

# A study of thermal behavior of cryogenic heat pipe for heat switch application at liquid nitrogen temperature

WANISON Ramnarong(SOKENDAI); KIMURA Nobuhiro(SOKENDAI, KEK);

MURAKAMI Masahide(University of Tsukuba)

Email: wanison@post.kek.jp

## 1. Abstract

In this research the performances of nitrogen cryogenic heat pipes with the combination of axial grooves and sintered metal particles wick structures were tested under the condition of a wide range of heat load and several filling ratios. The heat pipes tested are commercially available ones, which are originally designed for room temperature applications using water as a working fluid. For the present research working fluid, water, was replaced by liquid nitrogen. The size of the tubular copper heat pipe is: 6 mm in the outer diameter and 200 mm long. The thermal behavior in the film boiling and even in the local dry-out states in the case of very large heat input was examined to investigate the On/Off conductance ratio for the potential application to a heat pipe heat switch. In the On-state of the heat switch, it works as a heat pipe having excellent heat transfer performance, while in the Off-state, it is in the dry-out state having very large thermal resistance because of dry-out state. From experimental result, an On conductance about 12 W/K and an Off resistance about 12 K/W were obtained, giving the maximum On/Off conductance ratio about 144.

## 2. Cryogenic heat pipe for heat switch

Heat switches are devices that switch between roles as high thermal conductance devices and good thermal insulators. When one is installed in the heat-conduction path between a warm, heat-producing component and a heat sink, the change in thermal conductance it affords can control the temperature of the component. Heat switches can passively control the temperature of warm electronics or instrumentation without power requirements as well as the need for heater control circuitry and software.

The heat pipe was considered to operate as a heat switch as well as a heat transfer device, a device that is a part of a conductive link between the magnet and the cryocooler, for example. The heat pipe as a heat switch can be of both high thermal conductance, which works in a normal heat pipe action mode is capable of cooling a superconducting magnet and low thermal conductance, which is in the dry-out state, for preventing overheating from the magnet to the cooling system when a quench occurs.

## 3. Experimental Set up

Gas nitrogen was supplied to the heat pipe as a working fluid and liquid nitrogen bath locates inside a cryostat, which provides an environment at liquid nitrogen temperature (78 K) [1]. The heat pipe is attached to the bottom of the cylindrical liquid nitrogen bath using copper blocks which work as a condenser section [2]. A schematic of heat pipe,

dimension, and location of temperature sensors were shown in Fig. 1.

For both high capillary pressure and high thermal conductivity, sintered porous metal and axially grooved wick are combined as the composite wick, shown in Fig. 2.

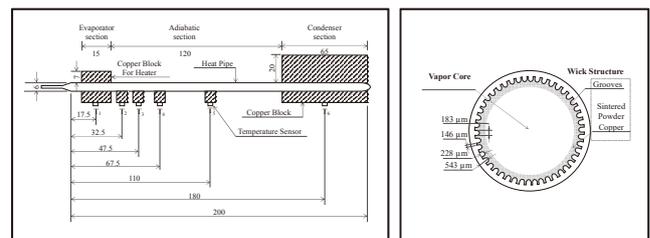


Fig. 1 Heat pipe

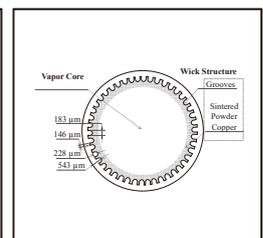


Fig. 2 Wick structure

## 4. Experimental Result Discussion and Future

The On/Off conductance ratio was defined as thermal resistance,  $R_{th}$  divide by minimum thermal resistance,  $R_{th, min}$  at the same filling ratio. In Fig. 3, On/Off conductance ratios of the heat pipe tested in this study are plotted as a function of filling ratios. It is found that the transition between the On and Off states highly depends on the filling ratio and the evaporator temperature. However, each filling ratio giving the On/Off conductance ratio more than 100 approximately, almost similar to thermal conductance of solid copper.

The heat pipe experiment will be continued to test with variable working fluid, such as argon or neon by using new variable temperature cryostat.

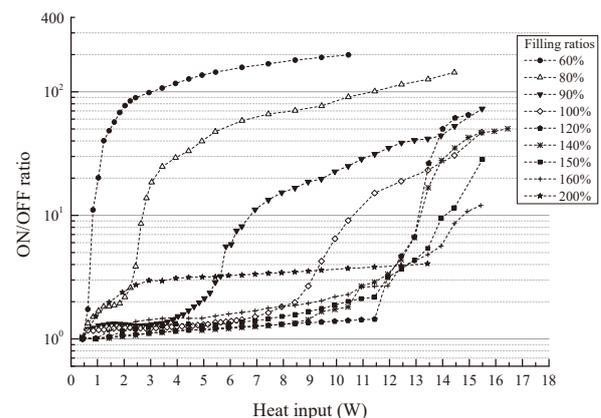


Fig. 3 On/Off ratio of the heat pipe for several filling ratios

## References

1. R. Wanison, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.96 (2018) p.123
2. R. Wanison, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.97 (2018) p.69

# 同軸パイプ蓄冷器の 4 K 冷凍能力の奇妙な特性

## Strange characteristics of 4 K cooling power by co-axial pipe regenerator

増山 新二 (大島商船高専); 松本 宏一 (金沢大学); 沼澤 健則 (NIMS)  
 MASUYAMA Shinji (NIT (Kosen), Oshima College); MATSUMOTO Koichi (KANAZAWA Univ.);  
 NUMAZAWA Takenori (NIMS)  
 E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

### 1. はじめに

蓄冷式冷凍機において 4 K レベルの温度を達成させるためには、現在、2 段式構造となっており、冷却ステージ、膨張空間、蓄冷器などが二つ必要とされている。4 K レベルにおいて高効率化を目指すためには、4 ~ 50 K 程度の温度範囲を担う 2 段目蓄冷器の効率が特に重要である。その効率を妨げる要因の一つとして、蓄冷器内を流れる高圧ヘリウムガスの比熱が挙げられる。これは 20 K 以下で急激に上昇すると共に、圧力依存も持つ。また、比熱変化にともない密度も変化する。したがって、非線形な温度勾配を持つ 2 段目蓄冷器内でのヘリウムの振る舞いを十分に把握することが、4 K 高効率冷凍機へのアプローチの一つであると考えられる。

われわれは、上記のヘリウム物性を考慮し、独自に開発中の「同軸パイプ蓄冷器」を 4 K-GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器に適用し、その特性を調査している[1]。今回は、その同軸パイプ蓄冷器を適用する位置において、4.2 K の冷凍能力に興味ある差異が見られたので報告する。

### 2. GM 冷凍機と 2 段目蓄冷器

実験に使用された 2 段 GM 冷凍機は RDK-408D2 (SHI) (1 W at 4.2 K モデル) である。概略図を Fig. 1 に示す。その中の 2 段目蓄冷材には、Pb, HoCu<sub>2</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 球が充填されており、その概略図を Fig. 2 に示す。(a) は一般的な三層構造 (three-layer) であり、三種類の蓄冷材が、今までの研究成果を参考に、図示された割合で充填される。(b) ~ (d) が今回準備した同軸パイプ蓄冷器 (co-axial pipe regenerator) であり、Pb, HoCu<sub>2</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 部のそれぞれの中心軸上に、ステンレスパイプが挿入されてある。パイプを挿入することで、ヘリウムの軸方向への乱れを抑える効果があると考えている。

圧縮機は、スクロール式 SSC-3700 (SUZUKISHOKAN) を使用した。なお、定格電力は 7.3 kW at 60 Hz であり、ヘリウムガスの初期封入圧力は 1.6 MPa 一定とした。

### 3. 冷凍能力試験結果

冷凍能力試験は、電気ヒータで 2 段目ステージを 4.2 K に保ちながら、1 段目ステージ温度を最低到達温度の 25 K から 65 K 程度まで変化させた。

実験結果を Fig. 3 に示す。いずれの場合も 1 段目ステージの温度変化に対して凸型の特性となり、そのピークは、おおよそ 50 K に存在している。Pb 部を同軸とした (b) は、三層構造の (a) と比較して、ほぼ全温度範囲において冷凍能力の向上が見られている。最大能力は 1.79 W を発揮している。HoCu<sub>2</sub> 部を同軸とした (c) は (a) と比較して多少の能力向上が見られた。特に 50 K 以上の高温側でその効果が大きい。Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 部を同軸とした (d) は、(a) と比較して大きな差異は見られないが、若干の能力低下となっている。

つぎに、上記の結果を踏まえ、(b) と (c) を組み合わせた (b) + (c) の実験を試みた。Fig. 3 にはその結果も示してある。これから、(b) の能力向上効果は現れず、(c) とほぼ同様な特性を示している。

### 4. まとめ

高出力 4 K-GM 冷凍機開発を目指して、同軸パイプ蓄冷器の調査を進めた。パイプを挿入する位置により、4.2 K の冷凍

能力向上の効果があることが明らかとなった。また、その位置は、高温側が望ましいことが証明された。しかしながら、能力向上を打ち消すような構造も存在する。今後は、さらに調査を進める予定である。

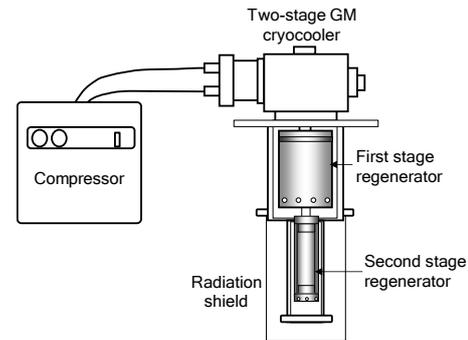


Fig. 1. Schematic of the two-stage GM cryocooler

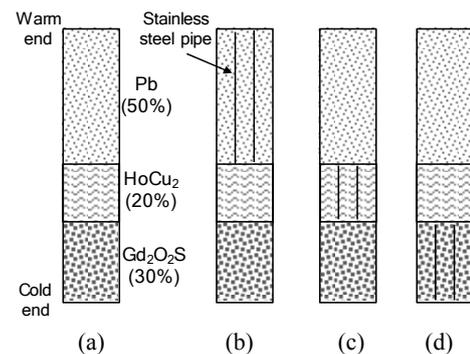


Fig. 2. Four types of the second stage regenerators comprised of Pb, HoCu<sub>2</sub> and Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S spheres: (a) three-layer layout, (b) ~ (d) co-axial pipe regenerators with a stainless steel pipe.

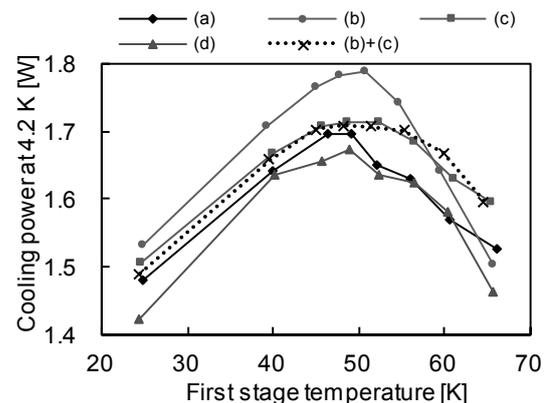


Fig. 3. Experimental results of the cooling capacity at 4.2 K of three-layer layout and co-axial pipe regenerators

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18K04095、中国電力技術研究財団 (試験研究 A) の助成により実施された。

### 参考文献

1. 増山新二ら: Abstracts of CSSJ Conference, **97** (2018), p.54

## 磁性蓄冷材 GdNiX (X=Si, Ge) の Er 置換効果

## Er substitution effects in magnetic regenerator materials GdNiX (X=Si, Ge)

小林 将己, 森岡 直矢, 松本 圭介, 平岡 耕一(愛媛大)

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

E-mail : g843011z@mails.cc.ehime-u.ac.jp

## 1. 諸言

GM 冷凍機は主にヘリウムの液化に用いられ、蓄冷器に磁性蓄冷材を組み込むことで 2 K 付近までの冷却を可能としている。磁性蓄冷材には、10 K 以下で反強磁性転移による比熱のピークを示す材料が求められる。比熱のピークの大きさは基底多重項の縮重度に依存しており、Gd 化合物は磁気相転移付近で  $J = 7/2$  に起因した大きな比熱のピークを示すことが期待される。GdNiGe, GdNiSi の磁気相転移温度はそれぞれ 10.5 K, 13.3 K と報告されており、Gd 化合物の中では非常に低い<sup>(1)</sup>。

我々はこれまでに、 $Gd_{1-x}Er_xNiSi$ ,  $Gd_{1-y}Er_yNiGe$  の Gd サイトへの Er 置換を  $x, y = 0, 1$  と  $0.4 \leq x, y \leq 0.8$  にすることで、8 K 以下に比熱のピーク温度を低下させることができるとことを報告した<sup>(3)</sup>。本研究では  $x, y = 0.1, 0.2, 0.3$  の試料について転移温度や体積比熱を測定したので、その結果を報告する。

## 2. 実験

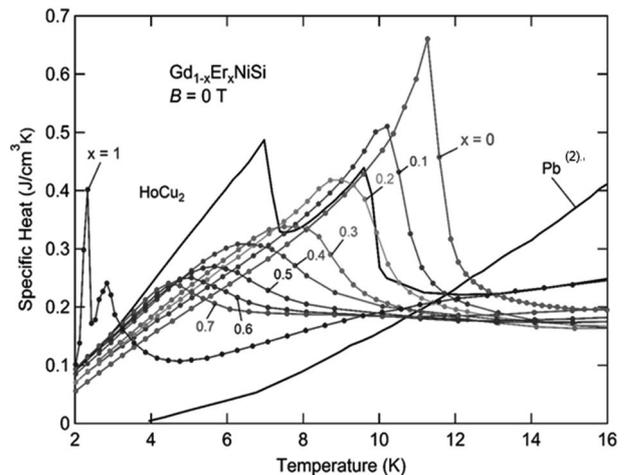
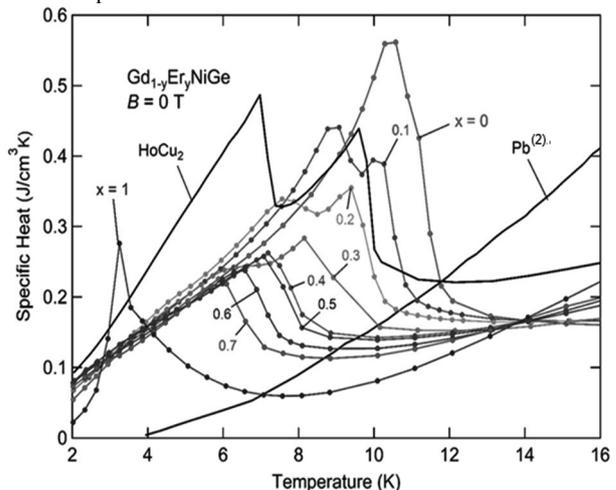
原料をアーク溶解法によって溶解、その後アニール処理 (800~1100 °C, 72 h) を施して、 $Gd_{1-x}Er_xNiSi$ ,  $Gd_{1-y}Er_yNiGe$  の  $x, y = 0.1, 0.2, 0.3$  の試料を作製した。粉末 X 線回折測定によって構造解析を行った。物性測定は、SQUID 磁束計による磁化測定と熱緩和法による比熱測定を行った。

## 3. 結果

粉末 X 線回折測定の結果よりどの試料も TiNiSi 型構造であることが確認できた。格子定数は、 $x, y = 0$  から  $x, y = 1$  まで系統的に減少し、Vegard 則に従っている。Fig. 1, 2 に  $Gd_{1-x}Er_xNiSi$  および  $Gd_{1-y}Er_yNiGe$  のゼロ磁場中での体積比熱の温度依存性を示す。Er の置換量が増加するに伴って比熱のピークを示す温度が低下した。また、 $Gd_{1-y}Er_yNiGe$  の  $y = 0.1, 0.2, 0.3$  では 2 つのピークが確認できた。 $x \geq 0.2, y \geq 0.2$  においてピーク温度は目標の 10 K 以下に到達する。 $x \leq 0.1, y \leq 0.1$  は 7 K 以上の温度域で  $HoCu_2$  よりも大きな体積比熱を示した。

磁気比熱から磁気エントロピーを求めた。転移温度での磁気エントロピーより、ErNiSi, ErNiGe の比熱のピークは  $R \ln 2$ 、GdNiSi, GdNiGe の比熱のピークは  $R \ln 8$  に起因していると考えられる。Er の置換量が増えるに伴って、比熱のピーク温度付近でのエントロピーは減少する。したがって、基底多重項の縮退数の減少に起因して比熱のピークが小さくなると考えられる。

また、RNiSi, RNiGe 中の Ni は非磁性であるため、磁気秩序を決めるのは RKKY 相互作用であり、磁気転移温度は局在モーメント間距離に依存する。 $Gd_{1-x}Er_xNiSi$ ,  $Gd_{1-y}Er_yNiGe$  においては、イオン半径の異なる  $Gd^{3+}$  と  $Er^{3+}$  がランダムに配列することによる短距離秩序の乱れに起因して、磁気転移温度に分布が生じたことが、比熱のピークがなだらかになった原因であると考えられる。

Fig. 1 Specific heat of  $Gd_{1-x}Er_xNiSi$  and comparison with practical materials<sup>(2)</sup>Fig. 2 Specific heat of  $Gd_{1-y}Er_yNiGe$  and comparison with practical materials<sup>(2)</sup>

## 4. 結言

Gd サイトに Er を  $x, y = 0.1, 0.2, 0.3$  で置換することで磁気転移温度の 10 K 以下への低下を図った。Er の置換量が増えるに伴って、比熱のピーク温度が低下し、 $x \leq 0.1, y \leq 0.1$  は 7 K 以上の温度域で  $HoCu_2$  よりも大きな体積比熱を示した。しかし、Er 置換による基底多重項の縮退数が減少し、結晶的な無秩序性に起因してピークがなだらかになり、体積比熱が小さくなった。

## 参考文献

- (1) P. Lemoine *et al.*, NRC Canadian Neutron Beam Centre Experimental Report, CNBC-2012-SD-7
- (2) 岡村正巳 他, 東芝レビュー, **55** 1 (2000) 64
- (3) N. Morioka *et al.*, Abstracts of CSSJ conference, 2P-p04 (2018) 124

## GGG および Er ドープ YAG による 2 段階断熱消磁冷凍機の開発

## Development of a two-stage ADR with GGG and Er-doped YAG

久志野 彰寛(久留米大);笠井 荘一(コアックス株式会社)

Akihiro KUSHINO (Kurume University); Soichi KASAI (COAX CO. LTD.)

