

古典モンテカルロ法による磁気冷凍材料の物性計算

Physical properties of magnetocaloric materials by using classical Monte Carlo method

新井 亮祐 (NIMS, 千葉大); 田村 亮, 沼澤 健則 (NIMS); 中込 秀樹, 李 晶 (千葉大)

ARAI Ryosuke (NIMS, Chiba Univ); TAMURA Ryo, NUMAZAWA Takenori (NIMS); NAKAGOME Hideki, LI Jing (Chiba Univ)

E-mail: r_arai@chiba-u.jp

1. はじめに

現在、磁気冷凍材料の物性値に関する計算手法として平均場近似が広く用いられている。しかしながら、この方法では磁気冷凍技術において最も重要なキュリー温度 T_c 付近での物性値を精度良く見積もることが困難である。近年、計算機性能の向上に伴い、乱数を用いて数値的に磁気冷凍材料の物性値を計算する試みがなされている[1]。本研究では、イジングモデルにおける断熱磁気エントロピー変化 ΔS_m と磁気比熱 C_{mag} を古典モンテカルロ法によって、計算したのでその結果を報告する。

2. 計算方法

一般的に比熱は格子系、電子系、磁気系、核系に分けられる。超低温領域でなければ核系の比熱は非常に小さく無視できる。格子系、電子系にはそれぞれデバイの比熱式と $C_{el} = \gamma T$ の関係式で高精度に求めることが可能である。本研究で対象とする 4f 電子に由来する磁気系の比熱はハイゼンベルクモデルによって記述ができる。本研究ではこのハイゼンベルクモデルをモンテカルロ法と平均場近似により計算し比較する。

Fig.1 に示すようにモンテカルロ法では初期状態からランダムにスピンを選択・反転を繰り返し定常状態に至った後、物理量の計算をおこない、終了条件に至るまで計算を繰り返し、最終的に物理量の平均値を取る。

Table.1 には計算条件を示す。ここで MCS はモンテカルロステップのことで系全体のスピンの数分計算をおこなうときに 1MCS となる。本研究では、この一連の計算を 20 回おこない平均値を取った。またボルツマン定数が 1 となるように規格化をおこなった。比熱とエントロピーの計算にはそれぞれ以下の式を用いた。

$$C_{mag} = \frac{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2}{k_B T^2} \quad (1)$$

$$S_m = \int_0^{T_i} \frac{C_{mag}}{T} dT \quad (2)$$

3. 結果と考察

Fig.2 は ΔS_m をモンテカルロ法、平均場近似のそれぞれで計算したものである。ここで温度は T_c で規格化している Fig.2 からモンテカルロ法で求めた ΔS_m と比べ、平均場近似ではシャープなピークを持つことがわかる。また平均場近似では T_c より高温での磁気エントロピー変化を非常に大きく評価してしまっている事がわかる。また講演では典型的な 2 次相転移物質である GdY 化合物における計算値と実験値との比較を報告する予定である。

参考文献

1. E. P. Nobrega et al.: J. Magn. Magn. Mater. 320 (2008), e147-e149

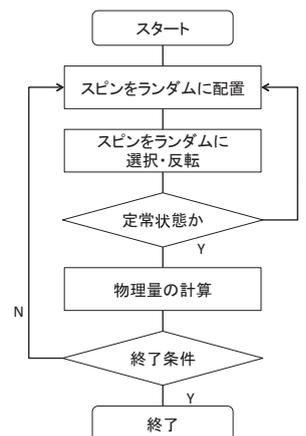


Fig.1 The algorithm of classical Monte Carlo method for Heisenberg model and Ising model

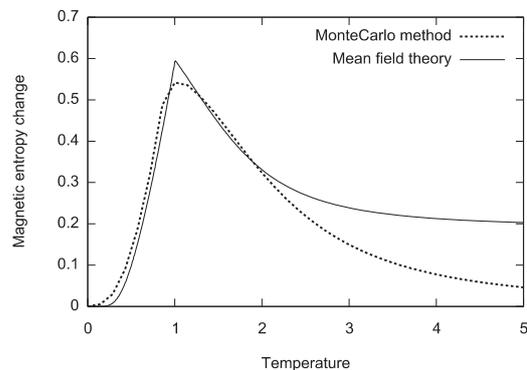


Fig.2 The temperature dependence of adiabatic magnetic entropy change by using Monte Carlo method and mean field theory

Table.1 Calculation conditions

Parameter	Value
Exchange interaction parameter λ_{ij}	1
Boltzmann constant k_B	1
External field $\mu_0 H$	0, 5 T
Dimension	3
Number of lattice points	6^3
Crystal structure	Simple cubic
MCS (steady state)	5000 MCS
MCS (total)	10000 MCS
Number of iteration	20

謝辞

本研究は科研費(26420890)の助成を受けたものである。

磁気冷凍用 $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ 水素化物の特性評価 II —樹脂成形体の磁気熱量効果—

Magnetocaloric effect of resin molded $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ hydride

裏 雄太郎, 竹下 実里, 村山 大樹, 阿部 聡, 松本 宏一(金沢大); 沼澤 健則(NIMS); 高田 裕章(三徳)
 URA Yutaro, TAKESHITA Misato, MURAYAMA Daiki, ABE Satoshi, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa Univ);
 NUMAZAWA Takenori (NIMS); TAKATA Hiroaki (SANTOKU)
 E-mail: you.u0320@gmail.com

1. はじめに

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍に用いる磁性材料を研究している。磁気熱量効果は磁性体の転移点近傍で大きくなる。室温近傍で用いる磁性材料に関しては Gd や $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ 系化合物がよく知られている。我々はこれまで一部元素置換を行うことで転移点制御が可能とされている $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ について、Ga 等を置換した試料についての研究を行ってきた[1]。また、 $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ は水素吸蔵することにより転移点制御が可能であることも知られており[2]、水素吸蔵した試料についての研究も試みた。しかし、我々の作製した試料では水素吸蔵することによりもろくなったため、樹脂成形体の作製を行い、今回はこの樹脂成形体の熱伝導率の結果について報告した[3]。

本研究では、 $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ 水素化物の樹脂成形体について、比熱・磁化測定、断熱消磁による磁気熱量効果の評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

本研究では、 $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ を高周波溶解、均質化熱処理後、水素吸蔵を行った多結晶試料を樹脂で硬化し成形した試料を用いた。

比熱測定は Quantum Design 社の PPMS(物理的特性測定システム)を用いて緩和法による 0 T での測定を行った。

また、磁化測定は Quantum Design 社の MPMS(磁気特性測定システム)を用いて 2 T までの測定を行った。その結果から、Maxwell の関係式を用いてエントロピー変化を導出し、磁性体としての性能を評価した。

断熱消磁温度変化の測定は、定常磁場(1, 2 T)を発生している超伝導ソレノイドの断熱磁場空間から磁性体試料を、アクチュエーターを用いて引き抜くことで、消磁を行い測定した。磁性体には磁場空間に引き込む力が働く。この力と熱リーク低減を考慮し、磁性体はホルダー中にケブラー糸を用いて吊るすように固定した。温度計は Lake Shore 社のシリコンダイオード温度計を用いた。測定した成形試料は 27 mm × 15 mm × 9 mm の直方体であり、ケブラー糸を通す穴を磁場方向に 2 カ所、温度計を固定するための穴を中央に開けた(Fig.1)。

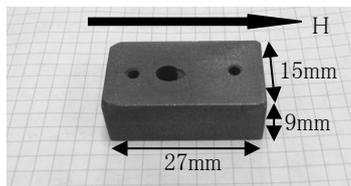


Fig.1 Resin molded $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ hydride

3. 実験結果

$\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ 水素化物樹脂成形体と $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ の 0 T 磁場中における比熱測定の結果を Fig.2 に示す。本研究で用いた試料は水素化により $\text{La}(\text{Fe}_{0.12}\text{Si}_{0.88})_{13}$ よりも転移温度が高温側にシフトしていることが確認できる。転移温度は 332 K であった。また、磁化測定でも転移温度付近で磁化が急激に

変化し、解析で得られたエントロピー変化も転移温度近傍で大きな値を示した。

断熱消磁温度変化の結果を、横軸を断熱消磁開始温度として Fig.3 に示す。印加磁場 2 T の場合、温度変化は断熱消磁開始温度 340 K でピークをとり、最大約 5 K の温度変化が得られた。

講演では、測定方法と測定結果の詳細について報告する。

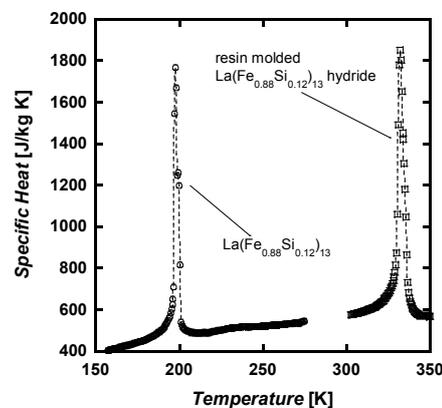


Fig.2 Specific heat of $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ and resin molded $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ hydride at 0 T.

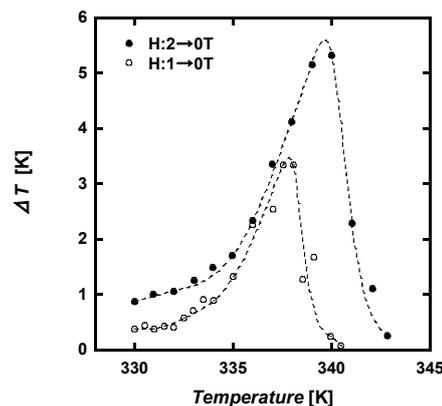


Fig.3 Adiabatic demagnetization temperature change of resin molded $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ hydride from 1 and 2 T. Abscissa represents start temperature of adiabatic demagnetization.

参考文献

1. K.Yamada, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.85 (2011) p.213
2. S. Fujieda, et al. :Appl. Phys. Lett. 79(2001)653
3. D.Murayama, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.89 (2014) p.60

80K,300W 級大出力パルス管冷凍機の開発

Development of High Power 300W-Class at 80K Pulse Tube Cryocooler

高橋 貞充, 梅津 淳一(エア・ウォーター総合開発研究所)
 TAKAHASHI Sadamitsu, UMETSU Junichi (AIR WATER R&D)
 E-mail: takahashi-sad@awi.co.jp

1. はじめに

高温超電導機器の冷却用として、小型冷凍機にも大出力が求められつつある。しかし国内では高圧ガス保安法による制限(圧縮機の原動機の定格出力が 3.6kW 以上になると都道府県知事へ届出等が必要)などもあり、70~80K 付近の液体窒素温度領域で 200W 級の能力の GM 冷凍機しか市販されていないのが現状である。

圧縮機の出力に制限がある中で高出力化を行うには、冷凍機システム側で高効率化を行うしかない。我々はこれまでに簡素な構造で高信頼性も期待できる、高効率単段パルス管冷凍機の開発を行ってきており、160W@80K、13%カルノーの冷凍機[1][2]など、GM型で世界最高級の効率を達成してきている。そこで今回この大出力の要望に応えるべく、法の制限内で入手可能な最も大型のHe圧縮機ユニットを用いて70~80Kの温度領域での最適化開発を行ない、300W超の能力を達成したのでその実験結果について報告する。

2. 試験システム

Fig.1 に試験システムの概略フローを示す。試験システムはパルス管冷凍機、水冷 He 圧縮機ユニット、バッファタンク複数個、空圧弁ユニット 1 式、フレキシブルホース、真空チャンバーで構成した。なお、冷凍機は内部の構成部品や蓄冷材を変更可能な構造としている。冷端部には金鉄-クロメル熱電対とヒーターを取り付け、多層断熱材(MLI)を施した。パルス管温端部は水冷し、ガスの位相制御はアクティブバッファ方式とした。

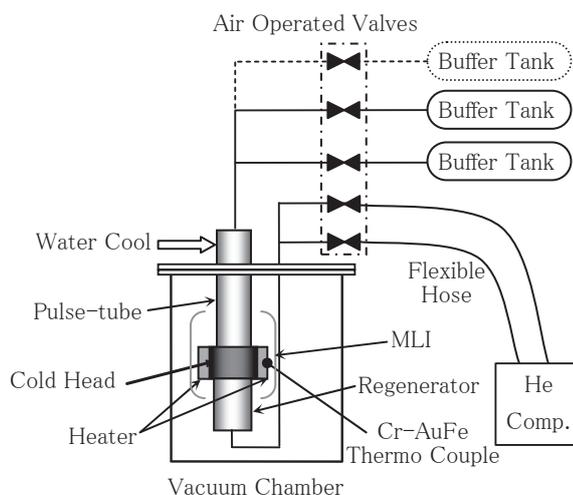


Fig.1 Schematic of the experimental system

3. 試験方法

真空チャンバー内に冷凍機を設置し、圧縮機電源入力

9.1kWで運転し、冷端部温度が70~80K付近となるようにヒーター負荷を加え、バルブタイミングを最適化した。ヒーター負荷を無負荷まで徐々に落としながら、それぞれバルブ切替周波数を最適化しデータを取得した。バッファタンク数など諸条件を変更し、実験を繰り返した。

4. 試験結果

Fig.2 に70K付近で最も高い性能が得られた、3バッファの条件における冷凍能力とCOPカーブを示す。

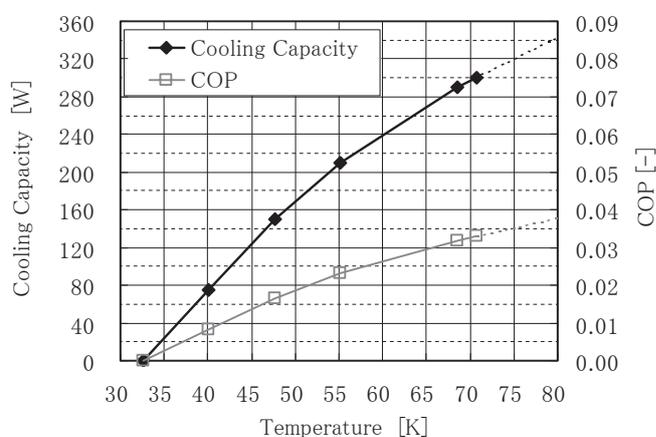


Fig.2 Cooling capacity and COP curves (3-buffer)

ヒーター負荷 300W 時の冷端温度として、70.7 Kを確認した。また試験システム上掛けられる最高のヒーター負荷が約 300Wであったため、それ以上の冷凍能力は推定値となるが、77Kにおける冷凍能力推定値は 329W、COP 0.036、10.4%カルノー、80Kにおける冷凍能力推定値は 343W、COP 0.037、10.3%カルノーという良好な結果が得られた。

5. まとめ

今回70~80Kの液体窒素温度領域で最適化した単段パルス管冷凍機において、電源入力9.1kWで、冷凍能力推定値343W@80K(COP 0.037、10.3%カルノー)と、300W超の高出力を達成。我々の知る限り、国内で市販されている最大のGM冷凍機の1.5倍以上の冷凍能力と、非常に高い能力を有するものとなった。当日はその他条件での比較実験結果についても報告予定である。

参考文献

- Shaowei Zhu, et al.: Cryogenics, Vol.37 No.8 (1997) p.461-471
- S. Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.116

ASPCS 研究用サーモサイフォン循環液体水素冷却による SMES モデル装置の開発 - 性能試験結果

Performance test results of a small SMES model cooled by liquid hydrogen thermo-siphon flow for ASPCS study

榎田 康博, 新富 孝和(KEK); 駒込 敏弘, 濱島 高太郎(前川); 太田 成美, 葛 雅志, 安藤 憲之介(上智大);
津田 理(東北大); 辻上 博司, 岩城 勝也, 藤川 静一, 広瀬 順之(岩谷産業)
MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); HAMAJIMA Takataro, KOMAGOME Toshihiro (MAYEKAWA);
OTA Narumi, KATSURA Masashi, ANDO Kennosuke (Sophia Univ.); TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
TSUSJIGAMI Hiroshi, IWAKI Katsuya, FUJIKAWA Shizuichi, HIROSE Junji (IWATANI Co.)
E-mail: yasuihiro.makida@kek.jp

1. はじめに

我々の研究チームでは、今後大量導入が予想される自然エネルギー発電の変動補償システムとして、SMES、燃料電池、電気分解装置、液体水素ステーションで構成する先進超電導電力変換システム(ASPCS)を提案してきた[1]。JST の先端的低炭素化技術開発(ALCA)より支援をいただき、小型モデルを製作してその基礎技術の確認とシステムの有効性の実証を行おうとしている。基礎技術の 1 つである「液体水素による超電導磁石の冷却」を行う試験用クライオスタットを製作し、液体水素による冷却・励磁試験を実施した。

