

無冷媒 25T 超伝導マグネット用の高強度 Nb₃Sn ラザフォードケーブル特性 High-strength Nb₃Sn Rutherford cable characteristics for a Cryogen-Free 25T superconducting magnet

杉本 昌弘, 坪内 宏和, 遠藤 壮, 高木 亮(古河電工); 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大)
SUGIMOTO Masahiro, TSUBOUCHI Hirokazu, ENDOH Sakuru, TAKAGI Akira (Furukawa Electric Co., Ltd.);
WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: masahiro@nikko.furukawa.co.jp

1. はじめに

次期定常強磁場施設計画において、我々は、大型強磁場超伝導マグネットに適用可能な Nb₃Sn 導体を開発してきた[1],[2],[3]。その導体は、Nb-rod 法(Cu 母材の中に Nb ロッドを多数本埋め込む新しい手法)で製作した Cu-Nb 強化材で内部補強されたブロンズ法 Nb₃Sn 素線を用いており、ラザフォードケーブル構造を有する。さらに、Nb₃Sn 生成熱処理後、繰り返し曲げ戻し歪を印加して、事前曲げ効果(pre-bending effect)により通電特性を向上させた上で、リアクト・アンド・ワインド法によるマグネット製造に供することを前提としている。最近、無冷媒 25T 超伝導マグネット用に設計した Nb₃Sn 導体の量産製造に成功した。ここでは、その導体から素線を取り出し、引張り応力下での臨界電流特性を調査したので報告する。

2. 製作試料と評価方法

無冷媒 25T 超伝導マグネット用 Nb-rod 法 Cu-Nb 強化 Nb₃Sn 素線と導体の諸元を Table 1 に示す。素線は伸線工程において断線することはなかった。製造した総長 153km(平均単長 12.8km)の素線を用いて、合計 7.8km(=1.6+2.8+3.4)のラザフォードケーブルを製造した。ケーブルは、フラットワイズ方向に、胴径 500mm のポビンに巻線して Nb₃Sn 生成熱処理(670°C×96h)を施した後、事前曲げ戻し歪印加プリーを用いて、正方向曲げ歪 ε_{pb}⁺(%)を 9 回、逆方向曲げ歪 ε_{pb}⁻(%)を 8 回、印加した。ε_{pb}⁺と ε_{pb}⁻は、(1)式 (+符号は正方向曲げ、-符号は逆方向曲げを意味する。)で算出できる。繰り返し曲げ歪±0.5%を印加するために、素線直径 d=0.8mm に対して、熱処理ポビン胴径 D₀=500mm、正方向曲げ歪プリー直径 2R⁺=125mm、逆方向曲げ歪プリー直径 2R⁻=250mm を選択した。

$$\varepsilon_{pb}^{\pm} = d \left(\pm \frac{1}{2R^{\pm}} - \frac{1}{D_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

導体から取り出した素線の引張応力下での I_c 測定は、東北大学・金属材料研究所の試験装置を用いて、サンプル長 40 mm、電圧端子間距離 10 mm、温度 4.2K、外部磁場 12T と 14.5T で実施した。I_cは電界 100μV/m で定義した。

3. 評価結果

Fig. 1 に、導体から取り出した素線の I_c-B 特性(冷却歪下)を熱処理直後の素線単体の特性と比較して示す。10T~17T の磁場領域において、事前曲げ効果によって、I_c が向上しており、高磁界側ほどその効果は顕著(12T で 1.2 倍、14.5T で 1.3 倍、17T で 1.5 倍)であった。

Fig. 2 に、導体から取り出した素線の I_cと引張応力との関係を示す。300MPa の引張応力下における I_cは、12T で 157A、14.5T で 94A であり、それぞれの冷却歪下の I_cに対して、5%と 11%の低下であった。12T での I_cは、要求性能(素線当たり、119A 以上)に対し、32%のマージンが確保された。

今回の評価結果から、Nb rod 法-CuNb 強化型 Nb₃Sn 線材を用いたラザフォードケーブルは、リアクト・アンド・ワインド法で製造される無冷媒 25T 超伝導マグネット用 Nb₃Sn 導体の要求特性を満足し、量産製造性にも優れていることが明らかになった。

参考文献

1. K. Watanabe et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) 4300304
2. M. Sugimoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.87 (2013) p.150
3. K. Watanabe et al.: Adv. Cryo. Eng. 60(2014)186-191

謝辞:本研究の一部は科研費基盤(A)の援助を受けています。

Table 1 Specifications of Nb₃Sn conductor for a Cryogen-Free 25T superconducting magnet

(a) Strand	
Superconductor	Bronze- processed Nb ₃ Sn
Reinforcement	Nb-rod-method Cu-20vol%Nb
Diameter	0.80 ^{±0.01} mm
Cu/Cu-Nb/non-Cu	20 ^{±5%} /35 ^{±5%} /45 ^{±5%}
Sn diffusion barrier	Ta
Filament diameter	3.3μm (nominal)
Twist pitch (direction)	24 ^{±3} mm (S)
(b) Rutherford cable	
Number of strands	16
Dimensions	6.45 ^{+0.015/-0.05} mm ^w x 1.53 ^{±0.05} mm ^t
Cabling pitch(direction)	65 ^{±10} mm (Z)
Insulation	E-glass tape
Critical current (A)	>1,900A @4.2K, 12T, 300MPa

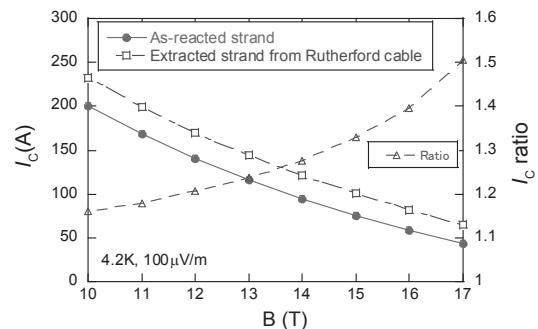


Fig.1 I_c-B characteristics for the as-reacted Cu-Nb/Nb₃Sn strand and the extracted strand from the Rutherford cable

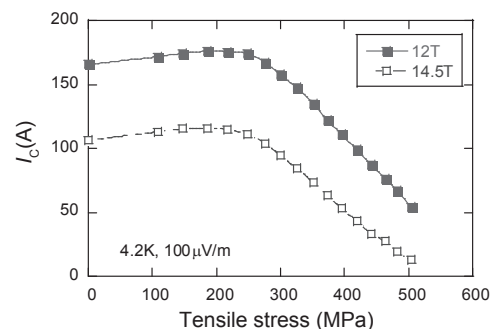


Fig.2 I_c-values as a function of tensile stress for the Cu-Nb/Nb₃Sn strand extracted from the Rutherford cable

無冷媒 25T 超伝導マグネット用の Gd123 テープ特性

Critical current properties of Gd123 coated conductors for a cryogen-free 25 T superconducting magnet

大保 雅哉, 藤田 真司, 佐藤 大樹, 飯島 康裕(フジクラ); 淡路 智, 小黑 英俊, 渡辺 和雄(東北大)
DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, SATO Hiroki, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA);
AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)
E-mail: masanori.daibo@jp.fujikura.com

1. はじめに

これまで無冷媒 25 T 超伝導マグネット用の Gd123 テープ線材として長尺線材の磁場中臨界電流(I_c)角度依存性 [1], 液体窒素中自己磁場下(77 K, s.f.)と低温磁場中の I_c 特性の相関について報告してきた[2]. 今回, 無冷媒 25 T 超伝導マグネット用 Gd123 テープ線材を株式会社東芝殿より受注し, 製作したので, 量産した Gd123 テープ線材の長手方向の I_c 特性などについて報告する.

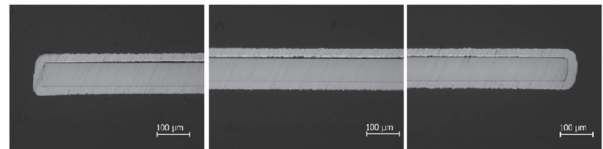


Fig. 1 Cross section of Gd123 coated conductor

2. Gd123 テープ線材の長手方向 I_c 分布

量産した線材の仕様概要を Table.1 に示し, 線材の幅方向端部および中央部の断面写真を Fig.1 に示す. Fig.1 は試料をエポキシ樹脂に埋め込み, 断面を研磨した後, 光学顕微鏡により断面を観察したものである.

Fig.2 には磁化法(ホール素子による線材幅方向の磁化測定から I_c 換算)による液体窒素中の長手方向 I_c 分布例(100 m)を示す. Fig.2 の線材長手方向の I_c 平均値は 286 A であり, 標準偏差 σ は 4.37 A であった. なお, 量産線材のうちの 70 条の磁化法の標準偏差 σ の平均値は 4.54 A であるため, Fig.2 が代表的な磁化法による 1 条内の長手方向 I_c 分布と同程度となる. このように量産線材においても長手方向に均一に製造できていることが確認できる.

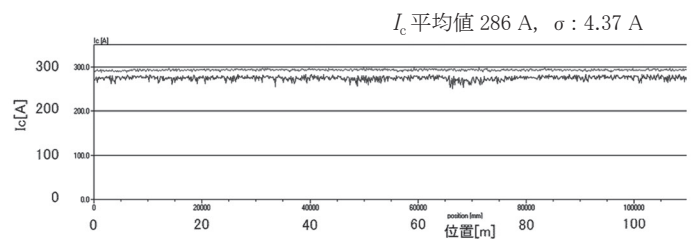


Fig. 2 Longitudinal I_c distribution of a Gd123 coated conductor

3. 液体窒素中 I_c (77 K, s.f.)および n 値測定結果

量産線材の I_c 測定は 5 mm 幅の線材を各条毎に無誘導巻きにした状態で通電して I - V 特性から求めた. ロット間の I_c 分布例として量産線材のうちの 70 条分について各条毎に行った液体窒素中での四端子法による I_c (77 K, s.f.)(閾値 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$)測定結果を Fig.3 に, n 値 (77 K, s.f.)($0.1 \sim 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 領域)測定結果を Fig.4 に示す. 無誘導巻きによる測定結果では 70 条分の I_c (77 K, s.f.) 平均値は 301 A, n 値 (77 K, s.f.) の平均値は 29.4 であった. なお, Fig.3 で I_c 278 A 以下が少ないのは I_c 検査によりスクリーニングしているためである.

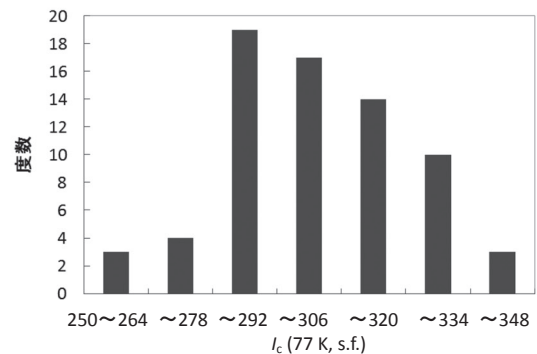


Fig. 3 Histograms of I_c (77 K, s.f.)

4. 液体窒素中引張特性

量産線材から短尺試料を切り出し, 液体窒素中での引張試験も実施している. 量産線材から試料数 45 本について平均引張応力 777 MPa にても試験前後で液体窒素中 I_c (77 K, s.f.)の変化が 1%以下と可逆であることも確認している.

参考文献

1. M. Daibo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.152
2. M. Daibo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.8

Table 1 Specifications of Gd123 coated conductor

Tape width (mm)	5
Thickness of substrate (μm)	75
Thickness of copper plate (μm)	20

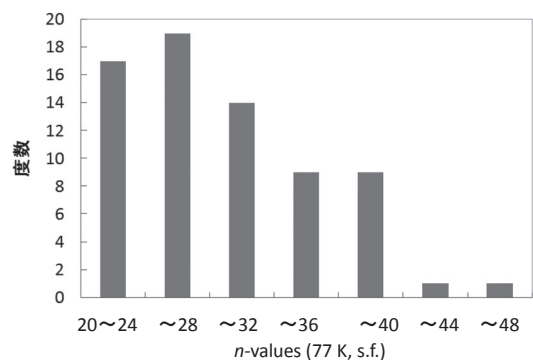


Fig. 4 Histograms of n -value(77 K, s.f.)

