

MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 3TREBCO 超電導マグネット

Half-size 3T REBCO superconducting magnet with active shielding coils for MRI

横山彰一, 三浦英明, 野村航大, 松田哲也, 井上達也, 江口諒, 森田友輔, 大竹俊輔, 佐藤伸治 (三菱電機)
 YOKOYAMA Shoichi, Miura Hideaki, Nomura Kota, Matsuda Tetsuya, Inoue Tatsuya,
 Eguchi Ryo, Morita Yusuke, Otake Syunsuke, Sato Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)
 E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体ヘリウムレスの医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を平成 28 年度より NEDO プロジェクトとして実施中である[1-3]。本プロジェクトでは、MRIシステムへの実用化に向け超電導マグネットシステムを開発し、課題などを検討しており、今年度(H30)には 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットを試作し、MRIへの適用を検証する。本報告では、1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットの試作状況および冷却システムについて述べる。

2. 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネット試作状況

本年度完成を目指し、試作している 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルの諸元を Table 1 に示す。コイルは 3 分割のメインコイルと 1 対のアクティブシールドコイルから成る。使用する超電導線材の線長は 72km、インダクタンスは 145H、イメージング定格磁場 2.9T での蓄積エネルギーは 1.6MJ である。コイルはシングルパンケーキコイルを 220 枚積層し接続する。コイルの径方向巻線精度は 0.1mm でありコイルの各ブロックの軸方向、径方向設置位置精度は 0.5mm で製作している。現在、コイル積層を実施しており、全体組立後に後述のクライオスタットに組み込み、真空引き後冷却し、励磁、磁場均一度測定およびシミングを行い、磁場均一度 2ppm 以下を達成し、イメージングによる実証を行う予定である。

3. 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネット冷却システム

マグネットの外形は、全高 1.8m、軸長 1.7m、常温ボア径 480mm である。コイルのある冷凍機 2nd ステージの被冷却重量が約 900kg、1st ステージ分は約 100kg と 2nd 側が重いから、冷凍機 1 台での室温からの初期冷却時間は Fig.1 に示すように、約 3 週間を要する解析結果が得られた。そこで、コイルの初期冷却時間を短縮するために冷凍機を 2 台設置し、さらに冷凍機の 1st ステージの冷凍能力を有効活用するために熱スイッチを 1st ステージと 2nd ステージの間に 2 個設置した。その結果、Fig.2 に示すように、約 10 日間と半減できる見込を

Table 1 Specifications of the half-size 3T Coil

Item	Specification
Inner Diameter	560 mm
Outer Diameter	1200 mm
Axial Length	980 mm
Inductance	145 H
Rated Current	148 A
Rated Current Density	120 A/mm ²
Stored Energy	1.58 MJ
Central Magnetic Field	2.9 T
Maximum Magnetic Field	4.2 T
Magnetic Field Homogeneity	1.7 ppm (250 mm DSV)

得た。Fig.2 で分かるように初期冷却時にコイルと冷凍機の温度差が大きいことから熱抵抗が改善できればより冷却時間が短縮できる。定常時のコイル設定温度は 20K 以下であることから、通常は冷凍機 1 台で運転する設計であり、他の 1 台はメンテナンス時に切り替えて使用することを想定している。

4. まとめ

液体ヘリウムを使用しない MRI 高温超電導マグネットを設計し、製作中である。伝導冷却方式の課題であるコイルの初期冷却時間の短縮について、半減の見込を得た。2018 年度内に製作完了し、冷却・励磁試験を実施する。

謝辞

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

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.76
2. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.1
3. H. Miura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.2

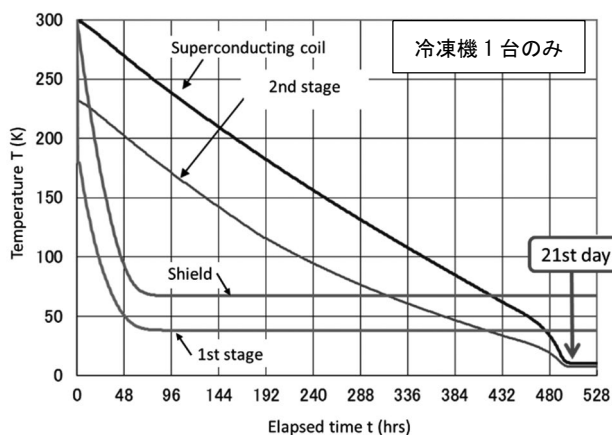


Fig.1 Results of the initial cooling properties analysis on the half-size active shield-type 3T coil (cooled by one GM cryocooler without thermal switch)

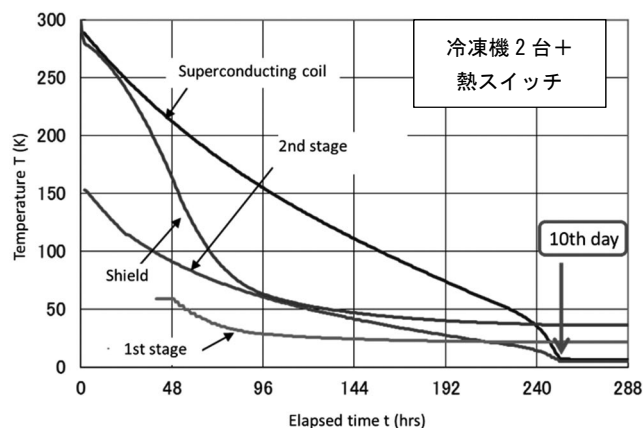


Fig.2 Results of the initial cooling properties analysis on the half-size active shield-type 3T coil (cooled by two GM cryocoolers with thermal switches)

MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導コイルの最適磁気設計

Optimal magnetic design of a half-size 5T REBCO superconducting magnet with active shielding coil for MRI

三浦英明, 松田哲也, 野村航大, 横山彰一, 井上達也, 江口諒, 森田友輔, 大竹俊輔, 佐藤伸治 (三菱電機)
 MIURA Hideaki, MATSUDA Tetsuya, NOMURA Kota, YOKOYAMA Shoichi, INOUE Tatsuya, EGUCHI Ryo,
 MORITA Yusuke, OTAKE Shunsuke, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)
 E-mail: Miura.Hideaki@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

高温超電導体を応用し, 液体ヘリウムかつ小型・軽量の医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を行っている[1]。開発のターゲットは全身撮影用 3T-MRI マグネットである。コイル電流密度 200 A/mm², 最大経験磁場 7 T を 1/2 サイズで実証するため, 1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルを試作予定である。

今回, 設計したコイルの形状と諸元を紹介するとともに, コイルの電流負荷率について報告する。

2. 設計コイル形状とコイル諸元

1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導マグネットを製作するため, コイル最適配置を設計した。最適化手法は Simulated Annealing 法を用い, その目的関数は磁場均一度の最小化とした[2][3]。最適化後のコイル諸元を Table1, 1/4 断面図を Fig.1 に示す。

従来のコイルは, 主コイルが 6 群, シールドコイルが 2 群の合計 8 群で構成されていた。主コイルを一体で製作すると, 軸方向電磁応力が最大 135 MPa となり, 超電導特性を劣化させる可能性があった。提案形状では, 主コイルの最も外側のコイル群(No.3 コイル群)を 2 分割し, その間に電磁力を支持できる空間を設けた。No.3 コイル群の電磁力を他のコイル群に伝えない構造とし, 設けた空間を利用して No.3-1, 3-2 コイル群の電磁力を独立に支持することで, 軸方向電磁応力を最大 30 MPa に抑制することができた。高磁場かつ高電流密度の MRI 超電導コイルを実現するには, コイル形状や磁場均一度のみならず, 電磁応力を考慮して設計しなければならない。なお, 磁場均一度は 1.7 ppm(250 mmDSV)であり, 目標の 2 ppm 以下を満たした。

3. コイルの電流負荷率評価

1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルは, 現在製作中の 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルよりも高電流密度化しており, 最大経験磁場も大きい。高温超電導線材の磁場角度依存性を改善し, コイルの臨界電流を向上させるために, 人工ピン導入線材の使用を予定している。今回設計したコイルに, 人工ピン未導入線材を使用した場合と, 人工ピン導入線材を使用した場合の臨界電流を比較した。運転温度は 20 K とした。

Fig.1 に人工ピン未導入線材と, 人工ピン導入線材を使用した場合の, 線材の臨界電流が最も小さくなる部位を示す。前者は No.3-2 コイル群の端部であり, 後者は No.3-1 コイル群の端部であった。臨界電流が最も小さくなる部位の磁場をもとに, 人工ピン未導入線材と人工ピン導入線材の通電特性を比較した。その結果を Fig.2 に示す。原点から引かれた直線は, 臨界電流が最も小さくなる部位におけるコイルロードラインである。人工ピン未導入線材では臨界電流が 286 A (電流負荷率 75 %)に対し, 人工ピン導入線材では 354 A (電流負荷率 61 %)であった。この結果より, コイルの臨界電流を向上させるためには, 人工ピン導入線材の適用が有効である。

謝辞

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

参考文献

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

Table 1 Specifications of the half-size 5T coil.

