

高純度アルミニウムの電気伝導度の温度依存性

Temperature dependence of electrical conductivity of high purity aluminum

恵 智裕, 星河 浩介, 田中 一郎(住友化学)

MEGUMI Tomohiro, HOSHIKAWA Hiroaki, TANAKA Ichiro (Sumitomo Chemical Co., Ltd.)

E-mail: megumit@sc.sumitomo-chem.co.jp

1. はじめに

高純度アルミニウムは高い電気伝導度、すなわち熱伝導度を有することから、熱伝達材や熱シールド材等として有用な材料の一つである。超電導用途等の各種用途における、熱伝達材や熱シールド材の実使用温度は、4.2K 近傍の極低温から 40K を超える温度まで、様々な温度域がある。従って、電気伝導度の温度依存性を把握することは、材料選択や装置設計等において、重要な要素の一つとなる。

上記背景において、4.2K から 296K までの温度域における高純度アルミニウムの電気伝導度を評価した。当社の所持する様々な純度のアルミニウムの板材を用い、純度ごとに系統立てて電気比抵抗および抵抗比 (RR) を測定した。また、純度 5N および 6N の高純度アルミニウムに関しては、板厚の異なる試料の電気比抵抗および抵抗比を測定し、電気伝導度を与えるサイズ効果の温度依存性について考察した。

2. 実験方法

純度 2N7 (99.7%)、2N8 (99.8%)、4N (99.99%)、5N (99.999%)、6N (99.9999%) および 6N7 (99.99997%) のアルミニウムのブロックを圧延し、板厚 0.1、0.5、1 および 2mm の板材を作製した。比較材として、純度 5N の無酸素銅のブロックからも同様に、板厚 0.5mm の板材を作製した。板材から 10 × 160 × 各板厚 mm の形状に切出した後、その表面を酸洗浄した (汚染除去)。酸洗浄した切出し材を、真空中で 500°C × 3 時間熱処理し、測定試料とした。

試料を液体ヘリウムで冷却し、四端子法 (電圧端子間距離 100mm) を用いて 4.2K の電気抵抗を測定した後、試料を任意の温度に加熱保持して、4.2K を超える温度の電気抵抗を測定した。但し、77K の電気抵抗は試料を液体窒素で冷却して測定し、296K の電気抵抗は恒温水槽中で測定した。電流は 0.1 ~ 3A まで印加して測定した。測定した電気抵抗から電気比抵抗および抵抗比を求めた。

3. 実験結果

純度の異なる試料の電気比抵抗を Fig.1 に示した。4.2 ~ 100K の温度域において、純度 4N 以上の高純度アルミニウムの電気比抵抗は、純度 2N7 および 2N8 の純アルミニウムよりも低くなった。特に、純度 5N 以上の高純度アルミニウムの電気比抵抗は、4.2 ~ 20K の温度域において、著しく低くなった。4.2 ~ 70K の温度域において、純度 4N 以上の高純度アルミニウムの電気比抵抗は、純度 5N の無酸素銅よりも低くなったが、70K を境にして、電気比抵抗の逆転現象が確認された。

板厚の異なる試料の抵抗比を Fig.2 に示した。4.2K 近傍の抵抗比は、板厚が大きいほど高く、サイズ効果を顕著に反映したが、温度上昇に伴って、その差は小さくなり、30K では純度や板厚によらず、抵抗比は同レベルになった。30K 以下では格子振動だけでなく、電子の表面散乱、すなわちサイズ効果も、電気伝導度に大きく寄与すると考えられる。4.2 ~ 296K の温度域において、純度 6N で板厚 0.1mm の試料の抵抗比は、純度 5N で板厚 2mm の試料と同レベルになった。すなわち、電気伝導度や熱伝導度が要求される材料選択において、より高純度のアルミニウムを選択すれば、材料の薄型化が可能になることを示している。

実験結果の詳細および Fuchs-Sondheimer 則を用いたバルク材の電気比抵抗および平均自由行程の推定 [1] と実測との比較に基づく考察の詳細は、本学会当日に報告する。

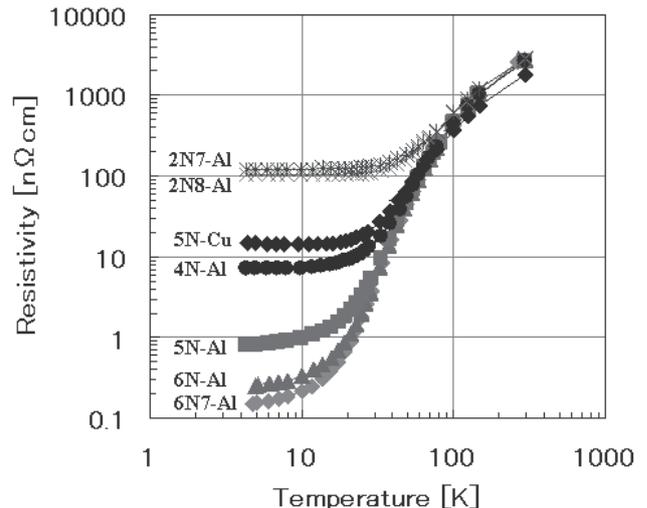


Fig.1 Temperature dependence of electrical resistivity.

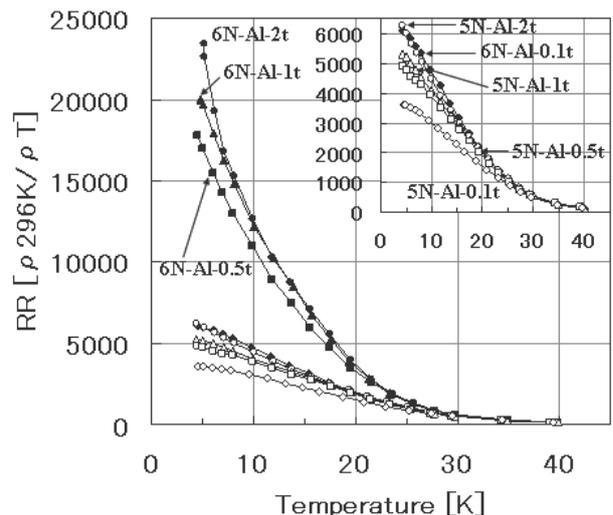


Fig.2 Resistivity ratio (RR) of 5N and 6N-Al with different thickness.

参考文献

[1] I. Nakamichi, et al.: Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 49 (1980) p.1350

光ファイバ温度センサの極低温特性

Characteristics of optical fiber sensor at cryogenic temperature

山田 秀之, 小方 正文, 水野 克俊, 長嶋 賢(鉄道総研)

YAMADA Hideyuki, OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI)

E-mail: hiyamada@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導磁石の内部温度を光ファイバ温度センサにより測定する技術の開発を行っており, これまで極低温での感度向上方法¹⁾, 振動を与えた状態での温度測定への影響²⁾, 多点型と分布型の比較等³⁾について報告した. 光ファイバ温度センサは1本のセンサで分布的に測定ができ, 熱侵入が少なく電気絶縁性が高いなど, 極低温機器内部の温度測定を行うのに適しているセンサであり, これまでの結果から, 光ファイバ温度センサは極低温においても安定的に感度良く温度測定できる可能性があり, 振動に対してほぼ影響がないことがわかった. 今回は, 安定的に更に感度を良くする可能性のある方法により光ファイバ温度センサを製作して, 極低温特性を試験により確認する.

2. コーティング

これまで検討している FBG(Fiber Bragg Grating)方式の光ファイバ温度センサは, 光ファイバに入射した光が温度センサ部である FBG 部で反射して戻ってくる. この FBG 部にはそれぞれ異なる間隔でグレーティング加工してあり, 温度が変化すると, その FBG 部のグレーティング間隔が温度変化により伸縮して反射波の波長がシフトするため, 温度を測定することができる.

しかし, 低温になると熱膨張率が小さくなるため波長シフト変化量も小さくなる. そのため, 低温での熱膨張率を大きくする目的で, 様々な材料をコーティングしてきた. これまで低温でも安定して最も波長シフト変化量が大きかった材料は, アクリル樹脂の上にニッケルを施した二重コーティングで, コーティングなしに対して波長シフト変化量(グラフ傾き)は約 1.3 倍であった. 今回, 更に熱膨張率の大きい材料である銅及び亜鉛をコーティングした光ファイバ温度センサを製作し, 低温での温度特性を確認した. 50K での熱膨張率を比較すると, ニッケルに対して銅は約 2 倍, 亜鉛は約 9 倍でアクリル樹脂と同程度である. Fig.1 にコーティングした場合の模式図を示す.

3. 計算結果・試験方法

Fig.2 に試験装置の概要図を示す. 銅または亜鉛をコーティングした FBG 部を 3 つ有した光ファイバ温度センサを冷却容器内に設置し, また, 比較として, セルノックス温度センサを同じ箇所を設置する. 室温から 10K 程度まで冷却した後, 冷凍機を停止して自然放置により室温まで昇温する.

Fig.3 に結果を示す. グラフはセンサ出力の温度依存性を示している. なお, 比較として, コーティングなし, アクリル樹脂, ニッケル, アクリル樹脂とニッケルの二重をそれぞれコーティングした場合の結果も示している. コーティングなしに対して波長シフト変化量(グラフ傾き)は, 銅コーティングで約 1.86 倍, 亜鉛コーティングで計算値ではほぼアクリル樹脂と同等の約 6.4 倍であった.

4. 考察・まとめ

光ファイバ温度センサの極低温での適用のために, FBG 方式タイプについて, 極低温での更なる感度向上方法を検討した結果, 銅, 亜鉛をコーティングすることで, 安定した出力で,

アクリル樹脂とニッケルの二重コーティングより感度が向上することがわかった. 当日は, 亜鉛コーティングの測定結果についても報告する.

本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施した.

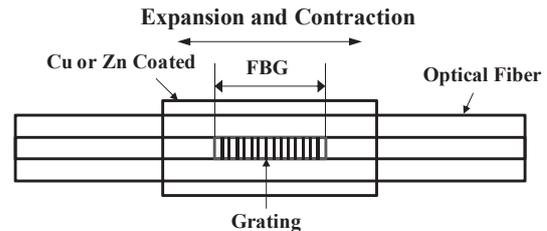


Fig.1 Coated Optical Fiber Sensor

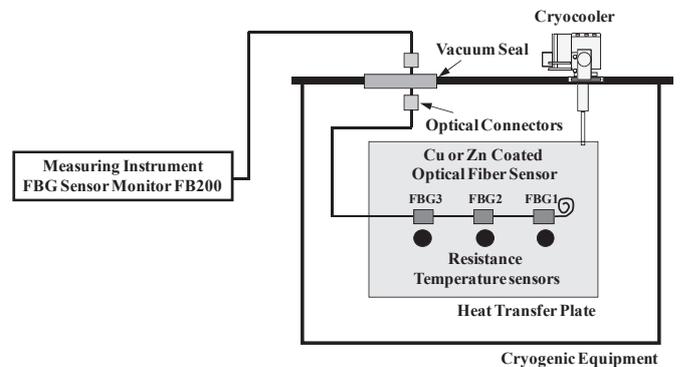


Fig.2 Schematic Illustration of Experimental Equipment

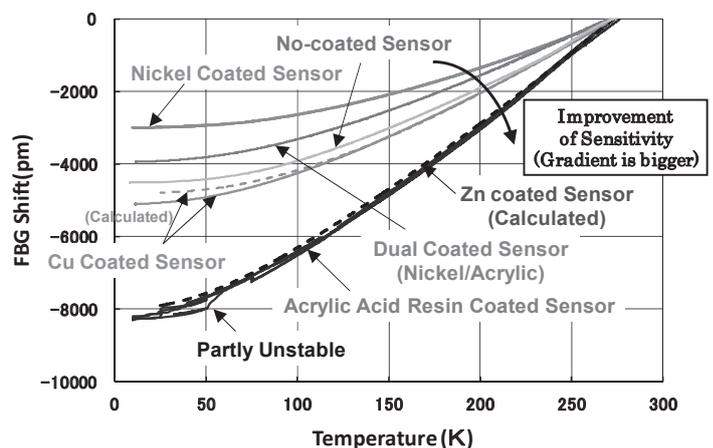


Fig.3 Result, Temperature Dependence of FBG Shift (The Output of Optical Fiber Sensor)

参考文献

- 山田秀之ら:「極低温での光ファイバ温度センサの感度向上」2011年度春季低温工学・超電導学会, 2P-p06
- 山田秀之ら:「光ファイバ温度センサの機械加振試験」2011年度秋季低温工学・超電導学会, 1P-p09
- Yamada et al.:「Temperature Measurement at Cryogenic Temperature using Optical Fiber Sensor」2012ICEC24, 15P-P01-05

極低温空間での目視・画像化を可能にする技術の開発

Development of tools and instruments visualizing in cryogenics

清水 禎, 端 健二郎, 大木 忍, 野口 隆志 (NIMS)

SHIMIZU Tadashi, HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu, NOGUCHI Takashi (NIMS)

E-mail: SHIMIZU.Tadashi@nims.go.jp

1. はじめに

東日本大震災で被災した 930MHz 高分解能 NMR 用超電導マグネットの状況診断のため、我々は日常的技術の延長で考えられる手法で、外形目視観察、機械的構造観察、電気的機能観測を行った。

結果としてクライオ外筒に“打痕”が確認され、常設配管類の立ち位置の不自然も観測された。と同時に通常外せる物が外れない事実、さらには余震発生のときの危険を予知させるベローズの挙動を、映像によって確認した[1][2]。

確認された個々の事例から、超電導マグネット装置全体の不健全性が構造自体に発生していることが推察され、消磁し、分解調査の後、不具合箇所を修復し再立ち上げすることとなった。

その過程で開発した目視・画像化技術および得られた画像を紹介し、その有用性を報告する。

2. 極低温用 CCD スコープ概要

消磁の工程で、永久電流スイッチをオフにする電流導入用ソケットが水分および空気の氷に覆われていたため、その掘り起しが必要となった。我々は 4K 付近のガスヘリウム中で撮像可能な CCD スコープを製作した。図 1 に試作機の構造を示す。

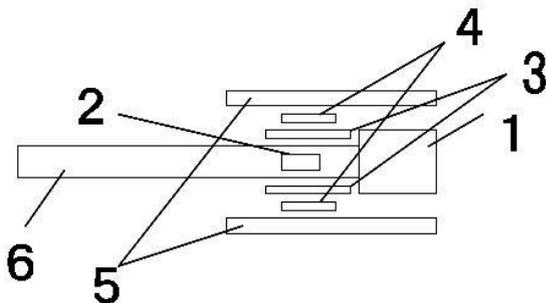


図 1 CCD スコープ構造

- | | |
|---------------|---------------|
| 1: CCD 素子 | 2: 温度計素子 |
| 3: 銅版 | 4: ヒーター |
| 5: 断熱 SUS パイプ | 6: CCD 信号ケーブル |

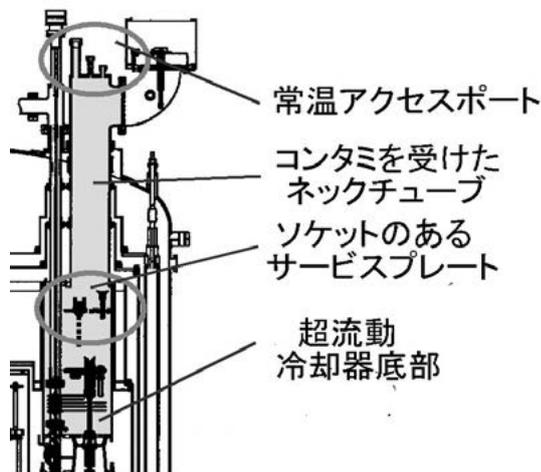


図 2 深さ約 800mm の極低温作業空間

3. 作業経過と得られた画像

このスコープにより、ソケットの状態、それを覆うコンタミの状態などの詳細を確認した。図 2 にその作業空間の部位を示す。液体ヘリウム液面上数 cm まで撮像可能であった。環境温度は約 4K、磁場は約 0. 2T である。

また掘り起こし作業に際して、ガスヘリウムによる吹き飛ばし効果、真空排気による吸引効果、各ピン穴へのドリルの位置などの視認ため、各作業器具および明かり導入用光ファイバーを同時に挿入した。



図 3 ガス導入パイプおよびドリルの同時挿入画像



図 4 作業中に落とした O リングの画像

4. 視認効果

今回実施した一連の作業は視認無しでは実施不可能であった。作業実施ばかりか、状態診断すらできない状況であった。超伝導応用機器、極低温機器の普及のためにも、高磁場・極低温空間の目視・画像化技術および作業器具の開発が必要であるとの印象を深くした。

参考文献

1. 清水他, 2011 秋季低温工学・超電導学会, pp27-28
2. K.Hashi, T.Shimizu, S.Ohki, T.Noguchi and T.Kiyoshi, ICEC24, May 14-18, 2012, Fukuoka.

心磁図マップのクラスタ分析を用いたマウス虚血性心疾患検出法の開発

Cluster analysis of mice MCG map for detection of ischemic heart disease

相原 伸平, 葛西 直子, 石山 敦士(早大); 小野 弓絵(明大); 南沢 享(慈恵医大)

AIHARA Shimpei, KASAI Naoko, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ); ONO Yumie (Meiji Univ); MINAMISAWA Susumu (Jikei Univ)
E-mail: aihara.sinpei@gmail.com

1. はじめに

我々は、独自に開発した小動物用 SQUID 装置を用いて、心筋梗塞モデルマウスの異常な心磁図(Magnetocardiogram, MCG)と心疾患との関係を明らかにする研究を行っている。これまでに、不整脈(期外性心室収縮)時の心磁図コンターマップの空間パターンがヒトとマウスで類似していることが明らかになり、心疾患の発生過程や薬理効果の解明に疾患モデルマウスの利用が有用であることが示されてきた。

本研究では、マウス心磁図の電流ダイポール推定から定量的に虚血性心疾患を検出する手法を開発し、その有用性を心疾患モデルマウスの長期計測データによって評価したので報告する。

2. 実験方法

心筋梗塞モデルマウス(NZW/N×BXS)F₁ type のオス 2 匹と、コントロールマウス NZW/NSIc type のオス 6 匹を用いた。健常時の心磁図パターンの判別基準を決定するためにコントロールマウスの 9-24 週齢にわたり、計 32 回の心磁図計測を行った。計測には筆者らが開発した小動物用生体磁気計測システムを用い、胸部の 4×4 点(4mm 間隔)を計測した。また、計測中、マウスは体温保持のため温水ベッドに仰向けに固定し、麻酔としてイソフルラン、酸素および笑気の混合ガスを吸引させた。サンプリング周波数は 4000Hz とし、50Hz のノッチフィルタおよび 700Hz のローパスフィルタを用いた。心磁図と同時に計測した心電図の R 波ピークをトリガとして 400 回加算平均を行った。全ての実験は早稲田大学動物実験審査委員会の承認を得て行われた。

3. 検出法の開発とマウス心磁図への適用結果

加算した心磁図の 1 周期、100ms にわたって 0.25ms ごとに電流ダイポールを最小二乗法で推定し、時間と各時刻における電流ダイポールの角度を特徴量として求めた。全コントロールマウスの RST 期における特徴量にクラスタ分析を適用して 3 つのクラスタ(C_R, C_S, C_T)に分類した(Figure2)。さらに、各クラスタの平均値を中心として 95% の範囲に分布する特徴量を抽出し、健常時の特徴量分布とした。異常な心磁図パターンの検出は、各計測データに対し、各時間帯のピーク付近(R 波時間帯(49-51.5 [ms]), S 波時間帯(53-55 [ms]), T 波時間帯(56-59.5 [ms]))の電流ダイポールを抽出し、健常時の電流ダイポールの角度範囲以外に存在する電流ダイポールの数をカウントした。異常な電流ダイポールの数が閾値以上となった計測データを心筋梗塞、閾値より小さい計測データは健常と判定した。また、閾値は以下のように設定した。本手法を心筋梗塞モデルマウス 19 匹の計測データ(96 計測分)に適用し、目視によりコンターマップに異常が認められた計測データを、自動で判別できるかどうか調べた。目視による判断は、十分に心磁図に熟練した者が行った。その際、閾値を 5 としたとき、最も判別率が高くなったため、本研究では閾値を 5 と設定した。

本手法を、クラスタ分析に使わなかった週齢のコントロールマウスの 6 計測データと、病理学的検査により心筋梗塞の進行が確認された週齢における心筋梗塞モデルマウスの 2 計測データに適用した。本手法を適用した結果、sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value とともに 100%となった。病理解剖検査の結果と本手法に

よる分類結果の比較を Table1 に示す。今後は、病理解剖検査を行う計測データを増やしていき、定量的な閾値を設定する必要がある。

4. まとめ

本手法の適用により、心磁図に熟練していなくても、心筋梗塞発症の可能性を自動的に判別できる可能性が示された。本手法は疾患モデル動物の心筋興奮の状態を非侵襲的かつ経時的にモニタリングするために有用なツールとなりうる。

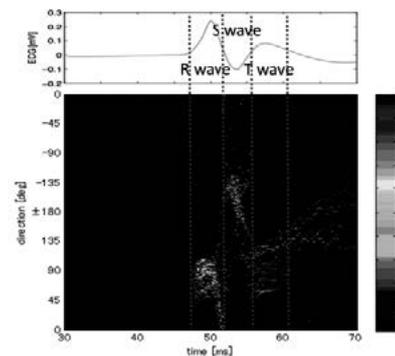


Figure1. Current dipoles of normal MCG pattern

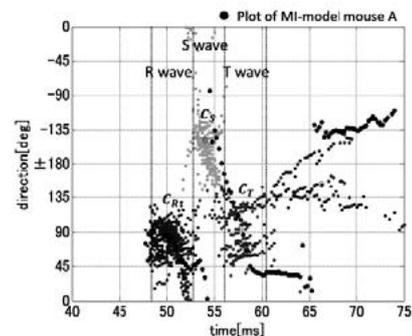


Figure2. Figure of cluster analysis

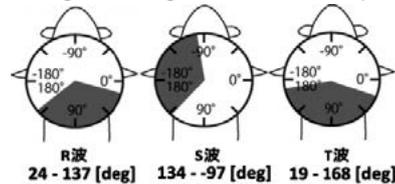


Figure3. The normal ranges of the angle of current dipoles during R, S, and T periods

Table1. Comparison between diagnosed result and classified result by this criterion

Classified \ Diagnosed	MI(+)	Normal(-)
	MI(+)	2
Normal(-)	0	6

参考文献

- Y.Ono, A.Ishiyama, N.Kasai, K.Chinone.: Development of biomagnetic measurement system for mice with high spatial resolution. *Appl Phys Lett* 85 (2004) p.332-334.

スパッタリング法により作製した Bi,Pb-2223 薄膜の臨界電流密度

Critical current density of Bi,Pb-2223 thin film fabricated by sputtering method

土屋 啓輔, 吉村 兆貢, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則 (熊本大学 工学部);
松本 明善, 北口 仁(物質・材料研究機構)

TSUCHIYA Keisuke, YOSHIMURA Hirotaka, SUEYOSHI Tetsuro
FUJIYOSHI Takanori (Faculty of Engineering, Kumamoto Univ.);

MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (National Institute for Materials Science)

E-mail: tsuchiya@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

ビスマス系高温超伝導線材は最近の著しい性能向上によって実用線材として注目されており、機器開発に向けて研究が活発に行われている。しかし、Bi,Pb2223 超伝導体の生成メカニズムをはじめ、超伝導電流経路など不明なことが数多くある。ビスマス系線材の商用化においては、臨界電流密度 J_c のさらなる向上が必要である。そこで Bi2223 薄膜を使った基礎研究が行われている。Bi2223 薄膜は自己磁場で線材よりも高い J_c を示しており、さらには高磁場中での低下も線材と比べて小さい[1]。しかしながら Bi2223 では不純物が混入することによる結晶性の低下が課題の一つとなっている。Bi2223 薄膜をスパッタリング法で作製し、これに Bi,Pb2223 ペレットとで焼鈍することで Pb を導入した Bi,Pb2223 薄膜の作製に成功した。さらに、この薄膜に酸素雰囲気下での後焼鈍した Bi,Pb2223 薄膜は、その T_c が 100 K を超えるものが再現性よく得られている[2]。

本研究では、作製した Bi,Pb2223 薄膜の臨界電流密度 J_c の磁場依存性や磁場角度依存性を測定して、その磁束ピンニング特性について調べた。

2. 実験方法

Bi2223 薄膜は、スパッタ蒸着法で作製した。焼結体ターゲットとして $\text{Bi}_{1.5}\text{Pb}_{1.0}\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{2.5}\text{O}$ を用いた。蒸着条件は、50 Pa 純酸素雰囲気下で STO(100)基板上に成膜を行った。スパッタリング時間は 10 時間で、基板温度は 680~690 °C である。Fig.1 に示すように、スパッタ法で得られた薄膜を Bi,Pb2223 ペレットで囲み、焼鈍熱処理を施すことで結晶性の向上と Pb の導入を行った。さらに超伝導特性向上のため、酸素雰囲気中で後焼鈍を 450 °C で行い酸素をドーピングしている。結晶構造は、XRD 測定により評価した。臨界電流密度 J_c の測定時には薄膜に幅約 50 μm 、長さ 1 mm になるようブリッジ加工を施し、四端子法で電界基準 $E_c=1 \mu\text{V}/\text{cm}$ により評価している。また、 J_c の磁場角度依存性では、磁場と薄膜の c 軸とのなす角度を θ とした。

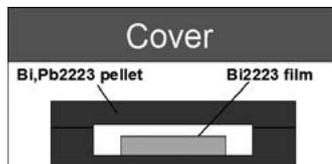


Fig.1 Annealing of Bi-2223 films.