2. 液体水素冷却試験装置(クライオスタット)の特徴

可燃性の液体水素を寒剤に使用するため、

- ① 超電導コイルとその電流リードは伝導冷却とした。
- ② 超電導コイルを冷却する液体水素は貯液槽の底部より上部気相部に至る配管内をサーモサイフォン循環する。
- ③ このサーモサイフォン配管より展開した伝導板にコイルからの純アルミ伝導板を接続して伝導冷却路とする。

超電導コイルの仕様は BSCCO テープ線材のダブルパンケーキ6個より構成され、Fig.1 の写真に示すように、純アルミ板を各パンケーキ巻端面に貼付けて伝熱経路を構成している。SMES 運転による渦電流損を低減するため、純アルミ板にはスリット加工が施されている。コイルの仕様を TABLE1 にまとめる。

3. 冷却試験結果

試験用クライオスタットの液体水素冷却試験は、液体水素を使用する環境が提供されている、岩谷産業中央研究所にて実施した。Fig. 1 中に示すような温度分布となり、コイルはサーモサイフォン配管を流れる液体水素によって、純アルミスリップ熱伝導板を介して約 22~25 K まで冷却された。Fig. 2 に示すように、定格 200A の励磁(直流)にも成功している。

次に、伝導板を中心の AC ロスの影響を見るため波高値 9 A、最大 1 Hz(運用上は 0.1 Hz が最大)での交流励磁を行い、温度上昇を Fig. 3 に示すように観測した。

参考文献

[1] T. Hamajima, et al., Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control, IEEE Trans. Appl. Supercond., **22** (2012) 5701704

TABLE 1 Parameters of Model SMES coil

Coil	Stored energy	6.2 kJ
	Conductor	BSCCO
	Max. Magnetic flux density	3.8 T
	Maximum operating current	200 A
	Coil I.D.& O.D.	100 & 193.8 mm
	Coil height	56.6 mm
	Coil structure	Double pancake
	Number of double pancake	6
Al plates	Thickness of Al plates	0.2 mm
	Slit width	10 mm

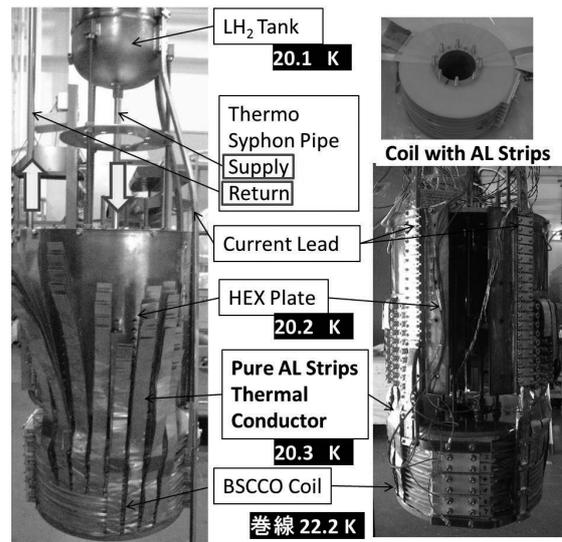


Fig. 1 Layout of the test bench of the LH₂ cooled BSCCO And temperature distribution

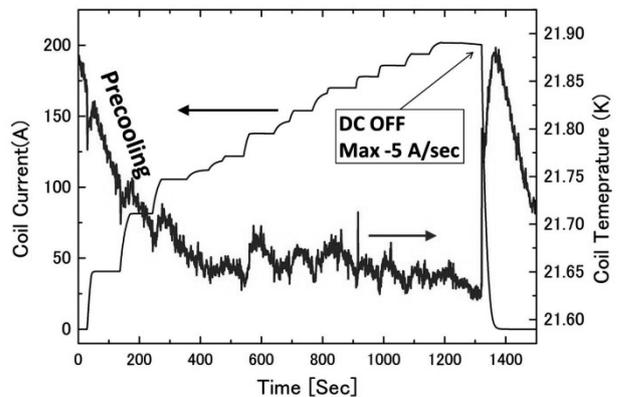


Fig. 2 Trends of current and coil temperature in the model SMES coil during a first excitation cooled by liquid hydrogen.

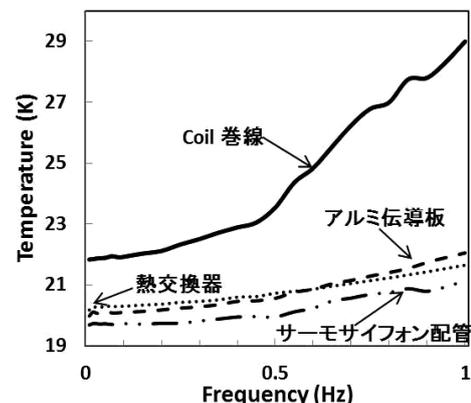


Fig. 3 Temperature rise due to AC excitation of +/- 9 A

輻射シールドにおける中間温度からの輻射熱負荷測定

Measurement of heat leaks by radiation in low temperature

李 智媛, 横山 彰一, 佐藤 伸治(三菱電機)

LEE Jiwon, YOKOYAMA Shoichi, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail; Lee.Jiwon@ds.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

MRIなどの超電導マグネットの極低温装置において、大型化に伴い輻射シールドからの熱負荷が無視できなくなっている。しかし、極低温下では金属の比熱が非常に小さく、微小な熱の出入りでも温度が容易に変化するため、輻射熱測定は非常に困難である。これまで機器設計は文献の輻射率を元に実施してきたが、輻射シールドの表面状態や温度依存性などにより熱負荷が大きく異なるため、輻射率の正確な値が必要である。本報告では、温度制御可能な小型伝導冷却要素試験装置[1]を用いて中間温度からの輻射熱負荷測定を行ったことについて述べる。

2. 輻射熱負荷測定

これまで極低温における輻射率測定の研究は、測定装置が大型であり、冷媒を使った計測のため、例えば4.2Kと77Kの一定温度での測定しかできなかった[2]。本研究では、小型で温度可変の伝導冷却要素試験装置を用い、輻射熱負荷測定を実施した。

Fig.1 に示す伝導冷却要素試験装置を用いて、輻射熱負荷を測定する方法を開発した。伝導冷却要素試験装置は、真空容器と試料を冷却する冷却ステージ(TL)、輻射シールド(TH3)、GM 冷凍機により構成されており、低温物性測定は真空度 10^{-4} Pa 以下で実施している。冷凍機により伝導冷却される低温側ステージがあり、ヒータにより温度制御が可能となっている。輻射熱負荷を測定するために、低温側ステージ(TL)と対面設置された。高温側ステージ(TH1)はもめん糸で吊している。ヒータ加熱量が全て低温側ステージ(TL)への輻射熱負荷とするために、高温側ステージ(TH1)の裏面への輻射熱負荷やヒータおよび温度センサーのリード線からの熱伝導による熱負荷をゼロにする工夫をした。高温側ステージ(TH1)の裏面と対向する位置に TH1 と同じ温度で維持する温度補償ステージ(TH2)を設置し、輻射シールド(TH3)を含めた、各温度を $TH1=TH2=TH3$ とすることにより、TH1 から TL への輻射熱負荷(Q)を精度良く測定することができる構成が得られた。

3. 結果と考察

輻射熱負荷測定の結果を Fig.2 に示す。測定条件は、高温側ステージ-低温側ステージをそれぞれアルミ(Al)-Al および Al-SUS とし、高温側ステージ温度 100K、120K、140K で測定した。また、低温側ステージ温度は 8K とした。同図には、測定値(実線)と理論値(破線)を記した。その結果、輻射熱負荷の実測値は120KでAl-SUSが8.2mW (0.26W/m²)、Al-Alが5.2mW (0.16W/m²)であった。また、輻射率を一定として(Al:0.03、SUS:0.06)計算した理論値と実測値を比較すると、実測値の温度依存性が大きいことから、輻射率の温度依存性があることが分かった。

4. まとめ

輻射熱負荷低減を検討するため、小型で容易に輻射熱負荷を測定できる、伝導冷却要素試験装置を用いた輻射熱負荷測定方法を開発した。その結果、輻射率の温度依存性を観測した。今後は、高温側ステージ及び低温側ステージの材料の表面状態などを測定し、輻射率低減を検討する。

参考文献

- [1]横山彰一ほか: 第81回低温工学・超電導学会予稿集(2009)141
- [2]天野俊之ほか: 日本機械学会論文集(1990-1)146

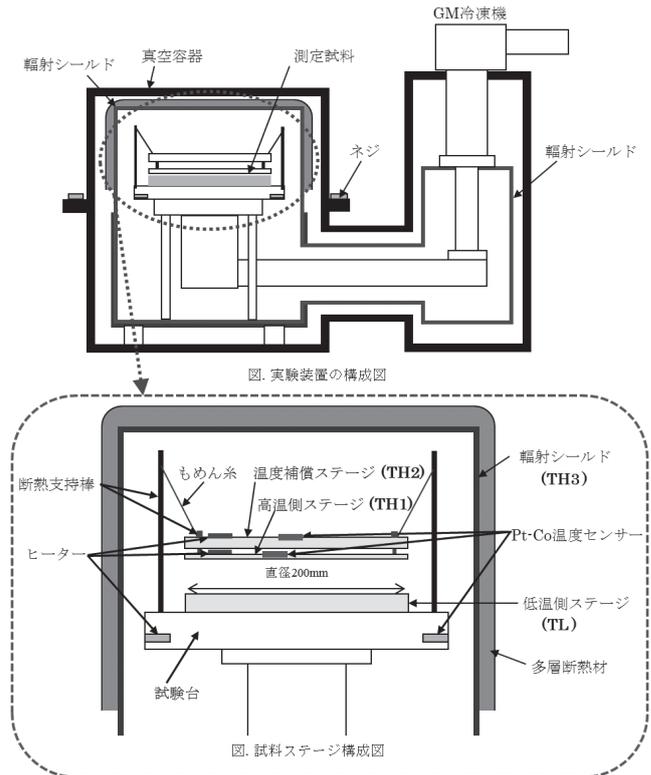


Fig.1 Schematic drawing of the radiation heat leaks measurement system by a conduction cooling.

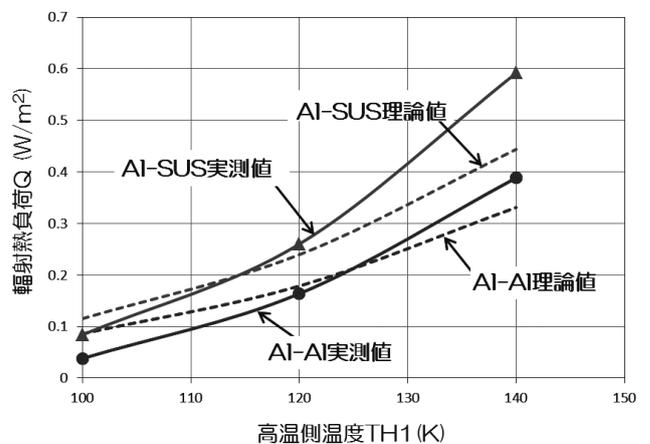


Fig.2 Comparison of measured values with the theoretical values of radiation heat leaks.

高温超電導ケーブル冷却用軸シールレス小型遠心式ポンプの開発

Development of Shaft Sealless Compact Centrifugal Pump for High-Temperature Superconducting Cable Cooling

河原 伸哉, 梅津 淳一, 城地 勇人, 高橋 貞充, 首藤 智仁 (エア・ウォーター総合開発研究所)
 KAWAHARA Shinya, UMETSU Junichi, JOUCHI Taketo, TAKAHASHI Sadamitsu, SHUTOU Tomohito (AIR WATER R&D)
 E-mail: kawahara-shi@awi.co.jp

1. はじめに

我々は、これまでに低温液化ガス送液用のポンプとして、無漏洩でありながら寿命を大幅に延ばした、軸シールレスの堅型遠心式ポンプ VCP シリーズを開発してきている[1]。

今回、高温超電導ケーブル冷却用途向けの LN2 循環ポンプの要求に応えるべく、出力、回転数を最適化した専用のモータを新たに開発し、ポンプの性能試験を実施した。合わせて、ケーブル冷却用途で課題となる入熱についても評価を実施したので報告する。

2. 構造・仕様

Fig.1にポンプの概略図を、Table.1に今回製作したポンプの仕様を示す。

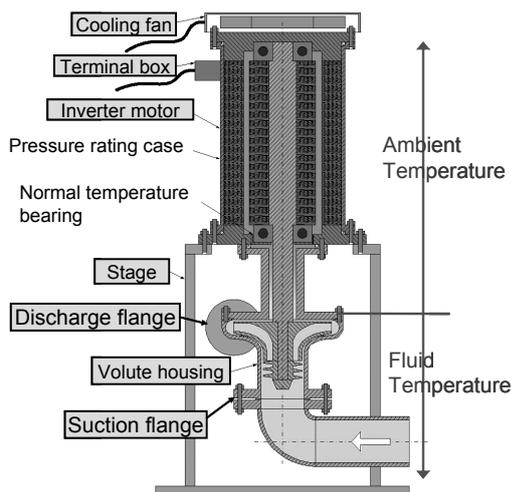


Fig.1 Structure of Shaft Sealless pump

Table.1 Specifications

ポンプ方式	軸シールレス堅型遠心式ポンプ
吐出量	500~5,000L/Hr (約 8.3~83L/min)
揚程	10~95m (LN ₂ 差圧 0.1~0.75MPa)
モータ仕様	三相 200V 出力 2.2kW インバータ駆動 3,000~7,000rpm
メンテナンスサイクル	約 20,000 時間

3. 試験方法

Fig.2 に試験システムの概略フローを示す。ポンプ前後にそれぞれ圧力計、温度計、ポンプ吐出部に流量計と流量調整バルブを設置した。ポンプの吸入側に設置した断熱タンクから液体窒素を供給し、予冷後に運転を行った。試験はインバータで回転数を変更し、各回転数でバルブ開度を調整し、流量とポンプ前後の差圧を変更しながら性能データを取得した。

軸動力及びポンプ効率にはインバータ出力の電流を測定し、モータの性能データからそれぞれ算出した。また、ポンプの出入口の温度を測定し、その温度差と流量から流体へ入った熱量を算出した。

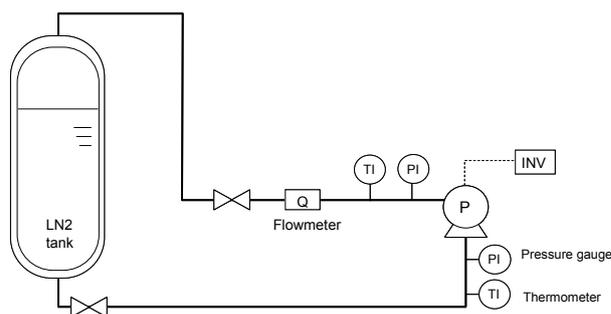


Fig.2 Schematic of experimental system

4. 試験結果

Fig.3 に測定結果の一例として 6,000rpm のときに得られたポンプの差圧、軸動力、ポンプ効率の値を示す。

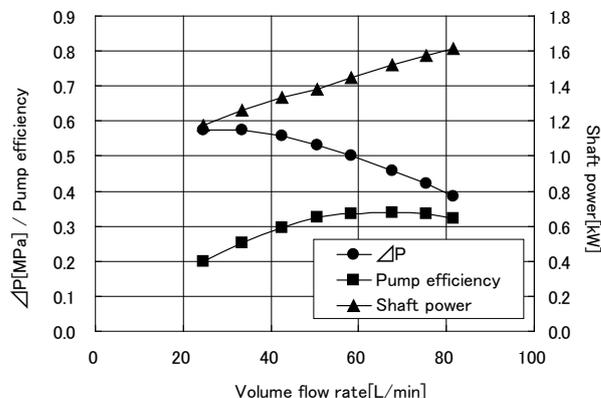


Fig.3 Pump performance curve at 6,000rpm

6,000rpm では約 25L/min~83L/min, LN2 差圧は約 0.38~0.58MPa の性能が得られた。インバータで回転数を調整し、流量 8.3~83L/min, 差圧 0.1~0.75 MPa の性能を確認した。さらに、流量、温度のデータからポンプ運転時に流体に入った熱量を算出した。算出した熱量は軸動力とほぼ一致しており、理論通りの結果となった。これらの詳細について当日報告する。

参考文献

1. S. Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.135

200m 高温超伝導直流送電ケーブルの臨界電流測定と通電試験

Critical current measurement and current feeding test of a 200-m high temperature superconducting dc power cable

孫 建, 宮田 成紀^{*)}, 山内 健吾, 佐藤 裕貴, Tallouli Mohamed, 浜辺 誠, 渡辺 裕文,
河原 敏男, 築本 知子, Yury Ivanov, 山口 作太郎(中部大学)

SUN Jian, MIYATA Seiki, YAMAUCHI Kengo, SATOU Yuki, TALLOULI Mohamed, HAMABE Makoto,
WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, CHIKUMOTO Noriko, YURY Ivanov, YAMAGUCHI Sataro (Chubu Univ)
E-mail: j_sun@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

A 200 m high temperature superconducting dc power cable was constructed in 2009 [1] and since then we have performed six cooling cycle tests to evaluate its performance. Current feeding test is one of the most important issues for this evaluation. In the summer of 2014, we started the sixth cooling cycle test on the 200-m cable. After cooling down to liquid nitrogen temperature, we applied a dc transport current to the 200-m cable. Previously, we have successfully carried on 2 kA current feeding test [2]. In this report, we will present the current feeding test in the 200-m cable together with the critical current measurements [3].