Central magnetic field	5 T
Maximum magnetic field	7 T
Homogeneous magnetic region	1.7 ppm @250 mmDSV
Inner diameter	560 mm
Outer diameter	1200 mm
Current density	200 A/mm ²
Rated current	215 A

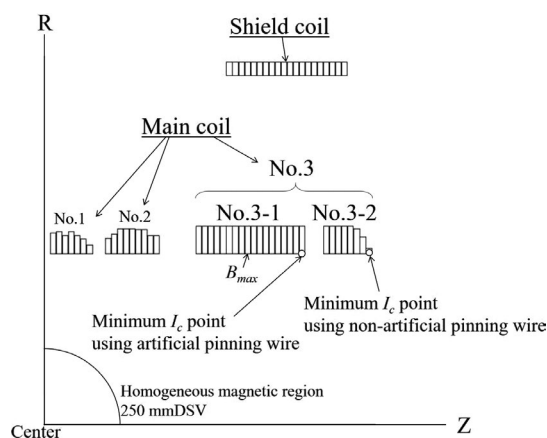


Fig. 1 1/4 cross sectional view of the half-size 5T coil.

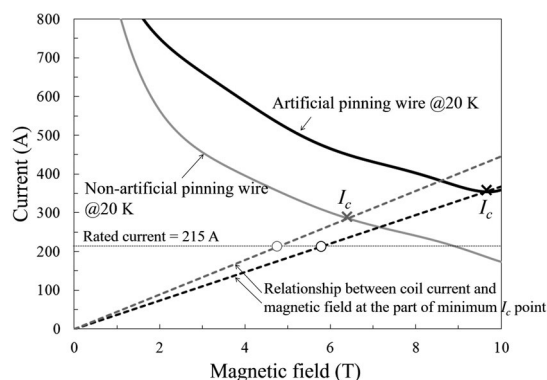


Fig. 2 Load line of the half-size 5T coil.

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 ～伝導冷却型 MRI マグネットにおける遮蔽電流特性評価～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI
- Evaluation of shielding current characteristics in a conduction-cooled MRI magnet -

金丸 允駿, 且尾 一樹, 長崎 陽, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 三浦 英明, 横山 彰一(三菱電機)
KANAMARU Masatoshi, ASAO Kazuki, NAGASAKI Yoh, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
MIURA Hideaki, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)
E-mail: masatoshi.kanamaru.s4@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

MRI 用高温超電導マグネットでは、励磁時に線材内に遮蔽電流が誘起され、時間的に減衰する。この遮蔽電流の減衰に起因する磁場変動は、MRI 用マグネットの中心磁場の時間的安定性に悪影響を及ぼす。また、MRI 用マグネットでは、複数のコイルが積層されるため、各コイルで生じる遮蔽電流分布は複雑になる。このため、1 個のダブルパンケーキコイルで検討してきた遮蔽電流磁場の変動抑制法が、複数コイルで構成される MRI マグネットでも有効であることを検証する必要がある。そこで、本研究では、REBCO 線材を用いたダブルパンケーキコイルを 10 個積層させた伝導冷却型 MRI 用マグネットを作製し、磁場変動抑制法の 1 つである「繰り返しオーバーシュート法」¹⁾が、MRI 用マグネットの中心磁場の遮蔽電流磁場変動に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

本実験に使用した積層型高温超電導マグネットの構造を Fig.1 に示す。実験に使用した高温超電導マグネットは、全てダブルパンケーキコイルで構成されており、磁場測定用 NMR を用いてマグネット中央部における磁場を測定した。本検討に使用したマグネットの励磁波形を Fig.2 に示す。励磁波形として繰り返しオーバーシュート法を適用した。繰り返しオーバーシュート波形を適用する際のオーバーシュート量は、 ΔI_1 が運転電流 I_{oper} の 0.1%、 ΔI_2 が 0.2% の様に、0.6% まで 0.1% ずつ増加させた。また、磁場変動率 ϵ_{center} の評価は、オーバーシュート後 60 秒間の磁場変動率の平均値とした。なお、マグネットの I_c はコイルに使用した線材の J_c - B 特性を用いて算出し、冷却温度 4.5 K で 649 A とした。また、運転電流は 64.91 A、97.37 A、129.83 A (負荷率 10%、15%、20%) の 3 種類とし、マグネット励磁時のスweep速度を 0.1 A/sec とした。

3. 実験結果

運転温度 4.5 K、運転電流を 64.91 A、97.37 A、129.83 A とし、オーバーシュート量 ΔI を変化させた場合の電流ホールド後 60 秒間の磁場変動率 ϵ_{center} の平均値を Fig.3 に示す。これより、電流負荷率に関わらず、オーバーシュート量を増やしていくと磁場変動率の符号が変わること、および、符号が変化する直前の磁場変動率が負荷率の大きさに関わらず目標値の 1 ppm/h 以下になることがわかった。また、負荷率が大きくなるにつれて、磁場安定化に必要なオーバーシュートの量が大きくなることもわかった。なお、この傾向は、シングルコイルにおいても確認されている。また、負荷率が 20% の場合において、磁場変動率を目標値以下にするのに必要なオーバーシュート量を臨界電流値で規格化した値は、シングルコイルでは 4.9% であったのに対し、積層型コイルでは 0.0010% と小さかった。これは、シングルコイルでは、1 個のコイルの遮蔽電流磁場の変動を抑制することになるのに対し、積層型コイルでは複数コイルの合成された遮蔽電流磁場の変動を抑制することになるためであると考えられる。複数コイルの合成された遮蔽電流磁場変動が、シングルコイルの遮蔽電流磁場変動よりも小さくなる原因については、今後検討していく予定である。

以上より、積層型高温超電導マグネットにおいても、負荷率の大きさに関わらず、「繰り返しオーバーシュート法」を適用することで、十分な磁場変動抑制効果が得られると考えられる。

謝辞

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

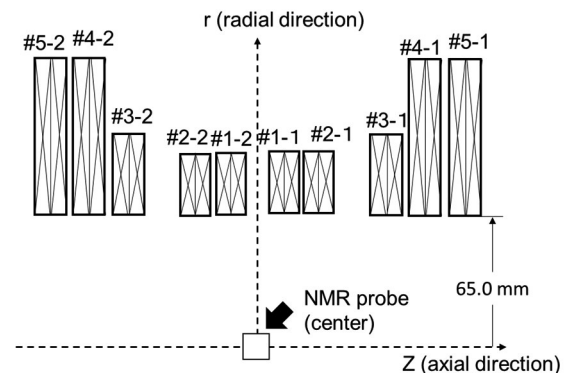


Fig.1 Schematic view of MRI magnet and NMR probe for magnetic field measurement.

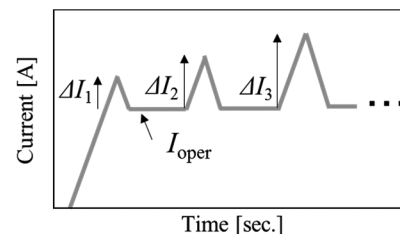


Fig.2 Waveform of magnet current.

