

13 T-700 mm大口径マグネットのクエンチ保護回路 Quench Protection System for A 13 T superconducting magnets with a 700 mm bore.

今川 信作, 力石 浩孝, 尾花 哲浩, 高田 卓, 柳 長門 (NIFS)
 IMAGAWA Shinsaku, CHIKARAISHI Hirotaka, OBANA Tetsuhiro, TAKADA Suguru, YANAGI Nagato (NIFS)
 E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

実使用条件に近い電磁力下での試験環境を実現するため、コイル形状の大電流導体サンプルの超伝導特性を評価できるような導体試験設備の整備を進めている[1, 2]。外部磁場発生用に、最高磁場 13 T、内径 700 mm の大口径マグネットを製作した。長手方向に2分割で、各々は内側から3つの Nb₃Sn コイルと3つの NbTi コイルで構成されており、さらに内側にインサートコイルを追加することにより、内径 600 mm で最大磁場 15 T に増強可能な設計となっている。この大口径マグネットのクエンチ保護シナリオと保護回路の設計検討について報告する。

2. クエンチ保護回路の設計思想

外部磁場発生用の大口径マグネットは、軽量化のため浸漬冷却の密巻コイルとし、製造実績のある範囲で大断面の Nb₃Sn 矩形導体 (3.2 mm×2.1 mm, ガラス編組絶縁) と NbTi 矩形導体 (4.0 mm×2.0 mm, ホルマール絶縁) を選定した。蓄積磁気エネルギーは、13 T-700 mm (運転電流 765 A) の場合でも 34.5 MJ と大きいため、クエンチ保護は外部抵抗方式を選択した。Nb₃Sn コイルは、絶縁施工の制約から、層間電圧を 147 V 以下、対地電圧を 1,500 V 以下とすることを設計条件とした。

これらの条件において、できるだけ高い電流密度を実現するため、Nb₃Sn 線材の銅比を 0.9 に下げ、NbTi 線材の銅比を 2.2 に高め、別々の時定数で遮断する設計とした。さらに Nb₃Sn コイルの対地電圧を下げるため、上コイルと下コイルの間に保護抵抗の一部を直列に接続する設計とした。その結果、直流遮断器の必要数が増えたため、15 T に増強する際の拡張性も考慮して、汎用の 1 kV-800 A 直流遮断器を採用することを検討した。図2に示すように、保護抵抗を 1.2 Ω 以下に分割して各々に並列に直流遮断器を配置し、また、Nb₃Sn コイルと NbTi コイルの切り離し遮断器 B と接地の間の抵抗を 0.6 Ω 以下にすることにより、遮断器の最大電圧は 1 kV 以下となる。通常時は全ての遮断器が閉となっており、遮断時には、まず、遮断器 A (2台) と遮断器 B を開とし、電源およびコイル間を切り離してから、各保護抵抗と並列の遮断器を開とする動作シナリオを計画している。ダイオードの代わりに電源電圧 (60 V) 以上で ON となるギャップスイッチを採用できれば、減磁の際に 0.6 Ω の保護抵抗に電流が流れることを回避できるが、新たに開発が必要なため、今回はダイオードを採用する予定である。なお、クエンチ検出は、Nb₃Sn コイルと NbTi コイルを別々に判別し、各々の上コイル3つと下コイル3つのバランス電圧を利用する。

3. 温度解析

最大磁場 13 T からの遮断の場合の温度上昇をホットスポットモデルで計算した結果を図3に示す。電流減衰には保護回路の抵抗のみを考慮した計算であり、この場合の到達温度は、Nb₃Sn コイルが 204 K、NbTi コイルが 226 K となる。現在、常伝導伝播の効果を考慮できる簡易計算プログラムを構築中であり、また、隣接導体への伝熱による冷却効果を取り込むことも検討中である。遮断器の誤動作の場合の温度上昇については、改良したプログラムを用いて評価する予定である。

参考文献

1. S. Imagawa et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.134.
2. S. Imagawa et al.: Plasma and Fusion Research, Vol. 10 (2015) 3405012.

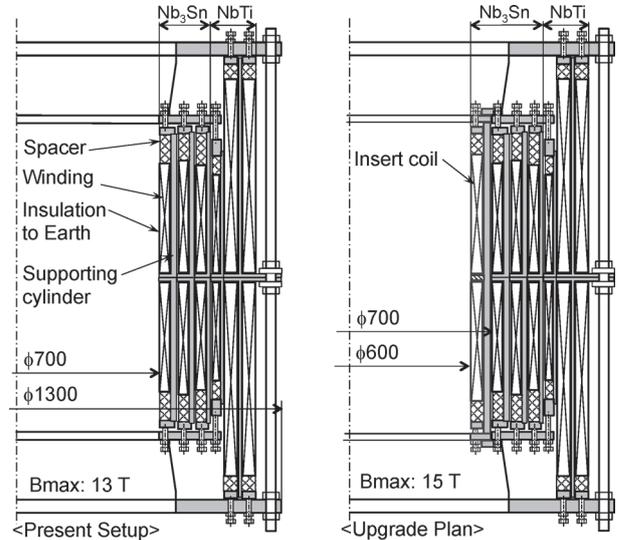


Fig. 1. Cross-section of the external field coils. The highest field can be upgraded to 15 T by adding an insert coil.

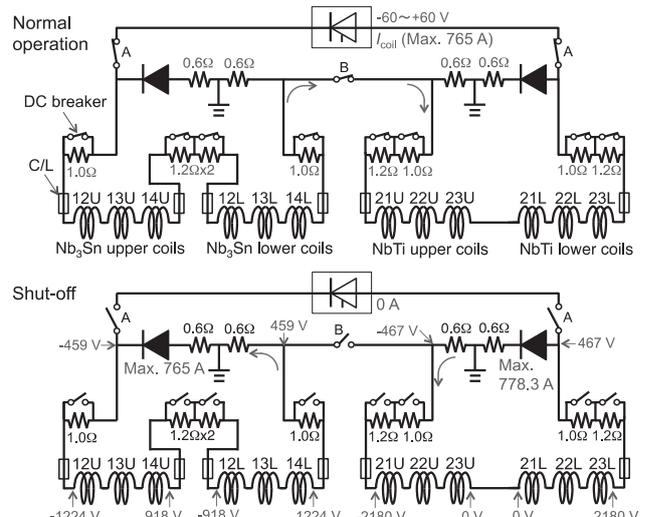


Fig. 2. Quench protection circuit for the 13 T-700 mm setup.

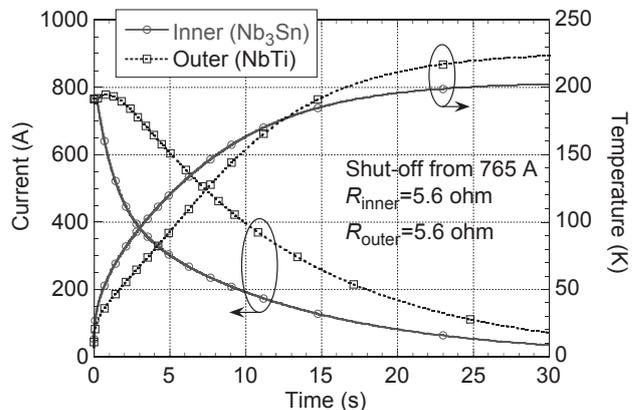


Fig. 3. Calculated currents and temperatures during shut off at 13 T-700 mm set-up with a hot-spot model. The delay of shut off from the transition to normal state is set at 0.2 s.

DI-BSCCO コイルのクエンチ保護(4)

Quench protection of DI-BSCCO coil (4)

山口 貴寛, 上野 栄作, 加藤 武志, 林 和彦(住友電工)

YAMAGUCHI Takahiro, UENO Eisaku, KATO Takeshi, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries)

E-mail: yamaguchi-takahiro1@sei.co.jp

1. はじめに

高温超電導線は常電導伝搬速度が \sim cm/s と非常に遅いため、ホットスポットが発生し劣化することが懸念されている。その保護のためには、異常を検知した際、通電電流を速やかに下げることが必要とである。しかしながら、20MW 級の大出力回転機ではコイルのインダクタンスが非常に大きく、電流減衰時定数を短くするには保護抵抗値を大きくし、コイル及びモータ内配線を高耐電圧化しなければならず、クエンチ検出・保護するための条件の最適化が必要である。我々は、2014 年度秋季に大出力回転機(20MW 機)用コイルの1極を模擬した実機サイズのコイルで、通電電流 200A とし、電流減衰時定数とクエンチ検出電圧をパラメータとし、コイルを劣化させずにクエンチ検出・保護できる条件を発表した(2014 年度秋季 3A-a03)。今回は、その実機サイズのコイルと発生磁界を同等とした小コイルで、熱伝達向上のため磁性体のフランジを用い、通電電流を 200A としたときのクエンチ検出・保護できる条件を調査したので、その結果について報告する。

2. 実験に使用した小コイルの諸元

実験に使用した小コイルは DI-BSCCO 線材(Type Hi)を用いて作製されており、Fig.1 に示すように円形のダブルパンケークコイル(エポキシ含浸済み)4個から構成されており、各コイル間、コイル-フランジ間には冷却用の銅板が挟みこまれている。冷却方法は伝導冷却とし、冷凍機の 2nd ステージから冷却パスを伸ばし、コイル上下と接続することにより、コイル上下方向から冷却する構造とした。

3. 実験方法

通電電流は 200 A、クエンチ検出はバランス回路を用い、クエンチ検出時間を 0.1s に固定した。クエンチはコイル温度を徐々に上昇させることで発生させた。ただし、保護抵抗による電流減衰ではなく、電流源を波形発生器で外部制御し、強制的に指数関数で電流減衰させる方法とした。そのときの電流減衰時定数とクエンチ検出電圧を変化させることにより、コイルの劣化の有無を調査した。

4. 実験結果

Fig.2 と Fig.3 に実験データの一例として通電電流 200A、電流減衰時定数 20 sec、クエンチ検出電圧 0.12 V での電圧と温度を示す。このときの電流遮断時の発熱は 54W であり、コイルに劣化が認められた。Fig.4 は横軸に電流減衰時定数、縦軸をコイルが劣化したクエンチ検出電圧での電流遮断時の発熱としたグラフであり、200A 通電時の非磁性フランジと磁性フランジの比較を示している。詳細は講演当日に報告する。

5. まとめ

今回の実験で用いたコイルでのクエンチ保護可能な電流減衰時定数とクエンチ検出電圧との関係を示した。また、今回の実験結果によると、電流減衰時定数が 20s のとき、磁性フランジの電磁力による吸引によって熱伝達向上が認められ、非磁性フランジと比較して 1.6 倍もの高い発熱であってもクエンチ保護可能であった。

謝辞

本研究は研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。

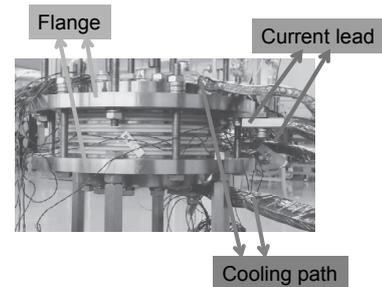


Fig.1 HTS coil

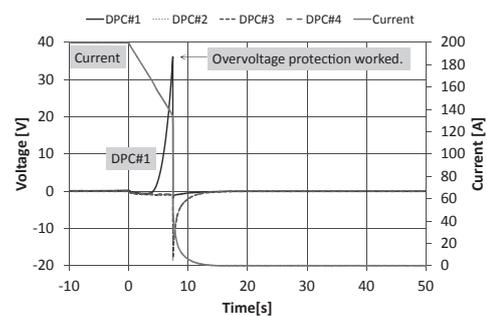


Fig.2 Voltage shift at detecting voltage 0.12 V and decay time constant 20 s (magnetic flange)

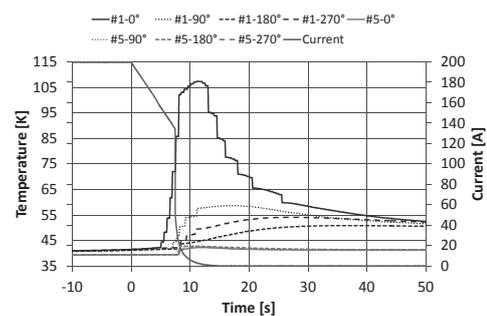


Fig.3 Temperature shift at detecting voltage 0.12 V and decay time constant 20 s (magnetic flange)

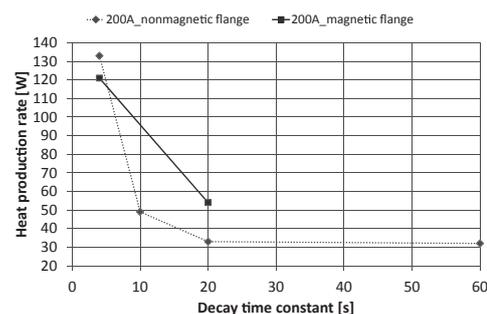


Fig.4 Decay time constant vs heat production rate with degradation

液体水素冷却での高温超電導コイルの熱伝播特性の評価

Numerical stability analysis of an immersion cooled high temperature superconducting coil in liquid hydrogen

佐々木 大樹, 中山 知紀, 石田 政義, 花田 信子(筑波大学)

SASAKI Daiki, NAKAYAMA Tomonori, ISHIDA Masayoshi, HANADA Nobuko (University of Tsukuba)

Email: s1520887@u.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

超電導機器を利用する際、擾乱の発生により局所的常電導遷移が生じる可能性がある。これまでに Bi 系高温超電導(HTS)コイルを液体水素で冷却すると、液体ヘリウムを冷媒として用いた場合と比べ、熱的な安定性が向上することが示されている[1]。しかし、これは HTS テープ線材の長手方向の熱伝導を取り扱ったものであり、パンケーキ状に密に巻かれた HTS コイルでは線材長手方向だけでなく、積層した線材間の熱伝導も考慮して詳細な検討を行う必要がある。本研究では半径方向の材料の厚みを含めたシングルパンケーキコイルの解析モデルを作成し、擾乱が生じた際のコイルの温度分布を解析した。

2. 超電導コイルの解析式・解析モデル

Fig. 1 にシングルパンケーキコイルの解析モデルを示す。Fig. 1 に示すように、コイルを含浸する際に用いるエポキシ樹脂、補強材である SUS 線、絶縁層であるポリイミド間の熱伝導を考慮した。コイルに適用する HTS テープ線材は住友電気工業株式会社で市販されている DI-BSCCO type HT-SS[2]とした。また、コイルの緒元を Table 1 に示す。式(1)に本モデルの熱伝播を計算するための非定常二次元熱伝導方程式を示す。

$$\gamma C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_r(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k_\theta(T) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + G(T, I_{op}) - Q(T) + G_d \quad (1)$$

コイルの長手方向、半径方向の熱伝導項をフーリエの法則を用いて表わし、温度上昇の項を温度に関する積分値、ジュール発熱量と冷却熱量を温度の関数とした。ここで t は擾乱発生からの時間 [s], k_θ は各材料の周方向の熱伝導率 [W/(m·K)], k_r は各材料の半径方向の熱伝導率 [W/(m·K)], θ はコイルの解析点同士のコイル中心からの角度 [rad], r は中心から解析点までの距離 [m], γ は各材料の密度 [kg/m³], C は各材料の比熱 [W/(kg·K)], I_{op} は運転電流値 [A], Q は単位時間当たりの冷媒による冷却熱量 [W/m³], G は単位時間当たりの Bi-2223 線材の通電によるジュール発熱量 [W/m³], G_d は単位時間あたりの熱擾乱の熱量 [W/m³]である。コイルの冷却は上面と側面で冷媒が接するとした。さらにコイルが発生する磁場および HTS テープ線の I_c - B - T 特性を考慮し計算を行った。

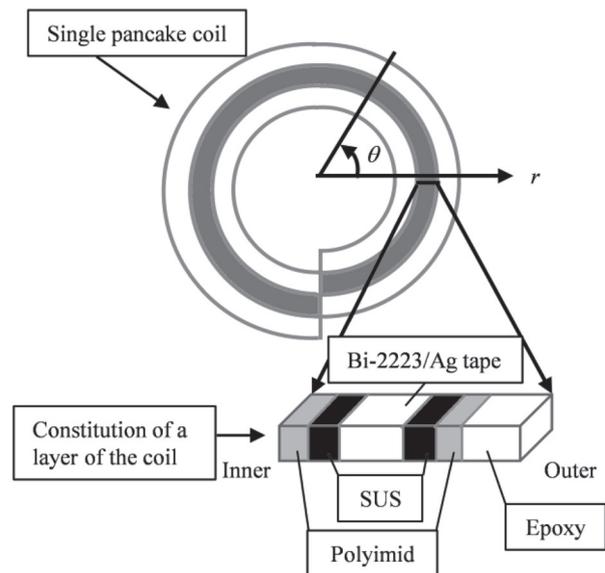


Fig. 1 Analytical model of a single pancake coil.