無冷媒 25T 超伝導マグネット用 Gd123 コイル開発

Development of Gd123 coil for a cryogen-free 25 T superconducting coil

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 井岡 茂(東芝);
渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大);大保 雅載, 飯島 康裕(フジクラ)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,
IOKA Shigeru (TOSHIBA); WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.);
DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

25 T 無冷媒超伝導マグネット(25 T-CSM)は, Gd123 テープ線材を用いたインサートコイルが 11 T の磁場を発生し, 外層の LTS コイルが発生する 14 T と組み合わせることで ϕ 52 mm の室温空間に 25 T の磁場を発生させる。Gd123 コイルは熱暴走すると焼損する危険性が高いため, 冷却時の熱応力や通電時の電磁応力によりコイルを劣化させないことが重要となる。本発表では, Gd123 コイルを用いた要素試験結果について報告する。

2. 要素コイル試験

試作した要素コイルの諸元を Table 1 に示す。5 つのコイルに使用した線材はすべて同一ロットであり, コイル寸法もほぼ等しくなっている。要素コイルを液体窒素中にて通電試験した結果を Fig.1 に示す。4 つのコイルは低電界領域まで良好な超伝導特性を有していることが確認されたが, #4 コイルは劣化する結果となった。要素コイルは径方向に発生する熱応力を 1 MPa 以下にするために径方向に 2 分割しており, 室温 (293 K) から 77 K まで冷却した際の径方向応力は最大で 0.4 MPa 以下となっている。同じように製作したにも関わらず一部のコイルだけが劣化したため, 原因としては線材の許容剥離応力にばらつきがあり, 線材長手方向の一部に剥離に対して弱い箇所が存在すると考えられる。

3. 補強構造検討

コイルに発生する応力は十分小さく設定しており, コイルを劣化させないためには, 線材の許容剥離応力を向上させることが重要となる。銅メッキ(片側 20 μ m)が薄いために, 強度が低くなっている可能性を考え, 銅メッキを厚くする構造や銅メッキと銅テープを組み合わせた構造を検討している。実際に, 銅メッキを厚くした線材および銅メッキを施した線材に銅テープを貼り合わせた線材を用いて小コイルを試作し, 液体窒素中にて通電試験を実施した。コイル諸元を Table 2 に, 通電試験結果を Fig.2 に示す。試作したすべてのコイルが低電界領域まで良好な超伝導特性を有しており劣化がないことを確認した。試作した小コイルは内外径比が 2 程度あり, 冷却時に発生する熱応力は約 9 MPa となる。評価したサンプル数が少ないものの許容剥離応力が向上している結果となった。今後, サンプル数を増やしてデータの妥当性を検証していくとともに, 伝導冷却試験や磁場中試験を実施する予定である。

4. まとめ

Gd123 コイルを用いた要素コイルを試作し液体窒素中にて通電試験を実施した結果, Gd123 テープ線材の許容剥離応力のばらつきに起因すると思われるコイルの特性劣化が生じた。対策として, 線材を補強する構造について検討し, 銅メッキを厚くする方法や銅メッキと銅テープを組み合わせることで, 線材の許容剥離応力が向上することを確認した。引き続き, データの妥当性を検証し, Gd123 インサートコイルの設計, 製作を進めていく。

Table 1 Specification of Gd123 test coils

Coil No	#1	#2	#3	#4	#5
Tape width (mm)			5		
Tape thickness (mm)			0.13		
Inner dia. (mm)			96		
Outer dia. (mm)	119.9	119.9	119.5	119.6	119.7
Height (mm)			5.2		
Turns			58		
Tape length (m)			20		

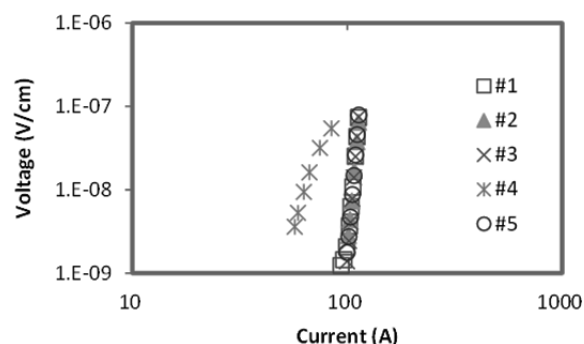


Fig.1 V-I characteristics of Gd123 test coils at 77 K

Table 2 Specification of Gd123 small coils

Coil No	A1	A2	B1	B2
Stabilizer	Additional electroplated copper		Electroplated copper + copper tape	
Tape width (mm)	5	5	5	5
Inner dia. (mm)	30	30	30	30
Outer dia. (mm)	58	58	60	60
Height (mm)	5.2	5.2	5.1	5.1
Turns	60	60	60	60
Tape length (m)	8.3	8.3	8.5	8.5

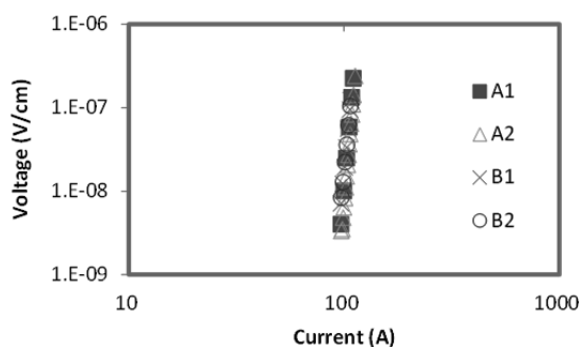


Fig.2 V-I characteristics of Gd123 small coils at 77 K

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤 A)による補助を受けています。

無冷媒 25 T 超伝導マグネットに向けた CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブル 多層コイルの電磁力下通電試験

Electromagnetic properties of multilayer coil with CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable
for cryogen-free 25 T superconducting magnet

小黒 英俊, 大村 拓也, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 二森 茂樹, 清水 禎(物材機構); 花井 哲(東芝)
OGURO Hidetoshi, Omura Takuya, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); NIMORI Shigeki,
SHIMIZU Tadashi (NIMS); HANAI Satoshi (Toshiba)
E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々のグループでは、現在 25T 無冷媒超伝導マグネット (25T-CSM) の開発を行っている。このマグネットには、Nb₃Sn ラザフォードケーブルを使用する設計となっており、その適用可能性を確認する試験を、これまではラザフォードケーブルの試験に重点を置いて行ってきた[1]。その結果から、我々が開発した CuNb 補強 Nb₃Sn(CuNb/Nb₃Sn)ラザフォードケーブルは、巨大な電磁力下でも通電可能であり、14 T で 1000 A 程度の通電電流に対し、十分なマージンがあることを示した[2]。

25 T-CSM では Nb₃Sn ラザフォードケーブルには、定格電流である 851 A 通電時に 14 T の磁場、電磁力として 250 MPa のフープ応力が発生する。そこで今回は、この条件と同じ条件下における通電試験を実施するため、CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルの多層コイルを作製し、通電時に上記の条件に近くなるように設計を行い、実験を行った。

2. 実験方法

試料コイルは、Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn ラザフォードケーブルを用いた、1 層 15 ターンを 4 層とした、ソレノイド巻きコイルを作製した。ラザフォードケーブルは、φ150 mm の熱処理ポビンにて 670°C×96 h の熱処理を行った。熱処理後には、ケーブルのフラットワイズ方向に正方向の事前曲げ処理を、φ65 mm のプリーに通すことで行った。これを内径φ150 mm となるようにコイル巻きを行い、エポキシで含浸した。この条件によって、コイルに通電する電流値が I_c と同程度のときに、25 T-CSM の運転時に加わる電磁力と同等の電磁力が加わるようになっている。このコイルの側面には、ひずみゲージを貼りひずみの測定を行った。

通電試験は NIMS の 14T 大口径超伝導マグネットを利用して行った。条件は、液体ヘリウム中にて最大 14 T、2000 A として通電時の電圧およびひずみ測定を行った。

3. 実験結果

通電は図 1 に示したように計 7 回行い、3 回目までは 14 T にて通電試験を行った。このとき、電磁力を 205 MPa しか加えられていなかったため、4 回目からは磁場を 13.5 T として、 I_c を高くすることで電磁力をより加えられる条件に変更して実験を行った。このときに、図の白抜きの点(2, 7 回目)はクエンチさせずに電流を下ろしているが、その他の通電時にはコイルはクエンチしている。図 2 に示した 5 回目の通電時に、最も大きな電流(1655 A)を流すことに成功し、このときの電磁力は約 230 MPa であった。このことは、本コイルでは 5 回目まではトレーニングによって、クエンチ電流値が上がっていったことを示している。この 5 回目の通電時には、常伝導電圧の発生が確認されており、コイルには I_c 近傍まで電流を流すことが出来たと考えられ、トレーニングはほぼ終了しているとも考えられる。図 3 には、5 回目通電時のコイルに加わるひずみの変化を示した。最大で 0.205% のひずみが発生していることが分かった。この値は、素線より求めた s-s カーブからの予想(0.25%) [1] より小さいことが分かった。これは、ケーブル化したことや、コイルをエポキシ含浸したことが原因ではないかと思われる。

25T-CSM への適用可能性に対する詳しい考察は、電磁力の議論を詳しくする必要があるため、当日詳細に報告する。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤 A)による補助を受けました。

参考文献

1. H. Oguro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.9
2. H. Oguro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.151

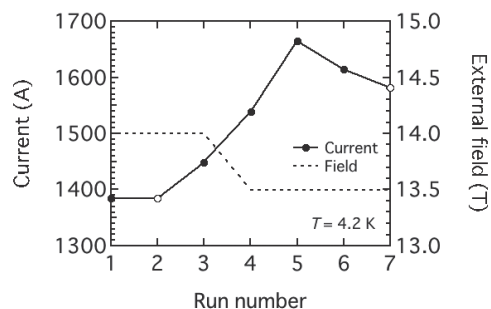


Fig. 1 The results of the transport current and field for the CuNb/Nb₃Sn Rutherford coil. The closed symbols show the quench points of the coil. The maximum transport current of the coil was 1655 A at 13.5 T.

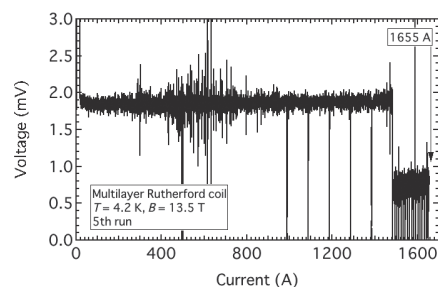


Fig. 2 The transport property of the CuNb/Nb₃Sn Rutherford multilayer coil at 4.2 K and 13.5 T. The coil quenched at 1655 A.

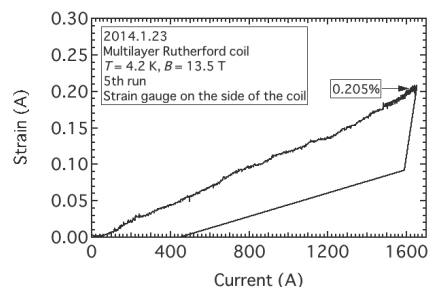


Fig. 3 The strain as a function of the transport current for CuNb/Nb₃Sn Rutherford coil.

25T-CSM 用 Gd123 テープ線材の低温強磁場 J_c 特性

Low temperature and high field J_c property of Gd123 tapes for 25TCSM

淡路 智, 水戸瀬 智久, 鈴木 匠, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大金研); 藤田 真司, 大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)
 AWAJI Satoshi, MITOSHE Tomohisa, SUZUKI Takumi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
 FUJITA Shinji, DAIBO Masanori, IJIMA, Yasuhiro (Fujikura co ltd)
 E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(RE123, RE: 希土類)コート線材 (Coated conductor) は, その高い機械特性と高い磁場中臨界電流密度 J_c 特性から強磁場応用が期待され, すでに多くの強磁場超伝導マグネット開発が進行している[1,2]。東北大金研では, 25T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)の開発が, 2014 年度末に完成予定で進行中である[2]。このマグネットは, 14T をバックアップの金属系超伝導コイルでカバーし, 内層の高温超伝導(HTS)コイルにより, 運転電流 135A で 11.5T を発生させる設計となっている(設計値は 25.5T)。このため, 最も高磁場を担う HTS 線材特性は非常に重要となる。本マグネットには, フジクラ製 Gd123 テープを採用することが決定しており, コイル設計において重要となる, 線材の低温強磁場領域の臨界電流特性について報告する。

2. 実験方法

25T-CSM に採用予定の線材は, 75 μm 厚 Hastelloy 基板上にバッファ層を介して成膜された Gd123 テープである[3]。現在のところ, 安定化層として片側 20 μm の銅メッキを施したものを予定している。低温強磁場の J_c 特性評価は, その高い電流容量のため, 直接測定をすることは困難である。そこで, 今回は, 銅メッキ前の試料について長さ約 1mm, 幅約 100 μm 程度のブリッジを作製し, 4端子法によって臨界電流を測定するとともに, メッキ線を約 2.5mm 角にカットして磁化測定によっても評価した。磁化から拡張ビーンモデルを用いて, 臨界電流密度を導出した。

3. 結果と議論

図1は, 40K 以下の各温度における I_c 及び J_c の磁場依存性の結果である。 I_c はブリッジ試料の測定結果から 5mm 幅当たりの値に換算したものである。残念ながら, 4.2 K, 18 T で試料が焼損したため, 低磁場領域の測定はできなかったが, 4.2 K, 18 T で $I_c \approx 280$ A の値が得られている。25T-CSM におい

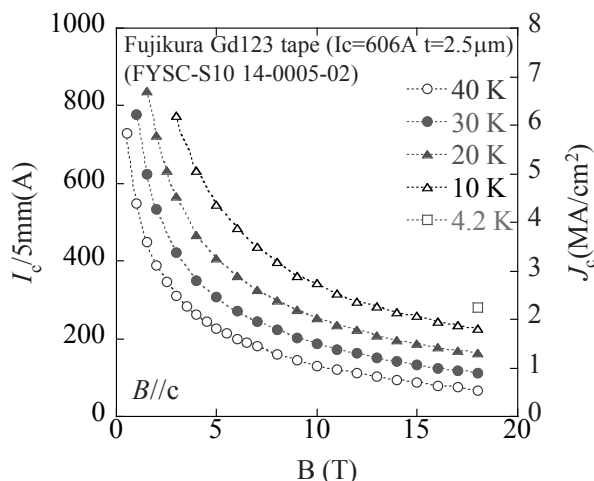


Fig. 1 Critical current densities for $B//c$ as a function of magnetic field up to 18 T at various temperatures below 40 K.