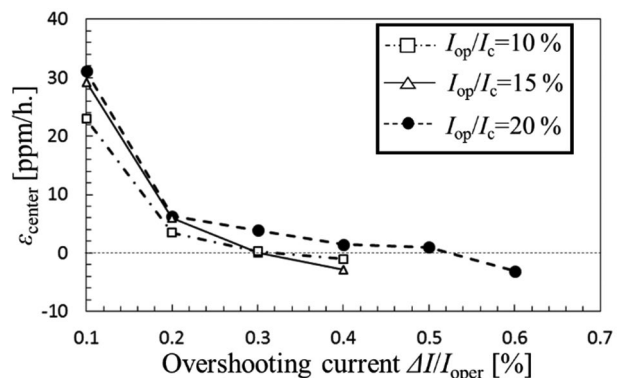


Fig.3 Variation rate of magnetic flux density as a function of ratio of overshooting current to operating current.

参考文献

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

加速器用高温超伝導二極マグネットにおける遮蔽電流磁界の 通電電流制御及び補正用六極コイルとの組み合わせによる低減 Shielding-current induced field mitigation of an HTS dipole magnet for accelerator system by current control and combination with sextupole correction coil

曽我部 友輔(京大・学振 DC1); 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

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

1. はじめに

粒子加速器用マグネットに高温超伝導マグネットを応用する上では異なる発生磁界すなわち異なる負荷率において遮蔽電流磁界の磁界精度への影響を抑制する必要がある。我々は、加速器システム用マグネットとして設計されたある高温超伝導二極マグネットを対象に遮蔽電流磁界を三次元電磁界解析によって評価し、遮蔽電流磁界の二極及び六極成分を低減する方策として通電電流制御及び補正用六極コイルとの組み合わせを提案し、それらの効果を電磁界解析によって評価した。

2. 解析対象のマグネット・解析方法

解析対象とした高温超伝導二極マグネットの三次元形状を Fig. 1(a)に示す。このマグネットは回転ガンTRY用マグネットを意識して設計されたマグネットである。マグネット発生積分磁界の高次多極成分の設計値は、2極磁界成分の 1×10^{-3} 以下の大きさである。二極マグネットは三次元形状をもつため、別途開発された三次元電磁界解析モデルを適用した[2]。このモデルでは、消費メモリ及び計算時間削減のため階層型行列法を適用している。

3. 遮蔽電流磁界とその低減手法

二極マグネットの設計積分磁界の2極成分の時間変化を Fig. 2(a)に、補正を行わない場合のマグネット積分磁界の2極係数及び6極係数に遮蔽電流磁界が及ぼす影響 Δb_{l1} 、 Δb_{l3} をそれぞれ Fig. 2(b)、2(c)に破線で示す。 Δb_{l1} の1周期目は実線と重なっている。補正を行わない場合の Δb_{l1} 、 Δb_{l3} は、回転ガンTRY用マグネットに要求される磁界精度の指標とされる 1×10^{-3} を上回っており、何らかの低減策が必要である。

Δb_{l1} は通電電流を調整・制御することによって低減することが可能である。通電電流制御を行った場合の Δb_{l1} を Fig. 2(b)に実線で示している。ビーム調整に使用する1周期目では通電電流制御は行わず、2周期目のみ通電電流制御を行っている。この結果、通電電流制御を行った2周期目において Δb_{l1} を 1×10^{-3} 以下に低減することに成功した。

6極磁界成分は二極マグネットの誤差磁界成分であるゆえに通電電流制御の影響をほぼ受けないため、6極成分の低減の達成はマグネット設計の変更が必要である。加速器用マグネット特有の、異なる発生磁界に対して十分な磁界精度を担保する必要があるという要請を満足するため、本研究では、2極成分を発生する主二極コイルと、主二極コイルの遮蔽電流磁界が6極磁界成分に与える影響を補正するための補正用六極コイルの組み合わせによって二極マグネットを構成する方を提案する。補正用六極コイルは高温超伝導線材で構成され、Fig. 1(b)に示すように主二極コイルのコイルエンド部に挿入される。補正用六極コイルの通電パターンを Fig. 3に示す。1周期目では、高温超伝導線に磁束を侵入させるため100 A 通電、ホールディングしている。この場合のマグネット全体の Δb_{l3} を Fig. 2(c)に実線で示しており、2周期目における Δb_{l3} を 1×10^{-3} 以下に低減することに成功した。

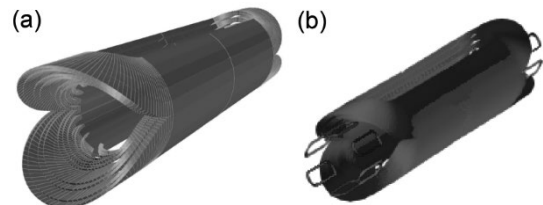


Fig. 1 Schematic view of analyzed magnets; (a) dipole coil [1]; (b) combination of the dipole coil and sextupole correction coils.

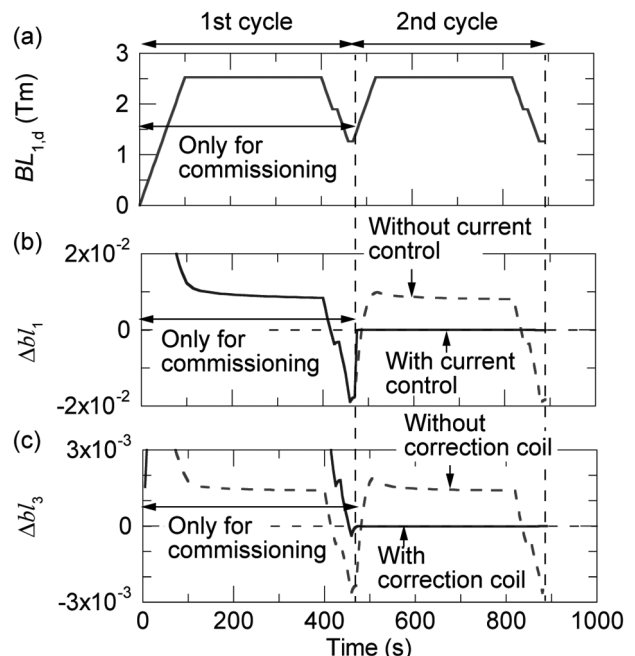


Fig. 2 Influence of shielding-current induced field on dipole and sextupole coefficients.

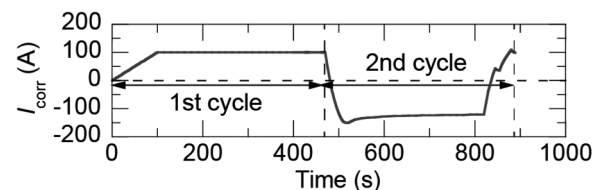


Fig. 3 Current pattern of the sextupole correction coil.

謝辞

本研究の一部は科研費基盤 A (16H02326) の支援によって、一部は科研費特別研究員奨励費 (16J07799) の支援によって行われた。

参考文献

- Y. Sogabe and N. Amemiya.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.26.
- N. Tominaga, et. al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3 (2018) 4900305.

REBCO パンケーキコイルの遮蔽電流磁場計算ウェブサイト

Web page for simulation of screening current-induced field for REBCO pancake coils

野口 聡(北海道大学/MIT); 今井 適(北海道大学); PARK Dongkeun (MIT);
HAHN Seungyong (SNU/NHMFL); 岩佐 幸和 (MIT)NOGUCHI So (Hokkaido Univ./MIT); IMAI Teki (Hokkaido Univ.); PARK Dongkeun (MIT);
HAHN Seungyong (Seoul National Univ./NHMFL); IWASA Yukikazu (MIT)

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

1. はじめに

REBCO マグネットの応用では、しばしば遮蔽電流磁場が問題となる。シェイキング・マグネットなど、遮蔽電流磁場を低減する手法も提案されているが、それと同時に遮蔽電流磁場を見積もることも大変に重要である。そのために、有限要素法と薄板近似法を組み合わせた遮蔽電流磁場解析手法が開発され、その有用性も確認されてきている[1],[2]。しかし、多数のダブル・パンケーキが積層された REBCO マグネットにおいては、解くべき連立一次方程式が大きいかつ、マトリックスが密であるために、高速多重極展開法などの特殊な計算手法を併用する必要がある。それでも、数日から数週間の計算時間が必要となる。

そこで、我々は遮蔽電流磁場の簡易計算法を提案してきた[3]。提案手法では、コイル形状からコイル自身および遮蔽電流経路の自己および相互インダクタンスを算出し、等価回路として遮蔽電流を計算する手法である。幾つかの制約条件は存在するが、有限要素法をベースとする計算手法に比べて、圧倒的に計算時間が短いという特徴がある。大規模な REBCO マグネットでも、数分で解析できる。そして、提案してきた遮蔽磁場電流計算をウェブ上で提供し始めたので、そのシステムについて報告する。