Table 1 A HTS coil parameters

Height (m)	0.0043
Radius (inner) (m)	0.0499
Radius (outer) (m)	0.3824
Number of turns	500
Operating current (A)	500
Magnetic field (T)	0.99665

3. 解析条件

擾乱の値として、含浸材の割れによる 1.5×10^5 [J/m³] を用いて解析を行った。冷媒として液体水素と超電導機器に多く用いられている液体ヘリウムを比較し、冷媒による熱伝播の違いについて考察した。

参考文献

- [1] T. Nakayama, et al.; "Stability analysis of high temperature superconducting coil in liquid hydrogen" Physica C 463-465 (2007) pp. 1285-1288
- [2] 住友電気工業株式会社, "DI-BSCCO Type HT-SS" Available: http://www.sei.co.jp/super/hts/type_ht.html (accessed 2015, April)

無絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける局所的常電導転移の検出法

Detection Method of Local Normal-State Transition in No-Insulation REBCO Pancake Coil

賈 昀昊, 王 韜, 池田 愛花, 大木 隆宏, 石山 敦士(早大); 野口 聡, 門馬 克敏(北大);
渡辺 智則, 長屋 重夫(中部電力)

Jia Yunhao, Wang Tao, Ikeda Aika, Ohki Takahiro, Ishiyama Atsushi (Waseda University);
Noguchi So, Monma Katsutoshi (Hokkaido University); Watanabe Tomonori, Nagaya Shigeo (Chubu Electric Power)
E-mail: michealwang@aoni.waseda.jp

1. はじめに

高温超電導コイルは、従来の低温金属系コイルに比べ熱擾乱に対する熱的安定性は高いが、何らかの要因によって局所的常電導転移が起こる可能性を無視することはできない。近年、高電流密度の下に高熱的安定性を有する無絶縁 REBCO 高温超電導コイル(以下:無絶縁コイル)が注目されている。無絶縁コイルは、局所的常電導転移が発生すると、電流が隣接の巻線に迂回することにより、ホットスポットができにくく、従来の高温超電導コイルのような熱暴走が起りにくいと言われている。しかし、無絶縁コイルにおいては、局所的常電導転移発生時の電流パスが複雑となるため、新たな局所的常電導転移の検出法の確立が不可欠となる。そこで、我々は先行研究で開発した部分的要素等価回路(Partial Element Equivalent Circuit: PEEC)と熱の連成解析[1]プログラムに基づいて、局所的常電導転移を起こした時の発生磁場分布とコイル両端電圧の変化について解析・評価を行った。その結果を報告する。

2. 解析条件と解析方法

今回の解析で用いた無絶縁モデルパンケーキコイルの諸元を Table. 1 にまとめる[2]。以下ここでは、30 A 一定電流運転時(負荷率 70%)に、最内層から 16 ターン目(全 60 ターン)の長さ 6 mm の領域に常電導転移が発生した(はじめの試みとしてここでは無限大の抵抗が発生し続けたと仮定)ときの解析・評価結果を例として示す。すなわち、Fig. 1 に示すような 8 の字と円形のピックアップコイルを仮定し、常電導転移による電流パスの変化に起因する誘導電圧と、無絶縁コイル両端に発生する電圧を計算した。

Table. 1 のモデルコイルを周方向に 30 分割し、ターン数をかけて合計 1800 個の局所セグメントにおける電流を 0.01 秒毎に求めた。そしてこの 1800 個の局所セグメント電流を用いて、ビオ・サバル則と二次元有限要素法を用いてピックアップコイル検出領域の磁場変化と誘導電圧を以下の式により求めた。

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{n=1}^n \iiint \frac{\mathbf{J}_n \times \mathbf{R}}{R^3} dv \quad (1)$$

$$R = \sqrt{(x_0 - r \cos \theta)^2 + (y_0 - r \sin \theta)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (2)$$

$$\psi_n = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sum_{i=1}^4 N_i B_i d\xi d\eta \quad (3)$$

$$V = -N \sum_{n=1}^n \frac{\partial \psi_n}{\partial t} = -N \sum_{n=1}^n \frac{\partial B_n}{\partial t} S_n \quad (4)$$

但し、 B , J_n と R はコイルの磁束密度、セグメント電流密度と磁場観測点までの距離である。 Ψ_n と V は各セグメントの磁束と誘導電圧である。 N_i は一次補間関数である。 N はサーチコイルの巻数である。

3. 解析結果

Fig. 2 に、常電導転移発生 0.01 秒後の各ピックアップコイルの誘導電圧とモデルコイルの両端電圧を示す。常電導転

Table 1. Specification of NI REBCO Pancake Coil

Parameters	Values
HTS Conductor	Super Power SCS4050
Conductor width; thickness [mm]	4.0; 0.063
Copper stabilizer thickness [mm]	0.005
Ic @ 77K, coil [A]	43
Number of turns	60
i.d.; o.d.; height [mm]	60; 67.6; 4.0
Inductance [μ H]	432.3

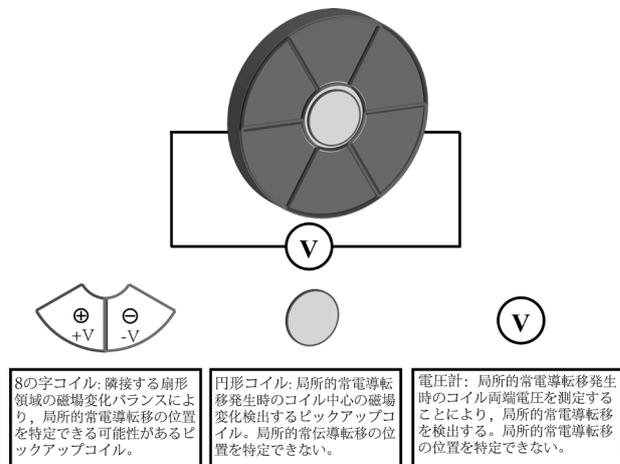


Fig. 1. Structure of the Detection System composed by Figure-eight Sector Search coil, Ring Search and Voltmeter

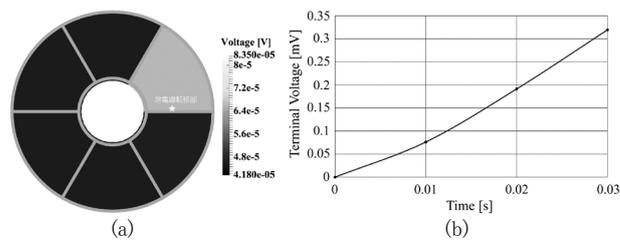


Fig. 2. Result of (a) Distribution of Detection Voltage and (b) Terminal Voltage during Local Normal Transition

移が発生すると、常電導転移部における瞬間的な磁束変化により常電導転移部の真上のピックアップコイルに 83.5 μ V ($N=1$ のとき)の誘導電圧が現れる。一方、コイルの両端電圧は時間と共に上昇し、0.03 秒には 0.35 mV に達した。

本研究の一部は、平成 26 年度科研費基金若手研究 B(No. 26820101)「高電流密度・高熱的安定性が両立する高温超伝導コイルシステムの開発」によることを付記する。

参考文献

1. T.Wang, et al., "Analyses of transient behaviors of No-Insulation REBCO pancake coils during Sudden Discharging and Over-Current", IEEE trans on Applied Supercond., Vol. 25, Issue 3, 2015
2. X.Wang, et al., "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation ReBCO pancake coil", Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012

無絶縁 REBCO パンケーキコイルの局所的常電導転移時における 銅安定化層厚が熱安定性に及ぼす影響

Influence of Copper Stabilizer's thickness on Thermal Stability of No-insulation REBCO Pancake Coil during Local Normal Transition

王 韜, 池田 愛花, 大木 隆宏, 賈 昀昊, 石山 敦士(早大); 野口 聡, 門馬 克敏(北大);
渡辺 智則, 長屋 重夫(中部電力)

Wang Tao, Ikeda Aika, Ohki Takahiro, Jia Yunhao, Ishiyama Atsushi (Waseda University); Noguchi So, Monma Katsutoshi
(Hokkaido University); Watanabe Tomonori, Nagaya Shigeo (Chubu Electric Power)
E-mail: michealwang@aoni.waseda.jp

1. はじめに

無絶縁REBCO高温超電導コイル(以下:無絶縁コイル)は、本来二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定化を同時に満足することのできる手段として期待されている。そして我々は、この無絶縁コイル技術を、MRI や加速器応用を想定した小型・高磁場のREBCOパンケーキコイルに適用することを目指している[1]。高温超電導コイルは、従来の低温金属系コイルに比べ熱擾乱に対する熱的安定性は高いが、何らかの要因によって局所的常電導転移が起こる可能性を無視することはできない。局所的常電導転移によるホットスポットの発生を回避するために、適切な厚みの銅安定化層を設ける必要があるが、銅安定化層の厚みの増加はコイル電流密度の低下を招くことになる。これに対し、無絶縁コイルでは、各層巻線間の銅層を共有することができるため、必要となる銅安定化層の厚みを低減できる可能性がある。そこで今回は、筆者らが開発したPEEC(Partial Element Equivalent Circuit)モデルに基づく無絶縁コイル内電流分布解析と熱解析の連成解析プログラム[1]を用いて、無絶縁コイルの一部が常電導転移を起こした時の電磁的・熱的振舞いを解析・評価したので報告する。

2. 解析条件と解析方法

今回の解析で用いた無絶縁モデルパンケーキコイルの諸元を Table. 1 にまとめる[2]。以下ここでは、30 A 一定電流運転時(負荷率70%)に、最内層から16ターン目(全60ターン)の長さ6 mmの領域に常電導転移が発生した(はじめの試みとしてここでは無限大の抵抗が発生し続けたと仮定)ときの解析結果を例として示す。Fig. 1 に、モデルコイル mid-plane 上の巻線内発生磁場分布と、臨界電流値(Ic)分布を示す。

開発した連成解析プログラムを用いて、上記の常電導転移が発生した直後以降の無絶縁モデルパンケーキコイル内の線材長手方向電流(Azimuthal Current)と、巻線層間方向電流(Radial Bypass Current)と巻線層間接触電気抵抗による発熱量および温度分布の時間変化を解析した。

3. 解析結果

Fig. 2(a)(b)に、常電導転移発生から0.03sまでの無絶縁モデルコイル内の線材長手方向電流(Azimuthal Current)と、巻線層間方向電流(Radial Bypass Current)の分布を示す。局所的常電導転移の発生を想定した16ターン目の周方向電流は、瞬間的に0 Aまで減衰し、隣接する巻線は16ターン目へ転流し始めるが、時間の経過とともに、コイル巻線全体に電流転流が進み、線材長手方向電流はコイル巻線内で一様になっていく傾向を示した。また、Fig. 2(b)に示す巻線層間方向電流も、瞬間的に常電導転移領域近傍で上昇するが、時間の経過とともに一定値に落ち着く結果となった。Fig. 3 に、常電導転移発生から0.03sまでの発熱量を示す。無絶縁コイルに常電導転移は発生しても、ホットスポットを形成するが、コイルの運転に対して問題となるような熱が発生していないことが確認された。なお、銅安定化層の厚みをパラメータとした解析結果は当日報告する。

Table 1. Specification of NI REBCO Pancake Coil

Parameters	Values
HTS Conductor	Super Power SCS4050
Conductor width; thickness [mm]	4.0; 0.063
Copper stabilizer thickness [mm]	0.005
Ic @ 77K, coil [A]	43
Number of turns	60
i.d.; o.d.; height [mm]	60; 67.6; 4.0
Inductance [μ H]	432.3

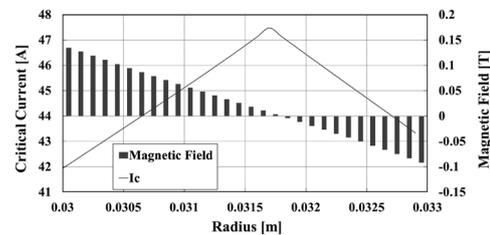


Fig. 1. Critical Current of Each Turn in No-insulation Pancake Coil

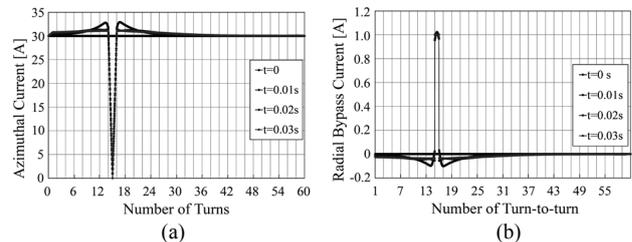


Fig. 2. Current Distribution of No-insulation Pancake Coil during Local Normal Transition: (a) Azimuthal Current, (b) Radial Bypass Current

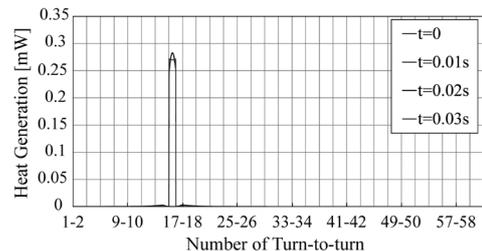


Fig. 3. Heat Generation of No-insulation Pancake Coil during Local Normal Transition

本研究の一部は、科研費基盤研究A(No.26249036)「次世代医療用サイクロトロン開発のための5H超伝導コイルシステムの基盤技術の確立」によったことを付記する。

参考文献

1. T.Wang, et al.; "Analyses of transient behaviors of No-Insulation REBCO pancake coils during Sudden Discharging and Over-Current", IEEE trans on Applied Supercond., Vol. 25, Issue 3, 2015
2. X.Wang, et al.; "Turn-to-turn contact characteristics for an equivalent circuit model of no-insulation ReBCO pancake coil", Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -実機級の起磁力実証に向けたレーストラックコイル製作-

Development of REBCO HTS Magnet for Maglev

-Production of Racetrack Coils for the Demonstration of a Magnetomotive Force Comparable with the Actual Magnet-

水野 克俊, 小方 正文, 杉野 元彦, 長谷川 均(鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, SUGINO Motohiko, HASEGAWA Hitoshi (RTRI)

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。浮上式鉄道用車載磁石に搭載されるレーストラックコイルは 700 kA を超える起磁力が求められる。このような大型且つ高起磁力の REBCO コイルは製作例が少ないことに加えて、浮上式鉄道特有である振動環境下での耐振評価には実規模のコイルが不可欠である。このような背景から、我々は浮上式鉄道用のフルスペック REBCO コイルの製作に着手した。

2. 700 kA 実証 REBCO 磁石仕様検討

コイル製作にあたって、REBCO 車載超電導磁石の仕様検討を行った。外部電源による常時通電方式を前提とし、熱侵入量やインダクタンスのバランスを考慮して通電電流は 250 A とした。700 kA の起磁力のためには 2800 ターン必要となり、全線材長は 1 レーストラックコイルあたり約 8 km となる。コイル断面形状やコイル製作性の観点から 6 mm 幅線材からなるシングルパンケーキコイル 8 積層の構成でこれを実現することとした。パンケーキコイルの基本仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specifications of the pancake coil

Width of the conductor	6 mm
Dimension of the race track	1070 mm × 500 mm
Thickness of the pancake coil	8.5 mm
Wire length	950 m
Number of turns	350
Operating current	250 A
Stacking number for the racetrack coil	8

なお、運用温度は 40 K 以上と想定しているものの、これは将来的な線材性能向上を見越した設定で、現行の線材性能では 30 K~40 K 程度がコイル上限温度になると予測される。

3. パンケーキコイル製作

浮上式鉄道は振動環境での磁石運用という点で特殊であり、機械的剛性や信頼性の高い冷却経路がコイルには求められる。我々は、ターン間絶縁に PTFE テープを用いることにより劣化を防ぎ、かつコイル端面と冷却部材をエポキシ含浸によって強固に接着するコイル構造を検証・評価してきた¹⁾。これに加えて、同様のコンセプトで、熱可塑性樹脂によって冷却部材を巻線部に融着するコイル構造も検討を行っている (Fig.1)。含浸によらない手法のため、エポキシ真空含浸に比べてコイル製作工程を簡略化できる特徴がある。熱可塑性樹脂にはニュクレル®を用いており、要素試験においてはエポキシ樹脂と同様に極低温でも接着面の剥離が発生しないことが確認されている。さらに、熱可塑性樹脂は粘性がエポキシなどの熱硬化性樹脂に比べて高く、冷却部材の融着に用いて

もターン間に樹脂が浸透することがなく、コイル特性の劣化は発生しないことを見出した²⁾。

ターン数を限定したパンケーキコイル製作を経て、PTFE テープ共巻かつエポキシ含浸および、熱可塑性樹脂によって伝熱部材が融着されたコイル構造で Table 1 に示す仕様のパンケーキコイルをそれぞれ製作した。外観写真を Fig. 2 に示す。冷却とコイル剛性のため巻線は銅板(冷却部材)で完全に覆われている構造ながらも、いずれのコイルも厚み 8.5 mm 以下を実現できている。

パンケーキコイル単体での健全性の確認のため液体窒素冷却下での通電を行ったところ、含浸あるいは融着の前後でも通電特性は変化せず、臨界電流、 n 値ともに健全な値であった。一例として熱可塑性樹脂を用いたパンケーキコイルの I-V 特性を Fig. 3 に示す。

