

無絶縁巻線技術に基づく積層型高温超電導コイルシステムの設計： 工学設計用数値解析技術

Design of a Multi-Stacked HTS Pancake Coil-System based on No-Insulation Winding Technique: An Analysis Technology for Dynamics Design

王 韜 (早稲田大学); 杜 双松, 丁 開忠 (中国科学院)

WANG Tao (Waseda University); DU Shuang song, DING Kaizhong (Chinese Academy of Sciences)

E-mail: michealwang@fuji.waseda.jp

1. はじめに

無絶縁高温超電導巻線技術(No-insulation コイル, 以下無絶縁コイル)は, 高温超電導コイルの高電流密度と高熱的安定性を同時に実現するコイル化技術として, 2011年にMITのハングループにより提案された。最近では, 無絶縁コイルの成立性と有効性について, 数値解析および検証実験により色んな検討を行ってきた[1, 2]。しかし, 無絶縁コイルがMRIやサイクロトロン加速器などのラージスケール応用を目指す積層コイルシステムへの適用性については, 有効な数値解析手法はまだ開発されていないため, 検討されていない。そこで, 我々は, 先行研究で開発された無絶縁コイルの基礎特性解析技術[1]に基づき, 積層無絶縁コイルシステムの特性を解析できるプログラムを開発した。本報では, 先行研究で提案された「Multi-Width winding technique」[3]を解析例として, 解析方法から始め, 実験値と比較しながら本数値解析の有効性, および「Multi-Width winding technique」の成立性について詳細に述べる。

2. 解析モデル

本研究で検討する積層型高温超電導コイルシステムモデルは, 等価回路分析に基づく電流解析, ビオ・サバルに基づく磁場解析および温度解析で構成された。まず, 電流解析では, 積層型パンケーキコイルシステムを, 垂直方向に若干個のサブコイルが直列した回路システムとして考えた。Fig. 1のように, サブコイルに流す電流は, 自己インダクタンス(L)だけではなく相互インダクタンス(M)にも影響されるとした。電気抵抗成分として, 無絶縁コイルの層間接触抵抗(R_c)およびサブコイルの超電導特性(R_{I-V} : I - V 特性)を考慮した。次に, 磁場解析では, 磁場が回路方程式で求められた各サブコイルの電流を用いてビオ・サバル法により計算した。また, 温度解析では, サブコイルの温度上昇が冷媒温度, 温度依存性を考慮した比熱とREBCO線材の密度, およびサブコイルの巻線体積を用いて求められた。最後に, 磁場, 温度, および磁場印加角度に依存するサブコイル全体の電気抵抗を求め, 最初の回路方程式にフィードバックし, 次ステップの電流と温度の計算に繰り返した。

3. 解析対象および解析結果

Fig.2(a)は本研究の解析対象であるMulti-Widthパンケーキコイルシステムを示す。このコイルシステムは, 幅が異なるREBCOテープで巻かれた7つのダブルパンケーキコイルで構成された。このコイルシステムがマグネットの小型化に有効なコイル構造として提案されたのは, 臨界電流への影響が大きい発生磁場の半径成分が強い箇所に幅が大きいテープ, 磁場の半径方向成分が弱い箇所に幅が小さいテープを使用することが考えられる(Fig.2(b))。また, 今回の解析により, 励磁時の積層型パンケーキコイルシステムの電流および発熱特性を明らかにしたので, その詳細について学会当日に報告する。

4. 謝辞

本研究は, 日本文部科学省科学研究費若手研究B(16K18068)のご支援の下, 行ったものとする。

Table.1 Specification of Multi-Width REBCO Pancake Coil

Parameters	Value
HTS wire width [mm]	2.5; 3.0; 3.5; 4.0
HTS wire thickness [mm]	0.08
Inner diameter [mm]	40
Outer diameter [mm]	50
Overall height [mm]	50
Number of DP coils	7
Turn per DP coil	120
Critical current @77 K [A]	25
Charging time constant [s]	0.81
Inductance [mH]	18.9

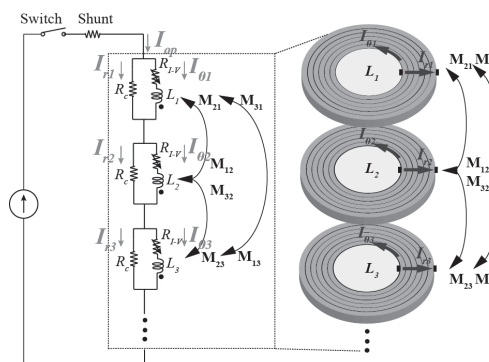


Fig.1 Equivalent circuit model for multi-stacked HTS pancake coil-system

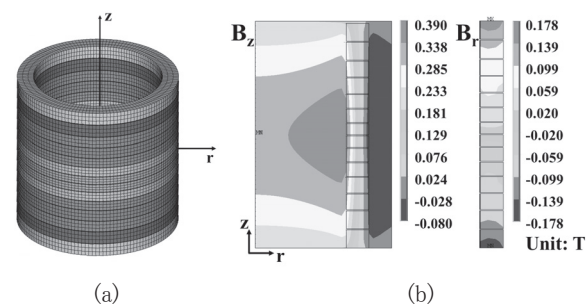


Fig.2 Multi-width pancake coil-system: (a) numerical model; (b) axial magnetic field distribution in longitudinal section, and radial magnetic field applied to the coil-winding, at operation current of 20 A.

参考文献

1. T. Wang, et al.: "Analysis on Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil during Over-Current and Sudden Discharging", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3, Art. No. 4603409, 2015
2. X. Wang, et al.: "Charging Behavior in No-Insulation REBCO Pancake Coils", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 25, No. 3, Art. No. 4601805, 2015
3. S. Hahn, et al.: "No-Insulation multi-width winding technique for high temperature superconducting magnet", Appl. Phys. Lett., Vol. 103 (2013) 173511

無絶縁巻線技術に基づく積層型高温超電導コイルシステムの設計： 非対称に分割されたコイル巻線の局所的インダクタンス計算法

Design of a Multi-Stacked HTS Pancake Coil-System based on No-Insulation Winding Technique: Calculation of Self/Mutual Inductances for Asymmetrical Segments in the Coil-Winding

王 韜 (早稲田大学); 杜 双松, 丁 開忠 (中国科学院)

WANG Tao (Waseda University); DU Shuangsong, DING Kaizhong (Chinese Academy of Sciences)

E-mail: michealwang@fuji.waseda.jp

1. はじめに

無絶縁高温超電導巻線技術 (No-insulation コイル, 以下無絶縁コイル) は, 高温超電導コイルの高電流密度と高熱的安定性を同時に実現するコイル化技術として, 2011年にMIT のハングループにより提案された。この技術の成立性と有効性を検証するために, 我々は, 大規模網状回路解析法に基づく電流分布解析および二次元有限要素法に基づく温度分布解析を連立し, 無絶縁コイル基礎特性を明らかにする解析プログラムを開発した。しかし, その解析プログラムはコイルの周方向に対称なメッシュしか導入できなかったため, メーカー級大口徑高温超電導コイル, あるいは積層型高温超電導コイルシステムの常電導転移特性解析に応用されると, (周方向分割数×巻数×積層数)²の程の巨大なマトリクスを数百回から数千回に繰り返して計算する必要があった。その原因により, 常に解析マシンのメモリアバを引き起こしている。この課題を解決するために, メッシュの数を減らすとともに解析精度を最大限に保証することが最も重要である。そこで, 我々は, 非対称なメッシュ (Fig. 1), 即ち, 発熱部あたりに緻密なメッシュ, その他の部分に粗いメッシュを導入することで, 数値計算の負荷を低減することを提案した。今回は, 非対称なメッシュを導入時, コイルの局所巻線同士間のインダクタンスの計算法について詳細に報告する。

2. 局所的インダクタンスの計算法

本研究に直面とする課題は, これまで開発された無絶縁コイルの特性解析用電流と温度分布の連成解析プログラムの計算容量と負荷を最大限に減らしながら解析精度を保証することである。特に, それは積層型パンケーキコイルシステムに重要である。そこで, 我々は, 積層型パンケーキコイルシステムに対して, Fig.2 に示すような簡易回路モデルとPEEC回路のハイブリッド回路モデルを開発した。この積層型パンケーキコイルの回路モデルで, 温度分布を検討しないコイルにはメッシュ分割をせず, 温度分布を検討するコイル (例えば常電導転移発生があるコイル) には熱計算を重視した非対称なメッシュ分割を行う。今回の報告は, 非対称なメッシュ分割による巻線の局所的インダクタンスの計算法を提案する。まず詳細な温度分布解析を行うコイル3 (Fig.2) の局所的巻線同士のインダクタンスを示す。

$$M_{i,j} = \frac{\mu_0 r_i r_j}{4\pi \lambda^2} \int_{\theta_i}^{\theta_i + \Delta\theta} \int_{\theta_j}^{\theta_j + \Delta\theta} \int_{h_i}^{h_i'} \int_{h_j}^{h_j'} \frac{\cos(\phi_i - \phi_j)}{R} d\phi_i d\phi_j dz_i dz_j \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{\sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\phi_i - \phi_j) + (z_i^2 - z_j^2)}} \quad (2)$$

ただし, r_i と r_j は二つの電流素片が中心に離れる距離を示す。 θ_i , $\theta_i + \Delta\theta$, θ_j と $\theta_j + \Delta\theta$ は, それぞれ電流素片 i , j の始点と終点に対応する角度である。なお, 非対称メッシュ導入時には $\Delta\theta_i \neq \Delta\theta_j$ の関係にある。 h_i , h_j , h_i' と h_j' は, それぞれ電流素片 i , j の高さの始点と終点を示す (積層型コイルシステムの場合, 子コイルの相対位置が異なるため, $h_i \neq h_j$ となる。)。 λ はコイル巻線の幅である。 ϕ_i , ϕ_j , z_i と z_j は積分変数である。

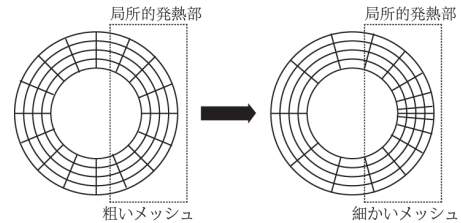


Fig.1 温度分布計算の精度を保証するメッシュ分割方法 (左図: コイルの周方向に対称なメッシュ; 右図: 発熱部に重視する非対称なメッシュ)

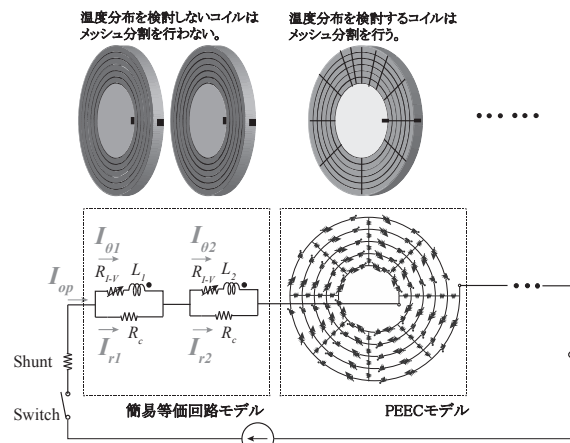


Fig.2 積層型無絶縁高温超電導コイルシステムにおける電流と温度の連成解析モデル (コイル3は温度分布を検討するコイル, それ以外のコイルは温度分布を検討しない。)

次に, コイル3以外のコイル同士間のインダクタンスは以下に示す。

$$M_{i,j} = \frac{\mu_0 N^2 r_i r_j}{2S_i S_j} \int_{r_i}^{r_i'} \int_{r_j}^{r_j'} \int_{\theta}^{\theta + 2\pi} \int_{h_i}^{h_i'} \frac{\cos \phi}{R'} dr_i dr_j d\phi dz_i dz_j \quad (3)$$

$$R' = \frac{1}{\sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos \phi + (z_i^2 - z_j^2)}} \quad (4)$$

そして, コイル3以外のコイルがコイル3の局所的巻線に対するインダクタンスを示す。

$$M_{i,j} = \frac{\mu_0 N r_i r_j}{2S_i S_j} \int_{r_i}^{r_i'} \int_{r_j}^{r_j'} \int_{\theta}^{\theta + \Delta\theta} \int_{h_i}^{h_i'} \frac{\cos \phi}{R'} dr_i dr_j d\phi dz_i dz_j \quad (5)$$

ここでは, ϕ は積分変数で電流素片同士間のなす角である。 N , S_i と S_j は巻数と2つの電流素片の横断面積である。なお, インダクタンス計算値の妥当性については, 先行研究の実験値と比較したので, 学会当日に報告する。

本研究は, 日本文部科学省科学研究費若手研究 B (16K18068) のご支援の下, 行ったものとする。

参考文献

1. Slobodan Babic, et al.: "Mutual inductance and magnetic force calculations for coaxial bitter disk coils", IET Sci. Meas. Technol., Vol. 10, No. 8, pp. 972-976, 2016

Y系超伝導転位並列導体で構成したコイルの付加的交流損失特性(4)

Additional AC loss properties of REBCO superconducting parallel conductors (4)

沖 総一郎, 三浦 峻, 岩熊 成卓(九大)

OKI Soichiro, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.)

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

1. はじめに

我々は大電流量化を目指す酸化物超伝導体の構成法として Fig. 1 に示すように素線を並列に並べ、巻き線途中で転位を施す方法を提案している。超伝導線材を用いて転位並列導体を構成すると転位並列導体化に伴う損失が発生する。この損失のことを付加的交流損失と呼んでいる。これまでの我々の研究では、時間変化する直流の外部磁界が印加された場合の付加的交流損失について検討してきた[1]。本研究では、交流外部磁界が印加された場合の付加的交流損失について検討した。

2. 並列導体の付加的交流損失

Fig.2 は 2 本並列導体の転位位置を中央から Δl だけずらした一層ソレノイドコイルの概略図である。転位の左右で鎖交磁束の差が生じ、それを打ち消すように遮蔽電流 I が発生する。遮蔽電流を導出する際に、 n 値モデルによる素線抵抗 R_{HTS} は(1)式となる。

$$R_{HTS} = V_C \frac{I^{n-1}}{I_C^n} \tag{1}$$

これより単位体積一周期当たりの付加的交流損失 W は(2)式となる。

$$W = \int_0^{2\pi/\omega} \frac{2(R + R_{HTS})I^2}{2uwL} dt \tag{2}$$

V_C : 電圧基準, I_C : 臨界電流値, L : 導体長

R : 端部接触抵抗, R_{HTS} : 素線等価抵抗

3. 結果

各 n 値における付加的交流損失の外部磁界振幅依存性の解析結果を Fig.3 に示す。 n 値が小さいほど早期から付加的交流損失が急激に増加することがわかる。また、 n 値が大きいほど付加的交流損失の増加率が急峻になることがわかる。その他パラメータを変化させた場合の付加的交流損失については当日報告する。

参考文献

1. 槻木、他：第 91 回 2016 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 90 (2014)2P-p15

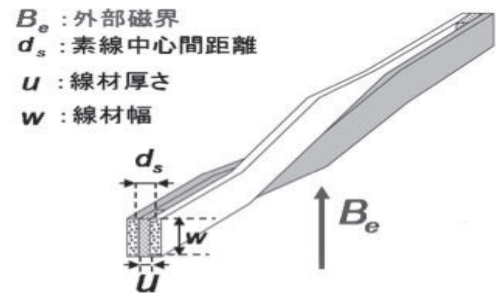


Fig.1 Schematic view of a transposed two-strand parallel conductor.

