

## 導電性中間層によりAgを不要とした低コストRE系コート線材

## Ag free low-cost RE123 coated conductor by using conductive buffer layers

土井 俊哉(京大, JST-ALCA); 橋本 真幸(京大); 堀井 滋(京大, JST-ALCA); 一瀬 中(電中研, JST-ALCA)

DOI Toshiya(Kyoto Univ., JST-ALCA); HASHIMOTO Masayuki(Kyoto Univ.);

HORII Shigeru(Kyoto Univ., JST-ALCA); ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA)

E-mail: doi.toshiya.8c@kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

液体窒素冷却で使用可能なY系線材の開発が進み、現在IBAD法もしくはRABiTS法によって製造されたY系超電導線材が市販されている。しかし、どちらの線材も非常に高価格であるため、一般への普及が進まない状況にある。これらY系線材の中で基材テープ、およびAg層は大きなコストウエートを占めていると考えられる。これらの部分の大幅なコスト低減を図るためには、ハステロイやNi-W合金テープを安価なコモンメタルを用いた基材テープに変更すること、およびYBCO層の上に安定化層を形成するために不可欠なAg層を不要にする新しい線材構造の採用が有効と考えられる。

我々は前回の講演会[1]で、新規なYBCO/NbドープSrTiO<sub>3</sub>/Ni/{100}<001>Cuテープ構造を提案し、新構造の短尺線材で1.2MA/cm<sup>2</sup>(at 77 K, 自己磁場中)の高いJ<sub>c</sub>が得られることを示した。今回、中間層およびYBCO層の形成条件を検討し、J<sub>c</sub>の向上を試みた。

## 2. 実験方法

基材には田中貴金属工業製(市販)のNiめっき{100}<001>結晶集合組織Cu/SUS316貼合せテープを用いた。NbドープSrTiO<sub>3</sub>(Nb-STO)およびYBCO層の作製にはKrFエキシマレーザーを光源とするパルスレーザー蒸着法(PLD法)を用いた。Nb-STO層の成膜は、基板温度600~800°C、成膜槽内の雰囲気98% Ar + 2% H<sub>2</sub>混合ガス2.0~3.0×10<sup>-3</sup> Paで実施した。YBCO層は、基板温度790°C、P(O<sub>2</sub>)=35 Paで成膜した。Nb-STO、YBCOの膜厚はそれぞれ100 nm、270 nmとした。

作製した薄膜の表面状態の評価は走査型電子顕微鏡(SEM)により、配向度の評価はX線回折により行った。また、YBCO層を積層した試料のJ<sub>c</sub>については試料を液体窒素中に浸漬し、直流四端子法で測定したI-Vカーブから決定した。

## 3. 結果と考察

Niめっき{100}<001>結晶集合組織Cu/SUS316貼合せテープ(Ni/Cu/SUS316テープ)上に、温度600、700、800°CでNb-STO薄膜を形成した。図1に、600°Cで作製した試料の{110}極点図を示す。α=45°の位置に90°毎に強度の強いスポットが観察されていることからNb-STO層は2軸配向していることが確認できる。700、800°Cで作製した試料も同様に2軸配向していることが確認できた。このように600~800°Cと非常に広い成膜温度領域で良好な2軸配向が得られることは、長尺線材作製を考えたとき、Nb-STOは非常に有利な中間層であることが分かった。

図2に作製したYBCO/Nb-STO/Ni/Cu/SUS316テープの77

K、自己磁場のI-V曲線を示す。I<sub>c</sub>は13A、J<sub>c</sub>は2.6×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>であった。

今後、中間層およびYBCO層の作製条件の最適化を進めることで更に高いJ<sub>c</sub>が達成できるものと考えている。

[1] 土井ら、2014年秋季低温工学・超電導学会、1C-p05.

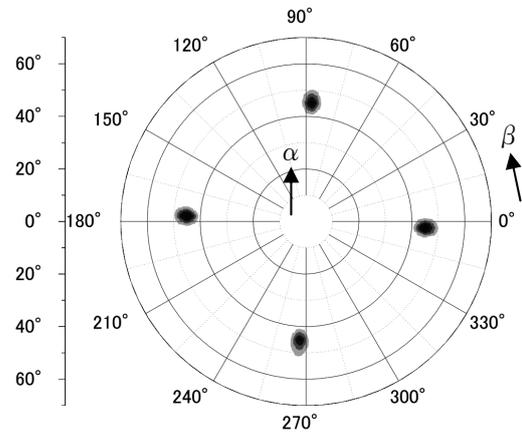


Fig. 1 The X-ray {110} pole figure for the Nb-STO thin film grown at 600 °C on the Ni/Cu/SUS316 lamination tape.