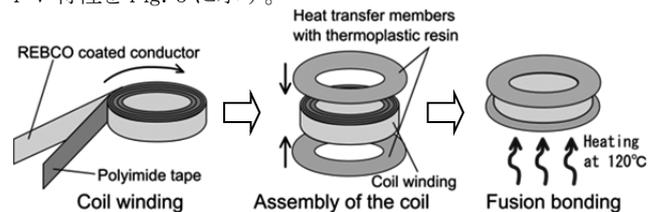


Fig.1 REBCO coil fabrication process using fusion bonding

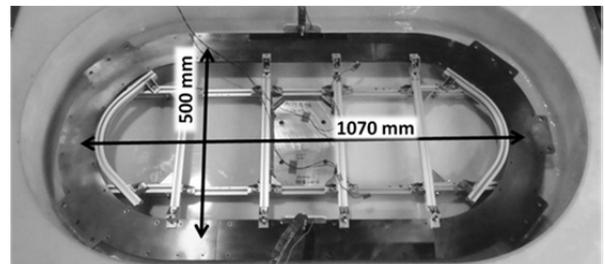


Fig.2 Picture of the pancake coil

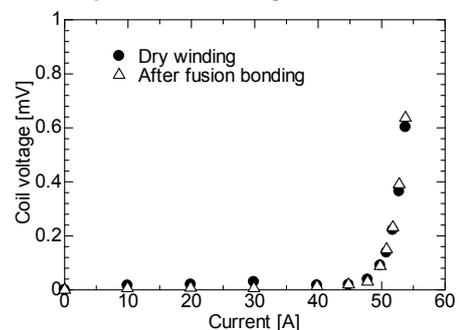


Fig.3 I-V Characteristics of the pancake coil at 77 K

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

参考文献

- [1] K. Mizuno, et al., Abstracts of CSSJ Conference **89**, 145 (2014).
- [2] K. Mizuno, et al., Abstracts of ISS 2014, SA-4

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 —実機大パンケーキコイルの機械加振試験— Development of REBCO HTS Magnet for Maglev — Mechanical Vibration Test of Full-scale HTS Pancake Coil —

杉野 元彦, 水野 克俊, 小方 正文, 長谷川 均 (鉄道総研)
SUGINO Motohiko, MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, HASEGAWA Hitoshi (RTRI);
E-mail: sugino.motohiko.79@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おり、磁気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 REBCO パンケーキコイルを製作した。^{1~3)}

実際のコイルは車両走行時に振動を受けて変形するため、電磁的性能と併せて、剛性や耐振性等の鉄道車両に求められる機械的性能を満たす必要がある。今回、繰り返し変形に対する耐性評価を目的として、パンケーキコイルの機械加振試験を行ったので報告する。

2. コイル冷却加振装置

本試験にあたり、このパンケーキコイルを冷却状態で加振するための加振装置を製作した。加振装置は、パンケーキコイルをばねで吊り下げて液体窒素に浸漬する LN2 槽、ペローズ貫通アームを通して装置下部からコイルを加振する加振器、装置上面から接続する通電配線および計測配線から構成される。(Fig. 1, Table 1)

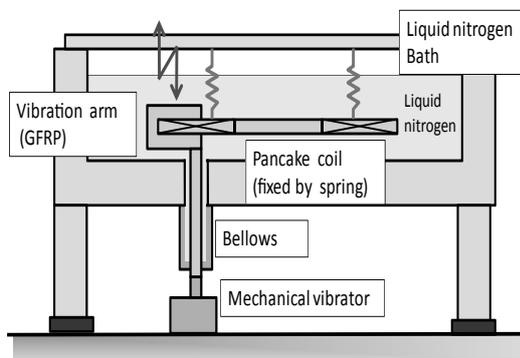


Fig.1 Cross Section of Full-scale HTS Pancake Coil Mechanical Vibration Test Device

Table 1 Specifications of Mechanical Vibration Test Device

Dimension of liquid nitrogen bath	1800mm×920mm height 145mm
Capacity of liquid nitrogen (liquid surface height 100mm)	165ℓ
Maximum displacement of the vibration arm	16.5mm
Mechanical vibrator	EMIC Inc. 9514-AN/AS
Range of the vibration frequency	5.0 ~ 3kHz
Maximum vibration force	300N

3. 試験条件

車両走行時、パンケーキコイルは荷重、振動を受けるが、実際に使用する場合はコイルをケースに格納、固定して使用

するため、ケースの強度によりパンケーキコイルの変形量は変化する。現時点のケースの設計強度から使用時にパンケーキコイルに生じる変形量は最大で 0.1mm と想定されている。本試験では繰り返し変形量をその 10 倍の 1mm とし、繰り返し回数は加振装置の冷却保持時間(4 時間)から 18 万回とした。

また加振時、液体窒素中の試験体の最大変位量を正確に計測する必要がある。そのため、簡略化した FEM モデルによる固有値解析を行い、予測される振動モードから最大変位、モード節点を推定し、各点の振動加速度を計測した。

4. 加振試験

試験にあたっては、エポキシ含浸構造および、熱可塑性樹脂融着構造にて製作したパンケーキコイルを使用した。このコイルを液体窒素に浸漬し、冷却状態にて機械加振による繰り返し変形を与えた。そして機械加振の前後で、通電試験と振動特性試験を行い、コイルの通電性能、機械的性能への影響を検証した。

試験の結果、Ic 値、n 値とも試験の前後で変化はなかった。

また Fig. 2 として加振後の振動特性のウォーターフール図を示す。剛性の低下や強度部材の破損など機械的性能の劣化を生じた場合、振動数、振動モードなどの振動特性に変化を生じるが、18 万回の変形を通してこれらの特性に変化を生じることはなかった。

この試験結果より、今回製作したパンケーキコイルに実機相当の変形を繰り返し与えても、通電性能や機械的性能の劣化は発生せず、コイルが機能を維持することを確認した。

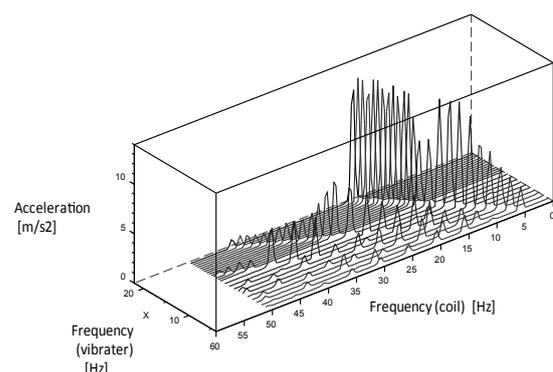


Fig.2 Vibration characteristics of Full-scale HTS Pancake Coil (after 180,000 times transformation)

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

参考文献

- [1] K. Mizuno, et al., Abstracts of CSSJ Conference 89, 2014,
- [2] K. Mizuno, et al., Abstracts of ISS 2014, SA-4
- [3] K. Mizuno, et al., Abstracts of CSSJ Conference 91, 2015, 3A-a06

外挿 LTS コイルのクエンチによる内挿 REBCO コイルにおける過電流誘起

Normal zone characteristics in a REBCO insert coil induced by quenches in an LTS outsert coil

土屋 雄司, 武藤 翔吾, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大);

宮崎 寛史, 花井 哲, 井岡 茂(東芝);大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)

TSUCHIYA Yuji, MUTO Shogo, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

MIYAZAKI Hiroshi, IOKA Shigeru (Toshiba); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)

E-mail: y.tsuchiya@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-δ}(REBCO、RE:Y または希土類)線材は、機械特性や強磁場下臨界電流特性が優れることから、強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている[1]。一方、REBCO 線材はLTS線材に比べ常伝導伝播速度が遅いため、臨界電流を超える過電流が流れる際、常伝導領域が発生し局所的熱暴走による劣化・焼損が懸念される。外挿 LTS コイルと内挿REBCOコイルを組み合わせた超伝導マグネットにおいて、最も常伝導領域が発生しやすいのは、LTS コイルのクエンチ時に REBCO コイルに過電流が誘起される状況である。我々は、この状況を模した無冷媒 LTS 超伝導マグネットの強制クエンチにより REBCO コイルに過電流を誘起させる外部磁場遮断装置を開発し、REBCO コイルのクエンチ保護について検討してきた[2]。本研究では、REBCO コイル内の分割電圧測定により、臨界電流分布と過電流通電時の常伝導領域発生箇所について調べた。

2. 実験方法

Table 1 に示す諸元を持つエポキシ含浸 REBCO シングルパンケーキコイルを作製し、Fig. 1 のように複数の電圧端子をはんだ付けにより設置した。線材は、100 μm 厚の安定化銅層をはんだにより張り合わせたフジクラ社製 GdBCO 線材を用いた。0-5 T の定常磁場下通電試験により、温度 20-50 K における臨界電流分布を測定した。また、外部磁場遮断試験装置を用いて、初期温度 10-50 K に対して 5 T 励磁後に遮断試験を行い、過電流誘起時の常伝導領域の発生箇所を測定した。

3. 実験結果及び考察

REBCO コイルの 40 K 自己磁場下の臨界電流は 303 A であった。Fig. 2 に、コイル全体の臨界電流で規格化した各分割領域の 40 K における臨界電流の外部磁場依存性を示す。低磁場においては中間、高磁場においては外側領域の臨界電流が低いことが明らかとなった。これは、REBCO コイルの自己磁場よりにコイル内部に磁場分布があるためだと考えられる。Fig. 3 に、REBCO コイルにおける初期温度 40 K、保護抵抗 4.31 mΩ に対する外部磁場遮断時のコイル内電場の電流依存性の履歴曲線を示す。大きなヒステリシスを示すことから常伝導領域における温度上昇が示唆される。また、50-10 ターンにおける発生電場が最も大きかった。磁場遮断時に外部磁場が 3-4 T のとき REBCO コイルにおいて電流が最大であったことから、定常磁場下での臨界電流分布の結果と比較すると、50-10 ターンの領域は最大電流が流れる状況で最も小さい臨界電流を持つことが分かる。よって、過電流が誘起された際に、臨界電流が小さい領域において発熱が大きかったと考えられる。当日は、種々の条件に対する実験結果について報告するとともに、GdBCO 線材の臨界電流特性から計算した臨界電流分布や、外部磁場遮断時の常伝導領域について数値計算により解析した結果についても報告する。

Table 1 Specification of a single pancake REBCO coil.

Inner diameter (mm)	96
Outer diameter (mm)	156
Height (mm)	4.1
Number of total turns	101

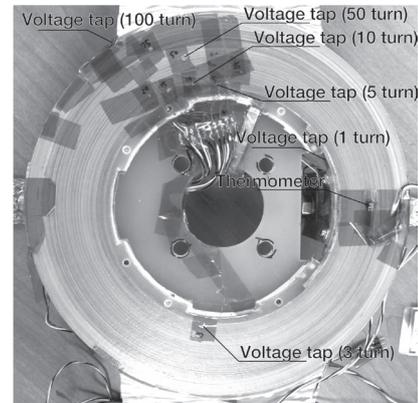


Fig. 1 Picture of a single pancake REBCO coil. 6 voltage taps are soldered to measure I_c at each section.

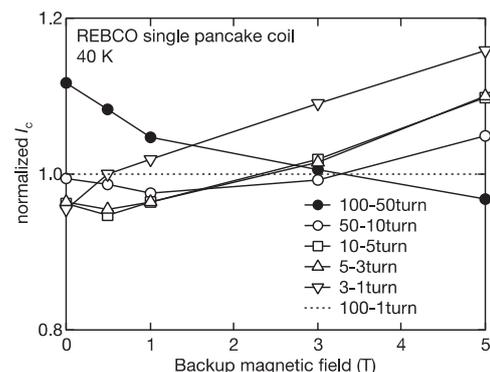


Fig. 2 Backup magnetic field dependences of I_c at each section of the REBCO coil normalized by the coil I_c .

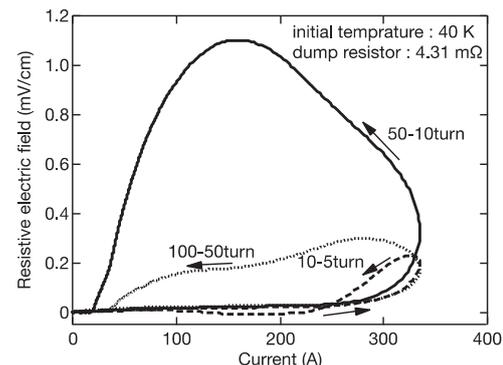


Fig. 3 Hysteresis loops of resistive electric field and current at each section in the insert REBCO coil during a shutdown of the outsert LTS coil.

謝辞 本研究は科学研究費補助金 基盤研究(A)25246032 と研究活動スタート支援 50736080 の支援を受けて行われました。

参考文献

1. S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24**, 4302005 (2014).
2. S. Muto *et al.*, Abstract of CSJ Conference **90**, 166 (2014).

無針注射器と磁気力を用いた遺伝子導入に関する基礎的研究

Fundamental Study on Gene Transfer utilizing Magnetic Force and Jet Injectors

長谷川 崇志, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏, 中神 啓徳(大阪大学)

HASEGAWA Takashi, MISHIMA Fumihito, AKIMAYA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro, NAKAGAMI Hironori (Osaka Univ.)

E-mail: hasegawa@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在、遺伝子治療や遺伝子ワクチンの研究が進められている。この治療法は治療用遺伝子を生体に投与し、細胞内で発現させることで治療効果を得ることができる手法である。遺伝子ワクチンにおいては、免疫細胞が多い皮内での遺伝子導入に対して有効な投与技術が求められている[1]。本研究では、無針注射器を用いた効果的な遺伝子ワクチン導入法の開発を目的とし、無針投与に磁気力による薬剤の誘導を併用した遺伝子導入の可能性を検討した。

無針注射器とは、ノズルから薬液を高圧で射出し、薬液を瞬時に生体組織内に浸透・拡散させることで投与を行う注射器であり、投与時に発生する高圧の薬液流により、物理的細胞膜透過による遺伝子導入効率の向上が期待される。本研究では、火薬の発火による圧力上昇を利用した無針注射器を用いた。Fig.1 に本研究で用いた無針注射器による薬液の射出の様子を高速撮影したものを示す。

また、磁場印加型薬剤送達システム(MDDS: Magnetic Drug Delivery System)と無針投与を併用することで、遺伝子導入効率の向上が期待される。本研究ではMDDSの手法として、投与する遺伝子に超常磁性粒子を結合させ、永久磁石を用いて磁場を印加することで、磁気力により牽引することで遺伝子と細胞との接触確率を向上させ、遺伝子導入の促進を図った。

2. 実験方法

マウスの背中中の皮内に黄色蛍光タンパク質(YFP :Yellow Fluorescent Protein)のレポーター遺伝子 $50 \mu\text{g}$ を有針・無針注射器を用いて投与し、遺伝子発現量を比較することで、投与方法による遺伝子導入効率の違いを調査した。

さらに、無針投与と磁気力制御の併用による遺伝子導入効率への影響を調査するために、超常磁性のマグネタイト粒子(平均粒径: 60 nm)と結合させたルシフェラーゼレポーター遺伝子 $50 \mu\text{g}$ をマウスの背中皮膚に無針投与したのち、永久磁石(最大磁束密度: 0.3 T)を用いて30分間磁場を印加し、レポーター遺伝子のみを無針投与した場合との比較を行った。

3. 実験結果と考察

遺伝子発現を示す蛍光観察の結果を Fig.2 に示す。有針投与と比較して無針投与では皮内における遺伝子発現量が明らかに多かった。無針投与では、有針投与と比較して投与された薬液が生体組織内において、より拡散し細胞膜との接触確率が上昇したため、あるいは無針投与においては、射出された薬液が細胞膜にもたらす動圧により遺伝子が細胞膜を物理的に透過したため、高い遺伝子導入効率を実現した可能性が考えられる。

無針注射器を用いた磁場印加型遺伝子導入実験の結果を Fig.3 に示す。遺伝子単体を投与した場合に比べ、遺伝子にマグネタイトを結合させて磁場条件下に置いた場合には約2倍の遺伝子発現があることが分かる。この結果から、投与後に細胞間に存在していた遺伝子が磁気力で誘導されることにより、細胞膜との接触が促進され、皮内における遺伝子導入効率が向上したと考えられる。

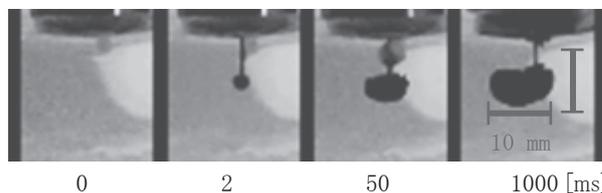


Fig.1 Diffusion of liquid ejected by jet injector.

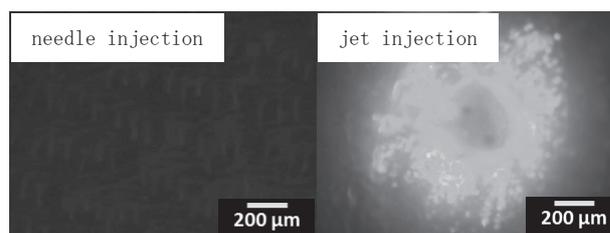


Fig.2 Fluorescence observation with and without needle.

