

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

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (I-1) - Outline of the project -

横山 彰一, 大屋 正義, 松田 哲也, 大竹 俊輔, 江口 諒, 森田 友輔, 井上 達也, 田邊 肇, 大穀 晃裕(三菱電機);
中村 武恒, 白井 康之(京都大);宮城 大輔, 津田 理(東北大)

YOKOYAMA Shoichi, OYA Masayoshi, MATSUDA Tetsuya, OTAKE Syunsuke, EGUCHI Ryo,
MORITA Tomohiro, INOUE Tatsuya, TANABE Hajime, DAIKOKU Akihiro (Mitsubishi Electric Corp.);
NAKAMURA Taketsune, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.); MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)
E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体ヘリウムレスの医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を平成28年度よりNEDOプロジェクトとして開始した。これまで、経産省およびAMEDプロジェクト(平成25~27年度)にて高温超電導を適用した高安定磁場コイルの基盤技術の研究開発を実施した。1/3 サイズ高温超電導コイルを試作し、世界初(当時)の3T 磁場でのイメージングに成功した[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、課題などを検討する。

2. 実施テーマとスケジュール

本プロジェクトの研究開発項目は大きく2つあり、一つはMRI用高安定磁場高温超電導コイル開発、もう一つは永久電流モード実現のための要素開発である。前者は三菱電機が、後者は産総研が受託してそれぞれで実施している。Table1 に三菱電機の開発項目とスケジュールを示す。平成 28 年度から3年間で1/2サイズアクティブシールド型3T 高温超電導マグネットを設計、試作し、磁場均一度並びに磁場安定性を評価したうえでφ150mmでのイメージングにより実証を行う。H30 年度下期以降では高温超電導マグネットシステムの小型、高磁場化を実証するために1/2サイズアクティブシールド型5T 高温超電導を設計、試作する。そのほか、磁場安定性向上に不可欠である高安定電源や磁場制御システムを検討するほか研究開発により得られた知見を元に3T 全身型実機マグネットの基本設計をする予定である。

3. 高温超電導コイルの実用化技術開発

これまでの高温超電導コイルの研究開発では、(1)超電導劣化対策、(2)ハンダ接続方法の確立、(3)高精度コイル製作方法の

検討を主として実施した。その中で(2)のハンダ接続方法については低温ハンダの適用による安定した接続が得られ、(3)のコイル位置精度についても目標の巻線精度0.2mm以下をクリアするなどの成果を得た。しかし、(1)の超電導劣化対策として剥離応力対策を実施したものの、コイル単体試験での良品率が85%と低く、より確実な対策が必要であり、線材を含めた要因を特定し、改善する。そのほか、1mを越えるコイルの大口径化に伴うコイル製作課題などを抽出し対策検討する。また、高温超電導線材の磁化の影響や異常時のコイル保護についても検討を進める。

4. 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

高磁場、高密度化により小型高温超電導コイルを実現するための検討を行う。Fig.1 に設計した1/2サイズアクティブシールド型3T 高温超電導コイルの漏れ磁場分布を示す。プロジェクト後半では同形状で5T コイルを設計し、最終目標として現行 1.5T-MRI マグネットと置き換え可能な小型、軽量の全身用 3T-MRI マグネットシステムを設計する。また、システム最適化として冷却設定温度や冷却方式など経済性も考慮したシステム設計を行う。

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. 92 (2015) p.7
2. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.116
3. S. Yokoyama, et al.: IEEE trans. on Applied Superconductivity, Vol.27 (2017) Issue 4

Table 1. Schedule of the development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI.

項目 \ 年度	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	H32年度
(1)高温超電導コイルの実用化技術開発		マグネット完成	磁場評価	マグネット完成	
①コイル・マグネット製作技術	3T-1/2 マグネット試作		イメージング		
②磁化による磁場乱れ対策	磁場変動、磁化解析		3T-1/2 マグネットによる磁場変動、磁化評価		磁場評価
③コイル保護手法の検討	コイル保護方式検討		コイル保護実用化検討		イメージング
(2)高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発	3T-1/2 マグネット設計	5T-1/2 マグネット基本設計	5T-1/2 マグネット設計	3T 実機マグネット小型化検討、基本設計	
①高磁場・高電流密度コイル設計技術					
②省エネ・低コストシステムの開発		システム省エネ、低コスト検討			
③経済性検討		マグネット市場調査と経済性検討			

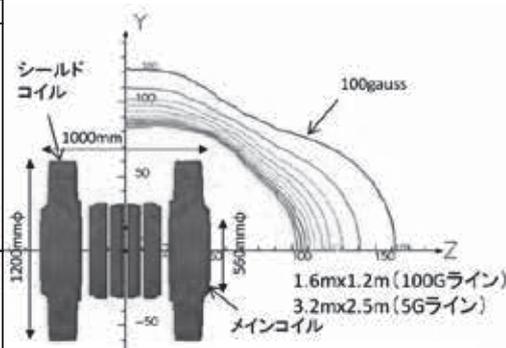


Fig.1 Leakage magnetic field of the half size HTS 3T-coil

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-2)