て, HTS コイルの最大経験磁場は中心磁場 25.5 T に対して $B//ab$ で約 25.66 T, 最大径方向磁場 B_r で約 4.8 T となっている。運転電流は 135 A のため, 図1の結果から, 20 K に置いても, 線材の通電能力は十分に高いことが理解できる。25T-CSM は, HTS と LTS の冷却を分けることで, HTS コイルの温度上昇を 20 K まで許容できるよう設計されている[3]。その点を考慮し, 20 K の特性を見ても十分な臨界電流特性を有しており, 20K に対する負荷率は 50%の負荷率となると認められる。

各温度における n 値の磁場依存性を図2に示す。30K 以上では磁場の増加に伴って若干の減少が見られるが, 20K では, 20 以上の値でほぼ一定となっている。さらに低温では, 温度の低下に伴って n 値の急激な上昇が見られ, 4.2K, 18T では 40 以上の値となっている。磁化法による測定結果についても当日報告する。

謝辞

本研究の一部は科学研究費基盤研究(A)の支援を受けています。

参考文献

1. D. Markiewicz *et al.*, IEEE TAS 22 (2012) 4300704.
2. S. Awaji *et al.*, IEEE TAS 24 (2014) 4302005.
3. M. Daibo, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.152

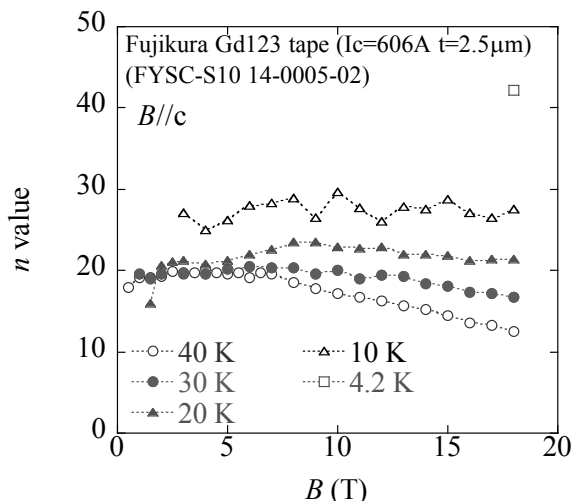


Fig. 2 n -values for $B//c$ as a function of magnetic field up to 18 T at various temperatures below 40 K.

IBAD/PLD 線材の小型含浸コイルによる耐剥離特性評価

Evaluation of delamination stress of REBCO coated conductors using impregnated pancke coils

大保 雅載, 原口 正志, 大杉 正樹, 竹本 哲雄, 町田 健次, 中村 直識, 飯島 康裕(フジクラ)
 DAIBO Masanori, HARAGUCHI Masashi, OSUGI Masaki, TAKEMOTO Tetsuo, MACHIDA Kenji,
 NAKAMURA Naonori, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA)
 E-mail: masanori.daibo@jp.fujikura.com

1. はじめに

RE系高温超電導線材の耐剥離特性としてスタッドプル法で成膜された各層の剥離応力などを評価してきた[1]. 剥離特性についてはさまざまな評価法が試みられているが, 実使用を想定した定量的評価として小コイルを用いた評価法が提案されている[2] [3]. 今回, 3種類の安定化銅構造を有したIBAD/PLD線材について先に提案された小コイルを用いた耐剥離特性の評価を行ったので, 以下に概要を報告する.

2. 評価線材の諸元

3種類の安定化銅構造を有したIBAD/PLD線材の仕様概要をTable.1, Fig.1に示す. Table.1にあるように線材(a)は75 μm 厚の安定化銅をラミネート(Snで貼り合せ)した構造, 線材(b)は20 μm 厚の銅を線材周囲にめっきした構造, 線材(c)は20 μm 厚の銅テープを線材周囲に包み込むようにラミネートした構造である. いずれの線材も基板厚は75 μm である. なお, 線材(c)は新規構造であり, 量産準備中の短尺試作品となる.

3. 小型含浸コイルによる耐剥離特性評価

コイル内径30mmとし, コイルターン数を変えてコイル内径外径比の異なるシングルパンケコイルを製作した. 線間絶縁はポリイミドテープを1枚共巻し, エポキシ樹脂を塗布しながら超電導層を内側にして巻線し, 加熱硬化後, 液体窒素中でコイル I_c (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義), コイル n 値(0.01~0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 領域)を評価した. 各線材について2~3ロットについて評価を行った. 内径外径比とコイル n 値の相関をFig.2に示す. 線材(a)は内径外径比1.23以上でコイル n 値が15未満となる結果が確認され, 線材(b)は内径外径比1.39以上でコイル n 値が20未満となる結果が確認された. これに対し, 線材(c)は内径外径比1.66以下でもコイル n 値が25以上と耐剥離特性が向上していることが期待される.

4. まとめ

安定化銅構造が異なる3種類のIBAD/PLD線材について提案された小コイルを用いた耐剥離特性について評価を行った. 20 μm 厚の銅テープを線材周囲に包み込むようにラミネートした構造の線材(c)FYSC-SCF05については, 線材(a)FYSC-SC05(75 μm 厚の安定化銅をラミネートした構造), 線材(b)(20 μm 厚の銅めっき構造)よりもコイル n 値が25未満となる内径外径比に優位差が見られ, 含浸コイルでの耐剥離特性の向上が期待される. 今後, 引き続きデータの蓄積を行っていくと共に, 線材機械特性などの評価も実施予定である. なお, 新規構造の線材(c)は量産準備中であり, 2014年度下期以降に評価用サンプル準備含めて, 開発を進めている.

参考文献

1. R. Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.168
2. H. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.100
3. S. Iwai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.101

Table 1 Specifications of REBCO coated conductors

Type	(a)FYSC-SC05	(b)Cu plate	(c)FYSC-SCF05
Tape width (mm)	5	5	5
Tape thickness (mm)	0.17	0.12	0.13
GdBCO thickness (μm)	(a-1) 1.8 (a-2) 2.7	(b-1) 2.5 (b-2) 2.7 (b-3) 2.1	(c-1) 2.3 (c-2) 2.0
Copper stabilizer thickness (μm)	75	20	20
	copper tape	electroplate	copper tape

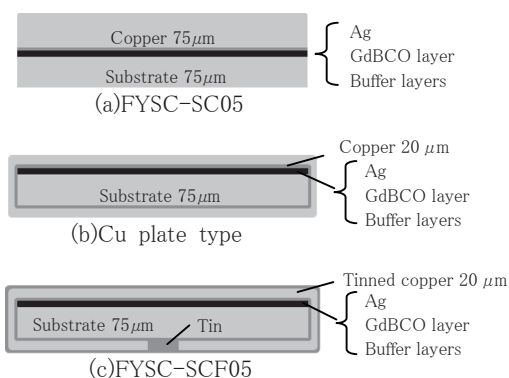
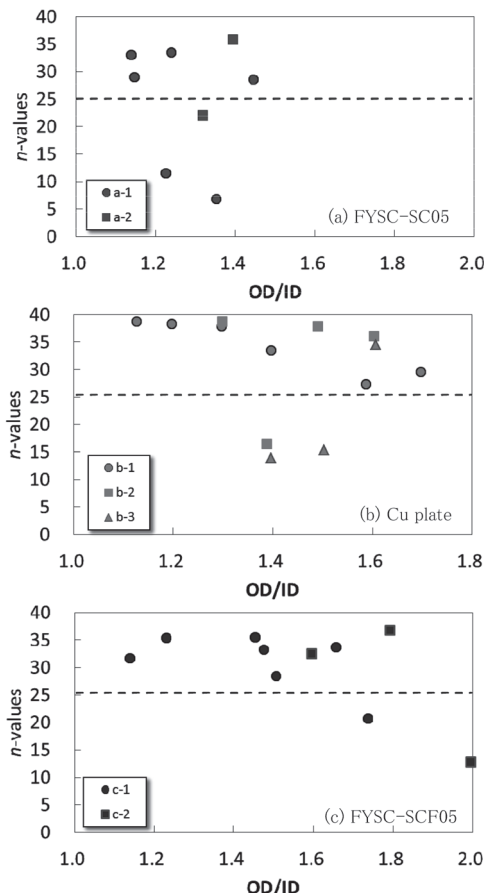


Fig. 1 Schematic of REBCO coated conductors

Fig. 2 Measured results of n -values of small coils having different ratio of outer diameter (OD) to inner diameter (ID)

75 μ m 安定化銅線材を用いた REBCO 含浸コイルの伝導冷却下クエンチ挙動調査

Study of quench behaviors of REBCO impregnated pancake coil with 75- μ m-thick copper stabilizer under conduction-cooled condition

藤田 真司, 原口 正志, 大保 雅哉, 飯島 康裕 (フジクラ); 土屋 清澄, 大内 徳人 (KEK)
 FUJITA Shinji, HARAGUCHI Masashi, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA);
 TSUCHIYA Kiyosumi, OUCHI Norihito (KEK)
 E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

RE 系超電導線材は低温超電導線材に比べ常電導伝播速度が遅く、クエンチ時に局所的な発熱を生じて線材が損傷してしまうことが懸念される。これまで線材での伝播速度等の調査を行ってきた[1]が、今回 75 μ m 厚の安定化銅を有した RE 系超電導線材を用いて内径 50 mm、50 ターン \times 2 層の小型含浸コイルを製作し、コイル内に設置したヒーターにより強制的にクエンチさせることによってクエンチ時の挙動を調査した。

2. 実験方法

実験用コイルに使用した線材の仕様をTable.1 に、作製した実験用コイルの諸元をTable.2 に示す。コイルはエポキシ樹脂による真空含浸コイルであり、コイル2層目にはFig.1 に示すように1ターン目にNiCr箔によるヒーター(0.53 Ω @50 K)、1~4ターンのヒーター付近に数cm間隔で電圧タップ(V0~V10)を取り付けている。コイルはGM冷凍機による伝導冷却で50~20Kに冷却し、各温度でコイル I_c の40~80%の負荷率の電流(I_{op})を通電した状態でヒーターに2Aの電流を通電しコイル2層目をクエンチさせ、コイル1層目と2層目のバランス電圧によりクエンチを検出し電流を遮断した。

3. 実験結果

クエンチ検出電圧を40~100 mV(検出時間 10 msec)に変化させてクエンチ部(ヒーター部;V0)の最大到達電圧を測定し、予め測定した線材抵抗値の温度依存性よりV0 最大到達温度を見積った。負荷率(I_{op}/I_c)が0.6 の場合の結果を Fig.2 に示す。V0 最大到達温度は検出電圧に概ね比例し 100 mV で160 K程度であった。また、負荷率が上がるとV0 最大到達温度はやや下がる傾向があったが大きな変化はなく、50~20K の範囲では温度による傾向もあまり見られなかった。

検出電圧 100 mV で、ほぼすべての条件でクエンチ時に電圧が発生した電圧タップ V4-V5 間の時差から常電導伝播速度(NZPV)を算出した結果を Fig. 3 に示す。伝播速度は負荷率が高い方が、また温度が低い方が速かったが、電流値(I_{op})に概ね比例する結果となった。今回の実験ではコイル周方向には常電導伝播が確認されたが、すべての測定で V7~V10 の電圧発生は無く、コイル径方向の伝播は確認されなかった。今回のコイルでは 50 K で 0.037 mm/sec 未満と考えられる。

実験後、コイルをクライオスタートから取り出し LN₂ 中でコイル I_c を測定し、劣化がないことを確認した。

参考文献

1. M.Daibo et.al, IEEE Trans. Appl. Supercond. , VOL. 21, No. 3, (2011) p.2428-2431

Table 1 Specifications of GdBCO tapes.

Type	FYSC-SC05 Cu (75 μ m) / Hastelloy® (75 μ m)
Width / Thickness	5 mm / 0.16 mm
I_c @77K, s.f.	251 A (10 ⁻⁶ V/cm)
n-value@77K, s.f.	33 (10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶ V/cm)

Table 2 Specifications of test pancake coil.

Inner diameter	50 mm
Outer diameter	73.4 mm
Coil height	10.6 mm
Number of turns	50 \times 2
Tape Length	10 m \times 2
Coil I_c @77K, s.f.	77 A (10 ⁻⁷ V/cm)
n-value@77K, s.f.	1st layer: 39, 2nd layer*: 20

* with a heater and voltage taps

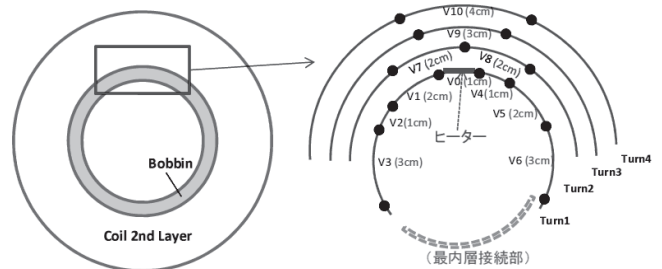


Fig.1 Location of a heater and voltage taps.

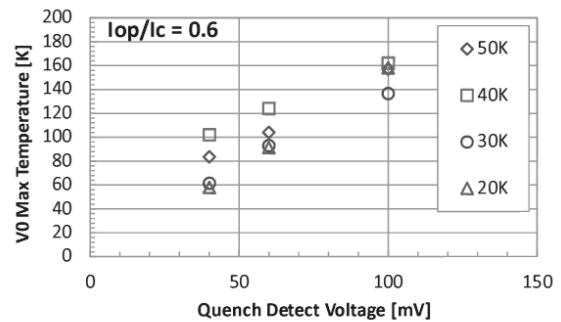


Fig.2 Quench detect voltage dependence of estimated V0 max temperature at $I_{op}/I_c = 0.6$.