3. 結果及び考察

Fig.2 に、ブリッジ加工をした Bi,Pb2223 薄膜の 77.3 K における J_c の磁場依存性を示す。磁場は薄膜表面に平行に印加している。試料 bs654 において、弱磁場中では磁場による J_c の急激な低下は見られず、このことは弱結合がないことを示している。さらに高磁場になっても磁場によらないフラットな J_c - B 特性が得られており、7 T でも $1.1 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$ の高い J_c を得た。一方、試料 bs650 では磁場に対して減少しており、臨界温度 T_c の低下が一因となっていると考えられる。また、Fig.3 に磁場を薄膜表面に垂直に印加したときの 60 K における J_c の磁場

依存性を示す。磁場が大きくなると薄膜表面に平行に印加した場合と比べ試料 bs650, bs654 ともに急激に J_c が低下している。Fig.4 に、後焼鈍処理を施した薄膜の J_c の磁場角度依存性を示す。試料 bs654 では磁場が薄膜の ab 面から少しずれたところで J_c は $\sim 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$ から急激に低下する。これよりインテリシク・ピンニングが有効に働いていることがわかる。また、後焼鈍を施した薄膜は後焼鈍を施す前の薄膜と比べて、 ab 面において少なくとも 1 桁程度の J_c の向上が見られるが、これは後焼鈍により最適な酸素キャリアドーピングが行われたものだと考えられる。この他の結果は当日発表にて詳しく説明を行う。

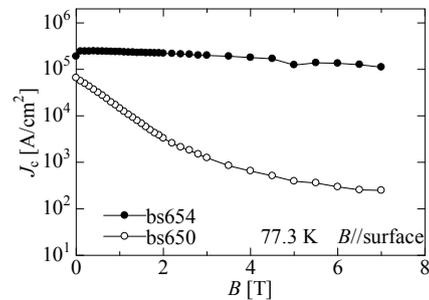


Fig.2 Magnetic field dependence of J_c at 77.3 K for $B // \text{surface}$

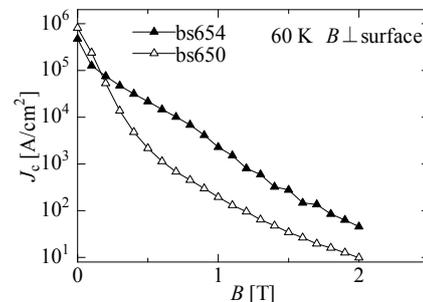


Fig.3 Magnetic field dependence of J_c at 60 K for $B \perp \text{surface}$

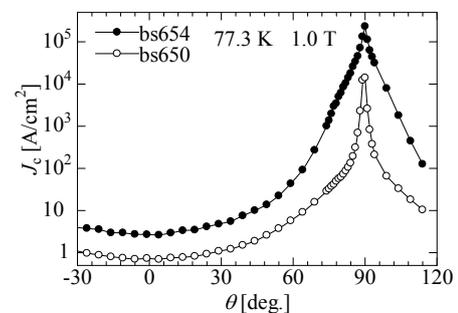


Fig.4 Angular dependence of J_c at 77.3 K for 1 T for after post-annealing

参考文献

1. K. Endo, *et al.*: Nature 355 (1992) 327.
2. A. Matsumoto, *et al.*: 第 73 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (2012) 12p-A2-7

配向クラッド基板 PLD 法 GdBCO 線材の成膜速度が臨界電流密度に与える影響

Influence of fabrication speed on critical current densities in PLD-processed GdBCO coated conductors with the Ni-Clad substrate

和田 純, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大); 大松 一也(住友電工)

WADA Jun, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

OMATSU Kazuya (SEI);

E-mail: wada@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1 はじめに

PLD 法で作製された希土類系超電導 (REBCO) コート線材は高い臨界電流密度 J_c を持ち、様々な分野での応用が期待されている。しかしながら、一般的に基板として使用される無配向ハステロイ基板では中間層の作製に特別な処理が必要となり、コスト面に課題が残る。そこで中間層に特別な処理を行う必要もなく超電導層に 2 軸以上の配向が得られる配向 Ni クラッド基板を用いた線材作製が注目されている [1]。更なる低コスト化をはかるためには、より速い速度で、線材を作製し、高い臨界電流密度と超電導層の厚さを得る必要がある。

本研究では、配向 Ni クラッド基板を用いた GdBCO コート線材の成膜速度の違いが臨界電流密度に与える影響に関して調べた。

2 実験

本研究において使用した試料は、基板に配向 Ni クラッド合金を用い、中間層を $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3$ とした PLD 法 GdBCO 線材で、成膜回数 N を 4、6、10 回とし、成膜速度 v をそれぞれ 20 m/h 及び 25 m/h としている。各試料の成膜回数、成膜速度、臨界温度 T_c 及び超電導層の厚さ d を Table 1 に示す。これらの試料に対して、SQUID 磁力計を用いて直流磁化測定を行い、 $J_c - B$ 特性を評価した。また磁界は c 軸に対して平行に 0 - 7 T の磁界を印加し、測定温度は 77.3 K とした。

Table 1: Specifications of specimens

Specimen	N	v [m/h]	d [μm]	T_c [K]
4S	4	20	1.30	92.3
6S	6		1.95	92.3
10S	10		3.25	92.0
4F	4	25	1.04	92.6
6F	6		1.56	92.2
10F	10		2.60	92.4

3 結果及び考察

Fig.1 に 77.3 K における自己磁界下の J_c の超電導層厚依存性を示す。成膜が速い方が特性がやや優れているが、どちらの成膜速度でも、成膜回数が増えるにつれて J_c の減少が確認できる。これは厚膜化による超電導層組織の劣化が原因と考えられる。

Fig. 2 に 77.3 K における $J_c - B$ 特性を示す。低磁界領域においては、上記の超電導層厚依存性があるが、高磁界領域においては超電導層の厚さに対する依存性は減少する傾向にある。特に 4S、4 F では、

低磁界領域における J_c に差があるのに対して、高磁界領域では同程度の J_c を示している。これは、超電導層の厚い試料は磁束クリープの影響を受けにくくなっているためであると考えられる。

詳細な議論は発表当日に行う。

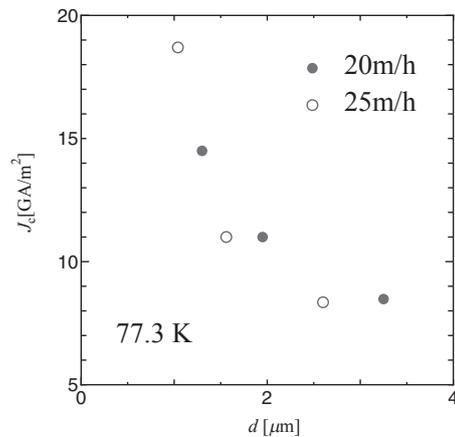


Fig. 1: Superconducting layer thickness dependence of J_c in the self field at 77.3 K.

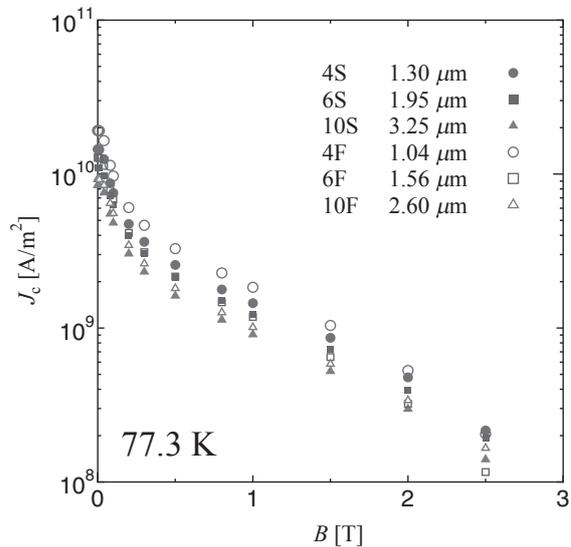


Fig. 2: Magnetic field dependence of J_c at 77.3 K.

謝辞

本研究に用いたコート線材は新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託により開発されたものである。

参考文献

[1] Y. Shingai *et al.*: SEI Technical Review174 (2009) 105.

挿入された鉄心形状による高温超伝導線材の交流損失特性への影響 Influence of iron core recess arrangement on AC loss characteristics in HTS tapes

前川 達也, 伏見 侑, 小川 純, 福井 聡, 岡徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学)

MAEKAWA Tatsuya, FUSHIMI Atsumu, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University)

E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導モータや超伝導発電機などの超伝導電力機器において超伝導線材の使用量を減らす目的で、鉄心を使用した設計が行われている。磁性基板など超伝導線材の周囲に磁性体がある場合には、交流損失特性に大きく影響を及ぼすことが報告されており、鉄心中に配置された超伝導線材の損失特性にも大きく影響を及ぼすことが予想される。また、鉄心に励磁した場合には線材に漏れ磁束が印加され磁化損失が生じることも予想される。本研究では実験により鉄心中に挿入された超伝導線材の交流損失特性評価を行った。

2. 実験装置

図1に示すような実験装置を構成し、鉄心は市販されている変圧器用のカットコアを使用し、片側に 18 ターンの励磁用のコイル、逆側に溝を形成し、この中に超伝導線材を図に示すように漏れ磁束に対して線材面が平行(a)と垂直(b)となるように溝の中央に Bi2223/Ag 線材を配置した。溝の幅 10mm に固定し高さを 3~5mm に変化させた。交流損失の測定方法としては、鉄心中では磁性体の影響を受け電気的な測定を行うことができないため、溝の中に断熱材を充填し交流損失による温度上昇により損失測定を行った。使用した Bi2223/Ag 線材はあらかじめ複数本用意し、臨界電流値がばらつきが 3% 以内で平均 70.5A のものを使用した。実験を行う前にマグネット電流 I_{mag} と漏れ磁界の関係を液体窒素中で測定し、超伝導線材に印加される磁界の大きさを液体窒素中であらかじめ測定を行った。

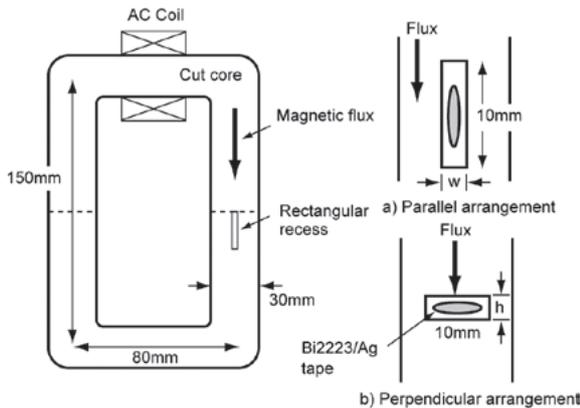


Fig.1 Schematic illustration of the experimental setup

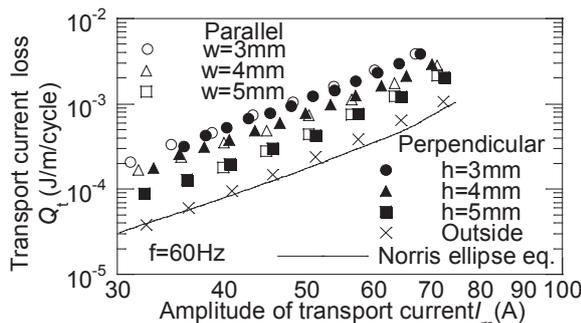


Fig.2 AC transport current loss in the iron core recess

3. 実験結果

図2に各条件における通電損失を示す。また、比較のために鉄心外で測定した通電損失を示す。図2より鉄心外で測定した結果に比べ、鉄心中に挿入されている場合には損失が増加していることがわかる。特に幅3mm においては損失が約 10 倍程度増加している。

図3に漏れ磁界による磁化損失を示す。縦軸に磁化損失、横軸にそれぞれの漏れ磁界のピーク値を示している。また、実線は Brandt の式より導出した損失を示している。図より漏れ磁束に対して垂直に挿入した場合には損失は Brandt の式とよく一致する。また、平行の場合と垂直の場合を比較すると、同じ磁界であれば損失は明らかに平行の場合に損失が大きくなる。鉄心外で測定した場合には線材面に平行に磁界を印加した時の方が損失が大きくなることから、磁束に対して平行に磁界を印加した場合には鉄心の影響を受けて損失が増大している。

図4に磁束に対し平行に線材を挿入した時の全損失測定の結果を示す。図より、磁界の大きい時には磁化損失、通電電流が大きい時には通電損失の影響を受けており、損失は通電電流とマグネット電流のバランスで決定されるといえる。通電損失と磁化損失の大きさがほぼ等しいときにマグネット電流が増加することにより若干損失が減少する傾向がみられた。これは鉄心による影響であると考えられる。

以上のような結果より、鉄心を使用した電力機器に超伝導線材を使用する場合には鉄心が及ぼす損失の影響を無視することはできない。

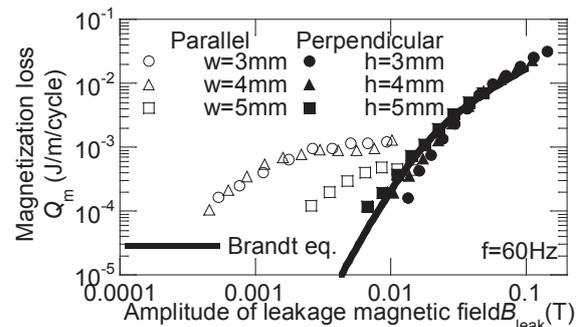


Fig.3 Magnetization loss induced by the leakage magnetic field

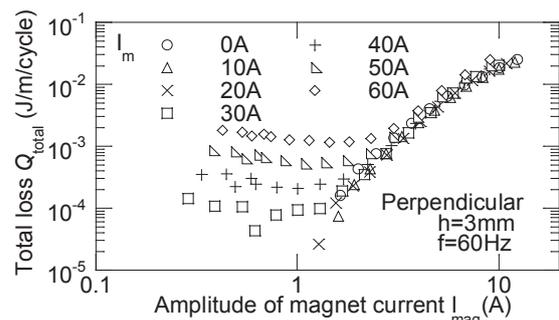


Fig.4 Total loss in the iron core recess

RE系コート線材の縦磁界下での臨界電流密度

Critical current density of RE-coated conductors in a longitudinal magnetic field

木内 勝, 田邊賢次郎, 小田部荘司, 松下 照男 (九工大); 吉田 隆 (名大);
 KIUCHI Masaru, TANABE Kenjiro, OTABE S. Edmund, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
 YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

RE系コート線材の臨界電流密度 J_c は、基板の最適化や人工ピンの導入により、応用機器で使用可能な特性レベルまで近づきつつある。一般的な超電導線材の使用では、自己磁界を含めて電流 I の方向に対して磁界 B は垂直方向である。一方で、電流方向に平行磁界を加える縦磁界下では、磁束線にローレンツ力が働かない free-force 状態になり、臨界電流密度は磁界 B の増加と共に増加する、すなわち縦磁界効果を示す[1,2]。この特性を直流電力ケーブルや限流器等で使用することが検討されつつある。

一方で、この縦磁界効果は電流 I と磁界 B が平行になる状態で能力を発揮することから、 ab 平面内の misorientation や、 a 軸配向粒の存在は電流路の妨げになる。したがって、これらの劣化要因を少なくし、縦磁界下で臨界電流密度特性を明らかにすることは、縦磁界効果を利用した応用機器設計においても重要である。

本研究では、電流 I の流れの障害となる結晶の乱れの影響を少なくすることができる、単結晶基板を用いた RE 系超電導薄膜に注目し、縦磁界下での臨界電流密度特性を評価した。さらに、RE系コート線材特性との比較もおこなった。

2. 実験

試料はPLD法でLaAlO₃基板上に成膜したGdB₂Cu₃O₇超電導薄膜で、膜面に対して垂直に c 軸が配向している。超電導層の厚さは 500 nm、臨界温度 T_c は88.8 Kである。この試料を臨界電流密度特性評価のために、レーザーエッチングを用いて長さが 1 mm、幅が 100 μ m のマイクロブリッジに加工した。臨界電流密度 J_c は直流四端子法を用いて電界 E -電流密度 J 特性を測定し、電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m の基準で求めた。全ての測定は液体窒素中で行った。また、薄膜に加える磁界 B は ab 平面内であり、電流 I と磁界 B が垂直になる角度を $\phi = 0^\circ$ とし、電流 I と磁界 B が平行になるすなわち縦磁界の状態を $\phi = 90^\circ$ とした。

3. 結果及び検討

Fig. 1 に電流 I に対して平行に磁界 B を加えた縦磁界下での J_c ($B//I$)、電流 I に対して磁界 B を垂直に加えた場合 ($B \perp I$) 及び c 軸方向に磁界を加えた場合 ($B//c$) の J_c の磁界依存性を示す。 $J_c(B \perp I)$ や $J_c(B//c)$ に比べて、 $J_c(B//I)$ の特性はその絶対値や磁界依存性が優れていることがわかる。しかし、金属超電導体や酸化物超電導体の単結晶基板薄膜で知られた、低磁界における J_c の増加[1,2]は観測されなかった。これは、今回の試料の自己磁界の値が 5.0×10^9 A/m² と低く、十分な面内配向等が得られていないため、電流 I が磁界 B に対して平行に流ることができず、このような特性になったと考えられる。

Fig. 2 に ab 平面内で電流 I に対して垂直方向 ($\phi = 0^\circ$) から平行方向 ($\phi = 90^\circ$) に、一定磁界 B を加えた $J_c - \phi$ 特性を示す。0.3 T においても J_c は緩やかに変化しており、この場合の $J_c(B//I) / J_c(B \perp I)$ の異方性は 2.0 になる。また、PLD 法で作製された超電導層の厚さが 0.6 μ m の GdBCO コート線材のその異方性は 1.1 [3] であり、今回測定した試料の方が大きくなった。このような異方性の違いは ab

平面内で電流 I が均一に流ることができないことによるものと考えられる。

参考文献

1. Yu. F. Bychkov *et al.*: *JETP Lett.*, **9** (1969) p.404.
2. B. Maiorov *et al.*: *LANL Peer Review* (2010).
3. M. Kiuchi *et al.*: Abstract of CSJ conference, Vol. 85 (2011), p. 1.

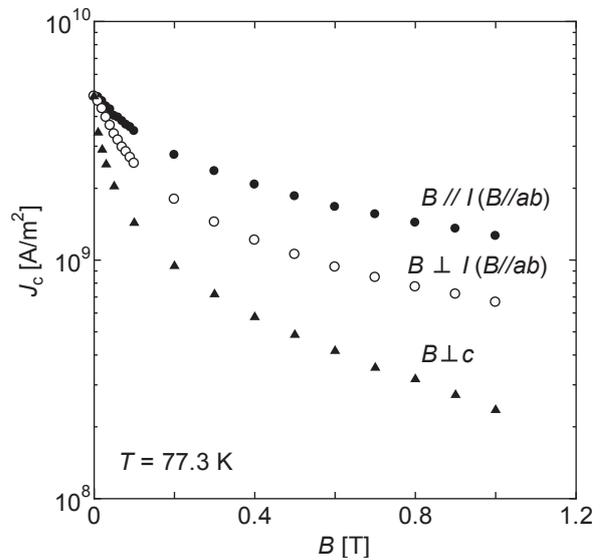


Fig. 1 Magnetic field dependence of J_c at 77.3 K.

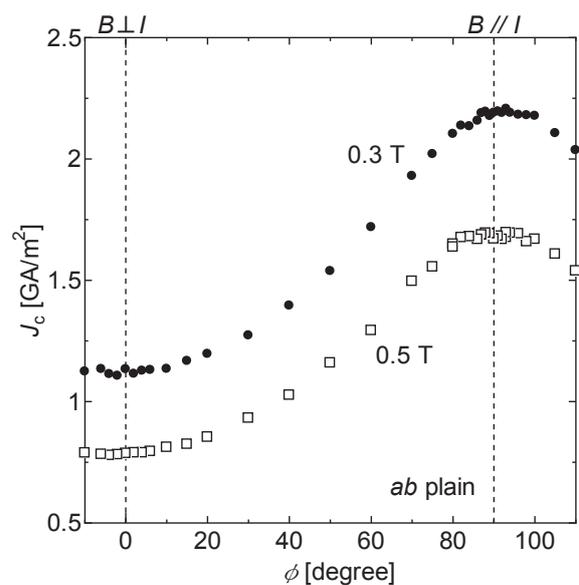


Fig. 2 $J_c - \phi$ properties at 0.3 and 0.5 T.

粒界での軟化を考慮した YBCO 薄膜の弾性変形解析

Elastic deformation analysis of the YBCO thin film
in consideration of the softening in the grain boundary.

小川 拓也, 町屋 修太郎(大同大学); 長村 光造(応用科学研究所);
田中 啓介(名城大学); 菅野 未知央(KEK)

OGAWA Takuya, MACHIYA Shutaro(DAIDO Univ); OSAMURA Kozo(Research Institute for Applied Sciences);
TANAKA Keisuke(MAIJO Univ); SUGANO Michinaka(KEK)
E-mail: t.ogawa.0102@gmail.com

1. はじめに

YBCO は二軸配向という, c 軸が固定されていて, a 軸と b 軸が直行した異なる方向を向く特殊な結晶構造を持っており, 結晶粒界では軟化が起こっている可能性が指摘されている. 今実験では, 有限多結晶モデルで, 結晶粒界でのソフトニングのモデル化を使い, 数値応力解析により, ソフトニングが弾性定数にどのような影響を及ぼしているのか, 検討を行った.

2. 実験方法

今回の実験では, 有限要素法を用いて, 粒界でソフトニングが粒界部で起きると仮定し粒界部の弾性定数を変えた 12 種類のモデルを使って解析を行った. 基本となるモデルは, Fig. 1 に示すような双晶構造を模擬した三次元異方性を持ったモデルの粒界部にソフトニングが起こると仮定したモデルである. 粒界部は, 全体の 10%とした.

このモデルを基に, ソフトニングが起こっている粒界部の弾性定数を, ある間隔で 1/2 から 1/20 まで変化させたものを y 軸方向に 0.1%の強制変位を与えることにより, マクロな弾性定数やひずみの解析を行い, ソフトニングが弾性定数にどのような影響を及ぼすのか検討した.

3. 実験結果および考察

解析を行った結果から, YBCO 薄膜のポアソン比とヤング率を求めることができた. ソフトニングがないモデルでは, 引張方向のヤング率は $E=170.1$ GPa, $\nu=0.1329$ となる. モデル中の弾性定数の変化とポアソン比の関係を Fig. 2, モデル中の弾性定数の変化とヤング率の関係を Fig. 3 に示す. また, 軟化係数 1.0 はソフトニングが起こっていない時の値で等方に軟化すると仮定した.

それぞれの関係から考察を行うと, YBCO の結晶界面の弾性定数を軟化させたとき, それによりポアソン比が変化することが明らかになった. ヤング率は徐々に減っていき, 二次関

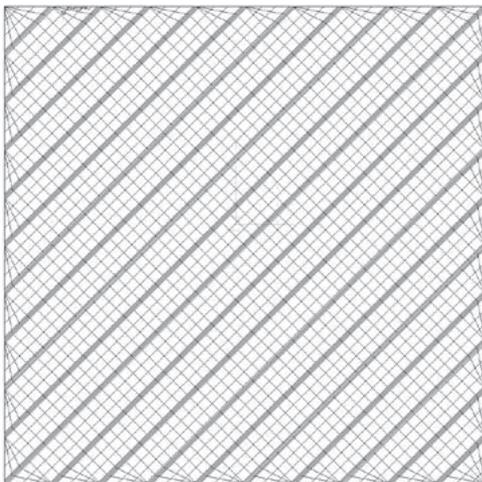


Fig.1 FE model.