E-mail: kushino@med.kurume-u.ac.jp

## 1. はじめに

放射線取扱施設におけるガンマ線測定等への応用をめざした超伝導検出器の試験, 及びその極低温配線の性能評価のため, 無冷媒の冷凍機を開発している。これまで主に1~9 K 付近での配線の熱伝導測定に用いてきた GGG(ガリウム・ガドリニウム・ガーネット)と GM 冷凍機とを組み合わせた断熱消磁冷凍機(adiabatic demagnetization refrigerator: ADR)に, 新たに単結晶 YAG(イットリウム・アルミニウム・ガーネット), 超伝導マグネット, ヒートスイッチを追加導入することで, 超伝導検出器の動作温度 0.3 K へ向け, 冷凍機の低温化を試みた。

## 2. 冷凍機システム

Table 1 に冷凍機の構成を示す。0.3 K 付近で動作する超伝導検出器の測定を行うため, 従来実験に用いてきた, GGG による 1 段階断熱消磁[1]により得られるおよそ 1 K よりも更に低い温度環境を作り出す, 超伝導マグネット, 磁気作業物質, 2 つの磁気作業物質間の熱スイッチを追加した。2 段階目の ADR に用いる磁気作業物質として, 取扱いの簡便さを優先させ, GGG と同様に安定な単結晶である YAG を用いることとし, その中で著者らにより, 266mK 付近の磁気比熱のピークが報告されている[2]Y の 30% が Er で置換されたものを用いた。熱スイッチとして, 実績のあるヘリウムガス・ギャップ式のスイッチを採用することとした[3]。Fig. 1 に今回開発する 2 段階 ADR の外観を示す。

Table 1 Configuration of present two-stage ADR system

機械式冷凍機コールドヘッド	アルバック・クライオ HE05
機械式冷凍機コンプレッサ	アルバック・クライオ SW404
1 段階磁気作業物質	Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (GGG)
超伝導マグネット (GGG 用)	最大 4T, Cryomagetics, Inc.
3K-GGG 間熱スイッチ	機械式, ジェック東理社
磁気作業物質 (新規導入)	(Er <sub>0.3</sub> Y <sub>0.7</sub> ) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
超伝導マグネット (新規導入)	最大 3T, Cryomagetics, Inc.
GGG-Er:YAG 間熱スイッチ	アクティブ・ガスギャップ式

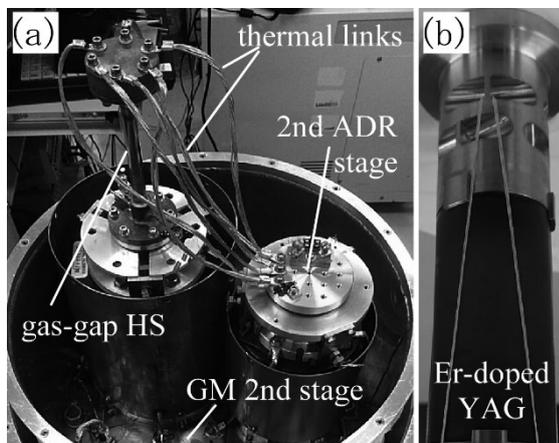


Fig.1 Photograph of present two-stage ADR. (a) two magnets and cold stages connected by an active gas-gap HS and OFC thermal links. (b) 30% Er-doped YAG with 2nd ADR stage.

## 3. 冷却試験

Fig. 2 に, 冷却試験における冷凍機各部の温度変化の様子を示す。新たな冷却ステージおよび磁気作業物質である Er ドープ YAG, 超伝導マグネット, ガスギャップ式ヒートスイッチを導入することにより, GM 冷凍機の 2nd ステージが室温から冷え切るまでの時間は, 導入前の 21~22 時間から 30 時間以上に長くなり, 到達温度は 3.4~3.5 K だったものが 3.6 K と若干上昇した。一方 1 段階目 GGG を断熱消磁後の到達温度は 1.0~1.1 K であり, 2 段階目 ADR の導入前後での顕著な差は見られなかった。

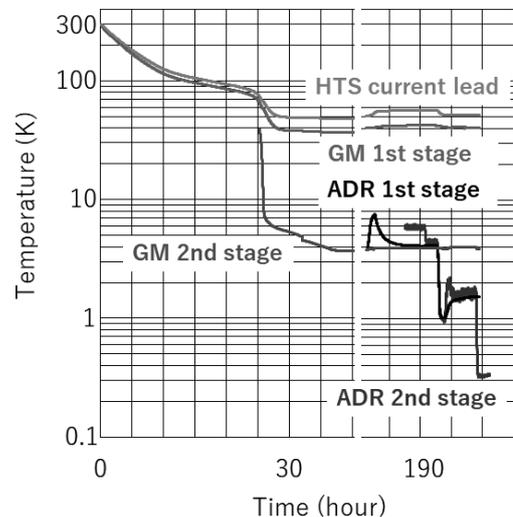


Fig.2 Temperature in the cryostat as a function of time

2 段階目の超伝導マグネットのクエンチのため, 今のところ定格の電流(9A)の半分以下までしか磁場を掛けることができていない。この状態で He ガスギャップヒートスイッチを切り, 2 段階目 ADR の断熱消磁を行ったところ, Er ドープ YAG の最低到達温度は 0.34 K となり, 4 時間足らずで 0.4 K に上昇した。

## 4. 今後の予定

超伝導検出器の動作は 0.34 K で十分可能であるが, 格電流をながした場合での保持時間を見極める必要がある。2 段階目の超伝導マグネットの熱アンカを最適化し, クエンチを起こさずに十分な磁場をかけた状態での最低到達温度とその持続時間を調べ, ガンマ線検出用超伝導検出器の動作実験を進めていく。

## 謝辞

He ガスギャップヒートスイッチを使用させていただいた NASA/GSFC の星野晶夫博士に心より感謝いたします。

## 参考文献

1. A. Kushino, et al.: J. Low Temp. Phys., Vol. 193 (2018) p.611
2. A. Kushino, et al.: J. Appl. Phys., Vol. 90 (2001) p.5812
3. Y. Ishisaki, et al.: J. Low Temp. Phys., Vol. 167 (2012) p.777

# 交流横磁界下における短尺直線状 HTS 線材の交流損失特性の高感度測定

## Highly sensitive measurement of AC loss characteristics of short and straight HTS tapes under transverse magnetic fields

原本 佳人, 富崎 怜, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HARAMOTO Yoshito, TOMISAKI Ren, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k8196162@kadai.jp

### 1. はじめに

HTS 線材を用いた電力ケーブルや変圧器などの実用化のためには、HTS 線材の低損失化及びその損失特性の定量的な把握が重要である。より低損失化を図った HTS 線材の開発のためには、その交流損失特性を測定・評価できるような高感度な測定システムが必要となる。そこで本研究では、見かけの損失であるキャンセル残りを低減し、交流横磁界下における短尺直線状 HTS 線材の交流損失特性の高感度測定が可能な測定システムを開発することを目的としている。本発表では、キャンセル残りの低減を狙った磁界印加用マグネット並びに検出コイルの設計方針、及び実際のキャンセル残りの測定結果と測定感度の検討結果について報告する。

### 2. 交流損失測定法と外部印加磁界用マグネット

本研究では、交流損失測定はピックアップコイル法を用いて行う。Fig. 1 は現有の外部磁界印加用マグネットの外観図と断面図である。楕円形のスプリット型の 2 対のコイル(メインコイルとサブコイル)から成り、直径 0.3 mm の Cu 線の 7 本撚り線を用いて巻線したものである。長さ 100 mm 程度までの短尺直線状サンプルの交流損失を測定できるように、スプリット型マグネットを採用しているため、検出コイル(ピックアップコイルとキャンセルコイル)はマグネット中心に対して非対称な位置に配置される。ピックアップコイルとキャンセルコイルの位置での磁場分布が異なるため、2 つの検出コイルの巻数は異なり、結果として測定 2 次回路での位相誤差に伴うキャンセル残りが発生する。

### 3. キャンセル残りの低減を狙った外部印加磁界用マグネットの設計

そこで、Fig. 2 に示すように、ピックアップコイルとキャンセルコイルを対称配置できるような外部磁界印加用マグネットを設計することで、測定二次回路での位相誤差を低減し、キャンセル残りの低減を図る。Fig. 3 は設計したマグネットの断面図である。中央のコイルとその両側の合計 3 対のコイルから成る。検出コイル位置での磁場一様度は 1.6%以内であり、サンプルへの最大印加磁界は、液体窒素温度 77 K で 0.13 T である。Fig. 4 にマグネット内の磁場分布の計算結果を示す。また、測定可能サンプルサイズは、幅 5 mm × 厚さ 3~5 mm × 長さ 90 mm である。

### 4. 測定二次回路での位相誤差低減によるキャンセル残りの低減について検討

Fig. 4 に示したように、マグネット中心に対して対称に配置されたピックアップコイルとキャンセルコイルの磁場分布は同じである。ピックアップコイルで検出するサンプルの磁化信号と測定空間の信号から、キャンセルコイルにより余分な測定空間の信号を差し引くために、通常はキャンセルコイルの巻数をピックアップコイルの巻数より多くする。しかし、2 つの検出コイルのインダクタンスをできるだけ近づけた方が、キャンセル残りの低減が図れる結果が得られているため、ここではその知見を生かして、2 つの検出コイルの巻数を同じにして、キャンセルコイルの断面積をピックアップコイルのそれより僅かに大きくすることで、測定二次回路での位相誤差を小さくし、キ

ャンセル残りが低減する条件について検討した。今回、作製したマグネットと検出コイルを用いたキャンセル残りの測定結果と測定感度の検討結果については、当日報告する。

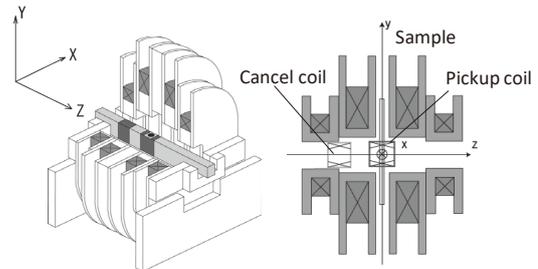


Fig. 1. Schematic view and cross sectional view of existing split-type magnet.

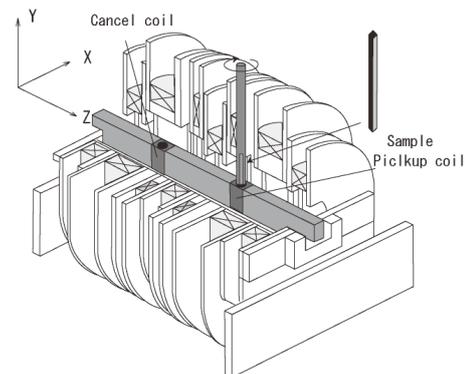


Fig. 2. Schematic view of new split-type magnet.

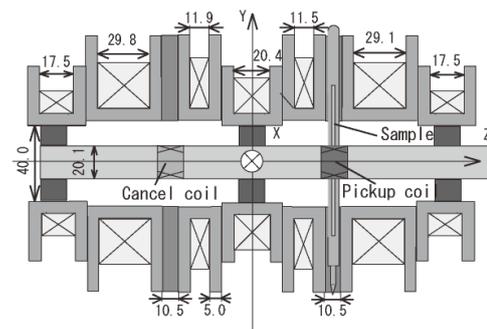


Fig. 3. Cross sectional view of new split-type magnet.

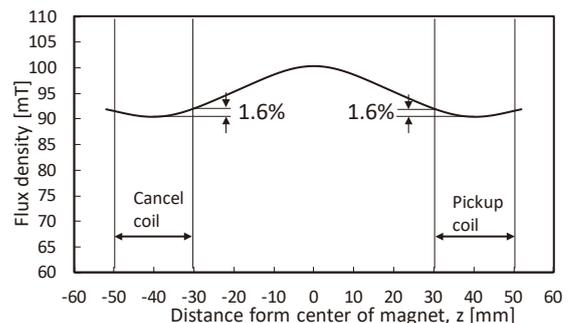


Fig. 4. Field distributions of new split-type magnet.

## 人工ピン導入 REBCO 線材の長手疲労特性

## Longitudinal fatigue characteristics of REBCO coated conductors with artificial pinning centers

武藤 翔吾, 藤田 真司, 平田 渉, 飯島 康裕, 大保 雅載 (フジクラ)

MUTO Shogo, FUJITA Shinji, HIRATA Wataru, IJIMA Yasuhiro, DAIBO Masanori (Fujikura Ltd.)