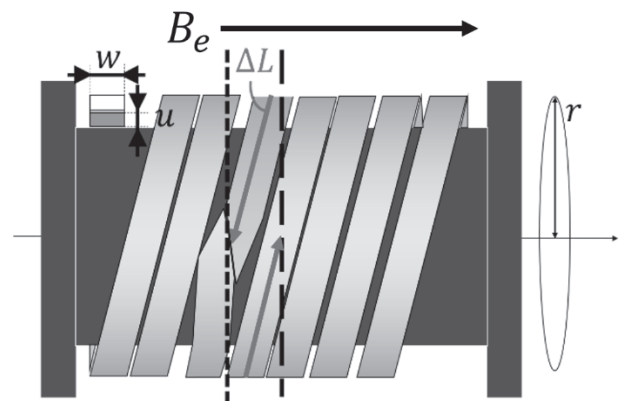


Fig.2 Schematic illustration of a parallel conductor wound into a one-layer coil.

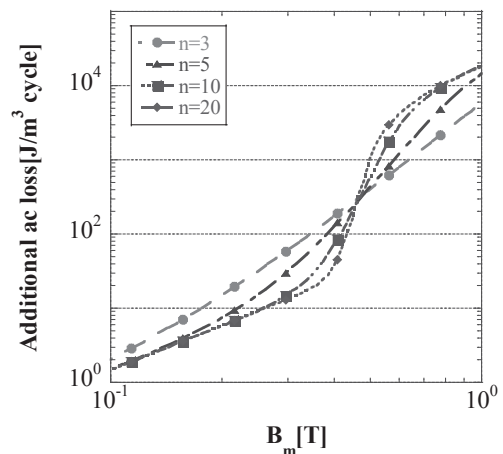


Fig.3 The properties of the additional ac loss.

MgB₂ ラザフォードケーブルによるダブルパンケーキコイル試作 Trial double pancake coils wound up with MgB₂ Rutherford cables

横田 康博, 新富 孝和(KEK); 濱島 高太郎, 駒込 敏弘, 塚田 謙一(前川); 平野 直樹, 長屋 重夫, 渡部 智則(中部電力); 高尾 智明, 谷貝 剛, 水落 空, 水野 伸哉, 神保 茉那, 上林 昌弘(上智大); 恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研)
MAKIDA Yasuhiro, SHINTMI Takakazu (KEK); HAMAJIMA Takataro, KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi (Mayekawa MFG. Co., LTD.); TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyohi, MIZUOCHI Sora, MIZUNO Shinya, JIMBO Mana, KAMIBAYASHI Masahiro (Sophia Univ.); ONJI Taiki, TOMITA Masaru (RTRI)
E-mail: yasuihiro.makida@kek.jp

1. はじめに

水素エネルギーシステムに、液体水素で冷却される SMES を連携させ、電力制御を高度化することを提案している[1]。コイルの超伝導線材としては、撚線化に向く素線形状の MgB₂ に注目している。ただし Nb₃Sn 線同様、MgB₂ 線も歪による超伝導特性の劣化は確認されており、撚線加工やコイル巻き線時の劣化の特性を理解しておかなければならない。加工方法の最適化を目指して、素線を調達して撚線し、Wind & React 法及び React & Wind 法によるパンケーキコイルを 1 個ずつ試作し、液体ヘリウム中で予備冷却試験を行った。

2. 線材及びラザフォードケーブル

MgB₂ 素線はハイパーテック (HT) 社製の 30-NM (30 フィラメント) 及び 24-NM (24 フィラメント) を購入し、それぞれ Fig.1 に示す断面構成のラザフォードケーブルを作製した。30-NM の銅の断面比率が 12 % と低いので、銅のコアを付加したケーブルとしている。また巻き線後に MgB₂ 生成熱処理 (約 675°C × 1 時間) を行うため、S-glass の編組で絶縁を施している。24-NM は、撚線後に熱処理し、ポリイミドテープで絶縁を施している。また、24-NM は、30-NM と比べて剛性が高く、撚り戻しを抑えるため、厚さ方向に 85 % まで圧縮 (ローラー) 加工をしている。ケーブル (24-NM) の臨界電流を LHe 中で測定したが、撚線時の劣化が確認されている (Fig. 2)。

コイル用撚線加工に先立ち、撚線加工による臨界電流の劣化の特性を測定した。Fig. 3 にツイストピッチを変えた 30-NM の 10 本撚線の試験結果を示す。ツイストピッチが長いほど、撚線時の曲げ歪 (許容値は 3 - 4 %) は下げることができるが、撚りほぐれてしまうので、ある程度まで (70 %) の劣化を前提にして、撚線性能を見積もらなければならない。

3. W&R 法及び R&W 法によるダブルパンケーキコイル試作

コイルの仕様を Table 1 にまとめる。ケーブルの厚さは異なるものの、同じ巻き線内外径となるよう、R&W コイルの方は、スペーサー (GFRP) を巻き線中に差し込んで調整している。どちらのコイルも、電材向けの低粘性熱硬化性エポキシ樹脂 (2 液型含浸用樹脂) を真空含浸した。Fig. 4 に完成した W&R コイルを示す。

完成した 2 個のダブルパンケーキコイルは、LHe で冷却され、700A (0.87 T) まで励磁された。巻き線時の著しい性能劣化が起きていないことを、確認した。今後、ダブルパンケーキを増設して、磁場や電磁応力を増していくとともに、安定性やクエンチ特性も測定する予定にしている。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構の先端的低炭素化技術開発の助成を受けて実施しています。又、羽衣電機の北村様には、コイル製作で大変お世話になっております。感謝申し上げます。

参考文献

[1] T. Hamajima, et. al : IEEE Trans. Appl. Super. Vol.22, no.3, June. 2012, Art.no. 5701704.

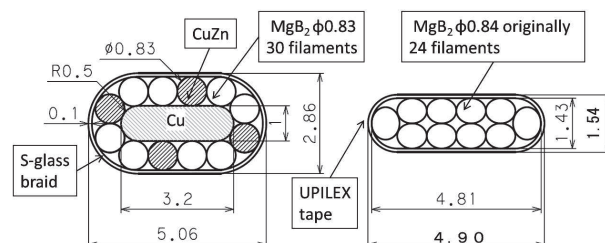


Fig. 1 Cross section of MgB₂ Rutherford cable. Left cable is for W&R coil, and right one is for R&W coil.

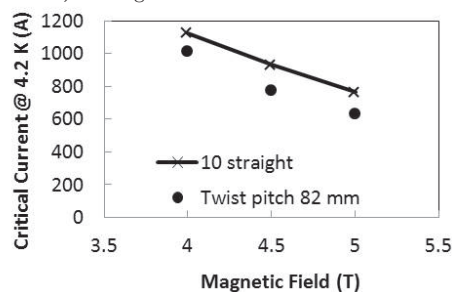


Fig. 2 Critical current of R&W coil Rutherford cables (circle) and 10 straight strands of 24-NM (line and ×).

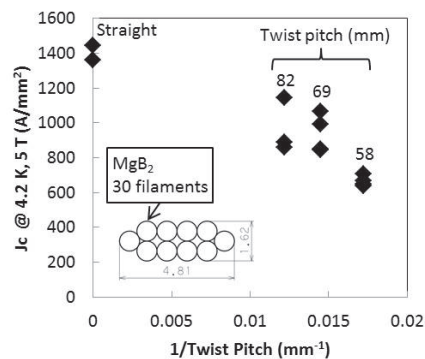


Fig. 3 Degradation of J_c due to cabling.

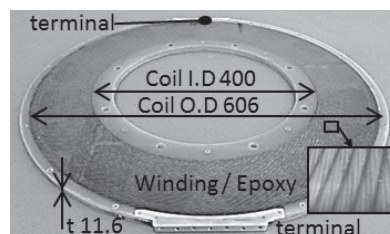


Fig. 4 Photo of completed W&R double pancake coil.

Table 1 Coil parameters

	W&R coil	R&W coil
Coil I.D., O.D. & H (mm)	400, 606, 11.6	400, 606, 11.6
Turn Number	2 × 36	2 × 55
Operation Current (A)	600	600
MgB ₂ type, Strand.D.(mm)	30-NM, 0.83	24-NM, 0.84
Cable twist pitch (mm)	51	82
Insulation	S-glass braid	Polyimide tape

MgB₂ ケーブルを用いたパンケーキコイルの開発(2) Development of prototype pancake coil using MgB₂ cable (2)

恩地 太紀, 石原 篤, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 荒井 有気, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研);
水野 伸哉, 谷貝 剛, 高尾 智明(上智大); 平野 直樹(中部電力); 榎田 康博, 新富 孝和(KEK); 濱島 高太郎(前川製作所)
ONJI Taiki, ISHIHARA Atsushi, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, ARAI Yuuki,
FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (RTRI); MIZUNO Shinya, YAGAI Tsuyoshi, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
HIRANO Naoki (Chubu Electric Power), MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK);
HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG)
E-mail: onji.taiki.67@rtri.or.jp

1. はじめに

MgB₂は、金属系超電導体最高の約40 Kの T_c をもち、各種コイルへの応用が検討されている。我々のグループでは、伝導冷却による数 10 kJ 級の超電導電力貯蔵システム(SMES)の開発を目指し[1, 2]、MgB₂ 線材を用いたパンケーキコイルの設計、製作を行っている。

これまで我々のグループでは、Hyper Tech 社の熱処理前の MgB₂ 超電導素線を用い、撚線加工により導体作製、Wind & React (W&R)方式でのパンケーキコイルの製作、ならびに動作試験を行ってきた[3]。本研究では、コイルの臨界電流値の温度・磁場依存性(I_c - B - T)の評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

MgB₂ 導体は MgB₂ 超電導素線 8 本と同径の Cu 線 4 本を Cu のコアに巻き付け、幅 5.06 mm、厚み 2.86 mm になるように撚り線加工を施して作製した。なお使用した MgB₂ 超電導素線は Hyper Tech 製のものであり、直径 0.07 mm のフィラメントが 30 本、撚りピッチ 300 mm で同軸 2 層で撚られた直径 0.83 mm の未熱処理線である。パンケーキコイルは W&R 方式で製作し、MgB₂ 導体を内径 200 mm、外径 269 mm に加工した後に、熱処理を行い、最後に樹脂含侵を施した。

作製したパンケーキコイルは冷凍機による伝導冷却で 20-30 K まで冷却し、超電導マグネットを用いて外部磁場を最大 5 T 印加した状態で最大 700 A までの通電を行った。

3. 結果と考察

パンケーキコイルは冷凍機冷却により、約 16 時間で 20 K 以下まで冷却することに成功した。Fig.1 に 25 K での I - V 特性、Fig.2 に I_c - B - T 特性を示すが、外部磁場の増加、温度の上昇に伴い系統的に I_c が低下していること、 I_c (@25 K, 1.5 T) > 700 A, I_c (@20 K, 3.0 T) ~ 600 A であることがわかった。

当日は、パンケーキコイルの詳細仕様や、他の温度、磁場における I_c - B - T 特性についても報告する予定である。

4. 結論

MgB₂ の撚り線導体を用いてパンケーキコイルを製作したところ、設計通りの通電電流値を得ることができた。今後はより実機に近いコイルの製作を進めていく予定である。

5. 謝辞

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] T. Hamajima *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** (2012) 5701704.
[2] T. Shintomi *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** (2012) 5701604.
[3] T. Onji *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference* **94** (2017) 69.

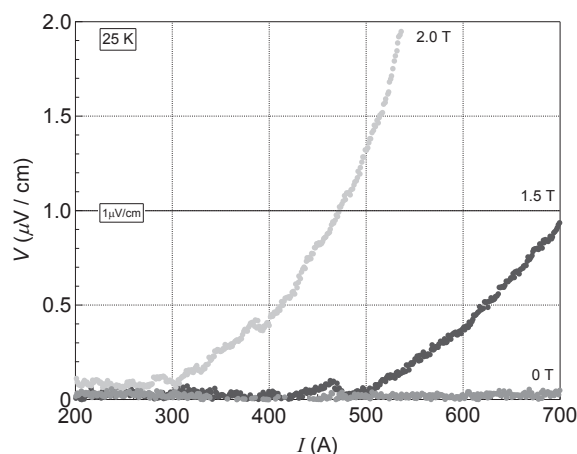


Fig.1 I - V properties of MgB₂ prototype pancake coil under 0, 1.5, and 2.0 T at 25 K.

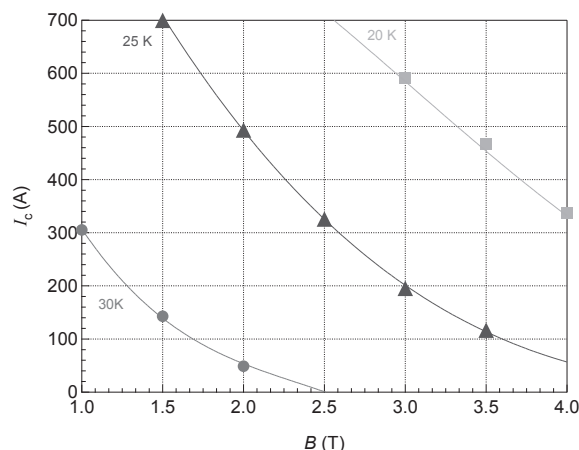


Fig.2 I_c - B - T properties of MgB₂ prototype pancake coil.

