

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ-①～プロジェクト状況～

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

—Outline of the project—

横山彰一, 李智媛, 井村武志, 松田哲也, 佐藤伸治, 江口諒, 井上達也, 福井秀樹, 長廣利成, 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, LEE Jiwon, IMURA Takeshi, MATSUDA Tetsuya, SATO Shinji, EGUCHI Ryo, INOUE Tatsuya,
FUKUI Hideki, NAGAIHIRO Toshinari, 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

医療用 MRI 超電導マグネットを液体ヘリウムレス、省エネ化するために高温超電導コイルの適用が期待されている。高温超電導を適用した高安定磁場コイルシステム技術を取得、実証する研究開発プロジェクトを実施した[1]。本テーマは、3T-MRI 超電導マグネット用の高温超電導コイルを開発し、実用化の見通しを得ることを最終目標としている。本報告では、本プロジェクトの実施内容の概要と開発状況について報告する。

2. 高温超電導コイル化技術

2014 年度まで適用した銅貼り合わせ構造の ReBCO 線材は、剥離などの機械的応力に弱いことから、2015 年度では超電導薄膜を保護するために $20\mu\text{m}$ の銅箔で包み込み Sn ハンダで固定した銅フォーミング線材をコイルに適用した。磁場均一度を確保するためにパンケーキコイルの巻線精度 0.1mm 以下、コイル組立精度 0.5mm 以下で製作した。

最大経験磁場 5.5T を発生することができるマグネットを製作し、冷却を実施。約 1 週間で初期冷却が完了。到達コイル温度 7K において励磁し、中心磁場 3T を発生することができた。Fig.1 に中心磁場 3T を発生したときの試験状況の写真を示す。

コイル製作技術として、メートル級コイルを試作した。コイルの製作を評価するために実施した。コイル内径は 850mm 、外径は約 950mm である。巻線後エポキシ含浸し、巻枠から取り出し、ハンドリングなど問題ないことを確認した。

3. 高安定磁場発生技術

高温超電導コイルは、現状では超電導接続ができないため、従来の永久電流モードではなく、電源によるドライブモード運転となる。励磁電源として 1ppm/hr 以下の検証をした[2]電源を用い、高温超電導コイルを 3T まで励磁し、磁場安定度を測定。超電導線材の作る磁化の影響と思われる磁束クリーブを観測し、数 A (数%) の過電流通電を実施することで 100ppm レベルの磁場変動が 1ppm 以下に抑制できた。その安定磁場およびシミングで整えた均一磁場を用い Fig.2 に示すように 3T 磁場中でイメージングをすることができた。供試体はマウスの胎児 (25mm 長) で、画像分解能 0.2mm 以下で鮮明な画像を得ることができ、高温超電導コイルでの実使用に耐えうる高安定、高均一磁場を実証できた。

4. 電源システム、超電導線材の循環電流

その他の成果として、省エネ、低コスト化として大型の磁石励磁電源と並列に設置した小型低電圧の磁場保持電源回路を提案した。また、高温超電導線材の循環電流(磁化)の影響評価や磁束クリーブの抑制方法などの検討も実施した。

5. まとめ

高温超電導コイルを用いた MRI 超電導マグネットの実用化見通しを得る研究開発プロジェクトを実施した。230mm ボアマグネットに 3T の高均一、高安定磁場を発生し、イメージングにより実証した。

謝辞

本研究は、H25、26 年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費および H27 年度、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業のうち高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」により委託・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. M.Yoshikawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.10

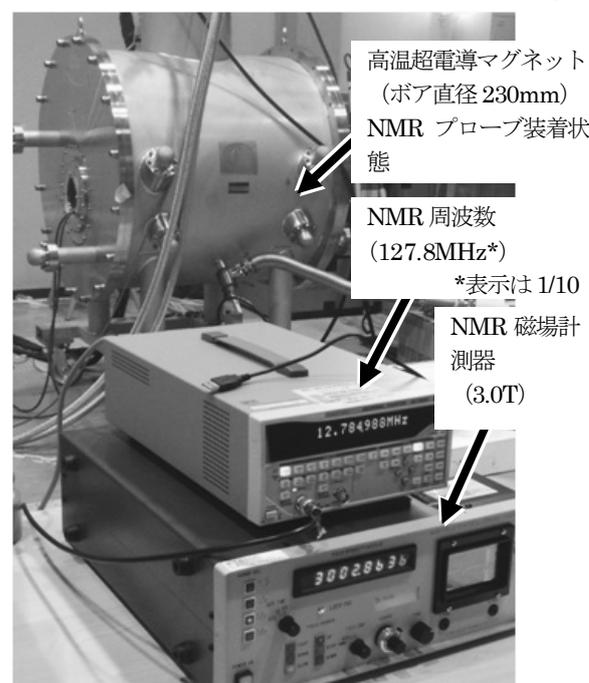


Fig.1 Photograph of the 3T-230mm bore test magnet.

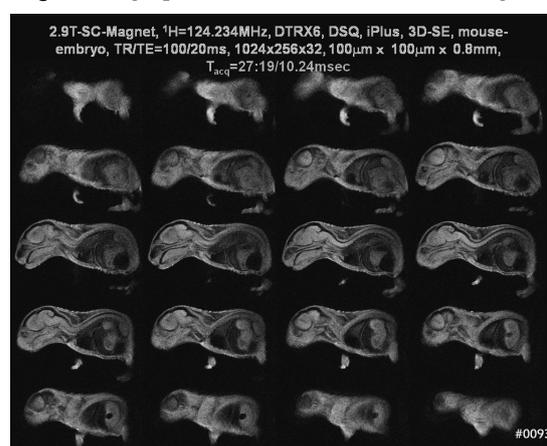


Fig.2 MRI multi-slice images of an embryo mouse in 3T fields by the high- T_c superconducting magnet.

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ-② ～300mm ボアコイルの通電試験～

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI.
-Excitation test of the HTS coil having a 300mm diameter bore-

横山彰一, 李智媛, 江口諒, 井上達也(三菱電機); 宮城大輔, 津田理(東北大); 中村武恒, 白井康之(京都大)
YOKOYAMA Shoichi, LEE Jiwon, EGUCHI Ryo, INOUE Tatsuya(Mitsubishi Electric Corp.);
MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); NAKAMURA Taketsune, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.)
E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

医療用 MRI 超電導マグネットを液体ヘリウムレス、省エネ化するために高温超電導コイル技術の研究開発プロジェクト[1]において、300mm ボアコイルを製作し、冷却、通電試験を実施した。本報告では、通電試験の結果について報告する。

2. 300mm ボア3T コイル

2014 年度に製作した 300mm ボア3T コイル[2][3]をクライオ装置に装填し GM 冷凍機で冷却を実施。約4.5 日で冷却完了し、到達温度は7K であった[1]。本コイルは、コイル温度20K において負荷率は約60%(設計値)である。Table 1 に3T コイルの諸元を示す。

通電試験は、コイル電圧、温度を確認するため数 A ごとにホールドし上昇させた。3分割コイルのうち1コイルで接続抵抗劣化起因と見られるオーミック電圧(60mV/100A)が発生し15K にコイルが温度上昇したものの安定して通電できていた。104A (1.4T) に上昇し保持したところ他のセンターコイルが突然熱暴走に至り焼損した。

マグネットを解体し、調査した結果、センターコイルの接続端子部に機械的応力(加工および熱歪み)が加わり線材の超電導特性が劣化していた可能性があることが分かった。

3. 300mm ボア3T 評価コイル

2015 年度は、3T 超電導マグネットの電磁力、コイル経験磁場検証用として3T 評価コイルを製作した。Table 1 に3T 評価コイルの諸元を比較した。Fig.1 に試作した3T 評価コイルの外観写真を示す。本コイルには、20 μ m 厚さの銅箔で高温超電導素線を包含したフォーミング材を適用した。コイル製作精度は上記3T コイルと同様に、コイル巻線0.1mm 以下、積層0.5mm 以下で製作した。冷却はコイル形状が大きくなりコイル部材を含めた重量が250kg となり、初期冷却は室温から約7 日で7K に到達した。励磁は上記3T コイルと同様にステップで励磁し、中心磁場3T まで励磁を実施した。3T コイルのような接続抵抗の劣化は観測されず、良好に繰り返し励磁ができた。初回励磁では温度上昇は3~4K あったが、2回目以降では1K 程度となりその差はヒステリシス損の差と考えられる。Fig.2 に2.9T 初回励磁で約10 分間ホールド時の各コイルの電圧変化を示した。図のようにホールド直後にサイドコイルに15mV 程度の電圧が発生しその後接続抵抗による電圧6mV まで低下する現象が見られた。なお、数 A 過励磁した場合は Fig.2 のような電圧挙動は観測されず、線材磁化による磁束クリープの誘起電圧と考えられる。3T で磁場安定性、均一度を測定し、目標値を達成するために、数 A の過電流通電、シミングを実施した[4]。

謝辞

本研究は、H25、26 年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費および H27 年度、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業のうち高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」により委託・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. T.Matsuda, et.al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.8
3. T.Imura, et.al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.9
4. T.Matsuda, et.al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016)

Table 1 Specifications of the model coils.

項目	300mmボア 3Tコイル	300mmボア 3T評価コイル
コイル内径	320mm	320mm
コイル外径最大	420mm	471mm
コイル軸長	450mm	440mm
中心B	2.9T	3.7T (2.9T)
Bmax	4.46T	5.5T (4.3T)
均一度 (100mm球)	1.72ppm	1.67ppm
定格電流値	214A	168A (132A)
コイル電流密度	140A/mm ²	140A/mm ²
超電導線形状、構成 (裸)	w5mm×t0.16mm 銅貼り合わせ	W4mm×t0.14mm 銅フォーミング
インダクタンス	10.5H	32.0H
最大軸方向コイル応力	9.0MPa	9.8MPa

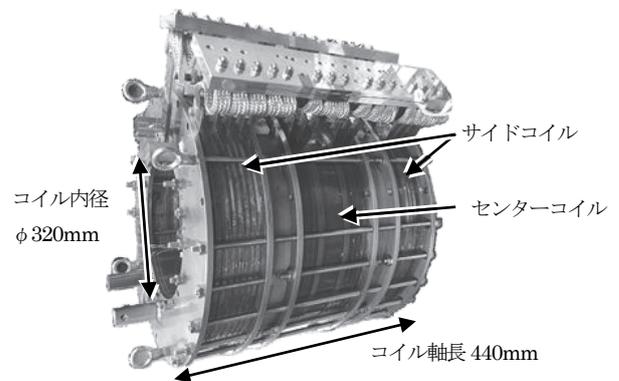


Fig. 1 Photograph of the 3T HTS test coil.