E-mail: shogo.muto@jp.fujikura.com

## 1. はじめに

現在 REBCO 線材の実用超電導マグネットへの応用開発が活発に行われている。超電導マグネットにおいては励消磁のたびに繰り返しのフープ電磁力が作用し、線材には長手方向の引張応力が繰り返し印加される。マグネットの長期信頼性を確保するためには、実際に線材へ長手方向の繰り返し負荷を与えたときの疲労破壊挙動を把握する必要がある。そこで今回、現在我々が市販している人工ピン導入 50  $\mu\text{m}$  基板厚の REBCO 線材について、液体窒素(LN<sub>2</sub>)中で長手方向の繰り返し引張試験を行い、線材の S-N 曲線を取得した。

## 2. 実験方法

評価に使用した線材は、50  $\mu\text{m}$  厚の Hastelloy®基板上に IBAD-MgO 層を含む中間層と、PLD による EuBCO + BHO 超電導層、Ag 保護層、片側 20  $\mu\text{m}$  厚の銅めっき層を形成した 4 mm 幅の線材(FESC-SCH04)である。この線材の不可逆応力は平均で、約 630 MPa、不可逆ひずみは約 0.43 %である。この線材に最大負荷応力 $\sigma_{max}$ を変化させて LN<sub>2</sub> 浸漬中で繰り返しの引張試験を実施した。引張負荷は油圧式の繰り返し疲労試験機を用いて、応力制御により周波数 1-12 Hz の正弦波を最大約 10<sup>6</sup> 回まで負荷した。このときの最大負荷応力 $\sigma_{max}$ と最小負荷応力 $\sigma_{min}$ の比である応力比( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ )は  $R=0.3$  にて試験を行った。線材のひずみは両面に貼り付けたひずみゲージで測定し、応力は 10 kN のロードセルで測定した試験力を線材の全断面積で除算した値とした。不可逆応力およびひずみの判定は試験前の臨界電流値  $I_{c0}$  と除荷後(unload)の臨界電流  $I_{cu}$  に対する比  $I_{cu}/I_{c0}$  が 99%を下回ったときの値として定義した。

## 3. 実験結果

Fig. 1 に  $R=0.3$  における全サンプルの  $I_{cu}/I_{c0}$  を繰り返回数でプロットしたデータを示す。 $I_c$  が特に高繰り返回数において 1%程度ばらついているように見えているのは、数日におよぶ試験のため気圧変動や酸素の混入によって LN<sub>2</sub> の温度が変動したためであると思われる。高負荷条件(低サイクル疲労領域)では  $I_c$  の劣化がみられたのちに破断している試験片がみられるが、ほとんどの試験片が  $I_c$  の劣化を観測する前に破断していることがわかる。破断面を観察すると、はさみで切断したように一直線に破断しているものが多く、疲労により亀裂が進展して脆性的に破断していることが示唆される。

なお、いくつかの試験片にて電圧端子部近傍で破断する場がみられた。これは応力集中によって早期に破断したものと考えられ、今回は線材の平滑な状態での疲労データを取得することを目的としたため、そのデータプロットはグラフから除いた。

Fig.2 に線材の S-N 曲線を示す。縦軸は最大負荷応力である。打ち切りとした試験片は矢印で示している。黒塗りは  $I_c$  が劣化した点、白抜きは破断点を示している。鎖線はバスキン則でフィッティングした結果である。S-N 曲線にばらつきがあるのは線材の初期強度や、初期欠陥のばらつきが反映されているためであると考えられる。今回試験した条件では、初期強度の約 80%にあたる約 500 MPa で 10<sup>6</sup> 回の繰り返し負荷に耐えられることが分かった。

## 4. まとめ

市販 REBCO 線材の繰り返し疲労特性を評価するため、繰り返しの引張試験を行い、50  $\mu\text{m}$  基板の REBCO 線材の S-N 曲線を取得した。元の強度に対して約 80%の強度で 10<sup>6</sup> 回の引張負荷に耐えることがわかった。今後はさらなる回数の負荷と、応力振幅が大きい負荷を与えたときの挙動を調査して行く予定である。

## 謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

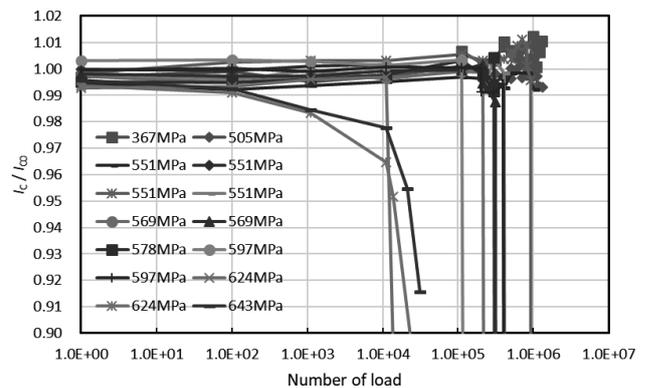


Fig. 1 Cyclic fatigue properties of normalized critical current  $I_{cu} / I_{c0}$  for commercial REBCO conductors with 50  $\mu\text{m}$  substrate of Fujikura at 77.3 K.

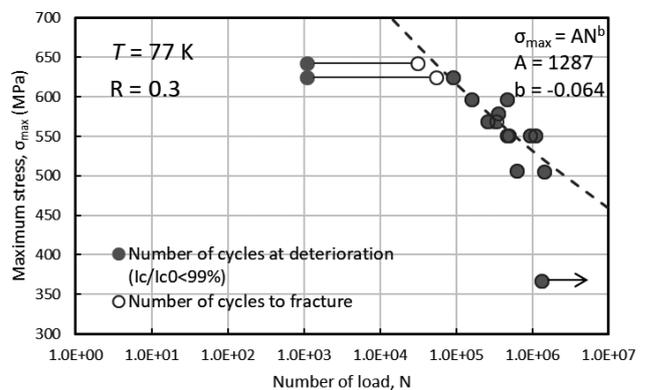


Fig. 2 S-N curve at stress ratio  $R = 0.3$  for commercial REBCO Conductors with 50  $\mu\text{m}$  substrate of Fujikura at 77.3 K.

# 曲げひずみ印加時の REBCO coated conductor の 臨界電流密度の磁場角度依存性

## Angular dependence of critical current density for REBCO coated conductor under various bending strains

畑野 和夫, 小黒 英俊 (東海大); 三浦 正志 (成蹊大); 一野 祐亮 (名古屋大); 神原 陽一 (慶応大)  
HATANO Kazuhiro, OGURO Hidetoshi, (Tokai Univ.);  
MIURA Masashi (Seikei Univ.); ICHINO Yusuke (Nagoya Univ.); KAMIHARA Yoichi (Keio Univ.)  
E-mail: 8BAJM034@cc.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO coated conductor は、磁場中でも高い超伝導特性を維持できること、機械特性が非常に高いことから、強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている。このために、人工ピンニングセンター導入により磁場中  $J_c$  を大きく向上させる研究が進んでいる[1]。

ここで、さらに  $J_c$  を向上させるための一つの方法として、我々はひずみ効果に注目した。REBCO coated conductor の引張りひずみ下での  $J_c$  は放物線状に変化することが知られており[2]、これを利用すると、これまで以上に  $J_c$  を向上させることができる可能性がある。これを実現する方法として、人工ピンが coated conductor の REBCO 層にひずみを与えることがわかっているため[3]、人工ピンを利用してひずみを付与し、超伝導特性を向上させることができると考えられる。

本研究では、REBCO coated conductor に対する超伝導特性のひずみ効果について、ひずみ、磁場、磁場角度の影響に関して詳細に調べるため、曲げひずみを印加した REBCO coated conductor の  $J_c$  に関して、その磁場角度依存性について測定したので、その結果について報告する。

### 2. 実験方法

曲げひずみ下低温磁場中超伝導特性評価装置を Fig. 1 に示す。この装置を用いて、曲げひずみ印加時の超伝導特性の磁場角度依存性を測定した。測定に使用した線材は、フジクラ製 GdBCO coated conductor である。

曲げひずみは以下の式を用いて決定し、超伝導層に発生するひずみは基板表面に発生するひずみと同じであるとして計算した。

$$\text{曲げひずみ} = \frac{\text{基板厚さ}}{\text{曲げ直径}} \times 100$$

曲げひずみ印加ジグは、Ti-6Al-4V 合金を用いた(以下、Ti ジグと表記する)。これは、熱伝導率と熱収縮率を考慮しての選択であり、Ti ジグの方が正確に測定できることから[4]、Ti ジグを用いて 0.4 T 以下において臨界電流の測定を行った。臨界電流は、 $6 \mu\text{V}/\text{cm}$  の電界基準で求めた。磁場はテープ面垂直方向を  $0^\circ$  として印加した。

### 3. 実験結果

曲げひずみを与えた GdBCO coated conductor の臨界電流の磁場角度依存性を、Fig. 2 に示した。Fig. 2 の中で、左上に  $0^\circ$  周辺の  $I_c$  を、右下に  $90^\circ$  付近の測定結果を内挿図として示した。 $0^\circ$  周辺においては 0.2% の曲げひずみを与えた試料が最も  $I_c$  が高く、曲げひずみ 0.5% では臨界電流が低下した。 $90^\circ$  付近では曲げひずみ 0% が最も  $I_c$  高く、

0.2%、0.5% と曲げひずみが大きくなると、臨界電流はひずみとともに低下した。これより、磁場印加角度によって臨界電流とひずみの関係が変化することが確認できた。

当日は磁場角度とひずみの関係を考察した詳細を報告する。

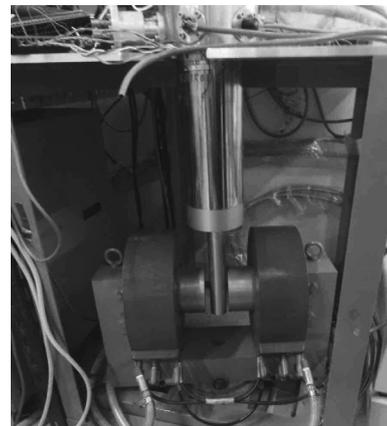


Fig. 1 A measurement apparatus for superconducting properties of REBCO coated conductors at various environments.

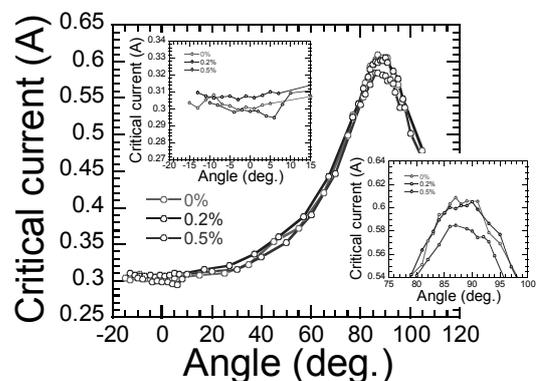


Fig. 2 Angular dependence of critical current for the REBCO coated conductor at 77.3 K and 0.4 T under various bending strains. The insets show the critical current of the conductor in low-angle ( $\sim 0^\circ$ ) and high-angle ( $\sim 90^\circ$ ).

### 謝辞

本研究は科学研究費補助金(17H03239)の助成により実施したものである。

### 参考文献

1. T. Izumi et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 47 (2012) 590
2. M. Sugano et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 085013
3. M. Miura et al., NPG Asia Materials, Vol. 9 (2017) e447
4. H. Oguro et al., J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 97 (2018) 77

# 低コスト化に向けた BaHfO<sub>3</sub> 添加 SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 超伝導線材の高速作製 High speed fabrication of BaHfO<sub>3</sub> doped SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> superconducting coated conductor for cost reduction

吉田 隆, 森 舜介, 日比野 拓, 松坂 陣, 土屋 雄司, 一野 祐亮 (名大); 松本 要 (九工大); 淡路 智 (東北大)  
YOSHIDA Yutaka, MORI Shunsuke, HIBINO Taku, Matsuzaka Jin, TUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke (Nagoya Univ.);  
MATSUMOTO Kaname (KIT); AWAJI Satoshi (Tohoku univ.)  
E-mail: yoshida@nuee.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(RE123, RE = Rare Earth)高温超伝導線材の製造開発に関して、高速化・大面積均質化・高性能化などの観点から多くの研究成果が報告されてきている。例えば、代表的な作製法である Pulsed Laser Deposition(PLD)法では、成膜レートを増加させた場合、*a* 軸混在粒が生成し、超伝導特性が低下する。そこで、我々の研究グループでは基板上に Seed 層として良好な結晶性を示す REBCO 層を作製することで、その上に超伝導特性を維持したまま幅広い条件で Upper 層の REBCO を成膜可能となる REBCO Growth using REBCO Buffer-layer(REGREB)法を提案し [1]、REGREB 法を用いた線材作製速度の向上について報告した。一方、77 K 及び低温での磁場中高性能化の観点からは、BaMO<sub>3</sub> ナノロッドなどの人工ピン材料に代表される成果が報告されている。本研究では成膜速度の高速化、*J<sub>c</sub>* の向上双方の観点から線材作製速度の高速化を目指した。成膜速度の高速化についてはレーザーエネルギー及び酸素分圧を最適化し、成膜基板への原料供給量を増大させることで検討を行った。また、SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(SmBCO)母相内に常伝導不純物である BaHfO<sub>3</sub>(BHO)を導入し、磁場中 *J<sub>c</sub>* の向上について検討した。長尺線材の作製に向けレーザーエネルギー及びブルームの安定性、Ag 安定化層の膜厚、酸素アニール方法について検討した。さらに予備試作として 2 m 級線材の作製を行った。

## 2. 実験方法

KrF エキシマレーザー、Reel to Reel 装置を用いて多層 REGREB 法によって IBAD-MgO テープ上に SmBCO 及び BHO ドープ SmBCO 線材の作製を行った。成膜レートを増大させた線材の作製について、Seed 層は膜厚 60 nm、酸素分圧 53 Pa、線材移動速度 25.2 m/h、繰り返し成膜数 3、レーザーエネルギー密度 2.8 J/cm<sup>2</sup>、繰り返し周波数 100 Hz、Upper 層を膜厚 400 - 900 nm、酸素分圧 53 - 200 Pa、線材送り速度 25.2 m/h、繰り返し成膜数 6、レーザーエネ

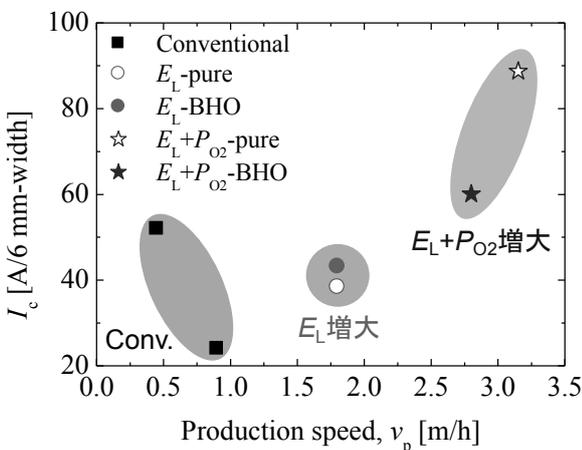


Fig. さまざまな作製条件で作製した BHO 添加線材の製造速度と *I<sub>c</sub>* の関係

ルギー密度 3.0 J/cm<sup>2</sup>、レーザー繰り返し周波数 100 Hz とした。線材膜厚は誘導結合プラズマ発光分析法、結晶構造は X 線回折、超伝導特性は 4 端子法を用いて評価した。

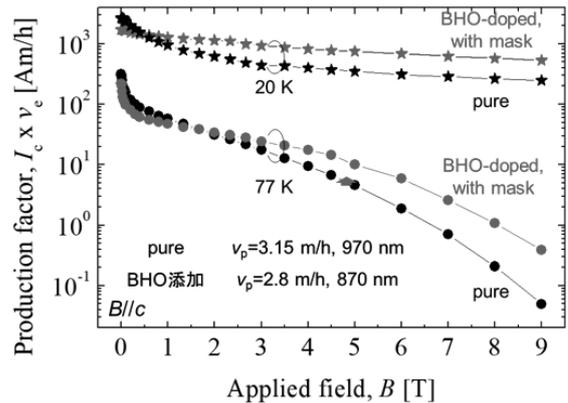


Fig. pure 及びマスクを用いて作製した BHO 添加線材の製造係数の磁場依存性

## 3. 実験結果及び考察

左図にさまざまな成膜条件で作製した場合の BHO 添加 SmBCO 線材の製造速度(m/h)と 77 K における *I<sub>c</sub>*(A/6mm-width)を示す。なお、図中 *E<sub>L</sub>* はレーザーエネルギーのことである。これまで検討してきた成膜条件にくらべレーザーエネルギーの向上や酸素分圧の増大により、製造速度の向上及び *J<sub>c</sub>* が向上することが確認される。

また、成膜時に成膜領域をマスクを用いて一部制限した。上図は、人工ピンを入れていない SmBCO 線材とマスクを用いて BHO 添加した線材の磁場中 *J<sub>c</sub>* 特性から求めた製造係数(*J<sub>c</sub>* × *v<sub>p</sub>* [Am/h])を示す。高温高磁場及び低温においては約二倍程度を示しており、人工ピン導入線材が線材作製速度の観点からも有効であることが確認された。

上記検討を踏まえて、Ag 安定化層の膜厚、酸素アニール方法について検討した。特に Ag 安定化層成膜技術は、スパッタ法とともに、RTR-PLD 法技術を構築してきた。成膜方法の違いや膜厚の違いによる、表面組織などの比較も検討した。さらに予備試作として 2 m 級線材作製を行ったので、当日詳細を報告する。

## 謝辞

研究の一部は、JST-ALCA を受けて実施したものである。本研究では、株式会社フジクラ飯島康裕様より金属テープに関して御協力を得た。

## 参考文献

1. 後藤大志他: 第 94 回低温工学・超伝導学会、東京、2018 年 5 月。

# RE 組成制御を施した YBCO 薄膜の磁場中超伝導特性の異方性と微細構造

## Anisotropy of Superconducting Properties in Magnetic Field and Microstructure of YBCO Film with controlled RE composition

吉田 隆, 塩見 基樹, 土屋 雄司, 一野 祐亮 (名大)

YOSHIDA Yutaka, SHIOMI Motoki, TUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke (Nagoya Univ.)