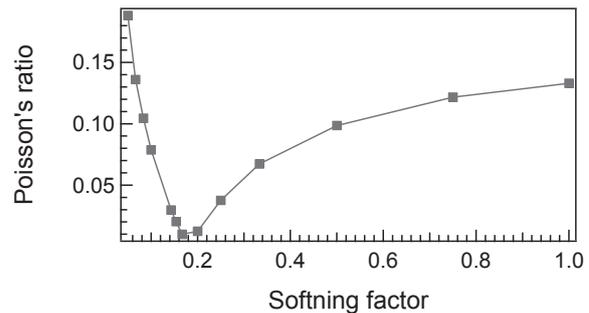


Fig. 2 Relation between an Softening factor and a Poisson's ratio

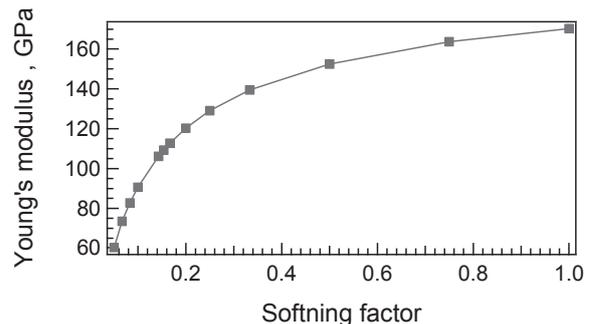


Fig. 3 Relation between an Softening factor and Young's modulus

数のようなグラフになることがわかった. ポアソン比は一定の変化はせず軟化係数が 0.2 となる付近に極値をもつが, ポアソン比の値からヤング率は正しく求められており, 正確な値を示していると考えられる.

以上のことから, 粒界部の弾性定数を変化させたときによる膜全体のマクロなヤング率とポアソン比への影響を確認することができた.

参考文献

1. S. Machiya, K. Osamura, T. Shobu, K. Kiriya, M. Sugano and K. Tanaka: "Macroscopic Elastic Constant Analysis and Strain Behavior of Crystal on the YBCO Layer in a YBCO-coated Conductor", TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 45 No. 5 (2011)

Nd:YAGレーザーを用いたコンビナトリアル PLD 法によって作製された YBa₂Cu₃O_y 薄膜の組成が超伝導特性に与える影響

Effects of nonstoichiometric compositions in YBCO films by combinatorial-PLD method using Nd:YAG pulsed laser

山田 亜佑夢, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大)

YAMADA Ayumu, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: yamada-ayumu11@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE123)相において、イオン半径が大きい軽希土類の場合、RE が Ba サイトの一部を置換する金属不定比性 (RE/Ba 置換)があり、熔融パルクの場合、RE/Ba 置換によって磁場中における臨界電流特性が改善されることが報告されている。一方で重希土類やYの場合、RE/Ba置換は起こらないとされてきた。しかし、近年これらのRE123でもRE/Ba置換を示唆する報告がされている [1-2]。また、TFA-MOD 法によって作製された化学量論比のYBCO膜の臨界電流密度と比較し、組成比がY:Ba:Cu=1:1.5:3であるYBCO膜の臨界電流密度の方が高いという報告もある[3]。

我々はこれまで、4倍波Nd:YAGレーザー(波長:266 nm)に着目し、YBCO 薄膜の作製を行ってきた。Nd:YAG レーザーはKrF エキシマレーザー(波長:248 nm)と違い、電力のみでレーザー発振が可能で、発振に用いる YAG 結晶は機械的に強く長寿命であるといった特徴がある。これらの特徴が、実用化へ向けた作製コストの低減に寄与すると考えられる。また、4倍波Nd:YAGレーザーを用いたコンビナトリアル PLD(C-PLD)法によってYBCO 薄膜への人工ピン止め点導入の高速探索[4]について検討を行ってきた。C-PLD 法とは、一枚の基板の上に組成を連続的に変化させて成膜できる方法である。

以上を踏まえて本研究では、YBCO 薄膜において、金属元素の組成比が T_c や J_c に与える影響を明らかにするために、4倍波Nd:YAGレーザーを用いた C-PLD 法によって様々な組成のYBCO 薄膜を作製し、組成が超伝導特性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験方法

YBCO 薄膜はパルスレーザー蒸着法(PLD 法)を用いてSrTiO₃ (100)単結晶基板上に作製した。まず、組成比が化学量論通りのYBCO 極薄膜(13 nm厚)を成膜し、その後ターゲットをY₂O₃に切り替え、ブルームをマスクするためのプレートを基板に平行に移動させることで、膜厚傾斜をもったY₂O₃極薄膜(最厚部10 nm厚)を積層させた。以上を繰り返すことでYの組成を連続的に変化させたYBCO 薄膜試料(500 nm厚)を作製した。なおレーザーのエネルギー密度は2.0 J/cm²、ヒーター温度は920 °C、成膜時の酸素分圧は40 Paとした。薄膜の結晶性、配向性はX線回折法、超伝導特性は直流四端子法、組成比はICP 発光分析法を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

組成分析より薄膜に含まれるYの量が基板端から他端に向かって連続的に変化していることを確認した。図1に、Ba/Y 組成比に対する YBCO 薄膜の $\Delta\omega$ の変化を示す。ここで $\Delta\omega$ は $2\theta/\omega$ スキャンの YBCO 005 反射におけるロッキングカーブの半値幅であり、 c 軸方位のバラつきを表す指標である。図1において、組成比が化学量論比通りに近づくにつれて c 軸方向のバラつきは小さくなることが確認できた。これは薄膜内に存在するY₂O₃が結晶性を低下させているためと考えられる。図2に Ba/Y 組成比に対する自己磁場 J_c の変化を示す。図2において、組成

比が化学量論比通りに近づくにつれて J_c の増加傾向が確認できた。 J_c 増加の要因としては膜中の Y₂O₃ が減少したことで電流の阻害が抑えられたこと及び結晶性が向上したことが考えられる。

4. まとめ

C-PLD 法を用い、Y組成が連続的に変化したYBCO 薄膜を一枚の基板上に作製することに成功した。さらにその試料からYの組成が超伝導特性に及ぼす影響を検討した。Ba/Y の組成比を変化させた結果、本研究では最高で $J_c=1.69$ MA/cm²@77 K(自己磁場下)が得られた。今後、Cu/Y 組成に対する超伝導特性について評価する予定である。

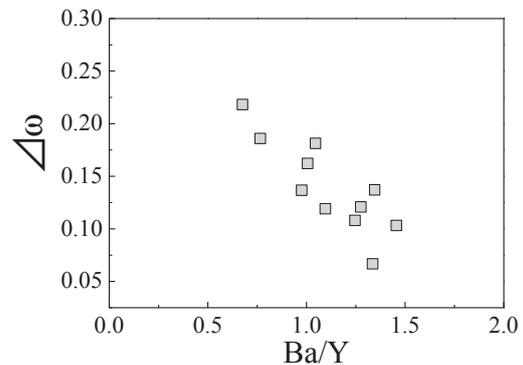


Fig. 1 Composition dependence of $\Delta\omega$

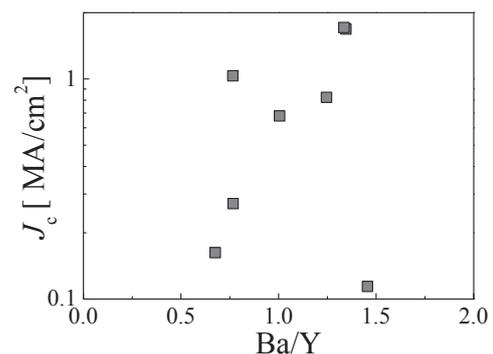


Fig. 2 Composition dependence of J_c

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014、20686065、24656580)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. J. Shimoyama et al.: Abstracts of CSJ Conference.: Vol. 80 (2009) p. 109
2. Z. Dong et al.: Solid State Communications.: Vol. 63, (1987) p. 97
3. K. Tada, et al.: PhysicaC, Vol 468 (2008) p. 1554
4. T. Yoshimura, et. al.: Physica C, Vol. 471 (2011) p. 947

異なる BaMO₃ (M=Hf, Sn) 人工ピンを添加した YBa₂Cu₃O_y 薄膜の磁場中超伝導特性

Superconducting properties in magnetic field of different BaMO₃ (M=Hf, Sn) artificial pinning centers doped YBa₂Cu₃O_y thin films

水谷 直樹, 吉田 隆, 一野 祐亮 (名大); 一瀬 中 (電中研); 松本 要 (九工大); 淡路 智 (東北大)

MIZUTANI Naoki, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke (Nagoya Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI);

MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: mizutani-naoki11@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_y (YBCO)超伝導薄膜における磁場中超伝導特性向上の手段として、これまで多くの研究グループによりREBa₂Cu₃O_y (REBCO)薄膜にBaMO₃(BMO: M= Zr, Sn, Hf)ナノロッドを導入することが試みられてきた[1-3]。BMO は、薄膜中で自己組織化しREBCOのc軸方向にナノロッドを形成すること、ナノロッドの直径や密度は、成膜温度や添加量で制御可能、さらにREBCOのc軸方向に印加された磁場に対して有効なc軸相関ピンとして働くといった特徴がある。

本研究では、2種類のBMO (BaHfO₃, BaSnO₃)をYBCO薄膜中に導入した。2種類のBMOを混合することによって、混合比に応じてBMOの形状及び格子定数が変化することが期待され、これによってBMOとYBCOの結晶界面における歪も変化すると考えられる。以上から、本研究ではBMOとYBCO結晶界面の歪みがYBCO薄膜の超伝導特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

YBCO薄膜はパルスレーザー蒸着法(PLD法)を用いてSrTiO₃(100)単結晶基板上に作製し、YBCO薄膜へのBaHfO₃(BHO)とBaSnO₃(BSO)の添加割合はターゲット交換法を用いて制御した。ターゲット交換法とは、YBCO、BHOとBSOの3つのターゲットに交互にレーザーを照射する手法である。ここで、BHOとBSOの添加量の合計を約4.0 vol.%に固定し、BHOとBSOの添加比を変化させた薄膜を作製した。作製した薄膜の結晶性、配向性はX線回折法、超伝導特性は直流四端子法を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

図1に、BMO添加YBCO薄膜におけるJ_cの磁場依存性を示す。図1において、BMOの効果によりJ_cの勾配がほぼゼロになる領域(plateau)が現れることが確認された。以後、このplateauの始端磁場をP_{start}、終端磁場をP_{end}とする。P_{start}とP_{end}の間の磁場領域では、磁束線が柱状に振る舞っており、且つ磁束線の数よりもBMOナノロッドの数が多いためJ_cがほとんど低下せず、plateauが現れたと考えられる。さらに、P_{end}はBMOナノロッドの数と磁束線の数が等しくなるマッチングフィールドに等しいと考えられる。

図2にBHOとBSOそれぞれの添加量に対するP_{start}とP_{end}の値を示す。図2より、BSOのみ添加した薄膜とBHOのみ添加した薄膜ではBMOが働く磁場範囲が異なっていることがわかった。さらに、BHOとBSO両方添加した薄膜は、添加量に対してP_{start}とP_{end}がほぼ連続に変化しており、BHO添加量を増加させるに従って、P_{start}とP_{end}はそれぞれ高磁場側へシフトしていることが確認された。P_{start}とP_{end}が高磁場側へシフトしているということは、BMOナノロッドの数が増加していることを示している。本研究では、BMOナノロッドの総添加量を約4.0 vol.%と固定しているため、BMOナノロッドの数が増加しているということは、BMOナノロッドが細くなっていると推察される。2つのBMOが混晶を形成しているか、それぞれ単相であるかは現時点では明らかではない。し

かし、BHOがBSOよりも細いナノロッドを形成したために図2のような結果が得られたと予想される。

4. まとめ

2種類のBMOをYBCO薄膜中に導入し、YBCO薄膜の超伝導特性に及ぼす影響を検討した。磁場中超伝導特性において、2種類のBMOの特性を平均した挙動を示していることが確認された。今後、BMOの形状や混晶状態を明らかにするために、高分解能TEM観察や、TEM-EDXによる組成分布観察が必要であると考えられる。

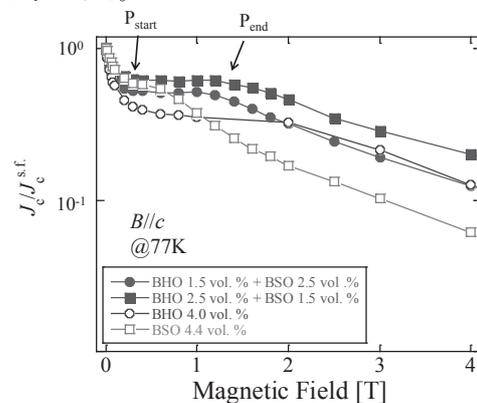


Fig. 1 Magnetic field dependence of J_c.

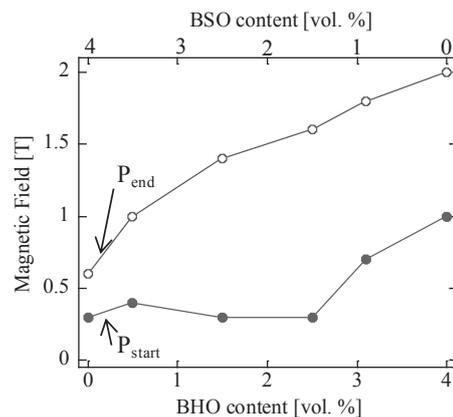


Fig. 2 P_{start} and P_{end} as a function of BMO content.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014, 19676005)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. J. L. M. -Driscoll, et al.: Nature mat, Vol. 3 (2004) pp. 439-443
2. C. V. Varanasi, et al.: Supercond. Sci. Technol, Vol. 20 (2007) pp. 1071-1075
3. H. Tobita, et. al.: Supercond. Sci. Technol, Vol. 25 (2012) pp. 1-4

スターリングパルスチューブ冷凍機の開発

Development of high performance Stirling Pulse Tube cryocooler.

中野 恭介, 平塚 善勝(住重)
 NAKANO Kyosuke, Hiratsuka Yoshikatsu (SHI)
 E-mail: Kys_nakano@shi.co.jp

1. はじめに

2004年、J. H. Ziaらは、高温超伝導機器冷却用の冷凍機としてQ-Drive社製の圧縮機を用い、電気入力4.3kWで冷凍能力200W at 77Kを有するスターリングパルスチューブ冷凍機の開発報告を行なった[1]。この高温超伝導線材を用いたデバイスの冷却には、数十Wから数百Wの冷凍能力を持つ小型冷凍機を必要とし、さらに高効率かつ高い信頼性(長寿命)が求められている。スターリングパルスチューブ冷凍機は、高効率で膨張器に可動部の無い構造から高い信頼性が得られる。そこで、今回我々は、高温超伝導冷却用途として、冷凍能力200W at 77Kスターリングパルスチューブ冷凍機の試作機を製作し評価試験を行った。膨張器の形状は、インライン型膨張器と低温部分が端面に位置することから利便性や小型化の観点からU型膨張器の双方を試作し、性能比較試験を行ったので、その結果について報告する。

Table1. 1st Target Prototype Specifications

Maximum cooling power	: 200W at 77K
Maximum electric input power	: 3.8kW (AC200V)
Efficiency	: 14.5% Carnot (COP 0.053)
Life time	: >50,000hours
Cooling	: Water cooling(20°C)
Operating frequency	: 45Hz ~ 60Hz
Initial gas pressure	: He 2.0 ~ 3.0MPa
Dimension	: H800mm × L670mm × W350mm
Weight	: <150Kg

2. 試作機概要

Fig.1に試作したU型パルスチューブ冷凍機の試作機概要を示す。圧縮機内部の2つのピストンはリニアモータによって駆動し、高い剛性を持つフレクシャベアリングで支持されている。これによりピストンとシリンダのクリアランスは非接触状態で数μmに保たれ、長寿命化を図っている。また圧力変動とピストンストロークを計測しP-V仕事を算出している。U型膨張器はアフタークーラ、蓄冷器、コールドヘッド(低温部熱交換器)、U字の流路を介しパルス管、ホットエンド(高温部熱交換器)、イナータンスチューブ、バッファタンクによって構成され、各要素は径や長さ等の幾何形状を変更できるようになっている。冷凍機の各熱交換器は水冷式を採用し、流量および出入口温度を計測し排熱量の計算をしている。

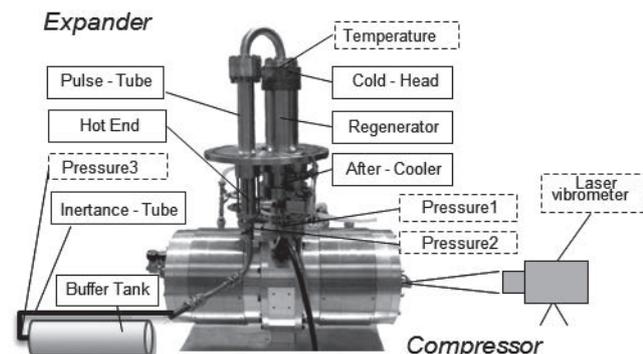


Fig.1 Photograph of prototype U-type Pulse tube cryocooler.

3. 評価試験結果

膨張器の各設定は蓄冷器直径90mm、長さ100mm、パルス管直径40mm、長さ250mmとし、試験では圧縮機電気入力3.8kW一定とし、イナータンスチューブの直径・長さ、運転周波数、封入圧等を調整し、最も高い性能が得られるよう最適化を行なった。冷凍能力は真空断熱されたコールドヘッドに熱負荷を印加し、定常時の温度をPtCOセンサにて計測している。Table2に封入圧2.3MPa、電気入力3.8kW、運転周波数49.0Hz時のU型膨張器の冷凍能力とCOPを示す。同表より、無負荷時の到達温度39.4K、冷凍能力191W at 77K、P-V仕事は2830W(圧縮機効率0.77)が得られている。インライン膨張器では、冷凍能力210W at 77Kが得られており、約9%能力が低下している。また対流の影響を確認するために、オリエンテーション試験を行った。Fig.2にコールドヘッドを下向き時の冷凍能力を基準とした変比率を示す。同図より、全設置方向の冷凍能力変化を3%以内に抑える事ができている。しかし、低温端温度が低くなるに伴い設置方向に対する性能低下割合が大きくなっていることから、対流による損失が生じていることが考えられる。

Table2. Experimental Evaluation of STP Cooling Performance

Tc (K)	Qc (W)	COP
50	62.5	0.017
60	111.7	0.029
70	158.2	0.042
77	191.0	0.050

※ Inclination angle 180deg.

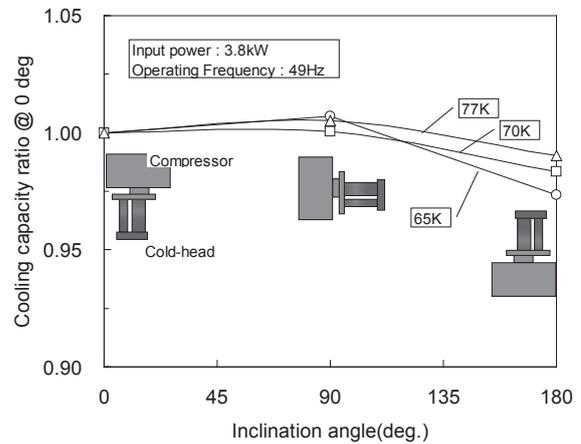


Fig.2 Influence of inclination by the difference in the cold-head temperature.

4. まとめ

スターリングパルスチューブ冷凍機を試作し評価試験を行った。電気入力3.8kW時に冷凍能力191W at 77Kが得られ、また膨張器の設置方向による冷凍能力依存性を3%に抑える事ができた。

5. 参考文献

1. J. H. Zia., et al, "A Commercial Pulse tube cryocooler with 200W Refrigeration at 80K", Cryocoolers 13, New Orleans(2004), pp. 165-171.

GM 冷凍機の 2 段階蓄冷器内に挿入されたベークライト棒の効果(1) —鉛蓄冷材の場合—

Effects of an inserted bakelite column in the 2nd stage regenerator of GM cryocooler (1) —In the case of lead (Pb) regenerator material—

増山 新二, 長尾 望宏, 松井 康平 (大島商船高専)

MASUYAMA Shinji, NAGAO Takahiro, MATSUI Kohei (Oshima National College of Maritime Technol.)

E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

蓄冷式冷凍機において、蓄冷器内に蓄冷に寄与しない物質を挿入することは、蓄冷器効率の観点から、従来考えられなかったことであろう。しかしながら、2 段階 GM 冷凍機において、ベークライト棒を挿入する方式を実験的に検証した結果、粒状蓄冷材を単に充填する一般的な方式と比較し、ほぼ同等か、それ以上の冷凍性能を発揮できる可能性が、増山らにより報告[1,2]されている。これらの報告では、ベークライト棒のサイズが一種類のみであった。そこで今回は、ベークライト棒の効果を詳しく検討するために、直径が異なる三種類のベークライト棒と鉛蓄冷材の組合せによる実験を行った。以下に、蓄冷器構造、ならびに実験結果を報告する。

2. ベークライト棒入り蓄冷器構造の概略

ベークライト棒が挿入された蓄冷器構造の概略図を図 1 に示す。GM 冷凍機の 2 段階蓄冷器内空間(内径:15mmΦ、長さ:100mm)の低温側にベークライト棒(長さ:50mm)が挿入され、残りの空間には球径 0.2mm の鉛蓄冷材が充填されている。中間部には、今後、磁性体蓄冷材を低温側に充填することを考慮しフェルトを入れてある。また、両温端部にもフェルトを使用しているが、ここでは省略している。

ベークライト棒は、その物性値、ならびに形状から、蓄冷効果には、まったく寄与していないと考えられる。むしろ、熱伝導損失を増大させているが、その値はおおよそ 10mW 程度であると見積もられている。

3. 実験方法・結果

2 段階 GM 冷凍機は SHI 社の SRDK-101D(電気入力:1.3kW@60Hz)をベースモデルとして冷凍性能評価を行った。なお動作周波数は 1.2Hz である。実験した三種類のベークライト棒の諸元と、ベークライト棒を挿入することで減少した鉛蓄冷材分量の減少割合を表 1 に示す。ここで、“Normal”は、ベークライト棒を挿入しない一般的な充填方法を、Bake 番号の“c”は長さ 50mm のベークライト棒を低温側のみに挿入していることを示す。なお、発表では、長さ 100mm のベークライト棒を挿入した場合の結果も併せて報告する予定である。

実験結果より得られた 4 つの蓄冷器タイプにおける到達温度の結果も表 1 に示してある。ベークライト棒の直径が大きくなるに連れ、到達温度が上昇している。この結果から、到達温度は、低温側の蓄冷器断面積に影響されることが分かる。つまり、蓄冷材の熱容量が大きく、ヘリウム流速の遅い方が、到達温度を下げる効果があると考えられる。

冷凍能力試験結果を図 2 に示す。Bake 1c~3c は、到達温度が Normal より高いため、その温度付近では多少の冷凍能力低下が生じている。しかしながら、7.5K 以上では、Bake 1c~3c の方が Normal の冷凍能力を上回る結果が示されており、特に、直径が一番大きい Bake 3c の冷凍能力が最も大きくなっている。20K で比較すると、Bake 3c は Normal よりも蓄冷材が 27%少ないにもかかわらず、その冷凍能力は 21%も向上している。ベークライト棒を挿入することにより冷凍能力が向上するのは、蓄冷器低温側のヘリウム流速が速くなることで、冷却ステージの熱負荷を素早く除去する効果が生じているよ

うである。ただし、この効果は Bake 1c, 3c で大きく、直径が中間の Bake 2c では小さくなっている点も興味深い。

4. まとめ・今後の課題

GM 冷凍機の 2 段階蓄冷器内に蓄冷に寄与しないベークライト棒を挿入したときの冷凍性能を実験的に評価した。研究結果から、本構造は蓄冷材の分量を減らすことができ、かつ、従来の充填方法と比較して、ほぼ同等か、あるいはそれ以上の冷凍能力を発揮できることが実証された。

本結果を受けて、次報では、磁性体蓄冷材とベークライト棒を組み合わせ、4K レベルでの性能評価を行う予定である。

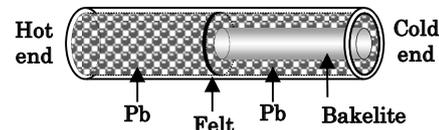


Fig. 1 A schematic of the 2nd stage regenerator with Pb regenerator material and bakelite column

Table 1 Regenerator type and achievable lowest temperature

Regenerator type	Diameter [mm]	Length [mm]	Change in Weight [%]	Lowest Temp. [K]
Normal			0	4.7
Bake 1c	7	50	-8	5.0
Bake 2c	10	50	-21	5.2
Bake 3c	12	50	-27	5.8

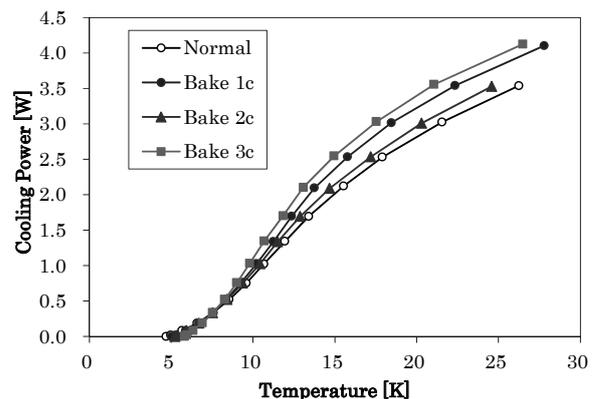


Fig. 2 Experimental results of cooling power

【謝辞】

本研究は、科学研究費助成事業(基盤研究(C)24561064)の一部により実施された。ここに感謝する。

【参考文献】

1. S. Masuyama, et al.: Cryogenics in press
2. S. Masuyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference Vol. 85 (2011) p.149