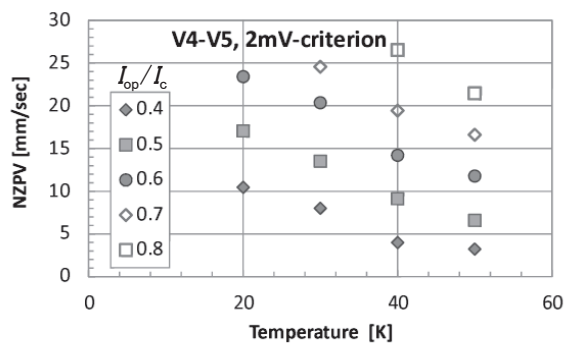


Fig.3. Temperature dependence of normal zone propagation velocity calculated from the time lag of V4-V5 voltage.

劣化を回避する REBCO 含浸レーストラックコイルの開発

Development of degradation-free impregnated racetrack coils wound with REBCO tapes.

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

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

1. はじめに

REBCO コイルを伝導冷却型マグネットに適用するためには、コイル内部まで伝熱経路を形成する必要があり、コイルはエポキシ樹脂などで含浸しておくことが望ましい。また、レーストラックコイルのような非円形コイルの場合、形状保持の観点からも樹脂含浸が重要となる。しかしながら、REBCO コイルでは冷却時に発生するコイル径方向の熱応力が、線材の許容剥離応力を超え劣化するという課題があった。円形コイルについては、コイル径方向応力 σ_r が許容剥離応力以下となるように巻線部を分割することで、劣化回避を実証した[1,2]。本発表では、このような劣化の回避方法が、含浸レーストラックコイルにおいて有効であるか、また巻線部を分割することで形状保持に影響が無いかについて検証した結果を報告する。

2. 劣化回避の方法

コイル径方向応力 σ_r は、巻線部を構成する線材、絶縁物等の物性値に依存し、コイルの内径と外径の比(内外径比)が大きくなるにつれて増加する。よって複数の円弧部もしくは直線部とで構成される非円形コイルの場合、 σ_r は径方向だけでなく周方向でも分布することになる。レーストラックコイルにおける σ_r は、レーストラックの直線部を半径無限大の円弧部とみなせば、直線部よりも半円部で大きくなると考えられる。そこで、半円部のみをつなげた円形コイルと同じ基準で巻線部の分割数を決定することにした。

3. 含浸レーストラックコイルの試作, 通電結果

前述の劣化回避方法の有効性を調べるため、許容剥離応力の異なる4種類のREBCO線材を用いて、4つの含浸レーストラックコイルを試作した。コイル諸元をTable 1に示す。直線部140mm、円弧部内径50mm、ターン数140に統一しており、線材の幅、厚み寸法の違いでFig.1に示すように外形寸法が異なる。#A,#B,#C,#Dに使用した線材の許容剥離応力は、前述の円形コイルで得た値を使用し[2]、コイル径方向応力 σ_r がこの値を超えないように、巻線部の分割数を2分割、2分割、4分割、1分割(分割無し)に設定した。試作したコイルは、液体窒素での冷却、通電試験を実施し、通電特性から劣化の有無を調査した。通電結果をFig.2に示す。本結果から得られたコイルn値は、Table 1に示すように、全てのコイルにおいて20を超えており、低電界領域まで良好な超電導特性を有している。したがって、含浸レーストラックコイルについても本方法が劣化回避に有効であることが示された。また、冷却および通電前後の外形寸法の差は最大で約0.05mmと測定誤差範囲内であり、巻線部の分割による顕著な形状の変化は見られなかった。

4. まとめ

4種類のREBCO線材を使用し、コイル径方向応力 σ_r が各線材の許容剥離応力以下になるように巻線部を分割した4つの含浸レーストラックコイルを試作した。全てのコイルで良好な超電導特性が得られており、本方法が含浸レーストラックコイルの劣化回避に有効であること、また形状保持に大きな影響を与えないことを示した。今後、さらなるデータの蓄積を進めるとともに、さまざまな形状のコイルで有効性を検証していく。

Table 1 Specifications of four REBCO racetrack coils.

Coil No.	A	B	C	D
Straight length (mm)	140	140	140	140
Inner radius (mm)	50	50	50	50
Outer radius (mm)	73	78	84	89
Number of turns	140	140	140	140
Tape width (mm)	4	5	5	4.8
Tape thickness (mm)	0.1	0.12	0.17	0.2
Tape length (m)	94	96	99	100
Cu stabilizer of tapes/ thickness (μm)	electroplate/ 20 (one side)	2-ply/ 75×1	3-ply/ 50×2	
Number of divided parts of windings	2	2	4	1
Coil Ic (A)	44	109	96	63
n-value	28	28	31	21

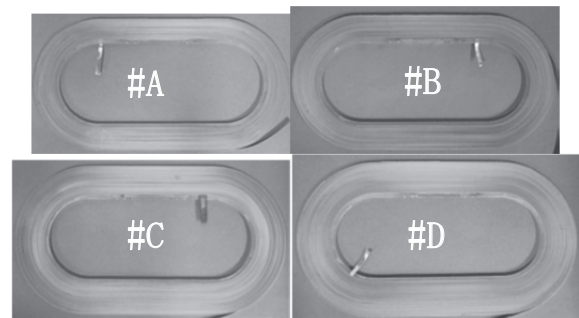


Fig.1 Racetrack coils wound with four REBCO tapes.

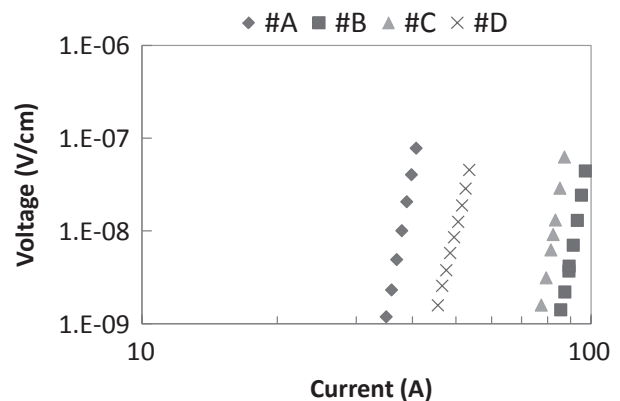


Fig.2 V-I characteristics of racetrack coils at 77 K.

参考文献

- 宮崎他: 2013年度秋季低温工学・超電導学会, “劣化を回避するREBCO含浸コイル開発(1)-REBCO線材の許容剥離応力評価方法-”
- 岩井他: 2013年度秋季低温工学・超電導学会, “劣化を回避するREBCO含浸コイル開発(2)-市販線材の許容剥離応力-”

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -伝導冷却を考慮したコイル製作-

Development of REBCO HTS Magnet for Maglev -Production of Conduction Cooled Coil-

水野 克俊, 小方 正文, 長谷川 均(鉄道総研)
 MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, 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、浮上式鉄道への適用を検討している。磁石の高温超電導化は構造の簡略化が期待される一方で、液体ヘリウムを用いない伝導冷却となるため、信頼性の高いコイル冷却構造が求められる。そこで、含浸材料の熱抵抗評価し、冷却安定性に優れた新構造の REBCO コイルを製作し特性を評価した。

2. 含浸材料の熱抵抗評価

パラフィン(融点:326 K)及びエポキシ(Stycast 1266)の熱抵抗試験を室温及び 77 K~10 K の温度域で実施した。測定方法としては、ギャップを 0.5 mm に固定した銅板の間に含浸材を流し込んで硬化させた後、片側から熱負荷を与えて温度差より抵抗を算出した。パラフィンにおいては冷却時に顕著に熱抵抗が上昇し、冷却後に室温で再測定したところ、冷却前の 0.7 K/W から 5.9 K/W に上昇した。エポキシでは熱抵抗の温度依存性は連続的であり、冷却後も始めの熱抵抗(0.9 K/W)を維持していた。評価サンプルの冷却後の拡大写真を図 1 に、熱抵抗を図 2 に示す。エポキシはなめらかな表面を維持しているものの、パラフィンにおいては無数のクラックが確認され粒塊状になっている。このことから、熱抵抗の増加は冷却時にクラックや接触面の乖離が発生したためと考えられる。

パラフィンの種類や評価サンプルの構成によっては異なる結果になる可能性もあるものの、パラファインは接着力がなく、エポキシに比べて強度も低いいため、冷却時に熱接触が失われ、コイルの冷却安定性が失われる危険性が高いと考えられる。

3. 冷却性及び劣化防止を両立したコイル構造

冷却性が求められる一方で、エポキシ樹脂は REBCO コイルの含浸に用いると線材剥離による性能低下を引き起こす問

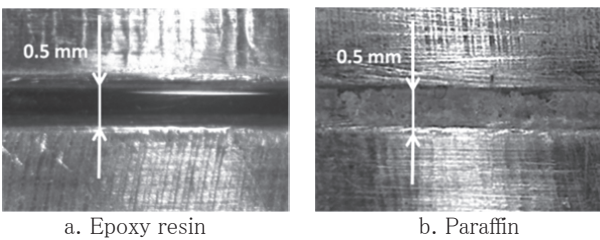


Fig.1 Close-up side views of impregnation materials after cooling down

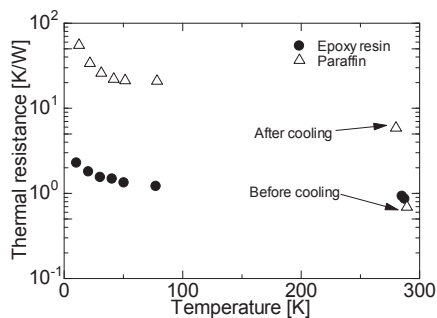


Fig.2 Thermal resistances of epoxy resin and paraffin

題もある。そのため、剥離の防止と、強固な冷却部材との接着という二つの要求を満たす必要があった。これを実現するため、コイルの層間絶縁にテフロン(登録商標)のPTFEテープを用いることとした。PTFE テープはエポキシに対して難接着であり、線材層間の熱応力の発生を防ぐ手段となりうる。また、共巻き構造のため、コイル上下面は PTFE テープに覆われておらず、エポキシ含浸によってコイルケース、あるいは冷却部材と強固に接着されることになる。

4. 実機大レーストラックコイル製作

PTFE テープ共巻きコイル構造の有効性を小型コイルで確認したのち、シングルパンケーキレーストラックコイルを試作した。コイル構造及び製作性の検証を目的としているため、使用線材長は 200 m と短いものの、浮上式鉄道用超電導磁石と同じ大きさのレーストラック形状である。GFRP コイルケースに収められた状態でエポキシ含浸されており、巻線とケースは強固に接着された構造となる。実機大レーストラックコイルの仕様を表 1 に、外観写真を図 3 に示す。また、含浸前後での液体窒素冷却による通電試験を行ったところ、図 4 に示すように通電特性の変化は確認されず、本コイル構成の成立性を実証できたと考えられる。

Table 1 Specifications of the racetrack coil

Coated conductor	SuperPower Inc. SCS6050-AP
Wire length	200 m
Insulator material	PTFE tape
Thickness of insulator	25 μm
Number of turns	72
Impregnation material	Epoxy resin (Stycast 1266)

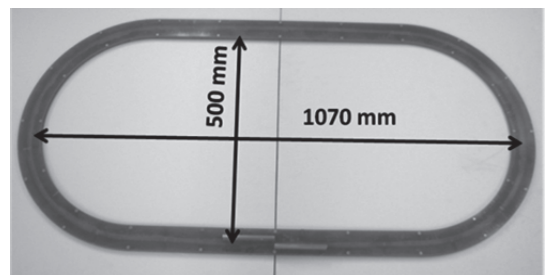


Fig.3 Picture of the racetrack coil

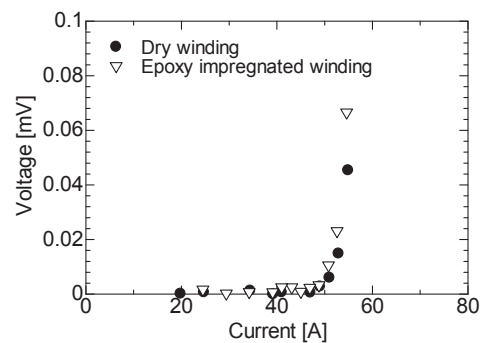


Fig.4 I-V Characteristics of the racetrack coil at 77 K

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

超伝導マグネットに対する新規補強構造の応力解析

Stress analysis in new mechanical-support coil structure for superconducting magnet

淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大金研); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Elect. Power co ltd)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO, RE: 希土類)コート線材(Coated conductor)は, その高い機械特性と高い磁場中臨界電流密度特性から強磁場応用が期待され, すでに多くの強磁場超伝導マグネット開発が進行している[1,2]。これらの2つの特徴により, 高い電流密度の設計が可能であるからである。しかし, 実際には安定化と保護のために安定化銅をつけるため, どうしても線材全体としての機械的強度は落ちてしまい, 結局電磁応力がマグネットの性能を決めてしまうことが多い。このため, より強度の高いコイル構造は, 高磁場マグネット開発において重要となる。これまで我々は, Yoroï 構造と呼ばれるコイル外周部のリングと上下の円盤の組み合わせによって優れた補強構造が可能であることを報告してきた[3]。しかし, 熱収縮や電磁力による応力分配の計算などの詳細な応力解析はまだ不十分であった。今回, 熱応力及び電磁応力下における内部応力解析を解析的に行った内容について報告し, その適用性について議論する。