E-mail: yoshida@nuce.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE = Rare Earth) 超伝導体は高い臨界温度を有することから様々な機器に応用が期待されているが、超伝導コイルのような機器内中の超伝導線材にはあらゆる方向の磁場が印加されている。

液体窒素の過冷却温度 (65 K) 下における機器応用のため、磁場中  $J_c$  の異方性改善を目的として、異なる基板温度および異なる Y 組成を持った Y<sub>1-x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (Y<sub>1-x</sub>BCO) 薄膜を作製し、 $x$  が磁場中  $J_c$  特性へ与える影響について検討してきた。また Y の組成を増加させた Y<sub>1-x</sub>BCO 薄膜を作製し Y リッチなナノパーティクルを磁束ピン止め点として導入することで磁場中  $J_c$  の異方性改善を目的とし成膜条件が薄膜内のパーティクルに及ぼす影響について検討しそれらの微細構造制御を行った。

本研究では超伝導薄膜内でナノパーティクルを形成する材料の一つである RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に着目した。REBCO 超伝導体は RE の種類によって質量や融点など物性が変化する。また、Gd や Sm のような RE/Ba 置換をしやすい RE 元素は固溶体を形成する。この固溶体は化学量論組成の REBCO に比べ低い  $T_c$  になり、なおかつ超伝導体内で球状になることから 3 次元 APC として機能することが分かっている。このように物性の違う異種の RE から成る REBCO と RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の組み合わせによる微細構造と超伝導特性の変化は大変興味を持たれる。そこで、RE/Ba 置換を起こさない YBCO 薄膜と、RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> として少量の RE/Ba 置換をする Gd を含んだ Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いることで、置換量の制御を容易にしつつ薄膜内の微細構造も制御することで、磁場中  $J_c$  の異方性改善を目的に、これらの薄膜の結晶性や超伝導特性について評価を行った。

### 2. 実験方法

YBCO 薄膜は、IBAD-MgO 基板上にパルスレーザー蒸着法 (PLD) で作製した。基板温度  $T_s = 820 - 860^\circ\text{C}$ 、酸素分圧  $P_{O_2} = 800 \text{ mTorr}$ 、レーザー繰り返し周波数  $f_L = 5, 20 \text{ Hz}$ 、ターゲット基板間距離  $d_{t-s} = 40 \text{ mm}$  で作製した。磁場中特性の評価は  $J_c$  の磁場印加角度依存性 ( $J_c - B - \theta$ ) を測定し、パーティクル状の APC 材料のサイズに関しては、 $J_c - T$  特性によって評価した。なお、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は、表面修飾ターゲット法<sup>1)</sup>を用いて YBCO 中に導入した。膜厚は誘導結合プラズマ発光分析法、結晶構造は X 線回折、超伝導特性は 4 端子法を用いて評価した。

### 3. 実験結果及び考察

Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の修飾面積比  $\alpha = 20 \text{ area\%}$  以上で作製した YBCO 薄膜は無添加 YBCO 薄膜と比較して  $T_c$  が 1 K 以上低下することが確認された。これは Gd の過剰添加により Gd/Ba 置換が多く起こり  $T_c$  が低下したためと考えられ、その置換による低  $T_c$  部分の生成により  $J_c^{s.f.}$  の低下も引き起こされた。

図 1 に異なる  $\alpha$  で作製した YBCO 薄膜の 65K、1T における磁場中  $J_c - B - \theta$  特性を示す。 $J_c$  の異方性を示す  $J_c^{\text{min}}$  については 65 K での  $J_c - B - \theta$  特性において  $\alpha = 15 \text{ area\%}$  で作製した Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加 YBCO 薄膜は  $\alpha = 0 \sim 25 \text{ area\%}$  で作製した YBCO 薄膜の中で最も高い結果となった。

$J_c - B - \theta$  曲線形状からは  $\alpha = 15 \sim 25 \text{ area\%}$  での薄膜においてナノパーティクル導入が示唆されたがナノパーティクル形状については  $\alpha$  に対しての傾向を見出すことはできなかった。

図 2 に異なる  $f_L$  で作製した YBCO 薄膜の 65K、1T における磁場中  $J_c - B - \theta$  特性を示す。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加 YBCO 薄膜内のナノパーティクルを高密度にするために  $f_L = 5 \text{ Hz}$  と成膜速度を低下させて  $\alpha = 15 \text{ area\%}$  で Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加 YBCO 薄膜を作製したところ  $f_L = 20 \text{ Hz}$  で作製した薄膜に比べて  $J_c^{\text{min}}$  の向上を示した。さらに、 $J_c - B - \theta$  曲線形状からは  $f_L = 5 \text{ Hz}$  は  $f_L = 20 \text{ Hz}$  に比べて小さく高密度なナノパーティクルが導入されていることが示された。

以上のことから Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加 YBCO 薄膜は  $J_c^{\text{min}}$  が向上することが示された。異種の RE を持った RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> も薄膜内のナノパーティクルになることが示されるとともに、有効なナノパーティクル APC として磁場中  $J_c$  異方性改善に寄与することも示された。

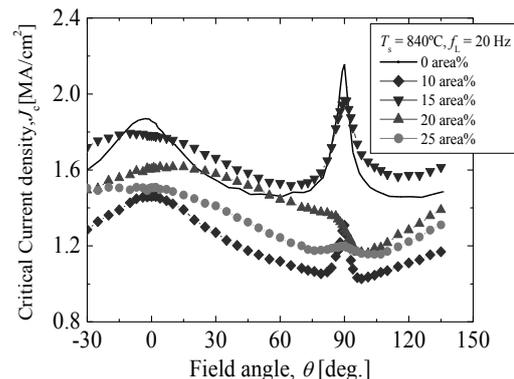


図 1 異なる修飾面積  $\alpha$  で作製した YBCO 薄膜の 65K、1T における磁場中  $J_c - B - \theta$  特性

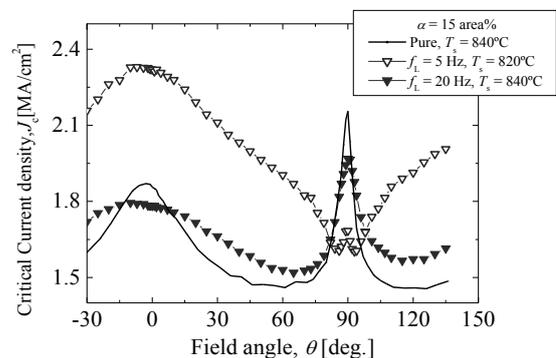


図 2 異なる  $f_L$  で作製した YBCO 薄膜の 65K、1T における磁場中  $J_c - B - \theta$  特性

### 謝辞

研究の一部は、JST-ALCA 助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

1) Alok K. Jha, Journal of Applied Physics **122**, (2017) 093905

# 低コスト REBCO 線材用 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ 導電性バッファ層の検討

## Investigation of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ conductive buffer layer for low-cost REBCO wires

太田 圭祐, 濱田 剛 (京大); 一瀬 中 (電中研); 堀井 滋, 土井 俊哉 (京大)

OTA Keisuke, HAMADA Tsuyoshi (Kyoto Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI);

HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ.)

E-mail: ota.keisuke.48x@st.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は低コスト YBCO 線材の開発を目的に、 $\{100\}\langle 001 \rangle$  集合組織を有する Ni めっき Cu テープ (Ni / Cu / SUS) 上に導電性を有するバッファ層を介して YBCO をエピタキシャル成長させる線材構造に着目している。この線材構造では、YBCO 層の一部で超伝導状態が破れた際、YBCO 層を流れる電流は導電性バッファ層を通して安定化層と基材を兼ねた Cu テープに回避することが可能である。当研究室ではこれまでに、導電性バッファ層として  $\text{SrTi}_{0.95}\text{Nb}_{0.05}\text{O}_3$  (Nb-STO) を用いた YBCO / Nb-STO / Ni / Cu / SUS 試料を作製し、 $2.6 \text{ MA cm}^{-2}$  (77 K、自己磁場中) の臨界電流密度 ( $J_c$ ) が得られた事を報告した[1]。また、臨界電流 ( $I_c$ ) を超えた場合、一部の電流が Cu に回避することを示した[2]。

しかし、導電性バッファ層として用いた Nb-STO は YBCO 層から Cu テープへの酸素拡散の防止能力が十分ではなく、YBCO の成膜中に Nb-STO 層の電気抵抗率が上昇してしまうことが課題として残っている[2]。そこで、本研究では  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$  (La-STO) を導電性バッファ層として用いることでこの課題の解決を試みた。Ni / Cu / SUS 上に La-STO 層及び YBCO 層を作製し、それらの配向度、電気抵抗率、 $I$ - $V$  特性および微細組織を調べた。

### 2. 実験方法

La-STO 薄膜及び YBCO 薄膜の成膜には PLD 法を用いた。La-STO 薄膜は Ni / Cu / SUS304 テープ上及び  $\text{LaAlO}_3$  単結晶基板上に成膜した。YBCO 薄膜は Ni / Cu / SUS 上に成膜した La-STO 薄膜の上にさらに成膜を行った。これらの薄膜の微細組織の観察は SEM を用いて行い、配向度の測定は X 線極点図測定により行った。電気抵抗率及び  $I$ - $V$  特性の測定には四端子法を用いた。なお、La-STO 薄膜の抵抗率測定は  $\text{LaAlO}_3$  単結晶基板上に成膜した試料にて行った。

### 3. 結果及び考察

$\text{LaAlO}_3$  単結晶基板上に成膜した La-STO 薄膜の抵抗率は 77K で  $1.34 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$  であった。Fig. 1 (a) に Ni / Cu / SUS 上 La-STO 薄膜の  $\{110\}$  極点図、(b) に La-STO / Ni / Cu / SUS 上 YBCO 薄膜の  $(102)$  極点図を示す。いずれの膜も 2

軸配向することが分かった。しかし、この YBCO 薄膜の  $J_c$  を測定したところ、 $J_c = 3.5 \times 10^2 \text{ A cm}^{-2}$  と、YBCO / Nb-STO / Ni / Cu / SUS 試料の  $J_c$  と比べ著しく低い値であった。この原因を調べるため、SEM を用いて作製した試料の断面を観察した。結果を Fig. 2 に示す。Ni 層に多数の空隙が存在することが確認された。これは Ni が YBCO 薄膜に拡散していることを意味し、強磁性元素である Ni の拡散が YBCO の超伝導特性が低下した原因であると考えられる。

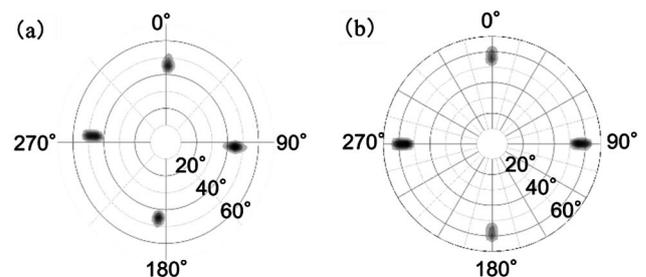


Fig. 1 (a) A  $\{110\}$  pole figure of the La-STO thin film and (b) a  $(102)$  pole figure of the YBCO thin film.

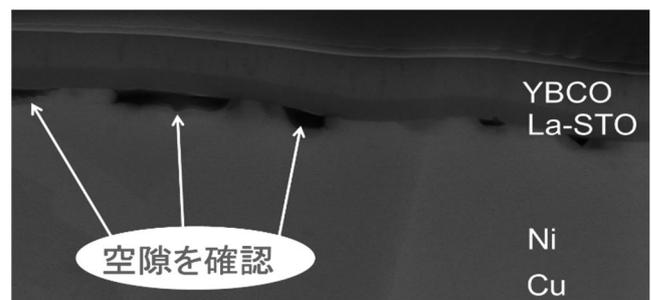


Fig. 2 A cross-sectional observation result of the YBCO / La-STO / Ni / Cu / SUS sample.

### 謝辞

本研究の一部は JST-ALCA、JPMJAL1109 の支援を受けたものである。

### 参考文献

- [1] T. Doi et al., Master. Trans. **58** (2017) 1493.  
 [2] T. Doi et al., APEX **12** (2019) 023010.

# REBCO 線材の超伝導接続部への Ag テープを通しての酸素供給の検討

## Investigation of oxygen supply through Ag tape to superconducting joint between REBCO wires

吉岡 雄太, 土井 俊哉, 堀井 滋(京大); 吉原 健彦, 永石 竜起(住電); 下山 淳一(青学大)

YOSHIOKA Yuta, DOI Toshiya, HORII Shigeru (Kyoto Univ.);

YOSHIHARA Tatsuhiko, NAGAISHI Tatsuoki (SEI); SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail:yoshioka\_yuta.44a@st.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は高性能かつ短時間で REBCO 超伝導線材同士を接続するための方法として、金属基材部分に酸素透過性の高い Ag を用いた REBCO 線材を使用することを検討している。現在の REBCO 超伝導線材の接続方法は、まず、REBCO 層を露出させた超伝導線材同士を REBCO 層が向かい合わせになるように配置し、その状態のまま接続部を加压しながら 800°C で熱処理することにより、線材同士を接続している[1]。しかし、800°C の熱処理の際に REBCO 層中の酸素が抜けてしまい超伝導性が失われてしまうため、500~200°C で酸素アニールを行い REBCO 層中に酸素を導入している。従来の接続方法では接続後、REBCO 層が露出している部分は側面部のみであるため、酸素は線材側面から侵入し、内部まで拡散して REBCO 層内部まで到達する必要がある。そのため、接続後の酸素アニールに長時間必要である。この酸素アニール工程を短時間化するために REBCO 層に酸素を効果的に供給する為に、酸素をよく通す物質である Ag を使用することを考えている。そこで今回、Ag の酸素透過性について検討を行った。

### 2. 実験方法

本実験では超伝導線材として住友電気工業(株)製の Ag/GdBCO/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni/Cu/SUS テープ(以後 GdBCO 超伝導線材と略記)を使用した。まず、GdBCO 超伝導線材を Ar 気流中で 750°C × 4 h の熱処理を行って GdBCO 層中から十分酸素を抜いた試料 1(Ag 層 1.5 μm)を作製した。その後、試料 1 に対して、Ag 層を 30 μm スパッタリングにより追加で堆積させた試料 2、および 80 μm の SUS304 テープを Ag 層上に接着した試料 3 を作製した。これらの試料 1~3 を酸素気流中で 500°C まで昇温後 200°C まで 10 h かけて冷却して酸素導入を試みた(試料 1A、2A、3A)。また、試料 3A については磁化率の温度依存性測定後に追加で 400°C × 35 h の酸素アニールを行った(試料 3B)。

### 3. 結果及び考察

Fig. 1 に、試料 1A(実線)、2A(破線)、3A(点線)、3B(一点鎖線)の磁化率の温度依存性を示す。試料 3A は超伝導転移を示さなかった。ここで、試料 3A に追加で 400°C × 35 h の酸素アニールを施した試料 3B では、超伝導転移が確認

でき、 $T_c$  の値は 92.1 K であった。このことから SUS304 テープを接着した際に超伝導相を壊したわけではなく、SUS304 を貼り付けた試料では酸素導入に長時間を必要とすることがわかる。

一方、試料 2A の  $T_c$  は 90.5 K であった。この結果は 31.5 μm とかなり厚い Ag 層を介しても十分に速い速度で酸素が拡散していることを示している。また試料 1A の  $T_c$  は 91.6 K であった。Ag の膜厚による  $T_c$  の違いは小さいことから、Ag 中の酸素拡散は非常に速いことが確認できた。

以上の結果から、接続部分に Ag を用いることで酸素アニール時間を短縮できる可能性があることが分かった。

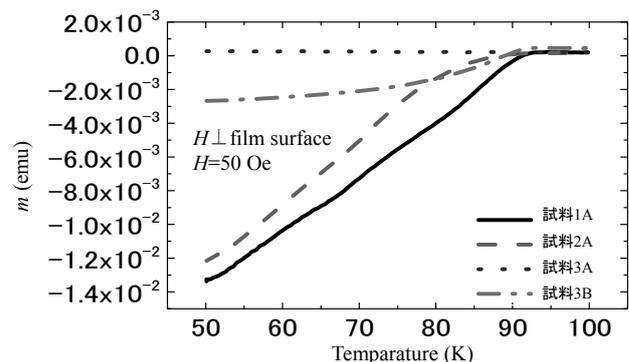


Fig. 1 Temperature dependence of the magnetic moment of the samples 1A, 2A, 3A, and 3B.

