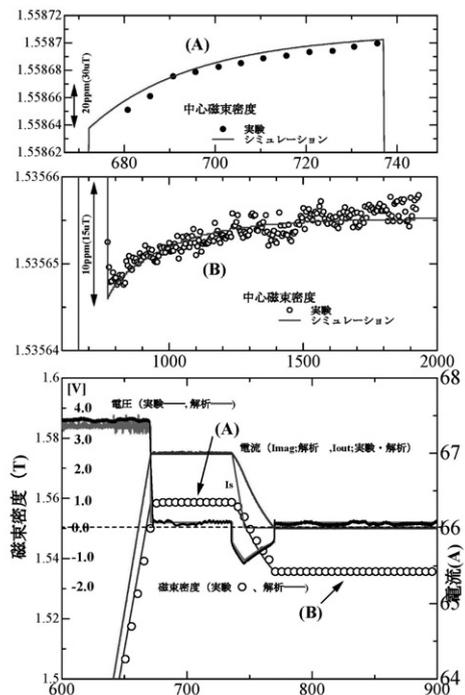


Fig.2 Typical experimental result of HTS-MRI magnet excitation and the corresponding simulation result.

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅱ-4) ～高温超電導線材の断面形状がコイル内磁場分布に与える影響～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (Ⅱ-4)

-Influence of HTS conductor's cross section on spatial magnetic field distribution in a coil-

山田 祥子, 趙 珈卉, 唐島 智治, 中村 武恒 (京大); 松田 哲也, 横山 彰一 (三菱電機)
YAMADA Shoko, ZHAO Jiahui, KARASHIMA Tomoharu, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.);
MATSUDA Tetsuya, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)
E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は, MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステムの研究開発[1]の一環として, 全身 3T-MRI 用高温超電導コイルの最適化設計に関する研究開発を実施している。本研究では, 冷凍機 COP も含めたシステム効率の最適化を目標として, 運転温度も変数とした設計コードの開発を行っている。すでに, 遺伝アルゴリズムに基づく最適化設計コードを開発し, マグネットの設計を可能にした[2]。一方で, 上記設計では線電流近似を用いているが, 同近似では線材断面構造が考慮されておらず, その空間磁場均一度に与える影響が明らかでない。

本講演では, 前報[2]で報告した 3 T マグネットについて, 希土類系高温超電導線材の正確な断面構造を考慮した 3 次元有限要素法モデルを作成し, その空間磁場分布に与える影響を検討したので報告する。

2. 解析方法

前報[2]で作成した 3 T ホールボディマグネットを対象として, 高温超電導線材の正確な断面構造を考慮した 3 次元有限要素法解析モデルを作成した(3次元モデルにしているのは, 今後遮蔽電流解析を実施するためである)。Fig. 1 には, 線電流近似によって得られた 3 T ホールボディマグネットの断面構造と均一球 500 mm の空間における磁場分布を示す[2]。本モデルを用いて, 線材の詳細な断面構造を考慮した 3 次元有限要素法モデルを作成した。Fig. 2 には, (a) 希土類系高温超電導線材の断面および (b) マグネットの部分拡大図をそれぞれ示す。同図に示すように, 超電導や絶縁層他の正確な断面構造を考慮してモデルを作成した。なお, 本報告では超電導層および保護層を一体として, 200 A の強制通電解析を実施した。

3. 解析結果

Fig. 3 には, Fig. 2 のモデルによって得られた強制通電解析結果を示す。Fig. 1 の線電流近似では, 均一球 500 mm における平均磁場は 3.18885 T であり, 空間磁場均一度は 12 ppm であった。一方で, Fig. 3 では平均磁場 3.18769 T であり, 空間磁場均一度は 94.29 ppm となった。即ち, 線電流近似によって設計したマグネットの空間磁場均一度は, 線材断面構造を考慮した場合に比較して高く評価される可能性があり, 当該構造を考慮することの重要性が示されたと考えられる。その他, 本結果に基づくマグネットの直流電流輸送特性など, 詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 96, 1A-a01 (2018)
2. T. Karashima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 95, 1A-p08 (2017)

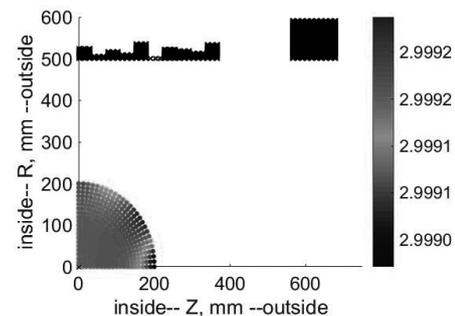


Fig. 1 Analysis result of magnetic field in a homogeneous ball space (500 mm) of whole-body 3 T coil [2]

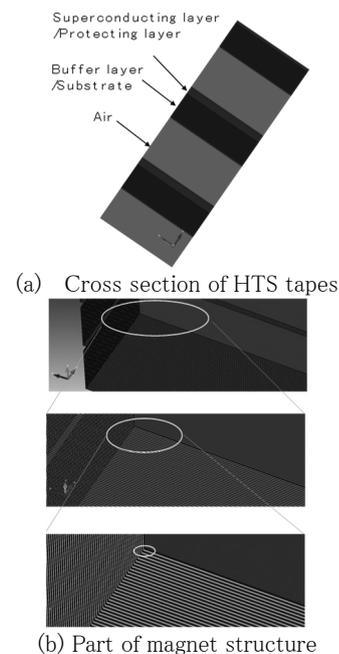


Fig. 2 3D FEM model for a 3 T whole body magnet

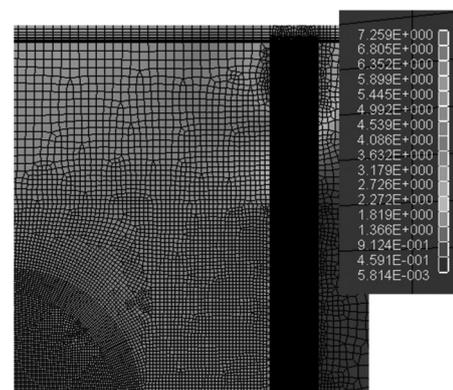


Fig. 3 An analysis result of 3 T whole body magnet taking account of cross section of the HTS tapes (Fig.2)

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅱ-5) ~コイル励磁中の温度変化が磁場安定性に及ぼす影響~

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (Ⅱ-5) -Influence of temperature change during coil excitation on temporarily stable magnetic flux density distribution -

金丸 允駿, 宮崎 純, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 三浦 英明, 横山 彰一(三菱電機)
 KANAMARU Masatoshi, MIYAZAKI Jun, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
 MIURA Hideaki, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)
 E-mail: masatoshi.kanamaru.s4@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

MRI 用 HTS コイルでは, 励磁時に線材内に遮蔽電流が誘起されるが, この遮蔽電流の減衰に起因する磁場変動は, コイル中心磁場の時間的安定性に悪影響を及ぼす。これまでは, 遮蔽電流磁場の変動抑制方法として, コイルの励磁電流を繰り返し変化させる「繰り返しオーバーシュート法」[1]を適用した場合の磁場安定性について検討してきたが, 磁場の安定化には, コイル温度を調整することも有効と考えられる。そこで, 本研究では, コイルの温度変化が遮蔽電流磁場の変動特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

GdBCO テープ線材を用いて 50 ターンのダブルパンケーキコイルを作製した。コイル断面および磁束密度測定用ホール素子の設置位置を Fig.1 に示す。なお, 線材長は 16.7 m, I_c は 260 A(40 K, 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準)である。本実験に使用したコイルの励磁波形とコイル温度の変化の様子を Fig.2 に示す。実験では, 目標とする運転温度よりも ΔT だけ高い温度で励磁を行い, 電流ホールド直後に温度を目標運転温度に下げた場合の磁場変動率 ϵ_{side} を評価した。なお, 磁場変動率 ϵ_{side} は, 励磁電流ホールド後 2000 秒間の磁場変動率の平均値とした。コイルの励磁にはオーバーシュート法を適用し, 運転電流を 104 A, 目標運転温度を 40 K, オーバーシュート量 ΔI を 0, 30, 60 A, 温度変化量 ΔT を 0, 1, 3, 5 K, コイル励磁時のスweep速度を 1A/sec. とした。

3. 実験結果

目標運転温度 40 K, 運転電流 104 A, オーバーシュート量 ΔI を 0, 30, 60 A とした場合の, 各温度変化量 ΔT に対する磁場変動率 ϵ_{side} の測定結果を Fig.3 および Table1 に示す。これより, オーバーシュート量にかかわらず, 電流ホールド後の磁場変動率は, 温度変化量が増加するにつれて, 減少することが分かった。また, オーバーシュート法を適用しない場合は, コイルの温度変化量 ΔT が 5 K でも十分な磁場変動抑制効果が得られないのに対して, オーバーシュート法を適用した場合は, より小さい温度変化量 ($\Delta T=3$ K) で十分な磁場変動抑制効果が得られることが分かった。温度変化量が大きくなると, 初期温度での電流負荷率が増加するため, コイルの安定性を考慮すると, 温度変化量は可能な限り小さくすることが望ましい。このため, コイルが経験する最大電流負荷率の増加を抑えた上で, 高い磁場安定性を得るには, オーバーシュート法を適用しつつ, コイルの運転温度を変化させることが有効であると考えられる。

謝辞

本研究は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「高温超電導実用化促進技術／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 (コイル開発)」により委託・支援を受け実施したものである。

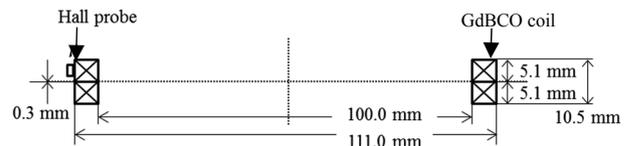


Fig.1 Schematic view of a GdBCO double pancake coil and hall probe for magnetic field measurement.

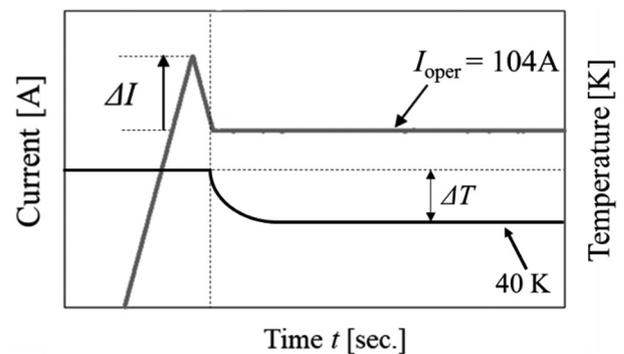


Fig.2 Waveforms of coil current and temperature

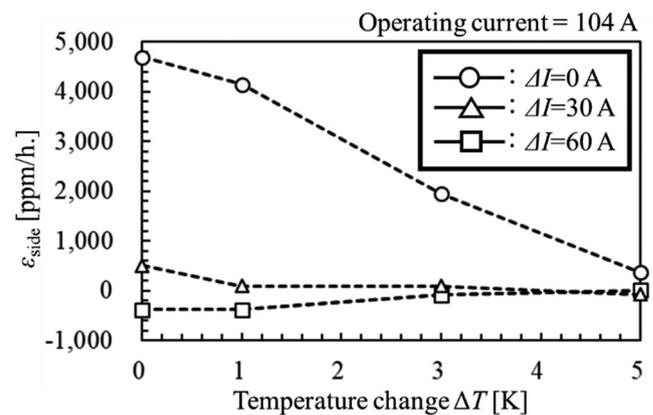


Fig.3 Variation rate of magnetic flux density as a function of temperature change ΔT at each overshooting current.