2. CASER-II cable

A three-layer coaxial structure is employed as the CASER-II cable. The inner two layers are used as positive (+) polarity and only one outer layer in the outmost is used as negative (-) polarity for dc electric energy power, respectively. Table 1 shows the specifications of HTS cable for the CASER-II system. BSCCO tapes (Type HT-CA) are used from SUMITOMO ELECTRIC Industry and their critical currents are 150 A - 170 A in self-field, 77K. There are 11 tapes, 12 tapes and 16 tapes for each layer. Different tapes are used for each lines of bipolar current feeding by taking account of self-field effects on HTS tapes in the cable [4].

3. Experiments and results

Bipolar current is fed into the cable and the voltages along each tape are measured against the transport current. In the experiment, three dc power supplies with output current of 3 x 1.2 kA are used to perform current feeding test on the CASER-II's cable in parallel. Since HTS tapes are separately connected to the current leads and each I - V characteristics can be obtained. Fig.1 shows different I - V curves of three HTS tapes in the cable and thus the critical currents for these tapes are different from each other. Fig. 2 shows I - V curve of one HTS tape in the outmost layer of the CASER-II's cable. The critical current of the cable is about 3 kA and the n -value is 13.0. The critical current is improved which is due to magnetic field interaction from bipolar currents between HTS tapes. Therefore, none degradation happened on the HTS cable resulting from six cooling cycle tests.

参考文献

1. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.272
2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.89
3. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.100

4. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.136

^{*)} 現在 玉川大学 (2015年4月から)

Table 1 Specifications of CASER-II's HTS cable at 78 K

Rated current, I	DC 2 kA
Rated voltage, V	DC ± 10 kV
Length, L	200 m
Cable structure	Coaxial 3-layer cable
HTS tapes	DI-BSCCO tapes
	Inner: 11/12; Outer: 16

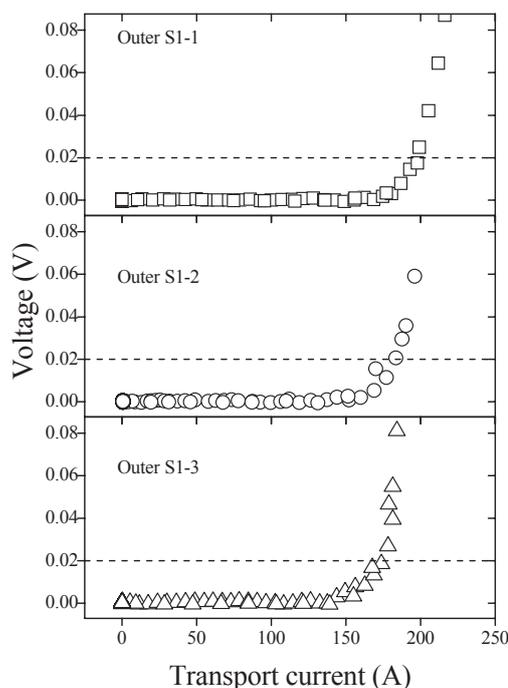


Fig.1 I - V curves of three HTS tapes in the outmost layer of the CASER-II's cable by independently connections.

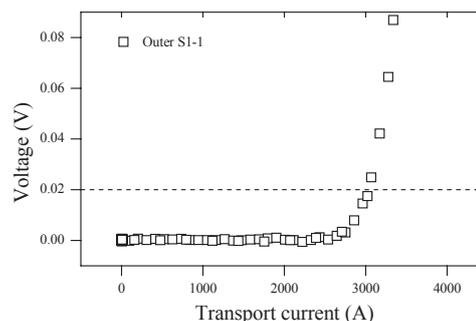


Fig.2 I - V curve of one HTS tape in the outmost layer of the CASER-II's cable.

コンパクト鉄道用超電導ケーブルシステムの開発

Development of compact superconducting cable systems for railway systems

富田 優, 前田 淳, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 鈴木 賢次(鉄道総研)
 TOMITA Masaru, MAEDA Atsushi, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi,
 FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute)
 E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導ケーブルの開発を進めており[1]、超電導ケーブルを鉄道の送電線に適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制などが期待できる。

これまで鉄道総研では超電導線材の製作および特性評価[2]、それらの結果に基づいた超電導ケーブルのプロトタイプを製作し[3,4]、各種の特性評価試験を行ってきた。

本講演では各種検討結果を踏まえ、製作したコンパクト鉄道用超電導ケーブルシステムの開発状況について報告する。

2. コンパクト鉄道用超電導ケーブルシステム

鉄道用超電導ケーブルの鉄道路線への導入を考えた場合、高信頼度だけでなく、鉄道沿線の空間的な制約から、超電導ケーブル、冷却システムのコンパクト化が必要不可欠である。そこで超電導ケーブルにおいては、超伝導ケーブルは対向流循環方式を、冷却システムは一体型冷却システムを採用した。これまで開発された超電導ケーブルの冷却システムの多くは各機能をユニット化し、個別のユニットを低温配管で接続する方式が採用されてきているため、冷却システムの寸法が巨大になってしまっているが、全てのユニットを一体化する冷却システム(一体型冷却システム)は寸法が小さくできている。また冷凍機が故障した場合でもサブクーラでバックアップをとる手法を採用しており、高信頼度なシステムとなっている。

Fig.1 に一体型冷却システムを導入した超電導ケーブルの概要を、Fig.2 に液体窒素循環ポンプの故障模擬試験の例を示す。液体窒素の循環が止まっても、24 時間は液体窒素の蒸発潜熱のおかげで超電導ケーブルの温度上昇は見られないことがわかる。

3. 謝辞

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。

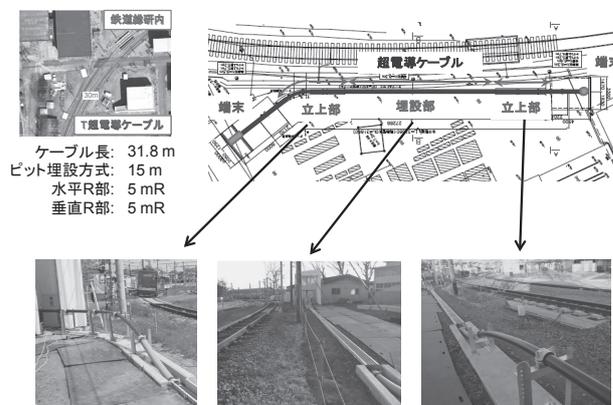


Fig.1 Schematic of a superconducting cable system for railway systems based on an integrated cooling system

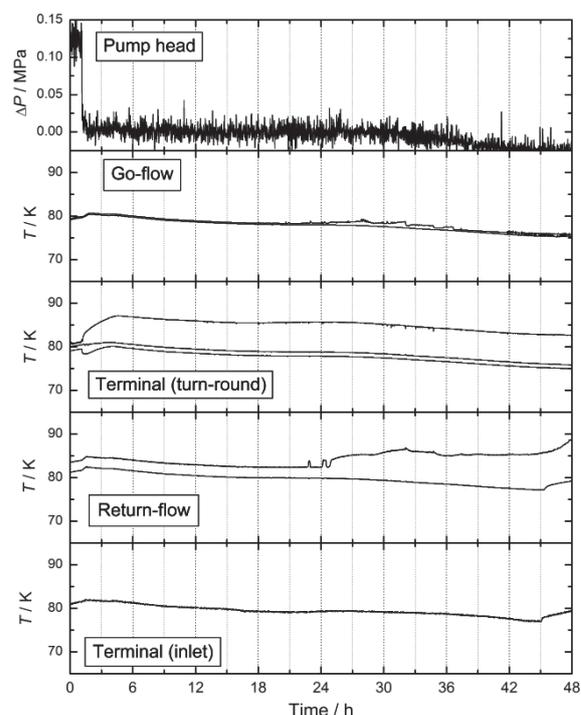


Fig.2 Example of fault simulation tests of a liquid nitrogen pump

参考文献

- [1] Tomita *et al.*: "Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system", *J. Appl. Phys.* **109**, 063909 (2011).
- [2] Y. Fukumoto *et al.*: "Characterization of HTS wire for railway system", *Abstracts of CSSJ Conference* **86** (2012) 101.
- [3] 富田優, 他: 鉄道用超電導ケーブルの要素技術の構築, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 12 (2012) 45.
- [4] M. Tomita *et al.*: "Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems", *J. Appl. Phys.* **111**, 063910 (2012).

直流電気鉄道のか電系における超電導ケーブルの短絡事故時の熱的特性解析

Analysis of Thermal Characteristics of Superconducting Power Cables Introduced to a DC Electric Railway Feeding System Suffering Short Circuit Accidents

熊谷 大輔, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

KUMAGAI Daisuke, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: kumagai@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

現在、鉄道への電力供給方式として用いられている直流き電システムの持つ課題への対策として、超電導ケーブルの導入が検討されている。直流超電導ケーブルは通常の運用時には発熱しないが、短絡事故により過電流が発生すると発熱し、急激な温度上昇を生じると考えられ、超電導ケーブル導入に際して、事故時の応答を明らかにすることも重要な課題となる[1]。本研究では温度依存性を考慮した短絡事故時の電流とそれによる発熱を考慮した温度分布解析を行った。

2. 解析モデル

超電導ケーブルの熱解析モデルを Fig. 1 に、超電導ケーブルを導入した回路における事故時の等価回路を Fig. 2 に示す。ケーブルの conductor 層と shield 層は超電導層と銅層の並列構造となっているものとし、超電導層の $V-I$ 特性は、

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (1)$$

で表されるものとする。ここで、 V_c は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 、 n の値は 12 としして解析を行う。また、臨界電流 I_c は、

$$I_c = I_{c0} \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

に従うものとする。 T_c は臨界温度、 T_0 は液体窒素室温度、 I_{c0} は T_0 における臨界電流を表し、 α の値は 1.5 を用いている。熱解析におけるモデルを長手方向に 10 分割し、conductor 層と shield 層それぞれの温度の平均値を回路モデルに与え、その電流により生じる発熱を熱解析モデルに与えることによって、それぞれを同時に解くことで解析を行った。本解析ではケーブル長さは 1 km、冷媒流量は 0.27 kg/s 、外部からの侵入熱は 0.82 W/m とし、短絡時間は 0.2 s としている。

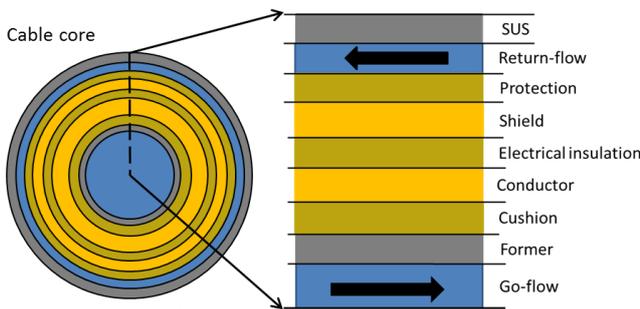


Fig. 1. Structure of the cable model.

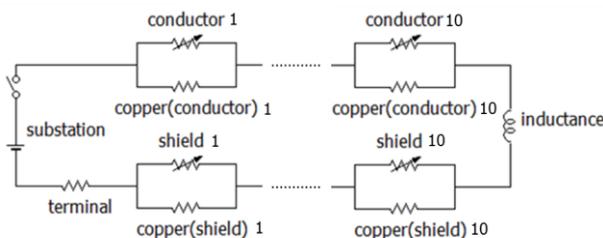


Fig. 2. Circuit diagram of a short circuit accident.

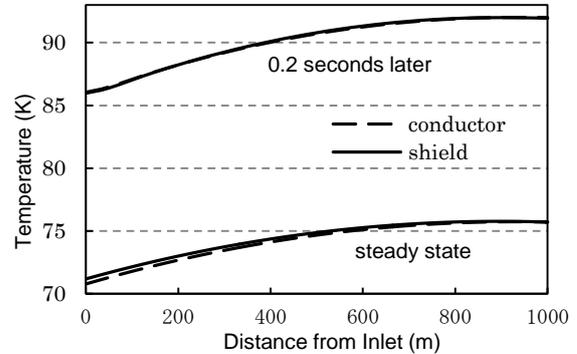


Fig. 3. Temperature transition in the superconducting layers.

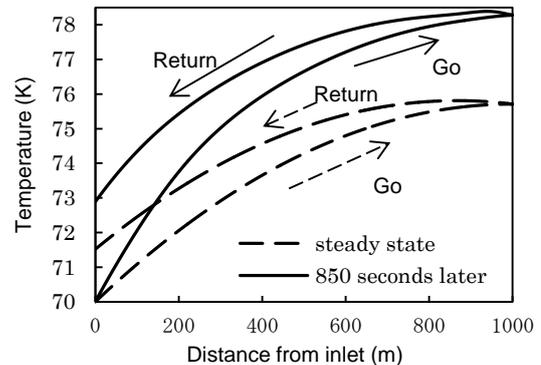


Fig. 4. Temperature transition in the go flow and the return flow.

3. 解析結果

Fig. 3 に conductor 層と shield 層の温度分布解析結果を示す。外部からの侵入熱が存在するため、短絡事故が発生する前から定常状態でも温度分布が生じており、それを初期条件として解析を行っている。短絡事故発生後 0.2 s で定常状態から 15 K 程度の温度上昇が生じる結果となった。Fig. 4 には冷媒層における温度分布の変化を示す。短絡事故による発熱で温度上昇した conductor 層と shield 層から熱が伝わり、冷媒層では徐々に温度が上昇する。本解析では短絡後およそ 850 s で最大温度 78.4 K まで温度上昇する結果となった。

4. まとめ

本研究では超電導線の臨界電流の温度依存性を考慮し、超電導ケーブルを導入した直流き電系における短絡事故時の電流解析、およびその発熱を考慮したケーブルの温度分布解析を行い、ケーブル内の温度遷移を求めた。

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

参考文献

1. D. Kumagai, et al.: "Transient Analysis of a Superconducting DC Power Cable under Overcurrent Conditions," The 27th Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD27), Nagasaki, May 2015.