### 謝辞

本研究の一部は、JST、未来社会創業事業、JPMJMI17A2 の支援を受けたものである。

### 参考文献

- [1] K. Ohki et al., Supercond. Sci. Technol. **30**(2017) 115017.

# REBCO 線材の臨界電流におけるピン配置依存性の基礎評価

## Fundamental analysis of the dependence of pinning center distribution on the critical current of REBCO tapes

山本 春海, 伊藤 悟, 三輪 美沙子, 松山 成男, 橋爪 秀利 (東北大)

YAMAMOTO Haruumi, ITO Satoshi, MIWA Misako, MATSUYAMA Shigeo, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: haruumi.yamamoto.s1@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

現在実用化が進められている REBCO 線材は、人工ピン導入により外部磁場下での臨界電流向上が確認されている[1]。一方で自己磁場下における人工ピンの効果を調査した研究においては、臨界電流の向上は確認されていない[2]。これは REBCO 線材の超伝導部の厚さが約 1  $\mu\text{m}$  と薄く、磁場侵入長( $\lambda_L$ ~数百 nm)と同程度のオーダーであるため、マイスナー電流が渦糸の作る電流と比較して支配的であることによることによる可能性が示唆されている[3]。すなわち自己磁場下における人工ピンは外部磁場下ほど強力に機能しない可能性がある。本研究では不均一な人工ピン配置により自己磁場下における臨界電流が向上するという考えに基づき、不均一に陽子線照射を行った REBCO 線材の臨界電流評価を行ったので報告する。

### 2. 実験方法

サンプルとして人工ピンが導入されていない銅安定化層なし REBCO 線材 (SuperOx, ST-4-10, 幅 4 mm) を用いた。各サンプルの臨界電流を評価したのちに人工ピン導入のための陽子線照射を行い、再度臨界電流を評価した。

臨界電流評価は、液体窒素 (77 K) 浸漬冷却、自己磁場条件下で、4 端子法によって行った (電界基準 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ )。

照射は東北大学高速中性子実験室のダイナミトロン加速器にて実施し、照射粒子として 3 MeV のプロトン化水素分子 ( $\text{H}_3^+$ ) を用いた。3 MeV の  $\text{H}_3^+$  1 つは 1 MeV の  $\text{H}^+$  3 つに相当する。

サンプルへの陽子線照射実験体系を Fig. 1 に示す。人工ピンを導入する位置を制御するために、サンプルの一部を銅リボンによりマスキングした。照射パターンは全面 (4 mm)、外側 (端 1 mm ずつ)、内側 (中央 2 mm) の 3 通り用意した。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 に臨界電流の照射領域依存性を示す。REBCO 線材の性能変化を照射後の臨界電流を照射前の臨界電流で規格化した値 ( $I_c/I_{c0}$ ) で評価している。全面、内側、外側いずれの照射パターンにおいても有意な臨界電流の上昇は見られなかった。これは 1. で述べたように自己磁場下における REBCO 線材には磁束量子線が侵入しにくく、微細な欠陥によるピン止め効果が弱いため、あるいは磁束量子線の熱運動が大きくピン止め効果が弱いと推測される。よって照射によって生じる微細欠陥はピンとしての働きより電流輸送断面積を減らす働きの方が強く、臨界電流低下を招いた可能性がある。外側のみに照射した場合が最も臨界電流低下が少ない傾向を得た。これは線材外側における REBCO 結晶の c 軸方向の磁束をうまくトラップし、線材中央のマイスナー電流による電流輸送を阻害しないピン配置による可能性がある。より低温では磁束線の熱運動が小さくなるためピンの働きが改善し、外側のみの照射が臨界電流向上に有利であることが示される可能性がある。

### 4. まとめ

本研究では自己磁場下における REBCO 線材のピン止めのメカニズムを調査するため、実験により臨界電流のピン位置依存性を評価した。その結果ピンを部分的に導入した場合に性能低下が小さいことが示された。より低温ではピン止め効果が顕著になるため、部分的なピン導入により臨界電流向上が見られる可能性がある。

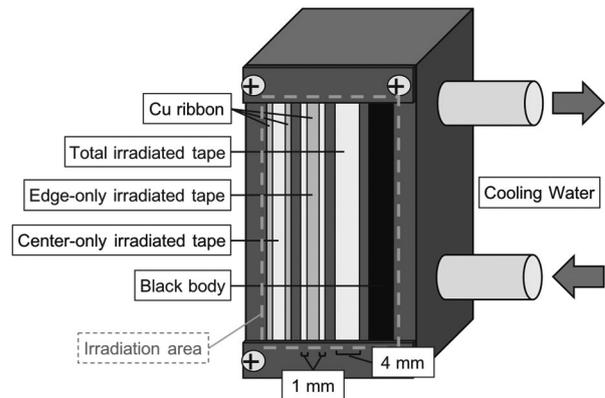


Fig. 1 Configuration of the proton irradiation

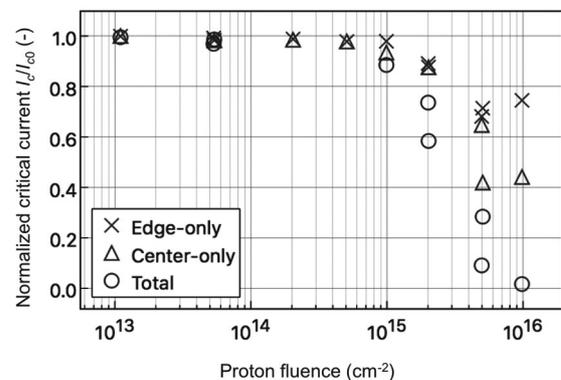


Fig. 2 Dependence of irradiation area on the critical current of REBCO tapes

### 謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費助成事業 (基盤研究 (S) 26220913) の助成を受けて実施されたものである。

### 参考文献

1. M. Eisterer et al., Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 014009
2. L. Antonova et al., Phys. Status Solidi C 12 (2015) pp. 94- 97
3. E. F. Talantsev et al., Nature Scientific Reports 8 (2018) 171

# SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 高温超伝導薄膜における磁化緩和の異方性

## Angular Dependence of Flux Creep in High-Temperature Superconducting REBCO Films

土屋雄司(名大);船木修平(島根大);尾崎壽紀(関学);木内勝(九工大);一野祐亮, 吉田隆(名大)  
 TSUCHIYA Yuji (Nagoya Univ.);FUNAKI Shuhei (Shimane Univ.);OZAKI Toshinori (Kwansei Gakuin Univ.);  
 KIUCHI Masaru (Kyushu Institute of Technology);ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)  
 E-mail: tsuchiya@nuee.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 高温超伝導線材は、高い  $T_c$  と磁場中での高い臨界電流密度  $J_c$  を有するため、次世代電力機器への応用が期待されている。一方、マグネット応用において REBCO 線材の形状に起因した大きな磁化による不整磁場が問題となる。この遮蔽電流による磁化は、磁束クリープによって時間経過にともない減衰し、磁場の時間不安定性を生じる。よって、REBCO 線材のマグネット応用では、磁場ドリフトを予測するため磁化緩和が重要である。

いままで我々のグループでは、REBCO 薄膜への相関性のある APC 添加による磁化緩和の抑制について報告してきた[1]。しかし、マグネット応用において REBCO 線材にあらゆる方向から磁場が印加されるのに対し、磁化緩和の磁場印加角度依存性について報告が少ない。そこで本研究では、REBCO 薄膜における磁化緩和の磁場印加角度について調べるため、薄膜垂直方向以外への磁場下での磁化率測定手法の確立および広い磁場温度および磁場印加角度範囲で磁化緩和特性の測定を行なった。

### 2. 実験方法

PLD 法を用いて IBAD 基板の上に 300 nm 厚の SmBCO 薄膜を作製した。薄膜を約 2 mm 角に加工し、DC スパッタリングを用いて Ag 保護層を成膜した。カンタムデザイン社 MPMS を用いて 0-7 T、10-77 K における磁化ヒステリシスおよび磁化の時間依存性を測定した。試料への印加磁場方向を変更するため、3D プリンターを用いての角度を制御したステージを有する PLA 製の試料ホルダーを作製した。作製した試料ホルダーを用いて、 $c$  軸方向からの磁場角度  $\theta$  を、0°、15°、30°、45°、60° と変化させて磁化測定をおこなった。磁化ヒステリシスから  $J_c$  を、磁化緩和特性から規格化磁化緩和率  $S = d \ln M / d \ln t$  を評価した。このとき、磁化  $M$  は薄膜垂直方向に向いていると仮定し、磁化を補正した。

### 3. 実験結果および考察

図 1(a), (b) および (c) に、 $\theta = 0^\circ$ 、 $45^\circ$  および  $60^\circ$  に磁場を印加したときの SmBCO 薄膜における  $S$  の磁場温度依存性を示す。すべての図において同じカラースケールを用いた。 $\theta = 0^\circ$  では、高温、低磁場ほど  $S$  が増加した。 $\theta = 45^\circ$  では、低磁場ほど  $S$  が増加した。 $\theta = 60^\circ$  では、高磁場、高温ほど  $S$  が減少した。

この結果から、REBCO 薄膜における磁化緩和は磁場印加角度に依存し、高温かつ磁場中ほど磁場印加角度依存性が大きいことが明らかになった。特に、65 K、1 T では、磁場を傾けると  $S$  は 70% 以上抑制された。

今後、APC を導入した REBCO 薄膜での磁化緩和の角度依存性について測定予定である。本講演では、REBCO 薄膜における磁化緩和の角度依存性の起源と磁化の角度依存性測定手法について議論する。

### 謝辞

本研究は、科研費(15H04252,16K20898)、JST-ALCA の助成を受けて実施した。産総研 和泉輝郎氏からテープ基板の提供を受けた。

### 参考文献

[1] Y. Tsuchiya *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2018) p.8.

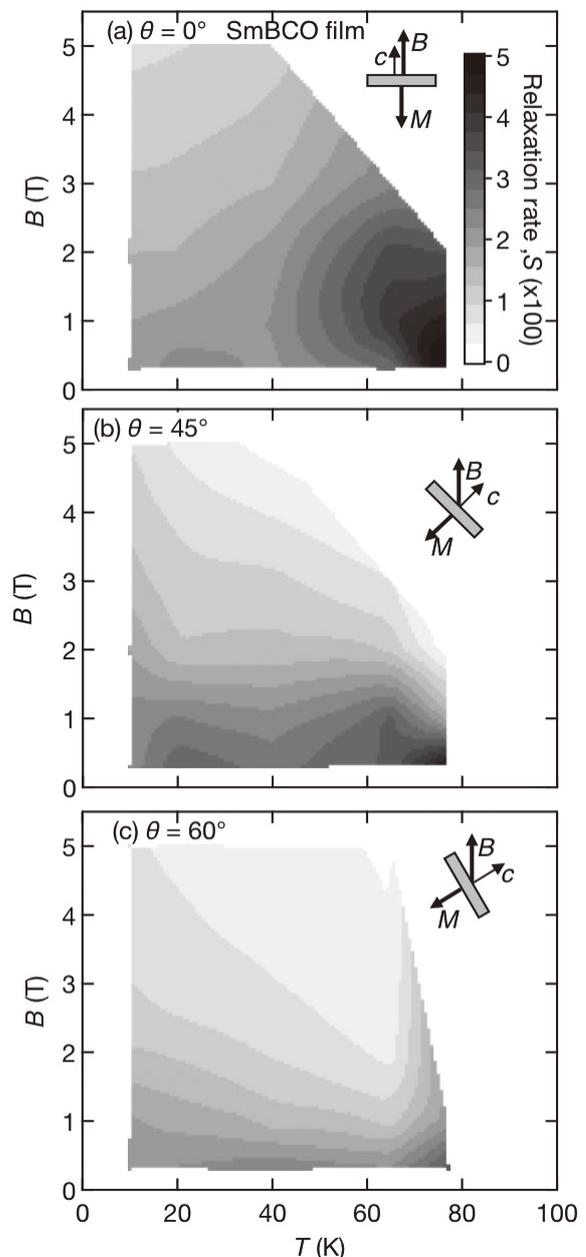


Fig. 1 Field and temperature mappings of the magnetization relaxation rate  $S$  in SmBCO films with the magnetic field along (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , and (c)  $60^\circ$  directions from the  $c$ -axis.

# 1 T 級高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイルの開発 —複合ひずみ効果に基づいたヘリカル巻線張力の検証—

Development of a 1-T Class HTS Force-Balanced Helical Coils: Verification of Helically Winding Tension Based on Complex Bending Strain Effects

鎌田 太陽, ニノ宮 晃, 野村 新一 (明治大); 谷貝 剛 (上智大); 中村 武恒 (京大); 力石 浩孝 (NIFS)

KAMADA Hiroharu, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.);

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); CHIKARAISHI Hirotaka (NIFS)

E-mail: kamada@meiji.ac.jp

## 1 はじめに

大規模 SMES では貯蔵エネルギーの増加に伴い電磁力が大きくなるため、効率的な巻線支持構造が重要となる。電磁力平衡ヘリカルコイル (以下, FBC) はピリアル定理に基づき、磁気エネルギー貯蔵に必要な引張応力のみが生じるよう電磁力を均衡させ、支持構造材を大幅に低減できるコイル形状である [1]。著者らは引張強度に優れた Hastelloy 基板の REBCO 線材を FBC へ適用することで、SMES 用超電導コイルの軽量化を目指した 1 T 級高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイル (以下, HTS-FBC) を開発を進めている。

一方で、REBCO 線材の  $I_c$  にはひずみ依存性があり、それは可逆領域と不可逆領域に分けられる [2][3]。HTS-FBC では REBCO 線材に引張応力を負担させることで巻線支持構造材の低減を図るため、形状、製作、冷却および電磁力により REBCO 線材が経験するひずみを  $I_c$  低下の可逆領域に収める必要がある。ここでは開発に用いる REBCO 線材の可逆限界ひずみ ( $I_c$  初期値に対してひずみ除荷後の  $I_c$  が 1% 以上低下したときのひずみ) [3]、ヘリカル形状で生じる複合曲げの線材長手方向軸ひずみ分布とピリアル定理から算出した最大発生応力をもとに印加可能な最大巻線張力について検討した結果を報告する。

## 2 HTS-FBC の最大発生応力と引張ひずみ

超電導コイルにおけるピリアル定理より、電磁力支持構造材の質量  $M_{\text{sup}}$  は、磁気エネルギー  $E$  貯蔵時の最大発生応力  $\sigma_{\text{max}}$  と密度  $\rho_{\text{sup}}$  を用いて次式で表される [4]。

$$M_{\text{sup}} = Q_{\text{max}} \frac{\rho_{\text{sup}} E}{\sigma_{\text{max}}} \quad (1)$$

ここで  $Q_{\text{max}}$  は磁気エネルギーと構造材体積で規格化された最大応力の規格化平均応力で、FBC では  $Q_{\text{max}} = 0.5$  である [1]。

超電導導体の質量は、その導体のアンペア・メートル (通電電流  $I \times$  導体長  $S$ ) に比例する [5]。ここで REBCO 線材単線を導体とみなし、発生応力は Hastelloy 基板で負担すると仮定すれば、構造材すなわち Hastelloy 基板の質量  $M_{\text{sup}}$  は REBCO 線材に対する Hastelloy 基板の体積比  $\gamma$  を用いて次式で与えられる。

$$M_{\text{sup}} = \rho_{\text{sup}} \gamma \frac{IS}{J_{\text{op}}} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_{\text{sup}}$  は Hastelloy 基板の密度を指し、 $J_{\text{op}}$  は導体オーバーオール運転電流密度である。体積比  $\gamma$  は導体長と幅が共通ゆえ線材厚み (0.16 mm) と Hastelloy 基板厚み (75  $\mu\text{m}$ ) の比と同値であり、 $\gamma = 0.47$  となる。HTS-FBC の設計値に基づく 4.2 K で 1 T 発生するために要する通電電流は  $I = 1000$  A、総導体長は  $S = 108$  m で、このとき  $J_{\text{op}} = 1.25 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup> および  $E = 1.2$  kJ であ