磁気作業物質として LaFe 系材料を用いた磁気冷凍システムの特性

Characteristic of magnetic refrigeration system with magnetocaloric material of La-Fe-Co-Si compound

宮崎 佳樹, 脇 耕一郎, 荒井 有気, 水野 克俊, 吉澤 佳祐, 長嶋 賢(鉄道総研);
平野 直樹(中部電力); 高田 裕章(三徳); 伊藤 孝治(蔵王精機)

MIYAZAKI Yoshiki, WAKI Koichiro, ARAI Yuuki, MIZUNO Katsutoshi, YOSHIZAWA Keisuke, NAGASHIMA Ken (RTRI);
HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co); TAKATA Hiroaki (Santoku Corporation); ITO Koji (Zao Seiki)

E-mail: miyazaki@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道車両に搭載される車両用空調装置は、利用客に快適な空調を提供する重要な要素であり、車内の快適環境を維持するための機能が要求される。車両用空調装置には蒸気圧縮式冷凍が用いられているが、駅の発着とともに乗客の出入りや乗客数が変動することや、空調機の搭載スペースの制約、および常時車内換気を行わなければならないなどの特殊性から、その COP(Coefficient of Performance (成績係数)) は家庭用のそれらに比べても低い値となっている。

一方で、昨今の電力事情や環境問題から、省エネルギーなどの環境負荷低減に対する要求は一段と厳しくなっている。そこで本研究では、鉄道車両空調の省エネルギーを目的とし、次世代の冷房技術として、磁気熱量効果を用いたヒートポンプ技術の実用化に向けた開発に取り組んでいる。磁気作業物質の動作点は、その物質のキュリー点付近の温度に限られるため、空調に要求される動作温度を得るためには、動作温度の異なる磁気作業物質をカスケードする方法が提案されている。そこで、将来のカスケード化を念頭に、Gd よりも低温側に動作温度を持つ LaFe 系の磁気作業物質を磁気冷凍システムに組み込み性能評価を行ったので報告する。

2. $\text{La}(\text{Fe}_{0.84}\text{Co}_{0.06}\text{Si}_{0.10})_{13}$ の磁気熱量効果

室温磁気冷凍では、磁気作業物質として室温付近まで強磁性を示すガドリニウム(Gd) が用いられることが多い。本研究に用いた磁気冷凍装置でも、Gd を搭載したシステム性能について報告している[1]。一方、永久磁石で発生可能な磁場程度で、Gdの磁気熱量効果を上回る材料開発が急速に進められている。本研究で用いた $\text{La}(\text{Fe}_{0.84}\text{Co}_{0.06}\text{Si}_{0.10})_{13}$ (以下 LaFeCoSi と表記する) は 8°C にキュリー点を持つ 2 次相転移材料であるが、0-2 T の磁場変化により、 T_c において -8 J/(kg K) を超える大きな磁気エントロピー変化 ΔS_M が観測される。Gd では 0-2 T の ΔS_M は -5 J/(kg K) であるので、本化合物は Gd にくらべ約 1.6 倍の磁気エントロピー変化を有する。

3. 試験結果

ハルバツハ配列を用いた磁気冷凍機[2]に、LaFeCoSi を搭載し、冷凍能力を評価した。温度スパン 0 K の条件における冷凍能力を図 1 に示す。磁気作業物質が充填された AMR(active magnetic regenerator) で熱交換する熱交換媒体の流量を増加するに伴い冷凍能力が大きくなるが、Gd の 5 rpm では流量に対して冷凍能力にピークが認められる。磁気作業物質充填層を流動する熱交換媒体の流量が大きいほど磁気熱量効果によって作業物質に生じた吸発熱量を多く輸送できるため、ある流量までは冷凍能力が増加するが、充填した磁気作業物質の吸発熱を取りきってなお流量を増やせば、熱交換媒体の温度変化が小さくなるため、冷凍能力は低下するものと考えられる。Gd の 5 L/min 以外の条件ではいずれも冷凍能力のピークは認められず、5 L/min 以降も冷凍能力が増加する傾向が示唆される。

4. 数値計算結果

本試験装置は耐圧の関係から 5 L/min 程度までしか流量をとることができず、より流量の大きな領域での冷凍能力の傾向を知ることができない。そこで、温度スパン 0 K における冷凍能力の流量依存性について数値計算を行い、Gd と LaFeCoSi を比較した。図 2 に計算結果を示す。Gd、LaFeCoSi の場合も、流量に対して冷凍能力はピーク値を持つ傾向を示す。LaFeCoSi は Gd に比べ比熱が大きいため、ピークを示す流量は Gd よりも大きい。適切な流量が得られれば、Gd よりも冷凍能力は大きくなることが分かる。

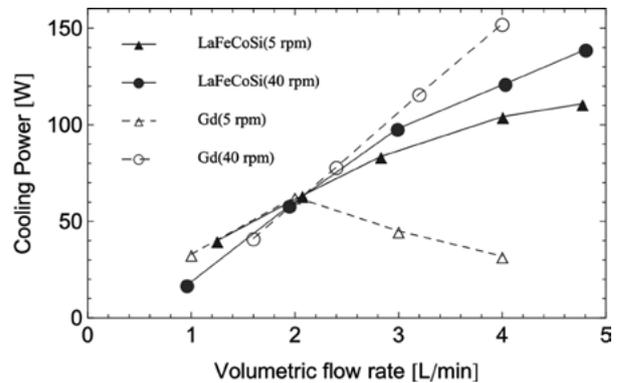


Fig. 1 Cooling power of the magnetocaloric refrigerator system as function of volumetric flow rate

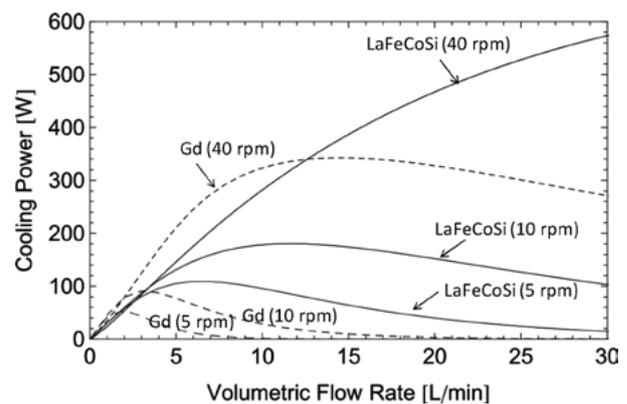


Fig. 2 Calculated cooling power of the magnetocaloric refrigerator system as function of volumetric flow rate

本研究は NEDO の委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. K. Waki, et al.: RTRI REPORT Vol.26, No.5 (2012). p47
2. K. Waki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84(2011) p.130

真空多層断熱材ブランケット間接続部の隙間から侵入する熱放射とその抑制法

Thermal radiation heat transfer through a slot between multilayer insulation blankets

大森 隆夫、児玉 薫(帝京大);山本 明、木村 誠宏(高エネ研)

OHMORI Takao, KODAMA Kaoru (Teikyo U.); YAMAMOTO Akira, KIMURA Nobuhiro (KEK)

E-mail: Ohmorit@koala.mse.teikyo-u.ac.jp

1. はじめに

真空多層断熱材 (MLI) は実用上、ブランケット化して用いることが多い。MLI はポリエステルフィルムなどの有機物で構成された断熱材であり、クライオスタット内で冷却されると金属性部材よりも熱収縮が大きく隣接するブランケット間に隙間 (slot) が生じる可能性がある。MLI は高性能の断熱材であるから、slot の幅がいかに狭くても熱放射による低温部の熱負荷の増加が問題にならないかを調べておく必要がある。本研究では小型の円筒型液体窒素タンクに施工した MLI ブランケットに slot 幅を調整可能な機構を設け、液体窒素タンクの熱負荷と slot 幅の関係、また熱負荷増加を防止する patch 法の有効性についても実験的に明らかにしたので報告する。

2. 試験装置と方法

Fig.1 のように直径 120 高さ 150mm の円筒型液体窒素タンクの上部和下部にカップ型 MLI ブランケットを施工した。MLI はカネカ製アルミ蒸着ポリエステルフィルム KF-9B とポリエステルネットスパーサ KN-20 を1枚ずつ重ね、それを1層として20層積層してブランケットとした。下部ブランケットはプーリーから繰り出された吊り糸で支えられ、プーリーの回転角を変えることにより高さ位置が下がり、上部ブランケットとの間に液体窒素タンクを一周する slot が生まれ、その幅を調整することができる。上部カップ型 MLI ブランケットの上底面に積層した断熱フィルムはブランケットの自重で圧縮され、それに伴い円筒側面の断熱フィルムは軸方向に移動する。移動量は外層にいくに従って大きく、端面の垂直位置が層方向で揃わなくなる。これを防止するために上底面の MLI の圧縮 (自己圧縮) を考慮して側面に積層する各層のフィルムの軸方向長さを決定した。下部ブランケットについても同様の方式で試作した。ブランケット間の隙間 (slot) を覆うパッチが無い場合とある場合の液体窒素タンクの熱負荷を Boil-off Calorimetry 法で測定した。ここでパッチとは断熱フィルム (KF-9B) を1枚、MLI ブランケット接続部の外表面に巻きつけ slot を覆うものである。

さらに上下ブランケットを一体として slot の無いブランケットを製作し、このときの液体窒素タンクの熱負荷を基準とし、slot がある場合の熱負荷の増加分 \dot{Q}_{SL} の値を調べた。

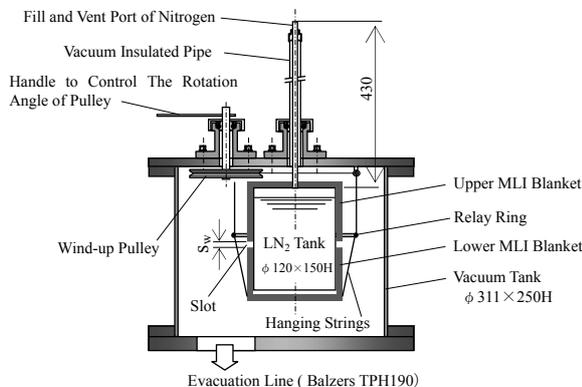


Figure 1 Boil-off calorimeter to measure the heat load of the cylindrical liquid nitrogen tank

3. 放射熱伝達解析

パッチが無い場合とある場合の放射熱伝達解析を行い、実

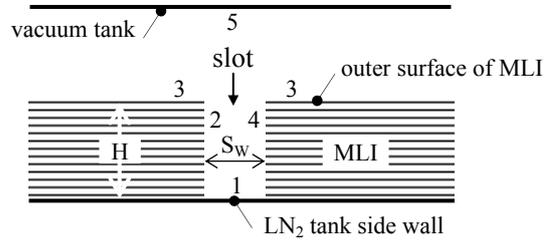


Figure 2 The model of radiative energy exchange between the slot and the inner surface of vacuum tank

験結果と比較したが、Fig.2 はパッチが無い場合の解析モデル、Fig.3 は slot 底部 (面 1) と真空タンク内面 (面 5) との形態係数を示す。両 MLI ブランケット端面 (面 2、面 4) と真空タンク内面 (面 5) の放射熱伝達についても解析したが、MLI 端面が受ける熱伝達は MLI を通して液体窒素タンクの熱負荷増加をもたらすと考えた。また、端面の放射率は 1 として解析した。パッチがある場合はパッチの slot 側の面を面 3 として同様の解析を行った。

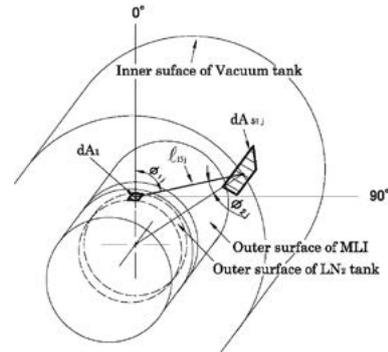


Figure 3 Geometry for configuration factor and radiative interchange between elements on the bottom surface (1) of the slot and the vacuum tank (5)

4. 熱伝達解析結果と実験結果の比較とまとめ

パッチが無い場合、 \dot{Q}_{SL} は slot 幅の増加にともない急激に大きくなるが、パッチを適用することにより、これを効果的に抑制できることがわかった。理論解析結果と実験値の差は小さいとは言えないが、 \dot{Q}_{SL} を抑制するにはパッチを適用することが有効であることが理論的にも示すことができた。

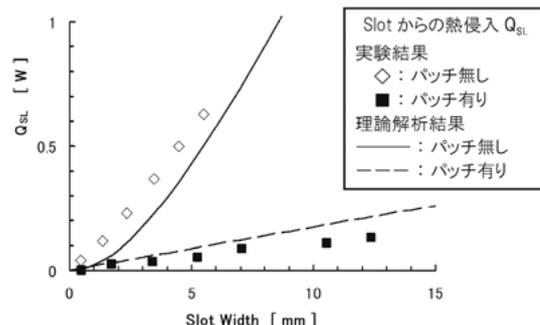


Figure 4 Excess heat input into the LN₂ tank through the slot

直流超伝導送電用断熱二重管における熱侵入量の真空度依存性

Dependence of Vacuum Pressure for Heat Leak on Cryogenic Pipe for DC Superconducting Power Transmission.

土岐 由信, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大学)

TOKI Yoshinobu, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: te08012@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では直流超伝導送電の実用化に向けた研究を行っている。長距離送電を考えたとき、ケーブル配管距離が長くなるのに伴い、配管からの熱侵入が支配的になるため、配管への熱侵入量の低減が重要となる。また、ケーブル配管の多くはコルゲート管が用いられるのに対し、中部大学では直管を用いることで真空度の向上と熱侵入量の低減を図っている。他にも、輻射シールドを簡略化する研究を縦型の熱侵入量測定装置を用いて、長さ 1.65m の断熱二重管で研究してきた。その結果、SUS 内管 φ81.9mm に垂鉛メッキ外管 φ165.2mm を用いることで、SUS 外管を用いたときに比べ、熱侵入量を 9.7W/m から 2.9W/m に低減することができた[1]。

超伝導送電において真空断熱配管での真空度は熱侵入低減に関して重要なパラメータのひとつである。そのため、今回は SUS 内管に多層断熱材(MLI)を巻きつけ真空度を変化させたときの熱侵入量の測定結果について発表する。

2. 精密熱侵入量測定装置

精密熱侵入量測定装置の概略図を図 1 に示す。この装置では LN₂ 蒸発量の時間変化を測定し、その蒸発に必要な熱量を熱侵入量として求めている。液面測定部は変化が明確になるよう他の部分より細くし、長さ 500mm、内径 φ20 とした。また、測定部への熱侵入(伝導熱と輻射熱)が極力小さくなるような構造とした。約 3m の被測定管の取り付け部は横向きになっており、実用化の際に必要なと考えられる、内管の支持構造からの伝導熱を考慮することができ、さらに被測定管の長さを天井高さの制約から逃がすことができるという特徴を持つ。

測定する外管は外径 φ216.3、長さ 3000mm、内管は外径 φ60.5、長さ 2820mm の SUS 管を用いた。この管径は中部大学に建設した 200m 直流超伝導送電試験装置と同じものである[2]。また、SUS 内管に MLI を巻きつけることで熱侵入量の低減を行い、真空度依存性について調査した。

3. 熱侵入量測定

各内管について測定した LN₂ 液面の時間変化を Fig.2 に、真空度による熱侵入量の変化を Fig.3 に示す。真空度が一番高いとき SUS 管+MLI10 層の熱侵入量は 1.75±0.07W/m となり、SUS 管(10.9±0.2W/m)だけで測定したときに比べ、84% 熱侵入量を低減できた。また、内管に MLI を巻きつけて真空度を変化させると、真空度に比例して熱侵入量が変わっており、真空度が 0.01Pa 以下ではほとんど熱侵入量が変わっていないことがわかる。また真空度が 0.1Pa を超えた辺りから熱侵入量が急に大きくなっていることから、0.1Pa 以下の真空度にするだけで断熱効果が期待できることがわかった。

参考文献

1. Y. Nasu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.972.
2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 5 (2012)p.169.

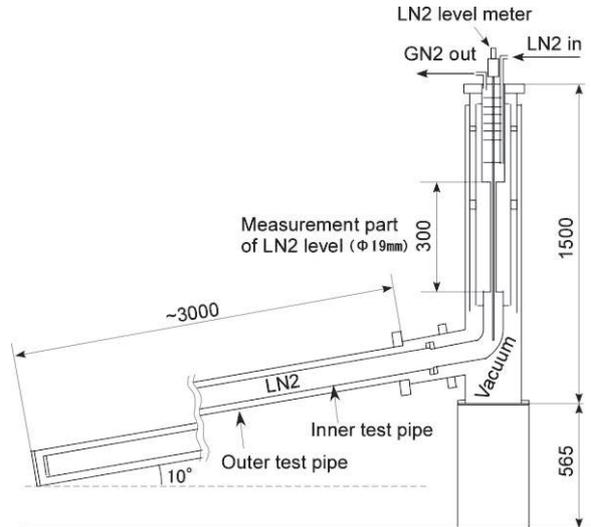


Fig.1 A schematic diagram of a test bench for heat leak measurement of cryogenic pipe

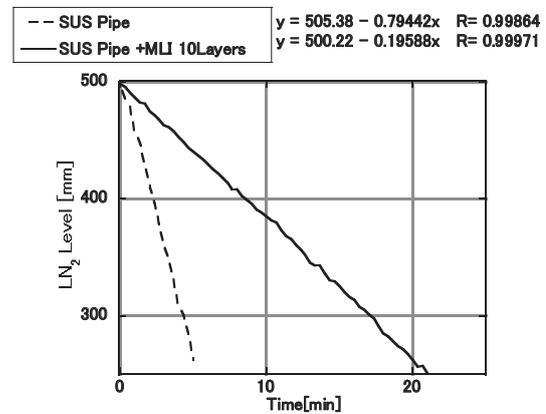


Fig.2 Evaporation time of LN₂

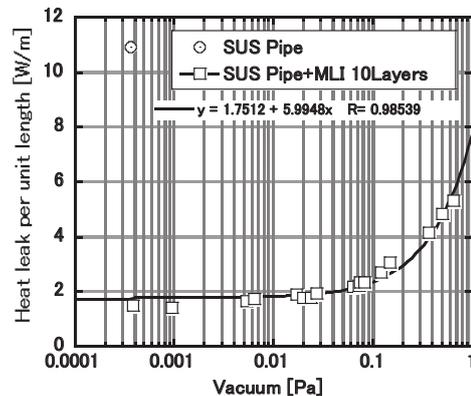


Fig.3 Measured heat leak per unit pipe length as a parameter of vacuum pressure

センサー冷却用断熱消磁冷凍機の熱設計に関する研究

Thermal design of continuous adiabatic demagnetization refrigerators (CADR) system for sensor cooling

園田 健悟, 植田 隼治(NIMS,千葉大);沼澤 健則(NIMS);中込 秀樹(千葉大);都丸 隆行(KEK)

SONODA Kengo, UEDA Shunji (NIMS,Chiba Univ);NUMAZAWA Takenori(NIMS); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ);

TOMARU Takayuki(KEK)

E-mail: k.sonoda@chiba-u.jp

1. はじめに

近年、極低温・超低温環境を必要とする宇宙科学ミッションが数多く計画されている。このような温度領域を生成する冷凍機として断熱消磁冷凍機(ADR:Adiabatic Demagnetization Refrigerator)が挙げられる。これまでに我々は連続作動型断熱消磁冷凍機(CADR)を作成し、その作動特性を明らかにしてきた。本年度からセンサー冷却に特化した CADR の開発を開始した。本研究ではその基本性能を向上させるために計測線やパワーリードからの熱侵入や振動の影響について再設計を進めた。

2. 連続作動型断熱消磁冷凍機 (CADR:Continuous ADR)

断熱消磁冷凍機とは磁性体を持つ磁気熱量効果を利用した冷凍機であり、外部磁場の操作によって磁性体のエントロピーを制御することで低温が生成される。この性質を利用し磁性体の断熱磁化・等温磁化・断熱消磁・等温消磁という4つの過程でカルノーサイクルを形成することにより冷凍を行うのが ADR の原理である。従来の ADR ではサイクルの性質上、冷凍できるのは等温消磁過程のみであり、一定温度を連続的に発生させることができなかった。この課題を解決するために NASA の Peter Shirron によって提案されたのが連続作動型断熱消磁冷凍機である[1]。CADR とは2組以上の冷凍ユニット(磁性体+超伝導マグネット)が熱スイッチを介して直列に接続し、隣接するステージの位相をずらしてサイクルを駆動させることで連続冷凍を実現するシステムである。Fig.1 にこれまでに作成した4段のステージからなる CADR の構造図を示す。

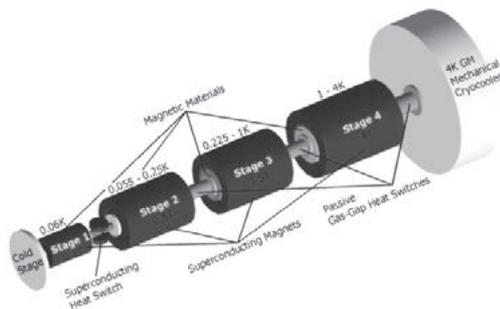


Fig.1 Schematic of the 4 stage CADR system

3. CADR クライオスタットの熱設計

CADR の基本性能を向上させるためには、排熱源である4Kステージにかかるさまざまな熱侵入や内部発熱による熱負荷を最小限に抑えるようにクライオスタットの熱設計を行うことが重要である。本研究の CADR クライオスタットでは、一番外側に真空容器、その内側に 60K シールド、さらにその内側に

4K シールドが続き、その内部に CADR システムを設置する構造となっている。

熱伝導による熱侵入は主に FRP 支柱、液体窒素予冷ライン、パワーリード、温度計用リード線によるものが考えられる。その他ジュール熱や輻射熱による熱負荷も考えられる。

以前、作成された CADR は超伝導マグネットへの電力供給のためのパワーリードに真鍮を用いていた。本研究では更なる熱侵入の軽減をはかるため、新しく高温超電導線材を採用する予定である。

Fig.2 には、各熱侵入・発生経路についてまとめた試算結果を示す。

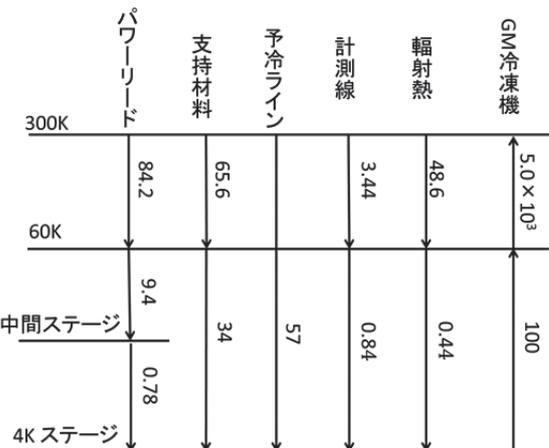


Fig.2 Result of heat loads (unit:mW)

4Kステージへの総熱侵入量は、支持材料、液体窒素予冷ライン、パワーリード、温度計用リード線の熱伝導によるもの及び輻射熱によるものを合計すると93[mW]と見積もることができる。GM冷凍機の4.2Kにおける冷凍能力は100mWであるので、排熱可能であることが示された。以前作成したCADRの総熱侵入量は267[mW]であった。この違いはパワーリードに高温超電導線材を採用したことで、60K-4K間において超伝導状態となり、熱伝導とジュール熱がほぼゼロになった要因が非常に大きいと考えられる。その他詳細については、学会にて報告する。

参考文献

[1] Shirron, P., et. al., "A compact, high-performance continuous magnetic refrigerator for space missions", Cryogenics 41 (2002) 789-795

Warm bore anti-cryostat to investigate thermal radiation heat leaks to the SuperKEKB IR magnet coil bobbin (2)

宗 占国, 大内 徳人, 土屋 清澄, 東 憲男, 山岡 広, 多和田 正文, 有本 靖(KEK); 田中 学(三菱電機システムサービス); 遠藤 友成(日立プラントテクノロジー)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, YAMAOKA Hiroshi, TAWADA Masafumi, ARIMOTO Yasushi (KEK); TANAKA Manabu (Mitsubishi System Service); Endo Tomonari (Hitachi Plant Technology)
E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

1. Abstract

In the SuperKEKB interaction region (IR), the vacuum gap for multi-layer insulation (MLI) between the superconducting (SC) coil bobbin at liquid helium (LHe) temperature and the beam pipe at 300 K is just about 3.5 mm. The variation of the radiative heat leaks with the number of MLI layers was experimentally studied by the vertical anti-cryostat. This paper introduces the heat estimation method and the results.

2. Introduction

In the SuperKEKB IR, the SC magnets are located between the two beams with the strong space constraint. The SC wire is placed on the bobbin with a small inner radius [1]. The thermal radiation from the warm beam pipe will increase the SC wire temperature and limit its operation. MLI is adopted to reduce the radiative heat flow. The MLI performance depends on both the total layers number and density. The optimization to apply MLI in the 3.5 mm narrow gap was carried out by the vertical anti-cryostat experiments to measure the heat leak variation with the MLI layer number [2]. In the previous tests, the heat leaks were estimated by the temperature differences (ΔT) over the G10 wall, which were measured by 3 precise Cernox sensors, as shown in Fig. 1. However, the standard deviations among sensors were usually large. The reason might be the cracks near the sensors in the thermal grease solid formed during cooling down and the cause of thermal conduction bridge by loose MLI in the narrow radial space. In this paper, the improvement on the anti-cryostat is reported and the experimental results are discussed.