2. ウェブ・システム 入力画面

本報告で提案するシステム (SCIFweb service) は、<https://hbd.is.thokudai.ac.jp/scifweb/>で提供している。使用する際には、ユーザ登録が必要となっている。

図1に、ユーザ登録後のウェブ・システム入力画面を示す。本画面で、磁場算出位置 z 座標(mm)、電流上昇率(mA/s)、ターゲット電流値(A)、およびコイル温度(K)を入力する。さらに、コイル情報として、 z 方向位置(mm)、コイル長さ(REBCO テープ幅)(mm)、内半径(mm)、外半径(mm)、巻数(turn)、77K 自己磁場下の臨界電流値(A)、 n 値、無絶縁巻きの場合の接触抵抗値(m Ω)、およびターン間絶縁の有無をパンケーキごとに入力できる。

REBCO テープ線の線材特性は、コイル温度および臨界電流値、 n 値をもとに、[4]で示された情報から求めている。ただし、30K 以下の温度に関しては、外挿しているため精度はかなり低い。また、現時点では、パンケーキの個数を最大12個に制限している。

3. ウェブ・システム 解析事例

図2に、ウェブ・システムの解析結果画面を示す。グラフ上には電流、遮蔽電流の影響がない理想磁場、遮蔽電流磁場、さらに遮蔽電流を考慮した磁場を表示している。このグラフは、マウスを使い、拡大や縮小なども自由にでき、コピーすることで他ソフトに貼り付けることも可能である。

さらに、その右横には、CVS データを提供している。2行目には、コイル全体の遮蔽電流を考慮していないインダクタンスと遮蔽電流を考慮した時のインダクタンスを示している。4行目以降に、時間、電流、遮蔽電流を考慮しない時の磁場、遮蔽電流磁場、遮蔽電流を考慮した時の磁場を提供している。これらをコピーすることで、Microsoft Excel などの商用表計算ソフトに解析結果を移行できる。さらに、容易に解析条件等を変更できるような機能も有している。

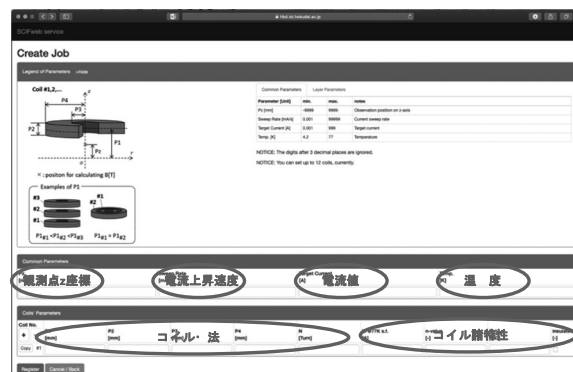


Fig. 1. Web page for input of simulation conditions and coil configurations.

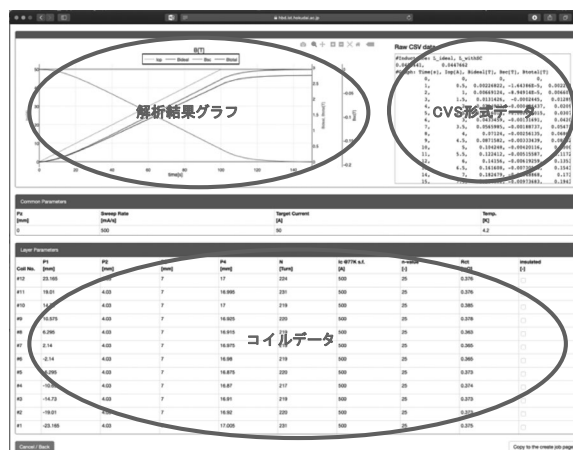


Fig. 2. Web page of computation result.

図2には、パンケーキコイルが12個の無絶縁 REBCO マグネットの解析事例を表示しているが、解析時間は1秒以下であった。

4. まとめ

これまでに提案してきた等価回路を用いた遮蔽電流磁場計算法をウェブ上で公開したことを報告した。提案手法は、有限要素法による解析に比べて精度は低いが、短時間で計算でき、有効な手法である。これにより、多くの研究者がより手軽に遮蔽磁場を見積もることができるようになった。ただし、REBCO テープ線材の諸特性などは改善の余地がある。

今後は、熱解析や応力解析を連成させた解析手法を実装させていきたい。

参考文献

1. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23 (2013) 4100205.
2. S. Noguchi, et al.: IEEE Trans. Magn., vol. 54 (2018) 7201904.
3. 野口 聡 他: 2017年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 IB-a01 (2017)
4. H. Ueda, et al: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24 (2014) 4701505.

欠陥のあるREBCO 線材で巻線した無絶縁パンケーキコイルの 電磁的・熱的特性解析・評価

Evaluation of Electrical and Thermal Behaviors in No-Insulation REBCO pancake coil with Tape Defects

石山 敦士, 市川 哲理, 尾下 遥(早大); 野口 聡(北大)

ISHIYAMA Atsushi, ICHIKAWA Tetsuri, ONOSHITA Haruka (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

REBCO 線材の欠陥・低特性箇所をある程度許容して高性能コイルを実現することができれば、これまで除外されてきた線材の利用も可能となり、コイルの低コスト化が期待できる。また、新たな劣化が生じても継続運転が可能となれば、より高い安定性・信頼性を確保することができる。そこで、多くの欠陥の存在によって臨界電流に大きなばらつきが存在する REBCO 線材で巻線した無絶縁 (NI) コイルについて、その電磁的・熱的振舞いについて解析・評価を行ったので報告する。

2. 解析対象

S.Hahn らの行った多数の欠陥のある NI モデルコイルの励磁実験[1]を対象として数値解析を行った。モデルコイルの諸元を Table 1 に、コイル内の臨界電流 (I_c) 分布を Fig.2 に示す。図にあるように供試モデルコイルに合わせて 6 箇所 (27,39,41,17,118 層目) 大きな欠陥があるものと仮定して解析を行った。

3. 数値解析

部分要素回路 (PEEC) モデル (Fig.1) に基づく電流分布解析と、FEM による温度分布解析を連成して[2]、Fig.2 に示す I_c 分布を持つ NI モデルコイルを、一定の掃引速度で励磁して行ったときの熱暴走に至るまでの過渡的な電磁的・熱的振舞いを解析した。

4. 解析結果

実験で得られたコイル両端の発生電圧の時間変化を数値解析により良く再現することができた。これにより、NI コイル内の熱暴走に至るまでの過渡的な電流と発熱・温度分布の変化を可視化することができ、また、欠陥のない NI コイル、絶縁された欠陥のあるコイルとの比較を行うことができた。

数値解析結果の一例として、通電電流に対するコイル両端電圧の変化を Fig.3 に示す。従来の絶縁コイルにおいては、もっとも I_c の低い箇所からの発熱によって熱暴走に至っている。すなわち、欠陥を許容することができない。これに対して、NI コイルでは、欠陥部分を迂回して他の健全層の線材に電流が再配分されるため、図のように、層間を流れる電流によって徐々に電圧が発生していくが、欠陥のないコイルの熱意暴走電流の 98.9%まで熱暴走の発生を抑えることができた。

本研究の一部は、科研費・基盤研究A (No.26249036) および基盤研究S (18H05244) によった。

参考文献

1. S.Hahn et al., Supercond. Sci. Technol., Vol.29, No. 10, 2016
2. T.Wang et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., vol.25, no.3, 2015

Table 1 Specifications of NI model coil

REBCO Tape	
Overall With [mm]	4.02
Overall Thickness [mm]	0.09
Copper Stabilizer Thickness [μm]	40 (20 per side)
I_c @ 77K, under Self-Field [A]	150
Coil	
Number of Turns	135
Inner Diameter [mm]	40
Outer Diameter [mm]	64.5
Height [mm]	4.02
Contact Surface Resistivity [$\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$]	29.4
Inductance [μH]	1266
Cooling Condition	LN2 (77 K)