る [6]。したがって、式 (1) と式 (2) から所定の磁気エネルギーを貯えた際の最大発生応力は

$$\sigma_{\text{max}} = 14.8 \text{ MPa} \quad (3)$$

と見積もられる。Hastelloy 基板の 4 K 下におけるヤング率は 210 GPa 程度 [7] あるため、 $\sigma_{\text{max}}$  により生じる引張ひずみは  $\varepsilon_t = 0.007\%$  程度と推計される

## 3 ヘリカル巻線張力の検討

REBCO 線材は低温になるほどひずみ感度が鈍化するため [8]、4 K 下の可逆限界ひずみは 77 K 下に比べ大きくなると考えられる。以下では暫定的に 77 K 下での可逆限界ひずみをもとに検討を進める。ヘリカル形状に起因した複合曲げで超電導層が経験する線材長手方向軸ひずみは最大で  $\varepsilon_{\text{bend}} = 0.240\%$  と推計され [6]、使用する REBCO 線材の 77 K における可逆限界ひずみは  $\varepsilon_{\text{limit}} = 0.280\%$  程度である [3]。所定の磁気エネルギーを蓄積した際に生じる引張ひずみを  $\varepsilon_t = 0.007\%$  とすれば、ヘリカル巻線時の張力により印加できる最大引張ひずみ  $\varepsilon_{\text{wt}}$  は

$$\varepsilon_{\text{wt}} \leq \varepsilon_{\text{limit}} - (\varepsilon_{\text{bend}} + \varepsilon_t) = 0.033\% \quad (4)$$

巻線する室温下において REBCO 線材のヤング率  $E_{\text{RT}}$  は 168 GPa 程度で [7]、REBCO 線材の全体の断面積  $A = 8.0 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup> ゆえ、式 (4) より最大巻線張力  $F_{\text{wt}}$  は

$$F_{\text{wt}} \leq A \cdot \sigma_{\text{wt}} = A \cdot E_{\text{RT}} \cdot \varepsilon_{\text{wt}} = 44 \text{ N} \quad (5)$$

と考えられる。したがって REBCO 線材の機械強度で電磁力を負担する場合、ヘリカル巻線張力は最大で 44 N (55 MPa) が限度だと明らかになった。講演ではこの検討が妥当か実験的に調査した結果も報告する。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費助成事業 (基盤研究 (B) 16H04321) の助成を受けて実施されたものである。

## 参考文献

1. S. Nomura *et al.*: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 14, no. 2, pp. 709-712, Jun. 2004
2. M. Sugano *et al.*: *Physica C* 463-465 (2007) 742-746
3. K. Osamura *et al.*: *Supercond. Sci. Technol.* 29 (2016) 094003 (9pp)
4. C. L. Longmire: *Elementary Plasma Physics*. New York, London: Interscience Publishers, John Wiley and Sons, 1963, pp. 68-73
5. R. W. Moses Jr.: *Advances Cryogenic Eng.* vol. 21 no. C-2, pp. 140-148, 1975
6. H. Kamada *et al.*: presented at the 97th CSJ Conference, Yamagata, Japan, Nov. 2018, Paper 2P-p23
7. C. C. Clickner *et al.*: *Cryogenics* 46 (2006) 432-438
8. M. Sugano *et al.*: *Supercond. Sci. Technol.* 23 (2010) 085013

# 超電導電力貯蔵装置(SMES)への無絶縁コイルの適用可能性に関する検討

## Evaluation on Applicability of No-Insulation REBCO Pancake Coil to Superconducting Magnetic Energy Storage

大牟礼 将人, 尾下 遥, 金原 徹郎, 石山 敦士 (早大)

OMURE Masato, ONOSHITA Haruka, KINPARA Tetsuro, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

超電導電力貯蔵装置(以下「SMES」)は電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する装置であり、高効率、長寿命で大電力の瞬時応答が可能であるという特徴を持つ。しかし、他の電力貯蔵装置と比較して貯蔵密度が極めて小さい。

無絶縁コイル(以下「NI コイル」)は、二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定化を両立できる巻線方式として期待されている。この NI コイルを SMES に応用することができれば、高電流密度化により高貯蔵密度化が可能になると考えられる。また、一般に SMES 用コイルは大電流、低インダクタンスで設計することが望ましい。そのため、4 本の無絶縁 REBCO 線材を集合導体化した導体を巻線した 4 枚バンドルコイルは SMES に適していると考えられる。そこで今回は、4 枚バンドルコイルを対象に負荷変動補償用途における一定電力の充放電時の効率と損失を、バンドル導体間の接触電気抵抗をパラメータとして簡易的な数値解析により評価し、SMES への適用可能性について検討を行った。合わせて 1 本の無絶縁 REBCO 線材を密巻きした場合との比較を行ったので、報告する。

### 2. 解析方法

解析対象のコイルとしては内径 1m で 100 ターンの密巻きコイルと同じ起磁力をもつ 25 ターンの 4 枚バンドルコイルを想定しているが、今回は計算を簡易化するため、電流がバンドル導体の中央部に集中して流れているものとして電流分布解析を行った。解析は PEEC モデルによる電流分布解析と FEM による熱解析を連成して行った[1]。運転温度は 30K とし、伝導冷却条件下において通電電流最大値を 2160A、最小値を 1680A(線材 1 本あたり最大 540A、最小 420A を想定)として一定電力での充放電制御を行うとした[2]。充放電周期は、負荷変動補償を想定した 18 秒とした。この条件の下で、バンドル導体間の層間電気抵抗値を  $700 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2 \sim 70 \Omega \cdot \text{cm}^2$  の範囲で変化させ、各場合の貯蔵エネルギーと貯蔵効率を求めた。

### 3. 解析結果

4 枚バンドルコイル及び密巻きの NI コイルにおける貯蔵エネルギーの時間変化をそれぞれ Fig.1 と Fig.2 に示す。両者とも層間電気抵抗値が小さい場合では、充放電時に転流現象が起りやすくなるため、充放電動作に追従できていないことが分かる。しかし、両者を比較すると 4 枚バンドルコイルの充放電動作への追従性は高まることが分かった。Fig.3 に貯蔵効率の計算結果を示す。4 枚バンドルコイルの貯蔵効率のグラフは通常の NI コイルのグラフに対して左側へシフトしており、特に層間電気抵抗値が  $100 \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  より小さい場合において貯蔵効率の向上が見られた。これは、バンドル導体化することによりコイルのインダクタンスが低減し、充放電時の損失が小さくなったためであると考えられる。これにより、NI コイルを SMES に応用する場合は、バンドル導体化することにより貯蔵効率を向上できる可能性があることが分かった。

### 4. 今後の展望

今回の解析結果は簡易的な計算によるものであり、実際にはバンドル導体内での転流現象などを考慮する必要がある

と考えられる。そのため、今後はさらに詳細な計算を行うことにより、貯蔵効率に加え熱的安定性などの観点からも SMES への適用可能性について検討を行っていく予定である。

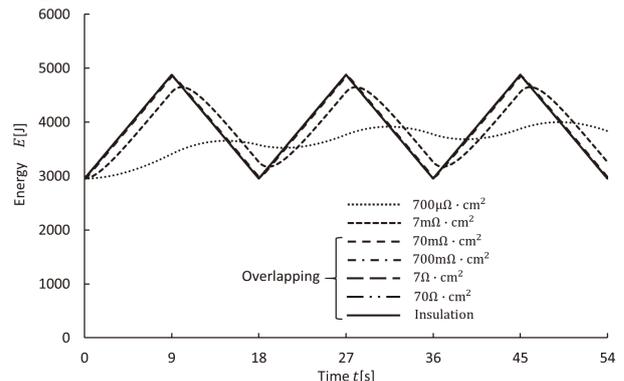


図1 バンドルコイルにおける貯蔵エネルギー  
Fig.1 Stored Energy in Bundle Coil

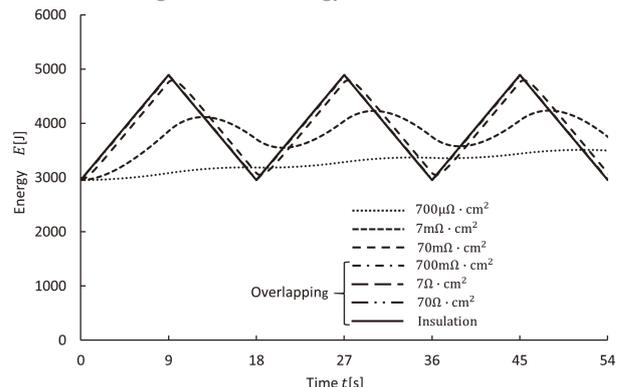


図2 密巻きの NI コイルにおける貯蔵エネルギー  
Fig.2 Stored Energy in NI Coil

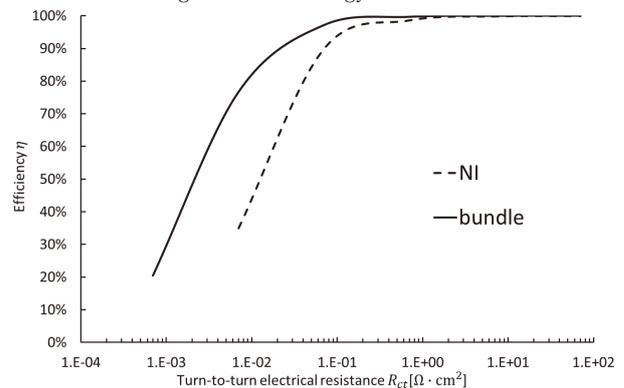


図3 層間電気抵抗と貯蔵効率の関係  
Fig.3 Efficiency at each Turn-to-Turn Electrical Resistance

### 参考文献

1. T.Wang, S.Noguchi, et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., vol. 25, no. 3, 2015
2. A.Ishiyama, et al.: TEION KOGAKU, vol. 48, no. 4, 141-150, 2013

## 直流超電導ケーブルへの応用 The applications of DC superconducting cable

張 翔, 大崎 博之, 寺尾 悠(東大)  
ZHANG Xiang, OHSAKI Hiroyuki, TERAO Yutaka (Univ. of Tokyo)  
E-mail: ZhangXiang@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. Introduction

Nowadays, superconducting cable has been widely used all over the world. With the increase of power transmission in power grid, the traditional cable may have great difficulties in transmission capacity. With the advantages of low loss, high capacity, DC superconducting cable may have great importance in many occasions. One possible application is the use of the DC superconducting cable in the Harbin data center. The power consumed of the data center is 150MW which will be powered by 500 meters, 200kA DC superconducting cable. And this research will talk about the design of the 200kA cable as well as the thermal analysis of it.

### 2. The design of DC superconducting cable

For the data center in Harbin, the power consumed of it is 150MW, and the voltage of it is 240V, so the current of the superconducting cable is 200kA. Because the current is 200kA, so considering the bending problem of the superconducting cable, firstly, the 200kA superconducting cable is consisted of four parallel lines, carrying 50kA each. And because 50kA is still a high current level, so this time, a five-around-one configuration will be developed to solve this kind of problem. And figure 1 is the construction of the five-around-one configuration. The grey part is the aluminum alloy jacket, and the red part is the hollow tube.

### 3. Simulation results

In this part, I mainly do the thermal analysis of the 10kA superconducting cable because the five-around-one superconducting cable is consisted of five 10kA superconducting cable. The length of the superconducting cable used in the data center is 500 meters. And the figure two is the relationship between the distance and the temperature.

Besides, sometimes the heat invasion from the external environment may change from 0.5W to 1.5W. So, the thermal analysis of the comparison of heat invasion is also developed in the figure 3. And from the figure 3, we can find that the influence of the heat invasion is not so large because the length of the superconducting cable is only five hundred meters.

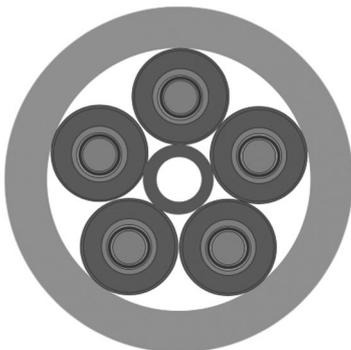


Fig 1. Structure of the superconducting cable model

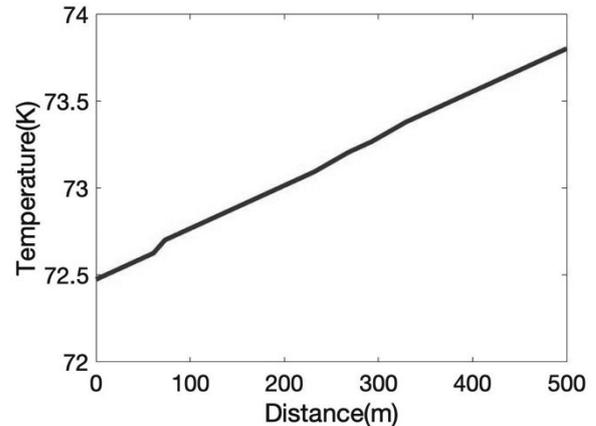


Fig. 2. Temperature distribution of 500 meters long superconducting cable.

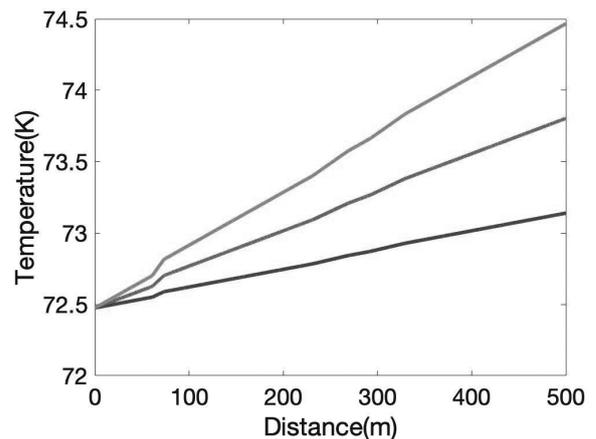


Fig. 3. The figure of the influence of the heat invasion from the external environment

### 4. Conclusions

This research talks about the use of the superconducting cable in the data center. And also give the thermal analysis of the 200kA DC superconducting cable.

### References

- Mulder T, Dudarev A, Mentink M, et al. Design and Manufacturing of a 45 kA at 10 T REBCO-CORC Cable-in-Conduit Conductor for Large-Scale Magnets[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):1-5.
- Konstantopoulou K, Ballarino A, Gharib A, et al. Electro-mechanical characterization of MgB<sub>2</sub> wires for the Superconducting Link Project at CERN[J]. Superconductor Science and Technology, 2016, 29(8):084005.