直流電気鉄道への超電導ケーブルの導入効果に関する 電力貯蔵装置との比較検討

Comparison of effects between a superconducting cable and an energy storage system for DC electric railways

赤堀 貴広, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

AKAHORI Takahiro, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: akahori@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

直流き電鉄道には回生失効や架線の電圧降下といった課題があり、その対策として超電導ケーブルの導入や貯蔵装置の設置が考えられる[1]。本研究では数値解析により超電導ケーブル導入時と貯蔵装置設置時の回生失効、電圧降下、変電所負荷低減効果を解析し、比較検討を行う。

2. 解析方法

本研究では変電所、電車、電力貯蔵装置、超電導ケーブルモデルからなる路線モデルを現実の路線を参考に設定し、時間ステップごとに各要素のエネルギー入出力等の解析を、汎用解析ソフトウェア Matlab/Simulink を用いて行った。

路線モデルは、全長 26.5 km で、5 つの変電所(SS1~5)、24 カ所の駅、き電線、変電所間をつなぐ超電導ケーブル、変電所設置電力貯蔵装置から成る。5 分間隔運行パターンを設定した (Fig. 1)。

変電所入力エネルギーと変電所最大出力の低減のために超電導ケーブルを導入するケースと、電力貯蔵装置を変電所 5(SS5)に設置するケースの 2 つについて検討した。また、変電所 5(SS5)が設置できず、電圧降下問題が発生するケースの対策として、SS4 から SS5 の位置に超電導ケーブルを導入するケースと、SS5 の位置に電力貯蔵装置を設置するケースの 2 つについて検討した。電力貯蔵装置は、最大出力電流と貯蔵容量をパラメータに解析を行った。

3. 解析結果

5 つの変電所間を結ぶ超電導ケーブルを導入するケースと、電力貯蔵装置を SS5 の位置に追加したケースとで比較を行った。

変電所入力エネルギーは、約 170 MJ の貯蔵容量を持つ電力貯蔵装置を設置した時と超電導ケーブル導入時が近い。変電所最大出力は電力貯蔵装置の貯蔵容量を変えてもあまり影響はなく、351 MJ の貯蔵容量でも超電導ケーブル導入時の方が小さい (Fig. 2)。

変電所最大出力を抑えるために、電力貯蔵装置を SS5 の位置に加えてもう 1 箇所設置した場合では、電力貯蔵装置を SS1 と SS5 の位置に設置すると変電所最大出力、変電所入力エネルギー共に小さくなるが、超電導ケーブル導入時の変電所最大出力の方が小さい。

以上より、変電所入力エネルギーの点においては電力貯蔵装置の方が効果的だが、変電所最大出力低減には超電導ケーブルの方が効果的である。

次に、SS5 の変電所が設置できずに電圧降下の問題がある場合の対策としての導入形態についての解析を行った。

電力貯蔵装置の最大出力電流を小さくすると、パンタ点最低電圧は低下してしまうが、変電所入力エネルギーや変電所最大出力に与える影響は小さい。超電導ケーブル導入時のパンタ点最低電圧は 2840 A の最大出力電流の電力貯蔵装置時のパンタ点最低電圧に近いが、変電所入力エネルギーや変電所最大出力は電力貯蔵装置時よりも大きくなるため、

超電導ケーブルの導入は、設置スペースなど、他の効果も考えていく必要がある(Fig. 3)。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

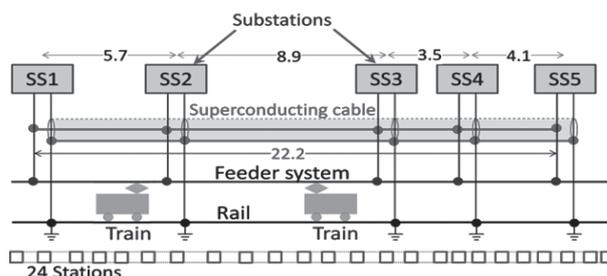


Fig. 1. Analysis model

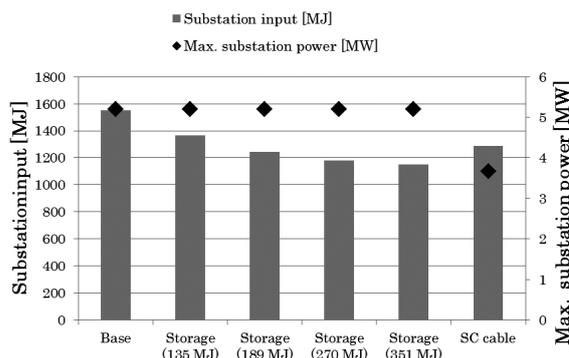


Fig. 2. Substation input energy and maximum substation power. Influence of introducing an energy storage system and superconducting cable.

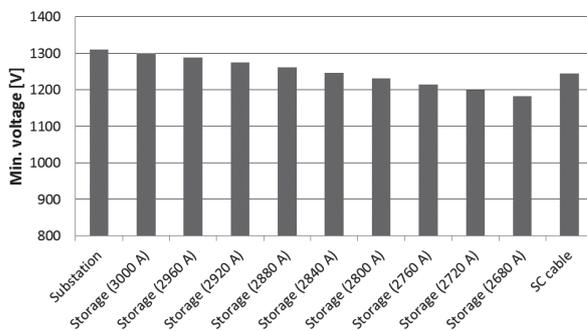


Fig. 3. Minimum feeder voltage. Influence of introducing an energy storage system and superconducting cable.

参考文献

1. N. Matsushita, et al.: "Superconducting Power Cable Application in DC Electric Railway Systems," IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3, June 2013.

YOROI 構造を応用したサイクロトロン超電導マグネットの磁場精度評価

Evaluation of magnetic field accuracy in cyclotron superconducting magnet with YOROI structure

柏崎 裕司, 辻 義明, 石山 敦士, 山川 宏(早大); 王 旭東(KEK); 植田 浩史(阪大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)
 KASHIWAZAKI Yujii, TSUJI Yoshiaki, ISHIYAMA Atsushi, YAMAKAWA Hiroshi (Waseda University); WANG Xudong (KEK);
 UEDA Hiroshi (Osaka University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、高温超電導技術を応用した医療用超電導サイクロトロンを開発を目指している。この超電導サイクロトロンは、等時性磁場発生用の円形スプリットコイル (SMC) と周方向に強弱をもつ磁場(AVF)を発生させるためのスパイラルセクターコイル(SSC)によって構成され、高精度の磁場分布を必要とする。しかし、巻線に発生する電磁力によってコイルが変形し、磁場精度を満足することが難しい。そこで、先行研究で開発した高機械強度 REBCO パンケークコイル構造(YOROI 構造)を各コイルに適用し[1-3]、YOROI 構造における磁場精度を数値解析により検証したので報告する。本研究は科研費(基盤研究 A, No.26249036)「次世代医療用サイクロトロン開発のための 5H 超伝導コイルシステムの基盤技術の確立」において実施したものである。

2. 解析モデル

SMC と SSC の概略図を図1に示す。また、超電導サイクロトロンと各コイルの設計磁場を図2に示す。3次元数値解析により超電導サイクロトロンの発生磁場を考慮した各コイルの電磁力を求め、その結果を用いて YOROI 構造を適用した各コイルの応力解析を行った。応力解析に用いた SMC と SSC の YOROI 構造の概略図を図3に示す[2, 3]。SMC の側板の厚みを 3 mm、外枠の厚みを 40 mm とし、SSC の側板の厚みを 20-50 mm まで変化させて解析を行った。巻線部は複合則により Hastelloy、銅層と絶縁層(それぞれ厚み 100 μm)の一体モデルとした。SMC の補強材料は GFRP とし、SSC は GFRP に加えて、実運転時の中性子照射も想定し、放射特性に優れ、強度もある SUS304 についても評価した。YOROI 構造の補強材隣接面は接着条件、補強材と巻線は接触条件とした。

3. 解析結果

YOROI 構造を適用した SMC と SSC の設計磁場に対する誤差を図4に示し、最大誤差とビーム引き出し点($r=1.06$ mm)における誤差を表1に示す。

SMC のコイル3を除いて設計磁場に対する誤差は1%以内に収まっている。コイル3は巻線形状が扁平であるため、他の SMC よりも 1 桁程度誤差が大きくなったと考えられる。そのため、コイル3の巻線形状や補強構造の再検討が必要と考えられる。

SSC は図2に示すように中心から 0.2 m までの磁場勾配が大きいいため、わずかな変位でも磁場精度に大きく影響を与えていることが考えられる。そこで、SSC の YOROI 構造の側板を厚くし、補強材料を GFRP から SUS304 に変更した場合について解析を行った。その最大変位と設計磁場に対する誤差を図5に示す。図5の(a)より、側板の厚みを 20 から 50 mm まで増すと、コイルの変位は GFRP 補強で 1.7 から 1.2 mm まで小さくなるものの、SUS304 では 0.7 mm と、GFRP よりも 40%ほど変位が少ないことがわかる。その結果、設計磁場に対する誤差は GFRP の約 0.7%から SUS304 で約 0.4%まで減らすことができ、SUS304 は磁場精度向上に有用であることがわかった。

今後は、SUS304 を用いた YOROI 構造の補強効果の詳細検討と、補強構造も含めた磁場精度確保のためのコイル設計を行っていく予定である。

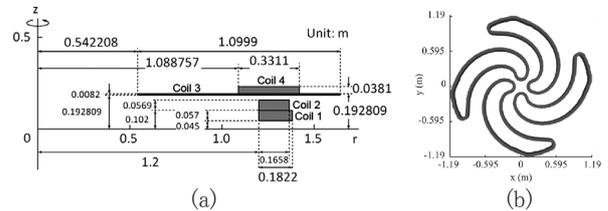


Fig. 1 Schematic drawing of (a) the cross-sectional view of the split main coils and (b) the top view of spiral sector coils

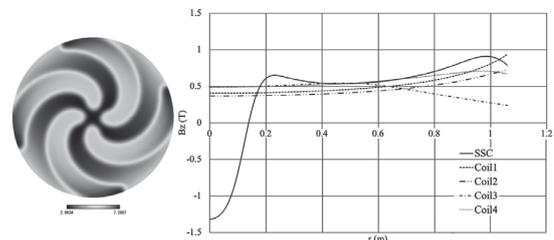


Fig. 2 Ideal magnetic field

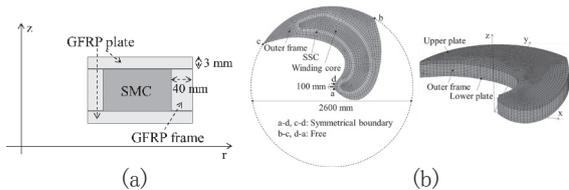


Fig. 3 YOROI structures of the (a) SMC and (b) SSC

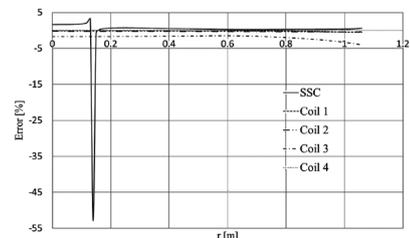


Fig. 4 Result of error rate of the magnetic field

Table 1 Error rate of the magnetic field

Field error [%]	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	SSC
Maximum	-0.59	-0.46	-4.06	-0.19	-52.94
$r=1.06$ m	-0.59	-0.42	-4.06	0.47	0.61

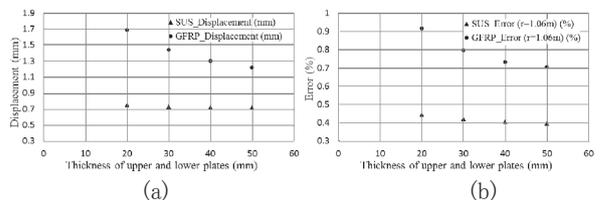


Fig. 5 Parameter analysis of (a) maximum displacement and (b) error rate of the magnetic field

参考文献

1. S. Nagaya, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, (2013), 4601204
2. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, (2014), 4601605
3. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, (2015), 4601904

FFAG 加速器応用に向けた 高温超伝導モデルマグネットの磁場精度に関する予備的検討

Preliminary study on the field quality of high T_c superconductor model magnet for an FFAG accelerator

坂 洋輔, 曾我部 友輔, 中村 武恒, 雨宮 尚之, 森 義治(京大); 高山 茂貴, 小柳 圭, 石井 祐介(東芝); 荻津 透(KEK); 吉本 政弘(原子力機構); 岩田 佳之, 野田 耕司(放医研)

SAKA Yosuke, SOGABE Yusuke, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki, MORI Yoshiharu (Kyoto Univ.); TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, ISHII Yusuke (Toshiba); OGITSU Toru(KEK); YOSHIMOTO Masahiro(JAEA); IWATA Yoshiyuki, NODA Koji(NIRS)
E-mail: y-saka@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

加速器用高温超伝導マグネットの実現に向けた 3 次元巻線技術と高精度磁場発生技術の開発を進めているが、これらを検証するためのモデルマグネットを試作している。モデルマグネットの発生磁場精度を実験的に評価するにあたり、磁場精度を損なう因子のうち、コイルの据付精度と超伝導線材の磁化に着目し、これらの影響を理論的に検討した。

2. 磁場精度の評価指標

次の指標を用いて磁場精度の評価を行った。

$$b_n = \frac{B_n - B_{n,\text{design}}}{B_{1,\text{design}}} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

ここで、 $B_{n,\text{design}}$ は設計磁場の $2n$ 極成分、 B_n は磁場精度を損なう因子の影響を考慮した磁場解析により得た磁場の $2n$ 極成分である。それぞれの磁場分布から積分磁場を求め、積分磁場の x 方向分布を多項式近似することで磁場の多極成分を求めた。2 極マグネットにおいては、(高次多極成分実測値)/(2 極磁場成分設計値)が磁場精度の評価指標として用いられ、シンクロトロンマグネットの場合、 10^{-4} がひとつの目安と考えられている。モデルマグネットにおいて式(1)の値で 10^{-4} を達成できれば、同じ技術を用いて2 極マグネットを製作すれば、(高次多極成分実測値)/(2 極磁場成分設計値)を指標として 10^{-4} を達成できると考えられる。

3. 解析結果

モデルマグネットを構成するコイルの外観を Fig. 1 に示す。コイルの片極全体が設計位置からずれた場合の発生磁場を計算し設計磁場と比較することで、据付精度が磁場精度に及ぼす影響を評価した。片極のコイルが x 方向に $+0.1$ mm ずれた場合の式(1)の値を Fig. 2 に示す。

高温超伝導線材を用いたマグネットにおいては線材磁化によって磁場精度が損なわれる。そこで、モデルマグネットにおける線材磁化の影響を評価するために、線材磁化を考慮した電磁場解析を行った[1]。100 秒間で 0 A から 250 A まで電流をランプアップし、その後 1000 秒間は電流を 250 A に保った。電磁場解析により得られた線材内電流分布からモデルマグネットが発生する磁場を計算した。ランプアップ終了から 1000 秒後の線材磁化の磁場精度への影響(式(1)の値)を Fig. 3 に示す。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって行われた。

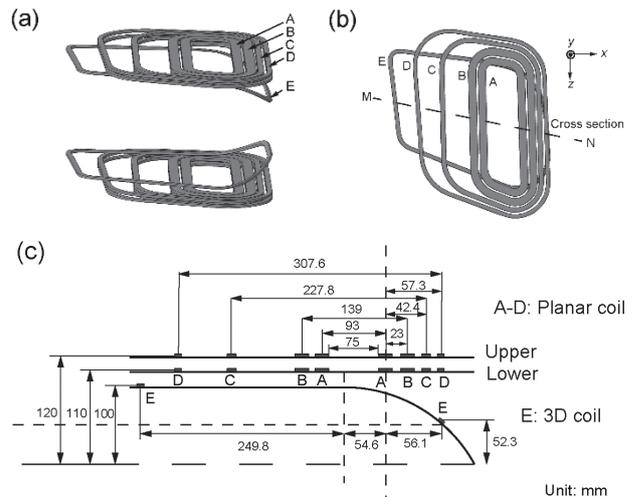


Fig. 1 Coils composing a model magnet: (a) Bird's-eye view (b) Top view (c) Cross section along M-N in (b)

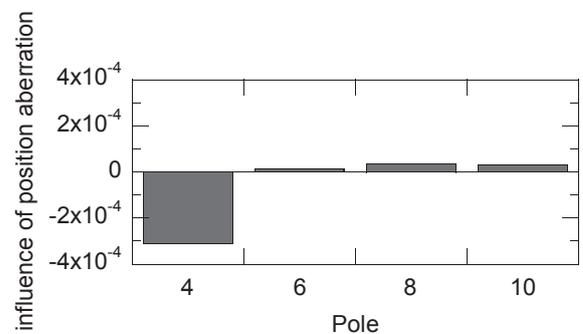


Fig. 2 Multipole coefficient when the coil positions move in the x -directions by $+0.1$ mm

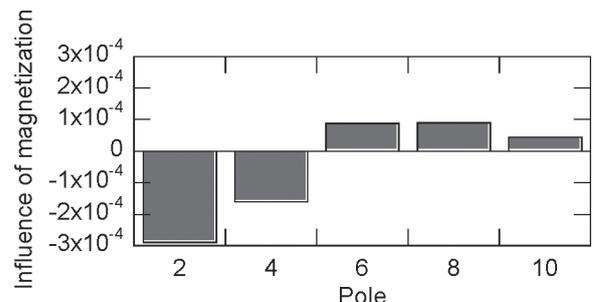


Fig. 3 Multipole coefficient considering the screening current

参考文献

1. Y. Sogabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3 (2015) 490025

CIC 導体内の循環電流が素線変形に及ぼす影響の検討

Study on influence of Circulating Current between Strands on Local Strand Deformation in Cable-in-Conduit Conductor

宮城 大輔, 渡部 一晃, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大); 谷貝 剛(上智大);
梶谷 秀樹, 布谷 嘉彦, 小泉 徳潔 (JAEA); 尾花 哲浩, 高畑 一也 (NIFS)

MIYAGI Daisuke, WATANABE Kazuaki, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.);
YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); KAJITANI Hideki, NUNOYA Yoshihiko, KOIZUMI Norikio (JAEA);
OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya (NIFS)
E-mail: dmiyagi@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体の性能低下の原因の一つとして、導体を構成する素線の一部に局所的な応力が働くことによるキック変形が考えられている。しかし、キック変形の発生機構は明確にされていない。そこで、本研究では、応力の発生源として電磁力に着目し、励磁時に印加される外部磁界によって素線間ループに誘起される循環電流に働く電磁力と素線変形の関連性について検討を行った。