二組のヘルムホルツコイルと傾斜磁場コイルを利用した 磁性粒子浮上の実験研究

Experimental Study on Levitation of Magnetic Particles Using Two Sets of Helmholtz Coils and a Pair of Gradient Magnetic Field Coils

許 航, ニノ宮 晃, 野村新一(明治大学)
 Xu hang, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi
 E-mail:ce61032@meiji.ac.jp

1. はじめに

本研究では、二組のヘルムホルツコイルと傾斜磁場コイルを利用して磁性体の浮上の可能性を検討している。目標は、ヘルムホルツ磁場空間の中心部が磁気力最大となるように磁場発生コイルシステムを作ることである。今回は、簡単な1次元磁場計算によりコイル形状を検討して試作し、これを用いて浮上可能性実験を実施した。ここでは、その結果について報告する。

2. 浮上磁場計算及び試作コイルの設計値

一次元磁場中における磁気力 F_m [N]の計算式を(1)に示す[1]。ここで、磁性粒子の体積 V [m³]と磁化率 χ [a.u.]は一定とし、空間磁束密度分布に対して影響を及ぼさないと仮定し、磁性粒子の置かれる磁場空間の磁束密度 B [T]とすると、磁気力 F_m [N]は磁気力係数 f_m [T²/m] (磁束密度 B と空間に磁気勾配 ΔB [T/m]の積)に比例する。

$$F_m = V \cdot \chi \cdot B \cdot \Delta B / \mu_0$$

$$= V \cdot \chi \cdot f_m / \mu_0 \cdot \dots \cdot \dots \cdot (1)$$

浮上空間の中心で磁気力が最大となる磁束密度分布 (Fig.1)を計算した。ヘルムホルツコイル1(Mコイル)の一方が作る磁場は、他方のヘルムホルツコイル2(Sコイル)が作る磁場に対して極性を逆向きにしている。これにより、浮上空間においてコイル近傍の磁場を下げる効果が期待できる。この磁場空間に傾斜磁場(Lコイル)を加えて、その傾斜磁場の大きさを調整し、必要な磁束密度分布を得る。Fig.2にS・M・Lコイルの模式図と基本設計値を示す。

3. 実験装置と実験結果

試作したコイルを液体窒素で冷却し、0.2 gの砂鉄をアクリルケースに封入し、3組のコイルの中心軸上に設置した。Mコイルを8 A、Sコイルを2.1 Aで励磁し、Lコイルを0.04 A/secで徐々に増磁させた。磁性粒子の位置はビデオカメラで記録した。録画映像から、Lコイルの通電電流が1 Aに到達すると、磁性粒子はケースの中心部に移動するのを確認した (Fig. 3)。しかし、磁性体は浮上しておらず、中心軸から径方向に32 mmの位置 (ケース壁面) に集まった。また、Lコイルの通電電流は設計値よりも低い時に、磁性粒子は中心部に移動した。

そこで、 $I_S = -2.1$ A、 $I_M = 7.9$ A、 $I_L = 1.0$ Aの時、コイルシステムが作る磁場分布について、浮上空間の中心軸と中心軸から径方向に32 mmの位置で測定した。測定結果より (Fig. 4)、中心軸から径方向に32 mmの位置の磁束密度の方が、中心部よりも強いことが判明した。また、その形状が類似していることより、磁気力係数においても強いことが推定でき、この位置に集まったものと思われる。

4. まとめ

本研究は、磁気力を利用して磁性粒子をコイルから離して、磁場空間に浮上・移動させる可能性を検討するものである。今回の実験研究では、浮上させるところまでには至ってはいないが、磁石間に移動させることを確認することができた。

今後は、磁場計算精度を向上させて、空間磁束密度分布を考慮した解析を実施し、磁性粒子の浮上可能性実験を検討していく予定である。

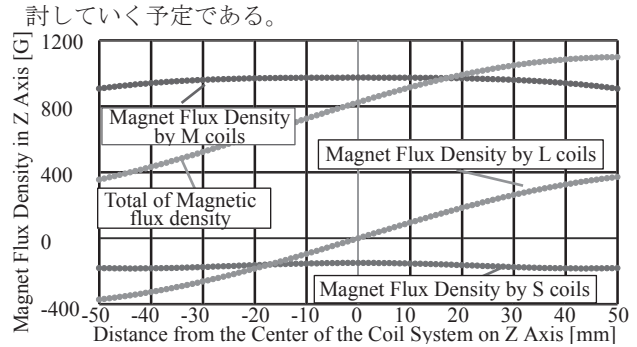


Fig. 1 Calculation of the magnetic flux density on z axis in the cases of $I_M = 8$ A, $I_S = -2.1$ A and $I_L = 10.4$ A.

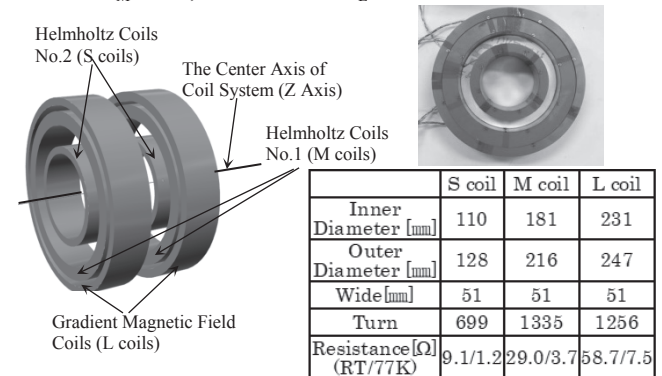


Fig. 2 Schematic Illustration and the Key Parameters of the Coil System.

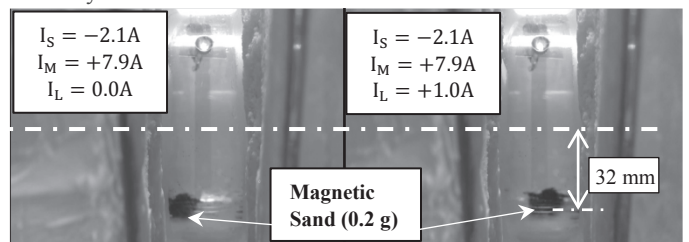


Fig. 3 Displacement of the Magnetic Particles. The L coils are Excited from 0 A to 1 A.

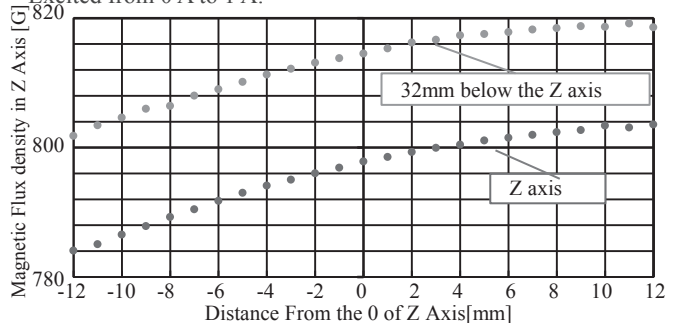


Fig. 4 Magnetic Flux Density Measurements on Z Axis in the case of $I_S = -2.1$ A, $I_M = 7.9$ A, $I_L = 1.0$ A.

参考文献

1. N. Saho, M. Ono : Abstracts of CSJ Conference, Vol.93 (2016) p.64

電気推進航空機用 3.6MW 超電導モータの最適設計

Optimal Design of a 3.6 MW Superconducting Motor for Electric-drive Aeropropulsion

孔 維魯, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

KONG Weilu, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. Tokyo)

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

1. Introduction

Electric-drive Aeropropulsion (EA) is one of the key technologies in design of future aircrafts because the electric motor drive has high efficiency and the EA would reduce operational cost and pollutant emission [1]. However, it would have some problems like the cruising range and payload. To solve these issues, the introduction of superconducting rotating machines (motors and generators) have been proposed [2] because it will allow the very stringent weight and volume constraints imposed by the airborne application. Superconductors can carry electric current at high current density with quite low resistance thus enabling light machines. According to previous researches, a superconducting motor is supposed to achieve power density comparable to turbine engines in excess of 10–20 kW/kg [3]. And, to reduce loss and to improve the power density, which is more important for EA, the optimization of the design is indispensable. In this paper, a 3.6 MW superconducting motor design optimized by the Finite-Element Analysis (FEM) and the Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) for EA is presented. A combination of FEM and an optimization algorithm is regarded as direct optimization method with high accuracy. The MOGA has been used in the optimization to acquire the design of a motor with a good balance of power density, electrical loss and torque ripple.

2. Specifications of motors

YBCO field windings in the rotor produce magnetic field in copper armature windings in the stator. The motor has an air-core (i.e., nonmagnetic) construction in the rotor and air gap windings in the stator as shown in Fig. 1, which enables the air gap field to be increased without the core loss and saturation problems inherent in laminated steel cores.

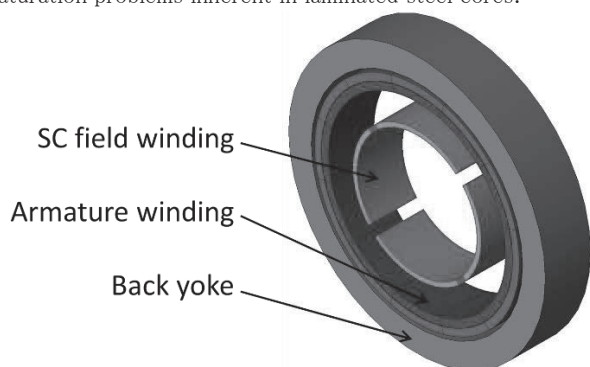


Fig. 1 Structure of designed superconducting motor

Common specifications for different motor design cases are shown in Table I. A reference object for this design is Engine GP7200. The most important properties of motors for EA are the power density, loss and torque ripple that are considered as cost function in optimization algorithm.

Table I

Common specification for all cases

Parameters	Value
Output power P (MW)	3.6
Line voltage U_L (V)	1732
Line current I_L (A)	1417
Frequency f (Hz)	360
Revolving speed N (rpm)	10800
Number of pole pairs p	2
Current density of field winding J_f (A/m ²)	1.768×10^8

3. Result of optimization

In this paper, power density, the electrical loss and the torque ripple are considered equally important, which is realized using weighted sum approaches.

The field winding is wound with YBCO tapes that endure high current density, and the back yoke material is low iron-loss steel sheet. Continuous allowable current density of armature windings changes with the cooling condition so the effect is considered as well.

Table II

Result of initial cases and optimized cases

	Result A1	Result A2	Result B1	Result B2
P (MW)	3.47	3.65	3.52	3.65
D_p (kW/kg)	7.37	13.10	8.94	15.00
T_r (%)	0.34	0.39	0.30	0.65
P_{loss} (kW)	26.57	11.62	29.37	13.84

 D_p : Power density of motor T_r : Torque ripple P_{loss} : The electrical loss J_a : Current density of armature windingResult A1: Initial case of $J_a = 1.5 \times 10^6$ (A/m²)Result A2: Optimized case of $J_a = 1.5 \times 10^6$ (A/m²)Result B1: Initial case of $J_a = 7.5 \times 10^6$ (A/m²)Result B2: Optimized case of $J_a = 7.5 \times 10^6$ (A/m²)

As Table II shows, after optimization, Result A2 and Result B2 show the power densities increased to be comparable to that of the turbine engine. The electrical loss decreases and the torque ripple increases but stays low. It means that Result A2 and Result B2 are considered the effective and optimal design that can be applied to EA.

References

1. A. Nishizawa, et al.: Aviation of 25 Years Later (Electric Aircraft), Journal of IEE. Japan, Vol. 134 (2014) pp. 84–87
2. C. A. Luongo, et al.: Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 19 (2009) pp. 1055–1068
3. P. J. Masson, et al.: HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles, Supercond. Sci. Technol, vol. 20 (2007), pp. 748–756

解析式に基づく航空旅客機向け電気推進用超電導モータの電磁設計

Electromagnetic Design of Superconducting Motors for Electric Aircraft Propulsion Based on Analytical Formula

寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

TERAO Yutaka and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

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

1. はじめに

近年、航空旅客機の運行数が増加する一方、ジェットエンジン部での化石燃料消費に伴う温室効果ガスの増加が懸念されている。この中で電気推進式航空旅客機が注目されており、欧米諸国の企業・大学の研究グループが研究を進めている[1]。電気推進用のモータは現在 5.0 kW/kg が永久磁石同期モータによって達成されているが、将来的には 20 kW/kg 以上の達成が望まれている。本発表では、解析式を用いて電気推進航空旅客機用の全超電導モータの電磁設計を行い、構造及び出力密度の考察を行う。また有限要素法により交流損失及び鉄損を算出し、損失低減に関して考察を行う。

2. 超電導モータモデル及び解析式

本発表では、複数の超電導モータを分散配置して推進力を得ることを前提としており、航空機は 180 人乗り、離陸時最大出力 44 MW を達成することを目標とし[2]、この出力を達成するためにモータの複数分散配置を前提とする。Table 1 にモータの基本特性を示す。モータ容量 P_M は 2.0-, 4.0-, 6.0 MW の 3 通りを考える。全超電導モータは界磁巻線に(RE)BCO 線材、電機子巻線に MgB₂ 線材を用いる。また回転速度 5000 rpm、線間電圧は 1.41 kV [1]、冷却温度 20 K と設定する。

Table 1. Motor Specifications

Motor capacity: P_M	2.0-, 4.0-, 6.0 MW
Number of poles: p	2, 4, 6
Rotation speed: N_{rot}	5000 rpm
Line Voltage: V	1.41 kV
Current: I_s	0.82, 1.64, 2.45 kA
Operating temperature	20 K

Fig.1 にモータの解析モデルを示す。 g_1, g_2 はそれぞれバックヨーク-電機子コイル及び固定子-回転子の機械的なギャップであり、今回はそれぞれ 50 mm 及び 20 mm に設定する。はじめにモータ外径 ($2R_6$) を定め、それを満たすような D を与えることで、モータの各部半径 $R_2 \sim R_6$ は以下の様に求まる。はじめは電機子電流部分をシート電流とし、 $R_4 \approx D/2$ として計算を行う。

$$t = \frac{D B_s}{p B_c} \quad (1)$$

$$2R_6 = D + 2t + 2g_1 \quad (2)$$

$$R_5 = R_6 - t \quad (3)$$

$$R_4 = R_5 - t - g_1 \quad (4)$$

ただし、 B_s (T): ギャップ磁束密度波高値, B_c (T): 鉄心内飽和磁束密度である。電機子コイル部分の厚みは、容量別に巻数と電機子コイル電流密度等を計算した上で R_3 が算出され、

$$R_2 = R_3 - g_2 \quad (5)$$

と求まる。また一般に回転機出力は以下の様に表される。

$$P_M = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \times k_w \times B_s \times A_s \times D^2 \times l_{eff} \times \frac{N_{coil}}{60} \quad (6)$$

$$A_s = \frac{6 N_{coil} I_s}{\pi D} \quad (7)$$

ただし、 k_w ($= 0.92$): 巻線係数, A_s (A/m): 比電気装荷, D (m): 電機子コイル部の平均直径, l_{eff} (m): 有効長, N_{coil} : 1 相あたり

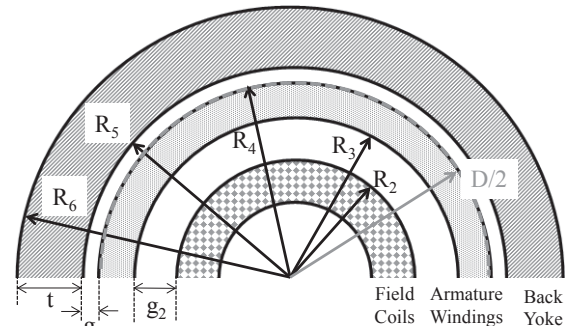


Fig. 1. Analytical model of fully superconducting motor of the coil turns, I_s (A): 電機子電流である。上式で、 B_s 及び A_s を変化させてその傾向を調べる。また出力密度の算出には、バックヨーク、MgB₂ 線材の重量を考慮し、その他部分 (構造材及び回転子等) は前者二つの 50% と仮定する。

3. 解析結果

Fig. 2 に 6.0 MW 機の場合の電磁設計結果を示す。本グラフは(6)で $B_s = 0.5$ T と固定したケースの出力密度である。いずれの場合も電気装荷を 200 kA/m 以上に増加させることで 20 kW/kg を達成することは可能であるがアンペアターンの増加による交流損失の増加とのトレードオフとなる。すなわち 6 極の場合は電気装荷が 100 kA/m オーダーで低くなるものの、回転周波数が 249 Hz となり 2 極機 (83 Hz) の 3 倍となるため、交流損失の観点から不利な構造となる。また現在の一般的な MgB₂ 線材を使用した場合には 2 極構造でも損失が定格の約 20 % となるため、将来的に線材径を四分の一程度まで低減する必要がある[2]。

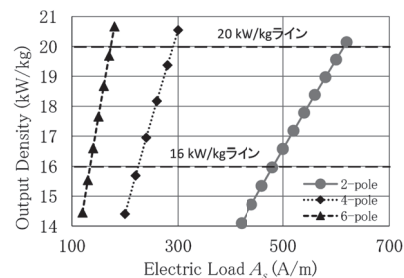


Fig. 2. Output density of 6.0 MW class fully superconducting motors as a function of electric load: A_s .