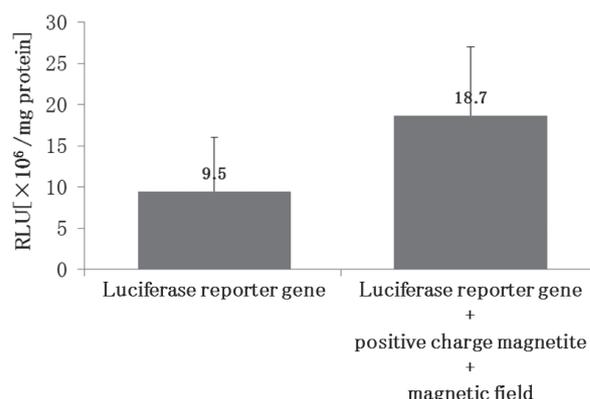


Fig.3 Luciferase activation with and without magnetic field

4. 結論

無針投与では、有針投与と比較して遺伝子導入効率が向上することが示された。さらに、無針投与と外部磁場を併用することで遺伝子導入効率の向上の可能性が示された。

今後、無針注射器のノズル形状や火薬量の最適化、磁性体の粒径や外部磁場に関して詳細な設計を行うことで更なる遺伝子導入効率の向上が期待できる。

謝辞

本研究では、株式会社ダイセル 特機・MSDカンパニーパイロテクニク開発室より無針注射器をご提供いただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- John J. Donnelly, Jeffrey B. Ulmer, John W. Shiver, Margaret A. Liu, DNA vaccines, Annu. Rev. Immunol. 1997. 15:617-48

多数個並列接続MOSFETを用いた低温用低損失低電圧充電回路の試作 Test production of the low voltage, low loss cryogenic DC charge circuit for the superconducting coil using multi connected MOSFETs

二ノ宮 晃, 杉山 歩, 倉西 康次 (成蹊大学 理工学部)
AKIRA Ninomiya, AYUMU Sugiyama, KOHJI Kuranishi (Seikei University)
E-mail: ninomiya@mug.biglobe.ne.jp

1. はじめに

超電導コイルの励磁には、コイルの性能を十分に満足させる電圧、電流および容量が必要になる。特に、直流用超電導コイルの場合、大電流への要求は非常に高いが電圧に関しては必ずしもそうではない。

そこで、我々は、直流用超電導コイルの励磁において、1V以下の低電圧を使用し、電流も電源から直接定格電流を供給するのではなく、徐々に増加させる充電回路を用いることで小容量電源でも超電導コイルの励磁が可能になることを検討している。

本充電回路の利用設備は、1kVA (200V/5A) 級の単相単巻可変変圧器、巻数比が非常に大きい変圧器 (1000:4)、MOSFETを多数個並列接続して大電流用途での利用を液体窒素温度環境下で可能にしたオン抵抗値の小さいスイッチ、そして超電導コイル (臨界電流42A) から成る。

提案回路を用いて、超電導コイルの励磁実験を実施したところ、実効値電圧0.3V程度で超電導コイルをクエンチ電流値 (42A) まで励磁させることが可能になった。ここでは、MOSFETの基本特性および充電回路の基本動作特性と損失特性などについて実験値に基づいて述べる。

2. 実験設備と実験結果

本研究に利用するMOSFETは、低損失・大電流スイッチとして利用したい。そこで、電流容量5AのMOSFETを100個並列接続して電流容量を100倍に増加させると共にオン抵抗値を100分の1に低下させる対策をとった。作成したスイッチを77Kで測定した結果、オン抵抗値は0.393mΩとなった。MOSFET単体のオン抵抗値は26.3mΩであったことから、この1/100の値である0.263mΩを期待したがやや大きい値となった。なお、MOSFETのゲート・ソース間電圧 (Vgs) は20Vで実施した。また、巻数比1000:4の変圧器は、珪素鋼板上に0.6mmφの銅線を巻いて製作した。

Fig.1 に充電回路を示す。本回路は、MOSFETスイッチと超電導コイルが並列接続されていて、交流電圧の正の半サイクル時はスイッチ部を、負の半サイクル時は超電導コイル部を流れるようにする。そして、次の負の半サイクル時に超電導コイル部分に電流が残っていると、コイル電流が増えるようになる。これを実現するには、スイッチ部とコイル部を繋ぐ配線部分の抵抗値を極力小さくしたい。そこで、配線部分にはBi系超電導線 (Ic: 150A) を並列接続

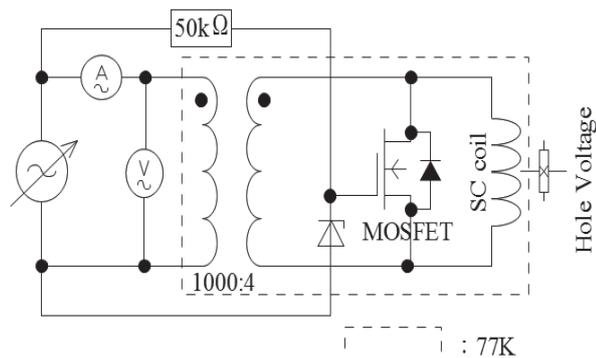
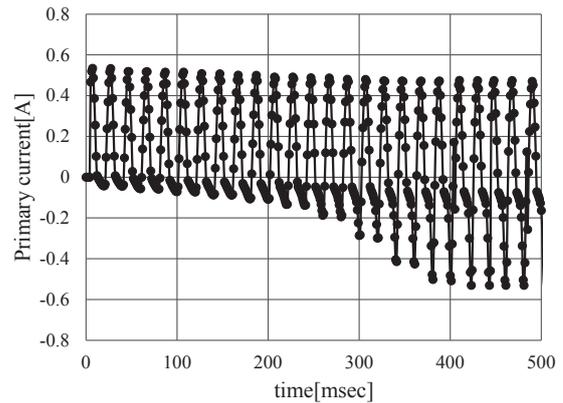


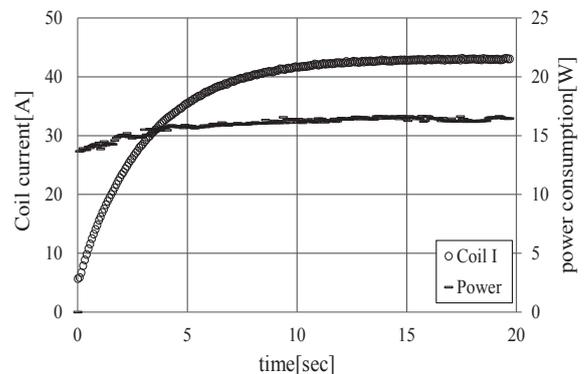
Fig.1 Experimental circuit

してある。また、MOSFETには逆方向にダイオードが入っていて、これが負の反サイクル時に動作すると充電動作ができなくなる。そこで、このダイオードの77Kでの動作についても調査した。その結果、動作電圧は1Vであることが判明した。これより、本充電回路は、交流電圧最大値を1V以下にして行うことになる。

Fig.2は、変圧器1次側実効値電圧80V/2次側0.32Vで実施した結果である。ここで、同図(a)は、通電開始時の25サイクル分の変圧器1次側電流である。これより、負の電流がサイクル回数と共に増加していることが確認できる。また、同図(b)は、超電導コイル中心軸上5cmの高さに固定したホール素子の磁場値から超電導コイル電流を推定した結果である。ここには、本回路の電力値も共に示してある。これより、提案充電回路は0.32Vの電圧で超電導コイルの臨界電流値である42Aまで励磁できることを確認し、そのときの電力値は電流上昇時においてもほぼ一定の16.2Wであることが判った。今後は、より電流容量の大きいコイルでの検討を進めたいと考えている。



(a). Primary current of transformer



(b). Charging current due to the Hall element and power consumption.

Fig.2 Charging current characteristics at the time of the transformer primary and secondary voltages of 80V and 0.32V.

参考文献

Y. Kondo, et al, IEEE Trans. on Appl. Supe. Vol.19, No.3, pp2337-2340, JUNE 2009.

卓上型超伝導バルク磁石の捕捉磁場特性の評価

Estimation of trapped field performance of a desktop type superconducting bulk magnet

横山 和哉, エランダ クラワンシャ, 趙 元鼎(足利工大); 岡 徹雄(新潟大)
 YOKOYAMA Kazuya, Eranda Kulawansha, Zhao Yuanding (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)
 E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石の産業応用を目指して、卓上型超伝導バルク磁石装置を開発した。スターリング冷凍機の採用とパルス着磁専用とすることで、装置の小型化と低ランニングコスト、さらに取り扱い易さが達成された。これまでに 53 K の最低到達温度と試料表面において 2.8 T の捕捉磁場を確認した。本文は更なる捕捉磁場の向上を目指して、パルス着磁で多く用いられる反復パルス磁化法による着磁実験を行った結果を報告する。

2. 実験方法

GdBCO バルク体 (φ 45×15 mm, 新日鉄住金製) をスターリング冷凍機 (CryoTel CT, SUNPOWER, 冷却能力: 8W@77K) のコールドヘッドに接続したサンプルステージの先端に取り付け、真空チャンバを取り付けた。最低到達温度まで冷却した後、着磁コイルを取り付けて 3.1~7.0 T のパルス磁場 (立ち上がり時間: 10 ms) を 2~4 回印加した。磁場印加毎にコイルを取り外し、三次元ホールセンサを用いて磁極表面 (バルク体表面から 4 mm) の磁束密度分布を測定した。

3. 結果及び考察

図 1 に 1 回目 7.0 T-2 回目 3.9 T-3 回目 3.1 T (パターン A, □印) 及び 7.0 T-5.4 T-5.4 T (パターン B, ○印), 5.4 T-5.4 T (パターン C, △印), 5.4 T-3.9 T (パターン D, ×印) を印加した場合の磁極表面における最大捕捉磁束密度と印加磁場の関係を示す。図中の丸で囲んだ数字は磁場印加の順番を表す。1 回目の印加磁場が 7.0 T のパターン A と B の場合は 2 発目で印加磁場を小さくすると捕捉磁場が増加しているが、3 発目では A の場合はほぼ変化がないのに対して、B の場合は大きく減少している。1 回目の印加磁場が 5.4 T のパターン C と D の場合は、2 発目の印加磁場の大きさが異なっても、捕捉磁場が低下してしまった。図 2 に図 1 のパターン A と B における磁場印加後の捕捉磁場分布を示す。両パターンとも 1 回目の磁場分布が同心円状になっており、磁場が侵入するパスが形成されていないことがわかる。パターン B では 2 回目に捕捉磁場が大きく増加しているものの、3 回目では 1.0 T 以上の部分がなくなってしまっている。図 3 に総磁束量及び磁極表面における最大磁束密度とパルス磁場印加回数の関係を示す。棒グラフが総磁束量 (左軸)、折れ線グラフが最大磁束密度 (右軸) の結果を表す。各印加磁場の 2 回目と 3 回目の変化を比較すると、パターン B の場合は総磁束量が半分以下に減少してしまっていることがわかる。これは 3 回目に印加した磁場が大きすぎたためバルク体が発熱し、 J_c が低下したためと考えられる。

4. まとめ

本文はスターリング冷凍機を用いた卓上型バルク磁石において、捕捉磁場の向上を目指して複数回パルス磁場を印加する実験を行った。従来の複数回パルス着磁の場合と異なり、1 回目で磁束のパスを形成することが難しくなっており、2 発目

の印加磁場の大きさを選定することが難しくなっている。今後、捕捉磁場の向上と効率的な着磁を目指して印加磁場の大きさを変えながらさらに実験を行う予定である。また、試料に加工を施す手法なども検討していきたい。

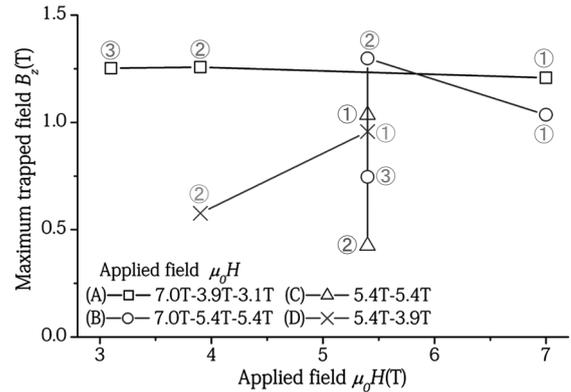


Fig. 1. Photograph of a desktop type superconducting bulk magnet system.

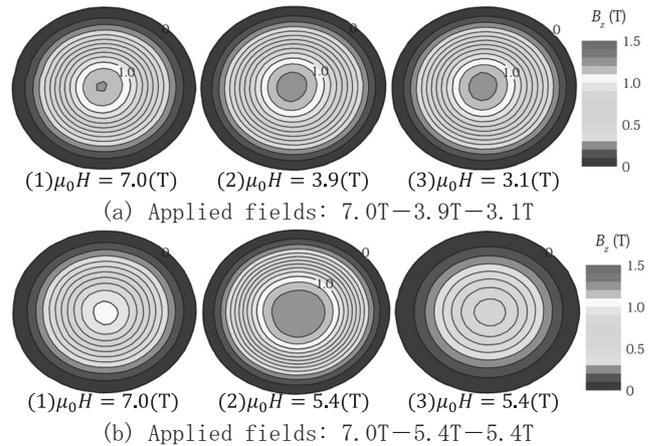


Fig.2. Time response of temperature at a cold stage

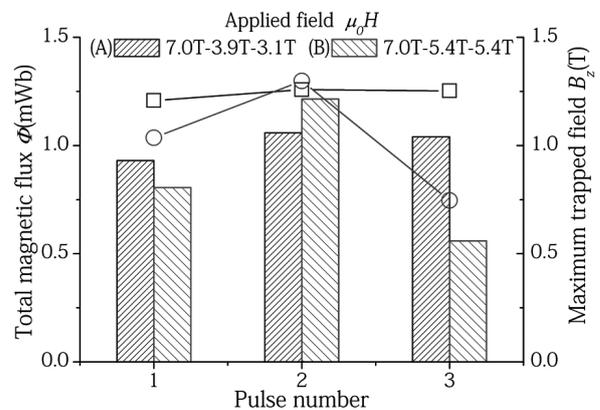


Fig. 3. Comparison of total magnetic flux and maximum trapped field

バルク超伝導体を利用した異物混入のない送液ポンプの研究開発

Development of a liquid feeding pump without contaminations using bulk superconductors

井上 和朗, 村上 雅人(芝浦工大); 平櫛 真男(セイコー化工機); 秋山 慎一(マグネオ技研)

INOUE Kazuo, MURAKAMI Masato (SIT); HIRAGUSHI Masao (SEIKOW CHEMICAL ENGINEERING & MACHINERY); AKIYAMA Shinichi (MAGNEO GIKEN)
E-mail: k-inoue@sic.shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

薬品製造分野では、ポンプによる液体搬送中に不純物が混入しない高純度清浄環境が求められている。それには、軸受部が完全非接触となる回転機構を有するポンプが望ましい。バルク超伝導体と永久磁石を用いると、ピン止め効果によって、完全非接触でインペラを回転させるポンプを構成できる[1]。我々は、Fig.1のような試験機を使用して、実際の運用と同様、インペラを高速回転させ、その安定性能を向上させることを目的として開発を行ってきた。その過程で磁石と超伝導体間の結合力が弱いと、危険速度で回転が不安定化することを見出した。そこで、バルク超伝導体直下に永久磁石（挟み込み磁石）を設置し、ピン止め力を増すことで、回転をより安定化させることが期待できる。本研究では、挟み込み磁石挿入によってポンプの回転挙動がどのように変化するかを剛性力や軸ぶれなどのデータを比較検証することで、実用的な超伝導ポンプ開発のための指針を得ることを目的とする。また、薬液搬送を想定したポンプによる水循環試験も行った。

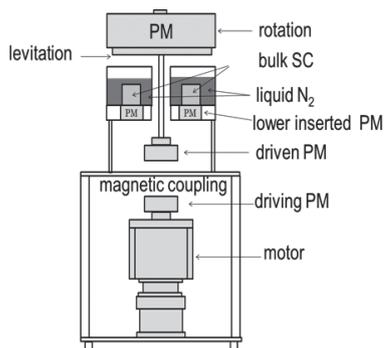


Fig. 1. Schematic illustration of a superconductivity rotational machine tested in this study.

2. 実験方法

Fig.1の超伝導回転機（超伝導ポンプ）において、最上位にある磁石（浮上用磁石）をY-Ba-Cu-O系バルク超伝導体によって浮上させる。実際のポンプでは、この浮上用磁石にインペラが装着され、液体を搬送する。磁石は、浮上した状態でシャフトにより下位の被駆動磁石に連結されている。被駆動磁石は回転モータに直結した駆動磁石と磁気結合しており、非接触でモータの回転を上部の回転機構に伝達する。挟み込み磁石は、バルク超伝導体の下部に配した。浮上安定性を評価するために剛性力を測定した。浮上用磁石に水平方向に荷重をかけることで、フォースゲージを用いて計測した。回転特性については、モータの回転速度を増加させながら、浮上用磁石の軸ぶれをレーザ変位計を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に挟み込み磁石を挿入した場合とない場合の剛性力の測定結果を示す。いずれの場合も移動距離に比例して、剛性力が大きくなる。また、挟み込み磁石を用いた場合のほうが剛性力が大きいことがわかる。これは、バルク超伝導体に捕捉される磁束が増え、ピン止め力が向上したためと考えられる。Fig. 3 に浮上用磁石の水平方

向の軸ぶれの回転速度依存性を示す。約 1500rpm から実用化の指標となる 3000rpm まで、軸ぶれがなく安定して回転させることができた。低速の回転域において、共振とみられる軸ぶれが生じるが、挟み込み磁石を設置した場合のほうが、軸ぶれが抑制されることが分かった。また、実際の薬液の搬送を想定して、貯水タンク内の水を循環させる試験を行ったところ、1800rpm まで回転させることに成功したが、それ以上の高速回転では、駆動磁石と被駆動磁石間の同期が外れた。駆動磁石間の磁気結合の強化によるさらなる伝達トルクの向上が必要であることが明らかとなった。

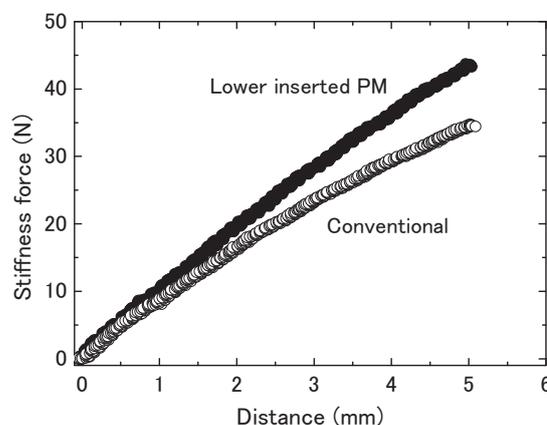


Fig. 2. Stiffness as a function of a displacement in a horizontal direction between superconductors and PM.