2. 解析方法

新補強(Yoroï)構造は, パンケーキコイル外周部の補強リングとそれに固定されたコイル上下の円盤構造で構成される。電磁力により膨張力を受けたコイルは, 補強リングによって補強され, さらに補強リングは上下補強円板で支持される構造である。したがって, 新補強構造を構成するのはコイル, 補強リング(outer ring), 補強円盤(cover plate)であり, 電極構造などの付帯構造は無視して同心円筒を仮定する。これにより, 肉厚円筒の焼きばめと同じ考え方が適用できる。このとき, 補強円盤と補強リングは最外層で固定されていると仮定した。計算対象は, 以前にコイルテストを実施したコイル[3, 4]を想定し

て計算し, さらに他のコイルへの適用性について議論を行う。テストコイルは, 10 mm幅のCVD法-(Y,Gd)BCOテープを用いて作製した, 内径219 mm, 外径240 mm, 巻厚約11 mmのダブルパンケーキコイルである。補強リングとして層厚15mmのFRP製リング, 補強円盤として厚み3mmのFRP製円板を用いている。計算には, 構成材料の熱収縮, ヤング率, ポアソン比が必要で, 300K から4.2K までの熱収縮はFRPで0.28%, コイルで0.264%とし, ヤング率はそれぞれ24GPa, 95GPaと設定した。ポアソン比は0.3とした。コイルは各構成材料の機械特性の平均値を有する一体変形を仮定した。

3. 結果と議論

コイルよりも補強構造の熱収縮が大きいために, 冷却した際にコイルには補強構造からの圧縮応力が印加される。想定した構成材料では, コイル外部に約0.5 MPaの径方向圧縮応力が印加される。この値は, 用いる材料の熱収縮率とヤング率によって変化し, 高ヤング率あるいは高熱収縮率の材料を用いることで制御することが可能である。

図1に, 電磁応力印加時の内部応力分布を示す。前回(2012年秋)は, 補強構造の応力分担を実験結果に合うように決定したが[4], 今回は熱応力及び電磁応力によるコイルの変形(変位)から, コイルと補強構造の界面に誘起される圧力を焼きばめの式を用いて算出し, そこから内部応力分布を計算した。元になる電磁応力分布はref[4]に示したコイルにバックアップ磁場8T中で1500Aの通電を行った際に対してWilsonの式とBJRの両方を用いて計算した結果を用いた。計算は, 電磁力から補強構造の寄与を差し引く形で計算している。図中に示した応力は空間平均値であり, ヤング率を用いて計算したひずみの値は, 実験結果で得られたひずみの値と比較すると, BJRで見積もった値と比較的良好一致を示すことが分かった。このとき, 電磁力と熱ひずみを合わせた径方向圧縮応力は, 最外層で約15MPaとなり, 最内層に向かって単調に減少することが分かった。

4. まとめ

同心円筒を仮定することで, 新規コイル補強(Yoroï)構造の補強効果及び内部応力分布を解析的に計算した。その結果, 本構造で大幅な補強効果が得られることが確認された。本手法を用いることで任意の形状と材料に対して, 補強構造設計が可能となる。

参考文献

1. D. Markiewicz *et al.*, IEEE TAS 22 (2012) 4300704.
2. S. Awaji *et al.*, IEEE TAS 24 (2014) 4302005.
3. S. Nagaya *et al.*, IEEE TAS 23 (2013) 4601204.
4. 渡部 智則ら, 低温工学 48 (2013) 213.

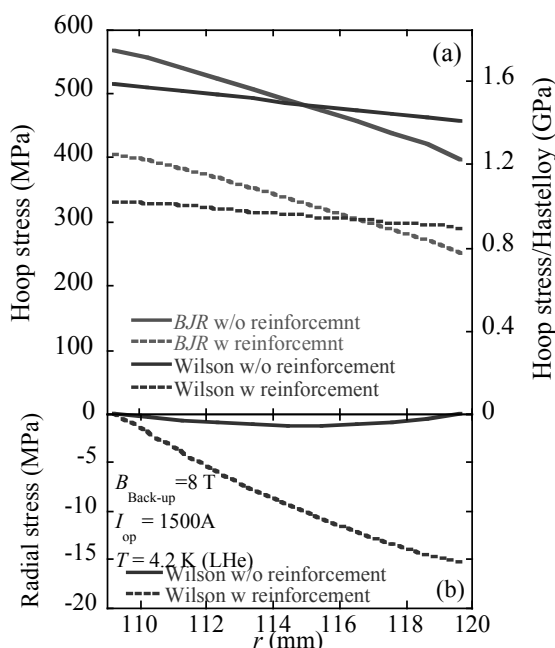


Fig. 1 Stress distributions with and without the reinforcement structure in the coil at 8 T and $I_{op}=1500$ A.

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発～プロジェクト概要～

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI.
 —Outline of the project—

横山 彰一, 井村 武志, 松田 哲也, 長廣 利成, 田邊 肇, 有吉 昭彦, 田中 博文(三菱電機);
 中村 武恒, 小林 哲生, 白井 康之(京大); 宮城 大輔, 津田 理(東北大)

YOKOYAMA Shoichi, IMURA Takeshi, MATSUDA Tetsuya, NAGAHIRO Toshinari, TANABE Hajime, ARIYOSHI Akihiko,
 TANAKA Hirofumi (Mitsubishi Electric Corp.); NAKAMURA Taketsune, KOBAYASHI Tetsuo, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.);
 MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)
 E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

医療用MRI 超電導マグネットを液体ヘリウムレス、省エネルギー化にするために高温超電導コイルの適用が期待されている。H25年度より、高温超電導を適用した高安定磁場コイルシステム技術を取得、実証する研究開発プロジェクトを開始した。

本テーマは、3T-MRI 超電導マグネット用の高温超電導コイルを開発し、実用化の見通しを得ることを最終目標としている。

本報告では、本プロジェクトの実施内容の概要と昨年度実施した当該テーマの成果について報告する。

2. 高温超電導コイル化技術

Re 系超電導線材は、超電導薄膜の剥離方向応力に弱く過大な面方向引っ張り応力により超電導特性が劣化する[1]。対策として、2重絶縁フィルム的一方に両面フッ素コーティングを施した線材(フジクラ製)を用い、また、コイル剛性を保つために極低温耐クラック性エポキシで真空含浸した。複数個のコイルを試作し、液体窒素温度で熱サイクルを加え測定した結果、コイル内での劣化はなく良好な結果が得られた[2]。各コイル間で臨界電流 I_c のバラツキが約7%発生したが、おもに素線 I_c のバラツキと考えられる。線材総長5kmの I_c データを分析した結果についても報告し、その I_c 分布がコイル損失に影響することも解析により検討している[3]。

このコイル製作方法をベースにしてボア直径300mmコイルの基本設計を実施した。主な諸元を Table1に示す。本コイルは、本年度に製作する予定である。

3. 高精度電流計測

Re 系線材は幅広のテープ形状かつ臨界電流密度が大きいいため磁化が他の線材に比べ大きい。コイル磁化の安定性への影響を精度良く評価するためには通電電流を高精度で測定する必要がある。そこで、通電電流の安定度などを高精度で測定する手法を提案した(Fig.1)。磁化の影響が小さいNbTi大口径超電導マグネットを用い、磁場で電流を評価した。その結果、10ppm以下の精度で測定できることが確認できた。計測例を Fig.2に示す。

4. H26 年度実施予定

今年度は、NMR計測できる均一度を確保したボア直径300mmコイルを試作し、磁化の影響を評価する。また、本コイルを用いたイメージングシステムも検討する予定である。

5. まとめ

高温超電導コイルを用い、MRI 超電導マグネットの実用化見通しを得る研究開発プロジェクトを開始した。昨年度は、劣化しないコイル化技術を開発し、今年度試作するボア直径300mmコイルの基本設計を実施した。

謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)により委託を受け実施したものである。

参考文献

- [1]横山彰一: 第87回低温工学・超電導学会予稿集(2013),P2
- [2]井村武志, 他: 第89回低温工学・超電導学会予稿集(2014) 3A-p02
- [3]中村武恒, 他: 第89回低温工学・超電導学会予稿集(2014) 3A-p03

Table1 Specifications of the 300mm bore test coil.

内径	300mm
外径	400mm
軸長	450mm
中心磁界	2.9T
最大経験磁界	4.2T
臨界電流/磁界	370A(20K)/3.6T(33°)
コイルAT	1.5MA
平均電流密度	139A/mm ²
運転電流	237A
磁場均一度	1.64ppm/100mm球Vrms
漏れ磁界(5ガウス)	R3.1m × Z3.9m

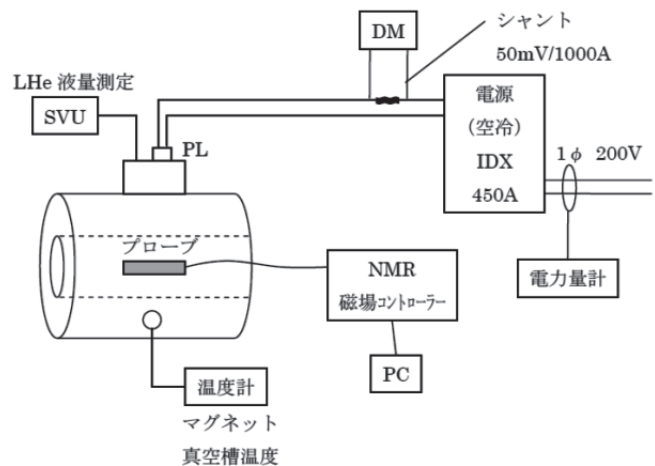


Fig.1 Schematic of the high precision current measurement system.

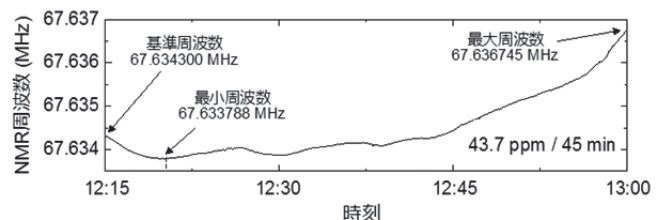


Fig.2 Current measurement result by a NMR probe.

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発 ～HTS モデルコイル試作～

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI
-HTS model coil production-

井村 武志, 植 哲昭, 長廣 利成, 松田 哲也, 横山 彰一, 田中 博文(三菱電機)

IMURA Takeshi, UE Tetsuaki, NAGAIRO Toshinari, YOKOYAMA Shoichi, TANAKA Hirofumi (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Imura.Takeshi@db.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

我々は MRI 超電導マグネットに高温超電導 (HTS) コイルを適用する研究開発を実施している[1]。Re 系超電導線材を適用した HTS コイルの課題として、線材の機械的特性に起因する特性の劣化がある。HTS コイル一体含浸後の超電導特性の劣化対策として、フッ素コーティングフィルム絶縁線材に合わせた耐クラック性エポキシを選定し、小型モデルコイルを試作して検証した結果、エポキシ一体化による劣化が見られない良好な結果が得られた。

本報告では、選定した HTS 線材と真空含浸用エポキシ、そして試作したコイルの評価結果について報告する。

2. Re 系 HTS 線材、エポキシの選定

Re 系超電導線材は、その構造からテープ面方向の引っ張り(剥離)応力に弱く、超電導特性劣化の要因となる。この Re 系線材の特性劣化対策として、2 重の絶縁フィルムの一方のフィルム両面にエポキシとの接着力を低下させるフッ素コーティング施工したものを選定した((株)フジクラ製)。これにより過大な剥離応力が加わっても、超電導線側のフィルム面が剥離し、超電導線の劣化が抑制できる。今回使用した HTS 線は、導体幅 5mm、導体厚み 0.16mm(金属基板 75 μ m、安定化銅 75 μ m)、臨界電流 250A 以上@77K 自己磁場の寸法、電気特性を有する線材を使用している。

真空含浸用エポキシは極低温でコイル剛性を維持するために耐クラック性が必要である。今回、極低温(80K 以下)での脆性が少ないエポキシを選定した。このエポキシの常温での機械特性試験結果を Table.1 に示す。

以下では、この HTS 線材と真空含浸用エポキシを用いた小型モデルコイルを試作し、劣化対策の有効性を確認する。

3. 小型モデルコイル試作と通電結果

試作した HTS 小型モデルコイルの諸元を Table.2 に示す。シングルパンケーキコイルとして巻線後、上述したエポキシにて真空含浸し、80℃、7 時間で硬化一体化した。この HTS コイルの外観写真を Fig.1 に示す。

試作した小型モデルコイルを液体窒素で冷却し、通電特性を複数回測定した。試作した 10 個の小型モデルコイルの電流-電圧(I-V)特性を Fig.2 に示す。Fig.2 のグラフはインダクタンス及び接続抵抗分を除いた電圧を表示し、臨界電流付近を拡大している。図のように各コイルの特性は概ね揃っており、また顕著な劣化は見られず、良好な特性が得られた。発生電圧 0.3mV を閾値としたコイルの臨界電流 I_c は平均で 89.8A であり、バラツキは 3σ で 7.2A (8%) であった。