Table.1 Variation rate of magnetic flux density as a function of temperature change.

$ \epsilon_{\text{side}} $ [ppm/h.]	$\Delta T=0$ K	$\Delta T=1$ K	$\Delta T=3$ K	$\Delta T=5$ K
$\Delta I=0$ A	4700	4148	1947	367
$\Delta I=30$ A	505	87	87	79
$\Delta I=60$ A	378	383	38	10

参考文献

1. H. Miura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.28 (2018), Issue.3, No.4401705

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (II-6) ~HTS パンケーキコイルの非破壊・非接触検査法に関する検討~ Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (II-6) – Consideration on non-destructive, non-contact method for diagnostic testing of HTS pancake coils –

木須 隆暢, 東川 甲平, 中桐 裕貴, 藤井 智仁, 今村 和孝, 鈴木 匠, 井上 昌睦 (九大);
 三浦 英明, 横山 彰一 (三菱電機)

KISS Takanobu, HIGASHIKAWA Kohei, NAKAGIRI Hiroki, FUJII Tomohito, IMAMURA Kazutaka,
 SUZUKI Takumi, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.); MIURA Hideaki, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric)
 E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MRI 用高温超電導マグネットの安定製造技術確立のためには、基本構成要素である HTS パンケーキコイルの巻線時あるいはマグネット運転による劣化因子を明らかとし、線材への要求性能ならびに巻線技術やコイル運転時の条件へとフィードバックする事が不可欠である。しかしながら、今のところコイルの特性試験は、コイル全体のマクロスケールな電流-電圧特性の測定によってその劣化の有無を判断するに留まっており、コイル内の I_c 低下位置やその程度の情報を得ることが困難であると同時に、コイルの要素試験そのものが劣化の要因になる恐れすらある。本研究では、コイルの I_c 低下部位の検出を可能とする非破壊・非接触検査法について検討を行い、原理検証のための実験を実施した。

2. 実験

パンケーキコイルの巻線部を模擬するため、長さ 5 cm、幅 5 mm のコート線材を 100 枚積層し、局所欠陥を模擬するためにその一部をハステロイ基板に入れ替えた。線材の長手方向を x 軸、積層方向を y 軸、各素線の幅方向を z 軸とする。積層導体を液体窒素中で着磁した後、積層導体表面における漏洩磁界の分布を走査型ホール素子顕微鏡によって計測した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に測定結果を示す。同図(a)は欠陥を含まない場合、(b)は $y=0$ の位置に 1 層分のハステロイ基板を挟み込んだ場合である。いずれも磁界の y 軸成分の y 方向分布を示す。健全な試料では、各テープの磁気モーメントが重畳された磁界分布を示しており、端部において y 軸成分のピークを観測した。一方、試料(b)において、欠陥部位では、(a)に比べ欠陥部位において超電導素線 1 枚が作る磁気モーメントを打ち消す向きの磁気モーメントによる磁界が重畳されるのと等価となる事から、 $y=0$ において逆向きのピークが観測された。 y 成分は磁気モーメントの直上で最大となることから、このピーク位置は欠陥位置に等しい。また、両端部のピーク磁界強度は、(b)の場合が(a)に比べて強く、分布の形もより急峻になっている。これは測定時の試料からセンサ位置までのリフトオフ距離が(b)の場合の方が小さいことに起因している。

さらに、上記と同様の積層導体において磁界の z 軸成分を測定した結果を Fig. 2 に示す。 z 軸成分の場合、磁界強度のピークは欠陥位置を挟む形で正負の符号変化をともなって現れる事から、欠陥位置との直接的な対応をより見やすくするため y 方向微分をプロットした。欠陥を有する試料において欠陥直上($y=0$)で急峻なピークを観測出来ていることが分かる。

以上により、コート線材が積層した構造を有するパンケーキコイルの欠陥位置を磁気顕微鏡によって非破壊・非接触に検知できると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発」(16100554-0)による支援を得て実施したものである。

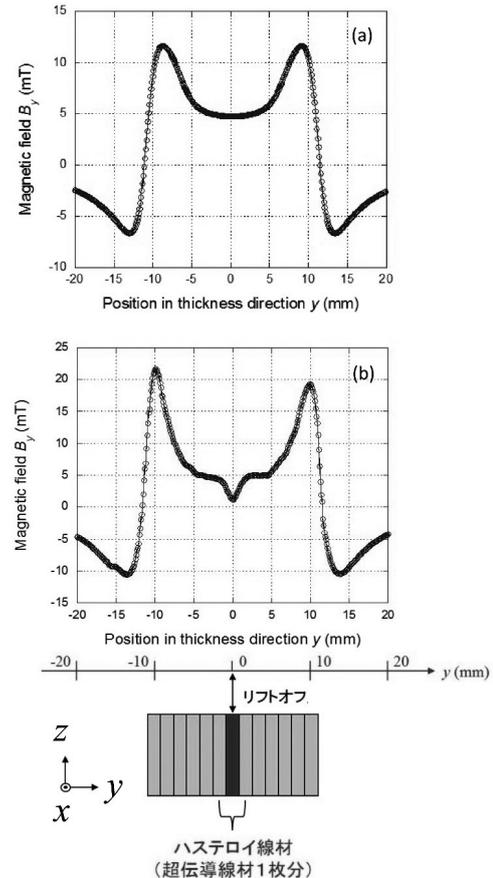


Fig. 1 Parallel component of the stray field, B_y , distribution above the tape stack simulating pancake coil (a) without and (b) with defect.

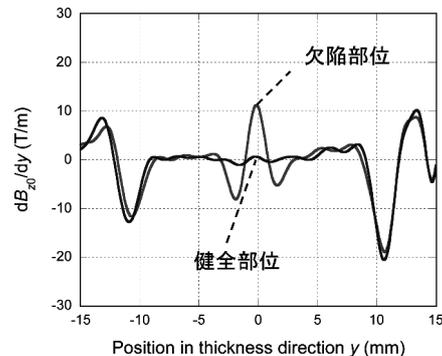


Fig. 2 Detection of the defect using perpendicular component of the stray field at sample surface, B_z .

無絶縁 REBCO パンケーキコイルの 電力貯蔵装置への応用可能性に関する検討

Evaluation on Applicability of No-Insulation REBCO Pancake Coil to Superconducting Magnetic Energy Storage

金原 徹郎, 鄭 齊一, 市川 哲理, 柿本 雄太, 尾下 遥, 石山 敦士 (早稲田大学);
 KINPARA Tetsuro, Zheng Qiyi, ICHIKAWA Tetsuri, KAKIMOTO Yuta, ONOSHITA Haruka, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置 (SMES) は、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する装置で、長寿命で繰り返し運転に制限がなく、大電力の瞬時応答が可能というメリットがあるが、貯蔵密度が極めて小さいというデメリットがある。

無絶縁コイル (以下「NI コイル」) は、二律背反である高電流密度化と高熱的安定性を両立できる巻線方式として期待されている。NI コイルは絶縁層が存在せず、安定化層の共有により銅安定化層の厚みを削減することができるので高電流密度が実現される。直流応用のみが想定されている NI コイルを SMES にも応用できれば、この高電流密度により高貯蔵密度を達成できる可能性がある。しかし、NI コイルには充放電の際に電流が径方向に流れることによるジュール損失が発生する。この損失を算出することで効率を定量的に求め、SMES への適用性を評価したので報告する。

2. 解析方法

今回の解析で用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。運転温度は 20K を想定した。周方向電流最大値を 540A、最小値を 420A とし [1]、一定電力での充放電制御を仮定のもと、Fig.2 の簡易等価回路モデル [2] による電流解析を行った。このとき、層間電気抵抗率を $1 \mu \Omega \cdot \text{cm}^2 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ の範囲で変化させ、充放電周期についてシステム安定化を想定した 3 秒、負荷変動保障を想定した 18 秒とした。結果から、充電されるエネルギーと 1 周期の充放電でのジュール損失を計算し、効率を求めた。

3. 解析結果

電流の解析結果の一例を Fig.3 に示す。周方向電流の時間変化によるコイル誘導起電力が径方向の層間電気抵抗に印加され径方向電流が流れる。層間電気抵抗が小さいほど径方向電流は大きくなった。

層間電気抵抗率と効率の関係を Fig.4 に示す。当然、効率は無絶縁であるほど悪く、絶縁であるほど良いが、長い充放電周期であれば層間電気抵抗が $10 \text{m} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度の有限の値でも高効率を示し、他の貯蔵方式と比較しても劣らない効率を示している。このことから、SMES に無絶縁巻線方式の採用と層間電気抵抗の最適化制御を施すことで、高電流密度化により高貯蔵密度化を達成できる可能性があると考えられる。

本研究は科研費挑戦的萌芽研究 (No.16K14220) によった。

参考文献

1. A.Ishiyama, et al.: TEION KOGAKU, vol. 48, no. 4, 141-150, 2013
2. X.Wang, et al.: Superconductor Science and Technology, vol. 26, no. 3, 2013

表 1 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの諸元
Table1. Specification of NI REBCO pancake coils

REBCO conductor	Overall width [mm]	4.02
	Overall thickness [μm]	206
NI Coil	i.d; o.d [m]	1.000; 1.041
	Height [mm]	4.02
	Number of Turns	100
	Inductance [H]	0.0296