～ 1/2 サイズ 3T コイル設計・試作 ～

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

—Design and trial manufacture of half-size 3 T coil—

大屋 正義, 松田 哲也, 井上 達也, 森田 友輔, 江口 諒, 大竹 俊輔, 長廣 利成, 田邊 肇, 横山 彰一, 大毅 晃裕(三菱電機)

OYA Masayoshi, MATSUDA Tetsuya, INOUE Tatsuya, MORITA Tomohiro, EGUCHI Ryo, OTAKE Syunsuke,
NAGAIHIRO Toshinari, TANABE Hajime, YOKOYAMA Shoichi, DAIKOKU Akihiro (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Oya.Masayoshi@cb.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体ヘリウムを必要としない伝導冷却型 MRI の実用化に向け、薄膜線材を用いた高温超電導マグネットの開発を行っている[1,2]。これまでに、1/3 サイズマグネットの試作を行い、世界初の高温超電導マグネットによる3Tの撮像に成功した[3]。今回、次のステップとして、1/2 サイズアクティブシールド型3Tコイルの設計を行い、試作を開始したので報告する。

2. コイル設計

1/2 サイズアクティブシールド型3Tコイルの構成を Fig. 1 に、仕様を Table 1 に示す。イメージングに必要な磁場均一度 10ppm (200mmDSV) 以下を得るためにコイル形状と配置を最適化した。コイルは 220 個のシングルパンケーキコイルで構成され、線材の総長は 72km である。メインコイルの内径は 560mm、アクティブシールドコイルの外径は 1200mm、軸長は 1000mm である。定格電流 148A 通電時の蓄積エネルギーは 1.58MJ である。5 ガウスラインは軸方向 3m/径方向 2.5m であり、アクティブシールドにより漏れ磁場を抑制している。

3. コイル試作

薄膜線材の幅は 4mm であり、エポキシ含浸コイルにおける剥離劣化対策のため、両面にフッ素コーティングを施したポリイミドテープを内側に、非コーティングのポリイミドテープを外側に巻いた二重絶縁構造とした。本構造により、線材剥離対策とコイル剛性維持を両立している。

コイル巻線時には、レーザー変位計で巻線高さを常時監視し、ターン間に挿入する層間シート枚数を調整することで、0.1mm 以下の巻線精度でコイルを製作した。

エポキシ含浸後のシングルパンケーキコイルを液体窒素浸漬冷却状態で全数通電試験を実施した。通電試験は、一定の電流スweepレートで I - V 特性を測定するスweep試験と、所定の電流値で保持して微小電圧発生を検査するホールド試験の 2 種類を実施した。スweep試験結果の一例を Fig. 2 に示す。ドットが実測値であり、実線が仕様 I_c (165A) の線材を巻いたコイルの I - V 特性シミュレーション結果を示している。ただし、スweep時に発生するインダクタンス成分は除去している。80A までの通電で閾値 (0.5mV) 以上の電圧は発生せず、コイルの通電特性が仕様を満足することを確認した。平成 28 年度は、内径 560mm、外径 670mm のサイドコイル 53 個を製作した結果、良品率は約 95% であった。

4. まとめ

1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルの設計を行い、コイル試作を開始した。平成 29 年度にコイル製作を完了させ、平成 30 年度にマグネットを組み立てて撮像を行う予定である。

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. 89 (2014) p.147
2. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.7
3. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.116

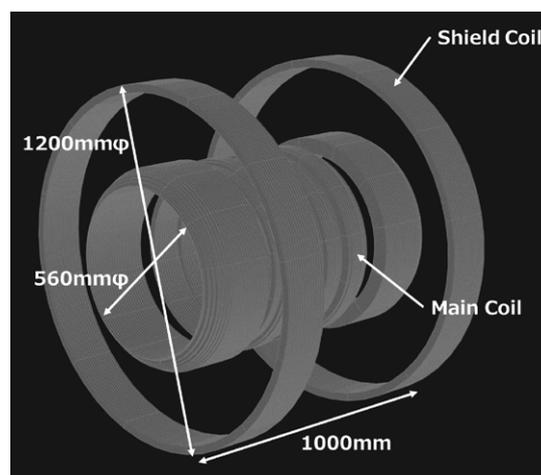


Fig. 1 Schematic view of half-size 3 T coil

Table 1 Specifications of half-size 3 T coil

Item	Specification
Inner Diameter	560 mm
Outer Diameter	1200 mm
Axial Length	1000 mm
Inductance	145 H
Rated Current	148 A
Central Magnetic Field	3 T