4. まとめ

本研究では高出力密度の電気推進航空旅客機用全超電導モータの電磁設計を行った。20 kW/kg 以上の出力密度と高効率を同時に達成するには、比磁気/比電気装荷の適切な選択と線材の細線化という、機器設計及び材料開発の両面からのアプローチが必要となる。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人 永守財団の「研究助成 2017」を受けて行われたものである。

参考文献

- C. E. Jones, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.26, No.6 (2016), pp. 1-9
- Y. Terao, et al.: Presentation in EUCAS 2017, 4LP6-10 (2017)

立方体バルクを使った目的に応じた最適配置についての研究.

Study on optimal placement according to purpose using cubic bulk.

山岸 一人(横浜国立大学)

YAMAGISHI Kazuhito (Yokohama National University)

E-mail: yamagishi-kazuhito-sd@ynu.ac.jp

1. はじめに

これまで超伝導バルクは、その基本的特性である特異な捕捉磁束性能の劣化を伴う形状加工を行わずに、製造時と変わらない円柱形状で用いられることがほとんどであったが、最近では様々な加工が考えられている[1]。本来、応用機器への組み込みを考えた場合、それぞれの用途に合わせてバルクの形状をカスタマイズする必要があり、特に磁気特性の劣化を極力抑えることが非常に重要であると考えられる。本報告はその取り組みの1例として、磁気軸受への応用を想定し、集積型のバルクを用いた際の検討を行ったものである。これは、磁気特性のばらつきなどによる回転軸の軸ぶれやそれに伴う回転損失等を考慮し、複数の小さな基本単位バルクを最適に組み合わせることによってその損失抑制が可能かどうかを検討したものである。

2. 立方体バルクによる最適配置の検討

最初に今回の検討にあたって、磁気軸受を構成するための最小単位のバルク形状を選択する必要がある。バルクの形状に関しては、様々なものが考えられるが、配置形状の自由度や加工の容易さ、扱いやすさなどを考慮するとともに、現在手持ちのバルクでなるべく多く作成できるものを選択することとし、今回ここでは基本単位バルクの形状に立方体を選択した。現在手持ちの円柱型バルクは表1に示すようなバルクであり、1つの円柱型バルクから4つの立方体を切り出し、1辺10mm角の立方体形状に成形することとした。問題となる円柱型バルクの切断線の選定については、円柱バルクの捕捉磁束密度の様子と、バルク表面の光学的観測により状態確認を行い、サンプルに適さない部分については選別を行った。立方体形状に切り出されたバルクは、それぞれ0.5TのFCMで着磁した後、捕捉磁束を測定したところ、一つのバルクに若干捕捉磁束の低下がみられたものの、その他のバルクには問題は見られなかった。以上、3個の円柱バルクから合計12個を切り出して、立方体形状に加工を行った。削り出した基本単位立方体バルクそれぞれの諸元を表2に示す。この表中の捕捉磁束値(B_{trap})を各ブロックの基本性能を示す値として、後述する最適計算に用いることとした。基本単位バルクそれぞれの捕捉磁束性能は、元の円柱型バルクの性能に起因する傾向がみられるが、切り出し後個々の捕捉磁束性能に大きなばらつきは見られなかった。

3. 最適計算による配置パターンの決定

本検討で軸受側のバルク配置パターンとしては、基本単位バルクの個数に制約があることから、最もオーソドックスで実験及び計算が容易な図1で示すような3×3の正方形配置パターンで行うこととした。この時、隣り合うバルクは、お互いの磁束に影響し合うことが考えられることから、辺が接する数によるGroup毎に最適なバルクの配置を考えることとした。Groupはa, b, cの3つを基本とし、配置全体の中心となり4辺を他のバルクと接するGroup-a、3辺を他のバルクと接しているGroup-b、そして2辺のみ他のバルクと接しているGroup-cとした。そして、磁気軸受の最適な磁気特性を得るために、その配置パターンを次の条件で最適計算を行い、配置を決定することとした。1) Group-b, cの捕捉磁束の総和が最大となる。2) Group-b, cのピーク値のばらつきが最小、3) Group-aの捕捉

磁束のピーク値が最大となることとした。この計算により、配置パターンを決定した。以上の計算結果で求めた最適パターンで永久磁石を浮上体として浮上実験を行い、その際の捕捉磁束密度の測定結果を図2に示す。また同時に、比較のために捕捉磁束のばらつきを考慮しない配置パターンについても同様に測定を行った。その結果を比較したところ、最適配置による磁束分布のばらつき抑制が、効果的であることを確認した。

以上、詳細な結果については、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、JSPS科研費JP16K06211の助成を受けたものです。

Table 1. Specification of HTS Cylindrical type Bulks.

Bulk	Material	Diameter (mm)	Thickness (mm)	B_{trap} (T)	J_c (A/m^2)	n value
A	Gd-Ba-Cu-O	34.4	10.4	1.164	6.84×10^7	20
B	Gd-Ba-Cu-O	33.5	11.1	0.872	4.74×10^7	20
C	Gd-Ba-Cu-O	32.4	10.5	0.871	5.19×10^7	20

Table 2. Specification of HTS Cubic type Bulks.

Bulk	B_{trap} (T)	Bulk	B_{trap} (T)	Bulk	B_{trap} (T)	Bulk	B_{trap} (T)
A1	0.253	A2	0.243	A3	0.251	A4*	0.221
B1	0.206	B2	0.206	B3	0.185	B4	0.201
C1	0.241	C2	0.237	C3	0.233	C4	0.236

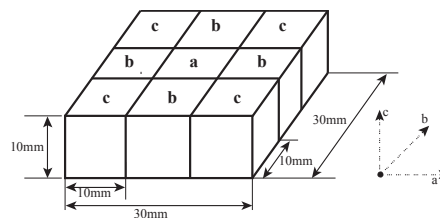


Fig.1 Basic arrangement pattern of magnetic bearings by cubic bulk. 3 row 3 row square arrangement pattern.

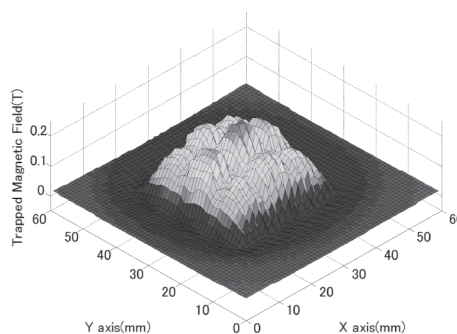


Fig. 2 Trapped magnetic flux density distribution when the optimum arrangement pattern. 3D graph of the trapped magnetic flux density distribution of the whole.

参考文献

1. S. Nariki et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.26, Issue.3, 7200404, doi: 10.1109/TASC.2016.2537382.

三次元超電導アクチュエータの床・壁走行間の高温超電導バルク体移動子の動的特性に関する研究

The Dynamic Characteristics of HTS Bulk Mover between Floor and Wall Traveling on 3-D Superconducting Actuator

山崎 尊雄, 平塚 祐介, 中嶋 淳夫, 植田 浩史, 金 錫範(岡山大学)

YAMASAKI Takao, HIRATSUKA Yusuke, NAKASHIMA Atsuo, UEDA Hiroshi, KIM SeokBeom (Okayama University)

E-mail: kim@ec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、空間的に隔てた環境における遠隔操作が可能な超電導アクチュエータの開発を行ってきた。開発する超電導アクチュエータは移動子である高温超電導バルク体(以下バルク体)と固定子である平面配列された電磁石群で構成されている(Fig.1)。固定子から三次元的な磁場分布を発生させ、特定の磁場分布が捕捉されている移動子に、鉛直方向・水平方向への移動及び回転を可能としている。これまでの研究では、床に沿ったバルク体の搬送(床走行)と壁に対して水平に電磁石を配列することによる壁に沿ったバルク体の搬送(壁走行)の2つの走行形態について検討してきた。この際、2つの走行形態間の移行には固定子として電磁石を用いる方法が提案された。しかし、この方法では電磁石の設計および励磁制御が複雑化し困難になるという問題があった。そこで、本研究では、新たな走行形態移行機構として永久磁石を3次的に曲面配列したレール状固定子(Fig.1)(以下 PM レール)を提案し、その動的特性について検討した。

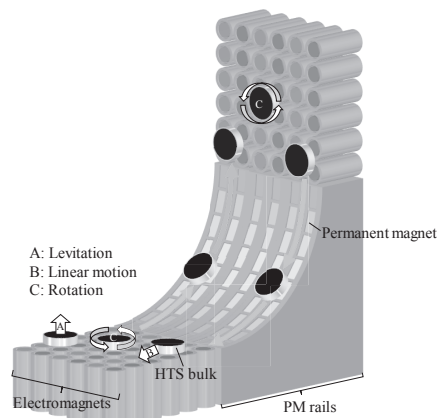


Fig.1 Schematic illustration of the concept for 3-D HTS bulk superconducting actuator system consisted with 2-D arranged multiple electromagnets and PM rails for traveling of HTS bulk mover between floor and wall.

2. 実験

PM レールの形状を設計するためには、永久磁石上でバルク体移動子を浮上・搬送させた際の静的・動的特性について実験的に明らかにする必要がある。そこで、長さ 40 mm、幅 20 mm、厚さ 5 mm のネオジウム永久磁石 8 個を 2 次元平面配列した PM 固定子(Fig.2(a))を作製した。あらかじめ 4 極電磁石を用いて磁場中冷却法にて着磁したバルク体移動子を PM 固定子上で浮上させ、その際の浮上高さおよび浮上力を測定した。次に、Fig.2(b)のように電磁石と PM 固定子を配置してバルク体を搬送させた。移動子に与える推進力を変える目的で、電磁石に逆極性磁場を励磁するための逆電流を 3 パターン用意し、各パターンについて搬送中の移動子の動きをデジタルカメラで高速度撮影(120fps)した。その後、1 フレームごとの移動子の位置を分析することで移動子の動的特性を評価した。

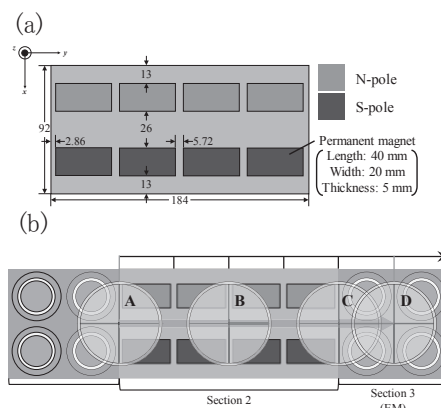


Fig.2 Schematic illustrations of (a) the 2-D arranged PM stator and (b) the carried conveyance experiment in order to investigate the dynamic characteristics of the mover.

3. 実験結果と考察

移動子を PM 固定子上で浮上させた際、浮上高さ 4.0 mm、最大浮上力 82.4 N が得られた。Fig.3 に搬送実験での移動子の動的特性を示す。Fig.3(a) から移動子の初速度および搬送開始直後の加速度は電磁石に通電する逆電流の大きさと正の相関があることがわかる。また、Fig.3(b) から逆電流の大きさに関わらず、移動子が B 区間を走行中に 2 か所で顕著な速度変化を起こしていることがわかる。この 2 か所は長手方向の PM 間隔が存在する座標とほぼ一致している。これは移動子の速度が減衰し、さらに間隔に生じる磁気勾配の影響で移動子が間隙上を通過する際に案内力および復元力が働いたためと考えられる。加えて、D 区間では移動子の加速度運動が見られ、搬送目標点での速度が 0 m/s ではない。このことは移動子が目標点を一度通り過ぎ、その点を中心にオーバーシュートを起こすことを意味している。そのため D 区間で移動子が減速するような制御法が必要となる。これらの実験結果を参考にして PM レールを設計・試作した。固定子として PM レールを用いた場合の移動子の諸特性については当日報告する。

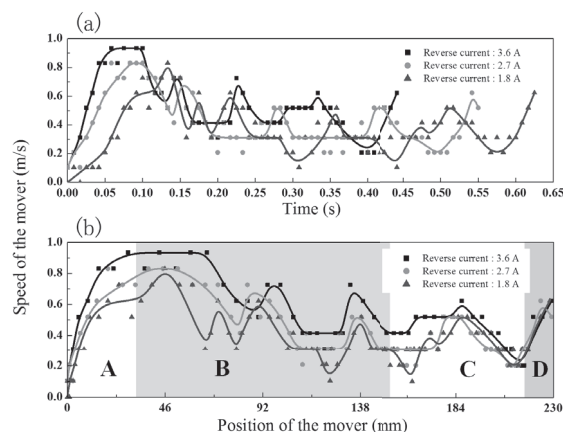


Fig.3 The measured speed profiles as function of (a) time and (b) position of the mover.

JT-60SA CS モデルコイルの流体特性

Hydraulic characteristics of the JT-60SA CS model coil

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 力石 浩孝, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS); 村上 陽之, 夏目 恭平, 木津 要(量研)
 OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hirotaka, IMAGAWA Shinsaku,
 MITO Toshiyuki (NIFS); MURAKAMI Haruyuki, NATSUME Kyohei, KIZU Kaname(QST)
 E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所(NIFS)と量子科学技術研究開発機構が共同で、JT-60SA 中心ソレノイド(CS)モデルコイルの性能評価試験を行った。本試験では NIFS の試験装置を使用し、モデルコイルの臨界電流値、接続抵抗、圧力損失等を測定した。その結果、CS モデルコイルが設計要求値を満足することを確認した[1]。本講演では、CS モデルコイルの流体特性について報告する。

2. CS モデルコイルと冷却システム

CS モデルコイルは、Nb₃Sn 素線からなるケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を用いたクアッドパンケーキコイルである。導体とモデルコイルの詳細を Table 1 に示す。モデルコイルには2つの冷却流路があり、流路入口がコイル中央部の外径渡り部、流路出口がコイル端部に位置する。各流路長は 100 m である。Fig.1 にモデルコイルの冷却フロー図を示す。コイルの入口・出口配管には、セルノックス温度計、圧力計、流量計を設置した。試験の際、コイルとブスバーと支持材は、超臨界圧ヘリウムで冷却した。

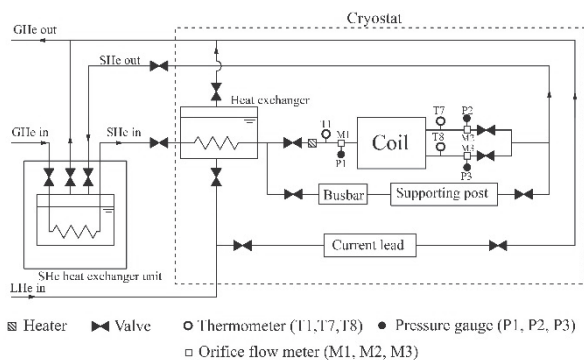


Fig.1 Cooling flow diagram of the CS model coil.

3. 流体特性試験

コイル入口温度を 5K に保持した状態で、コイルへの流量を 3g/s から 16g/s まで徐々に増加し、その際のコイルの流体特性を評価した。Fig.2 に2つの流路(1st path, 2nd path)におけるレイノルズ数と管摩擦係数の関係を示す。各値は、コイル入口・出口での温度、圧力、質量流量から求めた。今回測定したレイノルズ数 2000 から 11000 において、管摩擦係数が大きく変化することなく、0.06 から 0.1 の範囲に収まることが分かった。また、CIC 導体の流体特性を評価する際に使用される Katheder の経験式(式(1))[2]で実験結果へのフィッティングを行った。その結果、式(1)に0.5を乗じた式が実験結果に最もフィットすることが分かった。

$$f = v^{-0.72}(19.5Re^{-0.88} + 0.051) \quad (1)$$

ここで、 f は管摩擦係数、 Re はレイノルズ数、 v はボイド率を示す。

次に、コイル入口温度を 5 K に保持し、コイル入口配管バルブの開度を固定した状態で、コイル通電時におけるコイルの流体特性を評価した。Fig.3 に、モデルコイルの流路 1st path における各通電電流値でのレイノルズ数と管摩擦係数の関係を示す。通電電流値が増加するごとに、レイノルズ数が増加し、管摩擦係数が減少する傾向が得られた。この現象はコイル通電時に生じる電磁力が影響していると考えられる。

Table 1 Main parameters of conductor and model coil.