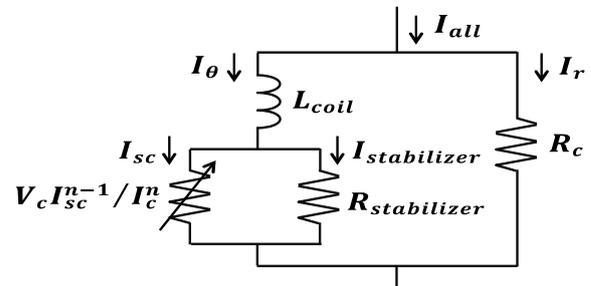


図 2 簡易等価回路モデル
Fig.2 Simple Equivalent Circuit Model

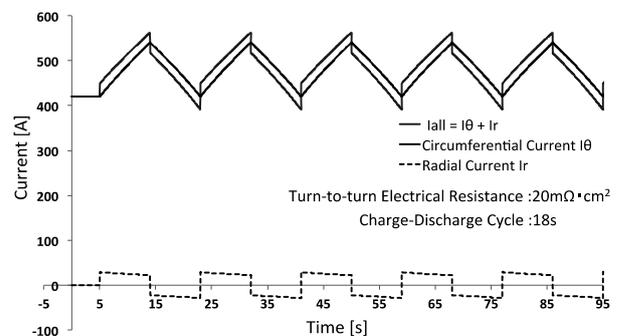


図 3 周方向電流と径方向電流
Fig.3 Circumferential current and radial current

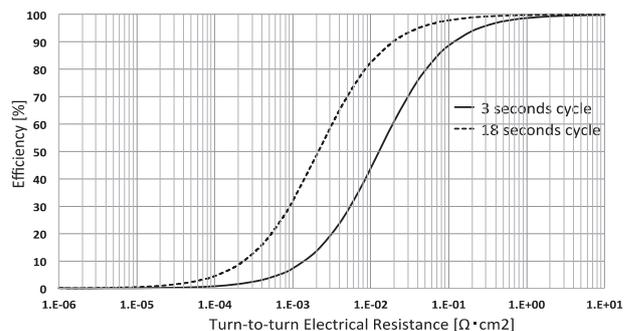


図 4 層間電気抵抗と効率
Fig.4 Efficiency at each Turn-to-turn electrical resistance

限流器応用のためのポーラス安定化材付 REBCO 線材の熱特性評価

Thermal Characteristics Evaluation of REBCO Tape with Porous Stabilizer for Fault Current Limiter

結城 光平, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)

YUKI Kohei, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: kohei.yuki.t2@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

抵抗型超伝導限流器で用いられる希土類系銅酸化物超伝導体 (REBCO) 線材は, 事故電流が流れ込んだ際に高抵抗を示し, その後素早く超伝導状態に復帰することが要求される. これらの要求を満たすために, NiCr 安定化層適用による高抵抗化[1]やフィン装荷による超伝導復帰時間の短縮[2]などが先行研究として行われてきた. そこで著者らは, これらの知見を基に2つの要求を同時に達成するため安定化材を金属多孔質体 (ポーラス体) に置き換えた構造を持つポーラス安定化材付 REBCO 線材を提案した[3]. ポーラス体内部は複雑構造となっており, バルク体と比べ高抵抗かつ, その大きな表面積により冷却を促進することができる. また, 事故電流はポーラス体へと転流するため, ポーラス体の体積発熱を利用した冷却が可能になると考えられる. 本研究では過電流通電後における REBCO 線材の抵抗挙動を明らかにし, ポーラス安定化材付 REBCO 線材の熱特性を評価した.

2. 実験方法

本実験では SuperOx 社製, 幅 4 mm, 長さ 100 mm で厚さ 2 μm の保護銀層を有する (銅安定化材なし) REBCO 線材を使用した. ポーラス体接合の有無およびポーラス体への電流転流量が REBCO 線材の熱特性へ与える影響を確認するため, Fig. 1 に示すように安定化材無接合のもの (試験体 1), ポーラス体全体を線材に接合したもの (試験体 2), ポーラス体の一部を線材に接合 (10 mm 間隔) したものの (試験体 3) の3種類の REBCO 線材試験体を製作した. ポーラス体には NiCr 製の金属発泡体 (気孔率 86%, 厚さ 0.4 mm, 長さ 50 mm) を用いた. Table 1 に各 REBCO 線材試験体の臨界電流値と n 値を示す. ポーラス体接合時には REBCO 線材とポーラス体間に厚さ 50 μm のインジウム箔を挟み, 接合圧力 10 MPa で機械的に接合した.

通電実験の際には電源, ショント抵抗, REBCO 線材 (液体窒素 77 K で浸漬冷却) を直列に接続し, 電源から事故電流を模擬した過電流 $I = I_0 \exp(t/\tau)$ ($I_0 \approx 2$ [A], $\tau=130$ [ms]) を出力する. 電流の最大値は 90 A ($t=0.5$ [s]) で試験体の臨界電流値の 3~4 倍の値となっている. ショント抵抗電圧値より求めた回路内の電流値と REBCO 線材の発生電圧から REBCO 線材の抵抗値を算出する. 指定の最大電流到達後, 電流を臨界電流値より十分に低い値 I_0 まで減少させ, REBCO 線材の抵抗が再び 0 Ω になるまでの時間を復帰時間として測定した.

3. 実験結果

Fig. 2 に各試験体の抵抗の経時変化を示す. 試験体 2 と 3 は超伝導体が常伝導に移した際, ポーラス体とインジウムに電流が転流することで, 試験体 1 に比べ抵抗値が減少し, 復帰時間が試験体 1 の 30%程度まで短縮した. また, 各試験体における冷却性能を評価するため, 抵抗の平均減少率を算出したところ, 試験体 1, 2, 3 でそれぞれ, 0.051, 0.035, 0.091 Ω/s であった. したがって, 冷却性能が高い順に試験体 3, 試験体 1, 試験体 2 となる. 試験体 2 では, ポーラス体への電流転流量が全電流の 1%未満 (77 K での各抵抗値により算出) であり, ポーラス体の体積発熱による冷却効果が小さい. また, REBCO 線材を冷却する際に

はインジウムを介しての冷却となるため, REBCO 線材を直接冷却可能な試験体 1 に比べ冷却性能が低下したと考えられる. 一方, 試験体 3 ではインジウムが存在しない領域があるために, ポーラス体への電流転流量が全電流の 3%程度まで増加した. 使用したポーラス体は数 A 程度で沸騰が発生するため, ポーラス体部での沸騰冷却が可能となり, 冷却性能が向上した可能性が考えられる.

4. まとめ

本研究では過電流通電後の抵抗の経時変化からポーラス安定化材付 REBCO 線材の熱特性を評価した. その結果, ポーラス体への電流転流量が熱特性に大きく影響する可能性が示された. 実験の詳細に関しては発表当日に報告する.

参考文献

- [1] M.Tamashita *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.27-No.4, (2017), 5601805
- [2] T. Yazawa *et al.*, *Physica C*, 468 (2008), P.2046
- [3] 結城光平 他, 第 18 回日本伝熱学会東北支部学生発表会講演論文集

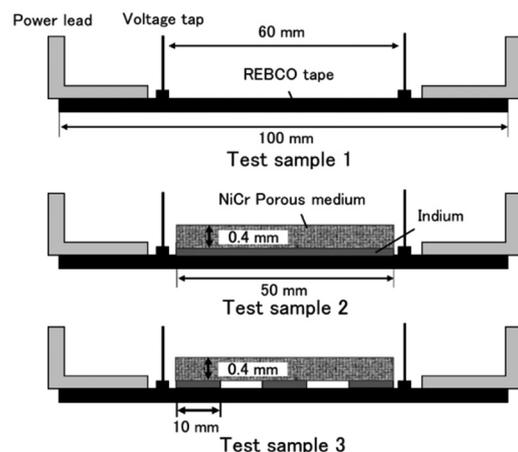


Fig. 1 Schematic drawings of the test samples

Table 1 Specification of the REBCO tape samples

Sample name	Critical current (A)	n-value
Test sample 1	34	31.6
Test sample 2	23	13.0
Test sample 3	28	22.9

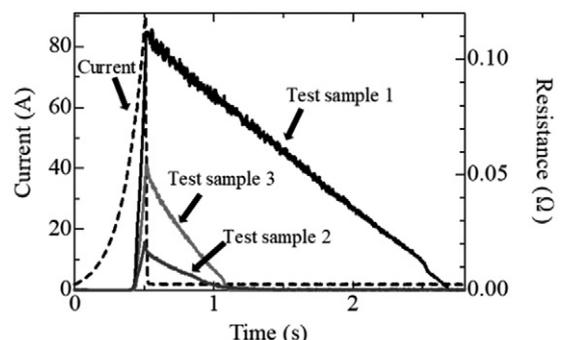


Fig. 2 Recovery characteristics of the test samples

REBCO 線材を用いた超電導限流器の模擬電力システムにおける限流試験及び復帰特性の検討

Current limiting test and study about recovery characteristics of simulated transmission system by use of SFCL made of REBCO wire

坂本 拓哉, 白井 康之, 向 麻理子, 坂本 大輝 (京都大学); 馬場 旬平 (東京大学);
 SAKAMOTO Takuya, SHIRAI Yasuyuki, MUKAI Mariko, SAKAMOTO Daiki (Kyoto University);
 BABA Jumpei (Tokyo University);
 E-mail: sakamoto@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年、電力系統の大規模複雑化に伴い故障電流の増大、電力系統の安定度の低下が懸念されており、限流器はこれらの問題解決に期待されている。本研究では REBCO 線材を用いた超電導限流器を用いて三相一機無限大母線系統を模擬した電力系統での限流試験を行い、限流器による電力系統への影響を調べた。また実験結果より限流器モデルを作成し、実験と同様のシミュレーションを行った。その際の超電導限流器の線材の温度変化を調べ、復帰特性の検討を行った。

2. 変圧器磁気遮蔽型 SFCL

実験で使用した変圧器磁気遮蔽型 SFCL は二つの超電導コイルを同軸に配置した変圧器の構造となっている。一次側は系統に接続され、二次側は短絡している。通常時は超電導状態であるため一次側コイルによる磁束を十分に打ち消す誘導電流が二次側コイルに流れるため低インピーダンスとなる。故障時はまず二次側が常電導転移し、一次側コイルによる磁束を十分に打ち消すことができなためリアクタンス成分が現れ、限流を行う。さらに大きな故障電流が流れると一次側も常電導転移し、抵抗成分も加わり限流を行う。様々な超電導線材を用いた限流器の研究が進んでいるが[1]、本研究では REBCO 線材を用いる。限流器の動作開始電流は約 30A である。線材の臨界温度は 90K であり、液体窒素で浸漬冷却する。