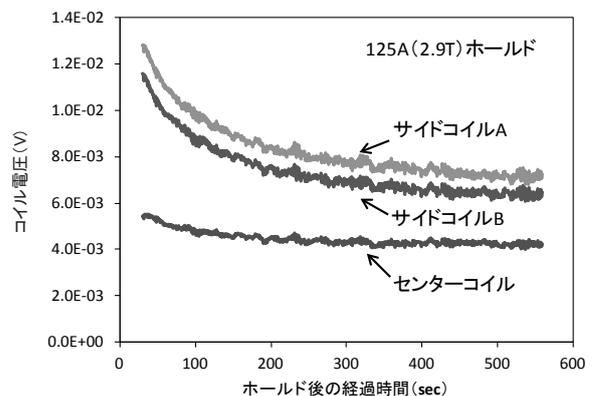


Fig.2 Results of coil voltage influences at current holding.

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ-③ ～3T評価マグネットの冷却・励磁～

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI Ⅲ-③ -Cooling and Excitation of 3T Test Magnet-

松田 哲也, 井村 武志, 横山 彰一, 江口 諒, 井上 達也, 長廣 利成, 田邊 肇 (三菱電機)

MATSUDA Tetsuya, IMURA Takeshi, YOKOYAMA Syoichi, EGUCHI Ryo, INOUE Tatsuya, NAGAIRO Toshinari, TANABE Hajime (MitsubishiElectric Corp.) E-mail: Matsuda.Tetsuya@dn.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

MRI 用マグネットには空間的に高均一な磁界が必要である。中心磁界3Tで高均一磁界を発生可能なYBCOテープ線材製のMRI用3T評価マグネットを試作した。このマグネットの形状・諸元について紹介するとともに、冷却・磁界安定度向上試験を実施したので、これらの結果について報告する。

2. 設計コイル形状とコイル諸元

高均一な磁界を得るために、コイル形状を最適化した後の1/4断面図を図1に示す。コイルは4群(ダブルパンケーキコイル数は26)で構成し、特にZ中心に近く磁界均一度への影響が大きいセンターコイル群のコイルの高さをコイル毎に変化させて高均一磁界を得た。コイル高さは最適化手法で決定した。詳細は参考文献[1]に記載した。磁界均一度はφ100mmで1.6ppmであり、イメージングを実施する磁界2.9Tでの電流密度は110A/mm²、定格電流は125Aである。諸元を表1に示す。

3. 冷却・磁界安定度向上試験

冷却は、GM冷凍機1台にて行った。コイル重量は約250kgである。冷却は6.5日で完了し到達温度は7K(仕様20K)であった。この温度は、解析特性とほぼ一致した。

冷却・励磁試験終了後、磁界の安定度向上試験を行った。イメージングには撮像時間内で1ppm以下の時間的に一定の磁界が必要である。図2に2.9Tへ励磁直後の磁界で規格化した磁界の時間依存性を示す。10分間の規格磁界の増加量は 3×10^{-4} と大きい。磁界増加の抑制方法としてオーバーシュート法が知られている[2]。今回、定格電流125Aから電源電流を4Aオーバーシュートさせることで、磁界変動を±1ppm/10分以下まで抑制できた。

4. まとめ

- (1) 3T 評価マグネットのコイルを設計した。空間的な磁界均一度1.6ppm/φ100mmを得た。
- (2) 2.9T への励磁直後の規格磁界の変化率は、電源電流のオーバーシュートがない場合 $3 \times 10^{-4}/10$ 分であったが、定格電流125Aに対し電源電流を4Aオーバーシュートさせることで、±1ppm/10分以下まで抑制できた。

謝辞

本研究は、H25、26年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費およびH27年度、国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業のうち高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

- [1] 松田哲也, 他:第92回低温工学・超電導学会予稿集(2015), 1A-p02
- [2] T. Hemmi, et al.:Electromagnetic Behavior of HTS Coils in persistent current operations, Fusion Engineering Design, 81(2006), pp. 2463-2466

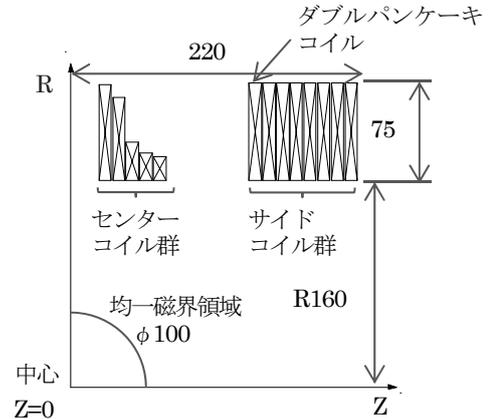


Fig.1 1/4 Cross sectional view of MRI coils after optimization of coil heights

Table1 Specifications of a 3T Test Magnet

中心磁界	3T
磁界均一度(φ100)	1.6ppm
コイル内径	320mm
コイル外径	440mm
コイル個数	26
電流密度	110A/mm ²
定格電流	125A
インダクタンス	31.9H
Brmax	2.53T
Bzmax	4.43T

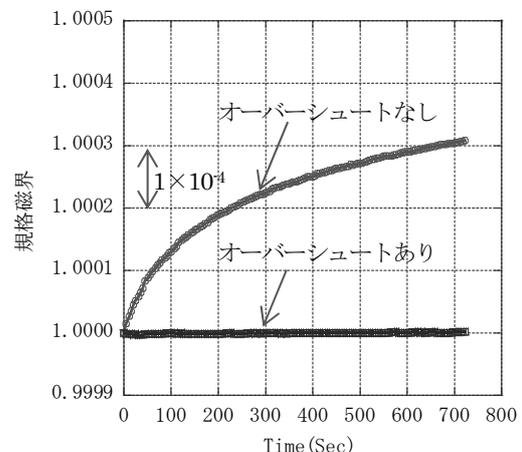


Fig.2 Time dependency of Magnetic Field of a 3T Test Magnet right after excitation

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ-④ ~高安定・高均一磁場によるイメージング~

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI Ⅲ-④ -Imaging using High stability and High Homogeneous magnetic Field-

松田 哲也, 江口 諒, 井上 達也, 福井 秀樹, 横山 彰一, 佐藤 伸治 (三菱電機)

MATSUDA Tetsuya, EGUCHI Ryo, INOUE Tatsuya, FUKUI Hideki, YOKOYAMA Syoichi, SATO Shinji(MitsubishiElectric Corp.) E-mail: Matsuda.Tetsuya@dn.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

MRI マグネットには、高画質の画像を得るために、画像取得領域で 2ppm 程度の高均一磁界が必要とされる。一般に、コイルの磁気設計時に高均一磁界が得られても、製作誤差等で磁界均一度は悪化する。YBCO テープ線材を用いた小型の MRI 用 3T 評価マグネットを試作し、高均一磁界を得る様に磁界分布を補正し、2.9T でイメージングを実施した。

2. 磁界分布補正方法と補正結果

最初に、磁界補正前の磁界分布を測定する。測定点は、Z 軸上が 5mm ピッチで ±50mm、R50mm の円周上が θ 方向 22.5 度ピッチ・Z 方向 15mm ピッチで Z=±45mm である。これらの三次元磁界分布を次式で展開する。

$$B_z(x, y, z) = Bmes_0 + Bmes_z \cdot z + Bmes_x \cdot x + \dots$$

上式において、第 2 項以下が誤差展開係数である。高磁界均一磁界を得るには第 2 項以下を鉄シムと呼ぶ微小鉄片で補正する[1]。鉄シムが発生する展開係数が誤差展開係数とは逆方向の値を発生することで高均一磁界を得る。鉄シムの最適配置が必要だが、これを線形計画法で決定した。誤差係数は厚みに比例するとした。

MRI 用小型 HiTc マグネットの常温空間内径 Φ220mm 内側に鉄シムを貼りつけた。鉄シムの個数は 144、大きさは最大厚み 20mm、幅 20mm、長さ 46mm である。図 1 と図 2 に補正前と補正後の磁界分布を示す。補正前に存在していた Z 方向・R 方向の一次の誤差係数が、鉄シムにより補正できていると分かる。Vrms 磁界均一度は、補正前は 255ppm/φ100mm、63ppmm/φ25mm であり、補正後は 35ppm/φ100mm、2ppm/φ25mm である。

3. イメージング

MRI 用 3T 評価マグネットにて、マウス胎児(長さ 25mm)のイメージングを、マグネットを含む全て国産の装置を用いて実施した。マウスの胎児の断層像を図 3 に示す。分解能は 0.2mm 以下である。

4. まとめ

試作 3T 評価マグネットの磁界均一度を鉄シムで補正した。Vrms 磁界均一度は補正前で 63ppmm/φ25mm、補正後は 2ppm/φ25mm である。この YBCO テープ線材製 3T 評価マグネットを用いて、2.9T にて世界初となるイメージングを実施し、マウスの胎児等の断層像を撮像した。マグネットを含む全ての装置は国産である。

謝辞

本研究は、H25、26 年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費および H27 年度、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業のうち高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

[1] Tetsuya Matsuda, et al.: Field Corrections of Open MRI Superconducting Magnets, IEEJ Trans. IA, Vol. 125, No. 8, pp. 774-778 (2005)

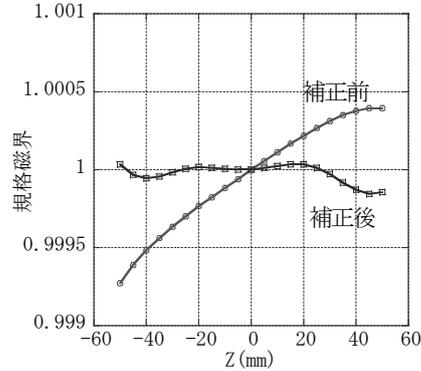


Fig.1 Z Field Distributions of a 3T Test Magnet at 2.9T

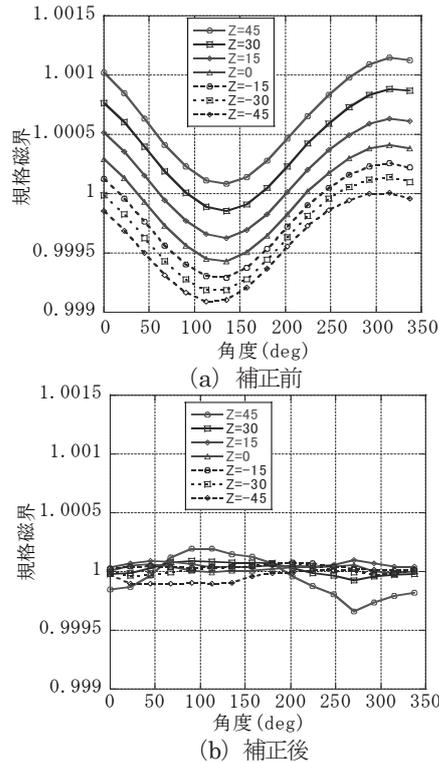


Fig.2 R θ Field Distributions of a 3T Test Magnet at 2.9T

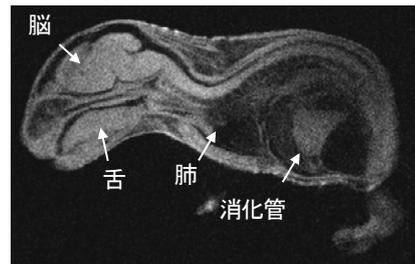


Fig.3 World's first MRI Image of Mouse fetus using a 3T Test Magnet at 2.9T

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ-⑤ ～高安定磁場実現に向けた電源オペレーションの検討～

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI Ⅲ-⑤

- Study of power supply operation for very stable magnetic field -

谷内田 貴行, 吉川 正基, 白井 康之 (京都大学); 井村 武志, 横山彰一 (三菱電機)

YACHIDA Takayuki, YOSHIKAWA Masaki, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto University);

IMURA Takeshi, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Co.)