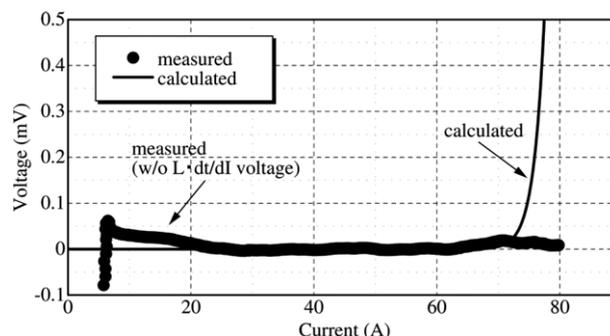


Fig. 2 Measured and calculated I - V curves of HTS single-pancake coil

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-3)

～微小電流制御による磁場安定度向上～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (I-3)

～Magnetic Field Stability Improvement of HTS-MRI Magnet

under Power Supply Driven Operation with a Micro Current Trimming Control～

川嶋健之, 谷内田貴行, 白井康之(京都大); 大屋正義, 松田哲也, 横山彰一(三菱電機)

KAWASHIMA Takeshi, YACHIDA Takayuki, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.);

OYA Masayoshi, MATSUDA Tetsuya, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric corp.)

E-mail: kawashima@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導(HTS)MRI マグネットでは、超電導接続が容易でないため、永久電流モードでの運用が現在のところ難しい。この一つの解決策として高安定の電源励磁による運用の可能性を検討している。

MRI イメージングに必要な磁場安定性を得るには、テープ線材の遮蔽電流と電源自体の変動によるコイル内磁場への影響を抑える必要がある。遮蔽電流の影響の低減は、設定電流を一旦越え若干の消磁過程を加えるオーバーシュート励磁法で、32H-HTS マグネットを用いてある程度の効果を確認し報告した[1]。

今回はこのオーバーシュート励磁を行わず、Fig.1 に示すように中心磁場強度信号をフィードバックし、励消磁電源と電流保持電源の二つからなる高安定電源システムを用いて微小電流制御を行い、磁場安定度を評価した。

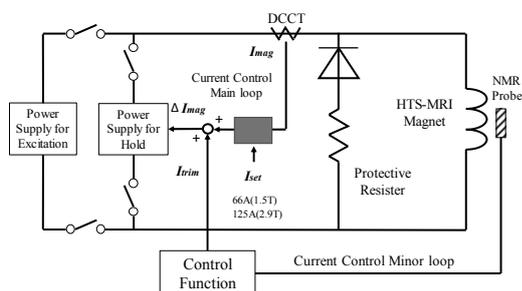


Fig.1 微小電流制御時の実験回路

2. 実験概要

まず励消磁電源により 32H-HTS マグネットを 0 A から 66 A(1.5 T)を目標に 0.1 A/s の掃引速度で励磁し、励消磁電源を電流保持電源に切り替え、66 A で電流が一定になってから微小電流制御を開始した。コイルの中心磁場を、制御開始後一時間測定し磁場安定度を評価した。

3. 実験結果と考察

励磁後に微小電流制御を行わない時の磁場変化を Fig.2 に示す。遮蔽電流の減衰に伴い中心磁場は増加し偏差は 5.8ppm/hour となった。

これに対して、制御を行った場合の磁場安定度は、Fig.3 に示すように 0.7 ppm/hour 以内に抑えられ、イメージングに必要なとされる 1 ppm/hour 以下の磁場安定度を満たしている。その時の制御電流を Fig.4 に示す。MRI の電源駆動を前提とすれば、オーバーシュートを行わなくとも微小電流制御によりイメージングに必要な磁場安定度を得られる可能性が示された。

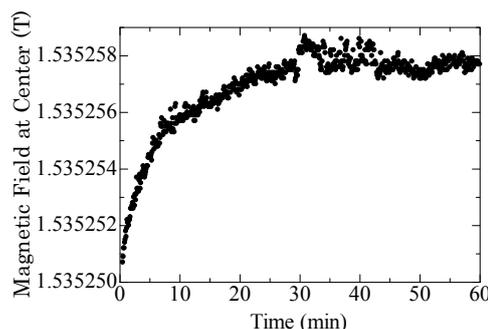


Fig.2 Magnetic field without micro-current control.

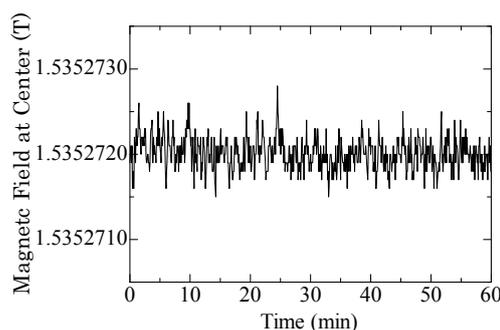


Fig.3 Magnetic field with micro-current control.