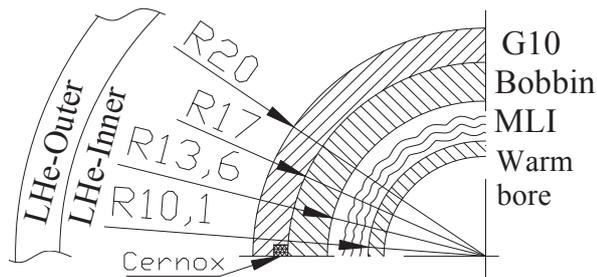


Fig.1 Quarter of the warm bore cross section of the anti-cryostat with a schematic sketch of other side

3. Improvement and experimental results

As shown in Fig. 1, the vacuum chamber between the two LHe vessels had been canceled. When the outer LHe level is higher than the inner, the heat leak down the SUS cylinder between them is intercepted by the outer LHe. The SUS bobbin has a small radius and heat conduction down to LHe can be ignored. The heat conduction through support spacer at the warm bore bottom is constant. The radiative heat leak into the inner LHe is proportional to the length of the bobbin immersed in the LHe or the LHe level and correspondingly the evaporation rate of the LHe has the linear relation with the

LHe level. The helium vapor flow rates at different LHe levels were measured by the precise thermal flow meter and the absorbed heat was calculated, plotted in Fig.2. By the linear fitting, the curve slopes are the radiative heat leaks per unit length, which are summarized in Fig.3.

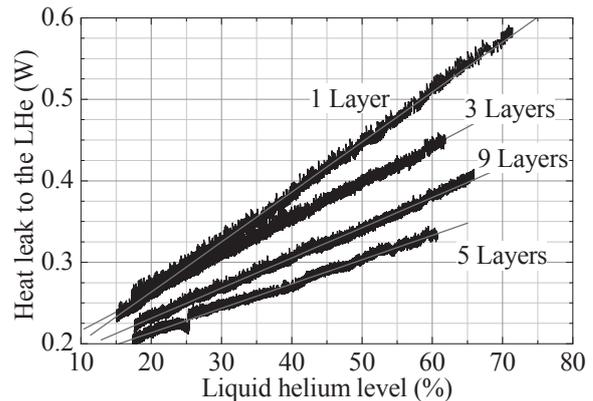


Fig.2 Heat leak to the inner LHe versus LHe level and fitting

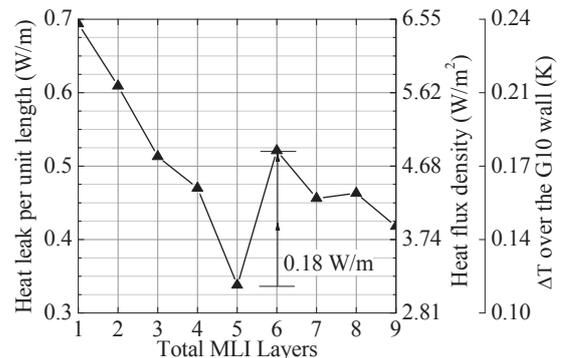


Fig.3 Measured radiative heat leaks with variable insulation layers and corresponding the heat flux density and ΔT

4. Discussion and conclusion

The experiments were carried out by adding layers one by one. Before the 5 layers, the MLI was wrapped without radial force and the heat leaks kept the reduction trend, as shown in Fig. 3. At 5 layers with the envelope diameter of 21.3 mm, the heat leak achieved the minimum of 0.34 W/m. As the thermal bridge was worried about in the narrow gap, some force was applied during wrapping from 6 to 9 layers. The heat leak at 6 layers was higher than that at 5 layers by 0.18 W/m and by adding layers the heat leaks decreased again. At 9 layers with the envelope diameter of 21.8 mm, the heat leak is 0.42 W/m. The performance of 5 layers carefully wrapped can satisfy the SC wire operation with a temperature rise less than 0.2 K.

5. Reference

1. N. Ohuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) Paper 1D-P04
2. Z. Zong, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p. 146

卓上型超伝導バルク磁石装置の開発

Development of a table-top-type superconducting bulk magnet

横山 和哉, 三田 裕幸, 津久井 友隆, 坪野谷 典之 (足利工大); 岡 徹雄 (新潟大)

YOKOYAMA Kazuya, MITA Hiroyuki, TSUKUI Tomotaka, TUBONOYA Noriyuki (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石 (以下, バルク磁石と呼ぶ) は小型の強力磁場発生装置として注目されている。著者らは, バルク磁石の産業応用を最終目標として, 特にパルス着磁による強磁場化や磁気分離等への応用について研究を進めている。様々な機会にバルク磁石を展示・デモンストレーションを行った時, 磁石装置の小型化について多くの要望があった。本文は, STパルス管型冷凍機を用いたパルス着磁専用のバルク磁石装置の開発について報告する。

2. 卓上型バルク磁石装置

Fig. 1 に卓上型バルク磁石装置の写真および概要を示す。本装置はSTパルス管冷凍機を用いるため外部にコンプレッサを必要としない点が大きな特徴であり, 一般的な単相 100V のコンセントのみで駆動することができる。また, パルス着磁専用としたことで, 磁極を短くすることができ, 長さ 370mm, 幅 350mm, 高さ 430mm とコンパクトな装置となっている。Fig. 1 中にある制御ボックスには, 安定化電源とサーミスタ装置が付属されている。

使用する超伝導体は, $\phi 60\text{mm} \times 20\text{mm}$ の Gd 系バルク体で補強のため厚さ 2 mm のステンレスリングを装着している。これを Fig.1(b)のようにサンプルフォルダに挿入し, コールドステージに取り付ける。バルク体及び冷却ヘッドは 5 層のスーパーインシュレーションで放射熱を遮蔽し, チャンバを取り付けて真空排気装置により真空断熱している。なお, バルク体表面と磁極表面は約 3 mm である。

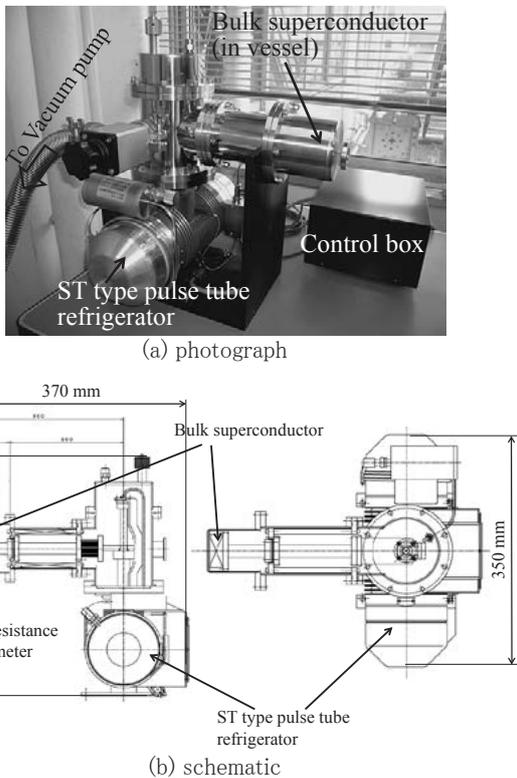


Fig. 1. (a)Photograph and (b)schematic of a table-top-type superconducting bulk magnet system.

3. 各種磁石装置の比較

Table 1 に本研究室の対向型, 単極型および卓上型超伝導バルク磁石装置のスペックを比較した表を示す。対向型および単極型は GM サイクル冷凍機を用いているが, 卓上型は STパルス管冷凍機を用いている。最低到達温度は高いものの, 必要な冷凍能力は備えている。また消費電力が 300 W と小さく, ランニングコストが安価である。卓上型磁石装置の着磁実験が実施できていないため発生磁場は N/A であるが, 1.5 T 程度を目標に実験を行いたい。

4. 冷却試験

Fig. 2 にバルク体を取り付けたときの, コールドステージ部の温度変化を示す。10 分毎の測定を行っており, 約 3 時間で 70 K 以下となり, 約 6 時間で最低到達温度 56 K となった。GM 冷凍機に比べて出力が小さいため, 冷却時間が長くなる結果となった。今回は諸事情で着磁試験を行えていないが, 永久磁石を用いたピン止め効果を確認できた (Fig.1 参照)。これより, 超伝導体も十分臨界温度以下に冷却されたと考える。

5. まとめ

本研究はバルク磁石装置の小型化を目指して, STパルス管冷凍機を用いたパルス着磁専用の卓上型バルク磁石を考案し, 製作した。冷却試験の結果 56 K まで冷却できることが確認できた。今後, パルス着磁実験を行い, 捕捉磁場を評価する予定である。

Table 1. Spec of each bulk magnet systems.

	対向型	単極型	卓上型
超伝導体	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} ($\phi 60 \times 20$ mm)		
発生磁場	3 T以上	3 T以上	N/A
冷凍機	1段GM冷凍機 (GR101, アイシン精機)	2段GM冷凍機 (RS271, アイシン精機)	STパルス管冷凍機 (SPR-05, アイシン精機)
最低到達温度	40K以下	20K以下	60K以下
出力 (W)	10W@77K	5W@20K(1 st) 19W@80K(2 nd)	8W@77K
入力	単相100V	三相200V	単相100V
消費電力	800W	1600W	300W
外部装置	・コンプレッサ ・真空排気装置	・コンプレッサ ・真空排気装置	・制御ボックス ・真空排気装置

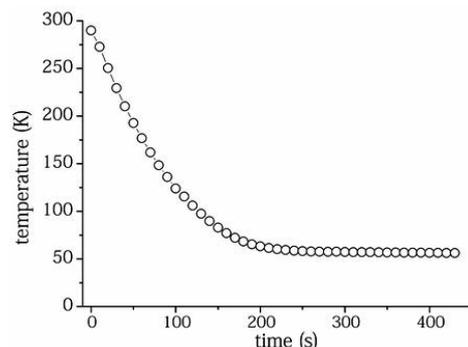


Fig.2. Time response of temperature (cooling test)

風力用 5MW Y 系超伝導同期発電機の設計検討

Design study of 5MW REBCO superconducting synchronous generator

大嶽 晃, 岩熊 成卓 (九州大学); 佐藤 寿洋, 長谷 吉二, 富岡 章 (富士電機);
和泉 輝郎, 塩原 融, 山田 穰 (SRL); 植田 浩史 (大阪大学)

1. はじめに

近年、低環境負荷を目指し、超伝導応用機器の開発が進められている。今迄の超伝導発電機の開発において、Bi2223 線材による試作機の多くは He ガス冷却により温度マージンを高くとった設計や、従来通り鉄心を有した構造となっている。近年では Bi 系線材に代わる次世代高温超伝導線材として Y 系超伝導線材が世界的に研究されている。そこで本研究の目的は、Y 系超伝導線材の臨界電流の磁場、温度を考慮しつつ、Y 系超伝導線材を用いた空芯の高性能超伝導発電機について小型化を目的とした設計を行ったうえで、発電機の損失を明らかにし、超伝導発電機の設計・開発の方向性を提示することである

2. 5MW REBCO 超伝導発電機の仕様

Table. 1 に検討した超伝導発電機の仕様を示す。界磁巻線に使用した REBCO 超伝導線材は、厚さ 100 μm のハステロイテープを基板とする幅 10mm、超伝導層厚 1.5 μm、銀層厚 10 μm で銅安定化層を加えた全体が 300 μm 厚のものを想定した。この臨界電流 I_c の温度、磁場特性としては、現在開発されている線材を参考にしており、臨界電流 492A @77K, 0T である人工ピン入りの IBAD(MgO)-PLD(GdBCO) 線材を想定した。臨界電流—磁場特性を Fig. 1 に示す。

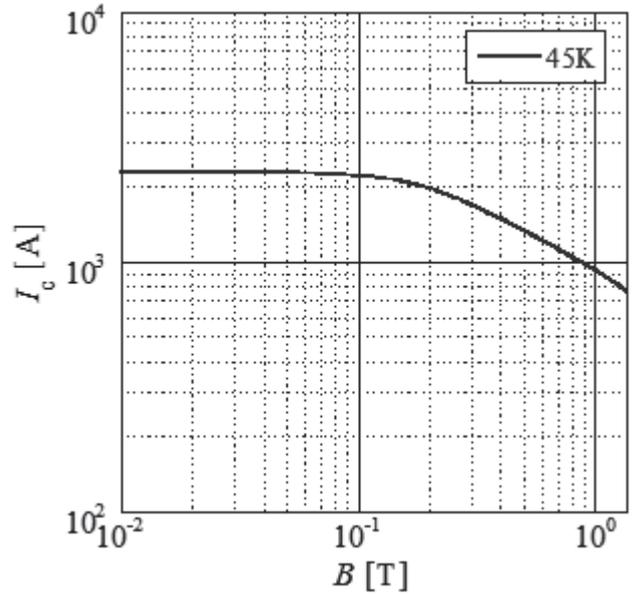


Fig. 1 Critical current of REBCO superconducting tape

3. 界磁コイル巻線形状の検討

まず、市販の電磁場解析ソフト Ansys を用いて界磁巻線が発生する磁場について 2 次元静磁場解析を行った。界磁巻線が発生する磁場を大きくするためには界磁巻線と電機子巻線の間の空隙を小さくする必要がある。巻線可能領域内でより空隙を小さくするためには、Fig. 2 に示すようにコイルを断面が傘型になるように積層配置すればよいことが分かった。今回解析を行った発電機の二次元断面図を Fig. 3 に示す。シールド鉄心外側(R1370)において漏れ磁束無しとした。



Fig. 2 Type of Lamp shade

4. 解析結果と考察

数値解析の結果、ギャップ磁場が最大となるのは傘型界磁コイルの上端が半径 430mm に位置するときであることが分かった。このとき、ギャップの最大磁場は 3.10T であった。これは一般的な形状であるソレノイド型界磁コイルにおける最大磁場よりも 14.6% 大きな値であった。今後さらに小型高効率化を目指して設計検討を進めていく。

謝辞

本研究は NEDO からの委託研究「希少金属代替材料開発プロジェクト」の一部として実施したものである。

Table.1 Specification of REBCO Superconducting motor

容量	5MW
極数	8
周波数	60Hz
回転数	900rpm
界磁電流密度	130A/mm ²
動作温度	45K

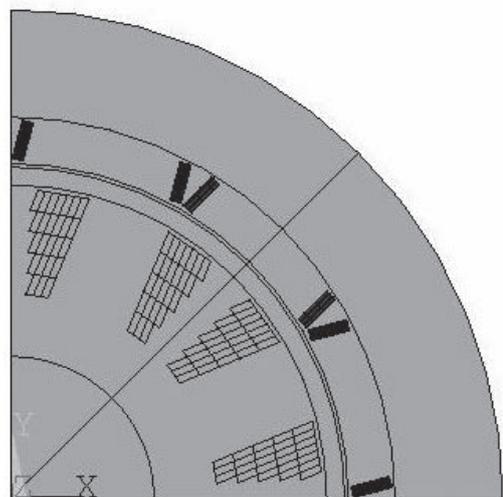


Fig. 3 Cross section of REBCO superconducting generator

構造の異なる10MW級超電導風力発電機の電磁特性の比較

Comparison of electromagnetic characteristics in 10 MW class superconducting wind turbine generators with different structures

寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: y_terao-008@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

超電導風力発電機は従来の技術と比べ、高出力密度かつ大容量化が実現可能であり、世界中で様々な構造が検討されている[1]-[3]。本稿では、常電導の永久磁石型(PMSG)、超電導型として突極型(S-SCG)、非突極型(NS-SCG)、全超電導型(FSCG)の合計4種類の10MW級ダイレクトドライブ型風力発電機について有限要素法(FEM)による電磁設計を行い、線材量、発電機サイズ、重量など複数の観点から比較・考察を行った結果を報告する。

2. 10MW級風力発電機的设计・比較条件

PMSG は界磁に永久磁石、電機子コイルに銅(分布巻)、S-SCG 及び NS-SCG は界磁コイルに YBCO 線材、電機子コイルに銅(分布巻)、FSCG は界磁コイルに YBCO 線材、電機子コイルに MgB₂ 線材(集中巻)を用いている。導体はいずれも占積率 0.5 とした。またダイレクトドライブ方式(低速回転; 10rpm)での運用を前提としている。極数は PMSG 及び S-SCG が 60 極、エアギャップを 15 mm とした。また NS-SCG 及び FSCG は、YBCO 線材コストの削減及び交流損失低減という観点から少極構造として 12 極、エアギャップは S-SCG が 100mm、FSCG は界磁・電機子コイルが同一クライオスタット内に格納されることを考慮して 80 mm とする。冷凍温度は、S-SCG が 33K、NS-SCG 及び FSCG は 22K での運転を前提として、負荷率 0.8 で電流密度を設定した。以上の4種類の発電機について FEM による 2 次元電磁界解析を行う。

3. 解析結果

Fig. 1 及び 2 に 4 つの発電機の直径、有効長及び超電導線材長、TABLE. 1 に発電機特性を示す。PMSG の場合、直径が 13.1m、重量にして 270トン以上となる。永久磁石の重量は約 16トンとなり、近年のレアアース価格の不安定さを考えると、PMSG はサイズ・コスト両面での課題が多い。その一方で、3 つの超電導発電機に着目すると、いずれの場合もサイズダウンが可能である(Fig.1)。特に FSCG の場合、直径 4.0m、重量 63.6 トンとなりコンパクト化及び軽量化という面では最もメリットがある。一方、S-SCG は YBCO 線材長が 53.7km となり、コスト面でメリットがあるといえる。しかしながら NS-SCG の場合、発電機サイズは FSCG と同程度であるが、線材長が 1240km とコスト面で過大となる。

4. まとめ

4 種類の 10MW 級風力発電機の電磁設計及び発電機特性の比較を行った。PMSG 等の既存技術と比べ、超電導発電機、特に S-SCG 及び FSCG はそれぞれコスト、コンパクト化という点からメリットがあるといえる。今後は冷凍システムの設計をどのように行っていくかが課題である。

参考文献

1. R. Fair, et. al.: presented at ASC2012 (2012), 4LLF-01
2. N. Maki, et. al.: Journal of CSJ, Vol. 47, No.6 (2012), p.392-397

3. Y. TERA0, et. al.: presented at ASC2012 (2012), 4LPG-08

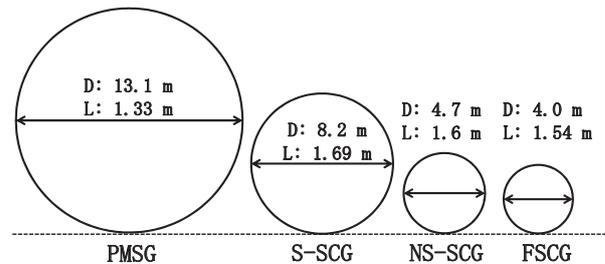


Fig.1 Size of wind turbine generators (D: Diameter, L: Effective length)

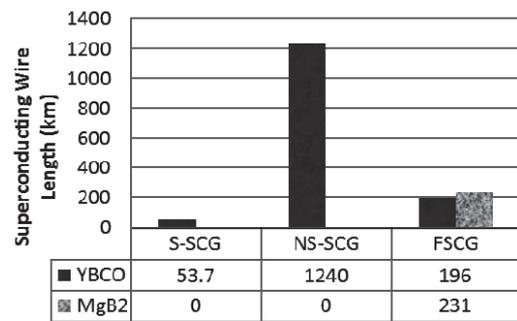


Fig.2 Wire length for three kinds of superconducting generators

TABLE.1 Characteristics of designed generators

Generator	PMSG	S-SCG	NS-SCG	FSCG
Output [MW]	10.0	10.0	10.1	10.0
Line current [kA _{rms}]	1.76	1.77	1.77	1.77
Voltage [kV _{rms}]	3.32	3.32	3.33	3.32
Rotor				
Current density [A/m ²]	Null	1.8×10 ⁸	1.45×10 ⁸	2.0×10 ⁸
B _{max} [T]	1.8	2.4	8.4	5.0
Stator				
Synchronous reactance [pu]	2.0	1.75	0.2	1.3
Copper loss [kW]	440	311	226	Null
AC loss [kW]	Null	Null	Null	1.9
Total weight [tons]	273.7	164.4	107.8	63.6

超伝導回転機の特性評価

Characterization of superconducting rotational machines

近藤 勝高, 井上 和朗, 腰塚 直己, 村上 雅人(芝浦工業大学);
 関 宏範(淡路マテリア); 平櫛 真男(セイコー化工機); 秋山 慎一(マグネオ技研)

KONDO Masataka, INOUE Kazuo, KOSHIZUKA Naoki, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology);
 SEKI Hironori (AWAJI MATERIA); HIRAGUSHI Masao (SEIKOW CHEMICAL ENGINEERING & MACHINERY);
 AKIYAMA Shinich (MAGNEO GIKEN)

E-mail: mb12021@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

医療や半導体分野の液体搬送では、不純物の混在しない高純度の環境が要求される。したがって、清浄環境を実現するためには、軸受け部が完全に非接触となる回転機構が望ましい。バルク超伝導体と永久磁石を用いると、ピン止め効果によって、無制御かつ完全非接触の状態での安定浮上が可能となる [1]。実際の応用にあたっては、ポンプが安定して回転する必要がある。ピン止め効果による安定化が重要となる超伝導浮上において磁石回路を二極として磁場勾配を配することで、より安定な回転が期待できる。

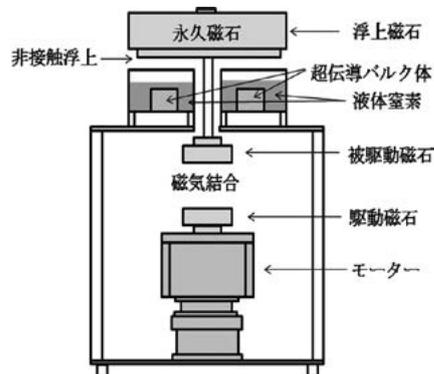


Fig.1 Schematic diagram of the pump superconductivity

2. 実験方法

Fig.1 に示す超伝導ポンプを用いて、回転特性を評価した。浮上磁石として、単極のもの NS2 極のものを用意した。磁石形状は、単極が外径 120mm、内径 70mm、NS2 極が外径 120mm、内径 60mm である。駆動磁石と被駆動磁石の初期ギャップを 100mm とし、その距離を 10mm 間隔で近づけていきながら、回転特性を評価した。

また、浮上安定性を評価するうえで重要となる剛性力および浮上力も測定した。さらに、単極および NS 二極の磁石回路において、剛性力、浮上力を比較することで浮上安定性を評価した。剛性力はフォースゲージを、浮上力は圧縮試験機を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

浮上磁石が単極および NS2 極いずれにおいても、駆動磁石と被駆動磁石の距離が 60mm の場合に、実用化の指標となる 3000rpm を達成することができた。これは、本研究で用いた超伝導ポンプが実用的に有用であることを示している。

浮上磁石が単極のときと、2 極のときの剛性力および浮上力のギャップ依存性を、それぞれ Fig.2 および Fig.3 に示す。剛性力は、2 極のほうが単極よりも大きいことがわかる。浮上力は、20N 以上では、2 極のほうが単極に比べて大きいことがわかる。

剛性力、浮上力ともに 2 極のときのほうが、単極のと

きに比べ大きいのは、2 極では磁場勾配が大きいためと考えられる。したがって、2 極のほうが単極より回転が安定するものと考えられる。

4. 結言

超伝導ポンプの回転測定を行った結果、単極および 2 極磁石回路の双方において、実用化に必要な 3000rpm を達成することに成功した。また、剛性力および浮上力測定において、浮上磁石としては、2 極のほうが単極よりもよりすぐれていることが確認できた。

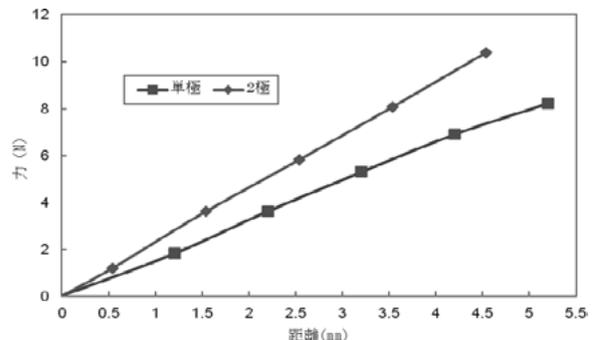


Fig.2 stiffness force characteristics at the pump superconductivity

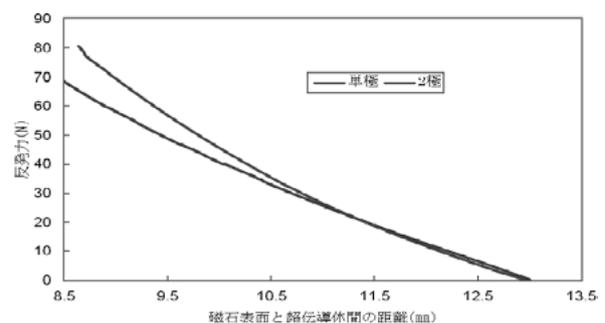


Fig.3 stiffness force characteristics at the pump superconductivity

参考文献

- [1] 村上雅人, 廣岡利紀, 宮崎太郎, 秋山慎一: 超伝導ミキサの開発、電気学会研究資料 ASC-06-48、(2006)、p45-48

小型クライオクーラーを用いた単純な真空断熱構造を持つ超伝導モータの開発

Development of a superconducting motor with the cryocooler in a simple vacuum thermal insulation structure