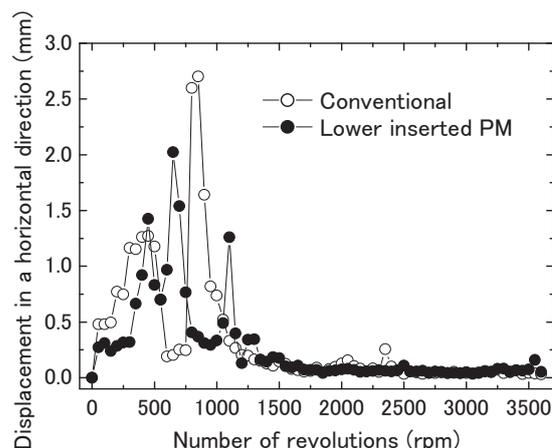


Fig. 3. Displacement of a shaft runout in a horizontal direction as a function of revolution speed of a levitated PM.

参考文献

[1] M. Kondo, K. Inoue, N. Koshizuka, H. Seki, M. Murakami, M. Hiragushi, S. Akiyama, Physica C 504 (2014) 134–137.

液体水素備蓄用高温超伝導磁気浮上コイルの研究

Liquid hydrogen storage system by magnetic levitation using HTS coils

三戸利行 (NIFS), 川越明史, 大迫智弥 (鹿児島大), 平野直樹 (中部電力, NIFS)

MITO Toshiyuki (NIFS), KAWAGOE Akifumi, OSAKO Tomoya (Kagoshima Univ.), HIRANO Naoki (Chubu Electric, Co., NIFS)
e-mail: mito@nifs.ac.jp

1. はじめに

燃料電池車の市販が開始されるなど、地球環境に優しい水素社会の実現に向けた新たな取組が求められている。本研究では、早期の課題解決が必須とされている水素の効率的な貯蔵方法として、高温超伝導コイルを用いた磁気浮上で、液体水素容器を支持することで、低熱侵入かつ高効率で、地震等の災害にも強い安心・安全な液体水素貯蔵技術の確立を目指す。最初は防災拠点や病院等の停電時の電力供給に、将来は化石燃料に変わる資源として液体水素を大量に備蓄することを想定する。最終的には、核融合炉を用いて水から水素を生成すれば、CO₂排出量0の真に持続可能な社会実現のストーリーが完結する。講演では液体水素備蓄用高温超伝導磁気浮上システムの検討結果について報告する。

2. 磁気浮上による液体水素貯蔵

液体水素を貯蔵する際、最も重要となるのは、安全性を確保しつつ、いかにして熱負荷を低減できるかにある。ここでは、図1に示すように対となる高温超伝導コイルを用いて液体水素容器を磁気浮上させることにより、支持材からの伝導による侵入熱を極限まで低減する。更に断熱真空層に中間温度のシールド板等を設けることにより、輻射による入熱も抑えることができる。この際、液体水素容器側に取付けた浮上コイルは永久電流モードで運転され、地上側に設置した支持コイルの電流を制御することにより、液体水素容器の浮上位置が一定になるように制御される。更に、地震等の災害発生時には、液体水素容器の振動を抑制する免震制御を実施し、安全性を確保する。小規模だが高温超伝導コイルを磁気浮上させた実例として、内部導体プラズマ実験装置 Mini-RT があげられる¹⁾。実際の液体水素の貯蔵には複数の超伝導コイルを用いた大規模な磁気浮上システムが必要とされる。図2にLNGタンカー等で用いられる直径40mの球形タンクを想定した場合を示す。タンクの内容積は33,500m³、貯蔵できる液体水素の重量は約2,000t、タンクの空重量が1,000tのため、浮上させる総重量は3,000tになる。底部に4対の磁気浮上用超伝導コイルを配置し、赤道面に横揺れ防止用の補助コイルを配置した。超伝導コイルの動作温度を20Kとすると、市販のDI-BSCCO線材を用いても上記の貯蔵タンク用浮上コイルの設計が可能である。

3. 自励振動式ヒートパイプ冷却超伝導コイル

浮上用および支持用超伝導コイルには、定常時にはほとんど熱負荷がかからない。しかし、地震時には免震制御をする地上支持コイル及び浮上コイルに短時間に大きな交流損失が発生する。交流損失発生時に速やかにコイル内部の熱を外部へ拡散し、コイルの熱暴走や巻線内のホットスポットの発生を防ぐため、自励振動式ヒートパイプ(OHP)をコイルに組み

込む。シート状 OHP の開発、液体水素温度での動作試験は既に行っており、その優れた熱輸送特性を実証済みである²⁾。

4. 研究計画

原理実証として、図3に示すシート状 OHP (厚さ 5mm、幅 95mm、長さ 225mm) 4 枚を組み込んだ BSCCO ダブルパンケーキコイル (外径 0.4m、内径 0.15m) を試作し、特性試験を実施する予定である。

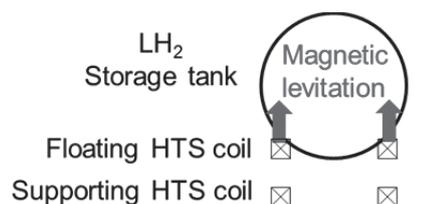


Fig. 1. Liquid hydrogen storage by magnetic levitation.

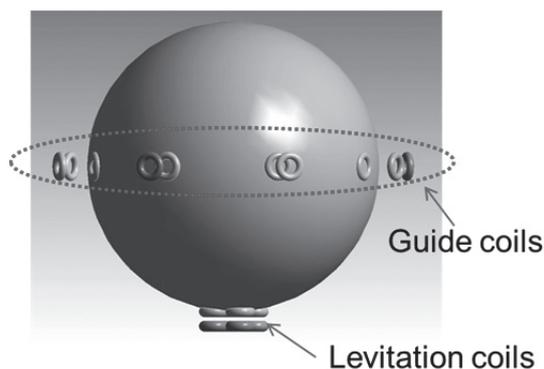


Fig. 2. Magnetic levitation for 40 mΦ liquid hydrogen tank.

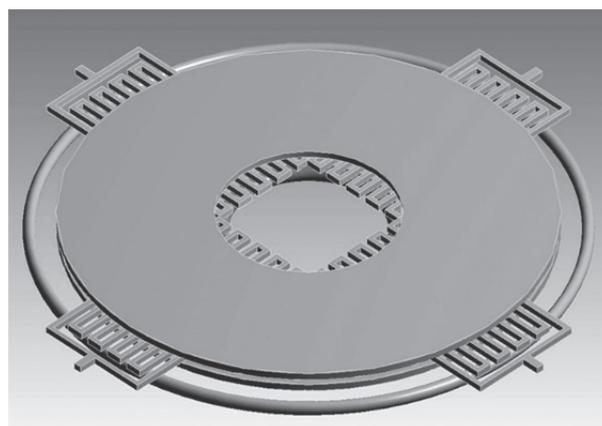


Fig. 3. OHP embed HTS double pancake coil.

参考文献

- 1) K. Natsume, et al.: IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 24, No. 3, (2014), 4601104.
- 2) T. Mito, et al.: IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 23, No. 3, (2013), 4602905.

ヒートパイプ冷却高温超伝導磁気浮上コイルの開発

Developments of HTS levitation coil cooled by heat pipes

大迫 智弥, 川越 明史(鹿児島大); 三戸 利行(NIFS); 平野 直樹(中部電力)
 OSAKO tomoya, KAWAGOE akihumi (Kagoshima univ.);
 MITO toshiyuki (NIFS); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co., Inc.)
 E-mail: k0429229@kadai.jp

1. はじめに

我々は、磁気浮上型液体水素貯蔵タンクの開発を目指して、伝導冷却型高温超伝導磁気浮上コイルの開発を行っている。本貯蔵タンクは、低熱侵入による高い貯蔵効率を有する。また、地震動を抑制する制御運転を浮上コイルが行うことによって、地震に対する強靱さも持つ。この地震動抑制運転中は、浮上コイル内で交流損失が発生して巻線温度が上昇することが予測される。本研究では、この上昇温度を十分に抑制するために、従来よりも熱輸送特性が格段に優れるヒートパイプの使用を検討している。今回は、ヒートパイプを用いた伝導冷却型高温超伝導コイルの実現性を示すために、Bi-2223 多芯テープ線を用いたコイルにヒートパイプを組み込んだテストコイルの設計を行ったので、その内容について報告する。

2. テストコイル

Table 1 にテストコイル及びヒートパイプの仕様を示す。ヒートパイプの作動ガスを H_2 とした場合、被冷却体との接触熱抵抗を考慮に入れた等価熱伝導率は約 $1000 W/mK$ と非常に高い。厳密には温度依存性があるが、今回は一定値としている。設計したテストコイルは、440 ターンのシングルパンケーキコイル 2 個で、ヒートパイプを挟む構造とした。コイルは、内直径 150mm、外径 472 mm である。ヒートパイプは、板状に成形されており、幅 95 mm、長さ 225 mm、厚み 5mm のものを使用した。この板状のヒートパイプを放射状に配置する構造とした。ヒートパイプの内径側と外径側の両端を G.He で冷却することを想定している。巻線線材は、厚み 0.3mm、幅 4 mm の Bi-2223 テープ線材を想定している。運転温度は 20K としている。

3. 解析モデルと解析結果

上述のようなテストコイルを、地震動抑制運転を模擬した交流運転した場合に、どの程度温度が上昇するかを解析した。そのために、磁場分布、損失分布、温度分布の解析を行った。磁場分布は、線電流が作る磁界を重ね合わせることで解析し、交流損失の計算は、求めた磁場分布をもとに、ピーン・ロンドンモデルを用い、線材断面を楕円近似した評価式を用いて求めた。解析した発熱密度分布を Fig. 1 に示す。この時の通電条件は、交流電流振幅 300 A、周波数 0.2 Hz とした。温度分布は、有限要素法解析ソフト ANSYS®を用いた定常伝熱解析を行って求めた。

伝熱解析のモデルは、Fig. 2 に示すような 1/8 モデルとし、発熱密度分布を、径方向に 20 分割したモデルに与えた。すなわち、1 分割分に与える発熱密度は、22 ターン分の発熱密度の平均値である。また電気絶縁層の熱抵抗を考慮するために、厚み 0.08 mm のカプトンテープ 22 枚分を 1 分割毎に挿入している。

Fig. 2 に伝熱解析結果を示す。比較のために、ヒートパイプの熱伝導率を、市販されている窒化アルミの熱伝導率($100 [W/mK]$)に置き換えた解析結果も示す。ヒートパイプを用いた方が到達温度を大きく低減できていることがわかる。300A 通電時の最大垂直磁界は 0.63T であり、この磁界中で 300A を通電できる許容温度を求めると、約 30K であった。窒化アルミ

を用いる場合、その許容温度を大幅に超えている。それに対しヒートパイプを用いる場合には、到達温度は 24 K と非常に低く抑えられており、余裕をもった運転が可能になることがわかる。以上のことより、ヒートパイプを用いた場合に、コイルの性能を大きく向上できる可能性があることがわかった。

Table 1 Parameters of a test coil and heat pipe

Test coil		Heat pipe	
Inner radius [m]	0.075	Length [mm]	225
Outer radius [m]	0.237	Width [mm]	95
Height [m]	0.0065	Thickness [mm]	2.5
Turns	440 x 2	Thermal Conductivity [W/mK]	1000
Current [A _p]	300		

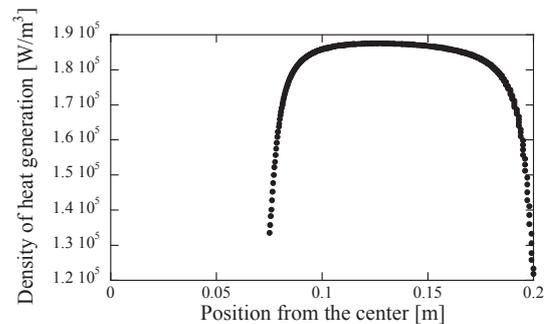


Fig. 1 Profile of heat generations in the test coil

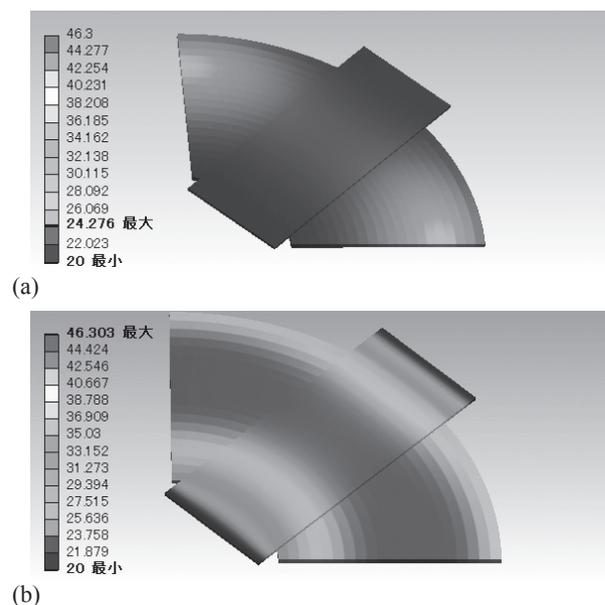


Fig. 2 Temperature distributions of test coils, (a) Heat pipe, (b) AlN.

参考文献

T. Mito et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) 3A-P05

HTS コイル開発プロジェクト-共通基盤技術の開発 (1) — 全体概要 —

Development of HTS Coiling Technologies

Common Core Technologies for HTS Coils (1) - Overview of the project -

和泉輝郎, 町敬人, 衣斐頭, 中岡晃一, 塩原融 (産業用超電導線材・機器技術研究組合, 超電導工学研究所); 岩熊成卓, 木須隆暢, 金子賢治 (産業用超電導線材・機器技術研究組合, 九州大学); 今野雅行 (産業用超電導線材・機器技術研究組合, 富士電機); 梅野高裕 (産業用超電導線材・機器技術研究組合, 大陽日酸); 小泉勉 (産業用超電導線材・機器技術研究組合, 昭和電線ケーブルシステム); 野田耕司 (放射線医学総合研究所); 川越明史 (鹿児島大学); 吉田隆 (名古屋大学); 雨宮尚之 (京都大学); 加藤丈晴 (ファインセラミックスセンター); 三浦正志 (成蹊大学); 松本要 (九州工業大学)

IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira, NAKAOKA Koichi, SHIOHARA Yuh (iSTERA, SRL-ISTEC);

IWAKUMA Masataka, KISS Takanobu, KANEKO Kenji (iSTERA, Kyushu Univ.); KONNO Masayuki (iSTERA, Fuji Electric Co.);

UMENOTakahiro (iSTERA, TAIYO NIPPON SANSO); Tsutomu Koizumi (iSTERA, SWCC);

NODA Koji (NIRS); KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);

KATO Takeharu (JFCC); MIURA Masashi (Seikei Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)

(E-mail: izumi@istec.or.jp)

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材は、高温高磁場で高い超電導特性を示すことから様々な応用で期待されている。平成 25 年度より経済産業省から受託 (平成 27 年度からは、日本医療研究開発機構 (AMED) に所管替え) により実施している「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト (以下 HTS コイル PJ)」では、医療用機器への応用を念頭に置いた開発が行われている。本プロジェクトでは、Table 1 に示した、5 つのテーマが設定されている。

Table 1 Themes of HTS Coiling Project

1. 高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発	① 高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発
	② 高磁場コイルシステムの研究開発
2. 高温超電導可変磁場コイルの研究開発	③ シンクロトロン型加速器本体マグネット用コイル
	④ 粒子線ビーム経路部・照射部用コイル
3. 共通基盤技術の研究開発	⑤ 共通基盤技術の研究開発

Table 1 中のテーマ 1 (①及び②) では、MRI を開発対象として、供給不安が危惧されるヘリウムをできる限り使用しないヘリウムレス機器を目指した開発を実施している。テーマ 2 (③及び④) では、小型化、省エネ化が課題となっている重粒子線加速器への適用を目指している。これらのテーマは、市販線材を用い、実機レベルの HTS コイルの開発を行っている。一方、我々が担当しているテーマ 3 (⑤) では、共通基盤技術開発として、テーマ①～④までのサポート技術開発とともに、我々が保有する高い要素技術を適用した先進的な機器を目指した基盤技術の開発を推進している。本報告では、共通基盤技術の研究開発に関する概要を紹介する。

2. 共通基盤技術の研究開発

上述の通り、本テーマでは高いレベルの要素技術に立脚した先進的な機能を目指した開発を進めている。具体的には、広い温度及び磁場環境の下で非常に高い磁場中特性を有する BaHfO₃ 添加 EuBCO 線材等の適用を想定している。加えて、磁場の時間的均一性確保に重要な遮蔽電流の制御技術及び昇減 (消) 磁などに代表される変動磁場における発熱抑制技術として、スクライビング技術も有効である。これらの基盤技術の更なる開発を行うことにより、液体窒素中での運転等のヘリウムを全く使用しない MRI の開発が可能となる。また、小型で磁場変動時にも発熱を抑制した省エネ型の重粒子線加速器を開発対象としている。