2. 循環電流に起因する导体表面における素線の変位量

検討した CIC 導体の諸元を Table 1 に示す。Fig.1 に示す様に、CIC 導体に通電し、導体中の 2 素線で形成される素線間ループに変動磁場が印加されると、この素線間ループには循環電流が誘起される。特に循環電流が大きい場合は、輸送電流と循環電流の和が、ループを構成する 2 素線で逆向きとなり、その結果として、両素線に逆方向電磁力が作用する。特にこの様な逆方向電磁力が导体表面の素線で発生した場合にキック変形の要因となり得るかを検討するために、撚り乱れを考慮した CIC 導体の素線軌跡を用いて、1 方向磁場を 0.0347T/s の速さで印加した際の 11.8T の瞬間の导体内の電流分布を評価した[1]。Fig.2 に逆方向最大電磁力が働く素線での导体表面梁の位置に対する逆方向循環電流の絶対値の分布を示す(导体表面梁以外の箇所はゼロ)。局所的な逆方向の電磁力による素線の変位量は梁長に大きく依存するため、磁界と导体表面梁区間の循環電流値と梁長の積を変位評価指数と定義し、各素線内で評価指数が最大となる梁をピックアップし、それを全素線間で比較を行い、評価指数が最も大きな 5 素線の変位量、最大応力値および最大歪を Table 2 に示す。素線に局所的に印加される最大応力値に着目すると、0.2%耐力である 160MPa を大幅に超える素線が複数存在しており、循環電流による局所的な応力により劣化する可能性が示唆された。

3. 性能劣化の低減に関する検討

素線の変位を低減するための手法として、局所的な電磁力を低減するために循環電流の局所的な不均一性を低減する手法が考えられる。これに関しては、文献[2]により、各サブケーブルの撚りピッチを最終撚りピッチ長の因数となるように選定することで循環電流の局所的な不均一性を抑制でき、循環電流も大幅に軽減されることが示されており、撚りピッチを適切に選定することは性能劣化の低減に対して有効である。

また、0.2%耐力は材料が素線変形しにくいことを示す指標であり、変位抑制や残留歪の軽減には、0.2%耐力が向上されることは有効である。そこで、0.2%耐力が 300MPa としたときの素線番号 169 および 147 の変位量の計算を行った。その結果、素線番号 169 では、変位が 0.52mm となり梁内の一部箇所が耐力を下回り弾性変形領域内に留まった。素線番号 147 では、変位が 0.16mm で梁内の全領域において弾性変形領域内となり、0.2%耐力の改善も性能劣化の低減に有効であることを定量的に示した。

Table 1 Specifications of a CIC conductor.

Material of strand	Nb ₃ Sn
Strand diameter [mm]	0.823
Length of cable [mm]	4500
Cabling layout	3×3×5×5×6
Twist pitch [mm]	(45 90 135 225 450)
Operational current [kA]	68
Maximum magnetic flux density [T]	11.8
Young's modulus of strand [GPa]	130
0.2% proof strength of strand [MPa]	160
Tangent modulus of strand [GPa]	29.92

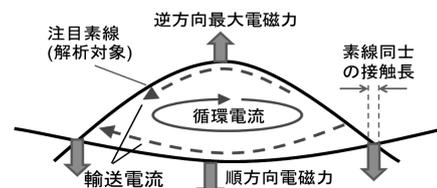


Fig.1 Schematic view of circulating current and electromagnetic force in a loop between strands.

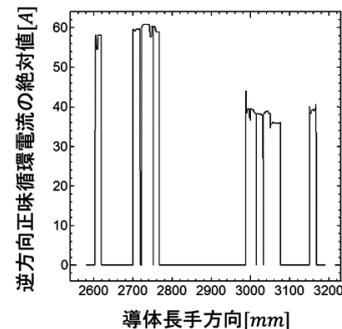


Fig.2 Reverse current distribution against the exciting current in a strand on the cable surface.

Table 2 Numerical results of local strand deformation.

素線番号	梁長 [mm]	逆循環電流 [A]	変位量 [mm]	最大応力値 [MPa]	最大歪 [%]
169	43	-42.8	1.67	450	1.37
147	43	-37	0.78	250	0.84
142	39	-17.2	0.75	180	0.6
97	33.5	-26	0.51	180	0.6
113	39	-9.34	0.15	50	0.038

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 24360103 の助成を受けたものです。

参考文献

1. K. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.215.
2. D. Miyagi, et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 25 (2015) 4801905.

分割型高温超伝導マグネットの接合性能予測手法と接合部製作法の改善 Improvements of a method to predict joint performance and joint fabrication for a remountable high-temperature superconducting magnet

伊藤 悟, 清野 祐太郎, 西尾 樹, 陳 偉熙, 遊佐 訓孝, 橋爪 秀利, 小黒 英俊 (東北大)
ITO Satoshi, SEINO Yutaro, NISHIO Tatsuki, CHEN Weixi,
YUSA Noritaka, HASHIZUME Hidetoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合原型炉や商用炉で想定される大型超伝導マグネットの設計案として機械的接合を用いた分割型高温超伝導マグネットを提案している[1,2]。本講演では、接合面にインジウム箔を挿入した GdBCO 線材 (フジクラ社製 FYSC-SC05) の機械的ラップジョイントを用いて実施した 1) 接合抵抗予測に必要なとなる接触抵抗の温度・磁場依存性のモデル化, 2) 安定して低接合抵抗を得るために試みた接合部製作時の温度制御, 3) 冷却・通電前の接合性能保証のために必要となる非破壊検査法の検討, の 3 点について報告する。

2. 接触抵抗の温度・磁場依存性のモデル化

まず機械的ラップジョイント (接合長 5 mm) の接合抵抗 (機械的接触面の接触抵抗と安定化層などによる導電層抵抗の和) の温度・磁場依存性を実験的に評価し, 続いて有限要素法による電流分布解析を用いて接合抵抗から導電層抵抗を引いて接触抵抗の温度・依存性を評価した。Holm の接触理論[3]によると接触抵抗は集中抵抗と皮膜抵抗からなる。電流分布解析で評価した接触抵抗のうち磁場 0 T (温度 10 K ~ 70 K) のデータと温度 10 K (磁場 0 ~ 15 T) のデータ, 集中抵抗の実験式の 1 つである Enjo の式[4], および銅の皮膜抵抗の実験式[5]から接触抵抗のモデル R_{model} を検討した。電流分布解析によって評価した接触抵抗の温度・磁場依存性および接合抵抗のモデル R_{model} による接合抵抗の温度・磁場依存性の予測結果を Fig. 1 に示す。2 種類の結果の誤差は最大で 10% 程度であり, 検討した接触抵抗のモデルが大型導体の接合抵抗の予測に用いることができることが示された。

3. 接合部製作時の温度制御

接合面に挿入しているインジウムの融点は 156.6 °C であり, 接合部製作時に加熱処理することにより, インジウムの軟化効果による真実接触面積増大, すなわち接合抵抗低減が期待できる。そこで, 室温で製作した機械的ラップジョイントサンプルの接合抵抗 (液体窒素冷却時) の加熱処理前後での変化を評価した。Fig. 2 に加熱処理温度と加熱処理前後の接合抵抗の比を示す。凡例の番号は接合前に GdBCO テープの銅面 (接合面) を研磨した際の研磨紙の番号を示している。加熱前の接合抵抗は全てのサンプルにおいて 200 ~ 240 nΩ であった。全サンプルにおいて加熱処理後に接合抵抗減少がみられ, 加熱処理温度 90 °C 付近で接合抵抗の減少量が最大となった。試験後のサンプルの X 線 CT 撮影画像では, 加熱処理温度 120 °C 以上のもので, インジウムに空隙が発生していることが確認されており, これは融点近くになるにつれて抵抗が増加することを支持している。

4. 非破壊検査法の検討

多数の接合部を有する分割型高温超伝導マグネットの場合, 接合部製作時, すなわち冷却前に接合性能を評価しておく必要がある。そこでまず, 電磁非破壊検査手法を用いた接合性能予測の可能性を議論するために, 常温時に得られるインピーダンスと冷却後に得られる接合抵抗の関係性を評価した。Fig. 3 に液体窒素冷却時に測定した接合抵抗と常温時に測定したインピーダンス (周波数 269 Hz) の関係を示す。冷却時の接合抵抗の上昇とともに常温時のインピーダンスも

上昇傾向にあった。今後はインピーダンスの差異が発生する原理究明, および X 線 CT や超音波検査の適用の検討もを行い, 接合性能の予測手法の高度化を図る予定である。

参考文献

1. H. Hashizume et al.: Journal of Plasma Fusion Research SERIES, Vol. 5 (2002) pp.532-536
2. H. Hashizume and S. Ito: Fusion Engineering and Design, Vol. 89 (2014) pp.2241-2245
3. R. Holm: "Electric Contacts Theory and Application," Springer-Verlag, Press (1967)
4. T. Enjo, et al.: Transactions of JWRI, Vol. 16 (1987) pp.64-74
5. Slade, P. G.: "Electrical Contacts: Principles and Applications", CRC Press (1999)

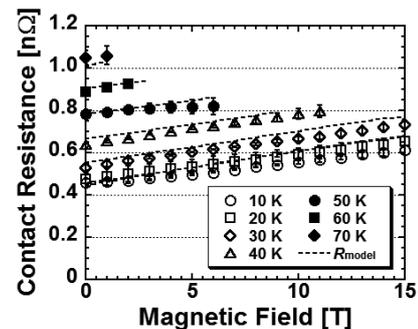


Fig.1 Contact resistance as functions of temperature and magnetic field.

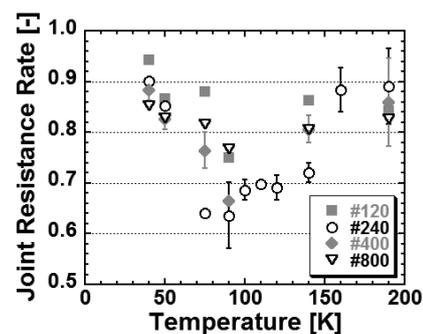


Fig.2 Joint resistance rate before and after heat treatment as a function of heating temperature.

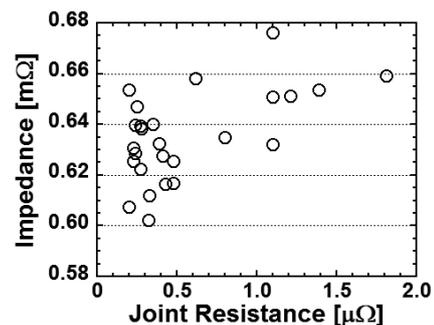


Fig.3 Impedance of the joint with a frequency of 269 Hz at room temperature as a function of joint resistance at 77 K.

MgB₂ マグネットクエンチ解析の実験的検証A test of quench analysis for a design of protection circuit in MgB₂ magnet

鈴木 雄太, 斉藤 一功, 川嶋 慎也(神戸製鋼);高溝 千広(豊橋技科大)

SUZUKI Yuta, SAITO Kazuyoshi, KAWASHIMA Shinya(Kobe Steel, Ltd);

TAKAMIZO Chihiro (Toyohashi University of Technology)

E-mail: suzuki.yuta@kobelco.com

1. はじめに

MgB₂ は従来の金属系超電導体と比較して T_c が高い[1]ことから、MgB₂ 線材を用いたマグネットは5-20K程度の冷凍機冷却による運転が可能であり、液体 He を使用しない機器への応用が期待されている。超電導マグネットにはクエンチ保護が必要になるが、MgB₂ は従来の金属系超電導体より T_c が高いため、保護回路設計に使用するクエンチ解析方法の妥当性を確認する必要がある[2,3,4,5]。このため我々は従来の金属系超電導マグネット用に開発したクエンチ解析を MgB₂ マグネットへ適用すると同時に、小型コイルを作製し、コイル I_q 到達時のクエンチ電圧を測定、クエンチ解析結果との比較を行った。

2. 実験方法

HyperTech 社製 MgB₂ 線材 (φ 0.83mm) を使用し、小型コイルを作製した (Table.1)。液体 He 中で小型コイル励磁を行いクエンチ時 (自己磁場) の電流、電圧のデータを取得した。次にこの小型マグネットに対してクエンチ解析を実施し、実験結果と解析の結果を比較した。

Table.1 Test coil Specification

	Coil A
Inner diameter[mm]	80
Outer diameter[mm]	103.60
Length[mm]	91.8
Total number of turns	1302
Number of layers	14
I _c [A]	278.3

3. 実験結果

Table.2 は小型コイルの I_q と I_c との比較である。実験では I_c の 70%程度でクエンチを観測した。このため線材中の MgB₂ 生成量が低く、線材断面中、超電導フィラメントの断面積が想定より小さいと仮定してクエンチ解析を行った。Fig.1 はクエンチ時のコイル両端電圧の実験値と解析値の比較である、解析では線材長手方向クエンチ伝播速度 v_l と径方向クエンチ伝播速度 v_t の比 v_t/v_l をパラメータとした。同形状 NbTi 線材コイルを想定した場合のクエンチ解析結果も合わせて載せた。これらを比較すると MgB₂ マグネットの電圧発生は緩やかである事がわかる。また、いずれの v_t/v_l の解析結果においても実験値と乖離があった[6]。

Table.2 Comparison of I_q and I_c in the test coil experiments

	I _q (average of 4 times experiments)	sigma	I _q /I _c
Coil A	193.38	0.72	0.69

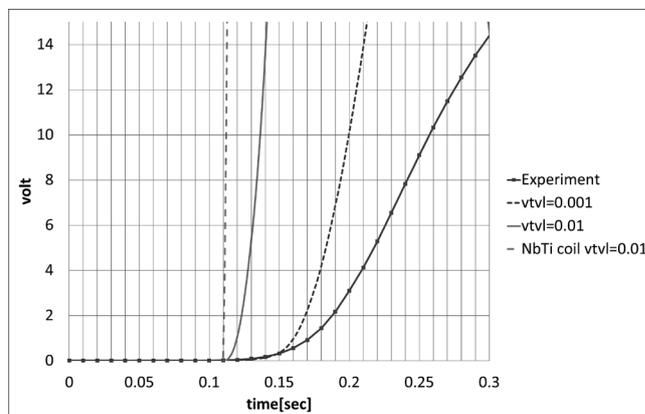


Fig.1 Comparison of the voltage between experimental and quench analysis

4. まとめと考察

MgB₂ 小型コイルを作製し、I_q を確認した。コイル I_c の 70%程度でクエンチを起こした。線材中の MgB₂ 生成率が少ないと仮定し、v_t/v_l をパラメータとしてクエンチ解析を行い、実験結果と比較したが、両者に乖離が見られた。この原因として伝播速度 v_l, v_t の見積もり手法に考慮しきれていない点があると考えられ[7]、長手方向伝播速度の詳細検証、径方向伝播速度の詳細検証が必要であり今後の課題とする。

参考文献

1. J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," Nature, vol. 410, no. 6824, pp. 63-64, Mar. 2001.
2. C.H. Joshi and Y.Iwasa, "Prediction of current decay and terminal voltages in adiabatic superconducting magnets," Cryogenics 29, 157 (1989).
3. MuElla, K.-H. et al. "The upper critical field in superconducting MgB₂", Preprint cond-mat/0102517 at hxxx.lanl.gov (2001).
4. Kremer R K, Gibson B J and Ahn K 2001 Preprint, "Heat capacity of MgB₂: evidence for moderately strong coupling behavior", cond-mat/0102432.
5. Bud'ko, S. L. et al. Magnetoresistivity and complete H_{c2}(T) in MgB₂. Phys. Rev. B 63, 220503(R) (2001).
6. Antti Stenvall, Risto Mikkonen, Pavol Kovac, "Relation between transverse and longitudinal normal zone propagation velocities in impregnated MgB₂ windings", IEEE Transactions on Applied Superconductivity 19, No. 3, Part 2, 2403 - 2406(2009)
7. H. vanWeeren, N. C. van den Eijnden, W. A. J. Wessel, P. Lezza, S. I. Schlachter, W. Goldacker, M. Dhallé, A. den Ouden, B. ten Haken, and H. H. J. ten Kate, "Adiabatic normal zone development in MgB₂ superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, p. 1667, 2005.