水川 達也, 河村 実生(岡山理科大)
 MIZUKAWA Tatsuya, MINARU kawamura(OUS)
 E-mail: t11em06mt@std.ous.ac.jp

1. 概略

近年、高温超伝導ワイヤーの臨界電流の大幅な向上や、クライオクーラーの性能向上によりクライオクーラーを用いた超伝導モータの開発が可能になった。本研究では、固定子のボビンに巻かれた超伝導ワイヤーを熱伝導方式によって冷却しているが、超伝導ワイヤーを目標の温度まで冷却できていない。本報告は、これまでに行ってきた研究の結果と改良型の開発の概要について報告する。

2. 超伝導モータの概要

本研究で開発してきた超伝導モータは、コイルに超伝導ワイヤーを用いた固定子を、永久磁石の回転子で挟むように配置しているコアレス構造のモータになっている。これにより超伝導ワイヤーに対して垂直により強く磁場をかけることができ、強いローレンツ力が得られる。また近年の高温超伝導ワイヤーの臨界電流密度の上昇によってコアレスでありながら強力な磁石と組み合わせることにより、1000[N]程度の力を発生させるのはそれほど困難ではない。

3. 超伝導モータの冷却構造

本研究の超伝導モータは、小型、軽量化を果たすために真空断熱構造を持っており、クライオクーラーにより熱伝導で冷却している。そのため効率よくクライオクーラーから固定子まで熱を伝えることが重要になる。クライオスタットは側面を円筒形にして、上部と下部に蓋を取り付けたものである。素材はアクリルを使用しており、蓋と側面部の接触面では蓋に溝を掘り、Oリングをはめている。上部と下部の蓋の中央には共にシャフト用の穴を開け、上部にはフェローシールを取り付けた。フェローシールとはガス・蒸気・霧・微細粒子に対してハメチックシールを形成するために、シャフトの廻りを磁性流体で取囲んでいるものである。クライオスタット内部は真空状態にすることで、断熱性能を向上させている。また、各媒介に銀箔を貼ることによって輻射係数を向上させて冷却効率の向上を図っている。超伝導モータの概略図をFig.1に示す。

4. 発電特性の検証実験

これまでに述べてきた超伝導モータを発電機として運用した時の発電特性について検証した。Fig.2に超伝導状態の場合と常伝導状態の場合の各回転周波数における出力電圧を示す。

5. 改良型超伝導モータについて

これまでに開発してきた超伝導モータは、効率を重視しているため、実用化することが難しい構造を持っている。また、固定子と熱伝達経路に大きな温度ギャップがあることがわかった。このため、改良型はこれらの課題を解決するために、超伝導モータの固定子を複雑なドーナツ型から平板型にする。また、これまでは固定子に熱伝導率の低いアルミナを使用していたが、改良型では、低温環境下でも高い熱伝導率を持つ窒化アルミを使用する。現在は、この前段階として、熱伝導率が高い純アルミで固定子を製作し、平板型にした時、十分に冷却することが可能であるかを検証するための、冷却実験を行っていく予定である。この冷却実験でクライオクーラーと固定子に大きな温度ギャップが発生しなかった場合は、固定

子を窒化アルミに、冷却実験後、超伝導モータの特性を確認する実験を行う予定である。

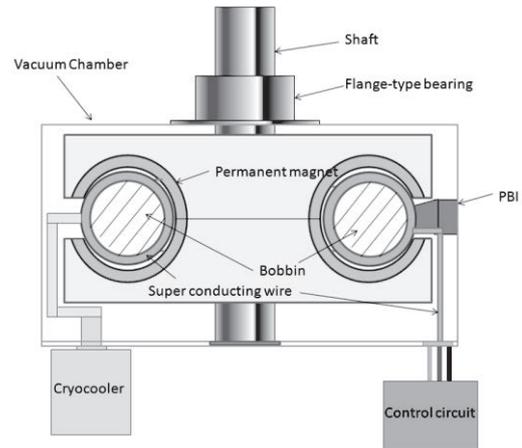


Fig.1 Schematic diagram of the superconducting motor

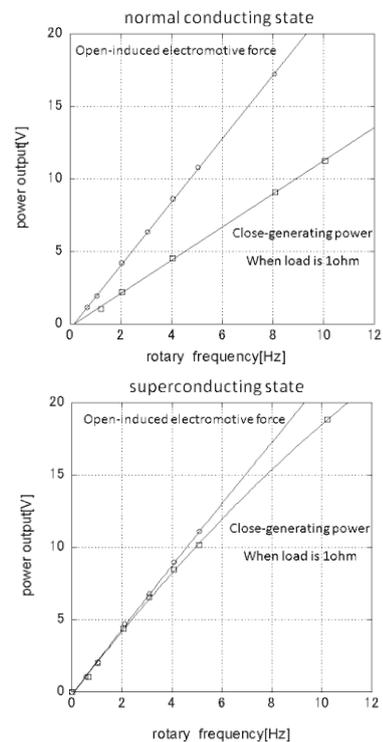


Fig.2 Power output of the each rotary frequency and states of superconducting wire

参考文献

1. K. Inooka, T. Mizukawa, T. Oba, M. Kawamura: Abstracts of Superconductivity Centennial Conference, (2011) p.148 (A479)

磁性流体を吸着した超伝導浮上磁石の振動解析

Damping Analysis of a Magnet Encompassed with Magnetic Fluid above a HTS Bulk

二村 宗男, 高橋 和也, 須藤 誠一(秋田県立大)

FUTAMURA Muneo, TAKAHASHI Kazuya, SUDO Seiichi (Akita Pref. Univ.)

E-mail: futamura@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

我々はバルク超伝導体上に浮上した磁石の振動抑制を目的として、浮上磁石に磁性流体を吸着させることによる振動減衰の影響を調べてきた[1]。本報では、磁性流体を吸着した浮上磁石の振動をバネ、ダンパ、質量からなる機械振動系で考え、その減衰振動の特性について考察を行った。

2. 実験と解析モデル

Fig.1 に示すように、冷却したバルク超伝導体(新日鉄 QMG-DyBaCuO, φ 32mm, 5mm)上に浮上している Nd-Fe-B 磁石(φ 10mm, 5mm, 2.85g)に磁性流体を吸着した後、周囲に設置したヘルムホルツコイルの磁場によって浮上磁石を持ち上げ、コイルの電流を遮断した後の磁石の振動をレーザ変位計によって測定した。比較のために、磁石のみの場合、磁石を磁性流体(タイホー工業製 フェリコロイド HC-50, 0.9g)で包んだ場合、磁性流体を意図的に凍結した場合について振動の時間変化を調べた結果、Fig.2 のように磁性流体吸着による振動の大幅な抑制効果が確認できた[1]。本研究ではこれらの振動を、磁気剛性を表すバネ k 、空気抵抗や磁気損失の粘性抵抗ダンパ c 、浮上磁石の質量 m によって構成される機械振動モデルで考えた。

一般的な超伝導浮上磁石の振動は、非線形な作用をするバネとダンパからなる非線形振動モデル[2]で表される。この非線形モデルに、Fig.3 に示すように磁性流体吸着の影響として、浮上質量 m に付加したバネ k_{mf} とダンパ c_{mf} によって支えられた追加の質量 m_{mf} を考える。これが磁石との位相差によってダンパ c_{mf} の粘性損失が振動抑制にはたらくと考えた。これは、下記のように2質点の連成振動モデルとして表される。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx + \sum_i k_{pi}(x - x_{pi}) + c_{mf} \frac{d(x - x_{mf})}{dt} + k_{mf}(x - x_{mf}) = 0 \quad (1)$$

$$m_{mf} \frac{d^2x_{mf}}{dt^2} + c_{mf} \frac{d(x_{mf} - x)}{dt} + k_{mf}(x_{mf} - x) = 0 \quad (2)$$

ここで、(1)式左辺第4項は、磁束ピン止めによる磁気力を表す非線形成分である。

3. 考察

磁石のみの場合の振動は、減衰率と周期が振幅(磁場変化)に依存するために振動中に変化しており、ピン止め磁束の効果を検討した非線形モデルによって説明できる。しかし、磁性流体吸着磁石の減衰振動波形は、線形な振動モデルによってフィッティングでき、非線形性が薄れていた。磁束ピン止めを考慮した非線形モデルに磁性流体分を換算した質量を付加した2質点連成振動モデルによって振動の減衰率、周期の変化を調べた。磁性流体を吸着した場合は、磁石とは位相がズレて振動する質量によって、小振幅時においても粘性抵抗がはたらき、ピン止め磁束線の非線形性が打ち消されるように作用してその結果、線形な振動と同様の減衰特性になりえると考えられる。

参考文献

1. M. Futamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.61
2. M. Futamura, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37 (1998), pp.3961- 3964

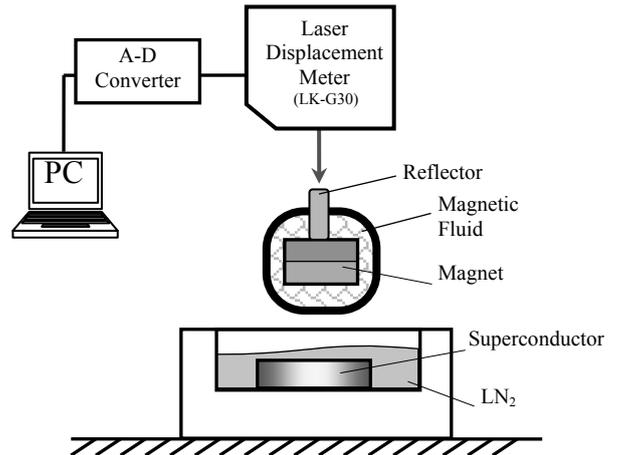


Fig.1 Schematic of experimental arrangement.

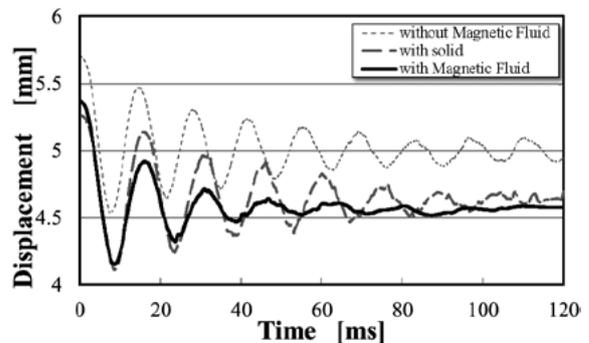


Fig.2 Comparison between the oscillations.

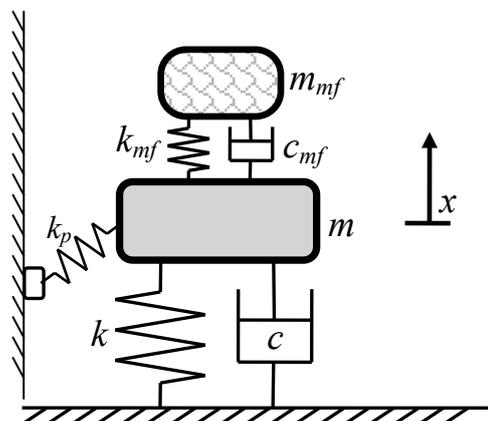


Fig.3 A mechanical model of the damping oscillation.

八極電磁石と四極電磁石を用いた 三次元超電導アクチュエータの動的特性に関する研究

The dynamic characteristics of 3-D superconducting actuator operating by the 4-poles and 8-poles electromagnets

川本 龍佑, 中野 大輝, 金 錫範(岡山大)
 KAWAMOTO Ryusuke, NAKANO Hiroki, Kim SeokBeom (Okayama University)
 E-mail: kim@elec.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 (Fig.1) の開発を行ってきた[1]. 開発する超電導アクチュエータは、移動子である超電導バルク体と固定子である平面配列された電磁石群から構成されている。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を鉛直方向・水平方向への移動及び回転させることが可能である。しかし、実際の超電導アクチュエータを実現させるには、より自由度の高い高精度な動作を移動子にさせることが求められる。

そこで、本研究では、より自由度の高い搬送を目的とし、Fig.2 に示すような従来から水平移動に使用している四極電磁石とより高精度な回転が可能である八極電磁石を組み合わせることを検討した。今回はその移動子の搬送特性について実験的に検討を行ったので報告する。

2. 実験条件

固定子として使用した電磁石の形状は、Fig.2 に示すような四極電磁石と八極電磁石の二種類である。Fig.2 に示す各電磁石を二つのユニットとし、二つのユニットの大きさは $92 \times 92 \text{mm}^2$ に収まるようにしている。移動子には外周をステンレスリング、バルク体表面をエポキシ樹脂によって補強されている直径 60mm ディスク型の GdBCO 高温超電導バルク体を用いた。

3. 実験結果

今回の検討における基礎特性として、Fig.2 の二種類の電磁石において、それぞれ極性パターンをNNSS, NNNNSSSSとし、通電電流を 3A とした場合の電磁石上部 1mm の発生磁場分布測定結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より、各電磁石において発生磁場強度に大きな差はないことがわかる。しかし、八極電磁石のほうがN極とS極が隣接する部分では磁場強度が高くなっている。これは八極電磁石のほうが磁極間の距離が小さいことにより、磁場の流入による影響が大きいためだと考えられる。逆に、同極性の電磁石が隣接する部分では磁場の相殺の影響が大きくなり、磁場強度の低下が大きくなっている。これらの実験結果から、各電磁石を組み合わせる場合、四極電磁石上と八極電磁石上ではバルク体の搬送特性に違いが生じると考えられる。

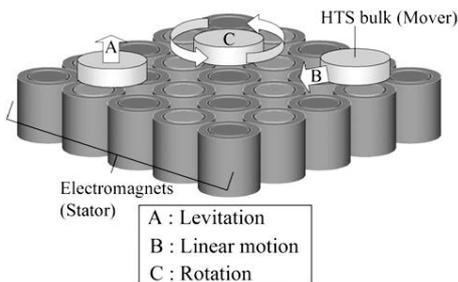


Fig.1 Schematic drawing of concept for 3-D HTS bulk superconducting actuator system consisted of 2-D arranged multiple electromagnets and the control parts.

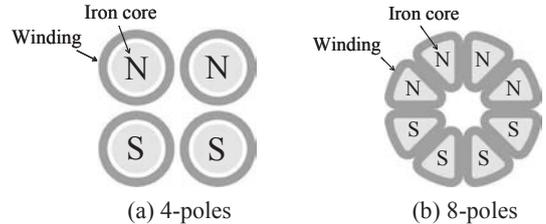


Fig.2 Top views of the two types of unit electromagnets with iron cores and windings : (a) 4-poles (NNSS pattern) (b) 8-poles (NNNSSSSS pattern).

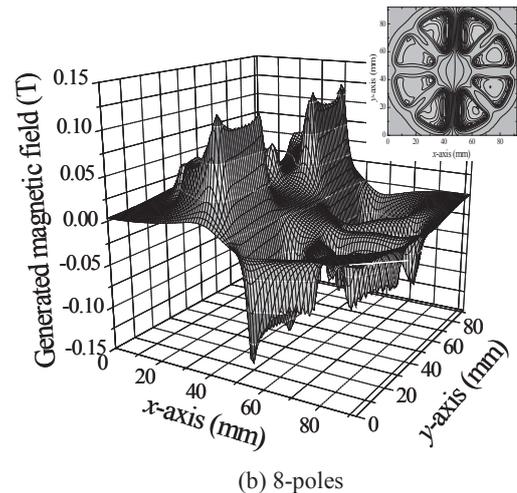
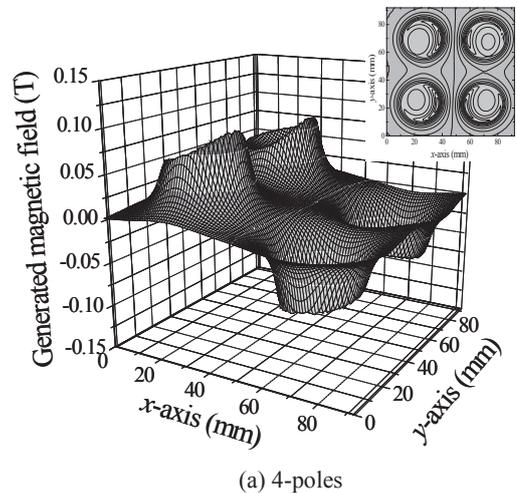


Fig.3 Spatial distributions of generating magnetic field and contour maps measured at the position of 1mm above the top surface of the coils with coil current at 3.0A : (a) 4-poles, (b) 8-poles.

参考文献

1. S. B. Kim, et al.: Physica C, vol. 445-448 (2006) pp1119-1122

超伝導球形ソレノイドマグネットの製作

Fabrication of Superconducting Spherical Solenoid Magnet

薮哲也、堀田一磨、高橋猛(株式会社堀田電機製作所)

Tetsuya Shitomi, Kazuma Hotta, Takeshi Takahashi E-mail:hotta5@hottadenki.co.jp

細山謙二(高エネ研) Kenji Hosoyama (KEK)E-mail:kenji.hosoyama@kek.jp

1. はじめに

エネルギー貯蔵用の超伝導マグネット装置では、大きい空間に高い磁場を発生させる必要があり、単純なコイル形状のソレノイドマグネットが利用されることが多い。また、加速器の偏向磁石等に使用される双極磁石もこの候補に挙げることができる。今回の球形ソレノイドマグネットは、ソレノイドコイルと双極コイルの特徴を併せ持つ球形のコイルで、エネルギー貯蔵に適していると考えられる。実証試験用の小型の超伝導球形ソレノイドコイルの製作、実験を行った。

2. 球形ソレノイドマグネットが作り出す磁場と特徴

今回製作した球形ソレノイドマグネットの基本概念設計は「超伝導球形ソレノイドマグネットの設計」(1)をベースにし、実証実験用のコイルとボビン等を設計した。

円形断面の双極マグネットでは、コイルの中間部から上下に向かって電流が減少する、所謂、 $\cos \theta$ 型の電流分布を採用することにより理想的な双極磁場がえられる。実際のコイルでは2層のコイルや複数のコイルブロックを組み合わせてこの電流分布を近似的に作り出している。

双極マグネットではコイルに働く強い電磁力を支えるために頑強な支持構造が必要になるが、球形ソレノイドマグネットでは円形のソレノイドコイルが積層された構造をしており、ソレノイドマグネットの場合と同様に、線材に働く強い電磁力はフープ力として線材で支えることができる。

3. 超伝導球形ソレノイドマグネットの設計・製作

図1に示すように、球形ソレノイドマグネットの実証試験用として、コイル半径約 8cm の小型のマグネットを設計した。使用した線材は平角 NbTi 線で基本仕様は、導体サイズ:0.9×0.6mm、フィラメント数:1032本、銅比:1.93、臨界電流:>435A at 4T となっている。電流分布が近似的に得られるように、各ブロックコイルの巻き数、位置、幅を決定した。

このコイルの配置は磁場の集中の緩和や、コイルボビンの構造、強度、組立などを考慮したものとなっており、No. 3-1とNo. 4-1のコイルボビン、No. 3-2とNo. 4-2のコイルボビンが一体化になった構造になっている。

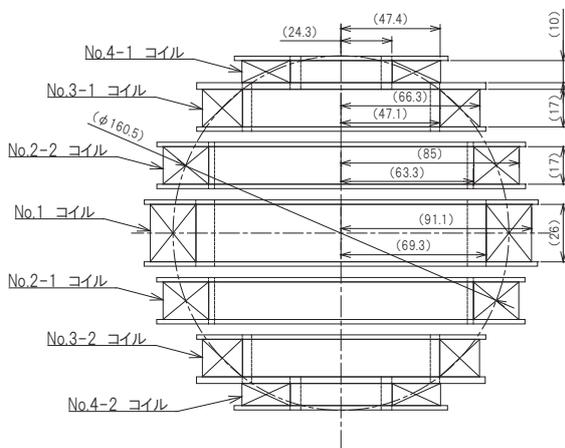


図1 7個のコイルでブロック近似して製作した球形ソレノイドコイルの断面図

表1 各マグネットコイルの諸元

コイル名	層数	巻数
No.1	33	891
No.2-1	35	595
No.2-2	35	595
No.3-1	29	493
No.3-2	29	493
No.4-1	35	350
No.4-2	35	350



図2 製作した球形ソレノイドマグネット

表1に、各コイルの諸元データおよび各コイル間の抵抗測定地を表に示す。図2に今回製作した球形ソレノイドマグネットの写真を示す。

4. 実験及び結果

励磁試験には定格通電電流 160A の電源装置を使用し、時間の都合もあり計 8 回の試験で終了した。

図3に今回の励磁試験で発生したクエンチ電流の推移グラフを示す。最初のクエンチは 120A で、その後、トレーニング効果により、計5回のクエンチで、励磁電源の容量の上限値の 164.1A にクエンチせずに到達した。

球形コイルの上部に取り付けたホール素子で磁場を測定し、中心磁場を推定した。

本球形ソレノイドマグネットは 164A (中心磁場で 3.2T、蓄積エネルギー 11.9 kJ) で安定して運転することが出来た。

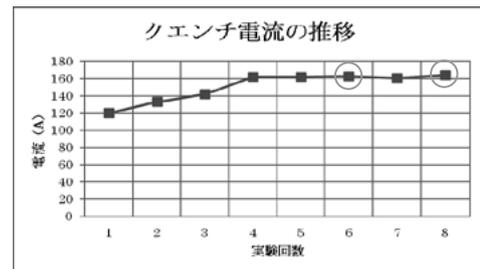


図3 励磁試験におけるクエンチ電流の推移 (青丸がついた回はクエンチをしなかった。)

5. まとめ

理想的な $\cos \theta$ の電流分布の超伝導球形ソレノイドマグネットの検証のために、ブロック近似した約半径8cmの小型の超伝導球形ソレノイドマグネットを設計し、平角線を用いて製作するまでに至り、励磁試験で約160Aまで通電することに成功した。今後、容量の大きい電源装置を使用して励磁試験を行う予定である。

6. 参考文献

- 「超伝導球形ソレノイドマグネットの設計」 細山謙二 2P-p42 第83回 2010年 秋季低温工学・超伝導学会

6.9kV-400kVA REBCO 超電導変圧器の限流特性

Current limiting characteristics of 6.9kV-400kVA REBCO superconducting

片野坂 祐太,松尾 政晃,佐藤 誠樹,岩熊 成卓(九州大学);岡元 洋,林 秀美(九州電力); 飯島 康裕,齊藤 隆(フジクラ);
富岡 章(富士電機);青木 裕治(昭和電線);大熊 武,五所 嘉宏,和泉 輝郎,塩原 融(ISTEC)

KATANOSAKA Yuta, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.); OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); TOMIOKA Akira (Fuji Electric Co.); AOKI Yuji (Showa Holdings Co.); OKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: te108108@sc.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景及び目的

超電導を電力機器に応用することで、小型・軽量化、高効率化といった効果が得られることが期待されている。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」では、66kV/6.9kV-20MVA 級の超電導変圧器の設計・製作技術の確立を目指している。

そこで、本研究では、20MVA 級超電導変圧器の開発に先駆け、要素技術開発のため、突発短絡試験において短絡電流を 20MVA 級超電導変圧器のものと同等とした 6.9kV-400kVA 超電導変圧器(type1)、および限流機能を付加した 6.9kV-400kVA 超電導変圧器(type2)の応答特性の比較を行った。

2. 設計・試作・試験

超電導線材の銀層と併設する銅線の厚さを type1 ではそれぞれ 16 μm 、300 μm 、type2 ではそれぞれ 18 μm 、50 μm として短絡電流を 20MVA 級超電導変圧器のものと同等とした突発短絡試験を行った。

3. 数値解析

二次側を一次側に換算した回路方程式を用いた数値解析コードにより数値解析を行い、通電電流、巻線温度、常電導抵抗割合の時間変化を算出した。実験結果と数値解析結果がよく一致したので、解析コードは概ね妥当であると考えられる。

4. 結果・考察

突発短絡試験における実験結果と数値解析結果の比較を行った。Fig.1 に type1、Fig.2 に type2 の通電電流の時間変化を示す。type1 の変圧器では超電導特性の劣化は見られず短絡電流が減衰することなく、そのまま流れた。この結果から超電導変圧器は短絡電流に耐えることが確認できた。また、実験結果と解析結果が一致しており、解析コードの妥当性が確認できた。

type2 の変圧器では 0.25 秒後に 174A に限流し、特性劣化も見られず目標である定格電流の 3 倍に抑制することができた。よって、超電導変圧器は短絡電流に耐え、かつ、限流機能を発揮することが確認できた。