これらの、先進機能を実現するための開発項目として以下

の 3 つのテーマを設定している。(i) 線材及びコイル基礎特性把握では、MRI 及び重粒子線加速器用超電導コイル開発の基盤となる線材の通電特性、磁化挙動やコイル化に必要な機械的特性、更にはコイルにおける磁化緩和挙動などの把握を目指している。(ii) 磁場中高 I_c 線材長尺化技術開発では、MRI 用コイルでヘリウムフリー化を実現し、重粒子線加速器用で磁化及びその緩和抑制、分割細線多芯線材で高特性を維持するために、現在短尺で得られている磁場中高特性線材の低コスト化を含めた長尺化技術開発を行う。ここでは、IBAD 基板上に PLD 法及び MOD 法で超電導層を形成するプロセスにおいて、BaZrO₃ や BaHfO₃ などの人工ピン止め点を挿入した線材での開発を行っている。(iii) 超低発熱線材作製技術開発では、変動磁場運転における発熱抑制に有効な分割細線多芯線材に対応する超超一線材化を実施している。具体的には、特性低下原因の把握と除去に対し、成長制御を含めたプロセス開発を行っている。また、超微細加工技術としてエキシマレーザーを用いたスクライブ技術、分割細線多芯線材の絶縁性能を含めた保護加工技術、更には接続による発熱抑制を目指した超低電気抵抗接続技術を研究開発中である。各テーマの目標値を Table 2 に示す。既に、多くの進展がみられており、平成 27 年度末までに上記目標の達成が見通せる状況まで来ている。

Table 2 Goals in Common Core Technologies for HTS Coils

研究開発項目	最終目標 (平成 27 年度)
(i) 線材及びコイル基礎特性把握	<ul style="list-style-type: none"> コイル状態での磁化緩和挙動に対する線材のスクライビング加工の効果を明確化する。 液体窒素中での運転が可能な脳診断用 3T-MRI 及び全身用 0.5T-MRI 用コイルを設計する。 線材及びコイルの磁化緩和挙動の明確化とその情報に基づいた MRI 及び加速器に適した緩和制御運転方法を提案する。
(ii) 磁場中高 I_c 線材長尺化技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 100m - 500A/cm-w@65K, 3T 850A/cm-w@35K, 10T
(iii) 超低発熱線材作製技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 本研究開発で使用される高温超電導線材の特性均一性、機械強度及び磁化緩和特性を高速に評価出来る技術を確立する。 100m-分割フィラメント幅\leq500μm-I_c値バラッキ 10%以下 接続抵抗\leq5 nΩ

謝辞

本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

HTS 超電導コイル開発プロジェクト-共通基盤技術の開発(2)

- 遮蔽電流の減衰促進 -

Development of HTS Coiling Technologies – Common Core Technologies for HTS Coils (2)

- Enhancement of Decay of Induced Shielding Current in REBCO Coils for MRI -

岩熊 成卓, 槻木 優樹, 鍋倉 航平, 上野 達人 (iSTERA/九大);

和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 颯 (iSTERA/ISTEC); 富岡 章, 今野 雅行 (iSTERA/富士電機)

IWAKUMA Masataka, TSUKIGI Yuhki, NABEKURA Kouhei, UENO Tatsuhito (Kyushu Univ.);

IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (ISTEC); TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co.Ltd)

E-mail: iwakuma@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

産業用超伝導線材・機器技術研究組合(iSTERA)は、国立研究開発法人 日本医療研究開発機構より、未来事業を実現する医療機器・システム研究開発事業「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト-共通基盤技術の研究開発」を受託し、REBCO 超伝導線材を用いた MRI 用超伝導マグネットの研究開発を行っている。

この開発に際する最大の問題は、REBCO 線材印加磁界の線材幅広面垂直成分により誘起される遮蔽電流が大きく、かつ時間的に変化し、これが ppm オーダの一様性が要求されるマグネット発生磁場を空間的、時間的に著しく乱すことにある。我々は、誘起される遮蔽電流とこれによる磁場の乱れを定量的に把握し、その低減策を案出することを目的として、REBCO 線材を用いて小型テストコイルを製作し、サブクール液体窒素中で直流バイアス磁場を印加して、通電中の中心磁場を測定した。その結果として、遮蔽電流の減衰時定数の通電電流依存性を明らかにするとともに速やかな減衰現象を観測したので報告する。

2. 実験

IBAD-PLD 法により5mm幅30m、100m長 REBCO 線材を製作し、これらを GFRP ボビンに、巻内径 78mm、巻線高100mm の多層ソレノイド状に巻いてテストコイルとした。外観を Fig.1に示す。これを、室温ボアを持つ外径 186mm φ の GFRP 製クライオスタットに挿入し、この全体を、巻内径 270mm、高さ 365mm の NbTi-3T 超伝導マグネットを装填した室温ボア 190mm φ を持つ GFRP 製クライオスタット内部に装着した。Fig.2 に全体の組合せ配置を示す。

まず、テストコイルを 65-77K のサブクール液体窒素中で浸漬冷却し、NbTi マグネットにより永久電流モードで 0.5-2T のバイアス磁界を印加した。この状態で、5ppm/8h の安定度を持つ高安定電源を用いて、テストコイルにステップ状に通電し、テストコイル中心の磁界を高精度ホール素子で観測した。

3. 実験結果

シャント抵抗を用いて測定したテストコイル通電電流波形の一例を Fig.3 に、この場合にホール素子で観測したテストコイル中心磁界の変化を Fig.4 に示す。REBCO 線材に誘起される遮蔽電流が作る磁界により、増減磁ともにコイル中心磁界は通電電流にある遅れ時間を持って追従する。Fig.5 に 65K、1T バイアス磁界中で通電電流 I_{op} を 60A、80A、100A、103A と大きくした場合のコイル中心磁界の変化を示す。 $I_{op}=80A$ までは、 I_{op} が大きくなるにつれ、初期の遮蔽電流減衰の時定数 τ_1 が大きくなったが[1]、 I_{op} が 80A を越えると τ_1 は急激に短くなり、遮蔽電流は速やかに減衰した。これは I_{op} が臨界電流 I_c に近づき、線材に等価抵抗が発生したためであると考えられる。65-77K で数Tを発生しうる BaHfO₃ 人工ピンニングセンター入り EuBCO 線材を使用することにより[2]、液体窒素浸漬冷却のMRI用超伝導マグネットが製造可能となり I_c 近傍までの通電で、遮蔽電流による発生磁場の乱れも速やかに解消されるものと期待される。

参考文献

1. K. Nabekura, et al.: Abstracts of This CSJ Conference, 2P-p21 (2015)
2. T. Izumi, et al.: Abstracts of This CSJ Conference, 3A-p9 (2015)

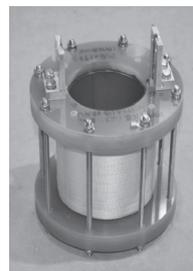


Fig. 1 Test Coil

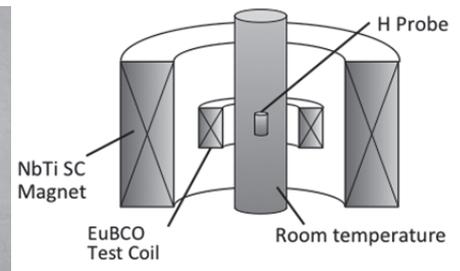


Fig. 2 Arrangement of Testing Apparatus

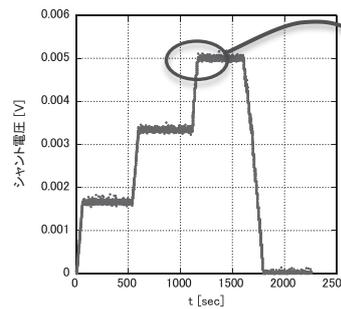


Fig. 3 Trans. Current Pattern

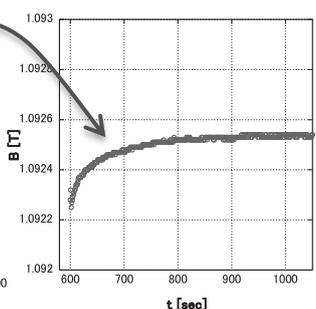


Fig. 4 Actual Magnetic Field

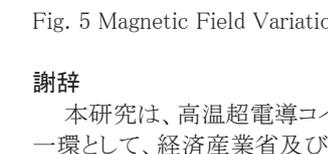
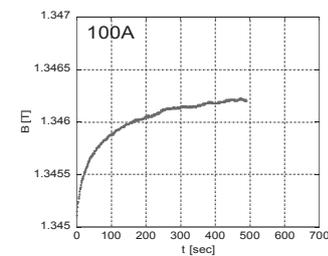
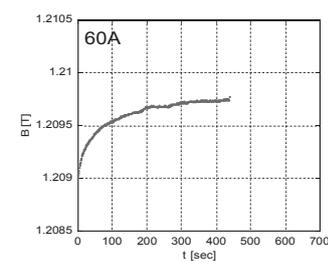


Fig. 5 Magnetic Field Variation with Current as a Parameter

謝辞

本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

HTS コイル開発プロジェクト-共通基盤技術の開発 (3)

— 長尺磁場中高 I_c 線材の開発 —

Development of HTS Coiling Technologies

Common Core Technologies for HTS Coils (3) Development of High I_c (B) Long Coated Conductors

和泉輝郎,衣斐顕,中岡晃一,吉田朋,木村一成,高木裕司,塩原融(産業用超電導線材・機器技術研究組合,超電導工学研究所);岩熊成卓,木須隆暢,金子賢治(産業用超電導線材・機器技術研究組合,九州大学);中村達徳,小泉勉(産業用超電導線材・機器技術研究組合,昭和電線ケーブルシステム);岩熊成卓,木須隆暢,金子賢治(産業用超電導線材・機器技術研究組合,九州大学);吉田隆(名古屋大学);加藤丈晴(ファインセラミックスセンター);三浦正志(成蹊大学);松本要(九州工業大学)

IZUMI Teruo, IBI Akira, NAKAOKA Koichi, YOSHIDA Tomo, KIMURA Kazunari, TAKAGI Yuji, SHIOHARA Yuh (iSTERA, SRL-ISTEC); NAKAMURA Tatsunori, KOIZUMI Tsutomu (iSTERA, SWCC); IWAKUMA Masataka, KISS Takanob, KANEKO Kenji (iSTERA, Kyushu Univ.); KONNO Masayuki (iSTERA, Fuji Electric Co., Ltd.); UMENO Takahiro (iSTERA, TAIYO NIPPON SANSO); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); KATO Takeharu (JFCC); MIURA Masashi (Seikei Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)
(E-mail: izumi@istec.or.jp)

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材の医療用機器への応用を目指している「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」の中で、我々は「共通基盤技術の研究開発」を担当している。ここでは、ヘリウムを全く使用しないMRIや小型で磁場変動時にも発熱を抑制した省エネ型の重粒子線加速器などの先進的な機器を目指した基盤技術の開発を推進している。本報告では、共通基盤技術開発の一環として高温運転を実現するために必要な長尺磁場中高 I_c 線材の開発に関する開発状況を紹介する。

2. 長尺磁場中高 I_c 線材の開発

本テーマでは、ヘリウムを全く使用しない機器を実現するための目標値として設定されている目標 (100m - 500A/cm-w@65K, 3T 及び 850A/cm-w@35K, 10T) の達成を目指して IBAD 基板上に PLD 法及び MOD 法により超電導層を形成する手法で開発を進めている。PLD 法では、従来の研究開発でその有効性が確認されている BaHfO₃(BHO)を用いた線材で高い特性を有した線材の長尺化、高速化の開発を行っている。一方、MOD 法においては、同法に有効なピン止め点として実績のある BaZrO₃(BZO)人工ピンに対し、そのサイズ分散を制御するプロセスの開発を行うことによる高特性化とともに長尺化の開発を行っている。

3. 開発状況

3-1 IBAD-PLD 線材

我々の従来の研究において、GdBCO 膜内に分散させることで様々な利点を見出した BHO 人工ピン止め点線材の特長を列記すると、

- 1) 厚膜時の磁場中特性の飽和傾向が抑制
- 2) I_c の磁場角度依存性における高い等方性
- 3) 広い温度、磁場領域で高 I_c の優位性を維持

となる。この GdBCO+BHO 線材で 77K, 3T の条件下において 85A/cm 幅(3 μ m^l)の高い磁場中特性を実現した。他の BMO (BaMO₃, M:Zr, Sn 等) 人工ピン材料とのナノロッドの形態的な差異を調査すると、BHO は細く(平均径~4.5nm ϕ)短く、軸の方向が分散していることが明らかになった。更に、その形態が膜厚に依存しないのも特徴であり、これらの反映として上記の特徴を発現していると考えられる。しかしながら、更なる磁場中高 I_c を目指して 3 μ m^l以上に厚膜化すると I_c 値が再び飽和する傾向が見られた。これに対し、EuBCO との組み合わせにより磁場中の高 I_c 化と共に上述の I_c の飽和現象も抑制できることを見出した。微細組織の観察によれば、厚膜領域における異方粒が GdBCO に比べて抑制されていることが分かった。Table 1 には、EuBCO+BHO 膜の代表的特性を示す。

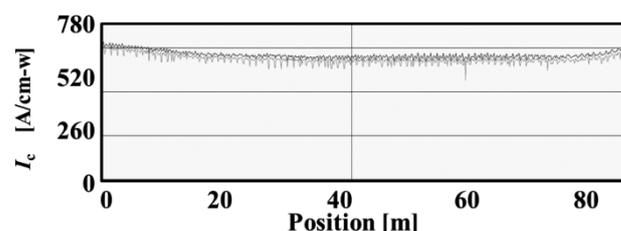
Table 1 Typical I_c values of EuBCO+BHO(3.5mol%)tape

	I_c (B//ab)	I_c (B//c)	I_c (min.)
77K, 3T	178	166	141
65K, 3T	584	411	569

(単位: A/cm 幅)

この線材は、Table 1 からわかる通り、液体窒素温度においても高い磁場中特性を示し、65K においては機器を設計することが可能なレベルに達している。

続いて、この線材の長尺を試みている。Fig.1 には、ホール素子法で評価した 94m 長 EuBCO+BHO 線材(3.6 μ m^l)の 77K 自己磁場中特性の長手方向の分布を示す。高い I_c レベルで均一な線材が実現できていることがわかる。端部を切り出して、磁場中特性を評価したところ、 I_c (min.)値で 124A/cm 幅@77K, 3T を確認しており、長尺線材においても均一で高い磁場特性を実現することができている。最近では、高速成膜の開発に取り組み、低コストが見通せる速度での成膜技術の開発が進行している。

Fig.1 I_c distribution of 94m EuBCO+BHO Coated Conductor

3-2 IBAD-MOD 線材

低コストを特徴とする MOD 線材では、従来の研究において YGdBCO 膜内に BZO ナノ粒子を分散させることに成功している。特に、超電導相形成の本焼プロセスに中間熱処理を加えることで BZO の微細化が進み、磁場中特性の向上に成功している。代表値として、68A/cm 幅@77K, 3T 及び 315A/cm 幅@65K, 3T の特性を得ている。長尺線材としては、124m 長線材で 50A/cm 幅@77K, 3T を得ている。

最近では、更なるプロセス改善により、更に高い磁場中特性の実現に成功している。

4. 謝辞

本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

HTS 超電導コイル開発プロジェクト-共通基盤技術の開発(4) - スクライブによる遮蔽電流の抑制 -

Development of HTS Coiling Technologies - Common Core Technologies for HTS Coils (4) - Suppression of Shielding Current in REBCO Coils for MRI by Scribing -

岩熊 成卓, 槻木 優樹, 鍋倉 航平, 上野 達人, 吉田幸市, 佐藤誠樹 (iSTERA/九大);
和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 颯 (iSTERA/ISTEC); 富岡 章, 今野 雅行 (iSTERA/富士電機)

IWAKUMA Masataka, TSUKIGI Yuhki, NABEKURA Kouhei, UENO Tatsuhito, YOSHIDA Kouichi, SATO Seiki (Kyushu Univ.);
IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (ISTEC); TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co.Ltd)
(E-mail: iwakuma@sc.kyushu-u.ac.jp)

1. はじめに

本予稿集 3A-p8 でも報告したように、REBCO 線材を用いて MRI 用超電導マグネットを開発するに当たっての最大の問題は、線材幅広面に印加される磁界により誘起される遮蔽電流がマグネット発生磁場を乱すことである。我々は、これまでに REBCO 線材のスクライビング加工によるマルチフィラメント化と特殊巻線工程の組合せにより、巻線形状での交流損失の低減に成功し、これを NEDO プロジェクトにおける液体窒素冷却 3φ-66/6.9kV-2MVA 超電導変圧器の試作にも適用してきた[1]。交流損失は、線材に誘起される遮蔽電流が作る磁気モーメントを印加磁界について一周期積分したものであるから、交流損失の低減は磁化すなわち遮蔽電流の低減と等価である[2]。よって、直流マグネットにおいても、REBCO 線材のスクライビング加工により、遮蔽電流が作る磁界の影響は抑制されるはずである。

これを検証し、MRI 用マグネットの開発に資するため、本研究では、スクライビング加工した REBCO 線材を用いて小型テストコイルを製作し、サブクール液体窒素中で直流バイアス磁場を印加して、通電中の中心磁界を測定し、無分割線材の場合と比較、検討した。

2. 実験

IBAD-PLD 法により 5mm 幅 30m 長 EuBCO 線材を作製し、これをレーザスクライビングにより図 1 に示すように 4 本フィラメント線材に加工した。これをソレノイド状に内径 78mm、高さ 100mm で GFRP ボビンに巻き、19 ターン×6 層のテストコイルとした。これを永久電流スイッチ付き NbTi-3T 超電導マグネット内に配置し、65-77K のサブクール液体窒素中で浸漬冷却して 0.5-2T のバイアス磁界を印加した上で、テストコイルにステップ状に通電した。コイル中心磁界の計測の要領等は無分割線材を用いた本予稿集 3A-p8 と同様である。

3. 実験結果

フィラメント分割した場合も、通電電流 I_{op} を大きくするとともに遮蔽電流の減衰時定数が長くなる傾向は同じであった。図 2 に 66K、0.5T バイアス磁界中で通電電流 I_{op} を 120A まで 0.18A/sec で掃引し、掃引を止めた場合のコイル中心磁界の変化を示す。300sec 程度で遮蔽電流減衰し、磁界がほぼ一定になっていることがわかる。比較のために、図 3 に無分割線材を用いたテストコイルでの観測結果を示している。フィラメント分割することにより、誘起される遮蔽電流が減少するとともに、その減衰が速くなっていることがわかる。また、本予稿集 3A-p8 で示したように、 I_{op} を I_c 近傍まで通電することにより、さらに発生磁界が一様になる時間は短くなった。

今回の一連の研究により、スクライビング加工によるマルチフィラメント化により、REBCO 線材の遮蔽電流の抑制と減衰促進が可能であり、冷却が良いサブクール液体窒素中での I_c 近傍までの通電により、さらに減衰促進が可能となることが明らかとなった。

参考文献

1. M. Iwakuma, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, No.3, Article No.5500206 (2015)
2. M. Iwakuma, et al.: SUST Vol.19, pp.350-358 (2006)

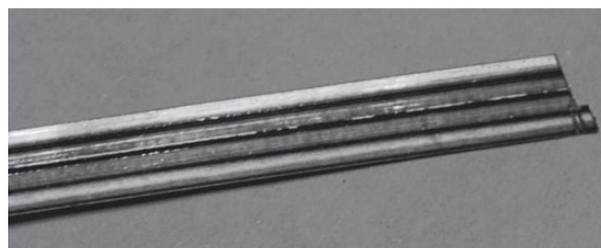


Fig. 1 Photograph of a laser-scribed 4-filament REBCO tape.