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

1. はじめに

現在普及している低温超電導 MRI には冷却に大量の液体ヘリウムが用いられているが、近年液体ヘリウムの希少化が進み供給リスクが顕在化してきている。そのため液体ヘリウムを使用せずに運用できるヘリウムフリー高温超電導 MRI マグネットの開発が期待されている。しかし高温超電導 MRI マグネットには遮蔽電流や電源変動により磁場変動が生じる問題があり MRI でイメージングに必要な 1ppm/hr 以下の高安定磁場を得られないという課題がある。ここで遮蔽電流は自己磁場により超電導テープ線材に誘導される電流でありこれが長時間にわたり減衰するために磁場変動が生じる。また超電導接続が現状困難であり永久電流モードができず常に電源駆動が必要のために磁場安定性が電源変動の影響を受ける。

そこで遮蔽電流による磁場変動を抑制する手法として励磁電源によるオーバーシュート [1] 励磁実験を、開発した 32 H の 3T 高温超電導 MRI マグネットで行った。1.5 T (66 A) と 2.9 T (125 A) の各通電電流においてオーバーシュート電流量を変化させ磁場変化を測定した。

2. 実験内容

Fig. 1 に示す高安定励磁電源により高温超電導 MRI マグネットのオーバーシュート励磁を行い、電流保持後のマグネット中心の磁場変化を NMR プローブで測定した。

1.5 T (66 A)、2.9 T (125 A) の目標値に対し 0 A から電流 0.1 A/s で励磁しオーバーシュートを行った。オーバーシュート電流量 ΔA は 1.5 T で (4 A、8 A、12 A)、2.9 T で (2 A、4 A) とした。磁場変化は電流が目標値に達してから 10 分程度測定した。

Fig. 2、Fig. 3 に 1.5 T、2.9 T それぞれにおけるオーバーシュート後の磁場変化 ΔB (電流が目標値に到達した時の磁場 B_0 を基準に ppm で表した変動分) の時間変化を示す。

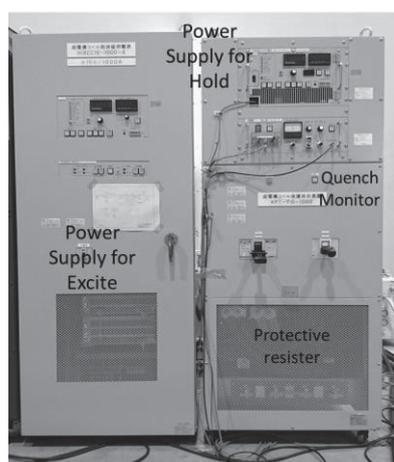


Fig. 1 High-stabilized power supply for HTS superconducting magnet

3. 実験結果と考察

Fig. 2 より 1.5 T において $\Delta A=8$ A の時磁場変化は最も小さく、電流が目標値到達した後 10 分間で $|\Delta B| < 3$ ppm ($B_0=1.533477$ T) となった。 $\Delta A=4$ A では中心磁場が $B_0=1.532705$ T から増加傾向となり、逆に $\Delta A=12$ A では $B_0=1.533847$ T から減少傾向となった。

また Fig. 3 より 2.9 T において $\Delta A=4$ A の時磁場変化は最も小さく 10 分間で $|\Delta B| < 2$ ppm となった。 $\Delta A=2$ A では 1.5 T での $\Delta A=4$ A の ΔB と似た増加傾向となった。これより高磁場であるほど (通電電流が大きい程) 少ないオーバーシュート電流量で磁場安定度を改善できることが示された。これは通電量が大きくなるにつれ超電導線の負荷率が大きくなり遮蔽電流の変動が小さくなるためと考えられる。

今後はオーバーシュート電流量と磁場変動の関係について負荷率との関係をより詳細に検討しオーバーシュート量の最適化条件を検討すること、および電源制御による磁場安定度のさらなる向上を考えている。

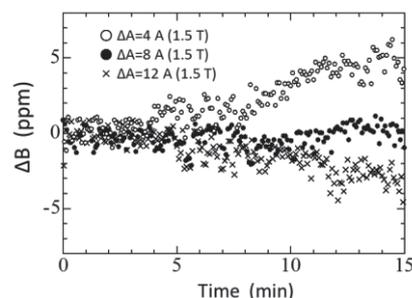


Fig. 2 The Magnetic field Variations at the center after the overshoot excitation with $\Delta A=4, 8$ and 12 A, (Target: 1.5 T, 66 A)

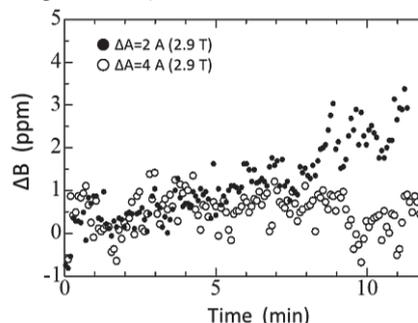


Fig. 3 The Magnetic field Variations at the center after the overshoot excitation with $\Delta A=2$ and 4 A, (Target: 2.9 T, 125 A)

参考文献

[1] Y. Yanagisawa, et al.: Effect of current sweep reversal on the magnetic field stability for a Bi-2223 superconducting solenoid, Physica C, 469 (2009), pp. 1996-1999

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ－⑥

～遮蔽電流磁場の変動抑制～

Research and development of the very stable magnetic field coil system fundamental technology for MRI Ⅲ－⑥－Suppression of variation of magnetic field induced by screening current－

三浦 英明, 高野 玲央, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 横山 彰一(三菱電機)
 MIURA Hideaki, TAKANO Reo, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
 YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)
 E-mail: h.miura@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

MRI 用マグネットでは、高解像度な画像を得るために時間的に高安定な磁場が要求される。しかし、REBCO 高温超電導コイルでは励磁時に大きな遮蔽電流が誘起され、遮蔽電流の減衰によって磁場変動が生じる。このため、コイルの磁場安定性を確保するには、遮蔽電流磁場の変動を抑制する必要がある。そこで、本研究では、磁場変動抑制手法のひとつであるオーバーシュート法[1]に着目し、オーバーシュート時の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条件について検討した。

2. 遮蔽電流磁場の測定方法

GdBCO テープ線を用いて、Fig.1 に示すような、線材長 16.7 m、臨界電流 113 A(77 K, 1 μ V/cm 基準)、 n 値 33 のダブルパンケーキコイルを作製した。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、コイル径方向の磁束密度 B_r を測定した。そして、常温での測定で得られたコイル電流と磁束密度の関係を用いて、測定した B_r を励磁電流分と遮蔽電流分に分離し、遮蔽電流磁場 B_s を算出した。なお、遮蔽電流磁場の測定では、定常運転時の電流(以下、目標電流)を 20, 30, 40, 50, 70, 90 A、スweep速度を 5 A/sec とし、オーバーシュート量 ΔI をパラメータとした。

3. 遮蔽電流磁場と磁場変動率の関係

目標電流が 50 A で、 $\Delta I = 0, 10, 20, 40$ A の場合における、1 分間あたりの磁場変動率 ε の時間推移を Fig.2 に示す。これより変動率 ε の増減は ΔI に依存し、 ΔI が大きくなるにつれて、変動率 ε がプラスからマイナスに転じることがわかった。この結果は、変動率 ε がゼロとなる ΔI が存在することを示唆しており、 ΔI と ε の関係から、目標電流 50 A の場合で励磁開始 1 分後の変動率 ε がほぼゼロとなる ΔI を推定したところ 22 A であった。そこで、目標電流が 50 A の場合において、通常励磁時 ($\Delta I = 0$ A) と $\Delta I = 22$ A 時の遮蔽電流磁場の減衰特性を評価した。その結果を Fig.3 に示す。Fig.3 において、励磁開始 1 分後の変動率 ε は、通常励磁時が 10920 ppm/min であったのに対し、 $\Delta I = 22$ A 時は 370 ppm/min であった。なお、 $\Delta I = 22$ A 時の遮蔽電流磁場 B_s はゼロではなく約 15 mT であった。そこで、他の目標電流において、励磁開始 1 分後の変動率 ε がほぼゼロとなる ΔI に対する遮蔽電流磁場 B_s を測定した。その結果を Fig.4 に示す。これより、磁場変動抑制に有効な ΔI を採用した場合の遮蔽電流磁場 B_s が、目標電流に依存することがわかった。これは、目標電流によって、線材内部の励磁電流領域と遮蔽電流領域の大きさや比率が異なるためと考えられる。

謝辞

本研究は、H25, 26年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費およびH27年度、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業のうち高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」により委託・支援を受け実施したものである。

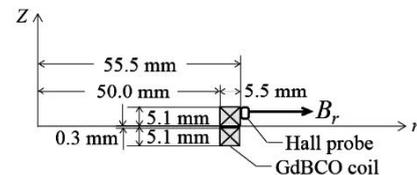


Fig.1 Schematic view of a GdBCO double pancake coil and hall probe for magnetic field measurement.

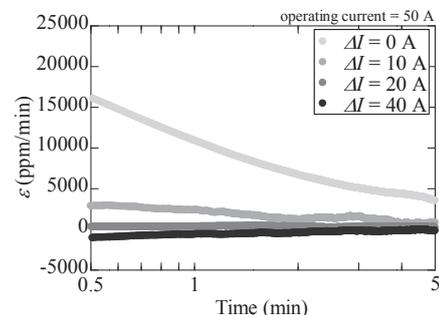


Fig.2 Time dependence of changing rate of magnetic flux density as a function of overshoot current, ΔI .