伝導冷却型高温超電導コイルの保護検討のためのコイル温度解析ツールの開発

Development of a Tool to Analyze Coil Temperature for Consideration to Protect Conduction-Cooled High-Temperature Superconducting Coils

中川 竜司, 堀 知新, 今村 幸信, 田中 秀樹(日立研開)

NAKAGAWA Ryoji, HORI Chishin, IMAMURA Yukinobu, TANAKA Hideki (Hitachi)

E-mail: ryoji.nakagawa.hn@hitachi.com

1. はじめに

一般に高温超電導線材は常伝導伝搬速度が遅い事から、常伝導転移個所近傍で局所的に温度上昇して劣化し易い。この為、電源から給電中の高温超電導コイルを保護する方法として、常伝導転移時に電源遮断して、保護抵抗で磁気エネルギーを消費する方法が報告されている[1-2]。文献[1]では保護抵抗値 R や電源遮断条件(常伝導転移の検出電圧 V_d)を決定する為に、コイルの常伝導転移試験を実施し、劣化が生じる R 、 V_d の値を探索している。また文献[2]では3次元熱伝導解析による保護設計が報告されている。しかしながら、常伝導伝搬速度は線材の特性や負荷条件といった多数のパラメータによって変化する為、コイル線材仕様を検討する段階では、実測データを用いるのは困難である。また解析により保護設計を実施する場合は、多数のパラメータを検討するには解析時間の短縮が課題となる。一方文献[3]では、特に線材表面が断熱条件に近い場合、常伝導伝搬速度は1次元解析でよく模擬できる事が報告されている。そこで本研究では、伝導冷却型コイルでは線材周囲への除熱が比較的小さい事から、線材表面を断熱とした1次元モデルで模擬し、さらに電源遮断による保護動作をシミュレートする機能を有するツールを開発した。本ツールを用いて多数のパラメータの解析結果から適切な R と V_d を探索する保護設計手法を考案した。本手法をMgB₂コイルに適用し、常伝導転移を伴う電源遮断試験をして、線材劣化の有無を調べた。

2. 解析方法と保護設計

本設計手法で実施する解析の概略をFig.1に示す。開発したツールでは、臨界温度 T_c と初期常伝導領域長 l を入力パラメータとし、多様な負荷条件と常伝導伝搬挙動を熱・回路連成解析によりシミュレートする。解析スタート時点($t = 0$)でコイルには一定電流 I が供給され、また長さ l の初期常伝導領域があり、電気抵抗を有すると仮定する。線材の温度は以下の1次元熱伝導方程式を離散化し、時間変化を差分で計算する。

$$AC \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(Ak \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \alpha I^2 \frac{\rho}{A}$$

A : 線材断面積[m²], C : 比熱[J/m³K], T : 温度[K],
 t : 時間[s], x : 初期常伝導領域中心からの距離[m],
 k : 熱伝導率[W/mK], I : 電流[A], ρ : 抵抗率[Ωm]

$$\alpha = \begin{cases} 0 & (T \leq T_c \text{ かつ } |x| > l/2 \text{ の時}) \\ 1 & (T > T_c \text{ または } |x| < l/2 \text{ の時}) \end{cases}$$

コイル電圧 $I r_{\text{all}}$ (r_{all} :コイル全体の抵抗値)が一定時間 t_d の間、検出電圧 V_d を上回った場合、Fig.1のスイッチSが開となり、電源遮断が完了する。その後電流は次式に従い減衰する。

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{(R + r_{\text{all}})}{L} I$$

R : 保護抵抗値[Ω], L : コイルのインダクタンス[H]

運転温度25K、電流値300Aの、MgB₂線材(撚り線、太さ ϕ 1.8mm)を巻線した内径 ϕ 100mmコイル(Fig.2、 $L=8.4$ mH)での計算結果の一例をFig.3に示す。保護抵抗値 R を0.2Ω、遮断所要時間 t_d を50msとし、検出電圧 V_d 、初期常伝導領域長 l 、臨界温度 T_c を変化させ、コイル最高温度の範囲を取得した。 V_d 固定時、 l 、 T_c を変化させて得られるコイル最高温度が許容温度を下回った場合に、保護が成立すると判定した。

3. 結果

解析の結果得られた V_d ごとのコイル最高温度をFig. 4に示す。誤差棒は、 l 、 T_c を変化させて得たコイル最高温度の幅を示す。コイル電圧が300mV以下の時に遮断すれば、許容熱応力から決定したコイル許容温度である175K以下となる結果を得た。これを基に V_d を300mV以下に設定し、3度の常伝導転移と電源遮断を伴う通電試験を実施した。その結果、コイルの臨界電流値は変化しなかったことから、開発したツールを用いた保護設計手法が有効である見込みを得た。今後常伝導転移個所の温度を実測し、解析結果と比較する事で、本ツールの解析精度を検証する。

参考文献

1. T. Yamaguchi, et. al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.168
2. M. Ristic, et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 21 (2011) p.3501
3. K. Funaki, et. al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 43 (2008) p.423

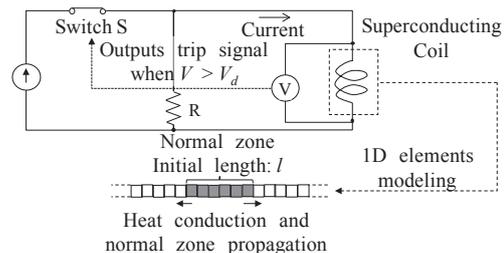


Fig. 1. Circuit model.

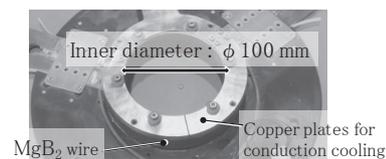


Fig. 2. MgB₂ coil sample.

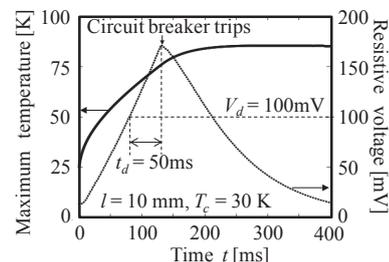


Fig. 3. An example of analysis results.

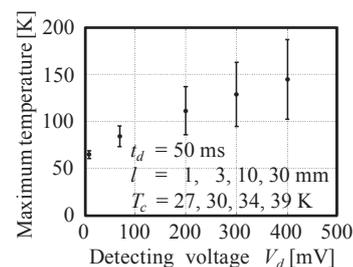


Fig. 4. Coil temperature derived from analysis results.

高温超伝導コイルの磁化緩和の測定

The Measurement of Magnetization Relaxation in HTS Coils

渡邊 真也, 白木 拓弥, 川越 明史 (鹿児島大学); 岩熊 成卓 (九州大学)

WATANABE Shinya, SHIRAKI Takumi, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University);

IWAKUMA Masataka (Kyusyu University)

E-mail: k5197997@kadai.jp

1. はじめに

MRI や重粒子線加速器を高温超伝導化しようとする研究開発が進められている。これらの機器を実用化するには、コイル線材内の遮蔽電流に起因する磁場の乱れやその時間的な変動を、種々の条件下で定量的に把握することが必要である。そのためには、高温超伝導コイルの電磁特性を、コイル径方向に広がるスプレッド磁場中で評価することが重要である。

そのために我々は、試料コイル周辺に複数の電界・磁界測定用のピックアップコイル対を配置し、ポインティングベクトルを測定する方法の応用を検討している。今回は、本測定法により Bi-2223 多心テープ線材で巻線したコイルの磁化緩和特性を液体窒素中で測定したので、その結果について報告する。

2. 測定原理

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて局所的な電界と磁界を測定し、その外積からポインティングベクトルを求める。試料コイルの磁化の緩和を測定するために、本測定法では、試料コイルの周辺に設置したピックアップコイルを用いて、見かけの磁化曲線を求める。この見かけの磁化曲線の面積は、測定点の電磁エネルギーの流れを表す。

測定素子は、Fig. 1(b)に示すように配置する。内側と外側に設置した測定素子対では、周方向電界と軸方向磁界を測定し、試料コイル径方向成分のポインティングベクトルを得る。上下に配置した測定素子対では、周方向電界と径方向磁界を測定し、試料コイル軸方向成分のポインティングベクトルを測定する。ポインティングベクトル法では、通常、電界を測定するために試料に電圧タップを半田付けするが、今回は、外部磁界のみを印加としたので、半田付けを行わず、1ターンのピックアップコイルとした。

磁化の緩和を測定するためには、次のような方法を用いる。交流磁界を印加した時の測定結果と交流磁界のピークで一定時間磁界をホールドした場合の測定結果を比較することによって緩和を評価する。磁界をホールドしている間に磁化が緩和するので、ホールド時間を変化させることによって、緩和が時間とともにどのように変化したかを評価することができる。

3. 実験

電界と磁界を測定する測定素子対は、試料コイル内側に 11 対、外側に 11 対ずつ配置し、試料コイル上下面には、それぞれ 5 対ずつ配置した。実験に用いた試料コイルは、軸長 84 mm、外径 66.6 mm の 2 層 17 ターン (全 34 ターン) のソレノイドコイルである。巻線に用いた線材は、幅 4.5 mm、厚み 0.4 mm の Bi-2223 多芯線テープ線材で、液体窒素中、磁化磁界中の臨界電流は 169 A である。測定素子対を配置した試料コイルを、ボア径 340 mm の外部磁界印加用銅マグネット内に配置した。スプレッド磁界を印加するために、測定装置はマグネット中心の均一磁場空間に配置せず、マグネット中心から 200mm 上の場所に試料コイル中心を配置することにした。このとき、試料コイルに印加される外部磁界は、試料コイル軸方向に対して約 5 度に広がっている。

試料コイルは液体窒素中で浸漬冷却し、基本周波数 3.3 Hz で測定した結果を Fig. 2 に示す。今回は、試料コイル外側の最も印加磁界の強い場所の測定結果のみ載せている。横

軸は 3.3Hz の基本波形のピーク時に設けたホールド時間で対数表示にしている。縦軸は見かけの磁化の変化分である。プロットは測定値、実線はフィッティングカーブとなっている。

測定値はほぼ直線に乗って増加している。今回は変化分をプロットしているので、時間の経過とともに測定値が増加している。一般に超伝導体の磁化は、十分に時間が経過した後、経過時間の対数に比例して減衰することが知られている。今回の測定結果もほぼ時間の対数に比例して変化していることから、超伝導体の磁化緩和の特徴が観測できていると考えられる。以上のことから、本測定方法により、磁化緩和の評価が可能なが示された。

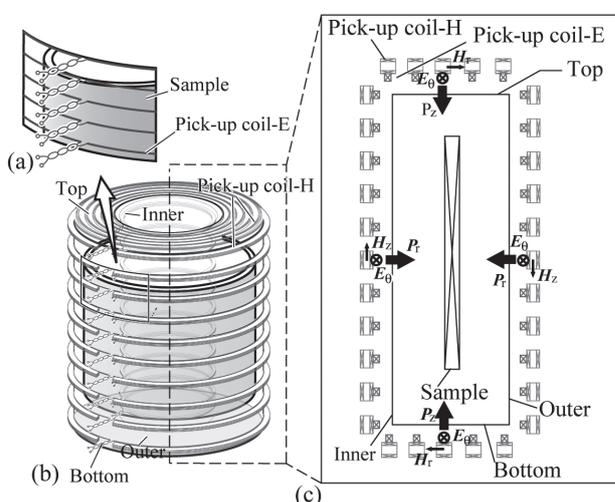


Fig. 1 Principle of the measuring method, (a) zoom up of potential leads, (b) measuring system, (c) array of pick up coils and potential leads.

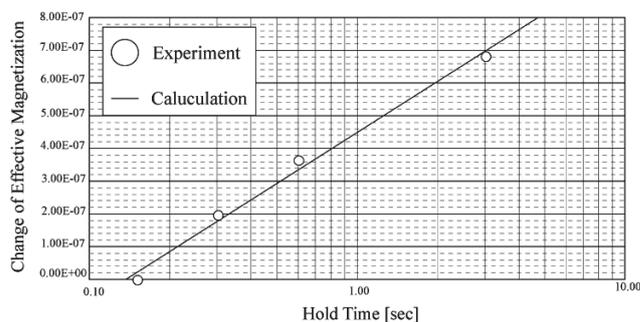


Fig. 2 Experimental results.

参考文献

1. T. Shiraki, et al. : Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014)p.174

銅トロイダルコイルを用いた HTS テープ巻線の遮蔽電流磁界の消磁

Degaussing of Screening-Current-Induced Fields in HTS Tapes Windings Using Copper Toroidal Coil

岡部 祐麻, 柁川 一弘 (九大)

OKABE Yuma, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.)

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

1. はじめに

現在、MRI や NMR 用マグネットには高い磁界均一度を必要とするため、低温超電導多芯線が用いられている。また、高温超電導 (HTS) 線も開発されているが、テープ形状であるため遮蔽電流による磁化が大きく、これを巻線したコイルでは中心磁界が不均一となる。そこで、異常横磁界効果を利用して HTS テープ線の磁化を消磁する方法が提案されており、HTS ソレノイドコイルと銅コイルを同軸に配置し、HTS コイルの軸方向に微小交流磁界を印加して、HTS テープの遮蔽電流及び磁化を消磁できることは実験的に確かめられている[1], [2]。しかし、HTS コイルに対し、トロイダル状に銅コイルを巻き、微小交流磁界を HTS コイルの周方向に印加して遮蔽電流を消磁する方法は、提案されているものの、実験的な確認、検証はまだ行われていない。そこで本研究では、後者の励磁用 HTS コイル及び消磁用銅コイルを実際に製作し、トロイダル配置についても HTS コイルの遮蔽電流及び磁化を消磁できるかどうか実験的に検証した。

2. HTS 励磁コイル及び銅消磁コイルの設計・製作

Table 1 に示すような HTS 励磁コイルを設計・製作した。HTS コイル製作に使用したテープ線は、幅 5.02 mm、厚さ 0.159 mm であり、臨界電流 I_c は 77 K、自己磁界下で 257 A である。この HTS 線をダブルパンケーキ状に巻き、4 個積層した。このとき、ダブルパンケーキ間に繋ぎ目のないジョイントレスダブルパンケーキコイルの巻線方法[3]を採用した。HTS 励磁コイルの内径は 66.0 mm、外径が 70.7 mm、コイル長が 42.0 mm、総巻数は 84 である。一方、Table 2 に示すような銅消磁コイルを設計・製作した。銅線の線径は 1 mm、製作した銅トロイダルコイルの層数は 4、総巻数は 343 である。ここで、HTS 線の遮蔽電流を完全に消磁するためには、HTS 線の中心到達磁界以上の外部磁界を銅コイルにより印加する必要がある。Bean モデル[4]を仮定して、HTS 線の中心到達磁界を求めると、32.1 mT となる。銅コイルに 30 A を通電すると、発生する磁界は HTS コイルの平均径 (68.4 mm) 部分で 60.2 mT であることから、製作した銅コイルは HTS 線の中心到達磁界のおよそ 1.8 倍の外部磁界を印加できる。

3. 実験結果

製作した HTS 励磁コイルと銅消磁コイルを液体窒素中に浸漬冷却し、HTS コイルの作る軸方向の中心磁界をホールセンサにより測定した。まず、HTS コイルを 100 A 通電し、そのときの中心磁界を基準として、銅コイルに交流電流を通電することにより外部交流磁界を印加したときの中心磁界の変化量を、Fig. 1 に示す。ただし、銅コイルに流す一定の交流電流の振幅をパラメータとした。Fig. 1 より、HTS コイルに交流磁界を印加すると、中心磁界がわずかに増加することがわかる。また、銅コイルに流す電流の振幅が 16.3 A 以上のときには、中心磁

界は最終的にある値で飽和する。

参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 125005
2. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 22 (2012) 4400404
3. J. Kang, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 25 (2015) 5700705
4. C.P. Bean: Phys. Rev. Lett. 8 (1962) 250

Table 1 Specifications of HTS coil

Tape width	5.02 mm
Tape thickness	0.159 mm
Tape I_c at 77 K in self-field	257 A
Inner diameter of coil	66.0 mm
Outer diameter of coil	70.7 mm
Length of coil	42.0 mm
Total number of turns	84

Table 2 Specifications of copper coil

Diameter of copper wire	1 mm
Number of layers	4
Total number of turns	343
Current amplitude	30 A
Applied magnetic field	60.2 mT

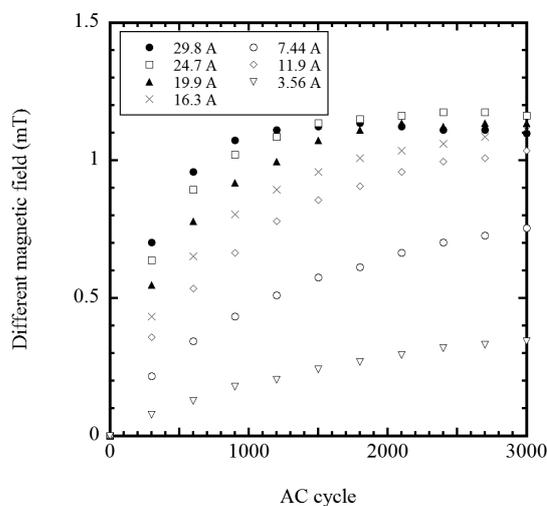


Fig. 1 Time evolution of central magnetic fields in HTS coil by applying continuous AC fields using copper coil having different current amplitudes.