また、Fig.3 に type2 の巻線抵抗の時間変化を示す。type2 では磁界分布の影響を受けずに温度上昇していて、20ms で常電導抵抗が発生して、すぐに巻線全体が常電導状態になり、安定した限流機能を発揮できたと考えられる。

謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

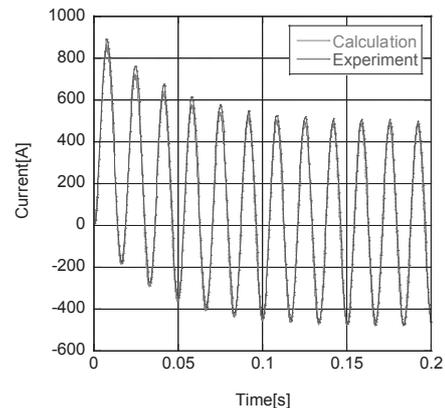


Fig.1 calculation and experiment current (type1)

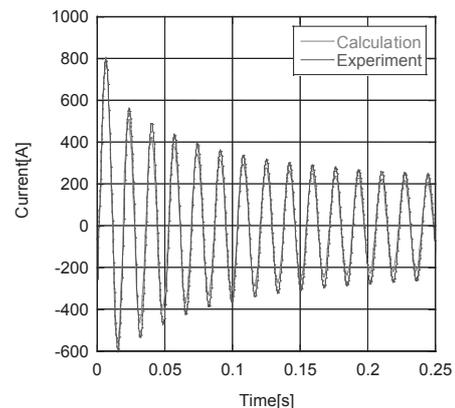


Fig.2 calculation and experiment current (type2)

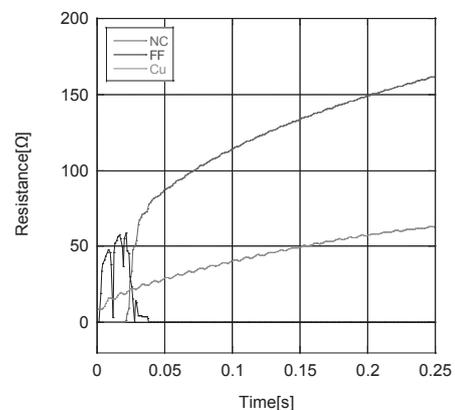


Fig.3 time variation of winding resistance (type2)

HTS 磁気軸受でフライホイールを非接触支持する模型試験装置の開発(第 3 報)

Development of the model scale flywheel examination device with HTS magnetic bearings (Third report)

荒井 有気, 清野 寛, 吉澤 佳祐, 長嶋 賢(鉄道総研)

ARAI Yuuki, SEINO Hiroshi, YOSHIZAWA Keisuke, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: arai@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導コイルと超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受を用いた鉄道用フライホイール蓄電装置の開発を進めている。これまでに、20 kN 対応超電導磁気軸受において、20 kN のスラスト荷重を浮上支持し、3600 rpm まで回転できることを確認している[1]。また、本件で開発した模型試験装置において、スラスト、ラジアル両荷重の非接触浮上支持および 570 rpm までの回転を確認している[2]。さらに、ロータダイナミクス解析により約 1500 rpm 以上であれば、安定して回転できる見込みを得た[3]。本件では、低次の共振点を越える回転数である 2000 rpm 以上での回転を行ったので報告する。

2. 模型試験装置

超電導磁気軸受(SMB)のステータは高温超電導コイル(BSCCO)、ロータは超電導バルク体(GdBCO)で構成され、1つのクライオスタットの中に収められた。この SMB を上下に 1組ずつ配し、ロータには、SMB の間にフライホイールを、SMB の上方には、永久磁石カップリングを用いたトルク伝達装置が接続されている。これにより、クライオスタット外からクライオスタット内のロータを非接触で回転駆動できる。装置の概要を Fig. 1 に、外観図を Fig. 2 に示す。なお、本件では、フライホイールは SUS 製、約 5.2 kg のものを用いている。ロータを浮上させていないときは、フライホイールをロードセルで支持しており、この荷重の減少分を浮上力として計測した。

3. 浮上回転試験

浮上回転試験時の超電導コイル電流、浮上力、回転数の時間変化を Fig. 3 に示す。まず上下の超電導コイルに通電すると、ロードセル出力が減少し、浮上力が発生した。電流を上げていくと浮上力も増加し、ロータ荷重から磁気カップリングの吸引力を引いた値と一致すると、それ以上増加しなくなった。これはロータが浮上したことを示す。浮上した直後に電流を一定(ここでは 60 A)に保持し、回転試験を行った。回転試験は、クライオスタット外にある磁気カップリングを誘導電動発電機で駆動することで、クライオスタット内のロータを非接触で回転させた。回転数はクライオスタット外の磁気カップリングを、レーザ式回転計で測定した。クライオスタット内のロータが同期して回転していることは、観測窓を通してレーザ変位計でロータ変位を計測し、変位の変化する周期が回転数による周期と一致することで確認した。この結果、ロータが低次の共振点を越え、2000 rpm 以上で回転することに成功した。

4. まとめ

高温超電導コイルと高温超電導バルク体を用いた SMB を用いた模型試験装置のロータダイナミクス解析結果により約 1500 rpm 以上であれば、安定して回転できる見込みを得た。これを元にロータ回転速度の向上を図り、低次の共振点を越えた 2000 rpm での回転に成功した。

今後は、実験との整合性を確認しながら、回転速度の向上を目指す予定である。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

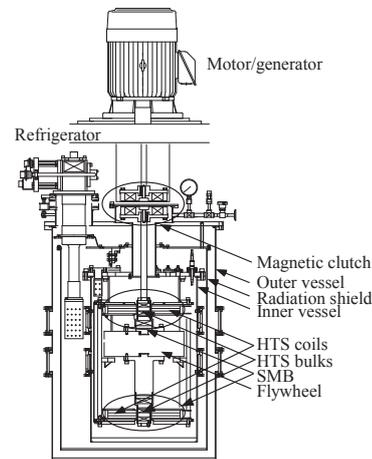


Fig. 1 Schematic view of the flywheel examination device

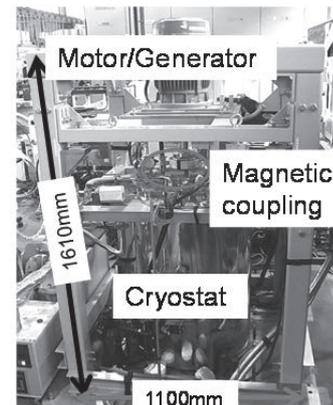


Fig. 2 Photograph of the flywheel examination device

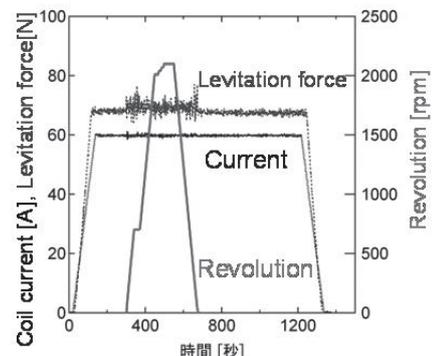


Fig. 3 Experimental result of rotational test

参考文献

1. H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.134
2. Y. Arai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2011) p.27
3. Y. Arai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.62

電磁鋼板を配置した高温超伝導テープ線材の臨界電流測定

Critical current measurements of HTS tapes with magnetic steel

小原 久人, 孫 建, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大学)
 OHARA Hisato, SUN Jian, WATANABE Hirohumi, HAMABE Makoto, KAWAHARA Toshio,
 YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)
 E-mail: te11006@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

これまでの中部大学では大電流直流超伝導送電ケーブルの設計を見直し、新しい導体構造を検討するために、積層させた超伝導線材に各層毎に方向を反転させて電流を加え臨界電流の測定し実験を行ってきた⁽¹⁾。特に、住友電気工業製 BSSCO 線材を 3 本積層させて中央の線材の臨界電流を測定した場合、自己磁場中の一本の線材の臨界電流 164.5A に対して 248.2A と 50.9% 増加した。これまでの研究で、自己磁場のテープ線材表面に対して垂直方向の磁場が打ち消されるように線材を配置することにより臨界電流が大幅に増加することが分かった。

ピスマス系線材を囲う様に電磁鋼板を配置することにより、自己磁場の影響が少なくなるように磁場を整形することができる可能性がある。また、このことから超伝導ケーブルの新しい導体構造の検討を始めた。本講演では電磁鋼板の囲う位置を変化させることによる臨界電流の変化の測定結果を発表する。

2. 実験方法

住友電気工業製 BSSCO 線材(厚さ:360 μ m、幅:4mm)と無方向性電磁鋼板(厚さ:300 μ m、幅:2mm、5mm)を Fig.1 の様に配置した。線材には電磁鋼板と絶縁するためにカプトンテープ(厚さ:60 μ m)を巻いている。2 つのコの字状電磁鋼板の間隔 d を 0mm、1mm、2mm と変化させた。線材はコの字状の電磁鋼板の下部に配置してあるため、上部と線材の間には 120 μ m 隙間が空いている。この配置で液体窒素(77K)に入れて臨界電流を測定した。

3. 実験結果

Fig.2 に実際の測定例として自己磁場中の一本の線材と電磁鋼板を配置し間隔 d を 2mm にしたときの結果を示す。臨界電流値は 1 μ V/cm のときの電流値とした。臨界電流は自己磁場中の一本の線材の 150.1A に対して $d=2$ mm の場合 172.5A と 14.9% 増加した。

Fig.3 に間隔 d を変化させたときの臨界電流の依存性を示す。間隔 d は 2mm、1mm、0mm の順に測定を行った。間隔を 0mm にした場合は 133.6A、1mm にした場合は 136.9A とそれぞれ 11.0%、8.8% 臨界電流は低下した。これは間隔を空けることによりテープ線材に対し垂直方向の磁場が生成したためと予想される。n 値は 2mm、1mm、0mm それぞれ、17.5、16.1、13.9 であった。自己磁場中の一本の線材のときの n 値 16.3 に比べて 1mm、0mm のときは低下し、2mm のときは上昇した。

Gu らの計算によれば⁽²⁾、Bi-2223/Ag tape 端に強磁性体を配置した場合の強磁性体の間隔を狭くすると臨界電流値は低下し、広げると臨界電流は上昇した。本実験と比較したところ、類似の傾向が得られた。

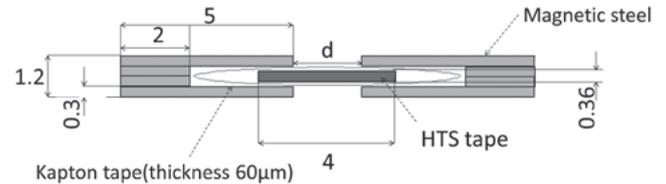


Fig.1 The schematic arrangements of the HTS tapes in the experiment

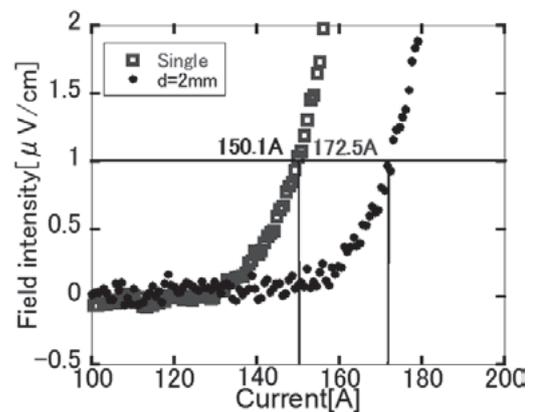


Fig.2 V-I characteristics for critical current measurement

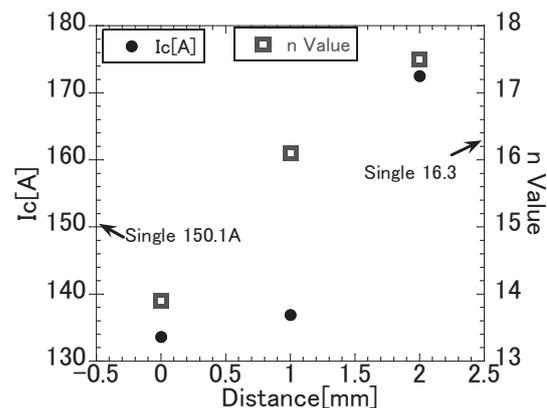


Fig.3 Critical currents of HTS tapes

参考文献

- (1) J. SUN et al, Physics Procedia **36** (2012) 1290-1295
- (2) Gu et al, 2007, Supercond. Sci. Technol. **20**, 133-137

超伝導直流送電ケーブルのための配置による臨界電流の測定

Critical current measurement with HTS tape arrangements for superconducting DC transmission power cables

孫 建, 水野 博貴, 安部 宏典, 小原 久人, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大学)
 SUN Jian, MIZUNO Hiroki, AMBAI Hironori, OHARA Hisato, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, KAWAHARA
 Toshio, YAMAGUCHI Satarou (CHUBU UNIVERSITY)
 E-mail: j_sun@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

DC superconducting power transmission system has been studied at Chubu University by using high temperature superconducting (HTS) tape wires. In the 200 m HTS cable system, called as CASER-2, a coaxial HTS power cable is used as shown in Fig.1, which is made of BSCCO tape wires by Sumitomo Electric Industries (SEI). There are 23 wires with two layer structure for inner HTS conductor and 16 wires for outer HST conductor with a monolayer structure in consideration of the gap effect on the critical current of the tape wires in the cable, which will lead to the reduction of the maximum current of HTS power cable [1]. Previous studies show strong dependence of the critical current of the BSCCO tape wires on the gap [2]. The critical current of the middle BSCCO tape in three straight tape arrangements increased by 5% with decrease of the gap for monolayer and 10% for two layer structure, respectively. In order to optimize the cable structure, we continue to investigate the critical current of the BSCCO tapes due to tape arrangements.

2. Samples and experiments

The DI-BSCCO tapes were used with cross sections of 4.5 mm wide and 0.35 mm thick. In the present experiments, five tapes were used with length 27 cm and set as the tape arrangement in the cable with two layer structure as shown in Fig 2. The tapes were insulated with each other and the critical current measurement was performed at 77 K. Different currents were applied to the tapes with two power supplies. The critical current distributions of the tape #2, #3 and #4 were measured against the gap between the tape edges in the same layer for different current in other tapes.

3. Experimental results and discussion

Fig.3 shows the comparisons of E-I characteristics curves for samples #2, #3, and #4 for single and five tape arrangements with different gaps. The transport currents in other tapes are 100 A. The measured critical currents of samples #2, #3, and #4 increase by 6%, 7% and 3% for 0.4 mm gap and 10%, 9% and 7% for 2 mm gap in the five straight parallel tapes arrangement. The critical current of the BSCCO tapes are improved when there are gaps between the tapes in the same layer due to magnetic field interaction between the tapes.

As shown in Fig.1, the tapes for inner HTS conductor are helically and crossed wound between each layer. In order to observe the winding effects on critical current, we will measure the critical current of the tape in the arrangement as shown in Fig.4. The experimental results will be presented for different arrangements in consideration of twist effects and winding direction to improve the property of the HTS cable for DC power transmissions and distributions by optimizing the tape arrangements.

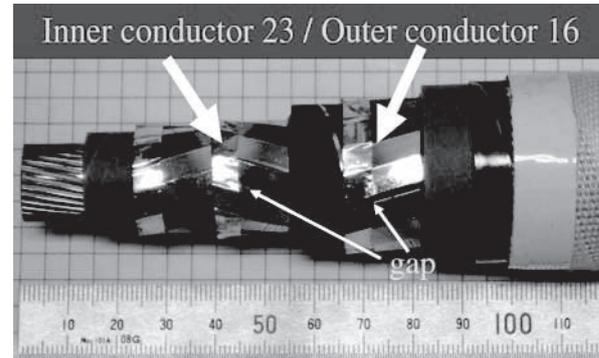


Fig.1 The coaxial power cable for CASER-2

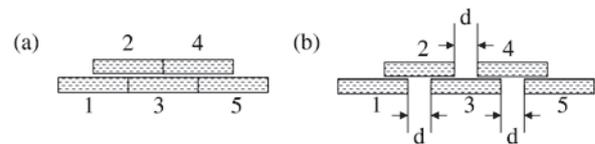


Fig.2 Setup of tape arrangements with and without gaps

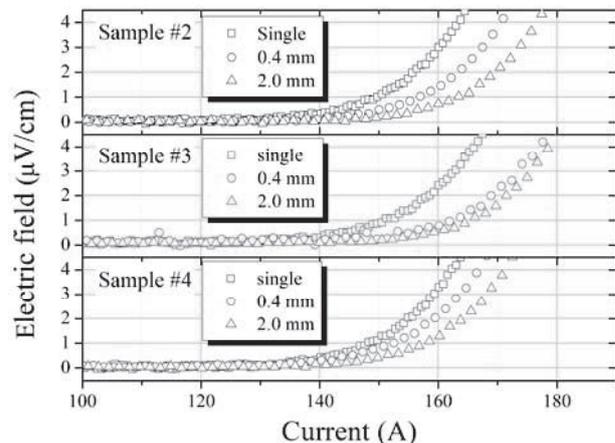


Fig.3 E-I curves for #2, #3 and #4 with different gaps.

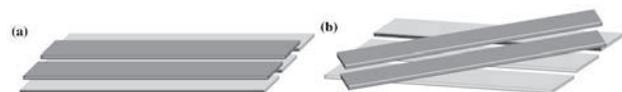


Fig.4 Scheme of parallel and cross tape conductors.

参考文献

1. J. Sun, et al.: Physica C, Vol, 471 (2011) p. 1313
2. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.136

鉄道用超電導ケーブル開発のための高温超電導線材の基礎特性評価 Characterization of HTS wire for railway system

福本 祐介, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 石原 篤, 富田 優 (鉄道総研); 北口 仁 (NIMS)
 FUKUMOTO Yusuke, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, TOMITA Masaru (RTRI);
 KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)
 E-mail: yfuku@rtri.or.jp

1. はじめに

直流電気鉄道における変電所間隔は、き電方式、線路条件、電気車出力、運転条件、電源事情などによって異なる。車両に電気を送るためのき電線は、電気抵抗があるため、流れる電流に応じて電圧が低下する。そのため、変電所間隔は、都市間を結ぶような路線で10~15 km、都市圏の路線で3~5 km程度であり、路線に多くの変電所が設置されている。

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導ケーブルの開発を行っている¹⁾。今回、超電導ケーブル設計のために必要な低磁場領域の臨界電流(I_c -B-T)特性について評価を行ったので、報告する。

2. I_c -B-T 特性評価

超電導ケーブルを構成した際、超電導線材にかかる磁場は0.05 T程度と低磁場領域であるため、それ以下での詳細な I_c -B-T特性が必要となる。そこで、外部印加磁場を0.2 Tまで0.01 T刻み、その後1 Tまで0.1 T刻みとした場合の I_c -B-T特性について測定を行った。装置の概要をFig.1に示す。サンプルの温度は、液体窒素を圧力制御器により加減圧することで、66~84 Kの範囲で調整した。測定サンプルは実用性を考慮し²⁾、銅合金をラミネートしたBi系線材(Type HT(CA50))と、銅安定化層をもつRE系線材(FYSC-SC05)の2種類とした。

Fig.2に垂直磁場を印加した場合の測定結果を示す。RE系線材はBi系線材に比べ、磁場特性がよく、 I_c の温度依存性も高いことが分かる。本結果により低磁場領域の I_c -B-T特性を把握でき、磁場解析により超電導ケーブルの詳細設計を行うことができる。

謝辞

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構(JST)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」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超電導技術イノベーション」の支援を受けて行った。

参考文献

1. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki: Abstracts of CSJ Conference, Vol81 (2009) p.95
2. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, A. Ishihara, M. Miryala: Abstracts of CSJ Conference, Vol84 (2010) p.138

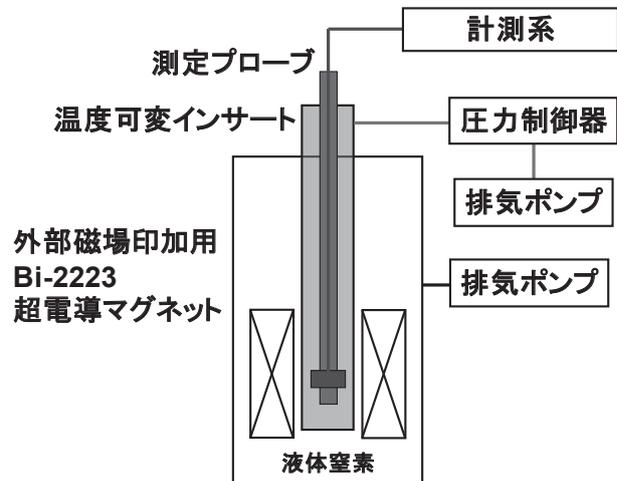


Fig.1 Measuring equipment of I_c -B-T properties

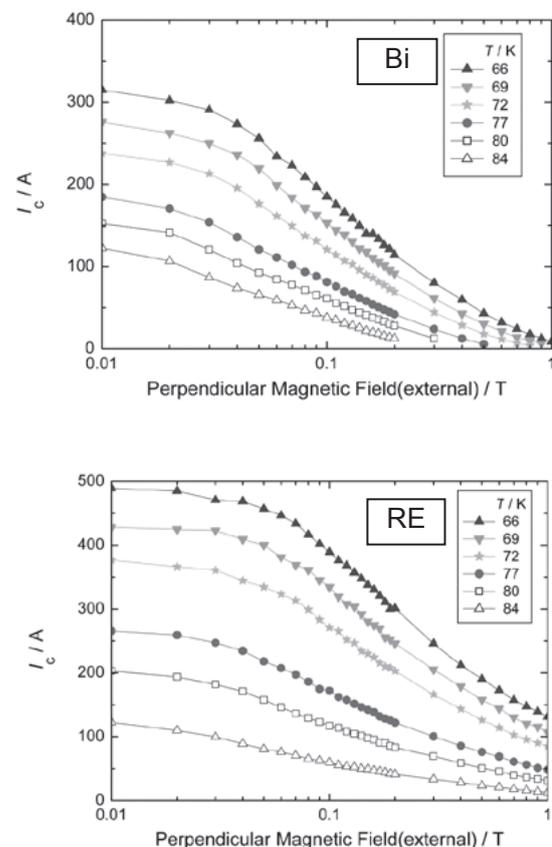


Fig.2 The relationship between field and temperature of the transport I_c (Perpendicular Magnetic field)

LHD ヘリカルコイル用ヘリウムサブクールシステムの運転制御特性

Control characteristics of helium subcooling system for LHD helical coils

濱口 真司, 今川 信作, 尾花 哲浩, 柳 長門, 三戸 利行(NIFS)

HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail: hamaguchi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

LHD ヘリカルコイル(以下、HC)の冷却安定性向上のため、2006年度にサブクールシステム(以下、SS)が導入された[1]。以後、供給バルブ(SV)によって50 g/sに調整されたサブクールヘリウム(飽和ヘリウム槽で3.0 K、HC入口で3.2 K)を安定にHCに供給している。結果として、HCの3ブロック平均の最大通電電流値は11.833 kAまで増大した[2]。SSはこれまで大きな問題なく運転され、サブクール運転時間は10,000時間を超えた。本報告では、SSの運転制御方法を詳細に説明するとともに、その制御特性について、特に流量制御を中心にこれまでの成果をまとめる。

2. 定常時の運転制御

Fig. 1にSSの概略を示す。定常サブクール運転では、出口弁(OV)を全開、バイパス弁(BV)を微開とし、入口弁(IV)で飽和ヘリウム槽の液面は一定値(70%)に自動制御される。低温排気圧縮機(以下、CC)は約1,500 rpsの回転数を保持して運転され、CC流量は飽和ヘリウム槽中のヒータで16 g/sに自動制御される。本制御方法の採用により、飽和ヘリウム槽、HC入口の温度の安定度が ± 0.01 K以内となり、常に一定温度のサブクールヘリウムの供給を可能とした(See Fig. 2)。

SSは低温システム全体への熱負荷軽減および緊急時の安全性を考慮してプラズマ実験期間中以外は待機モードで運転される。待機モードでは、OV全開、BV約70%開とし、約18 g/sのCC流量を確保している。CC回転数は約700 rpsとして仕事を抑え、飽和ヘリウム槽中のヒータは使用しない。これにより4 Kで500 W以上の熱負荷軽減効果が得られた。

3. 運転モード移行中の運転制御

上述の定常サブクール運転と待機モード間の移行方法について述べる。各モードで大きく変える必要があるのはBV開度とCC回転数である。CC回転数を変えるとCC流量が大きく変動する。遠心式のCCは適切な流量範囲(本機では16 - 20 g/s)で使用するため、SSではBVの開度調整でこれを抑えている。

BV開度がCC流量に与える影響をFig. 3に示す。BV開度47%以上では約10倍の変化率でCC流量が増加するため、この特性を反映した自動運転モード移行方法を開発した[3]。その運転制御の詳細は当日報告する。これによりモード移行中のCC流量の変動は17.1 - 18.6 g/sとなり、CCが安定に動作する流量範囲内に抑えることができた。また、モード移行にかかる時間も大幅に短縮され、省力化、ヒューマンエラーのリスク低減にも寄与している。

4. サブクールシステムの運転実績

SSが導入された2006年度から昨年度まで6年間の総CC運転時間は約20,000時間であり、総サブクール運転時間は10,000時間を超えた。この間、インバータの交換、UPSの追加、不純物対策、振動計測の強化等により、SSの不具合発生は年々減少し、昨年度、一昨年度は不具合が発生しなかった。これらの対策と運転制御の最適化により、安定な運転を継続している。

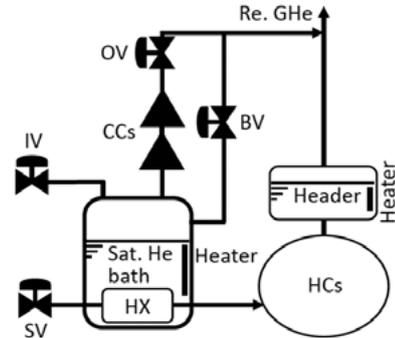


Fig. 1 Schematics of the subcooling system for the LHD helical coils.