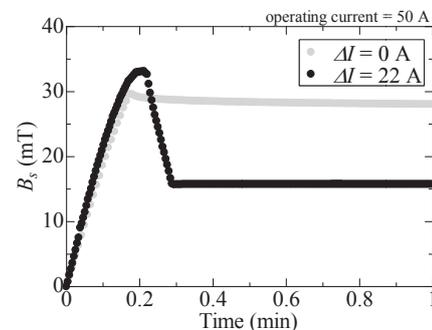


Fig.3 Time change of magnetic flux density induced by screening current as a function of overshoot current, ΔI .

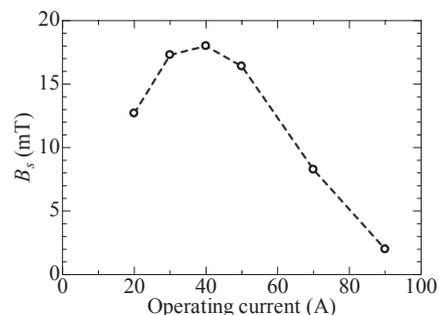


Fig.4 Magnetic flux density induced by screening current at $\varepsilon \approx 0$ as a function of operating current.

参考文献

1. Y. Yanagisawa and H. Maeda: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.) Vol.48 No.4 (2013) p165-171

MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発Ⅲ-⑦

～300mm ボアコイルの通電特性解析～

Research and development of the very stable magnetic field coil system
fundamental technology for MRI Ⅲ-⑦

- Characterization of the HTS coil having a 300mm diameter bore-

中村 武恒, 川端 優花 (京大); 横山 彰一 (三菱電機)

NAKAMURA Taketsune, KAWABATA Yuka (Kyoto Univ.); YOKOYAMA Shoichi (MITSUBISHI)

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

1. はじめに

我々は、MRI 用高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発プロジェクト[1]において、高温超電導コイルの遮蔽電流特性ならびに非線形電流輸送特性に関する検討を実施している。本講演では、Gd 系 300 mm ボアコイルの非線形通電特性について、その温度特性と線材長手方向バラツキの関係を解析的に検討したので報告する。

2. 電磁場解析モデルと解析方法

300 mmボアコイルの詳細については、別途報告されているので割愛する[2]。まず、同コイルに使用した短尺試料について、その電界-電流密度特性の実験結果をパーコレーション遷移モデル[3]に基づいて定式化した。その際、温度68 K程度までの実験結果について、遺伝アルゴリズムを使用してパラメータフィットし、温度20 K程度までの通電特性評価に使用した。

次に、線材の超電導層厚や冷却時絶縁層厚などを考慮した詳細な三次元解析モデル(軸対称モデル)を作成し、強制通電条件における正確な空間磁場ベクトル分布を求めた。また、当該磁場ベクトルを使用して、コイル内各要素の局所電圧を計算し、それを足し合わせることでend-to-endの総電圧や最大局所電界を求めた[4]。さらに、上記した短尺試料の電界-電流密度特性について、長手方向特性のバラツキをWeibull関数によって与え[5]、その統計的検討を行った[4]。

3. 解析結果

Fig. 1には、3次元有限要素法によって得られた中心磁場3 T発生時の磁束密度コンター図を示す。同図に示すように、コイル内最大磁束密度は4.3 T程度である。また、Fig. 2には、それぞれ(a) 77 Kおよび(b) 20 Kにおける最大局所電界を示すが、温度が低下するほど長手方向における特性バラツキの影響が顕著になっている。講演当日には、上記方法を用いた解析結果の詳細を報告する予定である。

謝辞

本研究は、H25・26 年度、経済産業省の産業技術研究開発委託費、および H27 年度、国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業のうち高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」により委託・支援を受け実施したものである。解析の一部について、京都大学工学部電気電子工学科(現 同大学院工学研究科電気工学専攻)唐島智治氏に協力頂いた。

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 93, 3A-a01 (2016).
2. T. Matsuda, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 92, 1A-p02 (2015).
3. T. Kiss et al.: Physica C, vol. 392, pp. 1053-1062 (2003).
4. T. Nakamura, et al.: TEION KOGAKU, vol. 48, no. 4, pp. 178-186 (2013).
5. Y. Shibayama et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 89, 3A-p04 (2014).

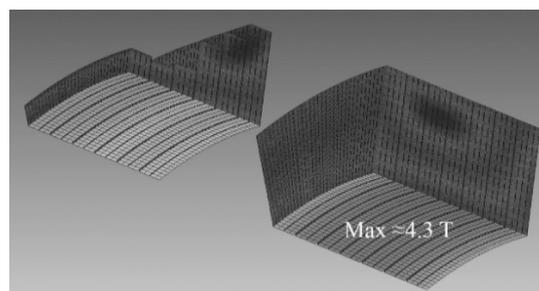
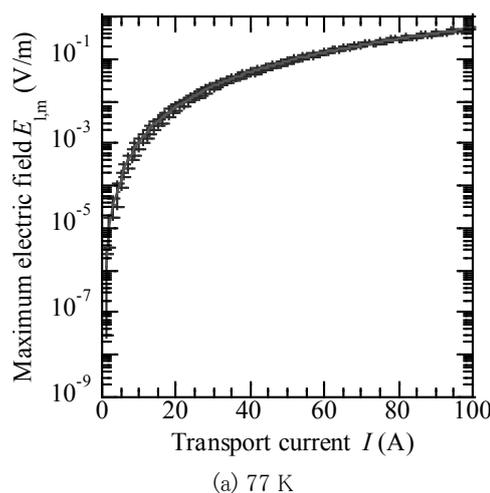
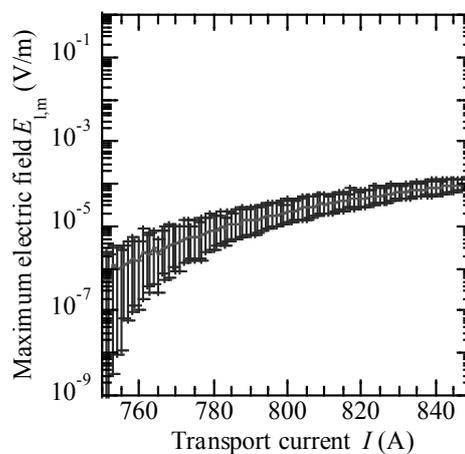


Fig. 1 3D contour plot of magnetic flux density in 300 mm diameter bore HTS coil



(a) 77 K



(b) 20 K

Fig. 2 Maximum electric field ($E_{l,m}$) vs. transport current (I) characteristics of 300 mm bore diameter coil, of which consider the longitudinal distribution of critical current

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(8)

-2 m モデル磁石の製作および冷却・励磁試験

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (8)

- 2 m model magnet fabrication and test results

榎本瞬, 菅野 未知央, 中本 建志, 川又弘史, 岡田尚起, 岡田竜太郎, 東憲男,
荻津透, 佐々木憲一, 木村誠宏, 田中賢一, 大島洋克, 菅原繁勝, 高橋直人 (高エネ研);

Andrea Musso and Ezio Todesco (CERN)

ENOMOTO Shun, SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, KAWAMATA Hiroshi, OKADA Naoki, OKADA Ryutaro,
HIGASHI Norio, OGITSU Toru, SASAKI Kenichi, KIMURA Nobuhiro, TANAKA Kenichi, OHATA Hirokatsu, SUGAWARA

Shigekatsu and TAKAHASHI Naoto (KEK);

MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail : enoshun@post.kek.jp

1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ミノシティを現行 LHC の 10 倍以上である 3000 fb^{-1} まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。このために特に重要になるのが ATLAS 及び CMS 実験衝突点近傍の加速器システムの性能向上であり、KEK はこの中でビーム分離超伝導双極磁石 (D1 磁石) の開発を担当している。現行の D1 は 6 台の常伝導磁石から構成されているが、これを超伝導化することで、主双極磁場を 1.28 T から 5.6 T (運転温度 1.9 K、運転電流 12 kA) まで高磁場化でき、磁石長を 15 m 短縮することができる。これにより、衝突点直近の四極磁石の磁石長が増加するにも関わらず、新たにクラブ空洞を設置する空間を確保できるというメリットがある。

D1 磁石製作の技術的課題として、ボア径 150 mm という大口径化に伴ってより顕著になる鉄ヨークの飽和を考慮した磁場設計、25 MGy 以上と想定される放射線に耐え得る絶縁材料を用いた磁石開発、大口径に起因する組み立て時や励磁時のコイルの大きな変形量を考慮した設計の必要性などがある。実機の機械長は約 6.7 m であるが、原理検証のために KEK で 2 m 長のモデル磁石の製作を行っており、本発表ではモデル磁石 1 号機の製作および試験結果について報告する。

2. コイル製作

コイル巻線、キュアリングについては既報の通りである [1]。Cu/NbTi ラザフォードケーブルおよび耐放射線性 GFRP 製のウェッジ、エンドスペーサーを用いて巻線を行った。コイル直線部 2 次元断面は 4 ブロック、合計 44 ターンのケーブルで構成されている。

3. 絶縁組み付け

コイルの外径面にクエンチ保護ヒーター (QPH)、対地絶縁用カプトンシート、プラスシューを組み付けた。QPH は厚さ 25 μm 、幅 15 mm のステンレス箔をポリイミドシートで挟んだ構造で、mid-plane から 1 番目の低磁場のコイルブロックの 9 ターンをカバーしている。

4. カラーリング

カラーはコイルの位置決めとコイルとヨーク間のスペーサーの役割を担う。本磁石では、ダイポールコイルにもかかわらず、4 分割のカラーを採用した。材質は非磁性のステンレス製で、精密打ち抜き技術により製作された。カラー板を積層したサブスタックをコイル周囲に配置し、4 方向から油圧プレスで押し込みながらコイルの直線部およびリターンエンドに組み付けた。一方、リードエンドについては、円筒を 4 分割した構造の GFRP 製カラーによりリードをクランプした。

5. ヨーキング

ヨークは上下 2 分割構造であり、精密打ち抜きにより製作した。ヨーク板を積層したサブスタックをカラードコイルに組み付けた。ヨークの肩を油圧プレスにより押し込み、ヨークのキヤ溝が揃った後、キヤを挿入した。この工程で

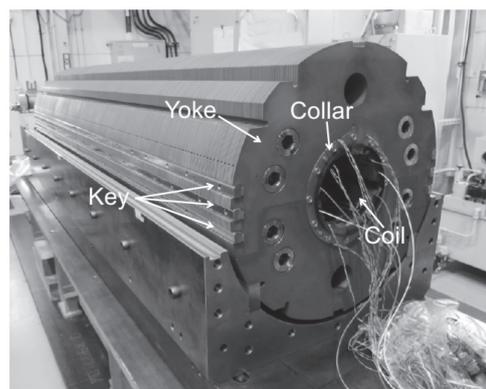


Fig. 1 2 m model after yoking.