# 全超電導回転機の希薄ガスを用いた回転子冷却に対する寸法と回転数の影響

## Influence of size and rotational speed on rotor cooling with thin gas for fully superconducting rotating machines

加藤 幹人, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

KATO Mikito, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: kato.mikito18@ae.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

全超電導回転機は機器の小型軽量化が可能であり、航空機用モータや風力発電機などへの応用が期待されている。しかし、固定子と回転子それぞれを冷却する必要があり、特に回転子内部への冷媒供給流路の設計では構造の複雑化が問題となる。そこで、全超電導回転機の回転子冷却を簡略化する方法として、エアギャップ中の希薄ガスの熱伝導と対流熱伝達を用いた冷却方法の実現性をこれまで検討してきた[1][2]。しかし、これまでは単一の解析モデルに対して検討していたため、回転機の寸法(特に回転子半径とエアギャップ長)や回転数が冷却特性に与える影響は明らかではなかった。本講演では、これらの影響を明らかにするため、有限要素法による定常状態熱解析を行い、パラメータ依存性を考察した結果を報告する。

### 2. 解析方法

本研究では、有限要素法解析ソフト COMSOL®を利用し、回転子とエアギャップ(ガス He)の2つの領域からなる軸対称モデル(Fig. 1)を用いて熱解析を行った。回転二重円筒間の熱伝達に関する実験式[3]より求めた熱伝達係数 $h_{He}$  [W/m<sup>2</sup>·K]とガス He 温度 $T_1$  [K]、回転子温度 $T_2$  [K]から、回転子—エアギャップ間、エアギャップ—固定子間の熱伝達の条件(熱流束 $q_1, q_2$  [W/m<sup>2</sup>])を設定した。ここでは、固定子温度は 20 K と仮定した。外部から回転子への侵入熱として、単位面積当たり一定の発熱を与えた。また、回転子側面の風損による発熱も解析では考慮した。回転子半径、エアギャップ長、軸方向長、回転数、ガス He の圧力をパラメータとして変化させて解析を行い、回転子表面の最大温度を算出した。そして、各パラメータが回転子冷却に与える影響を評価した。

### 3. 解析結果

Fig. 2 に異なる回転数での回転子半径と回転子表面の最高温度との関係を示した。その他のパラメータは、エアギャップ長 20 mm、軸方向長 600 mm、ガス He の圧力 100 Pa としている。Fig. 2 より、1000 rpm 以上の回転数になると回転によって生じる対流により冷却が促進され、温度が下がることがわかる。ただし、5000 rpm では冷却の促進効果よりも風損の影響が大きくなるので温度が上昇している。また、500 rpm と 1000 rpm の結果を比較すると、回転子半径 50 mm の時にはほとんど差はないが、回転子半径が大きくなるにつれて差が広がり、1000 rpm でも回転による冷却の促進効果を得られるようになることがわかる。このことから、回転子半径が大きいほど、小さな回転数でも冷却の促進効果を得られると言える。

Fig. 3 に異なる回転数でのギャップ長と回転子表面の最高温度との関係を示した。回転子半径は 200 mm とし、軸方向長、ガス He の圧力は Fig. 2 の結果と同じとした。Fig. 3 において、ギャップ長が大きいほど 20 K の固定子との距離が大きくなるので温度は上昇している。また、エアギャップ長が 20 mm のときに 1000 rpm で温度が下がるのに対し、35 mm のときには 500 rpm で温度が下がっている。このことから、エアギャップ長が大きいほど、より小さい回転数で回転による冷却の促進効果を得られることがわかる。

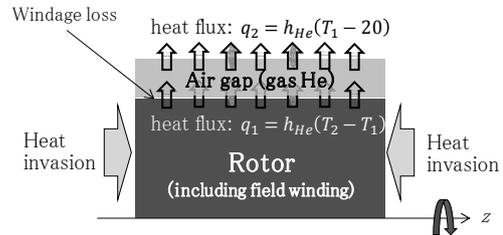


Fig. 1 Analytical model

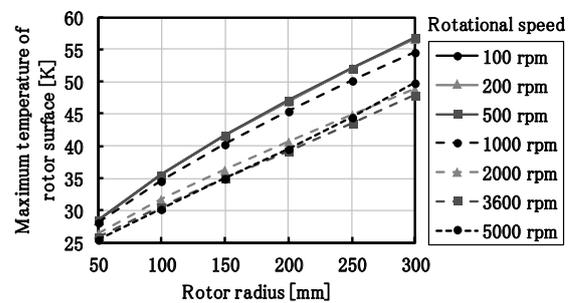


Fig. 2 Relationship between maximum temperature of rotor surface and rotor radius at different rotational speeds

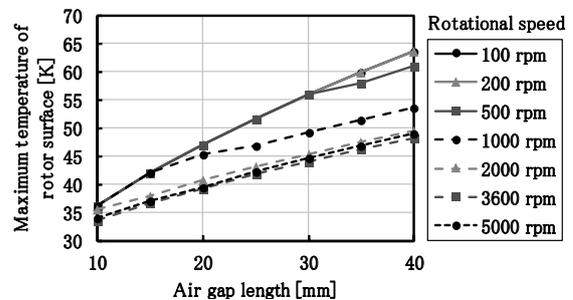


Fig. 3 Relationship between maximum temperature of rotor surface and air gap length at different rotational speeds

### 4. まとめ

本研究では、回転子半径やエアギャップ長、回転数などをパラメータとして変化させて熱解析を行い、全超電導回転機の寸法や回転数が希薄ガスを用いた回転子冷却に与える影響を調べた。解析結果より、回転子の半径やエアギャップ長が大きいほど、より小さな回転数でも回転による冷却の促進効果が得られることがわかった。

### 参考文献

1. M. Kato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.138
2. M. Kato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.134
3. M. Fenot, et al.: International Journal of Thermal Sciences, Vol.50 (2011) pp.1138 -1155

# 3次元有限要素法解析に基づいた 全超電導同期機の MgB<sub>2</sub> 電機子巻線における交流損失解析

## AC loss analysis of MgB<sub>2</sub> armature windings of fully superconducting synchronous machines based on 3D finite element analysis

清水 優孝, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)  
SHIMIZU Masataka, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)  
E-mail: shimizu-masataka214@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出量低減を目的として、自動車をはじめとした輸送機器における電動化の流れが顕著である。特に最近では、航空旅客機の電動化が盛んに議論されている。航空旅客機に搭載するモータには高出力密度が求められており、その中でも超電導回転機が注目を集めている。特に全超電導回転機は界磁/電機子巻線の両方に超電導線材を用いており、両方の巻線で高い電流密度を確保出来ることから、回転機の高出力密度化が期待されている。しかし、電機子巻線の交流損失をいかに克服するかが問題となっている。本発表では、3次元電磁界解析を行うことにより、コイルエンド部分も含めた全超電導回転機の交流損失を算出し、2次元解析の場合と比較・考察した結果を報告する。

### 2. 解析方法

本研究では回転数 5000 rpm、液体水素冷却(20 K)の全超電導回転機(Table 1)についての解析を行う。参考文献 [1]の条件を利用し作成した 2次元モータモデルと、基本条件を2次元の場合に合わせ、電機子巻線の端部の形状を参考文献 [2]を参考に作成した 3次元データモデル(Fig. 1)を用いて電磁界解析を行った。界磁電流は参考資料[1]の条件より電機子巻線に振幅 1.0 T の回転磁界が印加されるように決定し、電機子電流についても同様に参考資料[1]から、電機子巻線の MgB<sub>2</sub> フィラメントに電流密度  $1.3 \times 10^7$  A/mm<sup>2</sup> の三相交流電流が流れるよう設定した。2次元/3次元モデルの双方で、電磁界解析ソフトウェア JMAG-Designer®を用いて磁束密度振幅を計算し、電機子巻線各部における交流損失を求めた。2次元モデルを用いて交流損失を求める場合、軸方向や端部領域での磁束密度の分布を考慮せず、電機子巻線全体で一様であると仮定した。3次元モデルを用いる場合は、端部を含むモータ各部分の磁束密度分布を利用した。そして、2次元/3次元モデルから得た交流損失を比較し、端部の損失の差等の2つのモデルの差がモータ全体の損失の計算結果にどの程度の影響を与えるかを調べた。

### 3. 結果

前項の条件より得られた交流損失を Table 2 に示す。本結果より、有効長部分は 2次元/3次元モデルの差がおおよそ 11 W となる。この差の原因は軸方向による磁束密度振幅変化が考慮されたためである。それに対し、コイル端部領域は、3次元モデルで磁束密度が大幅に低下するのに対し、2次元モデルでは磁束密度が同一であると計算したため、2次元/3次元モデルの差が 789 W と大きくなる。これらの結果から、3次元モデルでは合計損失が 1018 W であるのに対し、2次元モデルでは合計損失が 1818 W となり、800 W の差が生まれることがわかった。これは、今回の計算方法では電機子巻線端部における2次元/3次元モデルの場合の磁束密度振幅の差が大きくなることに加え、モータのコイル端部における線材長が、全線材長の 55.8%と半分以上を占めるほど長いためであると考えられる。従って、2次元/3次元モデルを用いた解析の交流損失の差は大きくなり、特にコイル端部領域における2つ

のモデルの交流損失の差がモータ全体の交流損失に与える影響は大きいと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では 2次元及び 3次元モデルそれぞれを用いた電磁界解析を行い、得られた磁束密度分布から交流損失を計算した。2次元/3次元モデルの解析結果を比較すると、2次元モデルは 3次元モデルの結果と比べ、端部磁束密度分布の影響で交流損失が大きくなった。

Table 1 Parameters of analysis model [1]

Motor output power	1.5 MW
Rotational speed	5000 rpm
Rotor radius	175 mm
Air-gap length	20 mm
Thickness of armature winding	3 mm
Effective length	470 mm
Number of armature winding turns	28
Material of field coils	YBCO
Material of armature windings	MgB <sub>2</sub>

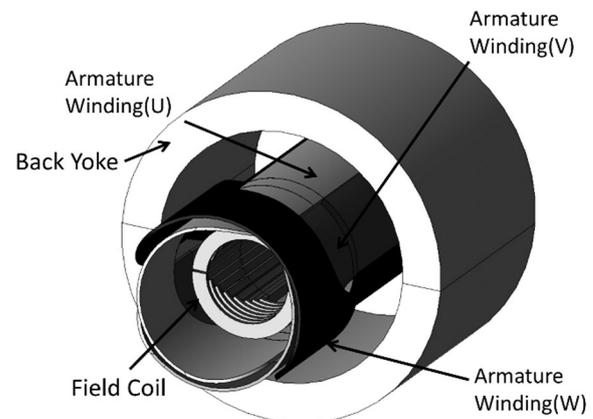


Fig. 1 3D analysis model of a fully superconducting machine

Table 2 AC loss estimation results

	2D Model	3D model
AC losses of effective length part	891 W	880 W
AC losses of coil end part	927 W	138 W
Total	1818 W	1018 W

### 参考文献

- Y. Terao, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 28, No. 4 (2018) 5208005
- S. Kalsi, et al.: AIAA Propulsion and Energy Forum, July 9-11 (2018) 10.2514/6.2018-4796

# 超電導フライホイールの開発① —SMB の信頼性耐久性評価装置—

Development of Superconducting Flywheel Energy Storage System  
—Evaluation machine for reliability and durability of Superconducting Magnetic Bearing—

山下 知久, 宮崎 佳樹, 小方 正文, 長嶋 賢(鉄道総研); 清水 秀樹, 澤村 秀次, 松岡 太郎(ミラプロ); 柴崎 康司, 井出 英次, 谷口 学(丸和電機); 向山 晋一, 佐久間 陽介(古河電工)  
YAMASHITA Tomohisa, MIYAZAKI Yoshiki, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI); SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu, MATSUOKA Taro (MIRAPRO); SHIBASAKI Koji, IDE Eiji, TANIGUCHI Manabu (Maruwa Electronic Inc.); MUKOYAMA Shin-ichi, SAKUMA Yousuke (Furukawa Electric)  
E-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

## 1. はじめに

超電導フライホイール蓄電システムの貯蔵エネルギー増にむけコア技術の超電導磁気軸受(SMB)の大荷重化の開発を進めている[1]。本蓄電システムのコア技術である超電導磁気軸受(SMB)の147kN超の大荷重化にむけて、バッテリー等の蓄電媒体に対する利点であり差別化となる、数十年レベルの期待寿命を実証するため、SMBの信頼性および耐久性の加速検証が必要と考えている。今回、負担荷重147kNを付与しつつ想定される充放電運用を模した回転数の上昇・下降1サイクル1分間以内(想定運用の数十倍超の速度)で試験可能な専用のSMB評価装置を開発したので報告する。

## 2. 超電導フライホイール用SMBの役割と要求事項

Fig.1にフライホイール蓄電システム(FESS)の原理を示す。フライホイール蓄電システムは装置に内蔵した大型の円盤(フライホイール)を回転させることで電力を運動エネルギーに変換して貯蔵し、必要に応じて再び電力に変換する機械式バッテリーである。超電導フライホイール蓄電システムのコア技術はSMBで、回転軸側に高温超電導バルク体を、軸受側に高温超電導コイルを用いて非接触支持する軸受であり、負担可能な荷重の大きさに比べて軸受構造が小型という特徴がある。数十年超の期待寿命に対し経験する充放電(回転数の上昇・下降)回数は、 $10^5$ 回程度になると試算される[2]。超電導フライホイールの実用性を検証するためには $10^5$ 回程度の回転数の上昇・下降を繰り返してもSMBが安定浮上・安定回転可能なことを実証することが不可欠である。

## 3. SMB評価装置の特徴

- 本装置の特徴は以下の4項目である。
- ①フライホイール無しで、実機相当の荷重回転試験が可能
  - ②フライホイールが無いため高加減速回転試験ができるので、短時間でSMBの促進劣化試験が可能
  - ③回転軸の振動振幅を任意に設定でき耐振性の評価が可能
  - ④SMB異常時の安全装置の着地軸受の性能評価が可能

## 4. SMB評価装置の仕様とおもな構成

Table 1に本装置の主要仕様諸元をまとめたものを示す。Fig.2にSMB評価装置構成を示す。Fig.2の右側の写真は超電導バルク体を内蔵する断熱回転軸を本装置に組み込んだ時の状態のものである。本装置はSMBを上下に対向させて、回転軸に発生荷重を与えるもののその荷重(浮上力)は相殺される構造を基本とし、回転軸の駆動モータは装置中央に配置する構成とする設計とし、駆動モータは数十Pa程度の希薄ガスヘリウム雰囲気でも連続運転可能なPMSM方式を選定した。また制御型磁気軸受(AMB)を採用し、回転軸の径方向を非接触支持可能な設計で、それゆえ断熱回転軸を組み込んだ回転軸は静止時から完全非接触浮上可能な構成が実現できている。

本装置の運転特性および本装置で確認されたSMBの加速試験結果の一部について当日速報する予定である。

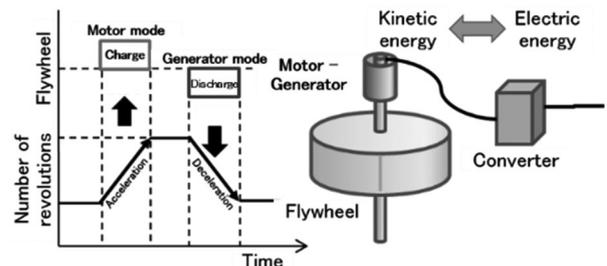


Fig. 1 Schematic representation of FESS operating principles

Table 1 Specification of SMB evaluation machine

Item	Specifications
Maximum levitated load	156.8 kN
Maximum revolution speed	Above 3,000 min <sup>-1</sup>
Atmosphere	Gas He
Pressure	10 ~20 Pa
Maximum amplitude by control	60 μm
Arrangement location of SMB	At the top and the bottom of the machine
Output power of drive motor	9kW
Active magnetic bearing	At the top and the bottom of the drive motor unit
Touchdown bearings	Made of Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> balls

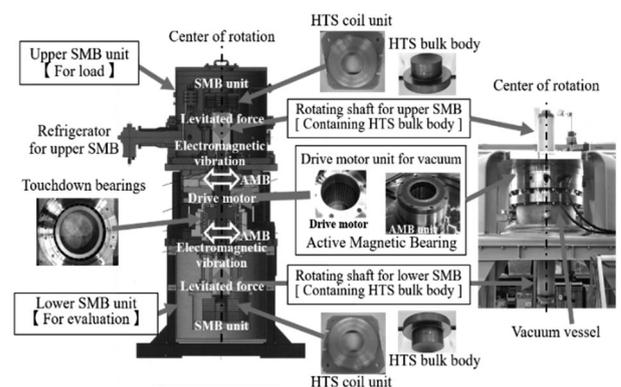


Fig.2 Configuration of SMB evaluation machine

## 参考文献

[1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 97 (2018) p. 147.  
[2] H. Shimizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p. 165.