Conductor	
Strand diameter [mm]	0.82
Number of Nb ₃ Sn strands	216
Number of Cu wires	108
Jacket outer size [mm×mm]	27.9×27.9
Cabling diameter [mm]	21.0
Central spiral (id/od) [mm]	7/9
Void fraction [%]	34
Model Coil	
Number of turns	40
Inner diameter [m]	1.3
Outer diameter [m]	2.0
Weight [t]	2

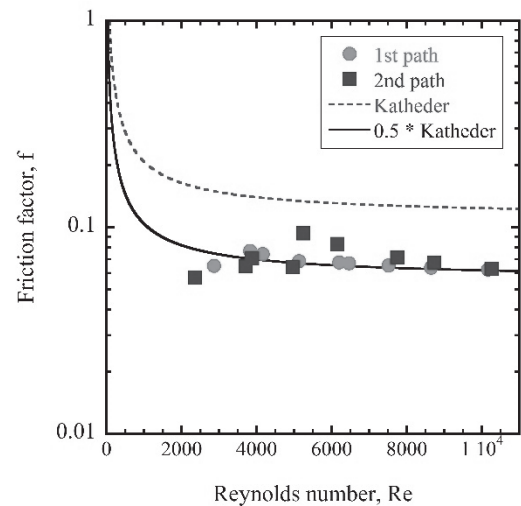


Fig.2 Relation between the Reynolds number and friction factor in the model coil.

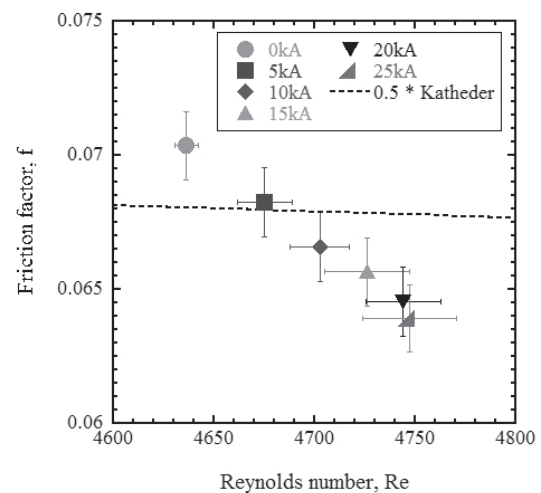


Fig.3 Relation between the Reynolds number and friction factor of 1st cooling path at each coil current.

参考文献

1. T. Obana, et al.: Physica C, Vol. 518 (2015) p.96
2. H. Katheder: Cryogenics, Vol. 34 (1994) p.595

13 T-700 mm大口徑高磁場導体試験装置用サンプルの形状の検討 Study on configuration of samples for 13 T - 700 mm conductor test facility

今川 信作, 尾花 哲浩, 高田 卓, 柳 長門, 高畑 一也 (NIFS)

IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, TAKADA Suguru, YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya (NIFS)
E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

最高磁場 13 T・内径 700 mm 大口徑高磁場導体試験装置用の大電流サンプルの形状と電磁力支持について簡易化の検討を進めている。コイル形状の導体サンプルには電磁力によって拡張力が働き、非対称な電流成分は並進力や回転モーメントを生み出すため、特に大電流サンプルの場合にはリード部および接続部の形状最適化が重要である。また、接続部を高磁場中に配置する場合には、接続部からの常伝導転移を避けるための工夫が必要である。サンプルに働く拡張力はサンプル自身で支えることが基本であるが、打ち消せなかった並進力によって、サンプルが断熱真空容器であるサンプル容器に接触し、さらにはサンプル容器が外部磁場コイルに接触することが考えられるため、並進力の許容値について議論する。

2. 外部磁場コイルとサンプル容器

外部磁場コイルは、軽量化のため浸漬冷却の密巻コイルが採用されている。図1に示すように、径方向に6分割して 10-12 層おきに円筒容器で電磁力を支える構造となっており、内側3層には Nb₃Sn 矩形導体、外側3層には NbTi 矩形導体が採用され、電流値 765 A において最高磁場 13.0 T が発生する。

強制冷却の導体サンプルを想定しており、外部磁場コイルの内側に真空断熱のためのサンプル容器を配置してある。コイル形状導体サンプルは、鉛直位置が外部磁場コイルの中央に一致するように設置する。50 kA の電流を供給する電流リードも強制冷却方式であり、下端に導体サンプルから分岐した冷媒が供給され、上端出口は常温回収系に接続される。

3. 導体サンプル形状

2 ターンの導体サンプルの概念図を図1に示す[1]。接続部を低磁場側の電流リード近傍に配置するためには、サンプルのリードを 3 次元形状に曲げる必要があり、リード部の電磁力支持を含めて難易度の高いことが欠点である。そこで、簡易な形状のサンプルとして、コイルリードの無い 1 ターンの導体サンプルを検討している。概念図と側面図を図2と3に示す。導体サンプル端部は超伝導線を添えた銅ブスバーと接続される。接続部は接続抵抗による発熱や交流損失の増加等のため、通常部と同じ条件ではそこから常伝導転位が生じることが懸念される。大電流導体では分流開始温度を測定するのが通例であることから、接続部は 4 K の冷媒で冷却し、試験部の冷媒供給温度を高くすることを計画している。この導体サンプルの端部同士を接続すれば、誘導法用の短絡コイルサンプルとなる。

導体には強大な電磁力が働くため、導体サンプルは円筒支持構造物に収納し、拡張力を支持する思想であるが、コイルリード部の電磁力を完全に打ち消すことは難しい。サンプルは天板から 4 本のボルトで吊られる方式のため、打ち消せなかった並進力によってサンプル容器に接触することになる。サンプル容器と外部磁場コイルの間隔は 3 mm 程度であるため、サンプル容器の変位をそれ以内とするのが、許容値の目安となる。それ以上の変位が生じた場合でも、サンプル容器はまず外部磁場コイル中央の支持平板あるいは下側支持フランジに接触する構造なので、ある程度の荷重超過は許容されると考えられる。サンプル容器の構造解析については当日に報告する。

参考文献

1. S. Imagawa et al.: Plasma and Fusion Research, Vol. 10 (2015) 3405012.

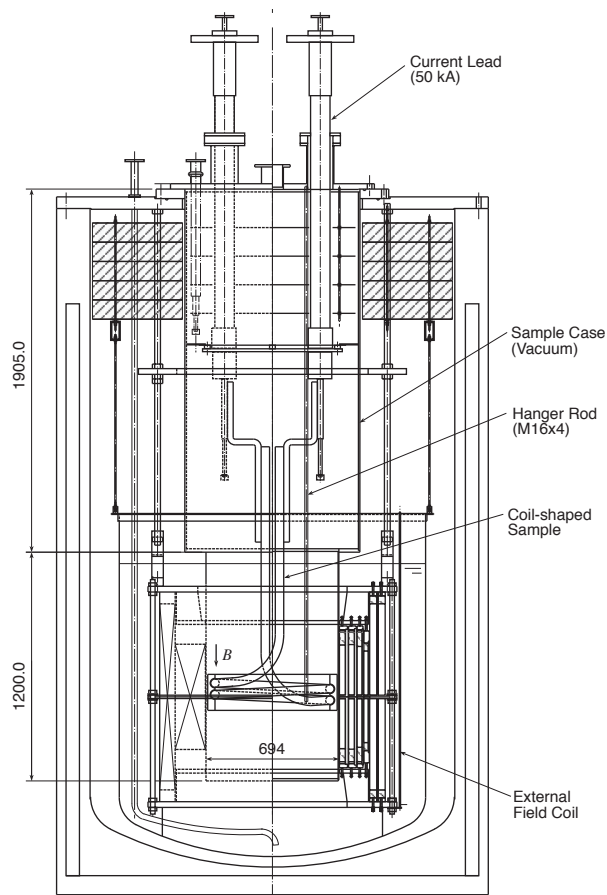


Fig. 1. Setup of two-turn sample in 13 T - 700 mm conductor test facility.

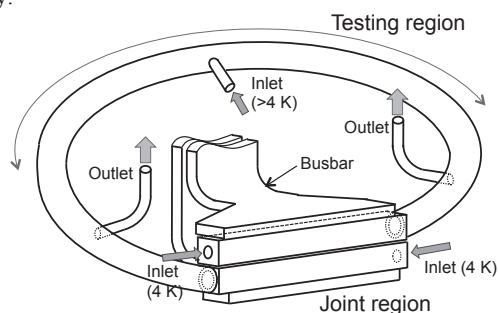


Fig. 2. Conceptual drawing of one-turn sample.

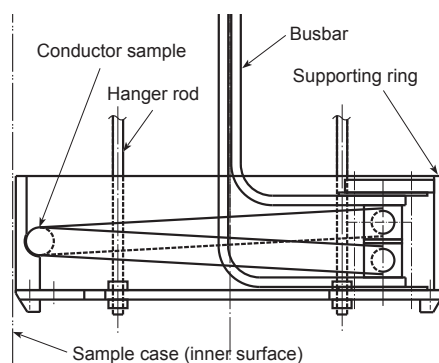


Fig. 3. Side-view of one-turn sample.

ヘリカル型核融合炉 FFHR-c1 のマグネット支持構造物の非線形構造解析

Nonlinear multiscale structural analysis of a superconducting coil and support structure for the helical fusion reactor

田村 仁, 後藤 拓也, 宮澤 順一, 田中 照也, 柳 長門, 相良 明男 (核融合研); 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)
 TAMURA Hitoshi, GOTO Takuya, MIYAZAWA Junichi, TANAKA Teruya, YANAGI Nagato, SAGARA Akio (NIFS);
 ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合研ではヘリカル型核融合炉 FFHR の設計活動を行っている。FFHR-d1(以下 d1)は自己点火までを見込んだ定常炉の概念設計で、装置の大半径 15.6m、プラズマ中心磁場強度 4.7T である[1]。これまでに、健全性を確保したマグネット支持構造案が示されている[2]。Fig.1 は d1 へのオプション機器のうち Nita coil (ヘリカルコイルの外側に巻き、逆方向に通電することでプラズマとコイル間を大きくする)と Liquid metal divertor (液体金属の噴流により高熱流束を受ける)を含めたマグネットシステムの概略図である。

現在、d1 での設計活動の成果を元に、コストの削減と早期の核融合発電実証を目指した装置の設計を進めている。例えば、装置サイズを d1 の 0.7 倍に小型化し、磁場を 7.3T に増強した FFHR-c1(以下 c1)では、サブイグニッション領域での自給可能電力の発電と、燃料の自己増殖の実証を目標としている[1,3]。装置のコイル配置や構造物が相似で、かつ磁場強度が同じ場合は、構造物の応力は変わらない。しかしながら、磁場増加により、電磁力は磁場強度比の2乗倍となり、そのままでは、発生する応力は構造材料の許容値を超えると予想される。装置が成立するためには、コイル断面形状と支持構造の再設計と評価が必要である。そのため、超伝導線材から全体の構造までを構造非線形を考慮したマルチスケール解析で応力分布評価を行い、基本構造の再構築を行った。

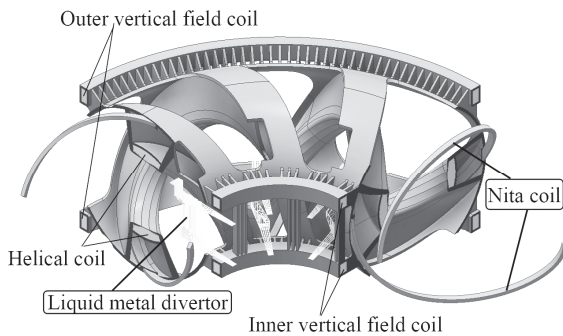


Fig.1 Fundamental design of the magnet system for FFHR-d1 involving the challenging options.

2. マルチスケール解析

超伝導マグネットを構成する要素のスケールは、超伝導素線/テープ線の数 mm 単位から、装置全体の 10m 規模に至る。そのため、機械的挙動と構造健全性を一貫して評価できるマルチスケール解析手法が有効である。また、超伝導コイル部とコイルケース間には、すべりや接触等が発生すると予想されるため、その部分の非線形挙動を考慮した。はじめに、超伝導導体部を単一の物性値で表すための均質化解析を行った。Fig.2 は均質化解析で用いた超伝導導体の断面図で、d1 の候補導体案を元に仮定したものである。これをモデル化し、6 方向の単位垂直・せん断ひずみを与えることで得られた物性値を同図右に示した。得られた均質化物性値を構造物全体の解析における超伝導コイル部分に与えて、応力・変形分布を解析した。

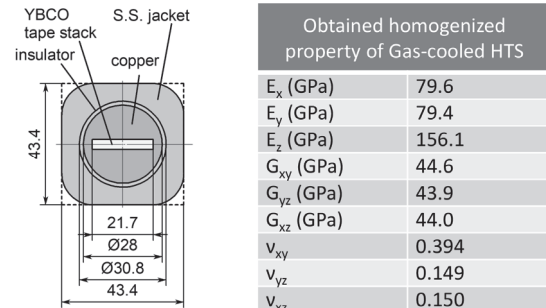


Fig.2 Cross section of the gas-cooled HTS and properties used in the analysis.

コイル保護の観点からは、コイルの電流密度は低いことが望ましいが、ヘリカル型ではコイル断面を全体的に拡大することが難しいため、ヘリカルコイルの小半径方向に断面を増やした。現状の c1 設計案では約 48A/mm² の電流密度、蓄積磁気エネルギー 156GJ、最大電磁力は 130MN/m である。

支持構造物の材料は SUS316LN とし、d1 では、相当応力が最大で 800MPa 以下となったが[2]、c1 では電磁力の増大に対応するために、基本板厚を 200mm とし、応力が高い開口部や垂直磁場コイルの接続部分の補強等を行い、相当応力が 1000MPa 以下となることを目標に構造の改良を行った。Fig.3 は相当応力分布の解析結果で、最大 960MPa が内側垂直磁場コイルの接続部に発生しているが、応力集中によるピークであり、許容されるレベルである。広域的にはヘリカルコイルケースの底部分が 700MPa で比較的高い結果となった。

3. まとめ

早期の発電実証を目指したヘリカル型核融合炉 FFHR-c1 に対して、構造健全性を確保の目処が立った。今後は、超伝導導体内部での塑性変形、すべり、接触等を考慮した等価物性値の算出と全体構造の挙動に与える影響、および炉内機器のメンテナンスに必要な開口部形状の整合、厚板構造接合による組立方法の検討等を進める予定である。

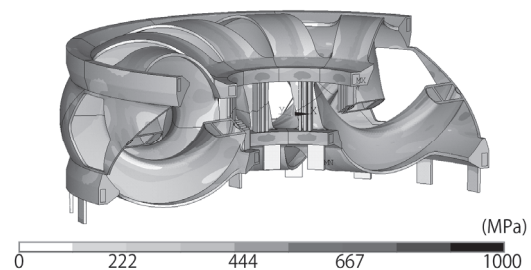


Fig.3 Von Mises stress distribution in the coils support structure of FFHR-c1.