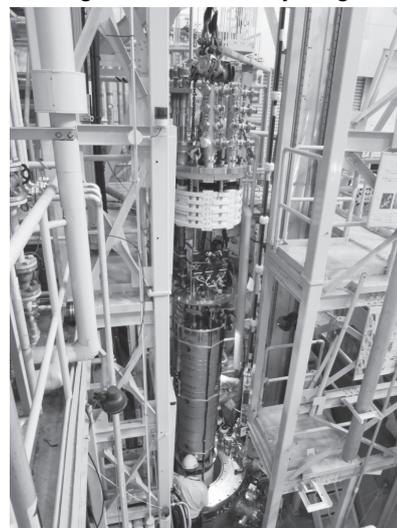


Fig. 2 Insertion of the 2m model magnet to the 9 m-deep-vertical cryostat.

励磁時の電磁力に抗する圧縮の予備応力をコイルに対して負荷した。Fig. 1 にヨーキング後の写真を示す。さらに、シェル、エンドリング溶接を経て磁石製作が完了した。

6. まとめ

LHC の高輝度化アップグレードの一環として、D1 磁石の 2 m モデルの製作し、冷却・励磁試験を進めている。Fig. 2 に示すように、完成した磁石を 15 kA のカレントリードを有する試験スタンドに接続し、深さ 9 m の縦型クライオスタットに挿入した。これまでに 4.45 K および 1.9 K でのクエンチ試験によりトレーニング性能の確認および磁場測定を行った。結果の詳細は当日の講演で報告する。

参考文献

[1] M. Sugano et al, Abstract of CSJ Conference, Vol.92(2015) 198.

磁気シールド材料の低温透磁率

Permeability of magnetic shielding material for use at cryogenic temperatures

増澤 美佳, 土屋 清澄(KEK); 榊原 満(株式会社 オータマ)

MASUZAWA Mika, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); SAKAKIBARA Mitsuru (OHTAMA CO.,LTD)

E-mail: mika.masuzawa@kek.jp

1. はじめに

磁気シールド技術を必要とする分野は、基礎物理実験から生体磁気、電子・強磁場機器まで多岐にわたっている。磁気シールド技術はその応用分野や対象とする磁場により大きく異なるが、シールド方法で分類すると、シールドしたい空間をシールド材料で覆う方法(パッシブシールド)とシールドしたい空間に存在する磁場を打ち消すコイルを作り、その励磁によりシールドする方法(アクティブシールド)がある。本稿ではパッシブシールド用材料、特に地磁気程度の磁場環境下で使われる磁気シールド材料の特性に焦点をあてて発表する。

2. 磁気シールド材料の透磁率

常温地磁気環境下での磁気シールドによく使われるパッシブシールド材料にパーマロイがある。低温用に開発された磁気シールド材は何種類か市場に出回っているが、それらに共通する特長はニッケル成分の重量比が $\sim 80\%$ と高く、他にモリブデンや銅で数%、残りの $\sim 15\%$ が鉄という成分比になっている点である。また熱処理温度も例えば 1170°C程度とパーマロイ材の処理に比べてやや高めである。Fig. 1 に鉄材、常温用シールド材、低温用シールド材の透磁率を示す。測定はリングサンプルを用いて室温と液体ヘリウム温度で行っている[1, 2]。低温用磁気シールド材の一つである Cryophy は低温でも透磁率劣化が小さく 100000 を越えていることがわかる。鉄材は透磁率が他のシールド材に比較して一桁以上小さく、また最大透磁率を与える外場が他の材料に比べて高いことから地磁気レベルのシールドには不向きであることもわかる。

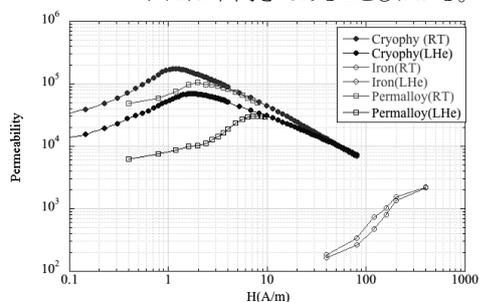


Fig. 1 Permeability for various materials at room temperature (RT) and liquid helium temperature (LHe).

3. 低温用材料の特性

低温用磁気シールド材は熱処理の仕方、取り扱い方によっては十分な性能を発揮することが出来なくなる。例として Fig.2 に Cryophy 透磁率の熱処理温度依存性を示す。

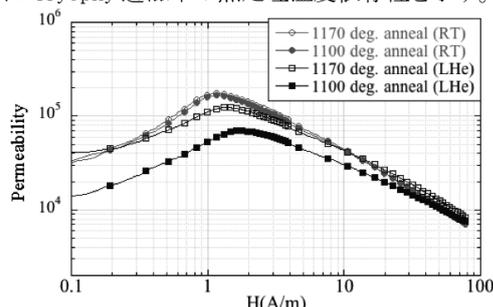


Fig. 2 Permeability dependence on the annealing temperature.

熱処理は工場の炉の通常運転温度の 1100°Cとメーカー推奨温度の 1170°Cで行った。室温では 1100°Cと 1170°Cの差はないが低温で大きな差が出るのがわかる。次に Cryophy リングサンプルに意図的に Fig.3 にあるような治具を使って歪みを与えた時の透磁率劣化を Fig.4 に示す。歪みは Δt をサンプルの厚み、 R を Fig.3 にある曲げ治具の極率半径として以下に表されるパラメータ ρ で表現した。Fig.4 は $\rho=0$ (歪み無し)、0.25%、1.5%の時の室温での透磁率を常温用シールド材(図中P)と低温用シールド材(図中C)の2種についてプロットしたものである。どちらの材料においても透磁率の甚だしい劣化が見られ、また透磁率最大を与える外場もより強い方へシフトすることがわかった。

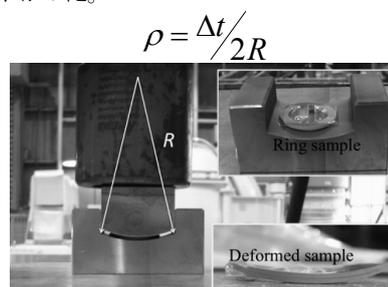


Fig. 3 The setup for bending the ring samples is shown. Template blocks with different R are used to achieve different deformation to the sample rings.

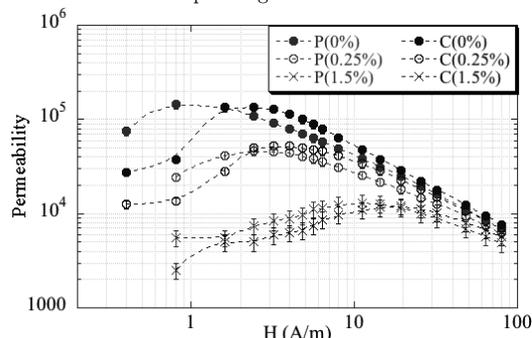


Fig. 4 Permeability for $r = 0$ (no mechanical stress is added), 0.3 and 5 % for two samples "P" and "C" measured at the room temperature.

4. 結論

低温用磁気シールド用材料の特性についてリングサンプルを使って調べた。常温用に比べて低温での透磁率劣化は小さいが、熱処理温度によっては低温での性能が十分に発揮出来ないことがわかった。またサンプルに歪み応力がかかってしまうと透磁率劣化が見られることもわかった。

参考文献

1. K. Tsuchiya, et.al., "Cryomodule development for superconducting RFTest Facility (STF) at KEK," Proc. of the 2006 EPAC, Edinburgh, Scotland, 26-30 June 2006.
2. M. Masuzawa, A. Terashima, and K. Tsuchiya, "Magnetic Properties of Shielding Materials for Superconducting Cavities," *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, vol. 22 No3, p3500104, June, 2012.

S-イノベ加速器マグネットプロジェクトにおける モデルマグネットの小電流磁場測定試験

Magnetic field measurement of model magnet in the small current of S-Innovation accelerator magnet project

李 陽, 坂 洋輔, 曾我部 友輔, 富永 直樹, 栗山 靖敏, 上杉 智教, 武藤 正文, 石 禎浩, 森 義治, 雨宮 尚之(京大);
吉本 政弘(原子力機構); 小柳 圭, 石井 祐介, 来栖 努(東芝); 荻津 透(KEK); 野田 耕司(放医研)

Li Yang, SAKA Yosuke, SOGABE Yusuke, TOMINAGA Naoki, KURIYAMA Yasutoshi, UESUGI Tomonori, MUTO Masayuki, ISHII Yoshihiro, MORI Yoshiharu, AMEMIYA Naoyuki(Kyoto University); YOSHIMOTO Masahiro(JAEA); KOYANAGI Kei, ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu(TOSHIBA); OGITSU Toru(KEK); NODA Koji(NIRS)

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

1. はじめに

「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」において、要素技術検証を目的として、モデルマグネットを製作し、初期実験として小電流磁場測定を開始した。モデルマグネットの外観とコイルシステムの概念図を図 1 に、コイルの正面図と上面図ならびに本稿で用いた座標系を図 2 に示す。小電流磁場測定の主な目的は、コイル製作精度・冷却によるコイル変形・線材磁化などが磁場精度に与える影響や鉄シムの効果の予備的評価である。今回は、冷却によるコイル変形・線材磁化が磁場精度に与える影響と鉄シムの効果についての評価の第一報について報告する。

2. 実験方法

ホールセンサを先端に装着したロッドをマグネット室温ボアに挿入し、ロッドをロボットで 3 次元的に動かすことによりマグネット発生磁場分布を測定した。磁場分布測定に先立ち、電流ランプアップ後約 1 分で磁場が十分に安定し、かつ、磁場に再現性があることを確認した。

3. 実験結果

3.1 冷却の影響

温度変化によるコイル変形の影響の評価は、120 K(常伝導状態)で 0.5 A の電流を流した場合の磁場から室温状態で 0.5 A の電流を流した場合の磁場を差し引いた値で行った。次項との比較のため電流値 10 A 相当になるよう上記差分値を 20 倍した値を図 3 にプロットした。

3.2 線材磁化の影響

線材磁化の影響の評価は、4 K(超伝導状態)で 10 A の電流を流した場合の磁場から、120 K(常伝導状態)で 0.5 A の電流を流した場合の磁場の 20 倍の値を差し引いた値で行った。この値を図 4 にプロットした。

3.3 鉄シムの効果

マグネット室温ボアの上下に鉄シムを入れるスロットが 16 本配置されており、それらの全てに鉄シムを挿入し、鉄シムの効果について調べた。鉄シムを入れることにより中央面で最大 10 mT 程度磁場を変化させることができた。

4. まとめ

モデルマグネットの小電流磁場測定により、冷却によるコイル変形や線材磁化がマグネット発生磁場に与える影響、鉄シムの効果について調べた。今回は限られた条件下での実験結果について報告したが、今後、追加の実験とデータ解析を続け、電流値も徐々に上げて実験を進めていく予定である。