このコイル I_c のバラツキを評価するため、購入した HTS 線材の特性を分析した。磁化法で求めた線材ロット間のバラツキは 10~20%程度あることから、Fig.2 で得られた I_c のバラツキの要因は線材ロット間の I_c のバラツキによるものと考えられる。設計するコイルの I_c 分布を考慮し、使用する線材の I_c を元に適正配置することで多少の裕度を得ることができる。

4. まとめ

選定した HTS 線材と真空含浸用エポキシを用いて小型モデルコイルを試作し、良好な通電特性結果を得た。また、HTS

線材の I_c 特性を分析し、HTS コイル I_c におけるバラツキ要因を検討し、HTS マグネット設計におけるコイル配置の指針を得た。

謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)により委託を受け実施したものである。

参考文献

[1]横山彰一,他:第 89 回低温工学・超電導学会予稿集(2014)

Table.1 Properties of the epoxy

曲げ強さ	MPa	25℃	57
引っ張り強さ	MPa	25℃	29.9
圧縮強さ	MPa	25℃	183
せん断接着強さ	MPa	25℃/SUS	12.2

Table.2 Specifications of the model coil

内径	150mm
外径	230mm
巻数	200 ターン
インダクタンス	10.9mH
Bmax at 100A	0.42T

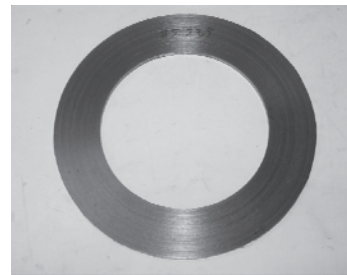


Fig.1 150mm bore model coil

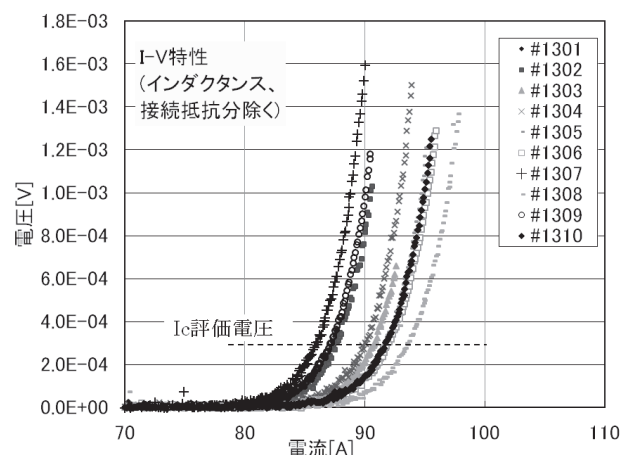


Fig.2 I-V characteristics of the model coils

GdBCO 高温超電導小型ダブルパンケーキコイルの特性評価(1) - 試作と通電特性の定量評価

Characteristics evaluation of GdBCO HTS small-sized double pancake coil (1) - Fabrication and quantitative evaluation of current carrying capability

中村 武恒, 柴山 優花 (京大); 横山 彰一 (三菱電機)

NAKAMURA Taketsune, SHIBAYAMA Yuka (Kyoto Univ.); YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)[1]の一環として、高温超電導 MRI の開発に向けたコイル中心磁場安定度の評価と同改善法の検討を実施している。

本研究では、上記検討の一環として、GdBCO 高温超電導ダブルパンケーキコイル(フラットワイズ巻, 巻数: 30, 中心発生磁場: 100 mT@125A)を試作した。また、試作したコイルについて得られた解析結果と実験結果を比較検討することによって、解析コードの妥当性について検討したので報告する。

2. 小型ダブルパンケーキコイルの試作

本研究では、(株)フジクラ製のGdBCOテープ材を検討対象とした。使用したテープ材(ポリイミドテープ絶縁)の臨界電流は300 A@77 Kである。Fig. 1には、試作したコイル(巻数: 30, 内径: 50 mm, 外径: 65 mm, 高さ: 10 mm)の外観写真を示す。本コイルの中心発生磁場は、100 mT@125 Aである。上記コイルを銅製のポピン上に固定し、またコイルエンドと銅電極の間には、発熱の影響を避けるためにビスマス系高温超電導テープ導体が接続されている。さらに、コイル中心磁場はアキシアル型のホールセンサーを使って計測した。

3. 通電特性の評価

まず、コイル巻線前の短尺試料について、その電界(E)-電流密度(J)特性を異なる温度と外部磁場に対して測定するとともに、木須ら(九州大学)が提案している理論式(パーコレーション遷移モデル)[2]によるキャラクタリゼーションを行った。

次に、Fig. 1のコイルを液体窒素にて浸漬冷却し、四端子法によって直流通電特性を測定した。また、測定結果を解析によって再現するために、電流通電した場合のコイル内垂直磁場分布(テープ面に垂直な磁場成分)を2次元静磁場解析で求め(例えばFig. 2), 上記短尺試料について得られた E - J 特性理論式を使って局所電界分布を計算した。さらに、当該電界をコイル全体について求め、それらを加算することでend-to-endの通電特性評価を行った。その際、参考文献[3]に基づいてテープ材通電特性の曲げ歪依存性も考慮した。Fig. 3に結果を示すが、実験結果(シンボル)と解析結果(実線)は立ち上がりの傾きを含めて良く一致しており、本解析法の妥当性や、あるいは試作したコイルが理論解析に耐え得ると考えられることが明らかになった。

謝辞

実験ならびに解析に際して、京都大学大学院工学研究科電気工学専攻・越智貴章氏(H26年3月修了)の援助を受けた。本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(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、三菱電機からの再委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. 横山彰一 他: 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p01 (2014)
2. 木須隆暢 他: 低温工学, Vol. 34, No. 7 (1999) pp. 322-331
3. 諏訪 他, 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター年次報告, Vol. 2011 (2012) p. 29



Fig.1 Photograph of fabricated small-sized GdBCO double pancake coil (turn number: 30, inner diameter: 50 mm, outer diameter: 65 mm, height: 10 mm)

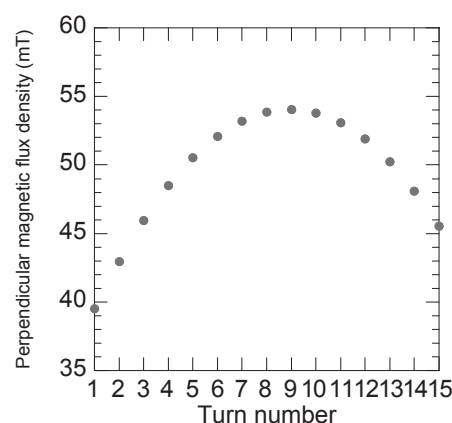


Fig. 2 Example of perpendicular magnetic flux density distribution in the coil (Fig. 1), obtained from 2D electromagnetic field analysis

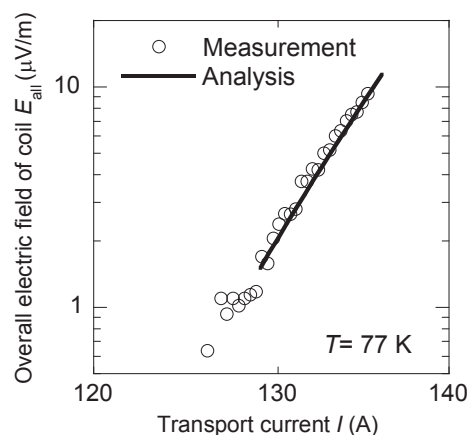


Fig. 3 Experimental and analysis results of electric field (E_{all}) vs. transport current (I) characteristics of the fabricated coil at 77 K

GdBCO 高温超電導小型ダブルパンケーキコイルの特性評価(2) -線材長手方向通電特性のバラつきと電流負荷率決定法に関する検討

Characteristics evaluation of GdBCO HTS small-sized double pancake coil (2)- Longitudinal inhomogeneity of current transport property and determination method of load factor

柴山 優花, 中村 武恒 (京大); 横山 彰一 (三菱電機)

SHIBAYAMA Yuka, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.), YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)

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

1. はじめに

我々は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)[1]の一環として、高温超電導 MRI の開発に向けたコイル中心磁場安定度の評価と同改善法の検討を実施している。前報[2]では、GdBCO 小型高温超電導コイルの試作と電流輸送特性の定量評価結果について報告した。本報では、上記コードを使用し、さらに線材長手方向不均一通電特性を検討した。さらに、上記検討に基づいて得られる最大局所電界を制約条件とした電流負荷率決定法について考察したので、その結果を報告する。

2. 線材長手方向バラツキの解析

本研究では、(株)フジクラ製のGdBCO高温超電導テープ材を検討対象とした。まず、Tapestar[®]によって測定されたテープ材長手方向の局所的臨界電流分布を用い、その度数分布を1 A毎に求めるとともに、Weibull分布関数によってフィッティングした(比較のため、Gauss分布関数によるフィッティングも行った)。

Fig. 1には、Tapestar[®]の測定結果から得られた臨界電流分布の度数プロット(シンボル)を示す[3]。同図から明らかのように、度数分布は非対称性を有することが分かる。さらに、上記度数プロットにWeibull確率密度関数を用いてフィッティングした結果を実線で示すが、Gauss分布関数の結果(点線)よりも精密に表現できている[3]。

コイルend-to-endの通電特性の解析に際しては、予め有限要素法によって上記コイルの各要素における磁場ベクトルを求め、通電特性決定のための条件パラメータとする。通電特性の評価には、木須らが提案しているパーコレーション遷移モデル[4]を適用した。さらに、各要素の臨界電流にWeibull分布若しくはGauss分布に基づいて乱数を与え、強制通電した場合の電界を統計的に計算した。そして、同様の計算を全てのターンについて実施し、コイル全体の通電特性評価を実施した。

3. 電流負荷率決定法に関する考察

Fig. 2には、コイル内における線材長手方向の総発熱特性を示す。同図の結果から、総発熱が電界基準(100 μ V/m)に達したときの電流は、バラツキの有無によらず約166Aである。しかしながら、Fig. 3に示すように、コイル各ターンの局所電界は電流160Aにおいてさえも最大250 μ V/mを超えている。詳細な検討の結果、コイル全ての領域における局所電界を100 μ V/m以下とするためには、電流値を150A程度にまで下げなければならない。この値によって電流負荷率を決定する指標が与えられると期待される。詳細は、講演当日に報告する。

謝辞

実験ならびに解析に際して、京都大学大学院工学研究科電気工学専攻・越智貴章氏(H26年3月修了)の援助を受けた。本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(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、三菱電機からの再委託を受けて実施した。

参考文献

1. 横山彰一 他: 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p01 (2014)

2. 中村武恒 他: 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p03 (2014)
3. 越智貴章 他: 第 88 回 2013 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2013) p. 16
4. 木須隆暢 他: 低温工学, Vol. 34, No. 7 (1999) pp. 322-331

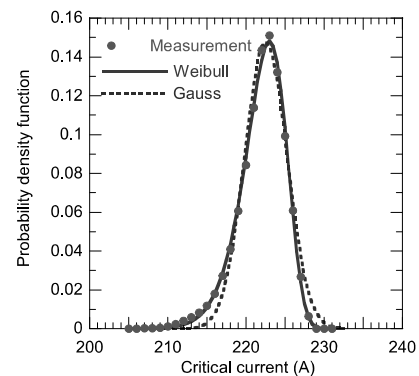


Fig.1 Measurement results of local critical current, obtained from Tapestar[®], in RE-system coated conductor [3]

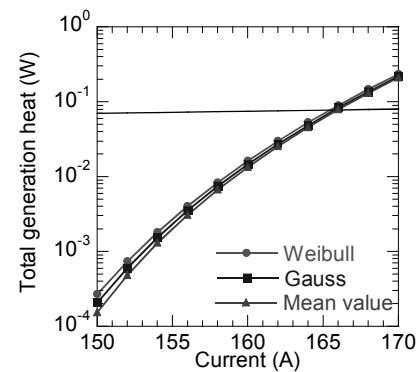


Fig. 2 Analysis results of overall heat generation of the coil

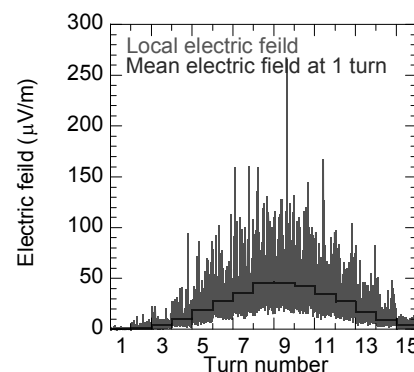


Fig. 3 Analysis result of maximum electric field in the coil at 160 A

高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(1)

-プロジェクト概要-

Development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (1)

- Project overview -

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);
 王 旭東, 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); WANG Xudong, 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

H25 年度より、経済産業省の高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトとして、高磁場 MRI の実現を目指した「高磁場コイルシステムの研究開発」が開始された。本テーマでは、ヒト全身用に用いる 10 T 級 (9.4T) MRI 用磁石の実現を目指している。

2. 高磁場 MRI の意義

MRI を 10T 級に高磁場化すると、従来計測核種である水素素に比べて圧倒的に量が少ない炭素、窒素、リン、酸素を高い信頼度で検出することが可能となり、癌の早期発見や、脳機能解析など、新しい医療診断に適用できることが期待される。また、高強度、高電流密度の REBCO 線材を用いることで、低温超電導磁石と比べてコンパクトな磁石が実現できるとともに、超電導コイルを冷凍機で伝導冷却することによって、潜在的に枯渇リスクがあるヘリウムの使用量を劇的に低減することができる。