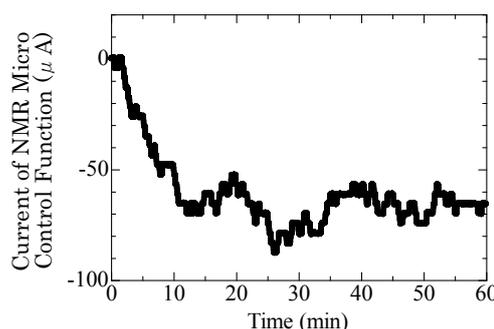


Fig.4 Additional control current (4.4μA→0.1T).

謝辞

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

参考文献

1. T.Yachida, et al.: IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.27(2017)(to be published).

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(I-4) ～残留磁化が磁場安定性に与える影響～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (I-4)
-Influence of residual magnetization on magnetic field stability-

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

1. はじめに

これまでの REBCO コイルにおける遮蔽電流磁場特性や遮蔽電流磁場の変動抑制に有効なオーバーシュート量の検討では、残留磁化の影響を排除するため、試験毎にコイルを常電導転移させてから励磁していた[1]。しかし、実際の MRI では、冷凍機を用いてコイルを伝導冷却するため、変動抑制に有効なオーバーシュート量を選定するためにコイルを繰り返し常電導転移させることは得策ではない。そこで、本研究では、コイルを常電導転移せずにオーバーシュート波形を繰り返し適用する場合に生じる残留磁化が、コイルの磁場安定性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

GdBCO テープ線材を用いて 50 ターンのダブルパンケーキコイルを作製した。コイル断面および磁束密度測定用ホール素子の設置位置を Fig.1 に示す。なお、線材長は 16.7 m, I_c は 234 A (45 K, 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準)である。残留磁化の大きさは、Fig.2 の様に、コイル励磁開始直前に通電する三角波電流の大きさ I_{tri} により変化させた。遮蔽電流磁場 B_s は、運転温度 45 K で通電した際に測定した径方向磁場と、常温通電時に測定した径方向磁場との差分で評価した。また、磁場変動率 ε は、励磁電流ホールド後 20 秒間の磁場変動率の平均値とした。なお、コイルの励磁にはオーバーシュート法を適用し、運転電流 I_{oper} は 120 A, コイル励磁時のスweep速度は 5 A/s とした。

3. 遮蔽電流磁場と磁場変動率の残留磁化依存性

オーバーシュート量 $\Delta I = 10\text{A}$, 三角波電流 $I_{\text{tri}} = 0, 100, 200\text{A}$ の場合の遮蔽電流磁場の時間推移を Fig.3 に示す。電流ホールド後の遮蔽電流磁場は、オーバーシュート時のピーク電流が三角波電流 ($I_{\text{tri}} = 100\text{A}$) より大きい場合は、残留磁化の影響を受けないのに対し、オーバーシュート時のピーク電流が三角波電流 ($I_{\text{tri}} = 200\text{A}$) より小さい場合は、残留磁化の影響を大きく受けることがわかった。 $\Delta I = 10, 20, 60\text{A}$ で、三角波電流を変化させた場合の磁場変動率を Fig.4 に示す。これより、磁場変動率は、遮蔽電流磁場と同様に、三角波電流がオーバーシュート時のピーク電流より小さい場合に残留磁化の影響を受けないことがわかった。以上より、コイル内の遮蔽電流磁場分布は一様でなく、通電電流によって異なるものの、オーバーシュート量を徐々に大きくしながらオーバーシュート波形を繰り返し適用すれば、励磁前に常電導転移させて残留磁化をゼロにした状態でオーバーシュート波形を印加した場合と同様の遮蔽電流磁場変動抑制効果が得られると考えられる。

また、オーバーシュート時のピーク電流より大きい三角波電流を印加することにより、三角波電流を印加しない場合よりも磁場安定性の向上が確認された。これより、オーバーシュート波形適用前の残留磁化を調整することにより、遮蔽電流磁場変動をより効果的に抑制できる可能性があると考えられる。

謝辞

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

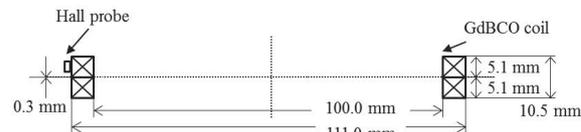


Fig.1 Schematic view of a GdBCO double pancake coil and hall probe for magnetic field measurement.

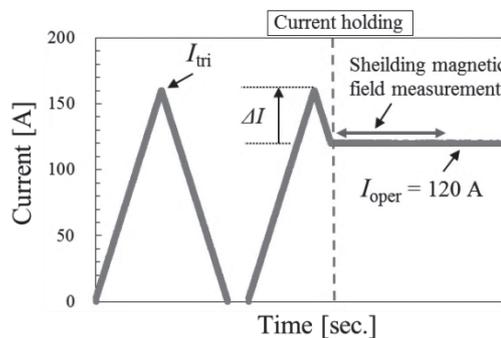


Fig.2 Coil current waveform.