参考文献

1. A. Sagara, et al.: Fusion Eng. Des. 89 (2014) p.2114
2. H. Tamura, et al.: Fusion Eng. Des. 124 (2017) p.605
3. T. Goto, et al.: presented at ISFNT-13, Sep. 25-29, Kyoto, Japan (2017)

半円状 MgB₂ 超電導バルク磁石の磁場特性評価 Magnetic field property of semicircular MgB₂ superconducting bulk magnets

石原 篤, 恩地 太紀, 赤坂 友幸, 福本 祐介(鉄道総研); 紀井 俊輝(京大); 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二(東大); 富田 優(鉄道総研)

ISHIHARA Atsushi, ONJI Taiki, AKASAKA Tomoyuki, FUKUMOTO Yusuke (Railway Technical Research Institute); Kii Toshiteru (Kyoto University); SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki, KISHIO Kohji (The University of Tokyo); TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)
E-mail: ai@rtri.or.jp

1. はじめに

MgB₂は、金属系超電導体最高の約 40 K の T_c をもち[1]、冷凍機冷却による超電導磁石などへの応用が期待される。さらに MgB₂ は異方性が低く、比較的長いコヒーレンス長を持つことから、無配向の多結晶体においても粒間の弱結合の問題がなく、優れた臨界電流特性を示し[2]、試料全体で均一な超電導特性を示すことが期待される。すなわち、MgB₂ は超電導バルク磁石として周期磁場生成装置(アンジュレータ)や NMR 等の計測機器への応用に実用上有利であると考えられる。

これまで我々は、均質性の優れた、MgB₂ バルク体の開発を行ってきた[3]。本研究では、アンジュレータへの応用を想定し[4, 5]、半円状 MgB₂ 超電導バルク磁石の空間磁束密度分布の評価をしたので報告する。

2. 実験方法

Mg と B の混合粉末を 20-25 mm ϕ 、厚さ 2.5-10 mm の円盤状に成型し、Ar 雰囲気下で 850°C、3 h の熱処理を行い、MgB₂ バルク体を作製し、得られたバルク体試料に対し、半円状に機械加工を施した。なお、一部の試料は機械的強度の向上を図るために補強を行った。作製したバルク体試料を冷凍機で 20 K まで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場中冷却により 3 T の磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場特性に関しては走査型ホールプローブを用いて空間磁束密度評価を行った。なお、試料温度はバルク体底面の温度とした。

3. 結果と考察

作製した半円状 MgB₂ バルク体をアンジュレータ用治具に組み込んだ外観を Fig.1 に示す。焼結後に半円状に加工した MgB₂ バルク体試料は、加工面にマクロスケールのクラック、ボイド等は見られなかった。半円状 MgB₂ バルク体の表面捕捉磁場の温度依存性を Fig.2 に示すが、中心からの位置に応じた捕捉磁場値を示すことを確認した。

当日は、半円状 MgB₂ バルク体の空間磁束密度分布を示し、形状効果が空間磁束密度分布へ与える影響について議論する予定である。

4. 結論

MgB₂ 超電導バルク体を作製し、応用を想定した上で、超電導バルク磁石としての素質を検討した。本研究では、アンジュレータ用の治具に組み込みこめるよう、半円形状に加工

を行い、磁場特性の評価を行った。今後は、複数個のバルク体を用い、空間磁場分布の評価を行っていく。



Fig.1 Undulator magnet array using MgB₂ superconducting bulk magnets.

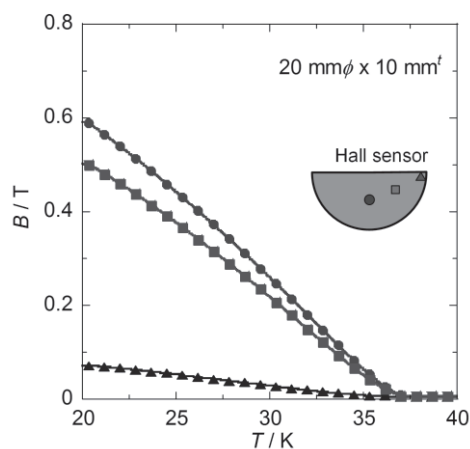


Fig.2. Trapped magnetic field of a MgB₂ semicircle superconducting bulk magnet.

5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科学研究費助成事業 (JP16H01860, JP17H01127) の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 例えば、M. Tomita *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference* **83** (2010) 86.
- [4] T. Kii *et al.*, *Proc. FEL2006* (2006) 653-655.
- [5] T. Kii *et al.*, *AIP conf. Proc. SRI2009* **1234** (2010) 539-542.

MO センサーによる高温超電導バルク磁石の捕捉磁場分布評価(2)

Evaluation of trapped field distribution in high- T_c superconducting bulk magnets using MO sensor (2)

赤坂 友幸, 恩地 太紀, 石原 篤, 福本 祐介(鉄道総研); 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二(東大);
紀井 俊輝(京大); 富田 優(鉄道総研)

AKASAKA Tomoyuki, ONJI Taiki, ISHIHARA Atsushi, FUKUMOTO Yusuke (Railway Technical Research Institute);

SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki, KISHIO Kohji (The University of Tokyo); Kii Toshiteru (Kyoto University);

TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)

E-mail: akasaka@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導バルク材は極低温下で高磁場まで高い臨界電流密度を有するため、小型で強力な磁場発生が実現できる。これまでに、優れた捕捉磁場特性を有するRE系高温超電導バルク体[1]、MgB₂超電導バルク体[2]の開発を行ってきた。

我々のグループでは、強力バルク磁石としての応用を見据え、超電導バルク体の磁場均一性ならびに磁束密度分布の評価を行ってきた。本研究では、磁気光学(MO)センサーを用いて、超電導バルク体の捕捉磁場分布を評価したので報告する。

2. 実験方法

MgB₂バルク体は、MgとBの混合粉末を用い、30 mmφ、厚さ10 mmの円盤状になるように成型し、Ar雰囲気下で850°C、3 hの熱処理を行い作製した。RE系バルク体はREBa₂Cu₃O_y、RE₂BaCuO₅、Ptの混合粉末を同じく円盤状に成型し、空気中にてcold-seeding法により溶融凝固を行い作製した。また、試料によってはリング状、半円状への汎用機械加工を施した。得られたバルク試料の1 mm上方にMOセンサーを配置し、冷凍機により20~50 Kまで冷却した後、超電導マグネットを用いて磁場を印加しゼロ磁場中着磁(ZFC)を行った。その後、ヒータにより試料温度を制御しながら升温し、MO像の変化を観察した。

3. 結果と考察

Fig.1にリング状RE系超電導バルク体の50 K、ZFCで着磁した際のMO像を、Fig.2にMgB₂超電導バルク体の20 K、ZFCで着磁した際のMO像を示す。MO像ではファラデー効果により磁束が侵入している箇所が明るく、磁束が侵入していない部分は暗く観察されている。いずれも試料形状に応じたMO像を確認できた。また、印加磁場を増加させるに従い、超電導の弱い箇所から磁束が侵入していく様子も確認できた。

4. 結論

超電導バルク体を作製し、MOセンサーを用いて捕捉磁場分布を評価した結果、バルク全体の磁気光学像を観察することができ、近距離においても試料形状に応じた捕捉磁場分布

が確認できた。当日は、本結果に加えて各種超電導バルク体の磁場中着磁を行った捕捉磁場分布についても議論する予定である。

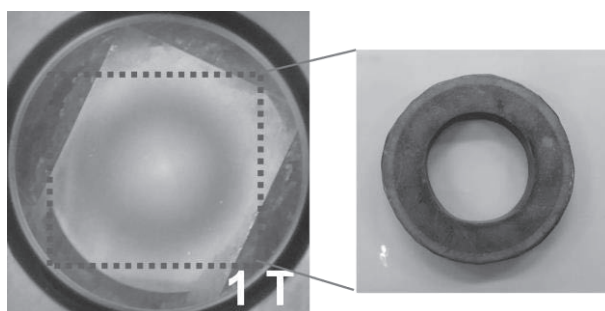


Fig.1 MO Image of trapped field distribution magnetized at 50 K under ZFC in a RE annular cylinder with 25 mm in inner diameter, 40 mm in outer diameter and 10 mm in thickness.

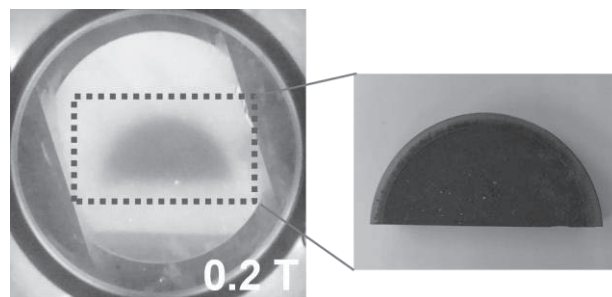


Fig.2 MO Image of trapped field distribution magnetized at 20 K under ZFC in a MgB₂ semicircular cylinder with 30 mm in diameter, and 10 mm in thickness.

5. 謝辞

本研究の一部はJSPS科学研究費助成事業(JP16H01860, JP17H01127)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] M. Tomita *et al.*, *Nature* **421** (2003) 517.
[2] 例えば、M. Tomita *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference* **83** (2010) 86.

スエーシング加工した MgB₂ 線材の輸送臨界電流特性に与える リンゴ酸添加の影響

Effect of malic acid doping on the transport critical current density of MgB₂ wire fabricated by swaging

前田 穂, 瀧川 博幸, 松本 明善, 熊倉 浩明 (NIMS)

MAEDA Minoru, TAKIGAWA Hiroyuki, MATSUMOTO Akiyoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: MAEDA.Minoru2@nims.go.jp

1. はじめに

二硼化マグネシウム(MgB₂)超伝導体は、線材などの実用材料への適合性の観点から、潜在的に優れた特長・物性を有しており、様々な超伝導応用が考案されている。例えば、我々の高質な健康管理に欠かせない磁気共鳴画像(MRI)診断装置の次世代化や、太陽光発電や風力発電などの分散型電源において、その電力供給を高安定化するための液体水素ステーション用超伝導電力貯蔵(SMES)などであり、医療・エネルギー分野で超伝導コイルとしての性質を利用した、磁場応用に期待が持たれている。現在、MgB₂線材をこれらの超伝導コイルに応用するためには、臨界電流特性のさらなる改善が要求されており、その課題の一つに線材化方法の最適化が挙げられている。この理由として、MgB₂線材に関するこれまでの研究では、線材化への加工手段に、従来から実績のある圧延やダイス線引きなどの方法を選択・適用していることが極めて多く、これらの作製方法に依存していることが指摘されている。その一方で、ダイスが回転しながら短いストロークでの打撃運動により成形する、スエーシング加工を用いた線材に関する研究は未だ少ない現状となっている。そこで本研究では、スエーシングマシンを用いて MgB₂線材を作製し、さらに磁場下の超伝導特性の改善に有効な添加剤であるリンゴ酸を加えて、その臨界電流特性への影響を評価した。

2. 実験方法

MgB₂線材は、硼素粉末とマグネシウム粉末及びリンゴ酸粉末を原材料として、*In Situ*パウダー・イン・チューブ法により作製した。添加剤のリンゴ酸は、MgB₂に対して 1.0, 2.5, 5.0 mol%に相当する量を適用し、線材の焼結は、600°Cの温度に固定して種々の熱処理時間で行った。また、比較のために、無添加の MgB₂線材も同様の方法で作製した。線材の臨界電流は 4.2 Kの温度で、10~12 Tの磁場範囲で測定し、その臨界電流密度(J_c)は線材コアの面積で算出した。

3. 結果と考察

まず初期条件として、スエーシング加工した線材を 600°Cの温度で 1時間焼結した場合、温度 4.2 K 及び磁場 10 Tでの J_c は、図 1に示す通り、無添加の線材で ~8600 A/cm²となり、さらにリンゴ酸を 2.5 mol%添加した線材で ~20000 A/cm²を超える値まで向上することがわかった。この磁場下の輸送特性の改善は、リンゴ酸を原材料として用いた炭素添加の効果であり、他の線材加工法と同様に、スエーシング加工した線材においても有効であることが明らかになった。一方で、添加量を 5.0 mol%まで増加すると、600°Cで 1時間の短時間焼結では、無添加の線材に比べて、 J_c の磁場依存性が多少改善しているものの、低磁場側で低い値に留まることがわかった。そこで、熱処理時間を長くして線材の焼結を試み、温度 4.2 K 及び磁場 10 Tでの J_c に与える影響を評価した。その結果、5.0 mol%添加した線材では、図 2に示す通り、熱処理時間の増加とともに J_c が増大していく傾向にあり、特に焼結条件を 1時間から 4時間に変えることで、 J_c が大きく改善していることがわかった。しかしながら、無添加の線材と 2.5 mol%まで添加した線材では、程度の差はあれ J_c の減少傾向に至ることが明確になった。添加量に関しても同様に評価した結果、図 3に示す通り、2.5 mol%に相当する量までは、熱処理時間に依存せず、 J_c が単調に増加していく傾向にあることがわかった。当日は、これらの結果に対して、圧延及びダイス線引きの線材加工法から作製した実験結果と比較することで、スエーシング加工したリンゴ酸添加線材の特長をより詳細に報告する。

謝辞

本研究は JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA)「未来の水素利用社会を支える低コスト高性能 MgB₂線材の開発」の助成を受けたものである。

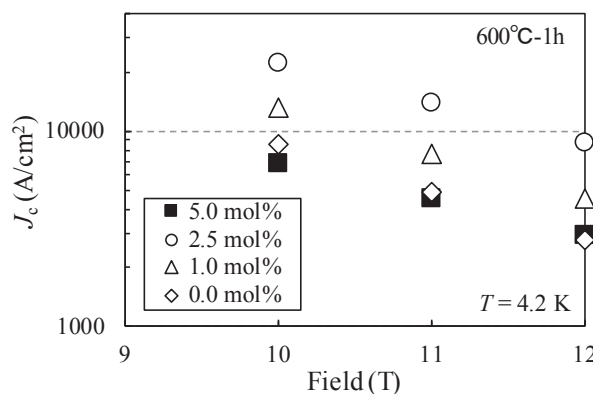


Fig.1 Magnetic field dependence of transport J_c at 4.2 K for un-doped and malic acid-doped MgB₂ wires fabricated by swaging. The amounts of malic acid doping were chosen to be 1.0, 2.5, and 5.0 mol% of total MgB₂.

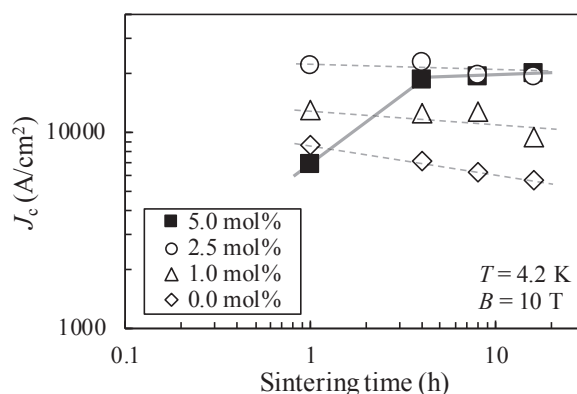


Fig.2 Transport J_c at 4.2 K and 10 T as a function of the sintering time at 600°C for un-doped and malic acid-doped MgB₂ wires fabricated by swaging. The amounts of malic acid doping were chosen to be 1.0, 2.5, and 5.0 mol% of total MgB₂.