3. プロジェクト全体計画

本プロジェクトの全体計画を Fig. 1 に示す。大きく分けて、基盤技術の研究開発、小型磁石 (Small-size model magnet) と中型磁石 (Middle-size model magnet) の 2 つのモデル磁石の開発、ヒト全身用高磁場 MRI 磁石 (Whole body MRI magnet) の設計から構成される。

基盤技術開発の目標は、求められる性能の磁石の設計ができるようになることである。それに対する最も大きな課題は、テープ形状の線材内部に生じる遮蔽電流による不整磁場 (遮蔽電流磁場) である。この不整磁場は、時間変動することも問題になる。また、テープ形状であるため、高均一磁場を発生させるためのコイル配置最適化設計に制約条件が増え、従来よりも難しくなる。その他にもコイル径方向の小さな応力で剥離してしまう REBCO 線材を劣化させないためのコイル化技術、高い電流密度の運転下におけるコイル安定化・保護技術等も重要である。これら基盤技術を、モデルコイルの試作・試験や解析を通じて確立させる。

基盤技術の達成度の検証は、Fig.2 に示す 2 つのモデル磁石を試作することにより行う。2015 年度 (平成 27 年度) に試作予定の小型磁石は、室温ボアは $\phi 100$ mm 程度であるが、10 T 級の磁場強度発生を検証をおこなう。また撮像することで MRI 用磁石としての評価を行う。プロジェクトの最終年度である 2017 年度 (平成 29 年度) には、室温ボア径 $\phi 300$ mm ~ $\phi 600$ mm 程度、磁場強度 7 T 級の中型磁石を試作し、大口径化の検証をおこなう。中型磁石においても、撮像により磁石を評価することを計画している。

基盤技術の研究開発や、小型磁石および中型磁石の開発を通じて得られた知見は、随時ヒト全身用高磁場 MRI 磁石の設計に反映させ、研究開発の方向や目標の妥当性、さらには達成度を確認する。

4. 高磁場 MRI 磁石の基本概念

これまでの検討により、重要課題である遮蔽電流磁場に対しては、高精度磁場計測をしながら、超電導シムコイルと室温部に配置したアクティブシムコイルを用いてリアルタイムシミングすることを考えている。

5. まとめ

高磁場 MRI 用磁石を目指した、プロジェクトの概要について述べた。今後、基盤技術の研究開発を進めるとともに、モデル磁石の開発を通じて、ヒト全身用高磁場 MRI 磁石の技術確立を目指していく。

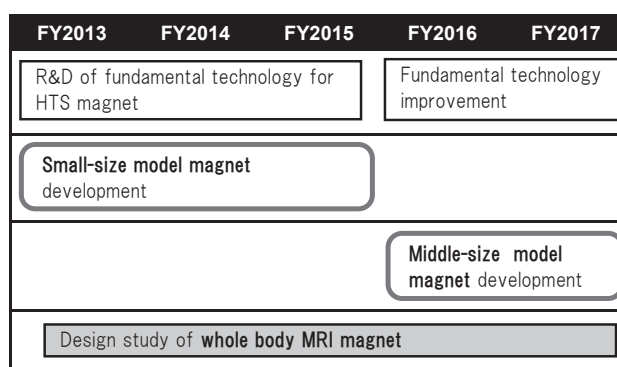


Fig. 1 Project schedule

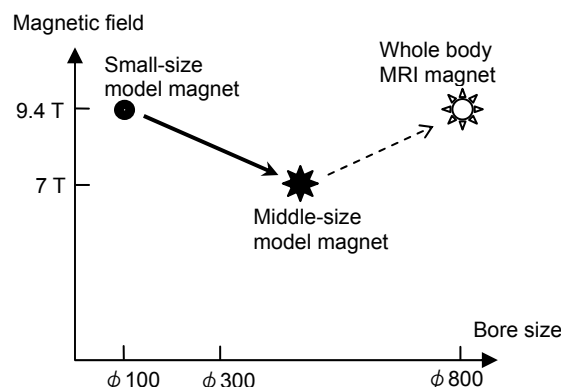


Fig. 2 Model magnet

<謝辞>

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<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 用高温超電導磁石の開発(2) -極小口径 10T コイル-

Development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2) -a small-bore 10 T superconducting coil-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);

王 旭東, 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, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (TOSHIBA);

WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);

NOGUUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

E-mail: hiroschi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

REBCO 線材は、テープ形状のため、外部磁場を遮蔽するように遮蔽電流が線材に流れてしまい、MRI 撮像に必要な均一な磁場空間を作ることが困難となる。そこで、10 T 級の磁場発生可能な極小口径(内径 ϕ 50 mm)のコイルを試作し、遮蔽電流による不整磁場の影響を調査することを目的としている。本発表では、極小口径 10 T 級コイルの設計およびコイルの試作結果より得られたコイル化に関する技術課題について報告する。

2. コイル設計

2 種類の REBCO 線材(A および B)を用いた場合のコイル設計案(#1 および #2)を Table 1 に示す。線材全長および単長の違い等により、発生可能な磁場が異なる設計案となっている。このコイルに発生する遮蔽電流による磁場の影響を調べるため、各ターンに印可される垂直磁場成分を打ち消すように矩形ストリップにシート電流が流れるとし、遮蔽磁場を計算した。コイル #1 において、通電電流を 50 A から 200 A まで 50 A 刻みで変化させた場合の中心部の遮蔽磁場の計算結果を Fig.1 に示す。遮蔽磁場は 100 A 近傍でピークを持つ結果となったが、これは電流が増加するにつれて負荷率が上昇し、遮蔽電流が流れにくくなるためである。また、線材の臨界電流値が異なると遮蔽磁場も大きくことなっており、定量的に評価するためには、線材の臨界電流分布も考慮する必要がある。

3. コイル試作評価

線材 A を用いてシングルパンケーキコイルを試作し、液体窒素中にて通電試験を実施した。含浸コイルは径方向に分割することで熱応力(σ_r)を低減させているが、7 分割したコイル($\sigma_{rmax} = 2$ MPa)では Fig.2 に示すように 8 個中 5 個のコイルで劣化する結果となり、20 分割したコイル($\sigma_{rmax} = 0.4$ MPa)においても 38 個中 7 個のコイルで劣化する結果となった。同じ諸元のコイルにおいて劣化が複数生じていることから線材の許容剥離応力にばらつきがあり、弱い箇所が存在すると考えられる。対策として、線材の許容剥離応力を向上させることが不可欠であると考え、線材を補強することを検討している。一方、線材 B を用いたシングルパンケーキコイルは 7 分割することで σ_r を 1.4 MPa 以下としているが、Fig.3 に示すように劣化のないコイルを製作できることを確認した。

4. まとめ

内径 ϕ 50 mm, 外径 162 mm のシングルパンケーキコイル 30 枚を積層した極小口径 10 T 級コイルの電気設計を実施し、遮蔽磁場を計算した結果、コイル中心部で約 1 T の遮蔽磁場が発生する結果となった。また、2 種類の線材でコイル化を進めた結果、許容剥離応力のばらつきが小さい線材においては、劣化のないコイルを製作できることを確認した。引き続き、コイル製作を進め、遮蔽磁場評価を行う。

<謝辞> 本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<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 small-bore 10 T superconducting coils

Coil No	#1	#2
Tape width (mm)	5	4
Tape thickness (mm)	0.13	0.1
Tape I_c @ 77 K, s.f.	200	100
Inner dia. (mm)	50	50
Outer dia. (mm)	162	132
Height (mm)	168	105
Number of pancakes	30	22
Turns	8400	5280
Tape length (km)	3	1.5
Operating current (A)	200	153
Central magnetic field (T)	10	7.5

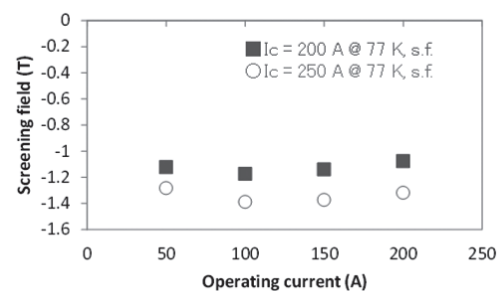


Fig.1 Screening field of small-bore 10 T superconducting coil

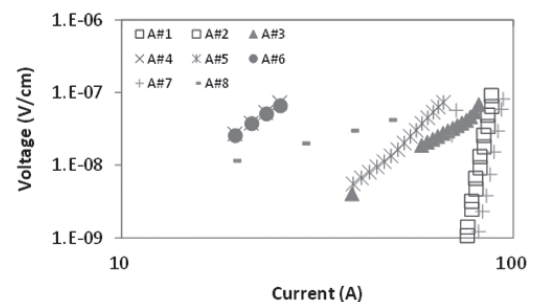


Fig.2 V-I characteristics of coils by using tape A at 77 K

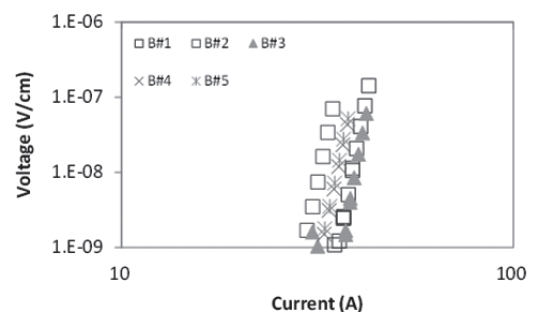


Fig.3 V-I characteristics of coils by using tape B at 77 K

高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(3) –コイル配置最適化設計–

Development of an HTS Magnet for Ultra-high Field MRI

– Optimal Design of Coil Configuration –

石山 敦士, 王 旭東(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 野口 聡(早大/北大);
 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)
 ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);
 NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi,
 NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、経済産業省プロジェクトである「高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級 (9.4 T) のヒト全身用 MRI の実現を目指している⁽¹⁾。MRI 用磁石では、設計の段階で高均一度磁場を達成している必要がある。高温超電導線材はテープ形状をしており、コイルはパンケーキ巻きされることが多い。そこで、各コイルの層数、1層当たりの巻数などを離散的設計変数として、高磁場均一度を達成するパンケーキコイルの形状最適化設計を行った。

2. 最適化設計条件

設計対象の小型磁石⁽¹⁾は、5 mm 幅、0.12 mm 厚 (超電導層 2.0 μm) の線材で巻くことを想定し、コイル内径、z 方向位置、層数、巻数を設計変数とした。設計対象の小型磁石は、1 mm の間隔を空けて、シングルパンケーキコイルを積み重ねた構造とした (Fig. 1 参照)。設計条件は以下の通りである。

- ・ 中心磁場: 9.4 T ± 0.2%
- ・ 最小コイル内半径: 100 mm
- ・ DSV 100 mm で 10 ppm 以下

以上のような設計条件のもと、巻線使用量を目的関数として、最適化アルゴリズムの1つであるシミュレーテッド・アニーリングで最適化設計を行った⁽²⁾。なお、線材は径方向に 0.48 mm 間隔、軸方向に 6 mm 間隔で配置されており、コイルは Fig.1 の z=0 平面を挟んで 4 対とした。

3. 磁場均一度評価

磁場の均一度評価には、ルジャンドル関数による表現が使われる⁽³⁾。

$$B_z = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_{2n} \rho^{2n} P_{2n}(\cos \theta)$$

ここで、 B_0 は中心磁場、 ε は係数、 ρ は中心からの距離、 P はルジャンドル関数、 θ は z 軸からの角度を表している。磁場均一度を高めるためには、係数 ε を小さくすれば良い。係数 ε の算出方法は、多くの文献⁽³⁾⁽⁴⁾で示されている。しかし、高アスペクト比の高温超電導テープ線材では、C 言語などの倍精度計算を行っても、正確に計算できないことも多いことから、Mathematica など、精度保証計算を行う必要がある。

小型磁石の最適化設計結果を Fig. 1 と Table 1 に示す。さらに、最適化設計形状に対する、係数 ε を Table 2 に示す。パンケーキコイル間の 1 mm 空隙を考慮した場合 (With 1 mm gap) と考慮しない場合 (W/O gap) では、算出される 2~6 次の係数 ε が大きく異なる。したがって、設計時には、パンケーキ間の空隙を考慮することが重要であることが分かった。また、1 mm の空隙を考慮した最適化設計結果の 12 次までの磁場均一度評価は、DSV 100 mm で中心との最大誤差が 1.771 ppm であり、十分な磁場均一度を達成できている。

4. まとめ

今回、内半径 200 mm の 10 T 級均一磁場発生コイルの設計に際して、高磁場均一度を達成しながら、巻線使用量を減

らす最適化設計を試みた。パンケーキ間のギャップを考慮する必要があること、磁場均一度を評価する係数の計算方法に注意を払う必要があることが明らかになった。今後、さらに実構造に近いモデルとして超電導層だけに電流が流れていることを考慮した時の磁場均一度を評価する予定である。

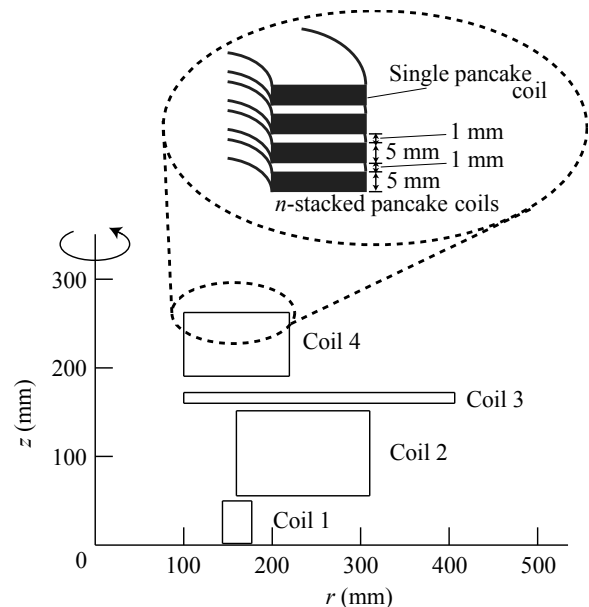


Fig. 1. Cross-section drawing of 10-T class small-size model magnet. It consists of stacked pancake coils with gap of 1 mm.