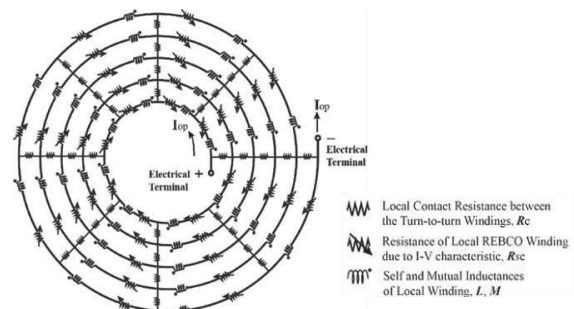


Fig.1 PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) model

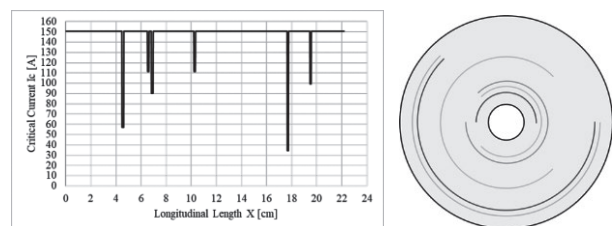


Fig.2 I_c Distribution of the REBCO Tape Used in simulation

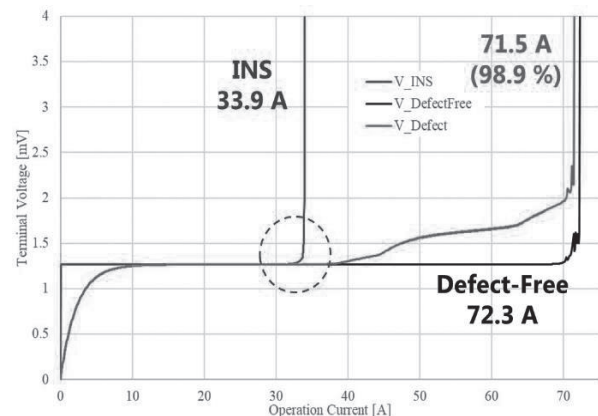


Fig.3 Comparison of Voltage Increment

局所的な特性劣化を持つ NI REBCO パンケーキコイルの安定性

Stability of NI REBCO pancake coils including local degradation

高橋 俊二(上智大);末富 佑(千葉大);高尾 智明(上智大);柳澤 吉紀(理研);前田 秀明(JST)
 TAKAHASHI Shunji (Sophia Univ.); SUETOMI Yu (Chiba Univ.); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
 YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN), MAEDA Hideaki (JST)

1. はじめに

No-insulation(NI) REBCO コイルでは、局所的な特性劣化部が存在しても、電流が劣化部を避けて隣接するターンに迂回し、その通電特性と電磁特性は劣化のないコイルとほぼ変わらないことが報告されている[1]。しかしながら、この現象については系統的な研究が行われておらず、劣化の度合いやターン間接触抵抗等とコイル特性の関係は必ずしも明らかになっていない。我々は、5ターンのコイルによる実験と、簡易的な回路解析により、これを明らかにしたので報告する。

2. 5 ターンコイルの実験

4 mm 幅の REBCO 線材で巻いた 5 ターン NI シングルパンケーキコイル(NI コイル)と、絶縁 REBCO シングルパンケーキコイル(INS コイル)を製作し特性を比較した。コイルの諸元を Table 1 に示す。コイルによって第 3 ターン中央部の線材に幅方向のスリットを設けることで人工的に劣化部位を作った。スリットの幅は 0 mm(すなわちスリットなし)、1 mm, 2 mm, 3 mm とした。さらに NI コイルについては、第 3 ターン中央部が切り離された(すなわちスリット幅 4 mm)コイルも製作した。これらのコイルを液体窒素中で熱暴走が生じるまで通電した。

特性劣化のない NI コイルと INS コイルのコイル臨界電流 $I_{c,coil}$ ($1 \mu V/cm$ 基準)はそれぞれ 117 A, 121 A である。これらの値で規格化した NI コイルと INS コイルの臨界電流(○と△)と熱暴走電流(■と◆)を Fig.1 に示す。スリット長さ(劣化量)に対して、NI コイルと INS コイルの臨界電流低下の度合いはほぼ変わらない(○印/△印参照)。しかしながら、NI コイルでは、常伝導電圧発生後の立ち上がり方が INS コイルと比べて緩やかで、最終的に熱暴走に至る電流は NI コイルの方が高くなっている。実際、スリットが 3mm でも臨界電流を超えるまで熱暴走は生じない。これは、NI コイルではターン間接触抵抗を介した径方向への分流によって常伝導電圧の増大が抑制されるためである。

3. 5 ターンコイルの回路解析

実験の劣化部を持つ 5 ターンコイルの回路解析を行い、実験と比較した。劣化部位に起因した定常的な常伝導電圧発生時の振る舞いに限定するために、熱的現象とインダクタンスを無視した簡単な電気回路の解析とした。ターン周方向は、超伝導層と安定化層の並列回路とし、ターン同士は接触抵抗でつながった回路とした。また、線材の I_c を 100 A に統一し、3 ターン目の中央部にのみ周方向長さ 0.94 mm の劣化部 ($L = L_{c,deg}$)を設け、スリットを持つ実験コイルを模擬した。

まず、ターン間接触抵抗率 R_{ct} を典型的な $100 \mu \Omega cm^2$ [2] に設定し、 $I_{c,deg}$ が 25 A, 50 A, 75 A, 100 A のときについて解析を行った。コイル臨界電流 $I_{c,coil}$ ($1 \mu V/cm$ 基準)を 100 A で規格化したところ、Fig. 1 の●印が示すように実験結果と概ね一致した。

次に、 $I_{c,deg} = 50 A$ のコイルについて、 R_{ct} を大きく変化させて V-I 特性を調べた。結果を Fig.2 に示す。 R_{ct} の変化によって電圧の立ち上がり始める電流値にはほとんど差はないが、その後は R_{ct} が小さいほど緩やかに電圧が立ち上がっている。このとき、第 3 ターンの周方向電流は減少し、内外の隣接ターンとの間に径方向電流が生じていた。通常、NI コイルにおける接触抵抗率は $10-100 \mu \Omega cm^2$ のオーダーにあるが、これが小さくなるほど、径方向電流が増え、電圧基準によって決まる見かけの $I_{c,coil}$ が向上し、結果として劣化のないコイルの振る舞いに近づいていくと考えられる。このふるまいは、マトリクスに埋め込まれたマルチフィラメント線材において、一部のフィラメントが劣化しても、その影響が顕在化しないことと類似している。

Table 1 Coil parameters of NI coil and INS coil

Parameters	NI coil	INS coil
REBCO conductor	SuperPower(SCS4050)	
Width; thickness (mm)	4.0; 0.1	
Length (m)	0.5	
$I_{c, min}$ at 77 K (A)	164	
I.D.; O.D. (mm)	30.0; 30.9	30.0; 31.0
Height (mm)	4.0	
Number of turns	5	

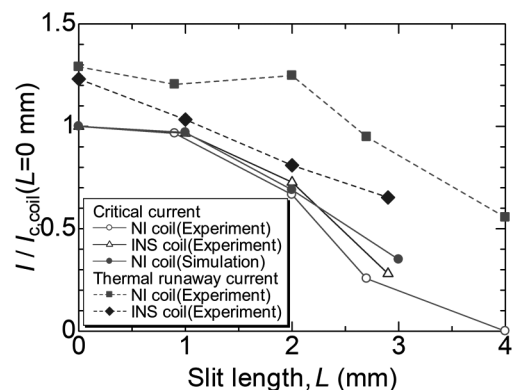


Fig. 1 The normalized thermal runaway current as a function of slit length

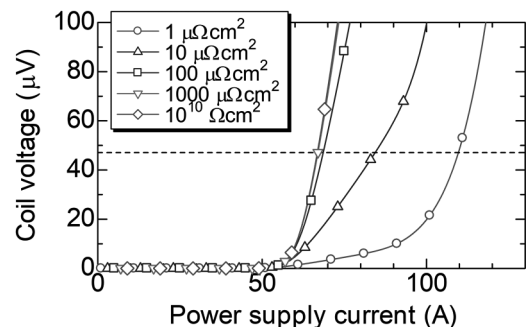


Fig. 2 Calculated V-I characteristics of NI coils with various turn-to-turn contact resistivities