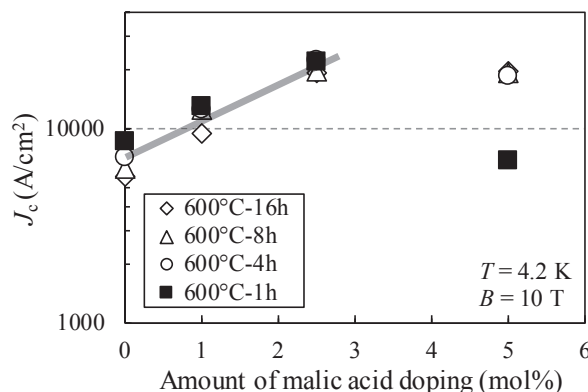


Fig.3 Transport J_c at 4.2 K and 10 T as a function of the amount of malic acid doping for MgB₂ wires fabricated by swaging. The swaged wires were sintered at 600°C for 1, 4, 8, and 16 hours.

GM 冷凍機用鉛代替蓄冷材酸化銀の特性

Properties of alternative regenerator material silver oxide to lead for GM refrigerator

山下 知大, 江口 朋子, 河本 崇博, 齋藤 明子(東芝); 増山 新二(大島商船高専)

YAMASHITA Tomohiro, EGUCHI Tomoko, KAWAMOTO Takahiro, SAITO Akiko (Toshiba Corporation);

MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College)

E-mail: tomohiro7.yamashita@toshiba.co.jp

1. はじめに

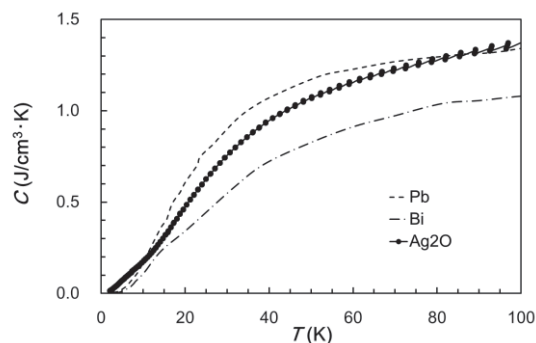
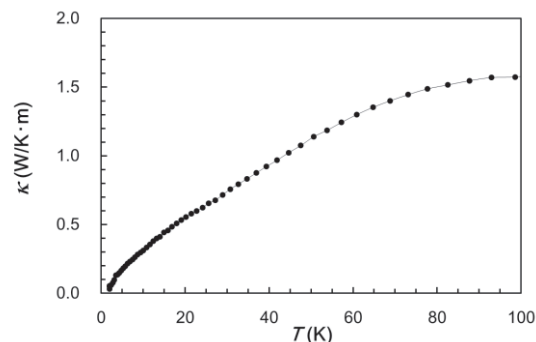
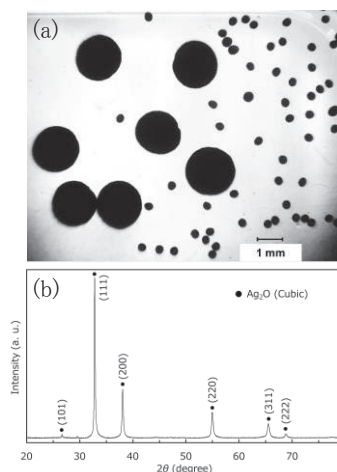
医療用 MRI などの超電導機器において、超電導磁石の冷却等には、Gifford-McMahon(GM)冷凍機が広く使用されている。GM 冷凍機の冷凍性能は、冷凍機内部に搭載される蓄冷材の比熱特性に大きく左右される。従来、2段 GM 蓄冷器では、1段目には室温から 100 K までの領域で比熱特性の高い Cu が、2段目には 100 K 以下の低温領域で比熱特性の高い Pb が使われてきた。近年、医療機器への RoHS 規制を受け、Pb 代替蓄冷材が求められており、Bi 系合金などが検討されている。我々は、格子の稼働運動が低温比熱に寄与する Ag_2O に着目し、鉛代替蓄冷材として検討している[1]。本研究では、 Ag_2O の冷凍機搭載を目指して、これに適した粒子形状への成形を検討するとともに、比熱、熱伝導率などの熱特性を調べ、これに基づく冷凍性能の見積もりを行ったので報告する。

2. 実験

Ag_2O のバルク体および球状粒子の試料を作製し、構造評価、比熱および熱伝導率の評価を行った。バルク体は、放電プラズマ焼結(Spark Plasma Sintering)法により作製し、球状粒子は、湿式プロセスにより作製した。構造評価は粉末 X 線回折法により行い、比熱および熱伝導率は、Quantum Design 社製 Physical Properties Measurement System (PPMS) の比熱オプションと熱輸送オプションをそれぞれ用いて、2~300K の温度範囲で測定した。比熱は、バルク試料と球状粒子の各々について評価し、これらを比較した。また、様々なサイズの粒子の成形も試みた。

3. 結果

Fig. 1 に 2~100 K における Ag_2O の比熱の温度依存性を示す。 Ag_2O は、全温度域で参照に示した Bi よりも大きな比熱を示し、11 K 以下では Pb を上回る。11 K 以下で Ag_2O の比熱が温度に線形な形状を示すのは、格子振動の光学モードが寄与していることに起因するものと考えられる。Fig. 2 に Ag_2O バルク体の熱伝導率の温度依存性を示す。温度の低下とともに熱伝導率は低下し、10 K で約 0.3 W/K \cdot m であった。 Ag_2O を蓄冷材として用いる場合の適切な粒子サイズについては、今後検討を進めるが、評価した熱伝導率と比熱から見積もると、250 μ m 程度のサイズであれば、冷凍サイクルの時間内に材料表面から内部まで十分に熱が伝導するものと考えられる。さらに、0.2 ~ 2 mm 程度の粒子の作製が可能であり、粉末 X 線回折法によりこれらの粒子が Ag_2O 単体であることを確認した(Fig. 3 参照)。また、上記の比熱と熱伝導率の評価結果をもとに冷凍性能の見積もりを行った。結果は当日報告する。

Fig. 1 Temperature dependence of specific heat of Ag_2O , Pb, and Bi.Fig. 2 Temperature dependence of thermal conductivity of Ag_2O .Fig. 3 (a) Photograph and (b) powder X-ray diffraction pattern of Ag_2O particles.

参考文献

1. T. Eguchi, *et al.*: Abstracts of 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, (2016) p.119

磁性材料として La 合金を用いた室温磁気冷凍機の特性

Characteristics of room-temperature magnetic refrigerator using La alloy for magnetic material

谷口 朋宏, 岡村 哲至(東工大); 裴 相哲(サンデン); 栗岩 貴寛(三徳)

TANIGUCHI Tomohiro, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (Sanden); KURIWA Takahiro (Santoku)

E-mail: taniguchi.t.ak@m.titech.ac.jp

1. はじめに

冷凍空調機器のノンフロン化を実現する一つの解として室温磁気冷凍機の研究が行われている。磁気冷凍は磁性材料の磁気熱量効果を利用したもので、励消磁と熱交換媒体の流れを用いて熱を移動させる。これまで磁性材料充填ダクト内に磁気転移温度の異なる複数の材料を層状に充填することによって磁気冷凍機の運転温度範囲が拡大することが明らかにされている[1,2]。本報告では、従来まで使用されていた Gd 系合金よりも大きな磁気エントロピー変化量を有する La 系合金をダクトに充填した際の冷凍特性を調査した。

2. La 系合金について

本研究で用いた La 系合金は $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si})_{13}$ 型構造を有する $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si})_{13}$ 系合金である。これは磁気異方性がなく二次相転移を示しヒステリシスがない[3]。Fig.1 に $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si})_{13}$ 系合金の磁気エントロピー変化量を示す。この磁気エントロピー変化量のピーク値に対応する温度のことをキュリー温度という。このキュリー温度は Co の含有量を変化させることで調整することができる。図からわかるようにキュリー温度の小さい La 合金は磁気エントロピー変化量が大きく、キュリー温度を上げるにつれて磁気エントロピー変化量が小さくなる。

3. 一次元伝熱数値解析

1 次元伝熱数値解析を用い磁性材料充填ダクトの熱特性を調査した。ダクト内の計算には磁性材料と熱輸送媒体との間の 1 次元エネルギー保存方程式を解いた。有効熱伝達率は Ranz の式および磁性材料のピオ数を用いて算出した[4]。

4. 解析条件

Fig.2 に解析に用いた磁性材料充填ダクト内の La 合金を充填する条件を示す。内径 14mm 長さ 150mm のダクトにキュリー温度が 25°C, 19°C, 13°C, 7°C, 1°C の 5 種類の平均粒径 0.45mm の球状材料を充填し、それぞれの充填長さを変化させた。(a)すべての材料を等しい長さで充填した条件、(b)キュリー温度が高い材料を増やした条件、(c)キュリー温度が低い材料を増やした条件、(d)キュリー温度が高い材料の磁気エントロピー変化量の小ささを補うために、磁気エントロピー変化量のピーク高さと充填量の積が等しくなるように充填した条件、の 4 通りである。磁場を掛ける周波数は 2Hz、流量は 0.5L/min、排熱温度は 25°C とした。

5. 結果と考察

Fig.3 に冷凍能力と低温端温度の関係を表す解析結果を示す。(b)と(c)を比べると、キュリー温度の低い材料の割合が多いほど低温端温度が低下し、キュリー温度の高い材料の割合が多いほど冷凍能力が向上することがわかる。また (a), (d) の充填条件の結果より冷凍能力と低温端温度にほとんど差がないことがわかる。充填する材料の磁気エントロピー変化量に 28% 程度の差があっても冷凍能力や低温端温度に大きな影響はないと示唆される。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて行ったものである。

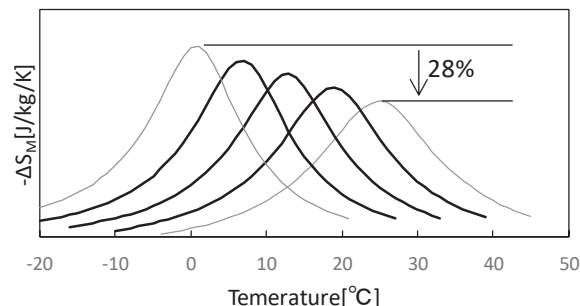


Fig.1 Magnetic entropy change of $\text{La}(\text{FeCoSi})_{13}$ alloys [3]

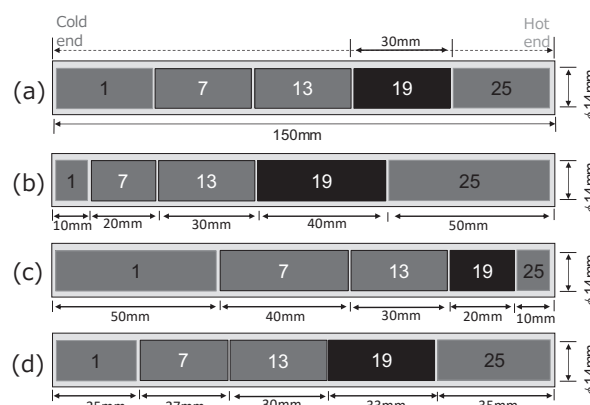


Fig.2 Arrangement of $\text{La}(\text{FeCoSi})_{13}$ alloys having different Curie temperature used for simulations

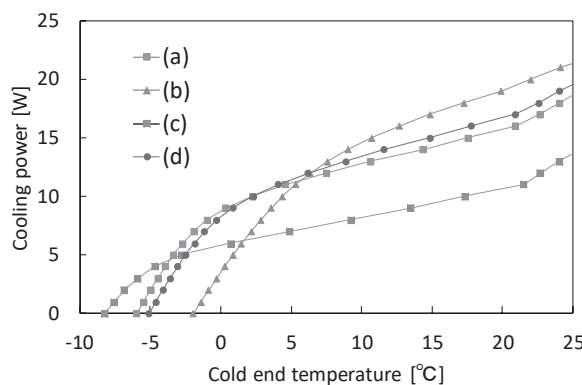


Fig.3 Analysis result of cooling power for the case of Fig.2

参考文献

1. M. A. Richard, et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 95 (2004) p.2146-2150
2. C. Zimm, et al.: International Journal of Refrigeration, Vol. 29 (2006) p.1302-1306
3. B. R. Hansen, et al.: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 322 (2010) p.3447-3454
4. K. L. Engelbrecht, et al.: ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 128 (2006) p.1060-1069

磁性蓄冷材 $Gd_{1-x}Er_xGe_{1.5}$ の磁化及び比熱特性

Magnetization and specific heat measurements of magnetic regenerator material $Gd_{1-x}Er_xGe_{1.5}$

森岡 直矢, 松本 圭介, 平岡 耕一 (愛媛大)

MORIOKA Naoya, MATSUMOTO Keisuke, HIRAOKA Koichi (Ehime Univ.)

E-mail : e843031u@mails.cc.ehime-u.ac.jp

1. 緒言

GM 冷凍機は主にヘリウムの液化に用いられ、蓄冷器に磁性蓄冷材を組み込むことで 2 K 付近までの冷凍を可能にしている。磁性蓄冷材には、15 K 以下で磁気転移に伴う大きな比熱のピークを示す材料が使用される。比熱のピークの大きさは基底多重項の縮重度に依存しており、一般的には Ho, Er など、全角運動量の大きな希土類が用いられる。

結晶中では、結晶場の静電ポテンシャルによって軌道のエネルギー準位が分裂し、転移温度付近でのピークが小さくなる要因となるが、Gd イオンは、軌道角運動量が 0 であり、結晶場による静電ポテンシャルの影響を受けない。よって理論上、磁気相転移温度付近で大きな比熱のピークを示すことが予測される。しかし、Gd 単体の T_C は 292 K と希土類中で最も高く、その化合物の転移温度も高い傾向にある。

先行研究において、 $GdGe_{1.5}$ は $T_N = 28.1$ K と報告されており⁽¹⁾、Gd 化合物の中では比較的磁気相転移温度が低い。

本公演では、 $GdGe_{1.5}$ の Gd サイトに Er を置換することで、磁気相転移温度を低下させた試料を作製し、磁化及び比熱を測定した結果を発表する。

2. 実験

Gd (99.9 %), Er (99.9 %), Ge (99.99 %) を原料とし、アーク溶解後、アニール処理 (810~1100 °C, 72 時間) をすることで、 $Gd_{1-x}Er_xGe_{1.5}$ ($x = 0, 0.5, 0.6, 0.7, 1$) を作製した。粉末 X 線回折によって構造解析をした後、SQUID 磁束計、熱緩和法により、磁化及び零磁場比熱を測定した。

3. 結果

粉末 X 線回折測定の結果より、すべての $Gd_{1-x}Er_xGe_{1.5}$ 試料は AlB_2 型の結晶構造であることを確認した。(Fig.1)

磁化測定の結果より、 $GdGe_{1.5}$ と $ErGe_{1.5}$ はいずれもの反強磁性であり、磁気相転移温度はそれぞれ 28 K と 3 K であった。