高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(15 年春)
—REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の評価—
 Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2015 spring)
 —Evaluation of Irregular Magnetic Field Distribution Generated
 by Screening Current in Multiple REBCO Coils —

中園 浩平, 持田 歩, 松見 絢子, 今市 洋平, 王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大);
 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);

NAKAZONO Kohei, MOCHIDA Ayumu, MATSUMI Ayako, IMAICHI Yohei, WANG Tao,
 ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); UEDA Hiroshi (Osaka University);
 MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba);
 E-mail: n.kohei@moegi.waseda.jp

1. はじめに

我々は、日本医療研究開発機構のプロジェクトである「高磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4 T)のヒト全身用 MRI の実現を目指している[1]。本研究で応用を想定している REBCO 線材はテープ形状をしているため、テープ面に垂直な磁場により遮蔽電流が顕著に誘導されてしまう。また、MRI コイルシステムは複数の REBCO コイルから構成されるため、発生磁場が相互に影響し合いより複雑に遮蔽電流が誘導されてしまう。そのためマルチコイルでの遮蔽電流の振る舞いを調査し、明らかにすることが求められている。今回は、先行研究[2]により効果が確認されているオーバーシュート及び、様々な励磁順による遮蔽電流による不整磁場の振る舞いについて評価したので報告する。

2. 実験方法

作製したモデルコイルには Fujikura 社製の線材を用いた。線材幅は 5 mm, 厚みは 0.13 mm である。また、マルチモデルコイルは内径 100 mm, 外径 129-132 mm, 巻き数 100-109 のシングルパンケーキコイル(SP)およびダブルパンケーキコイル(DP)を Fig. 1 のように重ねて構成した。マルチコイル中心とコイル付近の 7 箇所(1)~(7)を磁場計測点としてホール素子を設置した。

今回、REBCO コイルの発生磁場を運転電流 60A に対して 1%, 3%, 5%, 8.3%オーバーシュートさせた後 1 時間 Hold した場合において測定した。また各 Coil にオーバーシュートを含めた励磁を順番を変えて測定を行った。なお、全実験においてスweepレートは 10A/min とした。

3. 解析

REBCO コイル内の遮蔽電流の解析を行うために 3 次元電磁場解析プログラムを開発した[3]。REBCO 線材の厚み方向の電流を無視する薄膜近似を用いた。また、コイルの巻線の 3 次元形状、線材間での磁氣的結合を考慮した。

4. 結果と考察

例としてオーバーシュートしていない場合、運転電流に対して 3%, 8.3%オーバーシュートした場合の結果をそれぞれ Fig. 2(a)-(c)に示す。Fig.2 よりオーバーシュートをするにより遮蔽電流による不整磁場の時間的安定性が改善されていることがわかる。また、各磁場計測点でオーバーシュートの効果の違いがみられた。さらに、解析と実験結果との妥当性の評価も行った。解析結果については当日報告する。

謝辞

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

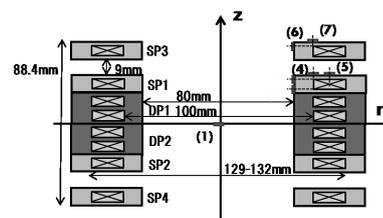


Fig.1 Schematic layout of the multiple-coil model and measurement point(1)-(7).

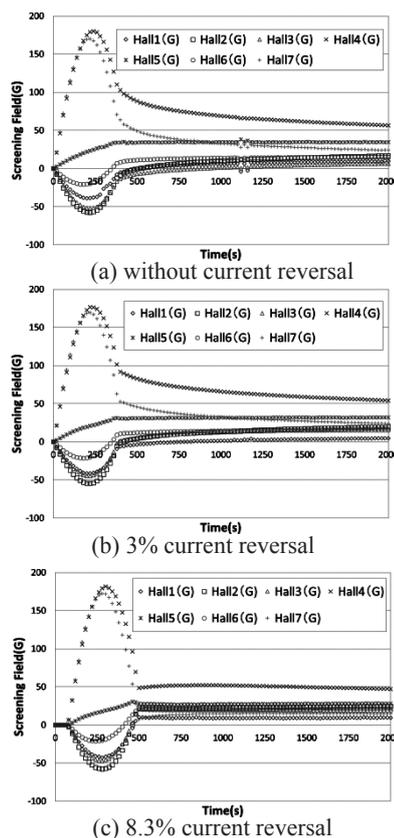


Fig. 2 Experimental results of magnetic field generated by screening currents.

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.90, (2014) 3B-p05.
2. H.Maeda, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, 4602412(2013)
3. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 4100805 (2013).

NMR への応用を目指した ESBS 法 REBCO 多芯テープ線材により作製したコイルの遮蔽電流磁場の評価

Study on the screening current induced magnetic field for a REBCO coil using a multi-cored coated conductor fabricated by the ESBS method toward NMR application

松田 徹郎(東工大); 金 新哲, 柳澤 吉紀, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研); 岡村 哲至(東工大)
 MATSUDA Tetsuro (Tokyo Tech); JIN Xinzhe, YANAGISAWA Yoshinori, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (Riken);
 OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)
 E-mail:matsudatetsuro@gmail.com

1. はじめに

NMR 装置では磁場が高いほど高感度、高分解能の NMR スペクトルが得られるので、より複雑なタンパク質の分子構造を調べることができる。この観点から、高磁場で高電流密度を流すことができる REBCO 線材を用いた超 1GHz の NMR の開発を進めている。REBCO 単芯テープ線材を用いた場合、遮蔽電流磁場の影響が大きいので、磁場均一度や磁場安定度に大きな問題が生じる。遮蔽電流磁場を減じる方法として、REBCO 線材の多芯化が有効である。

我々は、折り曲げ力を利用したフィラメント分離法 (ESBS, Electrical separating by bending stress) [1] による REBCO 多芯テープ線材の基礎開発を進めてきた。本研究では、これに基づき 5.6m の長さの線材を作り、コイル特性を調べたので報告する。

2. 実験方法

ESBS 法による REBCO 多芯テープ線材の製作装置は、Fig. 1 に示したようにローラーカッターとガイドローラーの 1 組と、応力制御バネを搭載したシングルスプリッターである。これを用いて、長さ 5.6m で幅 4mm の REBCO 線材 (SuperPower 社製 SCS4050) の REBCO 側と Hastelloy 側からそれぞれ 5 本と 3 本のスプリットを入れ、6 芯線と 4 芯線の 2 種類の多芯テープ線材を作製した。

本線材と 30 μ m の微粘着カプトンテープとを共巻きしてダブルパンケーキコイルを作製した。コイルの内径は 30mm、外径は 38mm、高さ 8.8mm であり、ターン数は 54 である。まず、単芯テープ線で作るコイルを作り液体窒素温度 (77K) で通電試験を行う。その後、コイルを巻き戻して微粘着テープを取り除き、ESBS 法により多芯テープ線材を作製した。これを用いて、ダブルパンケーキを作り、通電試験を行った。臨界電流を測定し、室温までゆっくり戻して遮蔽電流磁場による残留磁場を消した後に、再度 77K に徐冷して遮蔽電流磁場の測定を行った。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に 6 芯 (REBCO 側からスプリット 5 本) 線材を用いたコイル (Coil-2、○) と単芯線材を用いたコイル (Coil-1、■) の I - V 特性を示す。Coil-1 と Coil-2 の臨界電流は同じ 56.1A で一致していることがわかる。即ち劣化がない。

Fig. 3 に Coil-1 (●)、Coil-2 (▲)、Coil-3 (■) の 3 種類のコイルの遮蔽電流磁場を示す。但し、Coil-3 は、 Hastelloy 側からのスプリッティングによる 4 芯線で作ったコイルである。横軸はそれぞれのコイルの臨界電流で規格化した電流値、縦軸は遮蔽電流磁場である。結果は次のようにまとめることができる。図に示した残留磁場の間隔からみれば、REBCO 側からスプリッティングした 6 芯の Coil-2 は元の Coil-1 の約 15% 減少を示し、 Hastelloy 側からのスプリッティングによる 4 芯の Coil-3 は、50% (但し I_c が 30% 減の効果を含む) の減少となった。なお、 Hastelloy 側からスプリッティングした 6 芯のコイル (I_c がわずか 5% 減) も作製できており、今後測定評価を行う予定である。

4. まとめ

今回は 6 芯の REBCO 多芯テープ線材を用いたコイルを作製し、実験評価を行った。今後 6 芯のコイルについてさらに実験評価を行う予定である。

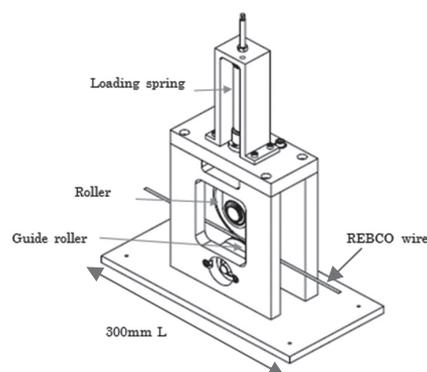


Fig. 1 Single splitter to fabricate REBCO multi-core coated conductor.

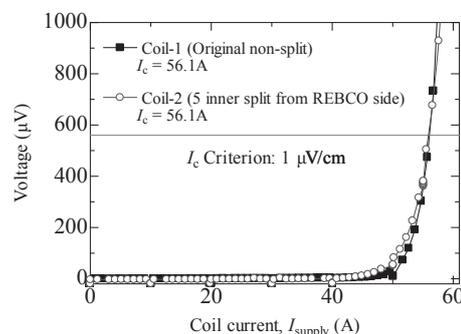


Fig. 2 I - V properties for original and six-core coated conductor splitted from the REBCO side.

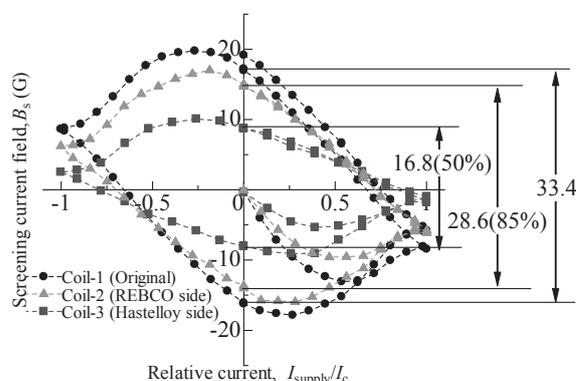


Fig. 3 Screening current induced magnetic fields for the coils.

参考文献

1. 金 新哲, 前田秀明, 特願2014-164590, 2014.08.12

REBCO 超伝導コイルにおける線材磁化緩和の促進法

Enhancement of the decay of shielding current in REBCO superconducting coils

鍋倉 航平, 槻木 優樹, 佐藤 誠樹, 吉田幸市, 岩熊成卓(九大);
富岡 章, 今野 雅行(富士電機); 和泉 輝郎, 井斐 顕(ISTEC)

NABEKURA Kohei, TSUKIGI Yuki, SATO Seiki, YOSHIDA Koichi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);
TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co.Ltd); IZUMI Teruo, IBI Akira (ISTEC)
E-mail: nabekurak@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

現在 REBCO 超伝導線材を用いた MRI 用超伝導マグネットの研究開発が進められており、液体窒素温度での使用や高磁界化といったさらなる発展が期待されている。しかしながら、REBCO 線材幅広面に印加される磁界により誘起された遮蔽電流がマグネット発生磁界を乱し、ppm オーダーの磁界均一性が要求される MRI 用マグネットではこの影響が重大な問題となる。本研究では、まずこの様相を定量的に観測するため、REBCO 超伝導線材を用いて小型テストコイルを試作し、直流バイアス磁界中で通電試験を行い、コイル中心における磁界変化を調べた。

2. 実験

試作した REBCO テストコイルの諸元を Table 1 に示す。これを、Fig.1 に示すように別容器に格納して NbTi マグネット内部に配置し、サブクール液体窒素を用いて 65-77K に浸漬冷却した。また、NbTi マグネットは永久電流運転し、0-2T の直流バイアス磁界を印加した。

REBCO テストコイルにはステップ状に通電し、目標の電流値に到達した後、約6分間その電流値をホールドして、コイル中心磁界をガウスメータを用いて観測した。

3. 実験結果及び考察

テストコイルを 65K に冷却し、0.5T バイアス磁界中で通電した場合のテストコイル中心の磁界変化の観測結果を Fig. 2 に示す。テストコイル中心磁界は遮蔽電流が作る磁界により、電流変化に遅れて電流に追従する。Fig. 2 における磁界増加の時定数が遮蔽電流減衰の時定数である。通電電流値を 40A、60A、80A と大きくするにつれて、遮蔽電流の減衰時定数が長くなっていることがわかる。100Aは減衰時定数が長くなったが、120A を越えると急激に遮蔽電流の減衰時定数は短くなり、磁界は早々に目指した一定値に漸近した。これは、通電電流が臨界電流 I_c に近づくと等価的に抵抗が発生し、遮蔽電流が速やかに減衰するためであると考えられる。テストコイルの通電時の I-V 特性から換算すると、通電電流値が 120A の場合には、テストコイル全体では等価的に $10^{-4} \Omega$ の抵抗が発生していることに相当し、これが遮蔽電流の減衰に寄与していると考えられる。

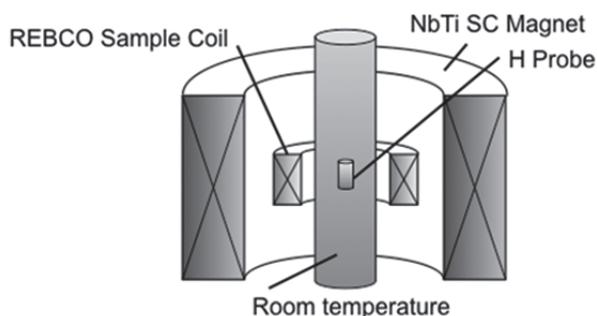


Fig.1 Positional relation between NbTi SC Magnet and REBCO Sample Coil

Table.1 Specifications of REBCO superconducting coil

Conductor	GdBCO
Tape Width	5mm
Tape length	100m
Inner diameter of coil	78mm ϕ
Height of coil	102
Number of turns	19
Number of layers	20

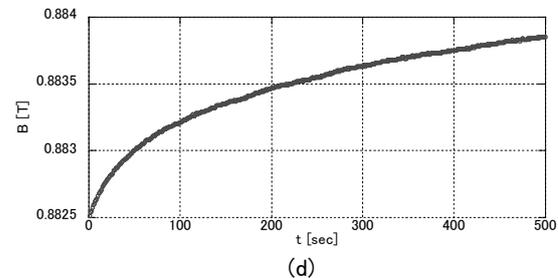
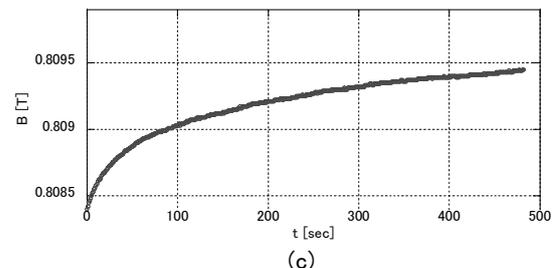
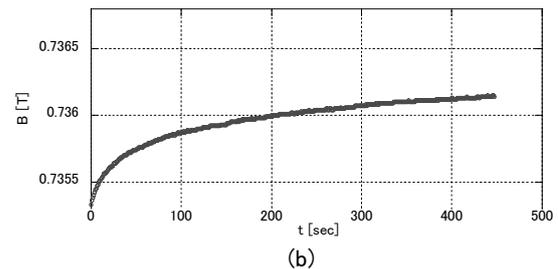
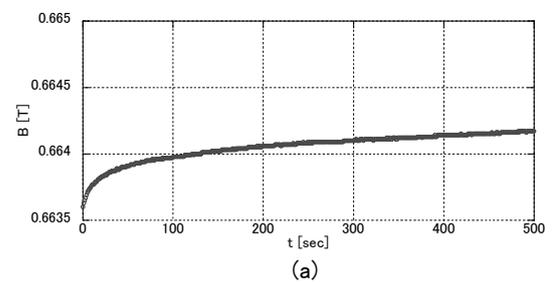


Fig.2 Magnetic relaxation of REBCO coil at 65K, 0.5T
(a)30→40A holding (b)40→60A holding
(c)60→80A holding (d)80→100A holding