4. まとめ

局所的な特性劣化を持つ NI コイルでは、INS コイルと比べて常伝導電圧発生後の立ち上がりが緩くなる。ターン間接触抵抗率が小さいほどこの傾向が強くなるため、電圧基準によって決まるコイル臨界電流が向上し、劣化のないコイルの特性に近づく。当日は、コイルのターン数依存性や、径方向への分流が中心磁場へ与える影響などについて報告する。

謝辞

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

参考文献

- S. Hahn, et al.: SuST 29 (2016) 105017
- X. Wang et al.: SuST 26 (2013) 035012

新手法を用いた NI レイヤー巻コイルと NI ダブルパンケーキ巻コイルの特性の 顕著な差異

Significant difference in characteristics of a NI layer-wound coil using a new winding method and a NI double-pancake coil

末富 佑(千葉大);高橋 俊二, 高尾 智明(上智大);柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)
SUETOMI Yu (Chiba Univ.); TAKAHASHI Shunji, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

1. はじめに

HTS コイルを熱暴走から保護する技術として、no-insulation (NI)法が有効であるが、永久電流コイルに適し、また、均一磁場を得やすいレイヤー巻コイルでは、長い磁場遅れが生じるため適用できなかった。我々はこの問題を解決するために、層間に絶縁シートと銅シートを挿入して回路構造を変化させる intra-Layer No-Insulation (LNI)法を用いる事で、磁場遅れの時定数を3桁短くできる事を示した[1]。

本報では、ほぼ同形状の LNI コイルと NI ダブルパンケーキ巻コイルを用いて、液体窒素浸漬冷却下において通電試験を行い、両者の熱暴走・自己保護特性を比較し、また、数値解析によって磁場遅れのコイルスケール依存性を比較することで、両者の特性を系統的に明らかにした。

2. 実験方法

フジクラ社製の REBCO 線材を用いて、内径 80 mm の LNI コイル(8 レイヤー×16 ターン)と、NI ダブルパンケーキ巻コイル(16 ターン×9 ダブルパンケーキ)を製作した。Fig. 1 に示す様に LNI コイルはレイヤー間にポリイミドシート(厚さ 12.5 μ m)と銅シート(厚さ 7 μ m)を挿入している。これらのコイルを用いて液体窒素中で過電流試験を行った。LNI コイルでは各レイヤーの電圧信号(最内層より $V_{L1} \sim V_{L8}$)、NI ダブルパンケーキ巻コイルでは各ダブルパンケーキの電圧信号(上部より $V_{DP1} \sim V_{DP9}$)、両コイルにおいて電源電流(I_{supply})とボア内の上部・中心部・下部に取り付けたホール素子による磁場信号(B_{up} , B_{center} , B_{low})を計測した。

3. 実験結果と考察

Fig. 2(a)に LNI コイルの過電流試験における各レイヤー電圧と電源電流を、Fig. 2(b)に最大値で規格化した磁場を示す。 $t = 507.9$ s ($I_{supply} = 150.0$ A) で、 V_{L4} が急激に上昇し熱暴走が発生している。熱暴走は外層側と内層側に伝播し、最終的に、 $t = 513.2$ s において最外層である V_{L8} が立ち上がり、各レイヤー電圧は 0.1-0.4 V の範囲で定常状態に至っている。 B_{center} は V_{L4} が立ち上がってから 7.1 s 後の $t = 515.0$ s において熱暴走前の 15%まで減少している。平均的には 12.0%/s の速度で減衰している。

Fig. 3(a)に NI ダブルパンケーキ巻コイルの過電流試験における各ダブルパンケーキ電圧と電源電流を、Fig. 3(b)に最大値で規格化した磁場を示す。熱暴走は $t = 541.4$ s ($I_{supply} = 136.5$ A) において、 V_{DP2} から発生し、上部と下部のダブルパンケーキへと伝播している。 $t = 576.2$ s で V_{DP9} が立ち上がった後、過電圧によって電源が遮断された。 B_{center} は V_{DP2} が熱暴走してから 38.5 s 後の $t = 579.9$ s において、熱暴走前の 6%まで減少しており、平均的には 2.4%/s の速度で減衰している。

両コイルの熱暴走時の振る舞いを比較すると、NI ダブルパンケーキ巻コイルは不均一かつ非連続的な磁場の減衰を示すのに対し、LNI コイルは磁場が均一かつ連続的に減衰している。これは、ダブルパンケーキ巻コイルでは、熱暴走発生時にパンケーキ毎にシングルターン状態[2]に遷移し、この状態がパンケーキ間で伝播する事によって磁場が順次減衰するのに対し、LNI コイルでは、レイヤー毎にシングルターン状態に遷移し、これがレイヤー間を伝播する事で磁場が減衰するためである。レイヤー間の伝播はレイヤー同士の広い接触面積を介した熱伝導に加え、各レイヤー間の強い磁気結合によって加速されるため、このような均一かつ連続的な磁場減衰になる。このような振る舞いは、電磁力のアンバランスを抑制する観点から有利である。

4. まとめ

LNI コイルは NI ダブルパンケーキ巻コイルと比較して、均一かつ連続的に磁場が減衰する。また、ヘリウムガス中で 700

A/mm² の高電流密度で過電流試験を行い、コイルが保護された事も確認している。磁場遅れの比較と合わせ、詳細は学会にて報告する。

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2、及び、理研の大学院生リサーチ・アソシエイト制度の支援を受けたものである。

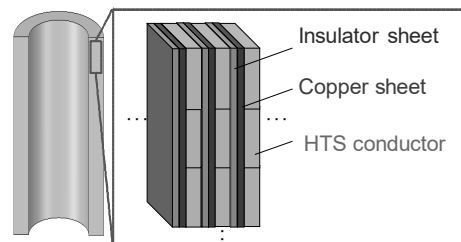


Fig.1 Cross section of an intra-layer no-insulation (LNI) REBCO coil.

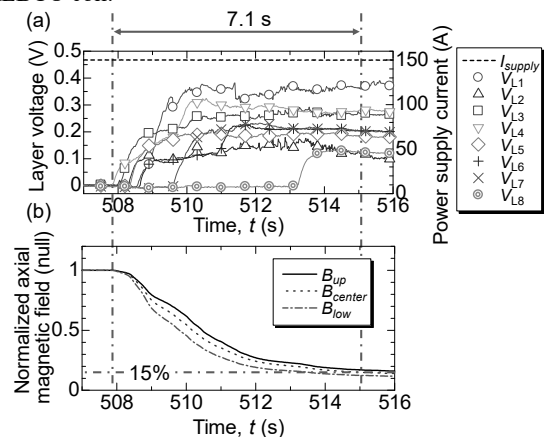


Fig.2 Transient signals of the LNI REBCO coil during a thermal runaway in an over-current operation.

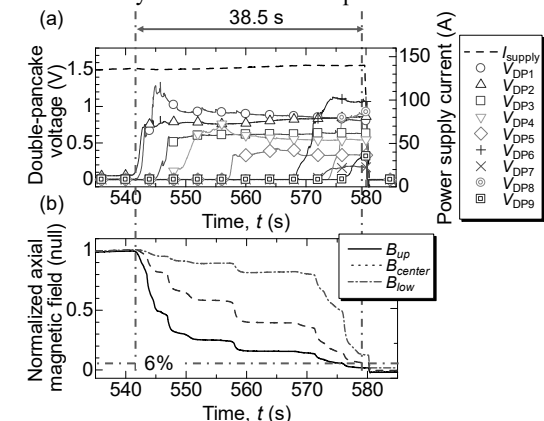


Fig.3 Transient signals of the NI REBCO double-pancake coil during a thermal runaway in an over-current operation.