3. 実験とシミュレーション概要

実験回路は Fig.1 であり、三相一機無限大母線系統である。発電機出力を約 7kW、図中 MC5 で一相地絡故障を起こし、限流試験を行った。FCL がある場合とない場合(代替リアクトル 0.12mH)の限流器電流を比較した。また XTAP(eXpandable Transient Analysis Program)を用いて限流器モデルを作成し、同様のシミュレーションを行った。限流器のインピーダンスと熱伝導方程式を用いたシミュレーションにより限流器の巻線温度を求めた。熱伝導方程式は線材の温度を一様とし、合成熱容量 C とジュール発熱 Q_j 、液体窒素による冷却 Q_q による式(1)を用いた。

$$C(T) \frac{dT}{dt} = Q_j(I, T) - Q_q(T) \quad (1)$$

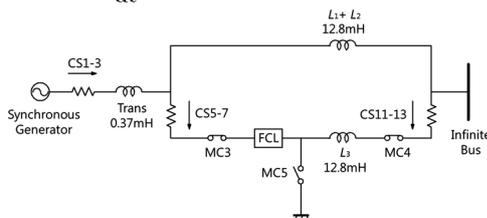


Fig.1 Lab-scale one machine infinite bus transmission system

4. 結果・考察

一相地絡故障での事故相の限流器電流を Fig.2 に示す。故障電流が 590A から 194A 程度に限流されていることが確

認できた。Fig.3 は限流器インピーダンスの実験結果と限流器モデルによるシミュレーション結果の比較である。抵抗成分、リアクタンス成分両方とも概ね模擬できていることが確認できた。Fig.4 はシミュレーションで求めた限流器一次側 T1、二次側 T2 の巻線温度である。二次側は最大でも 89K と臨界温度より低く、故障除去後 1s もかからず元の状態に戻っている。故障除去後、液体窒素は核沸騰状態でとどまり、すばやく冷却されるため復帰時間が速いと考えられる。一次側は 150K まで上昇しており、元の状態まで戻るのに 1s 以上かかっている。故障除去後も常電導状態であり、液体窒素も膜沸騰状態であるため、冷却に時間がかかり、復帰時間は遅くなっていると考えられる。

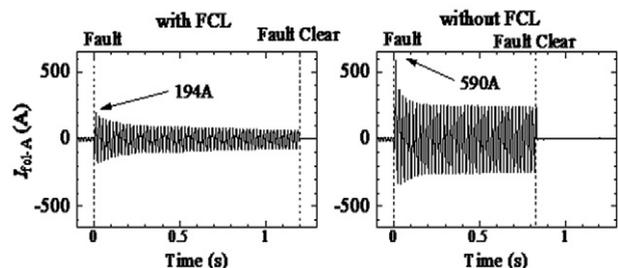


Fig.2 Fault current at the one phase ground fault

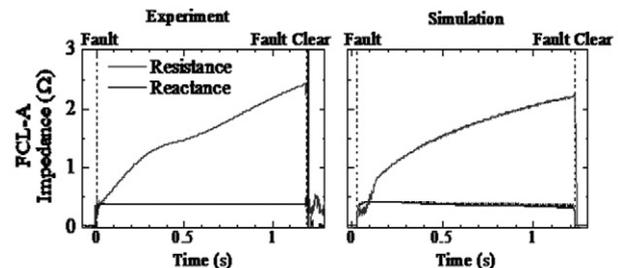


Fig.3 Impedance of the FCL at the one phase ground fault

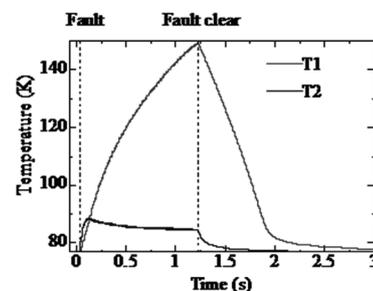


Fig.4 Temperature of the FCL at the one phase ground fault

参考文献

1. N. Yonemura, et al.: Abstract of IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.25, Issue.3 (2015) p.5601104.

12K 冷凍機を用いた REBCO バルク磁石の強磁場化の検討

Improvement of trapped field of REBCO bulk magnet using 12 K refrigerator

横山 和哉(足利大);岡 徹雄(芝浦工大)

YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

REBCO バルク磁石は 2 テスラを超える磁場を、小型・安価な装置で発生させることができる。著者らはバルク磁石の実用化を最終目標として、強磁場発生と取り扱い易さを両立した装置の開発を目指している。その一つとして、着磁方法をパルス磁化法に限定することにより、磁極を短くすることができ、装置全体も小型化することができる。一方、同手法では超伝導状態の試料に磁場を印加するため、大きな発熱を伴う。そこで、冷凍機の選定には、最低到達温度と同時に、冷却容量にも注意しなければならない。昨年度、12 W@20 K の冷却能力を有する 2 段 GM 冷凍機を用いたバルク磁石装置を開発した。本文では、 $\phi 60$ mm の GdBCO バルク体を用いて着磁試験を行った結果を報告する。

2. 実験方法

厚さ 2 mm の SUS316L リングで補強した $\phi 60 \times 20$ mm の GdBCO バルク体(新日鉄住金製)を、2 段 GM 冷凍機(RM20, アルバック製)の 2nd ステージに取り付けたサンプルフォルダに取り付ける。真空断熱した後、20~50 K に冷却する。着磁コイルを取り付けて 3.1~7.0 T のパルス磁場(立上時間:10 ms, 全パルス幅:100 ms)を 1 回印加し、試料表面の中央部に貼り付けたホールセンサ(BHT-921)により、着磁中の磁束密度の時間変化を測定した。着磁コイルを取り外した後、磁極表面(試料表面から約 4 mm)の磁束密度分布を、三次元ホールセンサ(BH-703)を用いて測定した。また、実測した磁場分布から、総磁束量を算出した。

3. 結果及び考察

Fig. 1 に 20 及び 40 K における、印加磁場 $B_{app}=3.9, 5.4, 7.0$ T の磁場分布を示す。20 K の $B_{app}=3.9$ T では十分磁場が侵入しておらず分布に歪みがあるが、 $B_{app}=5.4$ T では最大 2.3 T の同心円状の分布となっている。 $B_{app}=7.0$ T では、発熱にともなう磁束フローのために、最大値は 1.4 T に低下している。40 K では、 $B_{app}=3.9$ T でも同心円状の分布となっている。また、 $B_{app}=5.4$ T での最大値は 1.6 T であった。

Fig. 2 にバルク表面中央の磁束密度(左軸、白抜き折れ線グラフ)、磁極表面の最大磁束密度(塗りつぶし折れ線グラフ、左軸)及び総磁束量(右軸、棒グラフ)の印加磁場依存性を示す。(a)の 20 K では、 $B_{app}=5.4$ T で最大値を取り、試料表面中央の磁束密度は 3.6 T、総磁束量は 2.9 mWb であった。(b)の 40 K では、印加磁場 4.6 T で最大値をとり、試料表面中央の磁束密度は 2.0 T、総磁束量は 2.5 mWb であった。

4. まとめ

本文は、12 W@20 K の冷却性能を持つ 2 段 GM 冷凍機を用いたバルク磁石装置において、 $\phi 60$ mm の GdBCO バルク

体をパルス着磁した時の着磁特性を評価した。その結果、最大で 3.6 T の捕捉磁場を達成した。今後、着磁方法を工夫することで更なる捕捉磁場の向上が期待できる。なお、本研究の一部は JSPS 科研費 15K05951 の助成を受けたものである。

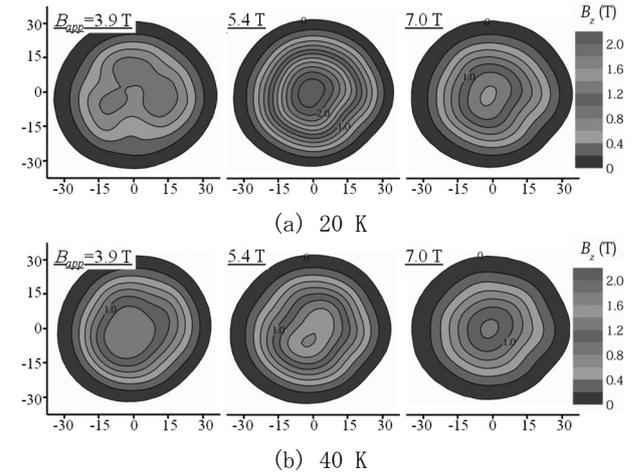


Fig. 1. Trapped field distributions measured on the pole surface when applied fields, B_{app} , are 3.9, 5.4 and 7.0 T

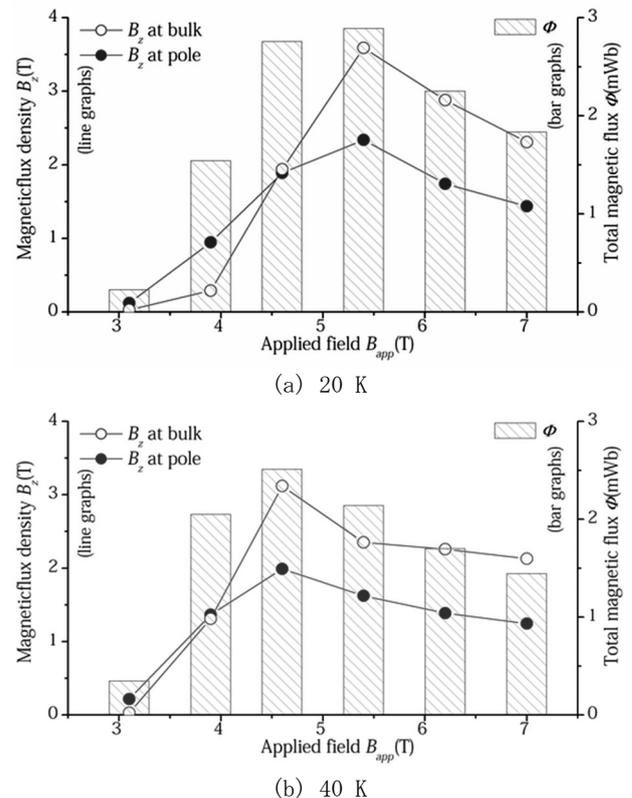


Fig. 2. Magnetic flux density at bulk and pole surfaces, and total magnetic flux as a function of applied field

非接触給電システムに適した高温超電導コイルのコイル形状に関する一検討

Basic Study on Suitable Shape of High Temperature Superconducting Coil for Wireless Power Transmission System

井上 良太 (東北大, 日本学術振興会特別研究員 DC); 五十嵐健太, 宮城 大輔, 津田 理, 松木 英敏 (東北大)
 INOUE Ryota (Tohoku Univ., JSPS Research Fellowships for Young Scientists DC);
 IGARASHI Kenta, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, MATSUKI Hidetoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: ryota.inoue.q3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、低周波領域(10kHz 以下)における Y 系線材を用いた非接触給電システムの可能性について検討している[1]。HTS コイルの交流損失は、電力伝送効率の低下に直結するため、HTS コイルの低ロス化が重要となる。そのため、低ロス化に向けた HTS コイルの設計指針が求められている。そこで、本研究では、線材幅に注目し、幅の広い線材から切断された幅の異なる臨界電流密度が等しい REBCO 線材を対象とし、実験および有限要素法解析により、線材幅の違いが HTS コイルの交流損失に与える影響について検討した。