謝辞

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

REBCO コイルの磁化緩和におけるスクライビング効果

Effect of scribing for magnetic relaxation of REBCO superconducting coils

梶木 優樹, 佐藤 誠樹, 吉田 幸市, 岩熊 成卓 (iSTERA/九大);
 和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 颯 (iSTERA/ISTEC); 富岡 章, 今野 雅行 (iSTERA/富士電機)
 TSUKIGI Yuki, SATO Seiki, YOSHIDA Koichi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);
 IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (ISTEC); TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co.Ltd)
 E-mail: tsukigi@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、MRI 用マグネットへの高温超伝導線材の導入が期待されており、実現すると脱ヘリウムや高磁界化が期待できる。しかし MRI 用マグネットには空間・時間的に ppm オーダーの均一な安定した磁場が要求されるため、REBCO 線材に誘起される遮蔽電流による磁場の乱れを低減する必要がある。本研究ではレーザスクライビングにより4本フィラメントに加工した REBCO 線材を用いて小型テストコイルを製作し、通電時の発生磁界の時間変化を観測した。これを無分割線材を用いたテストコイルの観測結果と比較・検討することによって、マルチフィラメント化による遮蔽電流の抑制効果を検証した。

2. 実験方法

REBCO テストコイルを NbTi マグネットの内部中心に配置し、サブクール液体窒素で 65-77K に浸漬冷却した。NbTi マグネットを永久電流モードで運転して 0-3T の直流バイアス磁界を印加し、REBCO テストコイルに 5ppm/8hour の安定度を持つ安定化電源を用いて通電した。目標電流値まで約 0.18A/sec で掃引した後 5-7分間保持し、ガウスメータによってコイル中心磁界を観測した。

Fig.1 は NbTi マグネット 286A 通電時の軸方向磁界分布である。テストコイルの諸元を Table.1 に示す。テストコイルは 3T の磁界中に配置可能な寸法であり、線材幅に対して超伝導層を 4 分割したコイルと分割を施していないコイルにおける磁界変化の比較を、印加磁界 0.5~2T 電流値 40~120A に変化させて行った。

3. 実験結果及び考察

Fig.2,3 に外部印加磁界 0.5T 電流値 80A の無分割コイルと 4 分割コイルの中心磁界の変化を示す。コイル中心磁界は電流変化に遅れて変化した。磁界が一定値に漸近していく時定数が線材に誘起される遮蔽電流の減衰時定数に相当する。Fig.2,3 からわかるように、4 本フィラメント分割した線材を用いたコイルでは、無分割線材と比較して、発生磁界が目指す目標値に早期に漸近している。すなわち、レーザスクライビング加工によりマルチフィラメント化することにより、遮蔽電流が抑制されるとともに、その減衰も速くなっていることがわかる。

よって、REBCO 線材を用いた MRI 用超伝導マグネットの開発にあたり、線材に誘起される遮蔽電流の抑制、減衰促進にはスクライビング加工によるマルチフィラメント化が有効であり、この活用が早期の実現の鍵を握ると考えられる。

謝辞

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

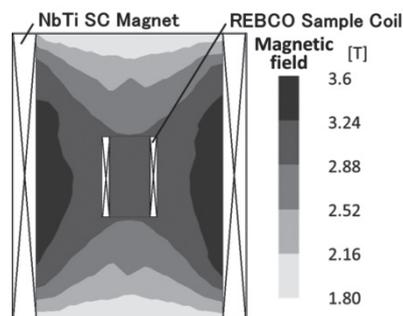


Fig.1 Axial magnetic distribution of NbTi SC Magnet.

Table. 1 Specification of REBCO sample coil.

Conductor	EuBCO
Tape Width	5mm
Tape length	30m
Inner diameter of coil	78 mm ϕ
Height of coil	100mm
Number of turns	19
Number of layers	6

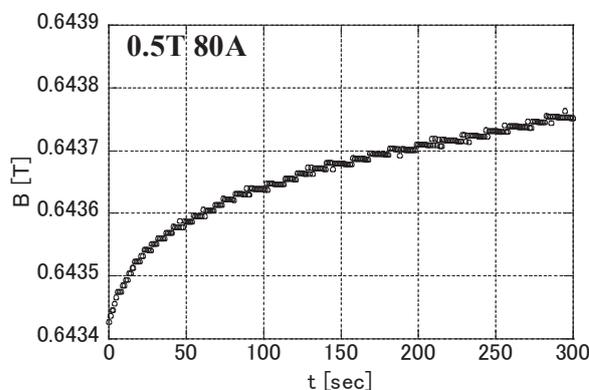


Fig.2 Variation of the magnetic field at the center of a test coil would with a non-scribed tape.

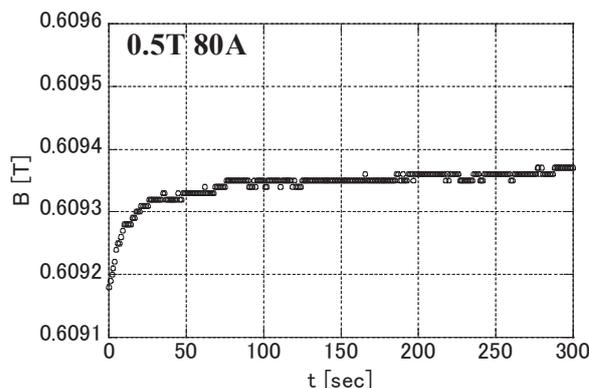


Fig.3 Variation of the magnetic field at the center of a test coil would with a laser-scribed 4-filament tape.

酸化物超伝導並列導体の通電特性を考慮した電流分流特性の考察

Study on the current sharing properties of HTS parallel conductors in consideration of I-V characteristics

河原 史典, 本田 正太郎, 岩熊 成卓(九州大学)
 KAWAHARA Fuminori, HONDA Shotaro, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.)
 E-mail: te10108p@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物超伝導線材を電力機器の巻線や大型超伝導マグネットに適用するためには大電流量化が必要である。現在の酸化物超伝導線材は、結晶の配向性を揃えるためにテープ形状であり、従来の撚線導体構造は適用できず、大電流量化するにはテープを重ね合わせて並列導体を構成しなければならない。しかし、単に積層しただけでは素線間のインダクタンスバランスがとれず、偏流が発生してしまう。そこで適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施すことにより、電流を均等化し、交流損失を低減することができる。

我々はこれまでY系超伝導テープ線材で構成した転位並列導体について、電流リード部の接触抵抗と、n 値モデルに基づく通電時の磁束フロー抵抗を考慮して電流分流の解析を行ってきた。今回、機器応用に向けて、コイル径や並列導体の構成本数等コイルの形状が変化した場合の素線間電流分流について考察したので報告する。

2. 電流分流比の計算法

多層ソレノイドコイルについて、並列導体の素線の本数を3本、4本、5本と変化させ、それぞれの場合の素線間電流分流の様相を数値解析により調べた。並列導体には素線の位置を途中で入れ替える転位を施した。例として、5本並列導体をソレノイド状に巻く場合の最適転位方法を Fig.1 に示す。また、素線数3本の場合の等価回路を Fig.2 に示している。ここでは各素線の自己及び相互インダクタンスに加え、電流リードとの接触抵抗 R_N と、超伝導素線における磁束フロー抵抗 R_{HTS} からなる抵抗 R_x を考慮に入れている。

高温酸化物超伝導線材の通電特性を n 値モデルで近似すると各素線の磁束フロー抵抗 R_{HTSx} は、

$$R_{HTSx} = V/I = V_c (I^{-1}/I_c^n)$$

で表される。接触抵抗 R_N には実測値を用いた。

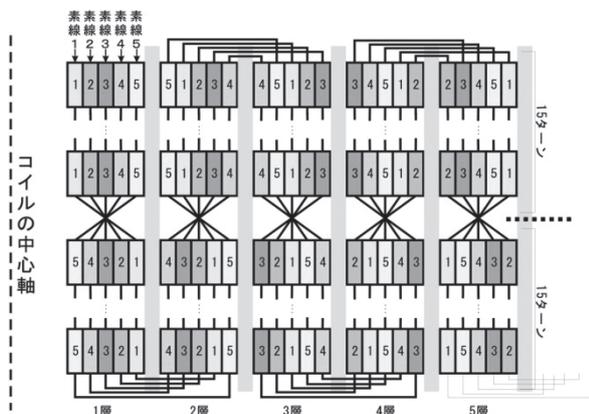


Fig.1 5-strand superconducting transposed parallel conductors.

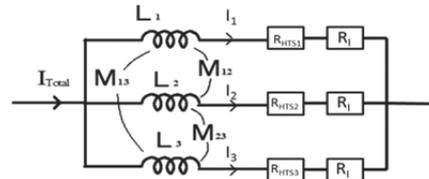


Fig.2 Equivalent circuit of a 3-strand parallel conductor.

3. 結果

周波数が高くなると等価抵抗がばらつくとも電流分流比は均一な値に近づいた。また、周波数が 0.1Hz 程度の場合でも使用している線材の n 値が大きい程、電流分流はより均流に近づいた。さらに各素線の臨界電流値を変化させ同様の検討を行った。結果として、各素線の臨界電流値の差が大きくなるにつれ電流分流比もばらつくことが分かった。また、コイル層数、コイル内径、コイルターン数を変化させ電流分流比の解析を行った。例として、3本、5本並列導体の電流分流特性の内径依存性を Fig.3 に示している。内径を大きくすればインダクタンス成分が等価抵抗のばらつきを無視できる程大きくなり、電流分流比が均一な値に近づくと考えられる。他の場合における電流分流の様相については当日報告する。

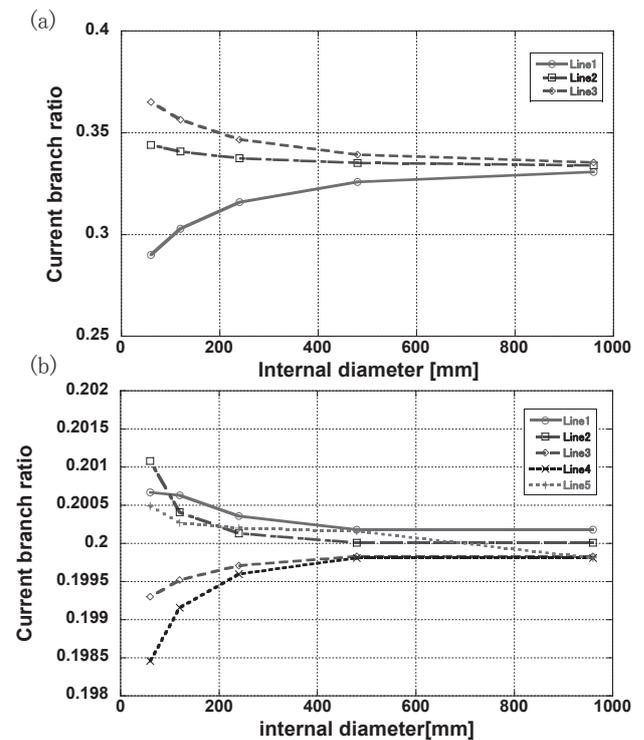


Fig.3 Size dependence of current branch ratio.(a) 3-strand parallel conductor.(b) 5-strand parallel conductor.

薄膜高温超伝導線材で巻いた複数層からなるコサインシート型二極マグネットの層別解析モデルによる三次元電磁界解析

Three-dimensional electromagnetic field analyses of a multilayered cosine theta dipole magnet wound with coated conductors by layer-by-layer model

曾我部 友輔, 雨宮 尚之(京大); 野田 耕司(放医研)
 SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (KU); NODA Koji (NIRS)
 E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

薄膜高温超伝導線材で巻かれたマグネットは、冷凍機で冷却可能な温度における高い発生時場という利点のため、様々な分野で実用化が期待されているが、マグネット形状や励磁パターンが異なれば交流損失や線材磁化の磁界精度への影響の程度は異なるため、実際のマグネット製作前の段階での解析的評価が必要である。

2. 三次元電磁界解析モデル

電磁界解析の支配方程式として以下の式を用いた。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{n} T \right) \cdot \mathbf{n} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_0 t_s}{4\pi} \int_{S'} \frac{(\nabla \times \mathbf{n}' T') \times \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{r^3} dS' + \mathbf{B}_{\text{ext}} \cdot \mathbf{n} \right) = 0$$

ここで、薄膜高温超伝導線材は超伝導層の断面アスペクト比が非常に大きいので、線材厚さ方向で電磁界分布が一様であると仮定する薄板近似を適用している[1]。また、コンピュータメモリ、計算時間を抑制するために各種近似を適用した薄膜高温超伝導線材で巻いたマグネットの三次元電磁界解析モデルを用いた[2]。

今回はFig. 1に示すような、複数層からなるコサインシート型二極マグネットを解析対象としたが、このように複数層からなるマグネットの解析を行う際に、各層を個別に解析対象とし、解析対象以外の層には、各ターン中心に一本の線電流が流れているとして扱う、層別解析モデルを用いた。

3. 三次元電磁界解析結果

本解析では、Fig. 1に示すマグネットに、50秒で200 Aまでランプアップし、50秒間電流をホールド、その後50秒で0 Aまでランプダウンするという条件で解析を行った。Fig. 2に、ランプアップ終了直後におけるFig. 1(b)に示す最内層の最初のターンと、最後のターンそれぞれの、直線部およびコイルエンド部での線材幅方向電流密度分布を示す。マグネット設計段階では考慮されていなかった線材磁化により、電流密度分布が一様でなくなっている。また、マグネットのもつ三次元形状のため、マグネットの各所で線材経験磁場は異なる。このため、最初のターンと最後のターンで電流密度分布が大きく異なり、更には同じターン中でも直線部とコイルエンド部で電流密度分布が大きく異なることが確認できた。

本解析では、層別解析モデルを用いてマグネット全体解析することにより1マグネット全体で発生する交流損失を計算可能である。50秒間で200 Aまでランプアップする過程において発生する交流損失は128 J(平均2.56 W)となった。また、マグネットの線材磁化を考慮に入れた発生磁界についても評価可能である。

謝辞

本研究は日本医療研究開発機構及び経済産業省の「高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクト」の支援によって行われた。

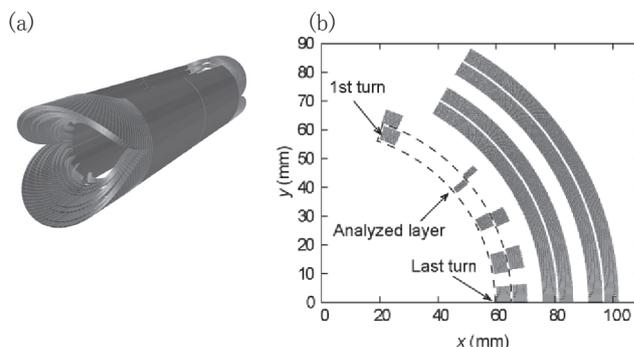


Fig. 1 (a) Analyzed multilayered cosine theta dipole magnet wound with coated conductor; (b) Cross section of the analyzed magnet.

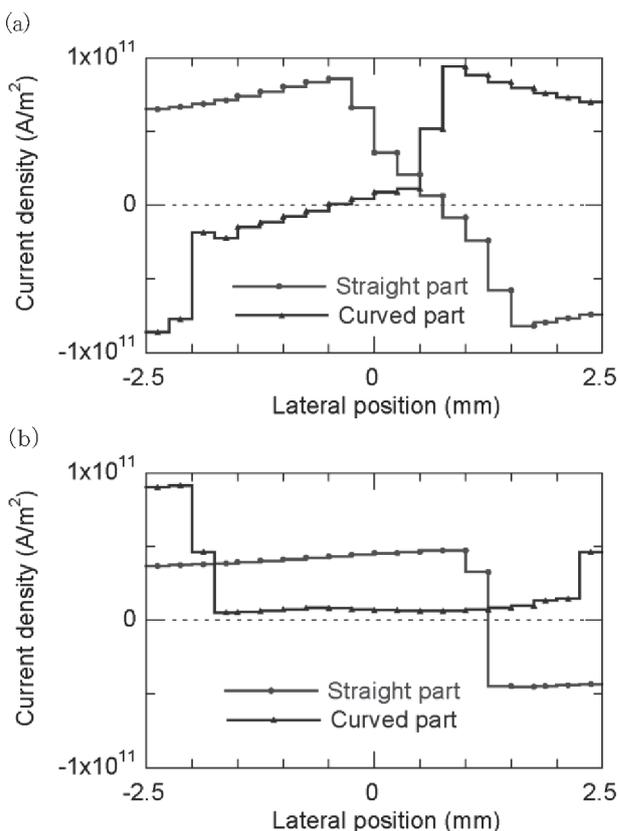


Fig. 2 Current density distribution in the turn; (a) 1st turn in 1st layer; (b) Last turn in 1st layer.

参考文献

1. Y. Ichiki, et al.: Physica C 412-414 2 (2004) 1050-1020
2. Y. Sogabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4900205