謝辞

本研究は科学技術振興機関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。

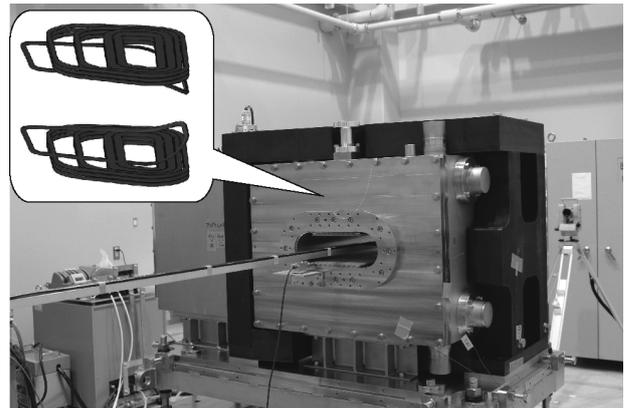


Fig.1 Outlook of model magnet and schematic of coils

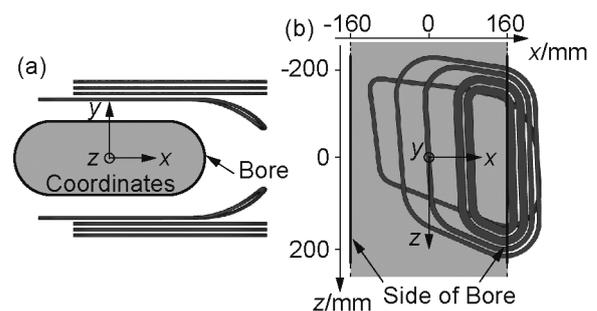


Fig.2 Schematics of coils and bore: (a) front view; (b) top view

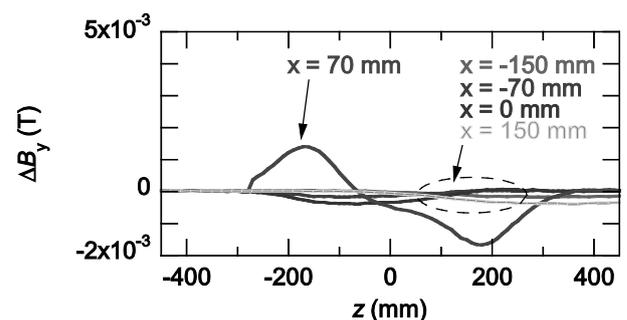


Fig.3 Influence of cooling down on midplane

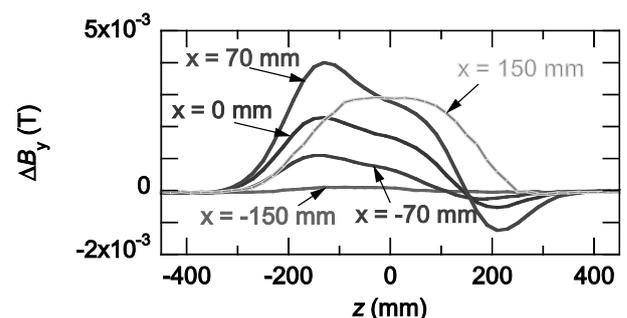


Fig.4 Influence of magnetization on midplane

スパイラルセクタ型 FFAG 加速器向けモデルマグネットの試作

Fabrication of a model magnet using coated conductors for spiral sector FFAG accelerators

小柳 圭, 高山 茂貴, 久保 洋一, 田崎 賢司, 折笠 朝文, 石井 祐介, 来栖 努(東芝);
 雨宮 尚之, 森 義治, 石 禎浩(京大); 吉本 政弘(原子力機構); 荻津 透(KEK)

KOYANAGI Kei, TAKAYAMA Shigeki, KUBO Yoichi, TASAKI Kenji, ORIKASA Tomofumi,
 ISHII Yusuke, KURUSU Tsutomu (Toshiba);

AMEMIYA Naoyuki, MORI Yoshiharu, ISHI Yoshihiro (Kyoto Univ.); YOSHIMOTO Masahiro (JAEA); OGITSU Toru (KEK)

E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

1. はじめに

JST 国プロ S イノベのプログラム「高温超伝導を用いた高機能、高効率、小型加速器システムへの挑戦」では、スパイラルセクタ型 FFAG (Fixed Field Alternating Gradient: 固定磁場強収束) 加速器への高温超伝導の適用を検討している。加速器で求められる磁場分布を超伝導コイルによる電流配置で実現するため、複雑な形状に巻線する RE 系変形鞍型コイルの試作に取り組んできた。この複雑形状の RE 系コイル巻線技術の確立と、発生磁場の検証を目的として、加速器用磁石実機の実現に必要なキー技術を盛り込んだ「モデルマグネット」を設計・試作した。本発表では、本モデルマグネット用コイルの構成とマグネットの設計および試作結果について報告する。

2. RE 系コイルの構成

モデルマグネットの主要諸元は、使用線材量の低減やビーム方向漏れ磁場の低減、テープ形状の RE 系線材での巻線性などを考慮しながら本プログラムにて設計した[1]スパイラルセクタ型 FFAG 加速器実機の諸元に基づいて決定した。モデルマグネットのコイル構成の概略を Fig.1 に示す。実機同等のネガティブバンド曲率を持つ 4 個のブロック状平面コイル A~D を入れ子に配置したコイル 3 層と、曲率半径 150 mm の長円形断面ダクトに沿う形状の片立体コイル E とで計 13 個のコイルからなる片側コイル群を構成し、これを対向させてその間にビームダクトを設ける配置としており、ミッドプレーンに FFAG 加速器マグネットを模擬した非対称の磁場を発生する。コイルには幅 4mm の IBAD-PLD 線材を採用し、使用線材長は約 2km である。平面コイルおよび片立体コイルの諸元を Table 1 に示す。

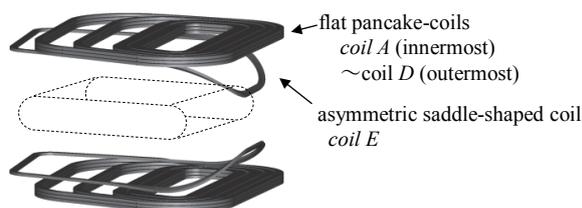


Fig. 1 Schematic view of the REBCO coils for the model magnet.

Table 1 Specifications of the REBCO coils

	coil A	B	C	D	E
bending radius of the negative-bend part, mm	3262	3186	3035	2884	2700
radius of the beam duct, mm	-	-	-	-	150
number of turns	100	100	60	50	50
number of coils	6	6	6	6	2
conductor length/(coil), m	79.5	94.0	70.6	68.4	75.0

3. モデルマグネットの試作

巻線したコイルは、ブロック状の単体毎に液体窒素中で通電試験した後、冷凍機で伝導冷却するためのアルミニウム合

金製のシェルを取付けて接続しユニット化した。コイルユニット毎に再度通電試験を実施して超伝導特性を評価した後、積層し直列に接続して真空容器に組込んだ。モデルマグネットの外観を Fig.2 に示す。マグネットは超伝導コイルを組込んだ容器と伝導冷却用 GM 冷凍機を組込んだ容器とを繋げた構成とし、コイルに合わせた形状の室温鉄心を取付けた。室温ポアは長円形断面形状とし、鉄シムを取付けるスロットを設けた。また、3次元走査プローブシステム等の発生磁場精度検証用の測定機器との位置出しを考慮して容器に基準点を設け、アライメント調整用の架台に搭載した。冷凍機の運転を開始後、コイルは約 100 時間で温度 3.7K に到達し (Fig.3)、現在、発生磁場の評価試験に着手している。今後、通電電流値などをパラメタとした試験を順次実施する予定である。

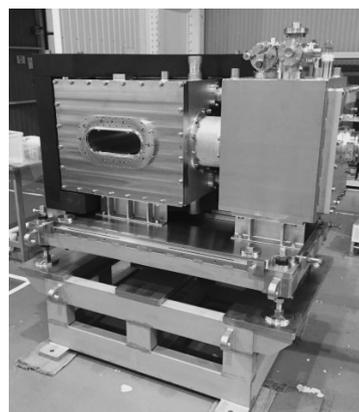


Fig. 2 Outer view of the model magnet.

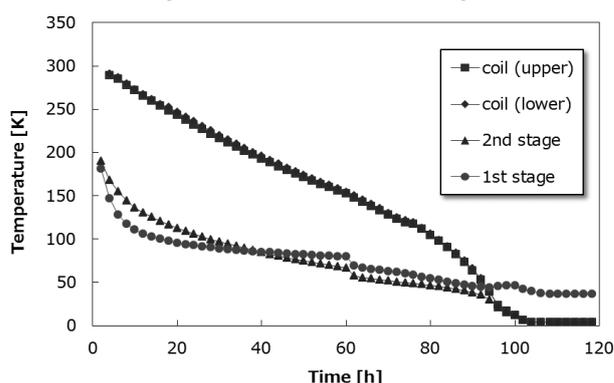


Fig. 3 Coil temperature during the initial cooling process.

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。

参考文献

1. K. Goda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.24 Issue 3 (2014) p.4402605

超電導フライホイール蓄電装置実証機の開発状況～2016 春～

Demonstration Machine of Flywheel Energy Storage System using Superconducting Magnetic Bearing in 2016 spring

山下 知久, 小方 正文, 長嶋 賢(鉄道総研); 前田 忠和(クボテック);
松岡 太郎(古河電工); 清水 秀樹(ミラプロ); 堀内 伸一(山梨県)

YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI); MAEDA Tadakazu (KUBOTEK);
MATSUOKA Taro (FURUKAWA ELECTRIC); SHIMIZU Hideki (MIRAPRO); HORIUCHI Shin-ichi (YAMANASHI Pref.)
E-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

1. はじめに

フライホイール蓄電システムは、装置に内蔵した大型の円盤(フライホイール)を回転させることで電力を運動エネルギーに変換して貯蔵し、必要に応じて再び電力に変換する充放電可能なシステムである。今回開発した実証機[1],[2]の特徴は RE 系の高温超電導材料からなるコイル(固定側)およびバルク(回転側)で構成される高温超電導磁気軸受(SMB)を新規に開発したことで負担浮上力を飛躍的に向上させた点である。具体的には直径 2 m、質量 4,000 kg の世界最大級の CFRP 製大径フライホイールを鉛直方向に支持する SMB を、その支持荷重に比して極めて小型にすることができた。(図1)

図 2 に実証機の内部構成を示す。実証機はフライホイールを回転数 3,000～6,000 min⁻¹ で運転すると、蓄電容量が 100 kWh となる設計である。