2. 測定および解析方法

非接触給電においては、目標とする伝送電力が決定している場合、コイルの大きさに応じてコイルに流れる通電電流が決定される。そこで、臨界電流密度が同じで線材幅の異なるテープ線を用いてインダクタンスが同程度のシングルパンケータキコイルを作製し、通電電流をパラメータとして交流損失特性を比較した。測定および解析に使用した HTS コイルの諸元をそれぞれ Table 1 に示す。Sample I, II を用いて実験を行った。Sample I は、幅 2mm の線材であり、Sample II は、幅 4mm の線材である。HTS コイルの交流損失は、電気的測定法を用いて測定した。なお、各実験は、液体窒素 (77K) に浸した状態で行った。また、解析には 2 次元軸対称の有限要素法 (H 法) を用いた。Sample A, B は、幅 2mm および幅 4mm の線材を用いたシングルパンケータキコイルである。また、Sample C は、幅 2mm の線材を用いて、Sample B と同形状となるようにコイルの巻数を調整したダブルパンケータキコイルである。なお、Kim モデル[2]を用いて J_C - B 特性を考慮した。また、これまでの検討から、10kHz 程度の低周波領域においては、交流損失の周波数依存性は小さいことが明らかとなっている[3]。そこで、解析時間短縮の観点から、解析における動作周波数は 50Hz とし、交流損失を定性的に評価した。

3. 結果および考察

Sample I, II および Sample A, B, C における 1 サイクルあたりの交流損失の測定結果 (10kHz) および解析結果をそれぞれ Fig.1 に示す。Fig.1 の Sample I, II および Sample A, B の結果より、同程度のインダクタンスにおいて、通電電流が同じ場合は、線材幅の広い方が低ロス化できることが分かった。これは、中心到達磁場以下の場合、線材幅を広くすると臨界電流値が高くなり、電流負荷率が低下することと共に、テープ面に垂直に鎖交する磁束密度を緩和できたためと考えられる。また、Sample C は、他のコイルに比べ、巻数が 2 倍であるため、Sample B と起磁力が同じになる場合 (電流量は半分) に、1 サイクルあたりの交流損失が同程度となることがわかった。

Fig.2 に受電電力を 100W とし、最適負荷を接続した場合における電力伝送効率の解析結果を示す。なお、HTS コイルの交流損失は Fig.1 の解析結果を用いた。ここで、回路方式は SS 方式を採用し、結合係数 k を 0.1 (一定) としている。Fig.2 より、幅の狭い Sample A よりも、幅の広い Sample B の方が高効率伝送できることがわかった。また、Sample C が Sample B とほぼ同程度の効率で電力伝送できることがわかった。これは、受電電力を一定とした場合は、Sample B に比べて Sample C のインダクタンスが約 4 倍になり、通電電流が約 2 分の 1 にな

ることから、Sample B と Sample C の交流損失が同程度になるためと考えられる。以上より、非接触給電用コイルにおいては、受電電力を一定とした場合、線材幅が広く、臨界電流の高い線材の方がより高効率伝送できることがわかった。また、線材幅が狭い場合においても、線材幅方向にコイルを積層することで、同程度の効率が得られることがわかった。今後は、コイルの巻数やコイル間の磁気結合が HTS コイルの交流損失に与える影響について検討する予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP17J02242) の助成を受けたものである。

Table 1. Specifications of HTS coils.

Sample	I	II	A	B	C
HTS tape material	GdBCO		GdBCO		
HTS layer [μm]	1.0		1.0		
Copper coating [μm]	-	2.0	-		
Tape width [mm]	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0
Inner diameter [mm]	130		130		
Number of Turns	20	22	20	22	44
Self-inductance [μH]	157	156	123	139	526
Critical current density J_{C0} [$\times 10^{10} \text{A/m}^2$]	3.2	3.4	2.5		
$I_{C \text{ coil}}$ (0.1 $\mu\text{V/cm}$ at 77K) [A]	73.4	36.9	-		
n value	24.1	13.6	20		
Kim parameter B_0 [T]	-		0.5		
Coil shape	Single		Single	Single	Double

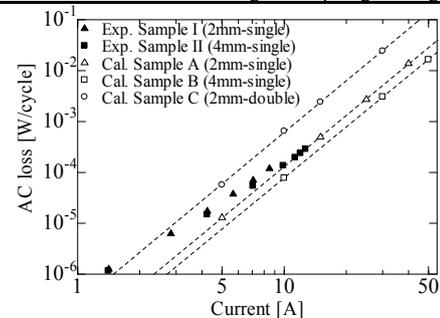


Fig.1 Experimental and calculation results of AC loss per cycle in HTS coils as a function of current.

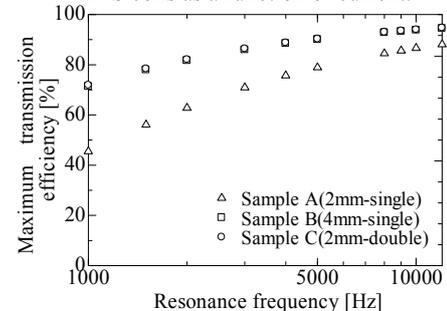


Fig.2 Calculation results of maximum transmission efficiency in WPT system of S-S topology (Coupling coefficient $k=0.1$).

参考文献

- [1] R. Inoue et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.27, No.1(2017) 5400106
- [2] Y. B. Kim et al. : *Phys. Rev. Lett.* 9, 306 (1962)
- [3] R. Inoue et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.28, No.4(2018) 8201405

新規高周波用高温超伝導線材の開発とそれを用いた高 Q 値コイル(共振器) Development of novel high temperature superconducting wire for high frequency and its application to high quality factor coil (resonator)

關谷 尚人, 小林 晋也(山梨大学)
SEKIYA Naoto, KOBAYASHI Shinya (Yamanashi Univ.)
E-mail: nsekiya@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

本研究は超伝導応用にとって未開拓であった高周波帯において非常に导体損失の小さい新しい高温超伝導線材構造を用いた高周波用超伝導線材を開発し、それをコイルに用いることで Q 値が飛躍的に改善することをシミュレーションによって明らかにした。加えて、提案構造の有効性を明らかにするために基礎的な原理確認実験を行ったので報告する。

2. 提案構造

商業化されている高温超伝導線材（直流では無損失）は超伝導層の表面に安定化層（銅）や保護層（銀）があるため、高周波では表皮効果によって、銅や銀に電流が集中することから、导体損失が大きくなってしまふ[1]。また、超伝導線材の基板材料である Hastelloy は銅の 70 倍の低効率であるため Hastelloy も損失の原因となる。

そこで、我々は高周波でも低損失となる新しい超伝導線材構造を提案する(図 1(a))。提案構造では銅や銀を取り除き、Hastelloy の両面に超伝導薄膜を形成する。こうすることで損失の原因であった銅や銀がなくなり、Hastelloy の影響を最小限に抑えることができるため、高周波でも低損失を実現できる。

3. シミュレーション

提案線材構造を用いたコイル（共振器）が高い Q 値 ($Q = \omega L/R$) を実現できることを確かめるために、3 次元電磁界シミュレータ (MW-STUDIO) を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションに使用したコイル形状を図 1(d)に示す。共振周波数は 10 MHz とした。また、比較のために従来の超伝導線材の安定化層（銅）と保護膜（銀）を取った構造（図 1(b)）及び銅テープ（図 1(c)）でも同様にコイルを設計し、Q 値を求めた。このとき、各部の導電率は超伝導層が 9.0×10^{11} S/m [2] とし、Hastelloy (77 K) は 8.3×10^5 S/m [3]、銅 (77 K) は 5.0×10^8 S/m [4] とした。図 2 にシミュレーションから得られた各コイルの Q 値をまとめた。その結果、提案構造を用いたコイルの Q 値が他のコイルと比較して飛躍的に高いことが明らかとなった。実験結果などの詳細は当日述べるが、原理確認実験によって提案構造の有効性を確認した。

4. まとめ

高周波で导体損失が低い新規高温超伝導線材構造を提案し、その構造を用いたコイルの Q 値が飛躍的に高いことをシミュレーションによって明らかにした。また、原理確認実験によっても提案構造の有効性を明らかにした。

今後、超伝導コイルの応用先としてワイヤレス電力伝送を選択し、超伝導コイルを用いた場合に伝送効率がどれだけ改善するか検討を行う。

謝辞

本研究の一部は 2017 年度日揮・実吉奨学会の援助を受けて行われた。

参考文献

- [1] 文殊川 他, 超伝導エレクトロニクス研究会, SCE2016-6(2016-04), pp.31-35, 2016.
- [2] J. Fang, et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 12, no. 2, pp.1823-1827, 2002.
- [3] J. Lu, et al, Journal of Applied Physics, vol. 103, 064908, 2008.
- [4] R. A. Matula, J.phys. Chem. Ref. Data, vol. 8, pp. 1147-1298, 1979.

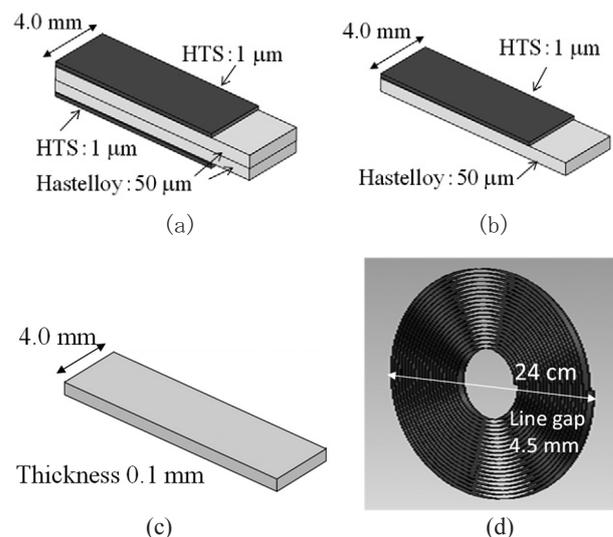


Fig. 1 (a) proposed wire, (b) conventional wire, (c) copper wire, and (d) designed coil.

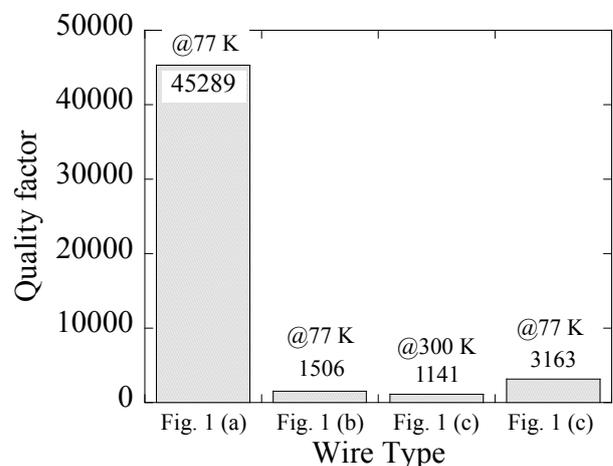


Fig. 2 Histogram of simulated quality factor.