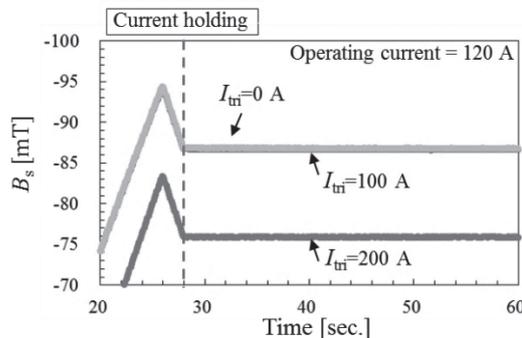


Fig.3 Time change of magnetic flux density induced by screening current as a function of the peak value of triangular wave current.

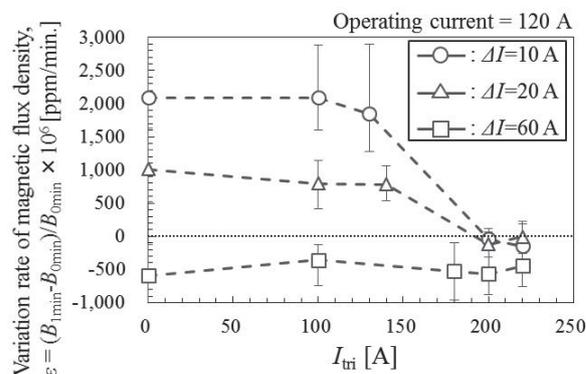


Fig.4 Variation rate of magnetic flux density as a function of the peak value of triangular wave current.

参考文献

- H. Miura, et al.: 2016 Annual Meeting of IEEJ No. 5-096

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-5)

～オーバーシュート法適用時の遮蔽電流磁場特性～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (I-5)

～Characteristics of shielding magnetic flux density when applying overshooting method～

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

1. はじめに

MRI 用マグネットには、時間的に高安定な磁場が要求される。しかし、MRI マグネットへの適用を目指している REBCO 線材は、テープ状の構造から、遮蔽電流の減衰による磁場変動が顕著であり、高安定磁場を生成する上で問題となっている。これまでは、遮蔽電流磁場の変動を抑制するため、液体窒素浸漬冷却型 REBCO コイルにおいて、遮蔽電流磁場の基本特性や遮蔽電流磁場の変動抑制に適したオーバーシュート量について検討してきた[1]。しかし、実際の MRI では、冷凍機を用いた伝導冷却となり、運転温度は液体窒素温度よりも低くなるため、遮蔽電流磁場の変動抑制に適したオーバーシュート量は、液体窒素冷却時とは異なることが予想される。そこで、本研究では、遮蔽電流磁場の減衰特性や遮蔽電流磁場の変動抑制に有効なオーバーシュート量の運転温度依存性と電流負荷率依存性について検討した。

2. 遮蔽電流磁場の減衰特性

Table 1 に、実験で使用したコイルの諸元を示す。コイルの冷却は冷凍機による伝導冷却とした。コイルの遮蔽電流磁場特性を明確にするため、コイル側面にホール素子を取り付け、径方向の磁束密度 B_z を測定した。また、遮蔽電流磁場 B_s は、コイルが超電導状態の時に測定した磁束密度と、常電導状態の時の測定結果より算出した磁束密度との差分で評価した。

まず、一定電流を通電した場合の遮蔽電流磁場の減衰特性を評価した。Fig. 1 に電流負荷率(=目標電流 I_{op} / 臨界電流 I_c)を 60% としたときの、各運転温度における遮蔽電流磁場の減衰特性を示す。なお、目標電流は、定常運転時の電流とした。縦軸は、各瞬間の遮蔽電流磁場を目標電流到達直後の遮蔽電流磁場で規格化した値である。Fig. 1 より、遮蔽電流磁場の減衰は、運転温度に係わらずほぼ同じになることがわかった。

3. オーバーシュート法適用時の遮蔽電流磁場特性

オーバーシュート量 ΔI を少しずつ増加させることにより、超電導体内部の磁化の書き換えを連続的に行い、遮蔽電流磁場の変動を抑制して効率的に磁場安定化を実現するために、本実験では、Fig. 2 に示すようなオーバーシュート波形を採用した。そして、コイルの運転温度や電流負荷率をパラメータとして、Fig. 2 のオーバーシュート波形を適用した場合の遮蔽電流磁場の変動特性を評価した。その結果、オーバーシュート波形印加直後の磁場変動率は、 ΔI に依存し、 ΔI が大きくなるにつれて磁場変動率がプラスからマイナスに転じることがわかった。この傾向は、先行研究[1]と一致している。