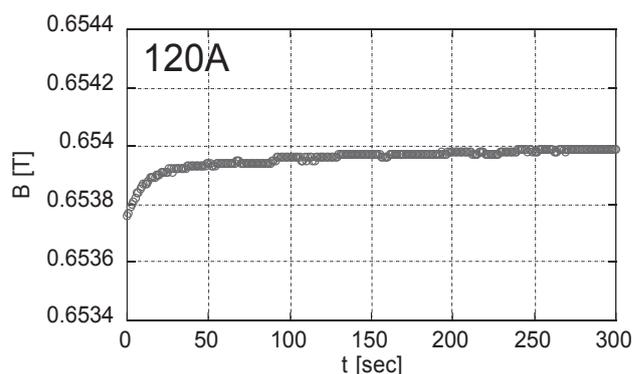


Fig. 2 Variation of the magnetic field at the center of a test coil wound with a laser-scribed 4-filament tape.

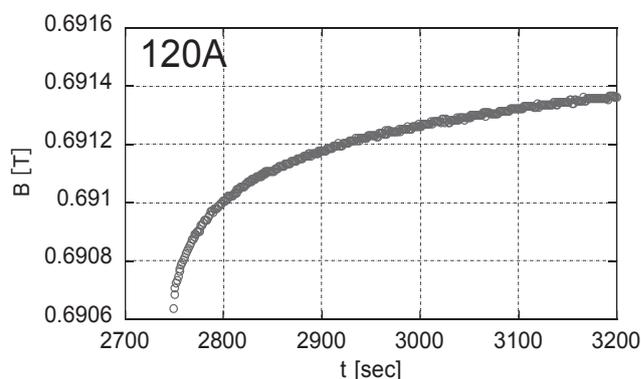


Fig. 3 Variation of the magnetic field at the center of a test coil wound with a non-scribed tape.

謝辞

本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

HTS 超電導コイル開発プロジェクトー共通基盤技術の開発 (5)

ー スクライビング細線加工の進捗と特性 ー

Development of HTS Coiling Technologies – Common Core Technologies for HTS Coils (5)
- Improvement of scribing technique and characterizations -

町 敬人, 劉 勁, 衣斐 顕, 和泉 輝郎(産業用超電導線材・機器技術研究組合, 超電導工学研究所);

岩熊 成卓, 木須 隆暢(産業用超電導線材・機器技術研究組合福岡分室, 九州大学);

富岡 章, 今野 雅行(産業用超電導線材・機器技術研究組合川崎分室, 富士電機)

MACHI Takato, LIU Jin, IBI Akira, IZUMI Teruo (iSTERA, SRL-ISTEC); IWAKUMA Masatak, KISS Takanobu (iSTERA, Kyushu Univ.);
TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (iSTERA, Fuji Electric)

E-mail: machi@istec.or.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)をMRI や医療用加速器のマグネットコイル等に用いる「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」の中で、我々は「共通基盤技術の研究開発」を担当している。低温超電導マグネットによく知られているように、遮蔽磁場の影響や交流損失を低減するためには、線材をマルチフィラメント化することが最も効果的である。我々はREBCO 線材においてマルチフィラメント構造を実現するためにレーザーを用いたスクライビング加工技術の開発を行っており^[1]、本報告では、スクライビング技術および細線化線材の特性について紹介する。

2. スクライビング加工技術

我々は、線材へのダメージが少なく、フィラメント幅の制御が容易なスクライビング加工技術としてエキシマレーザー照射による加工技術を開発している。従来の化学エッチングによるスクライビングでは、形成される溝幅にムラがあり溝幅の低減が困難であることに加えて、オーバーエッチングが避けられず、剥離強度が低下するという欠点を有していた。レーザー照射のみのスクライビング加工は、ダメージの少ないUV 波長エキシマレーザービームを長方形に整形して照射することで安定化層と超電導層を切削し、フィラメント間絶縁も実現する方法である。そのため長方形ビーム内でレーザー強度を均一にするようにし、またRTR 加工装置を開発して長尺線材のスクライビング加工を実現している。

3. 細線化された線材の特性

Fig.1 にレーザー照射のみのスクライビング加工した溝周辺の光学写真および断面 SEM 像の観察例を示す。光学写真において矢印で示した箇所がスクライビングされた溝(Slot)である。これは50 μ m \times 500 μ mのビームを用いた場合のスクライビング加工例で、ビームの幅と同等の溝幅が実現していることが分かる。溝で分断されたフィラメント間の電気抵抗は1M Ω cm以上を示し、十分な絶縁性が確保できた。

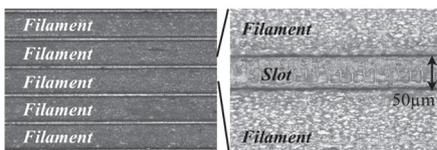
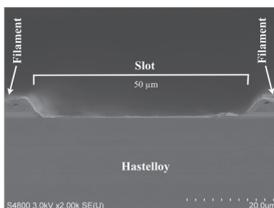


Fig.1 Optical microscope photograph and SEM image around scribed slot.



細線化された線材のフィラメント間の I_c のバラツキはマグネットの不整磁場の一因となる可能性があり低減する必要がある。

ある。 I_c のバラツキは、幅および長さ方向に均一な線材作製および加工プロセスを適正化することで向上を図っている。現状でのバラツキは、フィラメント毎の I_c を測定した Fig.2 のデータから計算すると、Max-Min 法(最大値と最小値の差を平均値で割った値)で約 12%, 1s 法(標準偏差 σ を平均値で割った値)で約 4%にまで低減している。ちなみに全フィラメントの合計 I_c は419 Aで、加工による低下は15%未満であった。

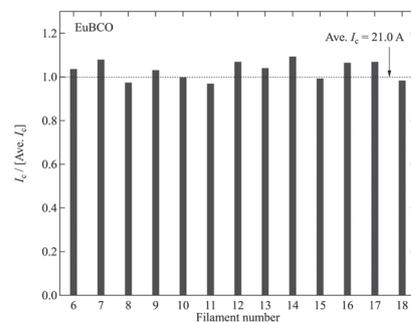


Fig.2 I_c distribution in width direction of scribed specimen into 20-filaments.

Fig.3 にフィラメント幅が異なる3種類の試料について65 K, 3 Tでの磁化の時間変化を示す。初期状態の磁化の絶対値はM-H曲線の磁化の値が時間ゼロM(0)から50%まで緩和した値であると仮定($M(\infty)-M(0) \approx 2IM$)して磁化の値を規格化した。未加工線材は5 $\times 10^4$ sec 経過後に30%程度に緩和しただけであったが、フィラメント幅の減少とともに顕著に短縮される結果となった。このようにスクライビング加工により遮蔽電流消失までの時間短縮が可能である事が分かった。

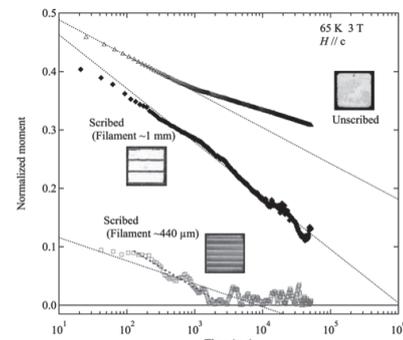


Fig.3 Time dependence of magnetic moment for specimens with different filament width.

謝辞

本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

[1] T. Machi, et al., Supercond. Sci. Technol. 26 (2013). (See also ISS2013 abstract.

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年春)

-プロジェクト進捗概要-

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 spring)

- Project status -

戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 大谷 安見, 高橋政彦, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);
 石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 野口 聡(早大/北大); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)
 TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, OTANI Yasumi, TAKAHASHI Masahiko, TASAKI Kenji,
 NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.); NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.);
 URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)
 E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

1. はじめに

一般病院にも設置可能となるコンパクトな 10 T 級(9.4T) MRI 用磁石を最終目標として、REBCO 線材を用いた高温超電導磁石の研究開発を進めている。開発の試作・検証における最重要パラメータは、発生磁場とコイル径である。本プロジェクトにおける試作・検証規模を Fig. 1 に示す。10 T 発生時の検証はテストコイルのひとつである極小口径コイルで実施し、大口径化の検証は室温ポアを有するモデル磁石(小型磁石)で実施する。今年度はプロジェクト最終年度となり、テストコイルや小型磁石の試作・検証で得られた知見を基に、最終目標であるヒト全身用 MRI 磁石の試設計、解析評価をおこなうことで、基盤技術を確立することを目指している。

2. 研究開発の体系と進捗

高温超電導磁石のコイル保護は難しく、あらゆる応用機器で共通の課題になっている。そのためコイル保護を最上位課題として体系的に研究開発を進める必要があると考えており、それをまとめたものを Fig. 2 に示す。現時点でコイル保護法として想定しているのは、熱暴走限界を正確に予測し、温度等を監視することで熱暴走する前に電流を下げる方法である。その実現には、信頼性が高い伝導冷却構造を有し、かつ特性劣化がない超電導コイルを製作できる必要があり、ターン間を離形したパンケーキ巻線の含浸コイルでその実現を目指している。一方、無絶縁コイルもコイル保護の有効な手段と考えており、「含浸」無絶縁コイルの開発も進めている。

MRI 用磁石では、空間的に高均一で時間的に高安定な磁場を発生させることが必要となる。高温超電導磁石でそれを実現するには、線材内部に生じる遮蔽電流による不整磁場を正確に予測する技術、テープ形状の線材をパンケーキ巻線することにもなる寸法制約下でコイル寸法や配置を求める最適化設計技術、その設計寸法を実現する高精度巻線技術等が必要であり、テストコイルの設計、試作、評価等を通じて研究を進めている。これまでに、極小口径コイル等において遮蔽電流磁場を解析で精度良く再現できることを確認した。また、最適化設計技術では、線材のテープ形状の制約だけでなく、厚さ数 μm の超電導層に電流が流れている条件を組み込むことが可能となっている。また、高精度巻線技術に関しては、室温ポアを有するスプリットコイル(1/2 サイズコイル)を試作し、ホール素子の測定精度レベルでは磁場分布が均一になっていることを確認した。今後、詳細評価を進めていく。

3. まとめ

REBCO 線材を用いた MRI 用高温超電導磁石開発プロジェクトの研究開発進捗について述べた。最終年度となる今年度は、これまでの成果を結集して小型磁石の試作、評価をおこない、高磁場 MRI 用磁石に必要な基盤技術の確立を目指す。

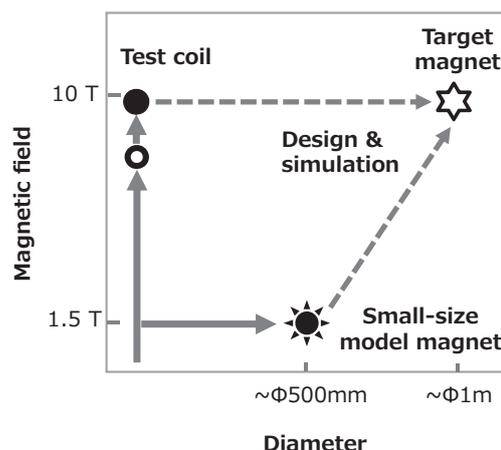


Fig. 1 Revised plan of test coil and model magnet

Vision	REBCO magnet (High performance and cost down)	Conduction cooled magnet (L,He free)
<R&D goal> Coil protection	Prevention of thermal runaway by monitoring coil temperature	NI coil
Requirement	Precisely prediction of V-I characteristics of HTS coils	Reliable cooling structure under conduction-cooled conditions
Solution at present	➤ Impregnated coil ➤ Pancake winding	
R&D for common problem	Fabrication of degradation free coil	Precise data of "lift factor" (I_c , n-index)
R&D for target applications	Management of screening current field	Winding with accurate dimensions
	Optimization of coil design	Fabrication of 3D shaped coil with tape conductor

Fig. 2 R&D philosophy of HTS magnet

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年春) -1/2 サイズコイル試験-

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 spring)

-Test results of a conduction-cooled REBCO magnet with a room temperature bore of 200 mm-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 大谷 安見, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);
石山 敦士(早大);植田 浩史(早大/阪大);野口 聡(早大/北大);浦山 慎一, 福山 秀直(京大)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, OTANI Yasumi, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji,
KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);
NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

MRI 磁石に必要な均一な磁場空間を乱す不整磁場要因として、遮蔽電流磁場およびパンケーキコイルの製作誤差などが考えられる。そこで、内径 ϕ 400 mm のパンケーキコイル 12 枚で構成された ϕ 200 mm の室温ボアを有する伝導冷却型のマグネット(1/2 サイズモデルコイル)を試作し、空間磁場分布を評価することで不整磁場を評価することを目的としている。本発表では、1/2 サイズモデルコイルの設計および伝導冷却通電試験結果について報告する。

2. モデルコイル設計

線材幅 5 mm、線材厚 0.13 mm の RE 系線材を使用したシングルパンケーキコイルを用いた 1/2 サイズモデルコイルのコイル配置を検討した。前提条件として、コイル内径 ϕ 400 mm、コイル数 2 対(4 ユニット)、均一磁場空間 100 mm DSV、中心磁場 1 T、運転電流値 300 A 以下とした。シングルパンケーキコイルのターン数、各ユニットコイル間距離をパラメータとして、空間磁場分布を計算し、不整磁場が極小となるコイル配置を導出した。コイル配置を Fig.1 に示す。外径が異なる 2 種類のパンケーキコイル 12 枚で構成され、線材全長は 3.2 km である。球面調和関数の各次の係数を Table1 に示す。

3. モデルコイル試作・通電試験

コイルサイズおよびコイル電流密度は、不整磁場要因となるため、シングルパンケーキコイルのターン数は設計通りとし、巻線途中にコイル寸法を測定しながら、コイル外径寸法が設計寸法と誤差 0.2 mm 以下になるように巻線を実施した。また、シングルパンケーキコイル間の軸方向の位置ずれも不整磁場要因となるため、軸方向のずれも 0.2 mm 以下となるように配置した。Fig.2 に試作した 1/2 サイズモデルコイルを示す。各シングルパンケーキコイルは、GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続された厚さ 0.25 mm の高純度アルミ板を介して冷却した。また、最初の通電では、簡易的に磁場精度を測定するため、通常の超電導コイル用電源(電流安定度 0.01%)を用い、ホール素子にて中心磁場および中心から z 軸上の 100 mm の位置の磁場を測定した。通電は、0 A から最大 300 A まで、60 min 励磁、60 min ホールド、60 min 消磁のパターンで通電した。Fig.3 に最大電流通電時の磁場測定結果を示す。また、Fig.3 には磁場計算結果を併せて示している。計算結果との差は、0.05%程度であり、ホール素子の測定精度 0.1%以下であることを確認した。

4. まとめ

RE 系コイルの不整磁場を評価するための、1/2 サイズモデルコイルを試作し、伝導冷却下にて通電試験を実施した。ホール素子による磁場測定の結果、不整磁場が測定精度以下の 0.1%以下であることを確認した。今後は、NMR プローブを用いて、100 mm 級の空間磁場分布を測定し、MRI 撮像に影響を与える不整磁場要因を調査する。