自己焼結 *ex situ* 法 MgB₂ 線材の開発に向けた原料粉末の検討Investigation of starting MgB₂ powder for the development of self-sintered *ex situ* MgB₂ wires

中西 健太 (東京農工大学); 前田 穂 (物材機構); 山本 明保 (東京農工大学); 熊倉 浩明 (物材機構)
 NAKANISHI Kenta (TUAT); MAEDA Minoru (NIMS); YAMAMOTO Akiyasu (TUAT); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
 E-mail: s180397y@st.go.tuat.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体は金属系として最高の臨界温度 ($T_c = 39$ K) を持つため、冷凍機冷却による 20 K 近傍での応用が期待されている。MgB₂ 線材は金属シースの中に原料粉末を充填し、冷間加工を施して長尺化する PIT (Powder-In-Tube) 法や、IMD 法等により作製される。PIT 法には、原料に Mg と B の混合粉末を用いる *in situ* 法と、既成の MgB₂ 粉末を用いる *ex situ* 法がある。*in situ* 法では、Mg 熔融時に生じる空隙のため密度が 50% 程度と低くなる。一方、*ex situ* 法では *in situ* 法と比較して高密度で均一な組織が得られる可能性がある。*ex situ* 法 MgB₂ 線材の臨界電流密度 (J_c) の向上には、結晶粒間の結合性を高めること、原料粉末の粒表面に存在する絶縁不純物層を無くすることが重要な課題である。[1]

本研究では、表面不純物の少ない活性原料 MgB₂ 粉末を開発することにより、MgB₂ の自己焼結反応を促進させ、高い J_c を持つ *ex situ* 法 MgB₂ 線材を得ることを目的とした。作製した MgB₂ 原料粉末の特性を調査するため、まず *ex situ* 法 MgB₂ バルクを作製して超伝導特性を評価し、次いで *ex situ* 法 MgB₂ 線材の試作を行った。

2. 実験方法

原料 MgB₂ 粉末の作製 Mg と B を 1 : 2 のモル比で混合した粉末を、900°C で反応させることで原料 MgB₂ 粉末を作製した。
MgB₂ バルクの作製 *ex situ* PICT (Powder-In-Closed-Tube) 法により行った。SUS 管中に原料粉末を充填し、一軸プレスを行った後、熱処理 (900°C, 3 - 144 h) を施した。

MgB₂ 線材の試作 *ex situ* PIT 法により行った。Fe 管中に原料粉末を充填し、圧延・引き抜き加工を行うことで単芯テープ線材 (平線) と単芯ワイヤー線材 (丸線) を作製した。加工後、熱処理 (600 - 900°C, 24 h) を施した。

評価 体積と質量から試料の密度を、X 線回折により構成相と軸長を、SEM により微細組織を、SQUID VSM により磁化率、 T_c 、 J_c を、PPMS により電気抵抗率、臨界磁場、コネクティビティを評価した。線材については I_c 測定を行った。

3. 結果と考察

XRD パターン (Fig.1) より、作製した原料 MgB₂ 粉末はほぼ単相の MgB₂ であることがわかった。この原料粉末を用いて作製した多結晶バルク体の電気抵抗率の温度依存性を Fig. 2 に示す。高い $T_c = 38.7$ K とシャープな転移がみられたほか (Fig.2 内挿図)、長時間の熱処理により、電気抵抗率から見積もられるコネクティビティが 20.9% まで向上した。20 K における J_c の磁場依存性を Fig. 3 に示す。 J_c も熱処理時間とともに向上したことから、MgB₂ の自己焼結が進行し、結晶粒間の結合性が改善したことが示唆される。

次に、*ex situ* PIT 法により Fe をシース材として MgB₂ 線材を試作した。加工後の微細組織観察から、断線が生じることなく加工できたことを確認した。900°C で熱処理を施した線材から取り出した MgB₂ コアに対して、電気抵抗率測定により評価したコネクティビティは 21.0% と高く、磁化測定により評価した J_c は 9.7×10^5 A/cm² に達した。線材の輸送 I_c 測定結果は当日報告する。

4. まとめ

自己焼結 *ex situ* 法による MgB₂ 線材の作製に向け、不純物の少ない原料 MgB₂ 粉末を作製した。自製粉末を使用した *ex situ* 法によるバルク・線材では、900°C での熱処理によって自己焼結が進行し、高いコネクティビティと J_c が得られた。

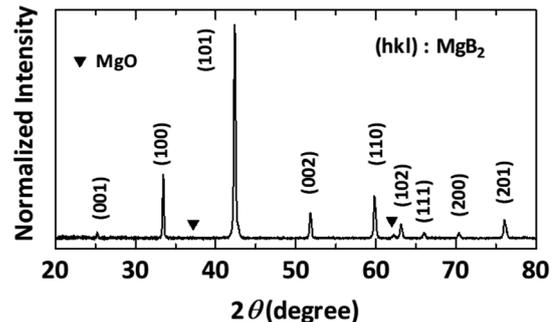


Fig.1 XRD pattern for the synthesized MgB₂ powder.

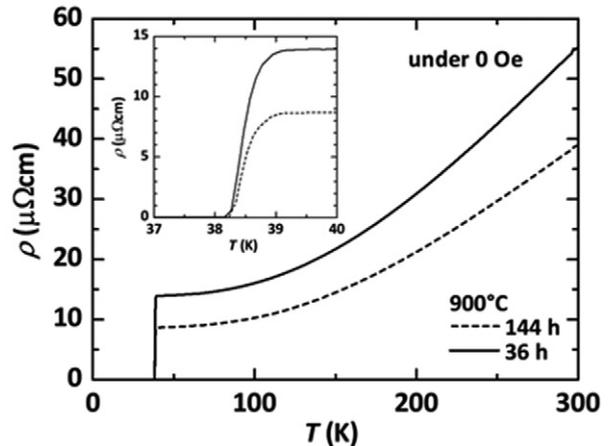


Fig.2 Temperature dependence of electrical resistivity ρ for the MgB₂ bulks. Inset shows transitions near T_c .

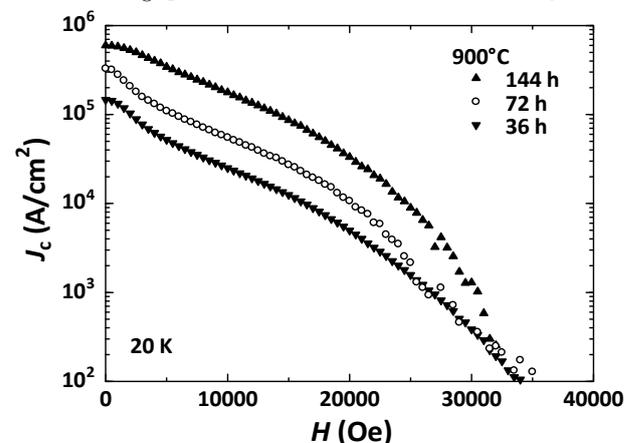


Fig.3 Magnetic field dependence of critical current density J_c at 20 K for the MgB₂ bulks with different sintering time.

参考文献

1. H. Tanaka *et al.*, *Superconductor Science and Technology*, vol. 25 (2012), 115022

MgB₂C₂を炭素源に用いた MgB₂バルクの微細組織と物性

Microstructure and Physical Properties of MgB₂ Bulks using MgB₂C₂ as Carbon Source

澤田 百々子, 高木 菜摘, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 児玉 一宗, 田中 秀樹 (日立)
 SAWADA Momoko, TAKAGI Natsumi, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);
 KODAMA Motomune, TANAKA Hideki (Hitachi)
 E-mail: c5617051@aoyama.jp

1. はじめに

MgB₂は無配向の多結晶でも 10⁵ A/cm²を超える高い J_c を示すが、磁場下で急激に減衰することが課題である。MgB₂多結晶では結晶粒界が主なピンニングサイトであり、磁場中 J_c の改善方法としては結晶粒の微細化や粒成長の抑制^[1]、B サイトへのC ドープ^[2]が知られている。しかし、C の実効置換量は仕込組成より少ないことが多く、粒間結合の劣化や未反応不純物の残存を伴いやすい。すなわち、超伝導特性や微細組織は炭素材料の反応性によって大きく変化することから、ドープ量や焼成条件の最適化だけでなく、炭素材料の選択が磁場下での J_c の改善に重要である。炭素源として SiC やコロネンなどの炭化水素を用いた研究例が多いが、必ず副生成物が生じる。そこで、我々は Mg-B-C 系に着目しており、MgB₂と似た結晶構造を持つ MgB₂C₂や高濃度C ドープ MgB₂を新たな炭素源として用いることで磁場中 J_c の向上を試みている。従来 MgB₂C₂は 1000°C 以上の高温高圧力下で生成する物質と考えられていたが、MgB₂と同様に PIT 法により常圧下で焼成することで純度はやや低いものの MgB₂C₂が合成できることを見出し、報告してきた^[3]。今回は、炭素源としてドープした際に大きい実効置換量を得られるようにさらに純度の高い MgB₂C₂の合成を目指した。

2. 実験方法

本研究では、Mg、B および炭素原料の粉末を混合し焼成する *in-situ* 法により MgB_{2-x}C_x ($x = 0-0.06$)バルクを作製し超伝導特性を比較した。具体的には上記の混合粉末を SUS316 管に充填後、両端を封じ、一軸プレスにより板状に成型し、石英管に空气中で封入し 750–850°C、12–24 h の様々な条件で焼成を行った。炭素源には MgB₂C₂や予め合成した高濃度C ドープ MgB₂を用い、比較として研究例の多い B₄C や微粒子 C (カーボンブラック)を用いた試料も作製した。試料の微細組織と元素分布は SEM-EPMA により調べ、構成相や格子定数、結晶性は粉末 XRD 測定により、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定と交流四端子法による抵抗率測定を行い評価した。また試料の実効C置換量 x_A を以下の式を用いて算出した^[4]。

$$x_A = 47.6 \times (0.3087 - a) \quad a \text{ [nm]}; \text{ 試料の } a \text{ 軸長}$$

3. 結果と考察

前回報告した MgB₂C₂ ドープ MgB₂は実効C置換量がやや少なく本質的な炭素原料としての有効性が議論できなかった。そこで今回は MgB₂C₂を 1050°C、40 h 焼成で作製し未反応のアモルファス B 及び C の低減を試みた。作製した MgB₂C₂の粉末 XRD パターンを Fig. 1 に、微細組織を Fig. 2 に示す。比較的高温の焼成であっても 0.5 μm 程度の微細な粉末が得られた。この MgB₂C₂添加したC ドープ MgB₂の J_c の磁場依存性を他の炭素源を用いて作製し

た試料と併せて Fig. 3 に示す。MgB₂C₂添加試料はC ドープによる低磁場の J_c の低下が少ないことが特徴である。

当日は *ex-situ* 法 MgB₂バルクにおける MgB₂C₂の反応性についても報告する。

参考文献

- [1] R.M. Scanlan *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **46** (1975) 2244-2249.
- [2] S.X. Dou *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 3419-3422.
- [3] M. Sawada *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference*, **95** (2017) 176.
- [4] A. Yamamoto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 1323-1328.