Fig. 3 に、運転温度と電流負荷率をパラメータとした場合の磁場変動抑制に有効なオーバーシュート割合(= $\Delta I / I_c$)を示す。Fig. 3 より、磁場変動抑制に有効なオーバーシュート割合は、電流負荷率と密接に関係していることがわかった。

以上の結果より、オーバーシュート波形適用時の遮蔽電流磁場の変動特性は、電流負荷率が大きく影響することがわかった。これは、遮蔽電流磁場の変動が抑制されている時の超電導体内部の励磁電流と遮蔽電流の分布が、運転温度によらずほぼ同じになることに起因していると考えられる。

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) 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。

Table 1 Specifications of a REBCO coil

形状	ダブルパンケーキ
巻数	50
インダクタンス	255 μ H
内径	100 mm
線材長	16.7 m
臨界電流 (0.1 μ V/cm 基準)	234 A@45 K 200 A@50 K, 158 A@60 K

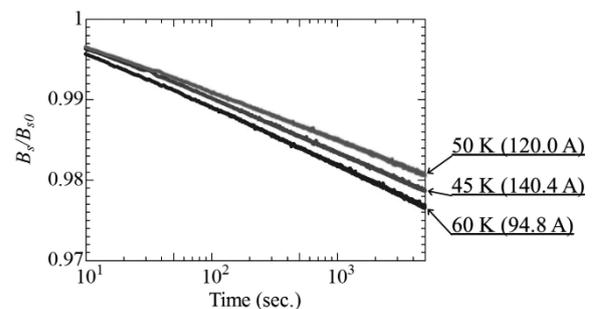
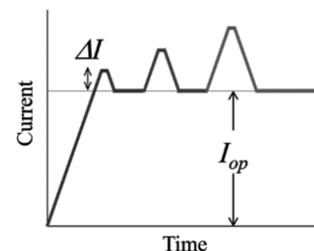
Fig. 1 Time shift of shielding magnetic flux density as a function of operating temperature ($I_{op}/I_c = 60\%$).

Fig. 2 Proposed current waveform in an overshooting process.

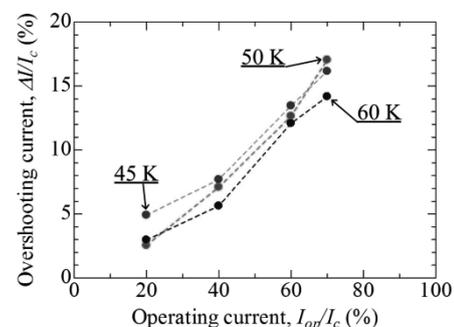


Fig. 3 Suitable overshooting current as functions of current load factor and operating temperature.

参考文献

1. M. Tsuda, et al: *IEEE Trans. Appl. Super.*, vol. 27, Issue 4 8200305, 2017

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-6)

～局所的 I_c 劣化時の REBCO 線材のクエンチ特性～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (I-6)

～Quench characteristics of REBCO coated conductor having Local I_c degradation～

井出 桃愛, 宮城 大輔, 津田 理 (東北大学); 横山 彰一 (三菱電機)

IDE Momoe, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);

YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: momoe.ide.p4@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBCO コイルでは、クエンチ時の熱拡散速度が遅く、局所的に劣化が進行するため、クエンチ領域の検出が難しく、焼損に至る恐れがある[1]。この様な REBCO コイルの保護対策を構築するには、REBCO コイルのクエンチ要因やクエンチの発生メカニズムを明確にする必要がある。そこで、本研究では、REBCO テープ線の局所的 I_c 劣化に着目し、局所的 I_c 劣化がクエンチ特性に及ぼす影響を明確にするために、REBCO テープ線の一部を切断することで局所的 I_c 劣化を模擬し、安定化銅の有無や冷却条件が I_c 劣化部の電圧変化や焼損時の電流値等のクエンチ特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

本実験では、局所的 I_c 劣化に対して安定化銅がクエンチ特性に及ぼす影響を調べるために、安定化層(銅層)の無い線材(Sample i)と有る線材(Sample ii)を使用した。実験に使用した GdBCO 線材の諸元を Table 1 に示す。線材の中央部を幅方向に 2mm 切断し、 I_c の劣化を模擬した。そして、劣化部をスタイロフォームで覆ったもの(断熱条件)と覆わないもの(液体窒素冷却)を用意し、液体窒素中で通電した時の、切断部を中心とする 10cm の領域の電位差を測定した。線材への通電は、0A から一定速度(5A/s)で増加させ、目標電流到達後に電流を 10s ホールドし、0A まで減少させるという方法で行い、線材が焼損するまで、目標電流を少しずつ増加させた。