Table 1. Specifications of optimally designed 10-T class small-size model magnet

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
Inner radius (mm)	143.766	159.540	100.000	100.000
Outer radius (mm)	176.886	310.260	406.240	219.520
z-position (mm)	1.860	55.627	160.082	190.428
Length (mm)	48.000	96.000	12.000	72.000
Current Density (A/mm ²)			100.000	
Turns / Single pancake	69	314	638	249
Number of single pancake	8	16	2	12
Conductor Length (km)			26.000	
B _z (T) @ center			9.382	

Table 2. Coefficients ε of Magnetic Field

Order n	2	4	6
With 1 mm gap	-1.380x10 ⁻⁴	-1.783x10 ⁻²	-2.322x10
W/O gap	1.138	5.059x10	2.406x10 ³
Order n	8	10	12
With 1 mm gap	-3.716x10 ⁵	1.467x10 ⁷	-1.418x10 ⁹
W/O gap	-4.747x10 ⁵	1.960x10 ⁷	-1.624x10 ⁹

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.89 (2014) 3A-P05.
2. S. Noguchi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 13 (2003) 1856-1859.
3. D. B. Montgomery: *Solenoid Magnet Design* (1969).
4. Y. Iwasa: *Case Studies in Superconducting Magnets* (2009).

高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(4)－巻線誤差の不整磁場への影響－

Development of an HTS Magnet for Ultra-high Field MRI － Analysis on Field Homogeneity Caused by Winding Error －

石山 敦士, 王 旭東(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 野口 聡(早大/北大);
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)
ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);
NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi,
NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、経済産業省プロジェクトである「高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4T)のヒト全身用 MRI の実現を目指している⁽¹⁾。高温超電導コイル設計では、線材がテープ形状をしているため、製作時の巻線誤差が発生磁場均一度に影響することが想定される。そこで本発表は、テープ線材の離散的な配置を考慮した最適化設計手法⁽²⁾によって設計された内径 200 mm の 10 T 級均一磁場発生コイル(「小型磁石」と呼ぶ⁽¹⁾)に対して、巻線誤差が磁場均一度に与える影響を解析評価したので報告する。

2. コイル諸元と巻線誤差の設定

小型磁石は、5 mm 幅、0.12 mm 厚(超電導層 2.0 μm)の線材の離散配置を考慮して、DSV 100 mm で 10 ppm 以下かつ巻線使用量が少なくなるように最適化設計されている⁽²⁾。線材は径方向に 0.48 mm 間隔、軸方向に 6 mm 間隔で配置されている。コイルは 4 対である。コイル諸元と概略図を Table 1, Fig. 1 にそれぞれ示す。巻線誤差は、巻棒形状を想定して上限値を巻線と巻棒の間の隙間である 0.2 mm とした。

3. 巻線誤差による不整磁場の評価

磁場の均一度評価には、ルジャンドル関数による表現が使われる⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$B_z = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_{2n} \rho^{2n} P_{2n}(\cos \theta)$$

ここで、 B_0 は中心磁場、 ε は係数、 ρ は中心からの距離、 P はルジャンドル関数、 θ は z 軸からの角度を表している。係数 ε が小さいほど磁場均一度が高くなる。 $z=0$ の磁石中心面に対してコイルが対称および非対称にずれた場合について、Fig. 1 の各コイルの内径、外径、中心面からの位置、コイル長がそれぞれ設計値から ± 0.2 mm までずれた場合の係数について解析を行い、DSV100 mm の各次の係数を評価した。コイル 1 の内径に対称および非対称の巻線誤差を与えた場合、各次の係数の変化を Fig. 2 に示す。対称にずれた場合は偶数低次の係数が巻線誤差の増大とともに大きくなり、非対称の場合は奇数低次も磁場均一度に影響する。他の結果においても 1 次から 4 次までの比較的 low order の不整磁場成分が大きくなり、僅かな誤差でも磁場均一度が大きく低下することが明らかになった。また、0-0.2 mm の範囲で巻線誤差を正規分布と仮定した場合の解析評価を行った結果、低次の係数が大きくなるものの 1 ppm 以下と比較的小さいことが分かった。詳細は発表当日にて報告する。

4. まとめ

今回は 10 T 級小型磁石を対象に、巻線誤差が磁場均一度に与える影響を解析評価した。その結果、より低次の均一度が影響されやすいことが分かった。今後は、必要磁場均一度を確保するための製造指標を詳細に評価していくとともに、製造誤差などに強いマグネット設計としてロバスト設計なども検討する予定である。

Table 1 Specifications of 10-T small-size model coil

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
Inner radius (mm)	143.766	159.540	100.000	100.000
Outer radius (mm)	176.886	310.260	406.240	219.520
Length (mm)	48	96	12	72
Current Density (A/mm ²)	100.000			
Turns / Single pancake	69	314	638	249
Number of single pancake	8	16	2	12
B_z (T) @ center	9.382			

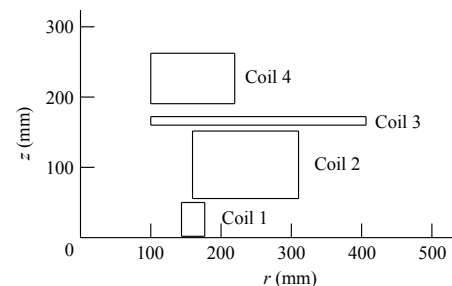


Fig. 1. Schematic drawing of 10-T class small-size model magnet.

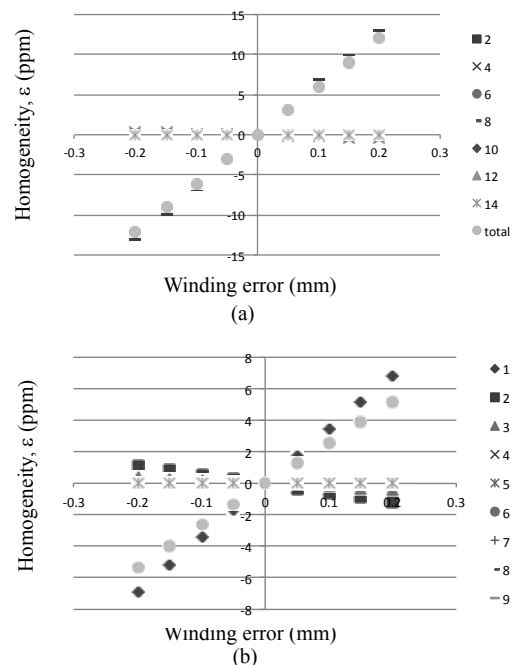


Fig. 2 Coefficients ε at DSV 100 mm of 10-T small model coil including the (a)symmetric and (b)asymmetric winding error of Coil 1 to the midplane.

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.89 (2014) 3A-P05.
2. A. Ishiyama, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.89 (2014) 3A-P07.
3. D. B. Montgomery: *Solenoid Magnet Design* (1969).
4. Y. Iwasa: *Case Studies in Superconducting Magnets* (2009).

高磁場 MRI 用高温超電導磁石の開発(5) – 遮蔽電流磁場の計算評価 –

Development of an HTS Magnet for Ultra-high Field MRI

– Numerical Analysis on Magnetic Field generated by Screening Current –

石山 敦士, 王 旭東(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 野口 聡(早大/北大);
 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)
 ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);
 NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi,
 NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、経済産業省プロジェクト「高温超電導磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4 T)のヒト全身用 MRI の実現を目指している⁽¹⁾。高温超電導コイルでは、線材がテープ形状をしているため、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによる不整磁場が撮像空間における磁場均一度や時間安定性を損なうことが問題となる。今回は、テープ線材の離散的な配置を考慮して最適化設計⁽²⁾された内径 200 mm の 10 T 級均一磁場発生コイル(小型磁石)⁽¹⁾を対象にして、遮蔽電流を三次元電磁場数値解析⁽³⁾によって計算し、設計磁場に対する不整磁場および時間安定性を評価した。

2. コイル諸元

対象のコイルは、幅 5 mm、厚さ 0.12 mm(超電導層 2.0 μm)の線材の離散配置を考慮して、10 ppm @ DSV 100 mm 以下かつ巻線使用量が少なくなるように最適化設計⁽²⁾された内径 200 mm の 10 T 級小型磁石である。線材は径方向に 0.48 mm 間隔、軸方向に 6 mm 間隔で巻線されている。磁石は 4 対のスプリットコイルで構成されている。磁石諸元と概略図を Table 1, Fig. 1 にそれぞれ示す。

3. 遮蔽電流磁場解析

REBCO 超電導線材は超電導層の断面アスペクト比が非常に大きいことから、線材厚み方向で電磁場が一様であると仮定する近似を用いて、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計算を行った⁽³⁾。

巻線はダブルパンケーキ巻として、電流を 0.1 A/s で 288 A まで励磁し、保持した場合について計算した。遮蔽電流磁場の時間変化を Fig. 2 に示す。不整磁場は励磁直後で -0.04 T、励磁後 1 時間で -0.03 T 発生している。次に、半径 50 mm の球面上で磁場分布を Legendre 級数展開して、10 次まで磁場均一度を評価した。励磁後 1 時間の磁場均一度を Table 2 に示す。遮蔽電流磁場なしの磁場を見ると、均一度 10 ppm 以下の設計であったが、2 次の項で 50 ppm に悪化している。これは、今回の解析で、ダブルパンケーキ巻を想定したため、パンケーキ間の渡りの影響と考えられる。さらに、遮蔽電流磁場の影響により、均一度が 2 次は 1100 ppm、4 次は 180 ppm となった。また全体としては、-900 ppm となった。

4. まとめ

内径 200 mm の 10 T 級均一磁場発生小型磁石を対象にして、遮蔽電流を電磁場数値解析によって計算し、不整磁場の時間安定性、磁場均一度を評価した。今後、遮蔽電流磁場を抑制しつつ、均一度を保つための巻線構造やコイル配置を検討する予定である。

<謝辞>

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<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 Specifications of 10-T class small-size model magnet.

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
Inner radius (mm)	143.766	159.54	100.00	100.00
Outer radius (mm)	176.886	310.26	406.24	219.52
height (mm)	48.0	96.0	12.0	72.0
Turns / Single pancake	69	314	638	249
Number of single pancakes	8	16	2	12
Transport current (A)	288	288	288	288

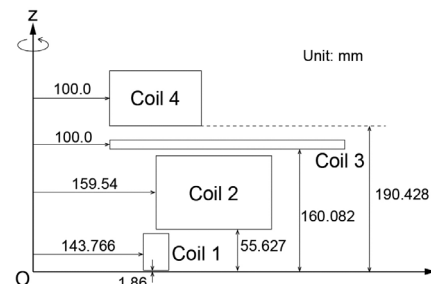


Fig. 1. Cross-sectional drawing of 10-T class small-size model

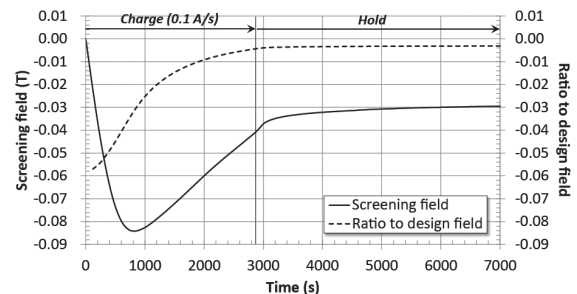


Fig. 2 Numerical results of magnetic field generated by screening current.

Table 2 Coefficients of Legendre polynomial and homogeneity at DSV 100 mm of 10-T class small-size model magnet.

n	Without screening current		With screening current		Irregular field
	Magnetic field (T)	Homogeneity (ppm)	Magnetic field (T)	Homogeneity (ppm)	Magnetic field (T)
0	9.406		9.376		-3.0×10^{-2}
2	-5.1×10^{-4}	-5.5×10	-1.0×10^{-2}	-1.1×10^3	-9.5×10^{-3}
4	5.9×10^{-5}	6.3	1.7×10^{-3}	1.8×10^2	1.7×10^{-3}
6	-7.1×10^{-7}	-7.5×10^{-2}	-1.5×10^{-4}	-1.6×10	-1.5×10^{-4}
8	-1.5×10^{-5}	-1.6	-5.3×10^{-7}	-5.6×10^{-2}	1.4×10^{-5}
10	1.5×10^{-6}	1.6×10^{-1}	-2.3×10^{-7}	-2.4×10^{-2}	-1.7×10^{-6}
Total		-5.0×10		-9.0×10^2	

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.89 (2014) 3A-p05.
2. A. Ishiyama, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.89 (2014) 3A-p07.
3. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23 (2013) 4100805.