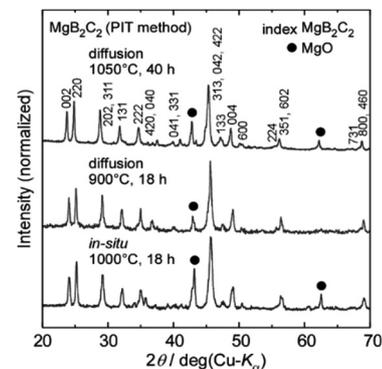


Fig. 1 Powder XRD patterns of MgB₂C₂ synthesized under various conditions.

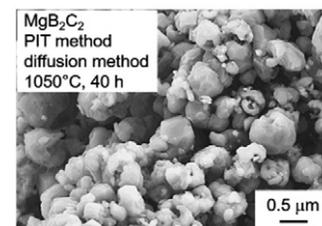


Fig. 2 Secondary electron image of MgB₂C₂ powder.

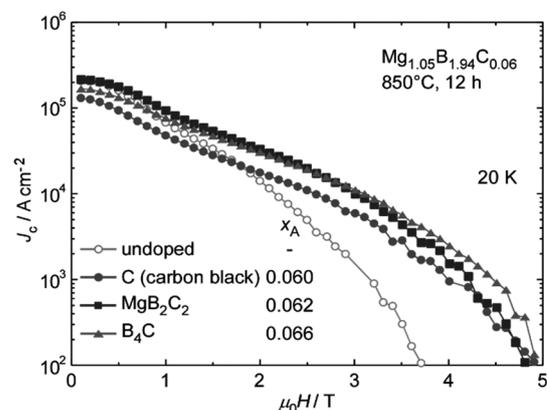


Fig. 3 J_c - H curves at 20 K of MgB_{1.94}C_{0.06} bulks prepared from various carbon sources.

Premix-PICT-Diffusion 法度密高MgB₂バルクの結晶サイズ制御

Control of crystal size of dense MgB₂ bulks prepared by Premix-PICT-Diffusion method

高木 菜摘, 澤田 百々子, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 児玉 一宗, 田中 秀樹 (日立)

TAKAGI Natsumi, SAWADA Momoko, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

KODAMA Motomune, TANAKA Hideki (Hitachi)

E-mail: c5617053@aoyama.jp

1. 緒言

MgB₂ は合成が比較的容易で化学的に安定で、さらに粒間の結合に本質的に優れるなどの長所を持ち、その線材はMRI、磁気浮上列車用の磁石や送電などへの応用が期待されているが、MgB₂ 材料の広範な応用に対しては特に磁場中の臨界電流特性の改善が不可欠である。一方、基礎的なMgB₂ 多結晶体の臨界電流特性を決定する様々な複合的な因子の理解も十分ではない。無配向 MgB₂ 多結晶体の臨界電流特性の主な支配因子は、純度、充填率、粒界密度であり、充填率が100%に近い粒間結合に優れる多結晶体の作製にはBとMgB₂の混合粉末の圧粉体にMgを拡散させるPremix-PICT 拡散法[1]が適している。またMgB₂における主なピンニングセンターは結晶粒界であり、粒界の高密度化には微細な原料 B 粉末の使用や低温焼成による粒成長の抑制が有効で、C ドープは粒界のピンニング力を高める。本研究では、Premix-PICT 拡散法による高密度 MgB₂ バルクの粒径分布、即ち粒界密度と焼成条件、および超伝導特性の関係を粒成長阻害不純物の添加を含めて系統的に調べ、臨界電流特性に及ぼす支配因子を再考している。

2. 実験方法

Premix-PICT 拡散法を用い混合粉末中の MgB₂ : B = 1 : 3 で充填率~90%を超える高密度 MgB₂ バルクを様々な焼成条件下で作製した。まず、あらかじめBと混合するMgB₂はPICT 拡散法[2]により合成した。これとBの混合比を系統的に変えた混合粉末の圧粉体とMg(#200 および 粒径1 mm)をSUS316管内に封入し、さらに石英管に封入し熱処理を行った。PICT 拡散法でのPremixするMgB₂の合成、およびPremix-PICT 拡散法での高密度MgB₂バルクに対するプレアニールは、最終的に得られるMgB₂バルクに含まれるMgOを減らすことを目的として行ったものである。また炭素源にMgB₂C₂を用い、Premix-PICT 拡散法によりMgB_{2-x}C_x (x=0-0.06)バルクを作製した。得られた試料の微細組織はSEMにより観察し、超伝導特性はSQUID 磁束計による磁化測定により評価した。

3. 結果と考察

充填率~50%の *in-situ* 法を用いた MgB₂ バルクでは最大ピンニング力密度は粒径の逆数と比例することが知られていることから、本研究の充填率>90%の高密度 MgB₂ バルクにおいても同様な傾向を予想したが、Fig. 1 に示すように明瞭な粒径依存性はみられなかった。

Fig. 2 に MgB₂C₂ を炭素源として作製した試料の 20 K における $J_c - H$ 特性を示す。混合粉末を MgB₂ : B = 1 : y とした。混合粉末において MgB₂ 粉末の割合が少ないほど J_c 特性が改善することがわかった。一連の結果は拡散反応で生成した MgB₂ が主に高い J_c を担う強い粒間結合を作るこ

とを示唆している。 J_c の顕著な改善はこれまでのところないが、 J_c の再現性は良く、また、高密度 MgB₂ バルクにおける C ドープによる高磁場下の J_c は向上した。これら試料の研磨面における微細組織の解析より求めた粒界密度と焼成条件および最大ピンニング力密度の関係について報告する。

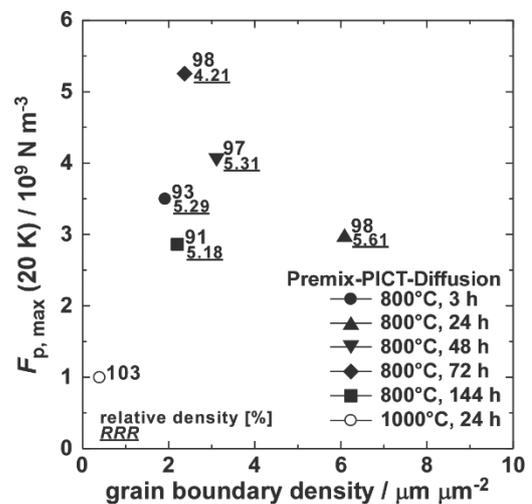


Fig. 1 Relationship between grain boundary density and $F_{p,max}$ (20 K). Closed symbols represent samples pre-annealed at 650°C for 12 h.

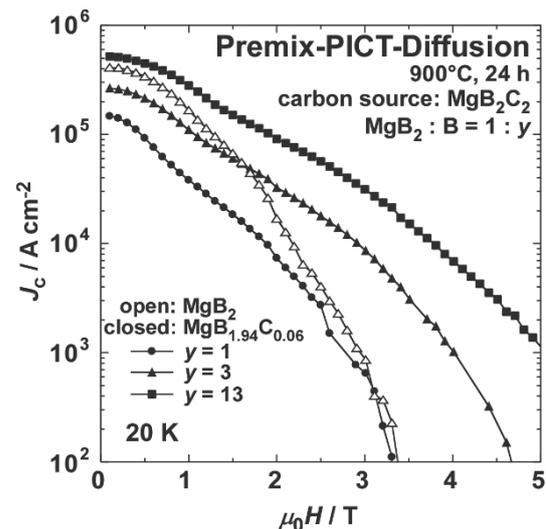


Fig. 2 $J_c - H$ curves at 20 K of MgB_{1.94}C_{0.06} bulks using MgB₂C₂ as carbon source.

参考文献

- [1] I. Iwayama, *et al.*, *Physica C* **460-462** (2007) 581-582.
 [2] S. Ueda *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 222502.

メカニカルミル法 MgB₂ 単芯線材におけるカセットロール加工とコロネン添加の効果

Effect of cassette rolling and coronene addition in monocore MgB₂ wires fabricated from mechanically milled powder

尻玉 一宗, 小瀧 博司, 鈴木 孝明, 田中 秀樹(日立); 西島 元, 松本 明善(NIMS);
山本 明保(東京農工大); 下山 淳一(青学大)

KODAMA Motomune, KOTAKI Hiroshi, SUZUKI Takaaki, TANAKA Hideki (Hitachi);
NISHIJIMA Gen, MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS);

YAMAMOTO Akiyasu (Tokyo Univ. of Agriculture and Tech.); SIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: motomune.kodama.yf@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂超電導線材の最も標準的な製法である *in situ* 法の次世代製法として、我々はメカニカルミル法の開発を進めている。メカニカルミル法では、ホウ素粒子がマグネシウム母相に分散した構造の前駆体粒子を遊星ミルにより合成し、それを充填した金属管を冷間加工により伸線する。我々はこれまで、この前駆体粒子を冷間加工により十分に变形させることで標準的な *in situ* 法線材よりも粉末充填率が高まり、高密度な MgB₂ が生成して臨界電流密度 (J_c) が高まることを報告した[1]。しかしながら、この前駆体粒子の变形は容易ではなく、その微細組織は冷間加工の方法や添加材の有無に大きく依存する。本研究では、メカニカルミル法による線材に対して、冷間加工方法とコロネン添加量がその微細組織と電流特性に与える影響を調べることを目的とする。

2. 研究方法

Mg 粉末 (99.8%, <200 mesh), B 粉末 (98.5 %, <350 nm), C₂₄H₁₂ 粉末 (>83%, 粉末状) を, Mg: B: C₂₄H₁₂ = 1: 2(1-x): x/12 に対して $x = 0, 0.02, 0.03$ のモル比で遊星ミル混合し, 前駆体粉末を合成した。前駆体粉末をベレット化し, 外径 18.0 mm, 内径 13.5 mm の Fe 管に充填後, 線径 0.5 mm まで冷間加工した。冷間加工方法は, 全工程を引抜加工, 引抜加工からカセットロール加工に線径 0.8 mm で切替えの二通りとした。Table 1 に作製した線材の諸元を示す。これらの線材を約 100 mm の長さで切断後, MgB₂ を生成させるために, 温度 600–700°C, 時間 3 h の条件で熱処理した。これらの試料に対し, 温度 10–20 K (He ガスフローとヒーターで制御), 磁場 3–10 T (電流方向に垂直) の条件下で直流四端子法により電流電圧曲線を取得し, 1 $\mu\text{V cm}^{-1}$ の電界基準で定義した臨界電流を線材横断面における MgB₂ フィラメント面積で除して, J_c を算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に, 温度 10 K と 20 K における J_c の外部磁場 (B) に対する依存性を示す。MMD-0% と MMDC-0% を比較すると, MMDC-0% の方が高い J_c をもつことから, カセットロール加工がメカニカルミル法線材の J_c 改善に有効であることがわかる。微細組織観察の結果から, この J_c の改善は, カセットロール加工が前駆体粒子の变形を促進して粒子同士の結合性を高め, 熱処理後に長手方向に良好な連続性をもつ MgB₂ フィラメントが形成されるためであることがわかった。

Table 1. Specifications of wires.