Fig.2 に零磁場比熱の測定結果及び、実用材料である Pb、 Er_3Ni 、 $HoCu_2$ との比較を示す。 $GdGe_{1.5}$ は予想通り大きな比熱のピークを示す。Gd サイトに Er を置換すると、磁気相転移温度に伴うピークを示す温度は低下し、比熱のピークはなだらかになった。これは、結晶的な無秩序性に起因していると考えられる。

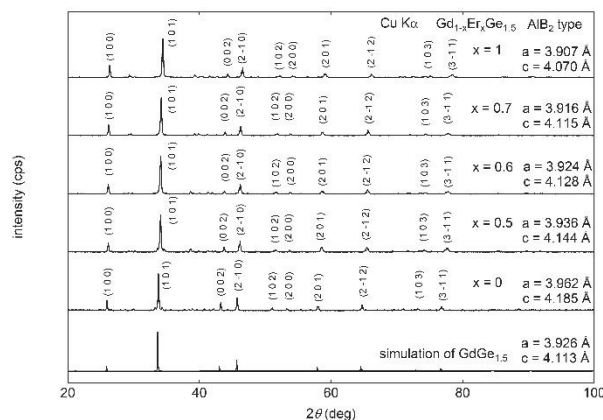


Fig.1 X-ray diffraction patterns of $Gd_{1-x}Er_xGe_{1.5}$

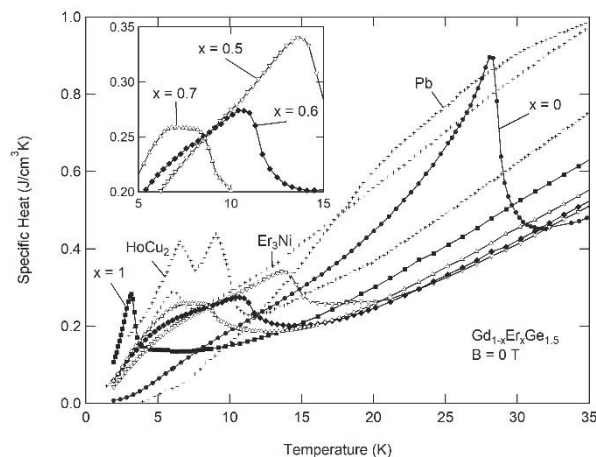


Fig.2 Specific heat of $Gd_{1-x}Er_xGe_{1.5}$ and comparison with practical materials⁽²⁾

参考文献

- (1) Mulder F.M. et al., J. Alloys Compd., **205** (1994) 169
- (2) 岡村正巳 他, 東芝レビュー, **55** 1 (2000) 64

大気中への種々冷媒ガス放出時の流動ならびに酸素濃度変動に関する数値実験

Numerical simulation on time dependent behavior of atmospheric oxygen during a localized coolant gas spill

岡村 崇弘 (KEK)

OKAMURA Takahiro (KEK)

E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

1. 緒言

一般的に、液体ヘリウムなどの極低温冷媒を用いた実験装置で何らかの問題が発生した際、その冷媒ガスは大気中へ放出されることがある。こうした冷媒ガスの放出に伴う流体挙動や酸素濃度の変化を定量的に理解することは、設備の安全設計並びに安全策を講じる際に極めて重要である一方、その挙動を実験的に明らかにすることは、報告事例がいくつかあるものの一般的には非常に困難である。特に高エネルギー物理実験設備は、設備の巨大化に伴い冷媒インベントリが増大し、この大容量の冷媒ガスが長距離にわたる加速器トンネルのような排気設備と気密構造を兼ね備えたやや特殊な空間系に放出されることが想定される。そのため事故時の予測を的確に行い然るべき安全指針を打ち立てるためには、大規模実験に代わり精度がある程度保証された数値シミュレーションを行うことが有効である。本報ではこうした冷媒ガス放出系に関するシミュレーション方法に加え、超電導機器の冷却に使用される窒素、ヘリウムに加え、その他検出器、モデレーターなどでも用いられる水素、アルゴン、キセノンについて同様に機器外へ放出された場合の流体挙動の時間変動について数値実験した結果を報告する。

2. 解析系

冷媒ガスが機器の外に放出される流動様相はその機器に生じる事象により大きく異なる。本報では放出条件としては種々に変えた流動様相について数値実験した。解析体系は(系1)床面 $20 \times 20 \text{ m}^2$ 、高さ 10 m の空間、(系2) ILC ディテクタホール [1]、(系3) ILC 用加速器 [2] トンネル内の移流拡散現象に着目した。放出口は全ての系において鉛直上向きを想定している。流体方程式、乱流モデル等具体的解析手法の詳細については当日述べる。

3. 結果と考察

Fig.1 に床面 $20 \times 20 \text{ m}^2$ 、高さ 10 m の空間系 1 へのヘリウム、アルゴン、キセノンの移流・拡散挙動の一例、Fig.2 に放出点から半径 4 m 高さ 1 m ならびに 3 m 地点における質量分率の時間発展を示す。アルゴン、キセノンは標準状態においても空気よりも密度が大きいため、放出直後は鉛直上方に向かうが周辺空気との密度差に起因して空間下部に滞留していく様子が伺える。一方でヘリウムは噴流による対流効果と浮力効果により空間上部に対流することがわかるが乱流拡散により比較的下部にもその影響を及ぼすことが伺える。Fig.3 に ILC の加速器ラインを想定し、破裂板から同時多発的にヘリウムガスされた場合のトンネル一部 ($150 \text{ m} \sim 290 \text{ m}$) の移流拡散の様子を示す。多発的に放出された場合、放出領域中心部は浮力の影響でトンネル上部においてヘリウムの質量分率が高くなるが、放出領域中心から下流域については、放出直後の圧力変動によりピストン効果的に巨視的流れが生じ、放出領域端部では浮力の影響よりトンネル長手方向

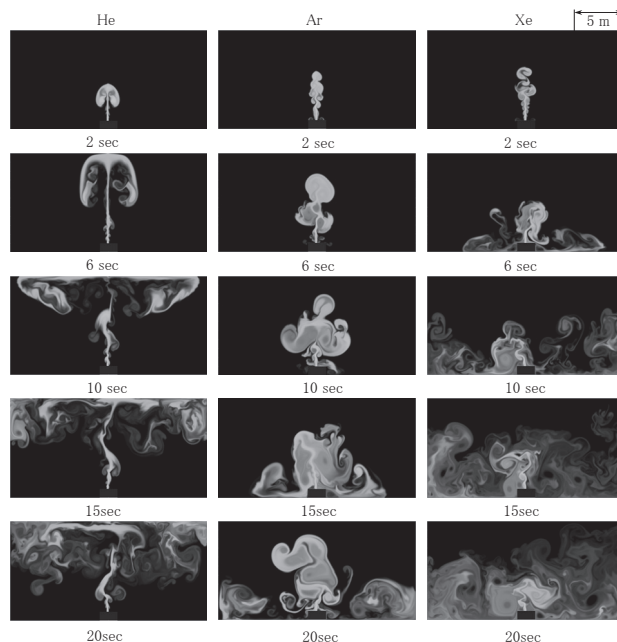


Fig. 1 Time dependent behaviour for He, Ar and Xe.

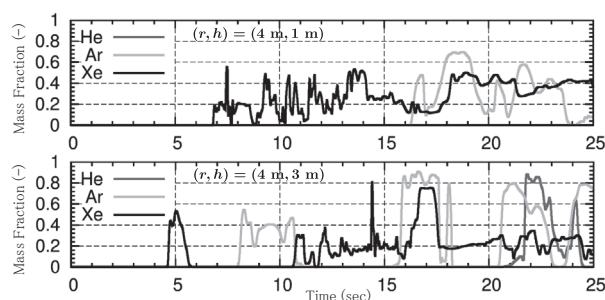


Fig. 2 Time dependent behaviour for He, Ar and Xe.

の巨視的流れによる影響から上部下部ともに移流拡散している様子が伺える。一方で放出が1, 2箇所程度の場合、主にトンネル上部を移流・拡散していく様子がシミュレーションから示された。これらの詳細については当日報告する。

参考文献

1. T. Okamura: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88, p155
2. M. Miyahara, et al.,: Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p795-798

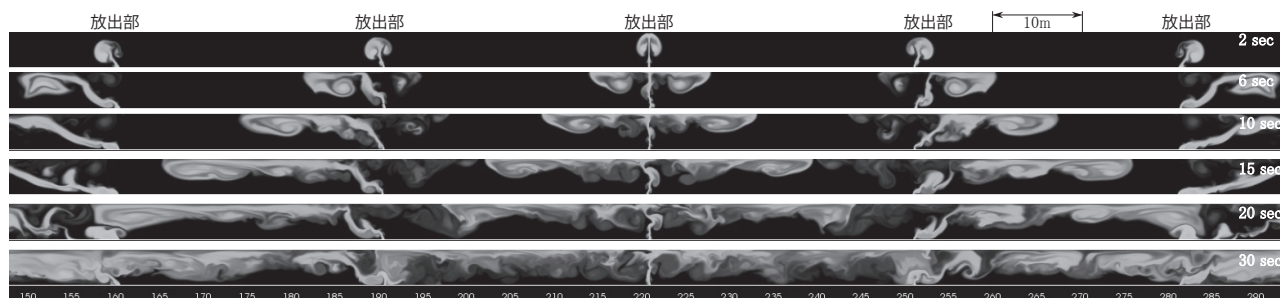


Fig. 3 Time dependent behaviour from 0 sec to 30 sec for the helium spill into the accelerator tunnel, ($150 \text{ m} \sim 290 \text{ m}$).

バイメタルを用いた極低温用光ファイバ温度計の開発

R&D of optical fiber thermometer for very low temperature with bimetal

清水 洋孝, 小島 裕二, 仲井 浩孝, 中西 功太, 原 和文, 本間 輝也 (高エネ研)

SHIMIZU Hiroataka, KOJIMA Yuji, NAKAI Hiroataka, NAKANISHI Kota, HARA Kazufumi, HONMA Teruya (KEK)

E-mail: hiroataka@post.kek.jp

1. はじめに

コア部分に、ブラッググレーティング (Bragg grating) と呼ばれる規則的な格子状に屈折率の変化を持たせた光ファイバは、ファイバブラッググレーティング (FBG) センサと呼ばれ、既に多方面で実用されている[1]。我々はこの FBG センサを利用した、4 K 以下の極低温の温度域で使用できる新しい温度計の研究開発を現在進めている。

FBG センサの利点としては1本の光ファイバだけを低温域に持ち込む事で、容易に測定の多点化が可能となる事で、従来の温度計のように、大量の金属信号線を必要としない点が挙げられる。対して、極低温領域では、素朴な grating 間隔の熱収縮の自由度は既に凍結されており、FBG 単体での運用では温度計として必要な感度の維持が難しい。この問題を克服する為に、極低温環境の中でも温度変化への感度を維持するための金属治具の利用を念頭に研究を進めている。この報告では、現在我々が取り組んでいる、バイメタル用いた温度検出能力の回復の研究開発についても説明を行う。

2. FBG の動作原理

最初に FBG センサの動作原理を説明する。ファイバの一端から導入された白色光が、グレーティング部分を通過する。この時、格子間隔とファイバコアの屈折率の積で規定される、実効的な光路長さに対応する波長成分だけが、選択的に反射され、残りの波長成分はそのままグレーティング部分を通り抜ける。温度変化や外力の作用等の様々な外因により、格子の間隔が増減した場合、反射されて戻って来る光の波長が、それに合わせて変化する。FBG の持つこの性質を利用すると、反射光の波長変化を測定する事で、グレーティングが設置されている場所における、温度や応力の変動の様子を知ることが出来る。

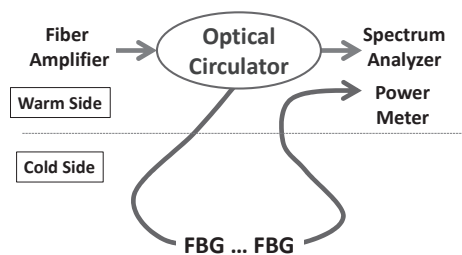


Fig.1 Schematic of Optical Flows including FBG

Fig.1 に示した配置図からも解る通り、FBG センサの場合、測りたい極低温領域に導入する必要があるのは、グレーティング部分を含む光ファイバ一本のみで済む。導入された光はコア内を全反射しながら漏れなく伝わる事と、ファイバを構成するガラスの熱伝導率は金属の1/10以下である事から、従来の测温抵抗体と異なり、発熱や熱侵入を発生させる恐れが無い点が、FBG を極低温域用温度計として用いる最大の理由である。更に上で説明したように、ある格子間隔のグレーティング部分を反射されずに通り抜けた白色光は、違う格子間隔のグレーティングへの入力光として使う事が出来るので、一本の光ファイバに異なる間隔のグレーティングを多数点設ける事で、容易に測定点の多点化が可能となる点も、FBG センサの著しい特徴の一つである。

3. 予備試験結果

Fig.2 に、FBG センサを用いて行った予備試験の結果を示す[2]。Fig.2 の左側が、異なる格子間隔を持つ FBG を直列に繋いだ際の反射光の様子であり、1040nm から 1060nm の3本の鋭いピークが得られている。これらのピーク位置の変動が格子間隔の変化に対応している。Fig.2 右側は、FBG を浸している熱浴の温度を変化させた際の、ピーク位置の変化の様子を調べた結果である。熱浴の温度が下がるに連れ、反射される光の波長が短く(格子間隔が短く)なっている事が解る。

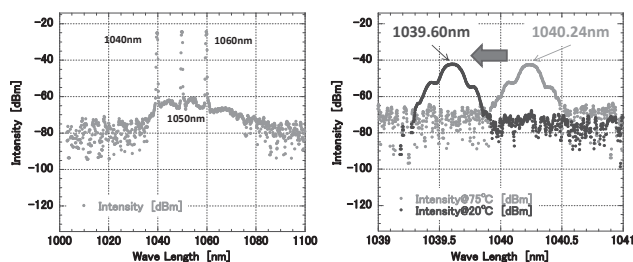


Fig.2 Examples of Spectrums of FBG

これらの試験を踏まえ、液体窒素や液体ヘリウムを使った冷却試験を行い、20 K 以下の温度域でも波長変化の感度を維持するための金属治具の開発を検討している[3]。

4. バイメタル治具の利用

金属治具として、バイメタルの利用を検討している。Fig.3 に、現在考えている温度検出に至る流れをのせる。ここでは、グレーティング部分を介してファイバコアからクラッド部分へと染み出す、クラッドモードと呼ばれる光を利用した方法を説明する。温度の低下によって凍結したバイメタルの自由度を、クラッドモードを使って回復させ、環境温度時応じた熱収縮を起こさせる事を狙いとしており、発生した収縮による応力変化を再び FBG で検知する事で、環境温度を測定する狙いである。

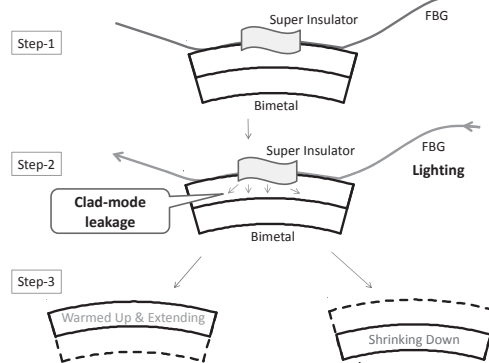


Fig.3 Schematics of Implementation of Bimetal

参考文献

- H. Yamada, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, (2012) pp.72
- H. Shimizu, et al.: Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2016) pp.1281
- H. Shimizu, et al.: Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2017)