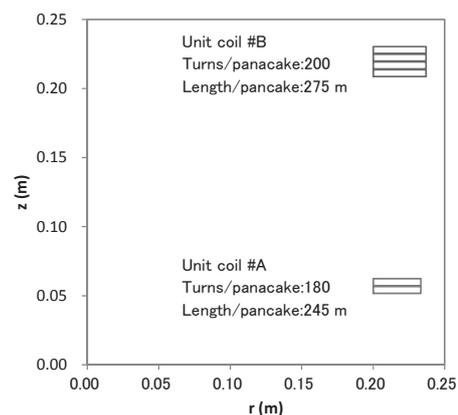


Fig.1 Two-dimensional axisymmetric drawing of coil positions

Table1 Inhomogeneous magnetic field over 100 mm DSV

Name	Z2	Z4	Z6	Z8	Z10	Z12
Value (ppm)	-1.27	6.70	30.0	-6.84	0.54	-0.03

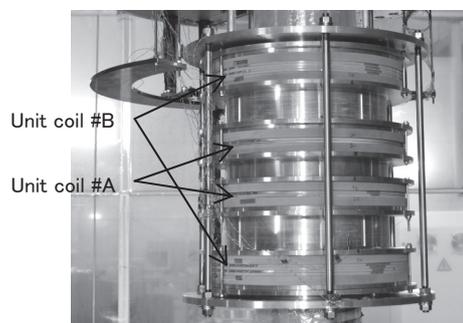


Fig.2 Photograph of a conduction-cooled model magnet

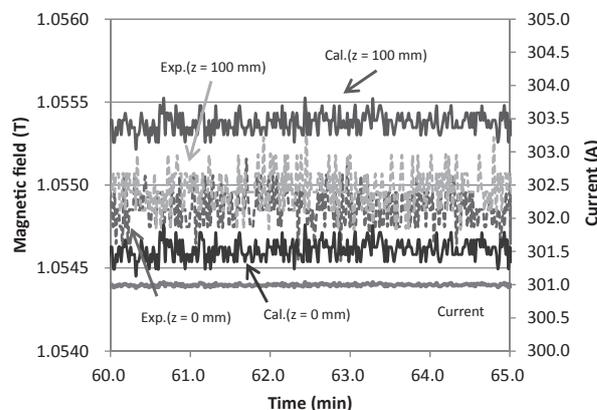


Fig.3 Time dependences of magnetic fields at z = 0 mm and 100 mm

謝辞 本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年春) —含浸無絶縁コイル試験—

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 spring)

—Test results of the impregnated no-insulation REBCO coil—

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 大谷 安見, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);
 石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 野口 聡(早大/北大), 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)
 IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, Otani Yasumi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji,
 KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);
 NOGUUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)
 E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

1. はじめに

ターン間絶縁のない無絶縁コイル構成では、フラックスフロー抵抗が大きくなるとターン間の転流が生じるため、高電流密度設計した REBCO コイルの自律的な保護(熱暴走の回避)が期待されている[1, 2]。一方、伝導冷却方式を想定すると、伝熱パスを形成するため、コイルは含浸されていることが好ましい。しかし、樹脂のような絶縁材を用いた場合、層間抵抗が大きくなり保護できなくなる可能性がある。そこで、樹脂含浸した無絶縁コイル(以下、含浸無絶縁コイル)を試作して過電流通電試験を実施し、熱暴走することなくコイル臨界電流値以上の通電が可能か検証した。本発表では、層間接触抵抗を調べるために行った液体窒素中での遮断試験の結果と、過電流通電試験の結果について報告する。

2. コイル諸元および遮断試験結果

試作した含浸無絶縁コイルの諸元を Table 1 に示す。インダクタンスは計算値である。REBCO 線材に巻線張力を印加しつつ巻線し、エポキシ樹脂で含浸・硬化させた。試作したコイルを Fig. 1 に示す試験回路に組み込み、液体窒素で浸漬冷却した。所定の電流値まで通電した後、直流遮断機(DCCB)を切り、電流、電圧、磁場の減衰を測定した。磁場の測定は、コイル中心に配置したホール素子で行った。磁場の減衰波形から得られた減衰時定数と層間接触抵抗率を Table 2 に示す。算出方法は文献 2 の方法に準拠した。層間接触抵抗率は、非含浸の無絶縁コイルで算出されている $71 \sim 72 \mu\Omega\text{cm}^2$ [2] に対し、今回試作した含浸無絶縁コイルでは $108 \mu\Omega\text{cm}^2$ であった。

3. 過電流通電試験結果

遮断試験の後、通電試験を実施した。コイル臨界電流値を調べるために行った 1 回目の通電では、 42 A (10^{-7} V/cm 相当)まで、コイル n 値は 22 と良好な超電導特性が確認された。次に、 40 A ($6 \times 10^{-8} \text{ V/cm}$ 相当)から、 1 A ずつ電流値を上昇させたところ、VI 特性は徐々に累乗則から外れ、1 回目の通電結果から外挿されるコイル臨界電流値 46 A (10^{-6} V/cm 定義)の約 1.5 倍となる 68 A ($3 \times 10^{-5} \text{ V/cm}$ 相当)まで熱暴走することなく、通電することができた。

4. まとめ

含浸無絶縁コイルを試作し、遮断試験を行った結果、層間接触抵抗率は $108 \mu\Omega\text{cm}^2$ であった。また、液体窒素中で過電流通電試験を実施した結果、熱暴走することなくコイル臨界電流値の約 1.5 倍となる 68 A ($3 \times 10^{-5} \text{ V/cm}$ 相当)まで通電できることを確認した。今後、伝導冷却下での検証を進めるとともに、コイルが大型化した場合でも、保護が可能か調べていく。

謝辞 本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

Table 1 Specification of the test coil.

Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.1
Tape length (m)	8.3
Tape I_c (77 K, s.f.) (A)	110
Inner radius (mm)	50
Outer radius (mm)	60
Number of turns	48
Inductance (μH)	210
Coil I_c (77 K, s.f.) (A)*	46
Coil n-value	22

(*) Coil I_c is defined as 10^{-6} V/cm .

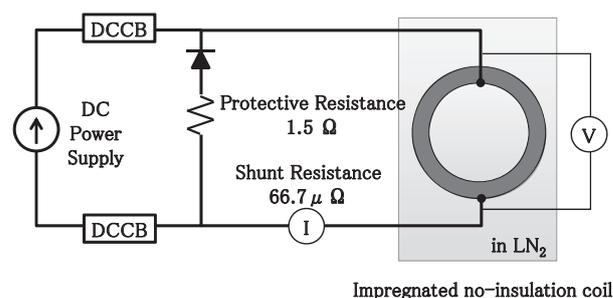


Fig. 1 Schematic drawing of the test circuit.

Table 2 Results of the sudden discharge tests.

Charging current (A)	10	20
Decay time constant (msec.)	286	285
Characteristic resistance ($\mu\Omega$)	734	736
Contact resistance ($\mu\Omega\text{cm}^2$)	108	108

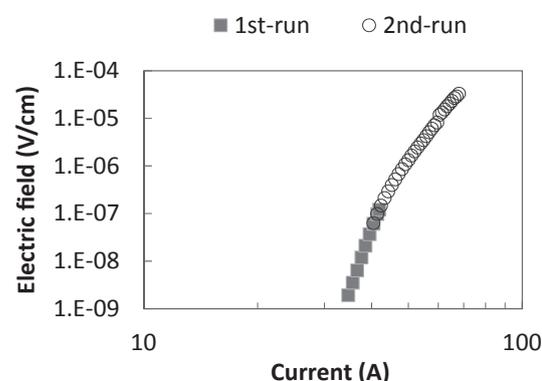


Fig. 2 V-I characteristics of the test coil at 77 K.

参考文献

- S. Hahn, et al.: IEEE Trans. On Appl. Supercond., Vol. 21 (2011) pp.1592-1595
- X. Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 035012

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(‘15 年春)

— 極小口径 10T コイルの遮蔽電流磁場解析 —

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 spring)

- Numerical simulation on screening current in small-bore 10-T class superconducting coil -

植田 浩史(早大/阪大); 石山 敦士(早大); 野口 聡(早大/北大);

岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 野村 俊自, 来栖 努(東芝); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大);

UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.);

IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba);

URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.);

E-mail: heuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、日本医療研究開発機構のプロジェクトである「高磁場コイルシステムの研究開発」で、REBCO コイルを用いた 10 T 級 (9.4 T) のヒト全身用 MRI の実現を目指している[1]。REBCO コイルでは、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによる不整磁場が MRI 磁石に必要な磁場均一度や時間安定性を損なうことが問題となる。そこで、遮蔽電流による不整磁場(以下、遮蔽電流磁場)の影響を定量的に予測する技術の開発が必要となる。今回は、伝導冷却で 10 T 級の磁場が発生可能な内径 50 mm の極小口径コイルの遮蔽電流磁場を 10, 20, 30K の温度で測定した試験結果に対して、三次元電磁場数値解析によって計算した結果について報告する。

2. 極小口径 10T コイル

解析対象のコイルは、幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm (超電導層 1.0 μm) の REBCO 線材を用いた、内径 50 mm, 外径 129 mm, 巻数 240 のシングルパンケーキを 22 段重ねたものである[2]。このコイルは伝導冷却下 10 K で、166.2 A 通電時にコイル中心磁場は 7.66 T 発生する。Fig. 1 に示す位置にホール素子を配置し、10, 20, 30 K のときの遮蔽電流磁場を測定した。

3. 遮蔽電流磁場解析

REBCO 線材の厚み方向で電磁場が一樣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[3]。超電導の I - V 特性は n 値モデルを採用した。 I_c の磁場強度・角度依存性は、各コイルの 77 K におけるコイル I_c の実測値を基に文献[4]のデータを参考に定式化したものを用いた。解析は 10, 20, 30 K について行ったが、磁場強度・角度依存性が得られているのは 30 K の場合だけである。10, 20 K については磁場強度・角度依存性を外挿して用いた。なお、 n 値は 20 一定とした。

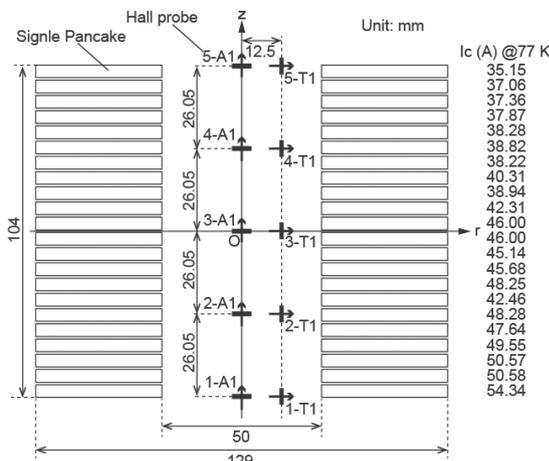


Fig. 1 Schematic drawing of small-bore 10 T coil and location of Hall probes.

10 K 冷却時の遮蔽電流磁場の解析結果を Fig. 2(a) に示す。実験値と解析値に差があるのは、10 K の磁場強度・角度依存性は外挿値であることが原因と考えられる。30 K の結果を Fig. 2(b) に示す。30 K の結果は、定量的にも一致している。30 K に関しては、磁場強度・角度依存性が参考値であるが得られているので、実験値が再現されたと考えられる。遮蔽電流磁場の精度良い予測のためには、 I_c の磁場強度・角度依存性データの取得が欠かせないことが明らかになった。

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。また、解析コードの開発は科研費基盤研究 C (25420253) に依ったことを付記する。

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p05.
2. H. Miyazaki, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p06.
3. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23 (2013) 4100805.
4. V. Selvamanickam, et al., *Supercond. Sci. Technol.* 25 (2012) 125013.

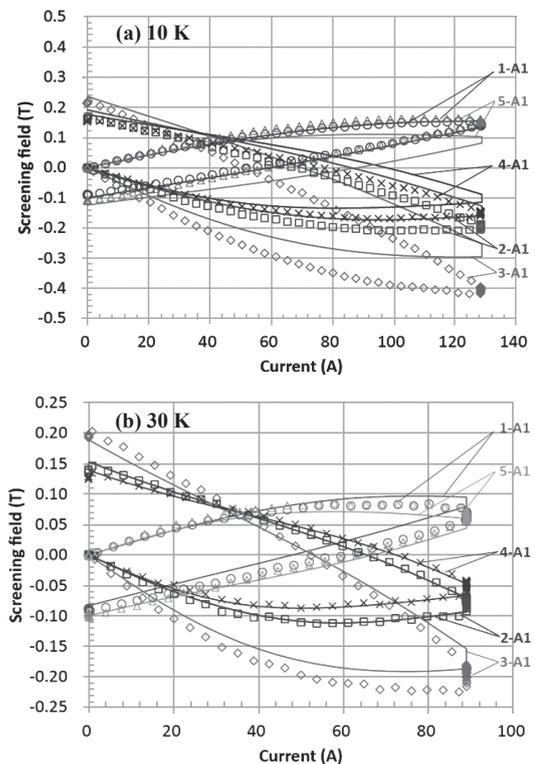


Fig. 2 Experimental and numerical results of axial direction of magnetic field generated by screening current. Plots and solid lines are the experimental and numerical results, respectively.

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年春)

— 均一磁場コイル最適化設計 —

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 spring)

— Optimal configuration design of highly homogeneous field REBCO HTS coils —

野口 聡(早大/北大); 石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);
浦山 慎一, 福山 秀直(京大)

NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);

MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (TOSHIBA);

URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材の断面積は、REBCO 層に比べて、基板などが占める割合が圧倒的に大きい。一般的に、REBCO 線の厚みがおよそ 0.1 mm に対して、REBCO 層の厚みは 1~2 μm 程度であり、50~100 倍となっている。このように、電流通過断面積が著しく小さい場合には、従来までのようにコイル断面全体に電流が流れているとして磁場均一度を正確に評価することはできない[1]。そこで、設計段階から、REBCO 層のみに電流が流れているとして、磁場均一度を評価する必要がある。本発表では、REBCO 層のみに電流が流れていることを考慮し、高均一磁場発生コイルの形状最適化設計を、シミュレーテッド・アニーリング法を用いて実施したので、その結果について報告する。

2. 磁場均一度評価

中心付近のマグネット磁場 B_z は、次の式で表される。

$$B_z(\rho, \theta) = B_z(0,0) \left[1 + \varepsilon_2 \rho^2 P_2(\cos\theta) + \varepsilon_4 \rho^4 P_4(\cos\theta) + \dots \right] \quad (1)$$

ただし、 $B_z(0,0)$ は中心磁場、 ε はマグネット形状から決まる係数、 P はルジャンドル係数である[2]。(1)式の2次以上の高次項を消去させることで、項均一度が達成できる。

通常、シミュレーテッド・アニーリングなどの最適化設計手法を用いた場合、100万~1,000万の異なるコイル形状に対して、(1)式による磁場均一度評価を行う。コイル矩形断面内を一律に電流が流れると仮定した場合には、計算量はさほど多くはない。しかし、REBCO 層のみの形状を評価した場合には、その計算量は膨大となる。単純に、1万ターンのコイルであれば、1万倍の計算量を必要とする。

本報告では、膨大な計算量を要する最適化設計を実現するために、GPGPUを用いて、計算時間の短縮を図った。

3. コイル設計仕様および最適化設計結果

コイルの設計仕様は、以下の通りである。

- ・ 中心磁場: 9.4 T
- ・ コイル内径: $\phi 200$ mm
- ・ REBCO 線材: 5 mm 幅、0.2 mm 厚 (ターン間絶縁含)
- ・ REBCO 層: 2 μm 厚
- ・ ダブルパンケーキキコイルを採用
- ・ パンケーキキコイル間隔: 0.6 mm
- ・ (1)式の2~6次項までを消去(極力小さくする)
- ・ 目的関数: 線材使用量を最少

Fig. 1に最適化設計後の形状を、Table 1にコイルの寸法を示す。また、最適化設計形状に対する(1)式の高次項をTable 2に示す。さらに、DSV 100 mm内の各次数における最大不正磁場も併せてTable 2に示す。6次までの不正磁場成分が十分に小さい設計が行えたことがわかる。

4. まとめ

REBCO 層のみに電流が流れていることを考慮して、9.4-T/ $\phi 200$ -mm のマグネット設計を行った。計算量が膨大になることから、GPGPUを用いて実施した。最適化設計形状は、6次までの成分の不正磁場を0.5 ppm以下にすることに成功した。

謝辞 本研究は、日本医療研究開発機構の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「高磁場コイルシステムの研究開発」を通じて実施された。

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 90 (2014)
2. S. Noguchi: J. Appl. Phys., Vol. 115 (2014) 163908

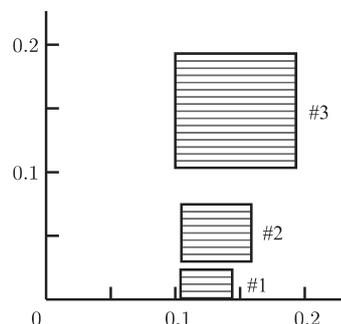


Fig. 1. Optimized configuration of 9.4-T REBCO magnet.

Table 1. Specifications of optimized 9.4-T REBCO magnet

Coil No.	#1	#2	#3
Inner radius (mm)	104.027	104.530	100.000
Outer radius (mm)	143.827	158.730	193.200
No. of turns per pancake	199	271	466
No. of pancakes	8	16	32
Distance between coils	2.002	59.862	206.950
Operating current (A)	199.951		

Table 2. Coefficients and inhomogeneous field

Order	Coefficient ε	Inhomogeneous field (ppm)
0	9.4044	-
2	-0.00137	-0.3650
4	-0.6378	-0.4239
6	-192.45	-0.3210
8	-4.8227e6	-20.0315

* DSV: 100 mm