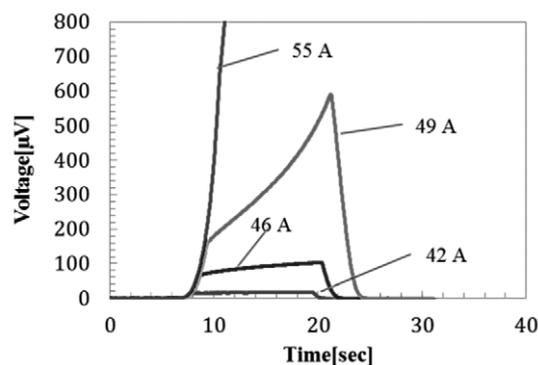
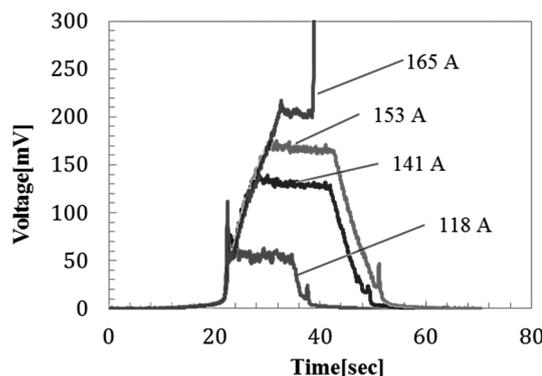
3. 実験結果と考察

安定化層が無い線材(Sample i)では、冷却条件によらず、通電電流が劣化部の I_c を超えると不安定になり、短時間で電圧が上昇して焼損に至った。安定化層が有る線材(Sample ii)における、断熱条件時の劣化部の両端電圧の時間変化の様子を Fig.1 に、液体窒素冷却時の結果を Fig.2 に示す。断熱条件時は、通電電流が局所的 I_c (41A) 以下であれば安定状態を維持できるものの、局所的 I_c を 5A 上回った状態では、時間の経過とともに電圧が緩やかに上昇し、局所的 I_c を 14A 上回った時(55A)に焼損した。一方、液体窒素冷却時は、局所的 I_c (43A) を 100A 以上上回った状態(153A)でも両端電圧が上昇することなく安定状態を維持できることがわかった。また、この時の発生電圧は 170 mV と、他の条件の場合と比べて桁違いに大きくなることが確認された。これは、 I_c が低下している領域では、電流が銅に分流するため、超電導層での発熱量が減少する上に、液体窒素による冷却効果と、安定化銅による長手方向の熱伝導効果により、発熱部での熱収支をバランスさせることができ、安定性を維持できたと考えられる。この様に、コイルの冷却条件を良くできれば、mV オーダーの電圧が発生するためクエンチ検出が容易になり、局所的にクエンチしても、焼損に至る可能性が低くなると考えられるが、MRI 用 REBCO コイルは伝導冷却となるため、コイルの冷却性能向上が重要となる。今後は、有限要素法を用いた数値解析により、線材が焼損するまでの時間や焼損時の発生電圧など、 I_c 劣化部の電磁現象や熱特性について検討する予定である。

Table 1 Specifications of GdBCO tapes

Sample	i	ii
Type	GdBCO	GdBCO
Superconducting thickness [μm]	1.0	1.0
Copper stabilizer thickness [μm]	0	20.0
Silver overlayer thickness [μm]	1.5(Ag coating)	1.5(Ag coating)
Hastelloy substrate thickness [μm]	60.0	60.0
Tape width [mm]	4.0	4.0
I_{cb} , I_{ca} , I_{qa} (LN ₂) [A]	116, 49, 53	92, 43, 165
I_{cb} , I_{ca} , I_{qa} (styrofoam) [A]	116, 49, 51	88, 41, 55

I_{cb} ; I_c before 2mm cutting, I_{ca} ; I_c after 2mm cutting, I_{qa} ; I_q after 2mm cutting

Fig.1 Time shift of voltage across the degraded part of I_c in a GdBCO tape with copper layer covered by styrofoam.Fig.2 Time shift of voltage across the degraded part of I_c in a GdBCO tape with copper layer cooled by LN₂.

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。

参考文献

1. A. Ishiyama et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 48, pp.141-150 (2013)

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-7)

～Gd 系線材の異方的常電導伝搬特性～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (I-7)

-Anisotropic normal-zone propagation characteristics of Gd-system HTS wire -

唐島 智治, 中村 武恒, 西野 竜平 (京大); 横山 彰一 (三菱電機)

KARASHIMA Tomoharu, NAKAMURA Taketsune, NISHINO Ryohei (Kyoto Univ.);

YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は, MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステムの研究開発[1]の一環として, 高温超電導コイルの最適設計に関する検討を実施している。当該設計を実現するためには, 熱安定性を保証するある程度定量的な指標に基づく電流負荷率の決定が不可欠である。本講演では, 上記検討の一環として, Gd 系高温超電導線材の異方的常電導伝搬特性に関する解析的検討結果を報告する。