実証機は山梨県米倉山の太陽光発電所(出力 1 MW)の実証実験施設に設置され(図 3)、2015 年秋からこれまで 8 カ月間で実施した回転速度向上試験、太陽光発電電力の出力変動の平滑化効果の検証試験および異常時想定試験など、系統安定化用蓄電システムの信頼性・耐久性に関する各種検証結果を報告する。

2. 実証機での検証成果の概要

- ①系統連系試験で、発電電力の平滑化効果を検証できた。
- ②回転速度向上試験に手間取り、蓄電容量は 25kWh の実証に留まったものの、出力は最高出力 300kW を確認できた。
- ③SMB は運転開始以来一切トラブルなく、これまでの 8 カ月の

試験期間で安定浮上は延べ 3,000 時間超を記録した。

- ④停電等の冷凍機停止でもフライホイールの回転が停止するまで安定浮上を維持できる保冷設計の妥当性を検証した。

Table 1 Test results of FESS demonstration machine

Output power / Storage capacity	300 kW / 25 kWh
Maximum rotating test speed	3018 min ⁻¹
Cooling atmosphere	Around 10 Pa @ Gas Helium
Minimum reach temperature of SMB	Coil ; Around 18 K Bulk ; Around 25 K
Power consumption of SMB	Less than 1 % for Output power
Stable levitation time of SMB	Total time ; 3,000 hours

3. 今後の予定

NEDO 助成事業は本年 2 月末日で終了したが、本実証機は今後も SMB の長期信頼性・耐久性検証試験や、鉄道用等の新たな開発の要素検証試験等に活用していく予定である。

本開発は、平成 22 年度から NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」により鉄道総研、クボテック、古河電工、ミラプロ、山梨県が共同で実施してきたものである。

参考文献

1. H.Hasegawa, et al.: Abs. of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.11
2. M.Ogata, et al.: Abs. of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.116

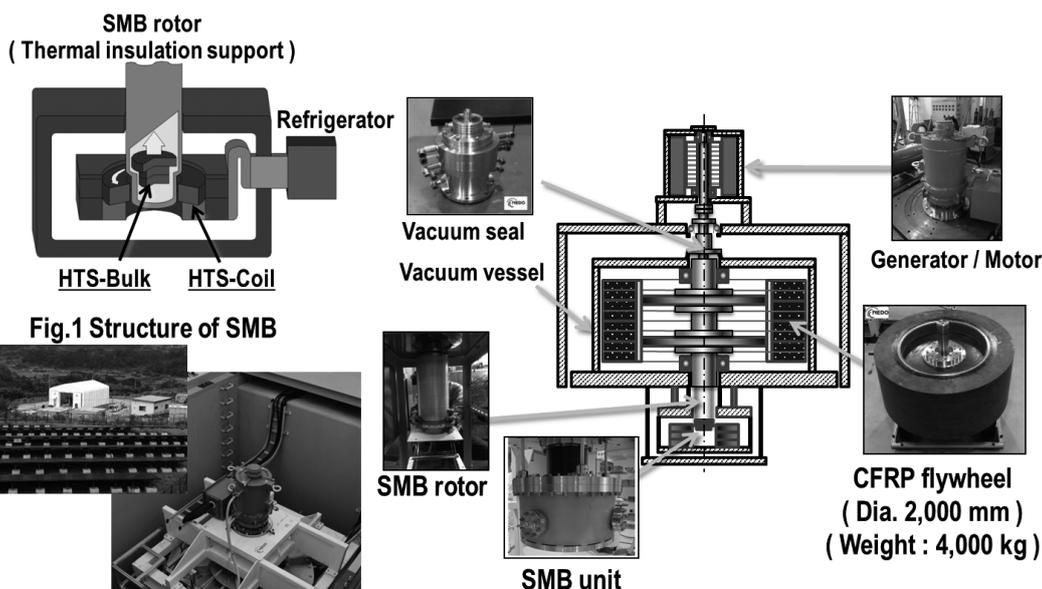


Fig.2 Structure of FESS demonstration machine
(Output power : 300 kW , Storage Capacity : 100 kWh)

Fig.3 Outside view of FESS demonstration machine

超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受(SMB)の開発 ～SMBの安定性検証～

Development of Superconducting Magnetic Bearing for Flywheel Energy Storage System -Stability Verification of SMB-

中尾 健吾, 松岡 太郎, 向山 晋一(古河電工); 山下 知久, 小方 正文, 宮崎 佳樹(鉄道総研)
NAKAO Kengo, MATSUOKA Taro, MUKOYAMA Sinichi (Furukawa Electric);
YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, MIYAZAKI Yoshiki (RTRI)
E-mail: mr251726@mr.furukawa.co.jp

1. はじめに

NEDO 助成事業により 2015 年秋から山梨県米倉山の太陽光発電所にて超電導フライホイール蓄電装置(FESS)の実証試験を行ってきた。FESS は超電導磁気軸受(SMB)によって質量4,000 kgのフライホイールをギャップ20 mmで浮上、縦回転でき、軸受部での摩擦等の機械的な損失が無いのでメンテナンス性も優れている。^[1]SMBの浮上原理は、超電導コイルで発生する磁界と零磁場冷却した超電導バルクのシールド効果により得られる大きな反発力を利用するものである。^[2]

FESS は山梨県米倉山へ設置後、太陽光発電所の発電電力の平滑化効果検証のための系統連試験が進められ、それに合わせてSMBの安定性検証を実施してきた。今回は前報^[3]の2,000 min⁻¹での高速回転時のSMBの安定運用に関する速報に続き、長時間運用時の浮上安定性、長時間運用に対する健全性、SMBのガスヘリウム圧力の安定範囲等について報告する。

2. 長時間安定浮上の検証状況

米倉山では、これまで約8か月間の検証期間で2,500時間以上の通電浮上を実施し、工場試験と合わせて延べ3,000時間以上の浮上を行ったことになる。なお、連続して1,000時間以上にわたる浮上試験を実施し、通電電流と浮上高さの間に大きな変化は無く、制御範囲(±0.5 mm)内で長時間安定浮上できることを確認した。

また、SMBのガスヘリウム圧力を変更させた試験を行い、Table 1にその結果を示した。1 Paから1,000 Paの範囲において浮上が可能であり、部分冷却法が成立する圧力範囲が幅広いことを実機でも確認した。さらに、浮上に必要な通電電流に違いが無いことから各圧力下でバルク温度も大きな違いはなく十分な部分冷却ができていると考えられる。

3. 高速回転時の浮上高さ制御特性

Fig. 1に系統連携系試験時の回転数と浮上高さの時間依存性を示す。充放電の為、トルクをかけて回転数が大きく増減しても浮上高さに変化は無く、安定して浮上を続けていることがわかる。また、3,000 min⁻¹で回転させた際も浮上高さを超電導コイル温度の変化はそれぞれ0.5 mm以下、1 K以下と小さく、SMBの浮上安定性に影響は見られなかった。これらの事からフライホイールの3,000 min⁻¹までの運用に安定浮上可能なことを検証できたと考えている。

4. SMBの長期耐久性試験

SMBの長期耐久性検証のため励消磁を100回繰り返す試験を実施し、Fig. 2に示したような緊急時を想定した急速消磁試験も5回行った。これらの試験後に浮上特性に明確な変化はみられていない。コイルの劣化評価のためのI_c測定結果については当日報告する。

5. まとめ

米倉山におけるFESSの系統連系試験とSMBの負荷試験を通し、SMBの安定性を検証した。系統連系試験でのロータ

の加減速を伴う高速回転時も安定した浮上が可能であり、3000 min⁻¹までの運用で安定浮上可能なことを検証した。

SMBの長期運用を想定して100回の繰り返し励消磁や真空破壊に伴う急速な温度上昇、緊急停止による急速消磁を行った後もSMBの浮上特性に変化は見られず、裕度のある設計となっていることを裏付ける結果が得られたと考えている。

6. 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)の助成事業として実施したものである。本超電導コイルの設計は中部電力(株)の「YOROI コイル」構造を採用している。

Table 1 SMB Pressure and Operation Properties

Pressure (Pa)	Coil temperature (K)	Operation Current (A)	Availability
less than 0.1	17.3	-	×
1.06	17.4	80	○
13.3	18.0	80	○
1.00 × 10 ²	19.3 (excitation)	80	○
1.00 × 10 ³	19.2 (excitation)	80	○

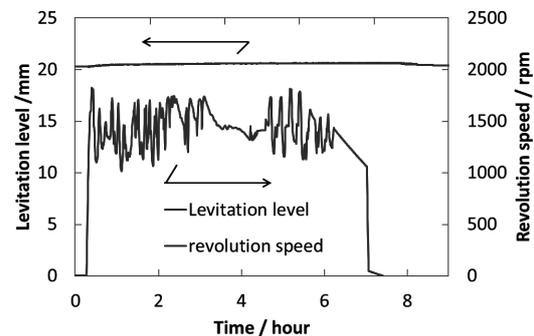


Fig. 1 Levitation height while power system connection test

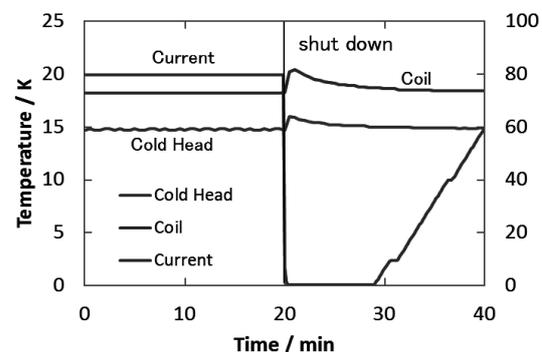


Fig. 2 Temperatures of SMB at rapid degaussing test

参考文献

- M. Ogata, *et al.* Abstracts of CSSJ conference, vol. 92 (2015) p.116
- K. Nagashima, *et al.* QR of RTRI, vol. 49 No.2 (2008) 127-132
- K. Nakao, *et al.* Abstracts of CSSJ conference, vol. 92 (2015) p117

20 kW 級高温超伝導誘導同期モータにおける出力特性と回転子巻線抵抗の関係 Relationship between output characteristics and rotor windings' resistance in a 20 kW class HTS induction/synchronous motor

郭 思宇, 池田 健一, 唐島 智治, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝 (イムラ材研)
GUO Siyu, IKEDA Kenichi, KARASHIMA Tomoharu, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);
ITOH Yoshitaka (IMRA MATERIAL)
E-mail: s-guo@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器(電車, バス, トラック, 自動車他)への実用を目指した高温超伝導誘導同期モータ(HTS-ISM: High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor)の研究開発を実施している¹⁾。前報²⁾では、定格出力 20 kW のプロトタイプ機について、2 倍以上の過負荷すべり出力 (41.3 kW) が実現可能なことを実験的に示していた。本報告では、回転子巻線抵抗を考慮した 2 次元有限要素法によって、上記実験結果を解析的に再現したので報告する。