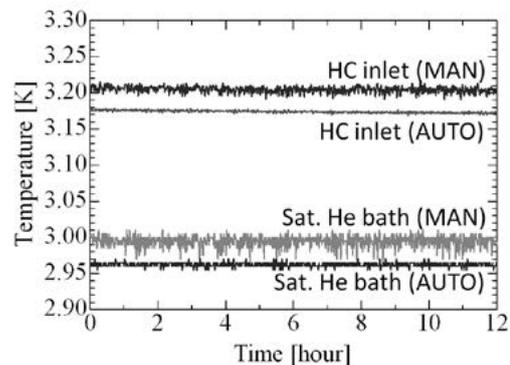


Fig. 2 Temperature stabilization by the automatic flow control of the cold compressors.

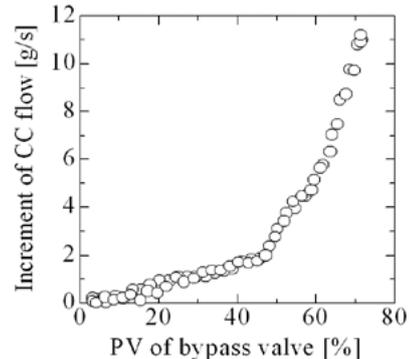


Fig. 3 Relationship between the opening degree of BV and the increment of the mass flow rate of the CCs.

参考文献

1. S. Hamaguchi, et al.: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 53B (2008) p. 1724.
2. S. Hamaguchi, et al.: Fusion Science and Technology, Vol. 58, No. 1 (2010) p. 581.
3. S. Hamaguchi, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3 (2010) p. 2051.

ヘリカル炉 FFHR-d1 の超伝導マグネットと支持構造

Superconducting magnet and support structure of the helical DEMO reactor FFHR-d1

田村 仁, 後藤 拓也, 柳 長門, 田中 照也, 増崎 貴, 宮澤 順一, 相良 明男 (NIFS)

TAMURA Hitoshi, GOTO Takuya, YANAGI Nagato, TANAKA Teruya, MASUZAKI Suguru, MIYAZAWA Junichi, SAGARA Akio (NIFS)

E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

現在概念設計が進められているヘリカル炉 FFHR-d1 は LHD 実験での知見を生かした設計を進めるために、LHD の4倍の相似形としている[1]。また、核融合出力、閉じ込め性能、ブランケット厚さを考慮したシステムコード解析により、プラズマ閉じ込めの中心磁場は 4.7T と設定され、この場合コイルの蓄積エネルギーは 160GJ に達する[2]。また、デモ炉では、ブランケットシステムとダイバータシステムが必須であり、これらの保守・交換が容易な構造とする必要がある。さらに、プラズマ境界と超伝導コイル間の冷却・励磁、および組立精度を考慮したラジアルビルド設計も重要な課題である。このため十分なメンテナンスポートの確保、材料強度、コイル位置精度を元に超伝導マグネットに作用する電磁力と構造解析を行った。

2. 電磁力解析

Table 1 は FFHR-d1 における超伝導コイルの諸元である。HC, IVC, OVC はそれぞれヘリカルコイル、内側垂直ポロイダル磁場コイル、外側垂直ポロイダル磁場コイルを示す。ヘリカルコイルの底部は長方形断面ではブランケットやプラズマ真空容器と干渉するため、Fig.1 に示すように縦横比と重心位置を検討しながら図のように底部が階段状であるとした。また、ポロイダルコイルは長方形断面とした。超伝導コイルにより発生する3次元磁場分布を FEM により解析を行った。得られた磁場分布と電流密度からヘリカルコイルに作用する電磁力をポロイダル断面ごとに積算した結果が Fig.2 である。Fa はフープ力に相当し、最大 70 MN/m の電磁力が発生している。一方ポロイダルコイルでは IVC で最大 65 MN/m のフープ方向の電磁力が作用する結果となった。

Table 1 Design parameters of SC magnet in FFHR-d1.

	HC	IVC	OVC
Current density (A/mm ²)	25	25	25
Magnetomotive force (MA)	36.66	18.5	-19.9
Major radius (m)	15.6	7.2	22.2
Minor radius (m)	3.9		

3. 支持構造物

板厚が十分厚いトーラス形状が支持構造として理想であるが、メンテナンスポートを確保するために開口を大きくする必要があり、ここでは基本板厚 300 mm のトーラス形状からコイルが接続される部分以外にできるだけ大きな開口部を設けるように構造を検討した。代表的な構案から構築した FEM モデルを Fig.3 に示す。各ヤング率を支持構造物 200GPa、ヘリカルコイル 80GPa、ポロイダルコイル 110GPa とした。ポアソン比はすべて 0.3 とした。モデルのコイル部分に電磁力解析で得られた電磁力を要素毎に与えて解析を行い、得られた応力・変位結果からモデル形状の再構築し、応力が許容内となるように最適化していった。結果として支持構造物に発生する応力は、von Mises 応力で最大 600MPa、広域では概ね 400MPa 以下となり、極低温での構造材料の許容レベルを得ることができた。また、最大応力が発生しているのは開口部のコーナー部分であり、形状の最適化を進めることにより、応力や板厚の低減が可能であると考えられる。変形量は OVC との接続部付近で最大 27mm と見積もられた。クリアランスが厳し

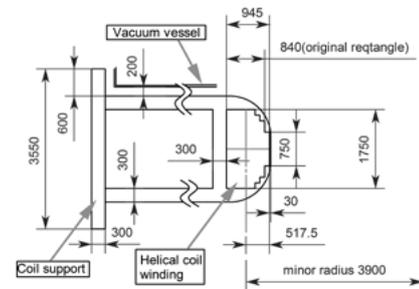


Fig.1 Cross section of HC.

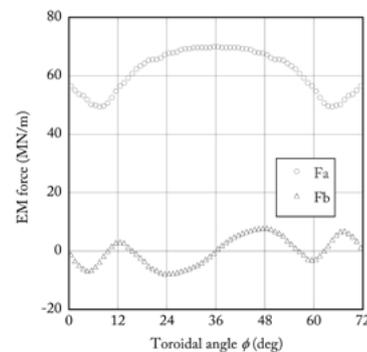


Fig.2 EM forces on HC.

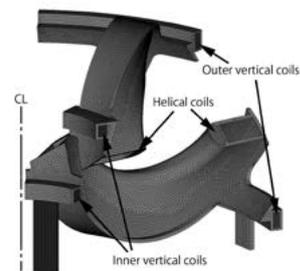


Fig.3 Fundamental design of the coil support structure.

いトーラス内側のラジアルビルド部では、コイルがプラズマ側へ約 7mm 変位する。建設時およびメンテナンス時のこの部分のギャップを 30mm 確保すれば、冷却による 40mm の熱変形と電磁力による変形により、通常運電時には 63mm のギャップが確保されることになる。なお、この支持構造物形状での重量は約 22000 トンであった。

4. まとめ

通常の励磁状態とメンテナンス時に必要な機能の双方を考慮し、応力・変位・他の構造物とのギャップ等の条件を満たすマグネット支持構造の形状最適化を進めた。組立性と支持方法を検討する上で、構造物の板厚および重量の低減が今後の課題である。

参考文献

1. A. Sagara, et al.: Fusion Eng. Des. 87 (2012) 594-602
2. T. Goto, et al.: Plasma Fusion Res. 7 (2012) 2405084

JT-60SA の超伝導フィーダーの設計

Design of the superconducting magnet feeders for the JT-60SA

浅川 修二, 木津 要, 古川 真人, 吉田 清 (原子力機構)
 ASAKAWA Shuji, KIZU Kaname, FURUKAWA Masato, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: asakawa.shuji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60 のトカマク本体を超伝導装置 JT-60SA に改修する計画が、日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライト・トカマク計画」として推進されている。超伝導コイルは中心ソレノイド(central solenoid:CS), 平衡磁場コイル(equilibrium field coil:EF coil), トロイダル磁場コイル(toroidal field coil:TF coil)より構成される。これらのコイルには、高温超伝導 (high temperature superconductor:HTS) 電流リードなどで構成されるコイルターミナルボックス(coil terminal box : CTB)から超伝導フィーダーにより電流が供給される。超伝導コイル, CTB, 超伝導フィーダーなどの全体構成を Fig. 1 に示す。

本報では、超伝導フィーダーや CTB などの設計について述べる。

2. 超伝導フィーダーの設計

超伝導フィーダーは導体外周に絶縁を施した後にステンレス鋼製ラップを巻きつけ、極間に設置板を設ける構造とし、500mm 程度のピッチでクランプして、1対の往復導体を一体化した。各 CTB は 6 もしくは 4 個、合計 26 個の HTS 電流リードなどから構成され、垂直に設置する円筒の端子箱とクライオスタットをつなぐダクト部よりなる。ダクト内の超伝導フィーダーは、冷却時における熱収縮などに柔軟に対応するためにジグザグな形状に曲げている。CTB 内部を Fig. 2 に示す。HTS の材料は Ag-Au を安定化材として使用した Bi2223 である。運転時において HTS 電流リードは、約 33mT の磁場にさらされる。HTS 電流リードのジョイント部と銅による接続部は、ヘリウムにより 50K に冷却され、NbTi の超伝導導体は 4.5K に冷却される。

3. 超伝導フィーダーの設置

CTB は上部には 3 個、下部に 2 個設置し、18 個の TF コイルにはそれぞれ 25.7kA, 4 個の CS 及び 6 個の EF にはそれぞれ 2kA の電流が供給される。TF コイル側と CTB 側の超伝導フィーダーの接続部であるターミナルジョイントは TF コイルターミナルエリアの上部に配置する。TF コイルのターミナルエリアは TF コイル通電時(TF on)に半径方向に 11.9mm 動く。TF コイルが最も傾く運転時(EOB)には周方向に 14.8mm 動き、 0.06° 傾く。超伝導フィーダーはこの変形と傾きを許容できる。超伝導フィーダーのサポート部をターミナルエリア、ジョイントの上部に設置し、超伝導フィーダーを配置する。TF コイルの超伝導フィーダーのサポート部とダクト間では、3 対の超伝導フィーダーをジョイント(mid joint)で結合し、ダクト側に八角形のフレームで取り付け、これにはサーマルアンカーを設け、熱負荷の低減を図っている。なお、CS と EF コイルの HTS 電流リードは、3分の運転と 30 分のインターバルで使用される。TF コイルへ電流を供給する超伝導フィーダーの設置状態を Fig. 3 に示す。

4. まとめ

CTB, フィーダーの設計が完了したので製作設計を開始する。

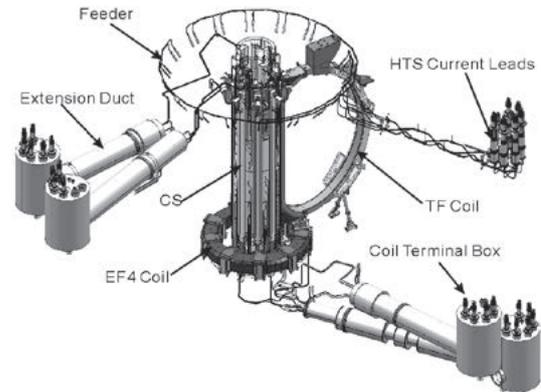


Fig.1 Coil terminal boxes, coils and feeders

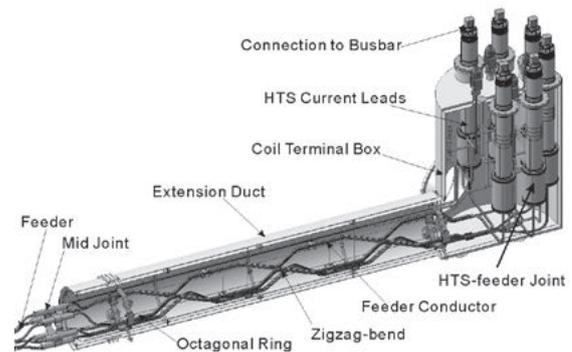


Fig.2 Coil terminal box

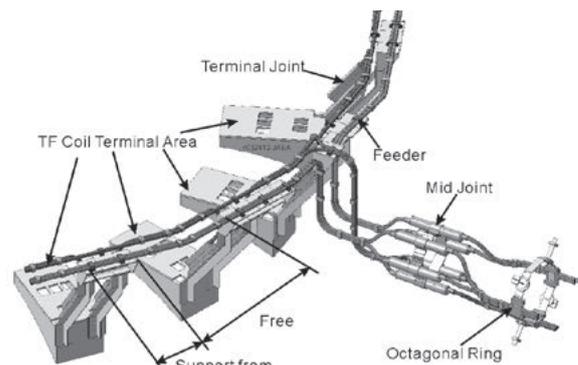


Fig.3 Feeders for TF coils

参考文献

1. K.Yoshida, et al.:SOFT2012, (2012) In press
2. K.Yoshida, et al.:J. Plasma Fusion Res. SERIES, VOL.9 (2010) p.214-219
3. 木津, 他:第 82 回 低温工学・超電導学会 講演概要集 (2010) p.121
4. 米田, 他:第 82 回 低温工学・超電導学会 講演概要集 (2010) p.124

JT60-SA EF コイル用 NbTi CIC 導体の素線間接触コンダクタンス測定

Interstrand contact conductance measurements of NbTi cable-in-conduit conductors for JT-60SA EF coils

夏目恭平, 尾花哲浩 (NIFS); 瀧野慧, 谷貝剛 (上智大学); 村上陽之, 木津要, 吉田清 (JAEA)
 NATSUME Kyohei, OBANA Tetsuhiro (NIFS); HAMANO Kei, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.) MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: natsume@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所(NIFS)と日本原子力研究開発機構(JAEA)は共同で JT60-SA プラズマ平衡磁場(Equilibrium Field)コイル用ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体の性能試験が、2007 年度から行われている¹⁾。本研究では、EF コイルに用いられる NbTi CIC 導体の基礎特性を知るために、単位長さ当たりの素線間接触コンダクタンス測定を、液体ヘリウム中で行った。

2. 試験方法²⁾

今回測定に使用する EF プロトタイプ導体と EF-H 導体の諸元を Table 1 に示す。EF-H 導体は比較的高磁場(最大経験磁場 6.2 T)を発生するコイルで利用される。サンプルとして、最終撚りピッチ程度の長さの導体を用いる。Fig. 1 は実験方法の概略図である。撚り線は 100 mm 程度を端子部分としてステンレススティールジャケットから、外に出されている。端子部分は撚りをほぐされ、素線先端の表面 Ni メッキを紙やすりで剥がし、電流ライン用直径 2 mm の銅線と電圧端子をハンダ付けされる。撚り線同士はジャケットの外側で接触しないように、シリコンチューブを被せる。測定した素線の配置を Fig. 2 に示す。測定された素線は通し番号が割り当てられている。実験は、2つの素線間に電流を 25 A 流し、端子間の電圧を測定する。得られた電圧から、単位長さ当たりの接触コンダクタンスを求める。

3. 試験結果

プロトタイプ導体を用いて測定された接触コンダクタンスは、一次撚り線内の素線間で $\sim 3.5 \times 10^7$ (S/m)、一次～三次撚りサブケーブルを跨いだ素線間で、 $\sim 2.0 \times 10^7$ (S/m)、四次(最終)撚りサブケーブルを跨いだ素線間では、 $\sim 6.0 \times 10^6$ (S/m) になった。四次撚りサブケーブルの外側には、厚さ 0.05 mm のステンレススティール(SS)ラップが巻かれているため、他の素線間よりも大幅に接触コンダクタンスが小さいことが確認できた。試験結果の詳細及び EF-H 導体を用いた試験については、本講演において報告する。

4. まとめ

JT-60SA の EF プロトタイプ導体及び EF-H 導体の素線間接触コンダクタンス測定を液体ヘリウム中で行った。得られた結果は、撚り線構造を反映した素線間の撚り次数の距離に依存した値を示しており、結果は妥当だと考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重な助言を頂いた University of Twente の A. Nijhuis 氏と S. Wessel 氏に感謝致します。

参考文献

1. T. OBANA et al., *Abstract of CSSJ Conference*, Vol. **82**, (2010), p. 123, 2B-a09
2. K. SASAKI et al., *Abstract of CSSJ Conference*, Vol. **66**, (2002), p. 150, D2-8

3. K. KIZU et al., *Fusion Engineering and Design*, **84**, (2009), p. 1058-1062

Table 1 Specification of samples³⁾

Conductor	Prototype	EF-H
Material	NbTi	NbTi
Sample length	253 mm	161 mm
Strand diameter	0.829 mm	0.829 mm
Strand coating	Ni	Ni
Number of strands	486	450
Cabling pattern	3 x 3 x 3 x 3 x 6	3 x 5 x 5 x 6
SS sub wrap	W/	W/O
Final twist pitch	245 mm	160 mm
Jacket inner size	22.6 x 22.6 mm	21.8 x 21.8 mm
Jacket outer size	28 x 28 mm	27.7 x 27.7 mm

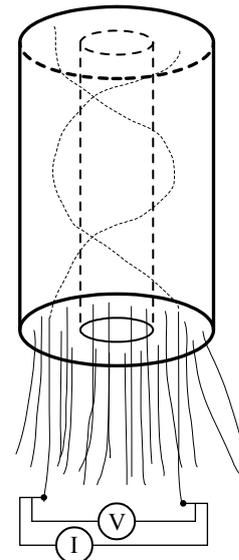


Fig. 1 Schematic view of a test setup

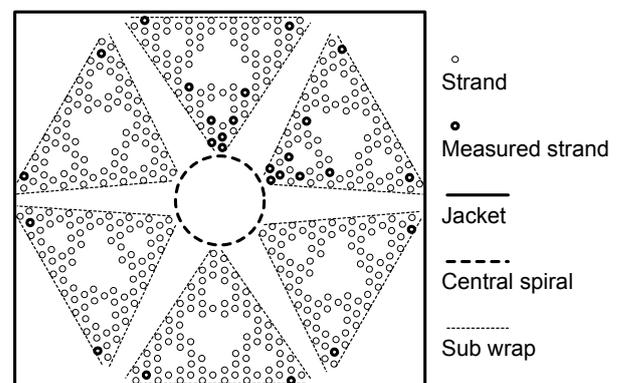


Fig. 2 Schematic detail of the strand arrangement

リング状バルク超電導体による均一磁場空間生成のための条件最適化

Optimization of Ring-shaped Bulk Superconductors for Generating Homogeneous Magnetic Fields

大浦 雄紀, 大崎 博之(東大); 富田 優, 福本 祐介(鉄道総研)

OURA Yuki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke (RTRI)

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

1. はじめに

核磁気共鳴現象を利用した技術には、生体内部の情報を画像化するMRI (Magnetic Resonance Imaging)、スペクトルを観察することで原子・分子レベルで物質の結合状態の分析を行うNMR (Nuclear Magnetic Resonance)がある。これらの装置は強磁界を必要とするため、既存技術の問題点として「装置の大型化」が挙げられる。そこで、小型かつ強力な磁束源であるバルク超電導体に着目し、これを応用することで MRI や NMR の小型化を目指す研究が行われている[1]。

MRI 画像の撮像には、磁界強度以外に高い磁界均一度が必要とされる。しかし、バルク超電導体に捕捉される磁界は、厚さ方向・径方向ともに傾斜を持った分布となる。また、製造過程において生じる成長界面の影響による周方向の捕捉磁界の不均一性が存在する。そこで、複数の大型リング状バルク超電導体を用いて、高均一度達成のためのシステムの構築方法について解析及び実験を行い、小型 MRI への応用方法を検討した。

2. 手法

Fig.1 に、今回用いたリング状バルク超電導体と、作製したバルク超電導マグネットを示す。リング状バルク超電導体は、外径 80mm、内径 50mm、高さ 20mm で、樹脂含浸して外径 87mm、内径 47mm、高さ 22mm の仕上がり寸法となっている。

まず、有限要素法による磁界解析を行い、4 個のバルク間ギャップを変化させたときの、中心部の磁界均一度の変化を比較した。次に、解析結果を元に製作した装置を使って実験を行った。バルク間にギャップを設けて、外部磁界 1T で磁界中冷却により着磁をしたのち、中心磁界をホールセンサで測定した。

Bulk Superconductor

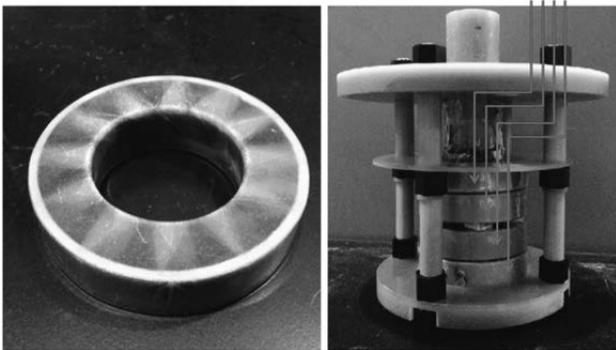


Fig.1 Bulk superconductor and a stacked-bulk magnet

3. 結果

最適なバルク間ギャップの取り方について解析にて検討したところ、磁界均一度や実験システム構築の容易さの観点から、外側ギャップは密着させ、中央部のギャップのみ変化させる手法が適していると判断した。このときのギャップ長の違いによる均一度の変化を、Fig.2 に示す。半径 5mm の球殻において、ギャップが 6.7mm のとき、磁界均一度 211ppm という解析結果が得られた。

この結果を元に、Fig.1 に示した装置にバルクを組み込み、

実験を行った。Fig.3 が実験結果である。横軸は測定領域の周方向角度、縦軸は磁束密度である。測定領域には 90 度 - 180 度方向に磁場の傾斜が見られた。また、測定領域の磁界均一度は約 4000ppm であった。

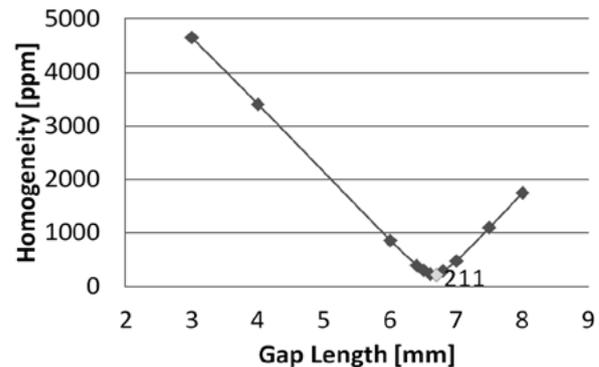


Fig.2 Relation between the gap length and the homogeneity

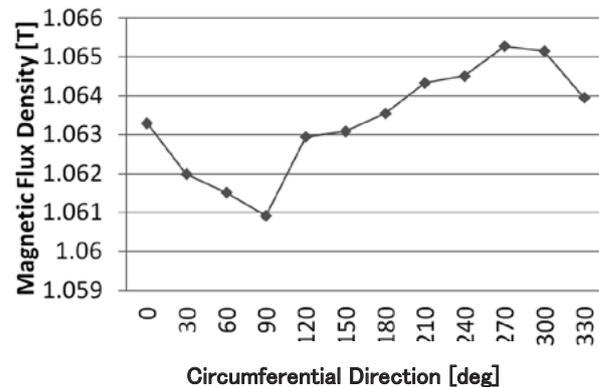


Fig.3 Magnetic flux density distribution

4. まとめ

複数のリング状バルク超電導体を用いて小型マグネットを構築し、磁界均一度及び捕捉磁界分布を測定した。実験結果で見られた捕捉磁界分布の傾斜に対しては、逆向きの傾斜磁界を発生させるコイルにより補正を行い、さらなる磁界の均一化を図る予定である。

MRI 画像の撮像には、約 10ppm の均一度が必要である。バルク個数を増やしたり、配列を変えたりすることで、磁界強度とともに均一度のいっそうの向上を図り、目標値に近付けて行く予定である。

参考文献

1. M. Sekino, et al.: Abstract of IEEE TRANS. ON APPL. SUPERCONDUCTIVITY, VOL21, NO3 (2011) pp.1588-1591