参考文献

- [1] 末富他, 2017 年度秋季低温工学・超電導学会 1A-p03
[2] Yanagisawa et al. Physica C 499 40-4 (2014)

無絶縁 REBCO マグネットのターン間接触抵抗の測定方法

Measurement method of turn-to-turn resistance in NI REBCO pancake coil

野口 聡(北海道大学/MIT); 立田 貴裕, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大学); 石山 敦士(早稲田大学)
 NOGUCHI So (Hokkaido Univ./MIT); TATSUTA Takahiro, UEDA Hiroshi, KIM Seokbeom (Okayama Univ.);
 ISHIYAMA Atsushi (WASEDA Univ.)
 E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

無絶縁巻線技術(No-insulation winding technique; NI)は、高熱的安定性をもたらす、多くの高磁場発生用マグネットに採用され始めている。高熱的安定性を実現するには、ターン間接触抵抗とインダクタンスのバランスが重要であることが明らかになっている[1]。しかし、ターン間接触抵抗の特性は完全に把握されておらず、制御することも難しい。現時点では、コイルの遮断特性から、時定数を求め、ターン間接触抵抗を算出している。ターン間接触抵抗値は、温度や電流値、外部磁場の影響で変化すると思われるが、実際の計測は難しく、ターン間接触抵抗の特性は明らかになっていない。

そこで、本報告では、ターン間接触抵抗の新しい測定方法を提案する。提案する測定方法では、NI REBCO パンケーキ・コイルに 5~50 Hz 程度の交流電流を流し、そのインピーダンスを測定することで、ターン間接触抵抗値を求めている。以下に、理論および実験結果を示す。

2. ターン間接触抵抗測定法

NI REBCO パンケーキ・コイルが超伝導状態である時、ターン間接触抵抗 R_{ct} とコイル・インダクタンス L の並列回路とみなすことができる(図1参照)。その時のコイル・インピーダンス Z は、

$$Z = \frac{j\omega L R_{ct}}{j\omega L + R_{ct}} \quad (1)$$

となる。ここで、 j 、 ω はそれぞれ虚数単位、角周波数である。

$|R_{ct}| \ll |j\omega L|$ の場合、(1)式は、

$$Z = R_{ct} \quad (2)$$

とみなせる。したがって、比較的高い周波数では、コイル・インピーダンスは、ターン間接触抵抗値となる。しかし、実際には、100 Hz を超えるような交流周波数では、交流損失が大きくなり、式(2)は成り立たなくなる。

そこで、ターン間接触抵抗測定に有効な周波数を、表1に示すコイルで検討した。検討には、PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)法[2]を使用した。コイルに0.5 Hzから1,000 Hz の交流電流を通電するシミュレーションを実施し、その際のコイル・インピーダンス Z および、その実部 ($\text{Re}(Z)$) と虚部 ($\text{Im}(Z)$) を調査した。図2に、その結果を表示する。また、図3に電圧と電流の位相差を示す。これらの図から分かるように、周波数が低い時には、インピーダンス虚数部が増大し、コイル・インピーダンスが接触抵抗値と異なる値になる。一方、周波数が高い時にも、インピーダンス虚数部が増大し、コイル・インピーダンスが接触抵抗値と異なる値になっており、交流損失の影響と思われる。これらの結果から、本コイルでは、5 から 100 Hz ぐらいが、妥当な周波数であると思われる。

3. ターン間接触抵抗測定結果

表1に示したコイルのターン間接触抵抗を提案手法で測定した結果を表2に示す。測定は 10 Hz の交流電流を使用した。測定結果は、従来の遮断による測定値と同オーダーの結果を得た。しかし、遮断による測定も交流損失が含まれていると考えられるため、オーダーの一致で十分と思われる。

4. まとめ

無絶縁 REBCO パンケーキ・コイルのターン間接触抵抗の新しい測定方法を提案した。また、遮断実験に近い接触抵抗値を実験で確認した。今後は、温度や外部磁場などを変化させ、ターン間接触抵抗の特徴を明らかにしていきたい。

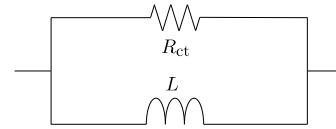


Fig. 1. Equivalent circuit of NI pancake coil.

TABLE I
Specifications of NI REBCO coil

i.d.; o.d. (mm)	60; 72
Length (mm)	4
Number of turns (turn)	60
Inductance (mH)	0.410
Contact resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$)	70
Contact resistance (m Ω)	0.511

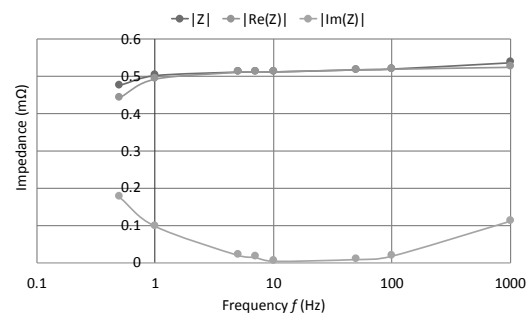


Fig. 2. Coil impedance vs. frequency.

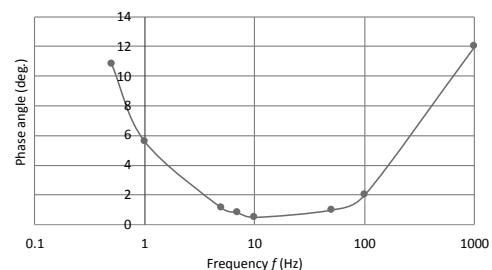


Fig. 3. Phase angle between voltage and current vs. frequency.

TABLE II
Contact Resistance Measurement Results

	Sudden discharging	AC current (Proposed)
Contact Resistance ($\mu\Omega$)	-	237.91
Contact Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$)	28.7	11.9

参考文献

- H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23 (2013) 4100205.
- S. Noguchi, et al.: IEEE Trans. Magn., vol. 54 (2018) 7201904.
- 野口 聡 他: 2017年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集1B-a01 (2017)
- H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24 (2014) 4701505.

導電性樹脂による高温超電導コイルの保護技術開発(1)

-開発概要-

Quench protection technique for an HTS coil using conductive epoxy resin (1)

-Overview-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 草野 貴史, 伊藤 智庸, 野村 俊自 (東芝エネルギーシステムズ)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi,

ITO Toshinobu, NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions)

E-mail: hirosi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

伝導冷却型高温超電導コイルの焼損を防止する方法として、導電性樹脂を用いてターン間を短絡させ、異常時には、導電性樹脂を介して電流を迂回させる方法を開発している。樹脂含浸したコイルが冷却時の熱応力で劣化することを防止するために、コイルを径方向に分割する方法を採用し、径方向の分割とターン間の短絡を両立するため、離形処理したポリミドテープと REBCO 超電導線材を共巻した含浸コイルにおいて、コイル側面のみ導電性樹脂で含浸する構成とした。

本講演では、導電性樹脂を塗布した含浸コイルの特徴および要素コイルによる通電試験結果等について報告する。

2. 導電性樹脂を塗布した含浸コイル

樹脂含浸したコイルが冷却時の熱応力で劣化することを回避するため、ターン間に離形処理したポリミドテープを挿入し、パンケーキコイルの側面に導電性樹脂を塗布する構成とした。フラックスフロー抵抗が発生した際には、導電性樹脂を介して電流を迂回させ劣化を回避することができる。導電性樹脂の有効性を確認するため、導電性樹脂がない通常の絶縁コイルと導電性樹脂を塗布したコイルを2種類試作し、伝導冷却中にて過電流試験を実施した。Fig. 1 および Table 1 に2種類のコイルの外観および諸元を示す。導電性樹脂コイルのターン間抵抗は、コイル温度 40 K で電流遮断試験を実施し、中心磁場の減衰時定数から算出した。

3. 通電試験

絶縁コイルおよび導電性樹脂コイルを伝導冷却装置に組み込み、冷凍機 2 段階ステージに取り付けたヒータによりコイル温度を 40 K に保つように制御し、過電流通電試験を実施した。コイル通電中にフラックスフロー抵抗による電圧の発生を確認後、電流を 1 A 刻みで増加させ、電圧が急激に上昇し、クエンチ検出器が動作するまで通電した。ここで、クエンチ検出器が動作する電圧を 1.1 V、検出後遮断するまでの時間を 0.11 s とした。絶縁コイルおよび導電性樹脂コイルの過電流試験の結果を Fig. 2 に示す。両コイルともに、通電電流が 415 A を超えたところで、電圧が急激に上昇し、クエンチ検出器が動作したが、導電性樹脂コイルは、電圧上昇に併せて電流の迂回が観測された。過電流試験後、両コイルの電流-電圧特性を取得した結果、絶縁コイルは熱暴走により一部焼損が見られ、劣化したが、導電性樹脂コイルは劣化もなく、焼損を回避できることを確認した。

4. まとめ

従来の絶縁コイルと、同諸元の導電性樹脂コイルをそれぞれ伝導冷却下で過電流試験を実施し、絶縁コイルが劣化する条件においても、導電性樹脂コイルは劣化を回避できることを示した。今後は、より蓄積エネルギーが高い条件にて、本手法の有効性を検証していく。