2. 解析方法

まず, Gd系高温超電導線材における直流通電特性を温度・磁場の関数として計測した。また, 本特性について, 九州大学・木須らが提唱しているパーコレーション遷移モデルに基づく評価式[2]を利用して定式化した。なお, パラメータフィッティングの際には遺伝アルゴリズムを利用している。次に, 上記を発熱項として, 次式の熱平衡方程式を差分法によって解析した。Fig. 1には, 解析対象モデルの概念図を示す。Gd系線材の長手方向ならびに厚み方向をモデル化し, 2次元差分法(陰解法)によって解析を実施した。なお, 線材に対する磁場印加方向の影響を解析する際には, 熱平衡方程式の発熱項に, 次式の等価垂直磁場 B_{eq} [3]を考えた。

$$B_{eq}(\varphi) = (\cos^2 \varphi + \gamma^{-2} \sin^2 \varphi)^{1/2}$$

ここで, φ ならびに γ は, それぞれ超電導線材に対する磁場印加角度(通電電流に対して垂直), 異方性比である。

3. 解析結果

Fig. 2には, 温度30 K, 垂直磁場4.0 Tにおける熱伝導特性の解析結果の一例を示す。同図に示すように, 常電導伝搬特性の電流負荷率依存性や銅保護層を片面に形成した場合と両面に形成した場合の相違など, 重要な結果が得られている。その他, 最小クエンチエネルギーの温度-磁場平面におけるコンター図や, 磁場印加角度依存性, 線材長手方向の特性バラつきが熱伝導特性に与える影響等, コイル電流負荷率を決定する上で重要な結果が得られているが, 詳細講演当日に報告する。

謝辞

本研究は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。解析プログラム改良の一部について, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻(2017年3月修了)伊藤達哉氏に協力頂いた。

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 94, 2A-a01 (2017).
2. T. Kiss et al.: Physica C, vol. 392, pp. 1053-1062 (2003).
3. T. Nakamura, et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 15, pp. 230-235 (2002)

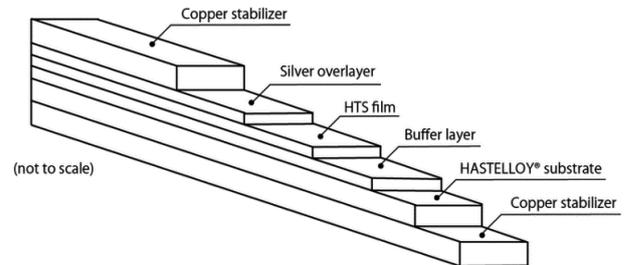
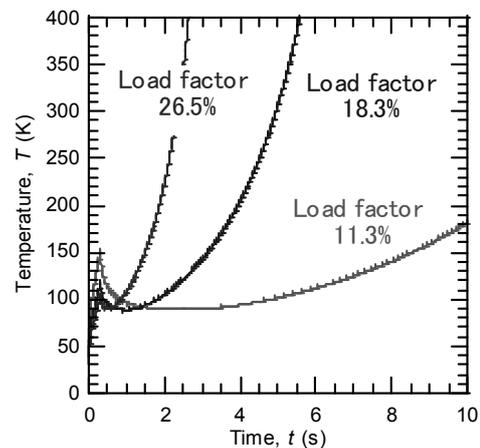
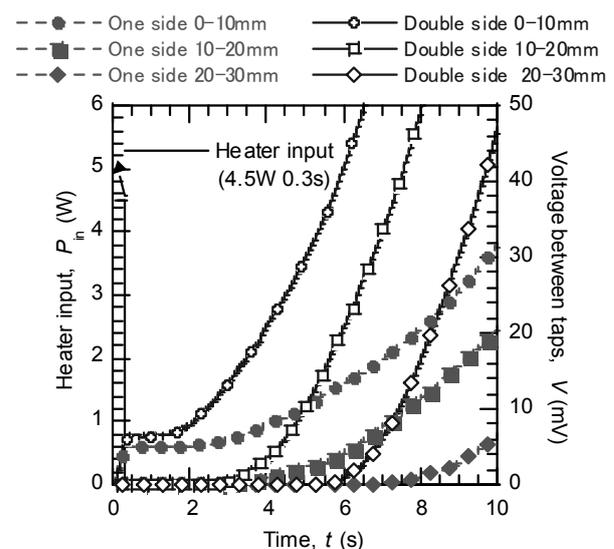


Fig. 1 Analysis model of Gd-system superconducting wire



(a) Dependence of load factor



(b) Dependence of Cu stabilizing layer configuration

Fig. 2 Analysis results of 2D thermal property characteristics in Gd-system superconducting wire (30 K, 4.0 T)