## 超電導フライホイールの開発② -超電導磁気軸受の浮上力特性-

Development of Superconducting Flywheel Energy Storage System -Levitation force characteristics of Superconducting Magnetic Bearings supporting large load-

宮崎 佳樹, 水野 克俊, 小方 正文, 山下 知久, 長嶋 賢 (鉄道総研);  
向山 晋一, 坂本 久樹, 佐久間 陽介 (古河電工); 澤村 秀次, 小澤 孝仁 (ミラプロ)

MIYAZAKI Yoshiki, MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, YAMASHITA Tomohisa, NAGASHIMA Ken (RTRI);  
MUKOYAMA Shinichi, SAKAMOTO Hisaki, SAKUMA Yosuke (Furukawa Electric Co., Ltd.);  
SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO Co., Ltd.)  
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

### 1. はじめに

我々は HTS 系コイルと HTS 系バルク体を組み合わせたフライホイール蓄電装置 (FESS) 向け高温超電導磁気軸受 (SMB) の開発を進めており, すでに山梨県米倉山太陽光発電所に併設された電力貯蔵技術研究サイトの FESS の実証機では SMB を用いたフライホイールの安定浮上・回転を実証している[1]. FESS を鉄道の回生失効防止や電圧降下対策に適用するには, さらなる蓄電容量向上に伴うフライホイールロータ質量増が必要なことから, 大荷重対応 SMB を開発した[2]. 今回大荷重対応 SMB について, 長期運用を想定した繰返し励消磁試験や, 長時間クリープ特性試験などを実施したので報告する。

### 2. 繰返し励消磁試験

長期運用における SMB の信頼性を確認する目的で, 超電導コイルへの励消磁を 150 回繰返して行い, 浮上力の変化の有無を確認した。Fig. 1, 2 に SMB 評価装置の写真及び構成を示す。コイルとバルク間に生じる反発力を上部のロードセルで浮上力として測定した。SMB の浮上力-通電電流特性について, 通電 1 回目と 150 回目の比較を Fig. 3 に示す。両者の再現性は良好であり, 繰返し励消磁による浮上力の変化はないことがわかった。

### 3. 長時間クリープ特性試験

既報告の 8 時間クリープ特性試験[3]に続き, 200 時間超の連続浮上試験を実施し, より長時間のクリープ特性を評価した (Fig. 4)。200 時間後の浮上力減衰は 1.2%, 磁束侵入や遮蔽電流密度の低下特性を考慮し, 実験結果をフィッティングすると, 浮上力低下は 1 年後でも 2.1%程度と計算され, この程度のクリープ特性であれば, 超電導コイルへの通電電流制御により, フライホイール浮上高さの一定保持が可能である。浮上力検証試験後の臨界電流測定ならびに n 値の測定結果は初期製作時の特性と同等であり, 試験前後での特性変化はないことが確認された。

### 4. 長期保存したバルク体の補足磁場分布特性

Fig. 4 に, 長期保存されたバルク体 (日本製鉄製 RE-Ba-Cu-O 系バルク-QMG®-) の捕捉磁場分布 (77K) を示す。(a) は鉄道総研国立研究所で非接触回転試験を行う直前の 2011 年の測定結果, (b) は回転試験後に試験機から取り出して保存し 2018 年に測定した結果である。捕捉磁場分布に大きな違いがなく, 経時変化が小さいことが確認できた。

### 5. 今後の計画

今後は「超電導フライホイールの開発①」でも報告する荷重発生しつつ回転試験が可能な「SMB 信頼性・耐久性評価装置」[4]を用い, SMB の長期耐久性加速試験や異常時模擬試験を実施し, 実運用を想定した SMB の評価試験を進める予定である。

### 謝辞

長期保存したバルク体の捕捉磁場分布特性評価にご協力頂いた, 日本製鉄 (株) の手嶋英一様はじめ先端技術研究所の皆様へ感謝申し上げます。

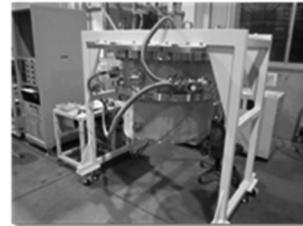


Fig. 1 Photograph of experimental set up for the SMB.

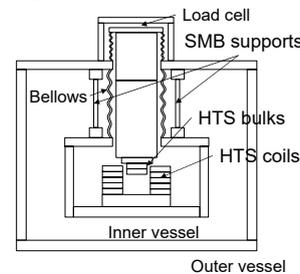


Fig. 2 Schematic of experimental set up for the SMB.

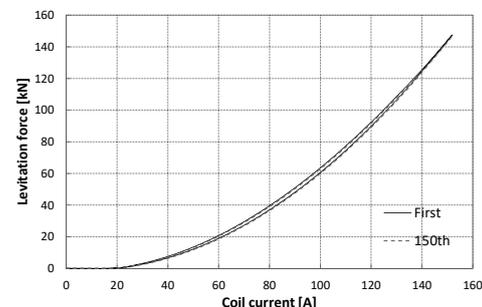


Fig. 3 Test result of SMB levitation force on the repeated magnetization and demagnetization.

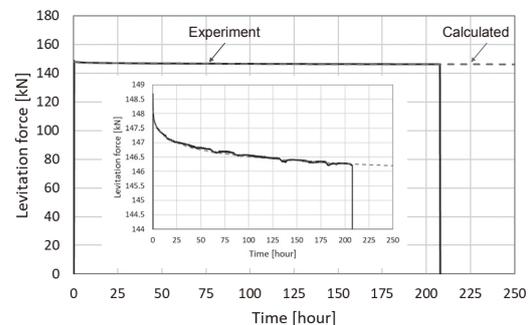


Fig. 4 Influence of creep on levitation force.

### 参考文献

- [1] T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96, p. 139, 2018
- [2] K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95, p. 128, 2017
- [3] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97, p. 147, 2018
- [4] H. Sawamura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97, p. 148, 2018

## 超電導フライホイールの開発③ —断熱荷重支持材の信頼性評価試験—

### Development of flywheel energy storage system with superconducting magnetic bearing 3 – Reliability test of SMB support–

宮崎 佳樹, 山下 知久(鉄道総研); 松井 義, 土肥 哲也, 上島 史生(松井鋼材);  
浅野 幸雄, 徳永 宏, 風間 竜也(三星工業); 向山 晋一, 坂本 久樹, 佐久間陽介(古河電工);  
澤村 秀次, 小澤 孝仁(ミラプロ)

MIYAZAKI Yoshiki, YAMASHITA Tomohisa (RTRI); MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya, UEJIMA fumio (Matsukoizai, Inc.);  
ASANO Yukio, TOKUNAGA Hiroshi, KAZAMA Tatsuya (Mitsuboshi kogyo Co., Ltd.);  
MUKOYAMA Shinichi, SAKAMOTO Hisaki, SAKUMA Yosuke (Furukawa Electric Co., Ltd.);  
SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO Co., Ltd.)  
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

我々は HTS コイルと HTS バルク体を組み合わせたフライホイール蓄電装置(FESS)向け高温超電導磁気軸受(SMB)の開発を進めており、すでに山梨県米倉山太陽光発電所に併設された電力貯蔵技術研究サイトの FESS の実証機では SMB を用いたフライホイールの安定浮上・回転を実証している[1]。FESS を鉄道の再生失効防止や電圧降下対策に適用するには、さらなる蓄電容量向上に伴うフライホイールロータ質量増が必要なことから、大荷重対応 SMB を開発した[2]。

SMB の重要部品であるアルミナ繊維複合材を用いた 4 本の断熱荷重支持材について、ひずみゲージの出力から求めた浮上力は、ロードセルによる計測荷重とよく一致し、ひずみゲージによる浮上力測定が有効であることが確かめた。また、15 トン超の超電導磁気軸受(SMB)浮上力検証試験の実施前後で引張試験を行い、健全性を確認した。

#### 2. ひずみゲージ出力から求めた浮上力

今回浮上力検証試験に用いた静止型浮上力検証試験装置を Fig. 1 に示す。高温超電導コイルと高温超電導バルクの反発力は上部のロードセルにて測定している。超電導バルクコイルの反力は 4 組の断熱荷重支持材を介して外槽容器で支持する構造となっている。「超電導フライホイールの開発①」で報告する「SMB 信頼性・耐久性評価装置」では、SMB の発生する浮上力は真空容器内で回転する回転軸の内力となるため、浮上力を直接測定することができないが、4 本の断熱荷重支持材に貼付けたひずみゲージの出力の合計から浮上力を知ることができる。事前検証として、Fig.1 の装置で断熱荷重支持材のひずみ測定とロードセルによる計測荷重を比較した結果を Fig. 2 に示す。両者はよく一致しており、事前に断熱荷重支持材の弾性率が得られていれば、ひずみゲージ法による浮上力の評価が有効であることがわかった。

#### 3. 引張試験による健全性評価

断熱荷重支持材は断熱性と耐荷重を両立する必要があるため、熱絶縁特性と引張強度に優れる(AFRP)を採用している。断熱ロッドの引張強度は、想定荷重に対し、安全率 2.7 を有することを確認している[3]。連報「超電導フライホイールの開発②」で実施したクリープ試験、繰返し励消磁試験後、断熱ロッドについても引張試験を行い、初期特性と比較した結果、弾性率は製造初期と比較してもほとんど変化なく、今回の試験で劣化などの問題がないことを確認した。

今後は「超電導フライホイールの開発①」で報告する荷重発生しつつ回転試験が可能な「SMB 信頼性・耐久性評価装置」[4]を用い、SMB の長期耐久性加速試験や異常時模擬試験を実施し、実運用を想定した SMB の評価試験を進める予定である。

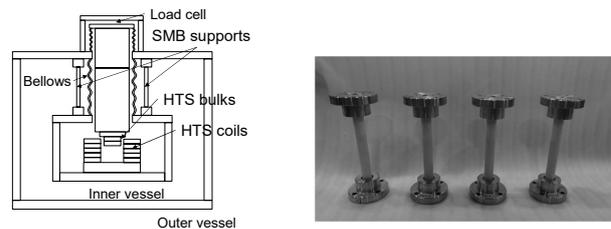


Fig. 1 Schematic of experimental set up for the SMB and photograph of the SMB supports.

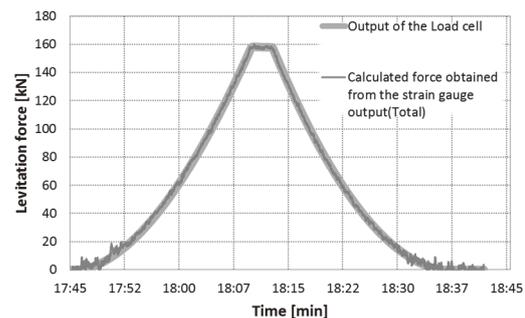


Fig. 2 Comparison of the SMB levitation force with the calculated force of the strain gauge output at the SMB supports.

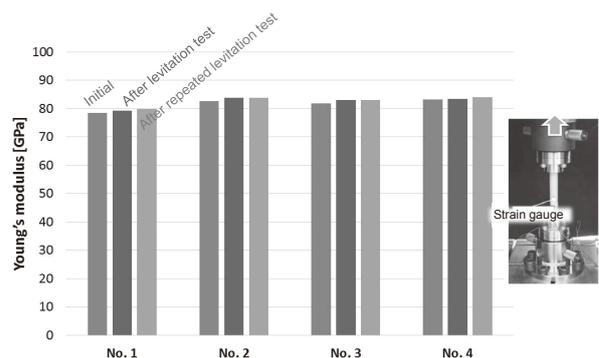


Fig 3 Young's modulus of the SMB support before and after levitation tests.

#### 参考文献

- [1] T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 p. 139, 2018
- [2] K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95, p. 128, 2017
- [3] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95, p. 168, 2017.
- [4] H. Sawamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 97, p. 148, 201

# 超電導フライホイールの開発④ —大口径高速回転磁性流体シール—

Development of large diameter high speed rotart magnetic fluid seal  
for superconducting fltwheel energt storage ststem

嶋崎 靖幸, 和田 高広, 大谷 真一(リガク); 澤村 秀次, 小澤 孝仁(ミラプロ);  
山下 知久, 小方 正文(鉄道総研)

SHIMAZAKI Yasuyuki, WADA Takahiro, OHYA Shinichi (RIGAKU); SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPURO);  
YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi (RTRI)  
E-mail: simazaki@rigaku.co.jp

## 1. はじめに

山梨県米倉山太陽光発電所の電力貯蔵技術研究サイトで数年後の商用機上市にむけ超電導フライホイール蓄電システム(FESS)の開発としてNEDO助成事業で開発した米倉山実証実験を有効活用する形で鋼製フライホイールを用いた実証実験を計画的に進めている。今回、超電導フライホイール向け磁性流体真空シール装置(MFS)について、米倉山超電導フライホイール蓄電システム用の大口径 MFS[1]を用いたベンチ試験(最高回転数 3,000 min<sup>-1</sup>以上(周速 31.4m/s以上)における真空回転ホールド試験, サイクル試験, 急加減速試験等)を実施したので結果を報告する。

## 2. 磁性流体シール(MFS)

磁性流体とは磁性に反応する酸化鉄の超微粒子に界面活性剤を混ぜ合わせコロイド状にし、分散させた機能性流体の一種である。Fig.1に磁性流体を使ったMFSの構造を示す。永久磁石と透磁率の高い磁極片、回転軸によって構成された磁気回路の数十ミクロンの微小間隙に磁性流体を注入すると、磁気回路に応じた液体のOリングが形成されて、非接触で空気をシールできる回転シールとなる。このシールの耐圧は1段当たり0.2気圧~0.4気圧のため複数段を持つ多段シールとして1気圧を保持可能な真空シールを設計できる。

Fig.2に米倉山向けMFSの概略構造断面図を、Table1にMFSの仕様条件について示す。

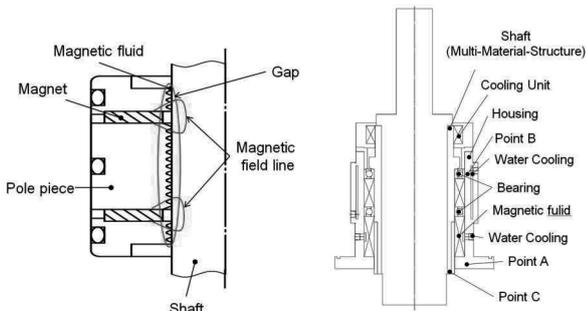


Fig. 1 Basis structure of Magnetic fluid seal.

Fig. 2 Magnetic fluid seal on FESS.

Table1 Spectication of Magnetic Fluid Seal .

Max speed	3,000min <sup>-1</sup> <( 31.4m/s<)
Pressure	10Pa
Shaft dia	φ 200 mm
Shaft Materials	Multi-Material-Structure
Bearing	Ceramic Ball bearings

## 3. 大口径MFSを用いた真空回転ホールド試験、サイクル試験、急加減速試験の結果

Fig.3に米倉山実証機向けと同じ設計のMFSを使用した真空回転ホールド試験結果を示す。

今回は回転数を3,000 min<sup>-1</sup>以上(周速 31.4m/s以上)まで回転させ、圧力を維持できることを確認した。

Fig.4に3,000 min<sup>-1</sup>以上からの急加減速試験の結果を示す。

MFSを3,000 min<sup>-1</sup>以上で回転させ3分で停止状態(0 min<sup>-1</sup>), 停止確認後3,000 min<sup>-1</sup>以上まで加速させたが軸固着など起こらず、運転が再現できることを確認した。

Fig.5に3,000 min<sup>-1</sup>以上のサイクル試験結果を示す。

MFSを3,000 min<sup>-1</sup>以上で回転させて温度安定を確認後、一定範囲で回転数を20サイクル繰り返し変化させた際の温度変化やトルク変化の再現性を確認した。

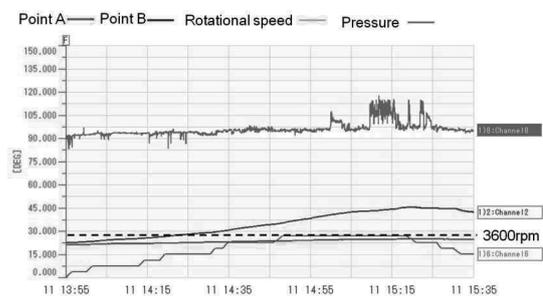


Fig.3 Result of vacuum rotation test.

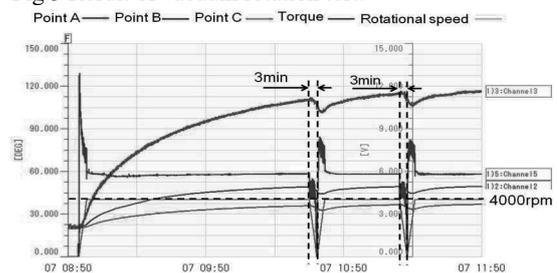


Fig.4 Result of acceleration / deceleration test.

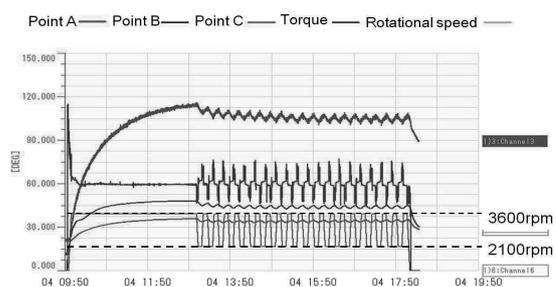


Fig.5 Result of cycle test.

## 4. 今後の展開

今後は、今回得られた知見を元に、鉄道用超電導フライホイール蓄電システム向けMFSの設計へフィードバックし、開発を推進していく。

## 参考文献

1.Y.Shimazaki,et al., Abstracts of CSSJ Conference,Vol.96 (2018)P141