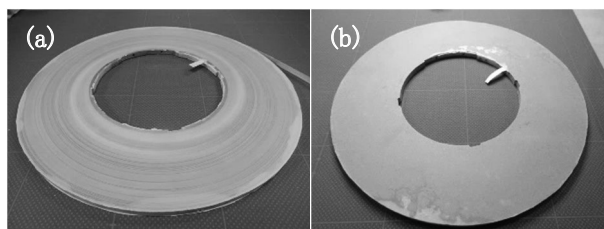


Fig.1 Photographs of (a) impregnated coil with turn-to-turn insulation and (b) impregnated coil using conductive epoxy resin

Table 1 Specifications of two coils

	Unit	Impregnated coil with turn-to-turn insulation	Impregnated coil using conductive epoxy resin
Tape width	mm	4.1	4.1
Tape thickness	mm	0.17	0.17
Inner diameter	mm	100	100
Outer diameter	mm	192.4	192.7
Turns		200	200
Inductance	mH	7.3	-
Turn-to-turn resistance	$\mu\Omega$ /turn	-	11.9

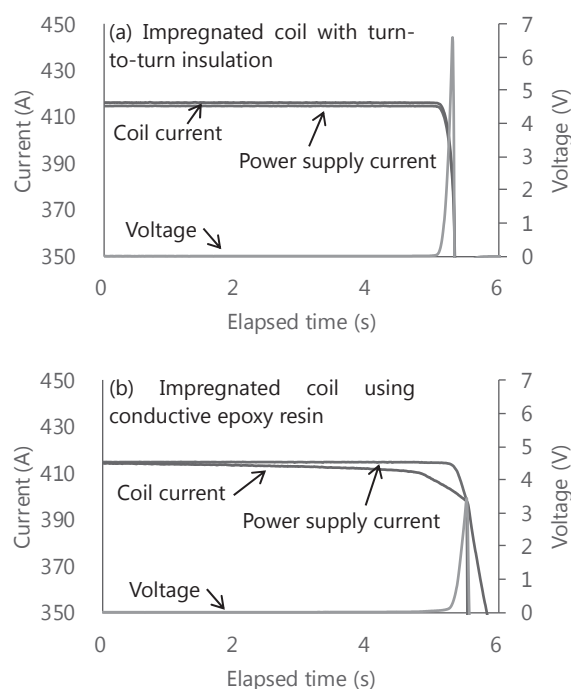


Fig.2 Overcurrent test results of two coils at 40 K

導電性樹脂による高温超電導コイルの保護技術開発(2) —大型 6 積層 REBCO コイルの過電流通電試験結果—

Quench protection technique for an HTS coil using conductive epoxy resin (2)

—Over-current test results of a REBCO coil composed of a stack of six single pancakes—

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 宇都 達郎, 草野 貴史, 伊藤 智庸, 野村 俊自 (東芝エネルギーシステムズ)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi,

ITO Toshinobu, NOMURA Shunji (TOSHIBA Energy Systems & Solutions)

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

1. はじめに

高温超電導コイルに導電性樹脂を塗布することで、コイルが熱暴走する前にターン間に電流を迂回させる新たな保護技術を開発している。導電性樹脂はパンケーキ側面に設け、巻線部には離形処理を施した絶縁テープを共巻きすることで、熱応力による超電導特性の劣化を回避しつつ、保護のための迂回路の形成を可能にしたコイル構成となっている[1]。今回、よりインダクタンス、蓄積エネルギーが高くなる大型・積層構成での保護動作を検証した。本発表では、内径 501 mm、156 ターンのシングルパンケーキコイル 6 枚を試作し、各パンケーキの超電導特性の劣化の有無、およびターン間抵抗を評価した結果、また、これらを積層し大型の 6 積層 REBCO コイルで過電流通電試験を実施した結果について報告する。

2. 大型 6 積層 REBCO コイルの試作・評価

6 積層用に試作したシングルパンケーキ(#1)を Fig. 1 に示す。また#1から#6の諸元を Table 1 にまとめた。内径 501 mm、156 ターンの同諸元で巻線し、外径は 554.4~554.8 mm である。各パンケーキについて液体窒素中で通電試験を行った結果、コイル n 値は 27~33 であり、超電導特性に劣化が無いことを確認した。また、遮断試験を実施し、中心磁場の減衰時定数からターン間抵抗を算出した結果、12~34 $\mu\Omega$ /turn で、全パンケーキのターン間が電氣的に接続されていることを確認した。試験後、Table 1 に示す番号順に積層し、6 積層 REBCO コイル試作した。なお、インダクタンスはシングルパンケーキで 30 mH、6 積層時は 0.92 H となる。

4. 保護動作検証: 過電流通電試験結果 (77 K)

試作した大型 6 積層 REBCO コイルを液体窒素で冷却し、過電流通電試験を実施した。通電電流とコイル電圧のほか、周方向に流れる電流をモニターするため、コイル中心にホール素子を設置し、中心磁場を測定した。結果を Fig. 2 に示す。図中のコイル電圧は 6 積層の両端電圧を示しているが、主に下層 2 枚のパンケーキ(#5, #6)で電圧発生が見られた。6 積層後の#6 のコイル I_c である 40 A から徐々に通電電流を上げていったところ、52 A ホールド時にコイル電圧の急上昇が見られたが、同時に中心磁場の減少が観測され、導電性樹脂を介したターン間の電流の迂回によるコイルの熱暴走回避を実験的に確認することができた。

5. まとめ

導電性樹脂を電流の迂回路とするコイル保護構成について、6 積層 REBCO コイルを試作し、保護動作の検証試験を行った。77 K における過電流通電時、コイルの熱暴走回避を確認した。今後、より電流密度(発熱密度)が高くなる伝導冷却下での検証を進めていく。

参考文献

- 宮崎寛史, 岩井貞憲他: 第 97 回 2018 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2A-a10 (2018)

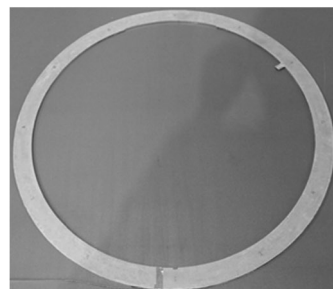


Fig. 1 Large-scale single pancake coil #1. Conductive resin was applied on the coil surface.

Table 1 Specifications of the six single pancakes (#1~#6) wound with the REBCO tapes.

Coil No.	#1	#2	#3
Tape width (mm)	4.1	4.1	4.1
Tape thickness (mm)	0.1	0.1	0.1
Tape length (m/pancake)	258	258	258
Inner diameter (mm)	501	501	501
Outer diameter (mm)	554.5	554.8	554.5
Number of turns/pancake	156	156	156
Coil I_c (A)	77	67	64
n-value	29	28	27
Average turn-to-turn resistance ($\mu\Omega$ /turn)	23	20	14
Coil No.	#4	#5	#6
Tape width (mm)	4.1	4.1	4.1
Tape thickness (mm)	0.1	0.1	0.1
Tape length (m/pancake)	258	258	258
Inner diameter (mm)	501	501	501
Outer diameter (mm)	554.5	554.6	554.4
Number of turns/pancake	156	156	156
Coil I_c (A)	68	60	70
n-value	30	33	29
Average turn-to-turn resistance ($\mu\Omega$ /turn)	12	18	34

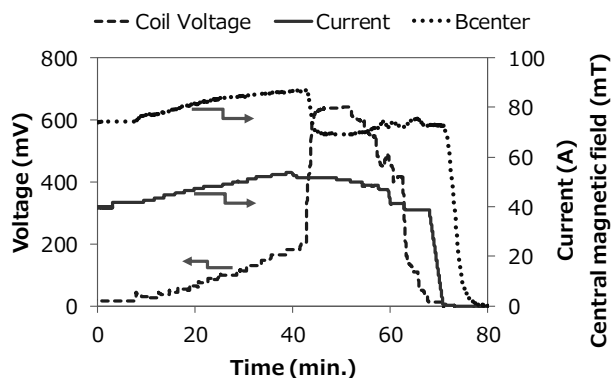


Fig. 2 Over-current test results of the REBCO coil composed of a stack of six single pancakes.