Specimen	Composition	Wire processing method
MMD-0%	$x = 0$	Drawing
MMDC-0%	$x = 0$	Drawing & cassette rolling
MMDC-2%	$x = 0.02$	Drawing & cassette rolling
MMDC-3%	$x = 0.03$	Drawing & cassette rolling

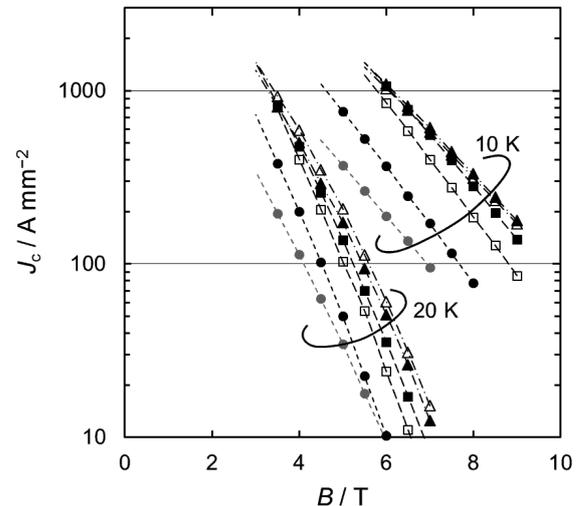


Fig.1 Dependence of critical current density, J_c , on external magnetic field, B . Gray circle, black circle, squares, and triangles are results of MMD-0%, MMDC-0%, MMDC-2%, and MMDC-3%, respectively. Solid and open symbols are results of samples heat-treated at 600°C 3 h and 700°C 3 h, respectively.

MMDC-0%, -2%, -3%を比較すると, C₂₄H₁₂ 添加により広い磁場領域で J_c の改善が認められる。一般によく知られるように, MgB₂ に炭素を含有する材料を添加すると, ホウ素サイトの炭素置換により MgB₂ の結晶に構造歪が導入され, キャリアの平均自由工程の短縮により上部臨界磁場 (B_{c2}) が高まり, J_c が改善する[2]。一方, 微細組織観察と MgB₂ フィラメントの輸送特性測定の結果から, MMDC-2%では, C₂₄H₁₂ 添加により炭素置換にともなう B_{c2} の向上だけでなく, 前駆体粒子の变形が促進されて MgB₂ フィラメントの長手方向の連続性が改善しており, J_c の改善はこれらの相乗効果によるものであることがわかった。

講演では, 微細組織観察と MgB₂ フィラメントの輸送特性の結果も併せて報告し, 前述したカセットロール加工と C₂₄H₁₂ 添加による J_c の改善機構の詳細な議論とともに, 今回作製したメカニカルミル法線材と標準的な *in situ* 法線材との比較を行う。

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォームに参画する東京大学微細構造解析プラットフォームの支援を受けて実施されました。

参考文献

- M. Kodama et al.: *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 30 (2017) 044006
- T. Masui et al.: *Phys. Rev. B* Vol. 70 (2004) 024504

内部 Mg 拡散法による銅被覆高安定度 MgB₂ 線材の開発 (II)

Development of Cu sheathed high stability MgB₂ wires by internal Mg diffusion method

熊倉 浩明, 張 雲超, 瀧川 博幸 (物質・材料研究機構)
 KUMAKURA Hiroaki, ZHANG Yunchao, TAKIGAWA Hiroyuki (NIMS)
 E-mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

MgB₂ 線材を作製する方法の一つである内部 Mg 拡散 (IMD) 法は、金属管の中心に Mg 棒を配置し、Mg 棒と金属管の隙間に B 粉末を密に充填した後に、線材加工と熱処理を行うもので、通常のパウダー・イン・チューブ (PIT) 法に比べてはるかに高い MgB₂ の充填率が得られ、これによって優れた臨界電流特性を得ることが可能になる。これまでに、高い安定性を確保するためにシース材として純銅を選び、バリア材としては純鉄を用いることで 100m 級の単芯ならびに 7 芯の無添加 MgB₂ 線材の作製に成功しており、臨界電流特性やその長手方向のパラツキについて報告した。MgB₂ 線材においては、炭素や炭素化合物を添加して J_c 特性を改善させるのが一般的である。我々はこれまでにコロネン (C₂₄H₁₂) 等の芳香族炭化水素の添加が特性の向上に有効であることを示してきた。そこで今回は、C₂₄H₁₂ を添加した 100m 級線材を作製し、線材の断面構造や臨界電流特性を評価した。

2. 線材の作製

内径 20.5mm、外径 30mm の純銅管にバリア材として肉厚 1.5-2.0mm の鉄パイプを挿入し、この中心に径 11mm の純 Mg 棒を配置した後、鉄パイプと Mg 棒の隙間に C₂₄H₁₂ をカーボン量として 10mol% 添加したアモルファス B 粉末を充填した。このピレットを最初にスウェッジ加工により径 13mm にまで縮径し、その後溝ロール圧延にて径 6mm にまで加工した。最後にカセットローラーダイスにより径 1mm のワイヤーに加工した。最終的な線材長は約 120m である。加工の途中において数回のアニール (500°C × 1 時間) を施した。これらの線材から長さが 1m の線材を切り出し、ゴールドファーネスにて 600-650°C で 1-20 時間の熱処理を行った。Fig.1 に熱処理後の線材断面を示す。鉄バリア材の初期の厚みが 2.0mm (左)、1.5mm (右) いずれの場合もバリア材の破れ等は認められず 100m 線材に加工できることがわかった。この 1m 長線材から短尺線材を複数本切り出し、4.2K、磁界中で I_c 測定を行った。

3. 結果

Fig.2 に、今回の C₂₄H₁₂ 添加した線材の $I_c(J_e)$ - B 特性を、以前に報告した無添加線材の特性と比較して示す。C₂₄H₁₂ 添加した線材では、C₂₄H₁₂ の分解温度以上に熱処理温度を上げる必要があり、熱処理温度は無添加線材に比べて高くする必要がある。無添加線材に比べて C₂₄H₁₂ 添加した線材では高磁界での特性が大幅に改善していることがわかる。これはこれまで報告してきた短尺 MgB₂ 線材と同様に C₂₄H₁₂ が炭素源となって MgB₂ の B サイトの炭素置換が一部分で起きたためと考えられる。1.5mm 厚バリア材を用いた線材ではバリア材が薄い分だけ MgB₂ の層厚を増加させることが可能となり、より高い $I_c(J_e)$ を得ることが出来る。

IMD 法線材では、Mg の拡散が MgB₂ 生成の重要な因子となるので、一般的に IMD 線材の I_c は PIT 線材よりも熱処理条件に敏感である。Fig.3 には 1.5mm 厚バリア材を用いた線材について、熱処理条件による $I_c(J_e)$ の変化の例を示す。高温・短時間の熱処理よりも、比較的低温で長時間熱処理を行った方が I_c が高まる傾向にある。これは低温で熱処理をした方が MgB₂ 結晶粒の粗大化が抑制されるためと考えられる。

当日は、100m 級の C₂₄H₁₂ 添加 IMD 線材の I_c のパラツキにも言及する予定である。

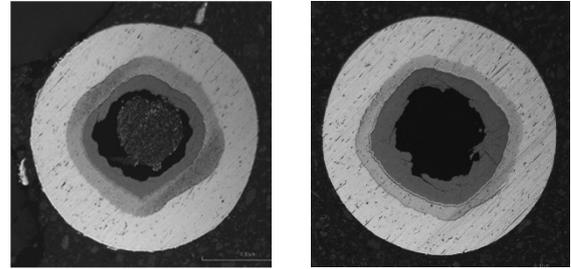


Fig.1 Cu-stabilized mono-filamentary IMD MgB₂ wires with different barrier thickness(after the heat treatment).

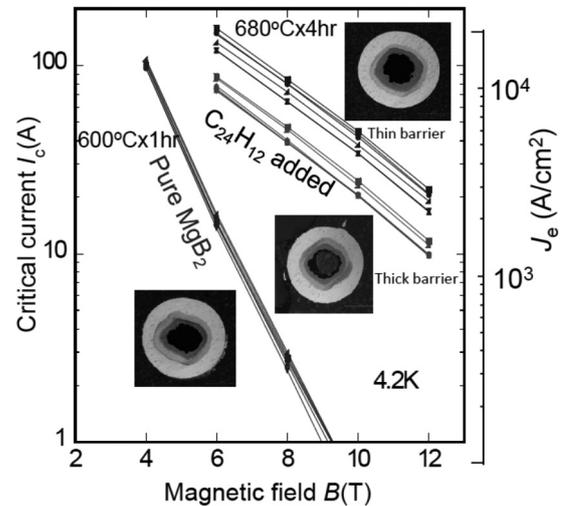


Fig.2 $I_c(J_e)$ - B curves of short wires cut from 100m long IMD MgB₂/Cu wires.

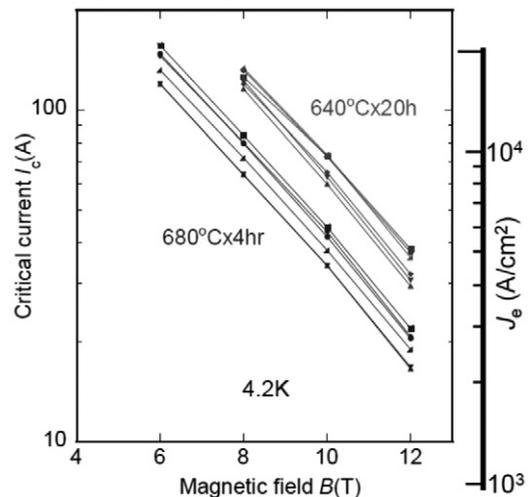


Fig.3 $I_c(J_e)$ - B curves of IMD MgB₂/Cu wires heat treated at different conditions.

謝辞: 本研究は JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の助成を受けて実施したものです。