2. 高温超伝導誘導同期モータの基礎特性

高温超伝導誘導同期モータの基本構造は、従来のご型誘導モータと同様である。そして、HTS-ISM の二次(回転子)巻線をビスマス系高温超伝導線材で置き換えることによって、従来(常伝導)モータに比較して飛躍的な性能改善が実現される¹⁾。

Fig.1には、HTS回転子巻線の概念図を示す。同回転子に磁束が捕捉されることによって、高効率な同期回転が実現される。さらに、始動時や過負荷時においても、HTSロータバーが磁束フロー状態に遷移して短時間すべり運転が可能である。このことは、超伝導モータにおいても、従来モータと同様に短時間過負荷耐量概念が成立する可能性を示唆している。

3. 解析方法

解析には、市販のソフト((株)JSOL製 JMAG-Designer[®])を使用した。Fig. 2には、20 kW級プロトタイプ機の2次元解析モデルを示す。本モデルに、実験と同じ駆動条件(一次電圧、一次周波数、および回転数(すべり))を与え、異なる負荷に対する回転特性を解析した。その際、HTSかご型回転子巻線の接触抵抗(主として、HTSロータバーとHTSエンドリングのハンダ接続抵抗)をフィッティングパラメータとして変化させ、機械出力の実験結果と一致する条件を求めた。

4. 結果と考察

Fig.3には、運転温度 77 K における過負荷実験結果(入力線間電圧: 225 V, 入力周波数: 60 Hz, 同期回転数: 1800 rpm)を示す(×印)¹⁾。同図に示すように、20 kW の準同期出力が実現されているだけでなく、2 倍以上(41.3 kW)の過負荷すべり出力を達成している(機械損除去後の結果)。

また、Fig.3には解析結果も●印として示す。さらにFig. 4には、上記実験結果とのフィッティングによって得られた回転子抵抗値 $R_{c,r}$ を示す。同図に示すように、 $R_{c,r}$ は $10^{-5} \Omega$ 程度であり、かつ機械出力に対してほぼ 2 次特性として変化することが明らかになった。なお、本抵抗値のオーダーについては、別研究によってもその妥当性が検証されている。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のプロジェクト“H24 年度戦略的創造研究推進事業先端的低炭素化技術開発(ALCA)”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の一環として実施されたものである。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, 5202304 (2015)
2. S. Guo, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 92, p. 163 (2015).

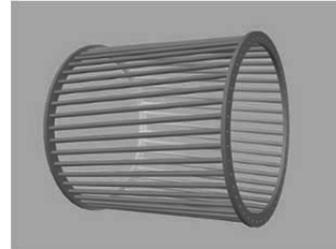


Fig. 1 Schematic diagram of squirrel-cage (rotor) windings

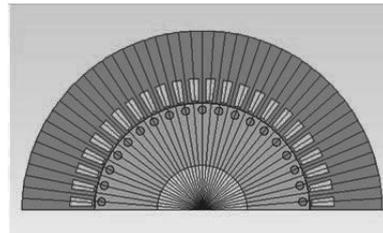


Fig. 2 Analysis model of a 20 kW class HTS-ISM

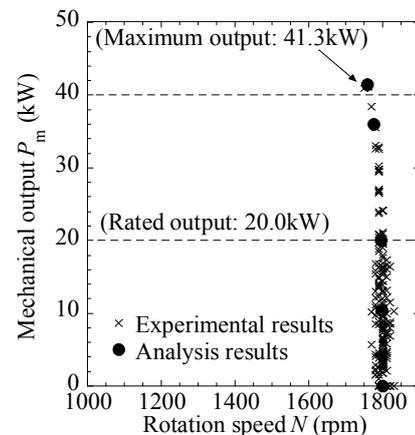


Fig. 3 Experimental and analysis results of load curve in a 20 kW class HTS-ISM (Input line voltage: 225 V, Frequency: 60 Hz)

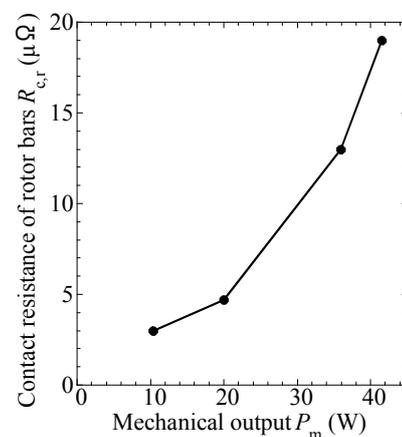


Fig. 4 Contact resistance as a function of mechanical output obtained from the fitting process of analysis results to the experimental ones (Fig. 3)

風力熱発電用超電導高温発熱機

Superconducting high-temperature heat generator for wind-powered thermal energy system

岡崎 徹(エネ総工研); 山田 穰(芝浦工大)

OKAZAKI Toru (IAE); YAMADA Yutaka (Shibaura Institute of Technology)

E-mail: t-okazaki@iae.or.jp

1. 風力熱発電の概要

風力熱発電が再エネの不安定性を一気に解決する革新的手段として注目を浴び始めている。システムは単純で、図1に示すように回転エネルギーを直接熱エネルギーに変え、高温蓄熱を利用して蒸気タービンにより安定発電する。蒸気タービンの効率は電池などの半分程度しかないが、高温蓄熱コストは電池と比べて1/20~1/100と極めて安価なため総合的なエネルギーコストで有利になる。また回転エネルギーを直接熱に変換するため重いダイレクトドライブ発電機が発熱機では1/10近い重量まで削減でき、ギア付きと変わらない設備コスト実現できる。これらを定量的に評価した結果、全体効率は落ちるものの蓄エネルギーコストを含めた全システムコストが大きく削減できるため、結果として電池で安定化された風力より遙かに経済的になる。さらに待機火力コストや系統強化費用も含めた従来型風力と比べても経済的になる[1]。

熱機械は高温になるほど高効率化するが、鉄のキュリー温度により600℃以上を得ることは難しい。超電導であれば1000℃を越える温度の磁性体が存在しない領域でも高磁場により導電体に渦電流を発生させられるため、システムの高温化・高効率化が可能となる。例えば700℃にて超臨界二酸化炭素タービンを利用すると熱電変換効率は通常の蒸気タービンの効率40%が50%に増加する[2]。この高効率化と超電導の採用などによる高コスト化を比較し経済合理性を検討した。

1. Intermittent Input

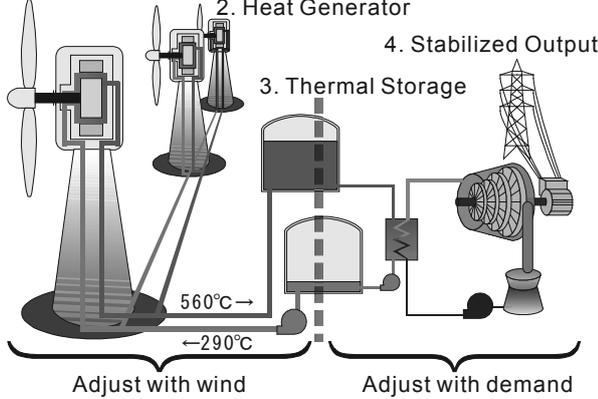


Fig.1 Configuration of Wind-powered Thermal Energy System (WTES)

2. 超電導発熱機の経済性検討

超電導発熱機の概略を想定した。従来の超電導風力発電機と同様にレーストラックコイルを円筒上にならべて多極界磁とする。電機子の代わりに大きな4m直径銅パイプを配置し、ここで渦電流発熱が生じさせる。常電動の場合、発電機の複雑な電機子配線が無くなることも発熱機軽量化の理由である。超電導化はこれをさらに軽量化する目的でなく、作動温度を上げる目的で採用される。超電導発熱機の諸元を表1に、断面を図2に示す。

この状態で発熱部、具体的には超電導コイル端部から55mm離れた位置に単体コイルで0.3Tの磁場を発生させるには30,000 ATが必要となる。コイルを20 Kに冷却し250 A通電とすると120ターンとなる。長径1.5 mのレーストラックが60個なので22 kmの線材が必要である。将来的な線材価格を2

Item	Value
Capacity	2MW
Rated Speed	15rpm
Outer Diameter	4m
Axis Length	1.5m
Number of Poles	60
Minor Outer Axis of HTS Coil	200mm
Major Outer Axis of HTS Coil	1500mm
Cold Thermal Insulation (-250°C-RT)	25mm
Room Temperature (R.T.) Gap	5mm
Hot Thermal Insulation (+700°C-RT)	25mm

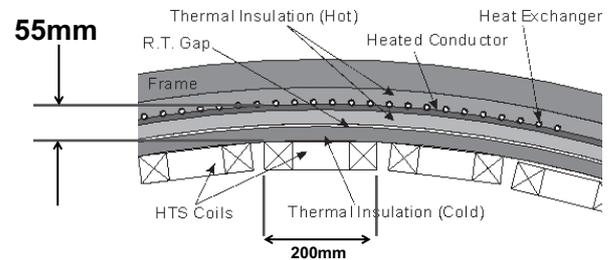


Fig.2 Cross section of Superconducting Heat Generator

千円/m とすると4千万円強となる。高温側断熱は、熱の逃げを許容し、かつマイクロサーム™を採用すると5mmで熱ロスが2%強となる。ここでは余裕を持って25mmとた。その他コイルの配置やバックヨークの付加などで必要線材量は大きく削減できる。渦電流の計算も含めて最適化の余地は大きい。

超電導化に許容されるコストは次のように考えた。ダイレクトドライブ風車はギア付き風車の建設コスト15万円/kW(欧州基準)から40%増となる。しかし故障が少なく発電コストは同等になる。この設備コスト増加無しにダイレクトドライブが実現できること、および効率向上25%を勘案すると2MW機で2億円の建設費増加が許容できる。20MW ウィンドファームを考えた場合、超電導化に10億円(1億円/基)、高性能熱機械導入に10億円の増加まで許容できる。10 MW 電気出力で10億円は10万円/kWに相当し、ベースとなる常電導風力熱で計上した設備費と併せ20万円/kWとなる。10MW 木質バイオマスプラントの全設備コストが30万円/kW程度と言われているため十分実現可能である。他に高温化による蓄熱材コストも削減できるがその効果は算入していない。長期平準化にはこの蓄熱材コストの削減も重要となる。特に季節間エネルギー蓄積になると熱化学反応の採用が必須で超電導の採用が必須となる。

参考文献

1. Toru Okazaki, Yasuyuki Shirai, Taketsune Nakamura, "Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage", Renewable energy, 83 (2015) pp. 332-338
2. Mahmood Mohagheghi, Jayanta Kapat, "Thermodynamic optimization of recuperated S-CO2 Brayton cycles for waste heat recovery applications", The international symposium - Supercritical CO2 power cycles (Sept.2014)