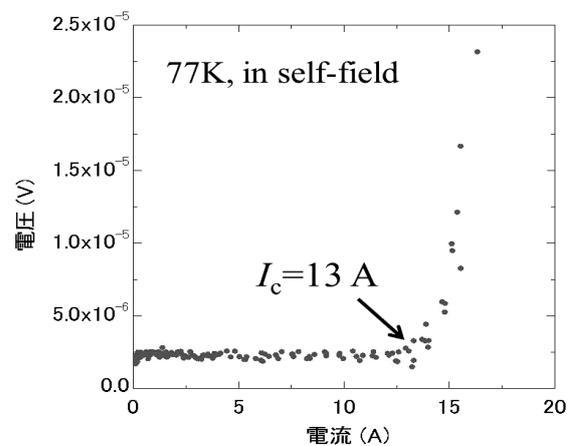


Fig. 2 The I-V curve measured at 77 K in self field for the YBCO/Nb-STO/Ni/Cu/SUS316 tape.

# 低コスト RE 系コート線材を目指した配向鉄テープ上の酸化物中間層

## Oxide buffer layer on textured Fe tapes toward low-cost RE123 coated conductors

一瀬 中 (電中研, JST-ALCA); 中 順平, 内間貴之 (京大); 堀井 滋, 土井俊哉 (京大, JST-ALCA)  
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA); NAKA Junpei, UCHIMA Takayuki (Kyoto Univ.);  
 HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA)  
 E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

### 1. はじめに

Y系高温超電導テープ線材の研究開発の成果により, IBAD法あるいはRABiTS法による高性能線材が市販されている。しかし, 超電導機器開発において, 機器によっては臨界電流等の十分な性能が得られていても, 線材の価格が高いため, 超電導機器の実用化・普及には至っていない。実用化・普及のためには, 線材の更なる低コスト化が不可欠である。Y系高温超電導線材の中で, 大きなコストを占める箇所は, 試算により体積が最も大きい金属基材であることがわかっている<sup>1</sup>。したがって, 金属基材のコスト低減を図ることで, 容易にY系高温超電導線材の低コスト化につながると考えられる。

そこで, 金属基材に安価なコモンメタルである配向鉄を使用することを検討した。これまでに, 配向鉄基材上に二軸配向したカルシア安定化ジルコニア (CSZ),  $\text{CeO}_2$  の中間層の作製に成功し, その上に  $T_c=90\text{K}$  の  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  (YBCO) 層の作製に成功している<sup>2,3</sup>。しかし, 鉄の(110)面とCSZ(100)面は, 不整合界面であり, 鉄基材上のCSZの二軸配向化は単純ではない。そこで, X線回折および透過電子顕微鏡を用いて, CSZの結晶配向, 組織観察を行い, 結晶成長機構を考察した。

### 2. 実験方法

金属基材として日本金属(株)製の{110}<001>集合組織鉄テープを使用した。配向鉄テープは表面を機械研磨した後, 成膜装置内でArイオンビーム照射を行い, 表面の酸化膜を除去した。その後, 第1中間層のCSZ, 第2中間層の $\text{CeO}_2$ を作製した。全ての層は, KrFエキシマレーザーを用いたパルスレーザー蒸着法(PLD法)を用いた。

得られた試料の評価は,  $\text{CuK}\alpha$ 線を用いたX線回折による結晶配向の測定, 透過電子顕微鏡(JEM-2100F)による断面および平面の微細組織観察を行った。透過型電子顕微鏡観察用試料は集束イオンビーム装置を用いて試料の任意の場所から切り出し, Gaイオンで薄片化した。

### 3. 実験結果および考察

図1に鉄基材上にCSZ層, その上に $\text{CeO}_2$ 層を作製した試料の断面STEM像を示す。特徴的な組織として, CSZ層の組織は明るいコントラストの領域が基板界面近傍で幅が広く, 表面に近づくにつれて細くなる三角形の形を有し, 一方, 暗いコントラストの領域は, 明るいコントラストの領域の逆三角形になっており, ほぼ交互に配列していることがわかる。電子線回折より, 明るい部分は(111)配向で, 暗い部分は(001)配向であることを確認している。

X線回折測定から鉄テープの表面の{110}面は, 圧延方向に鉄の<100><sub>Fe</sub>, 圧延方向と直交する方向に<110><sub>Fe</sub>が向い

ていることが確認されている。また, 鉄とCSZの方位の関係は, 基材の法線方向のCSZの配向が{001}<sub>CSZ</sub>, {111}<sub>CSZ</sub>に関わらず, <100><sub>Fe</sub>と<110><sub>CSZ</sub>が平行の関係であることがわかった。Fe{110}面とCSZ{001}面の原子の配列の模式図を図2に示す。黒丸はFe, 白丸はCSZ, グレーの部は二つが重なった部分である。この図からわかるように鉄の圧延方向(紙面の上下方向)にCSZが僅かに縮むことで, FeとCSZの一部の原子位置に整合性が出る。透過型電子顕微鏡による平面組織の解析から, {001}<sub>CSZ</sub>配向のCSZは, 圧延方向とそれに直交する方向で結晶軸の軸長が僅かに異なり, 圧延方向の軸長が短くなっていることがわかった。CSZは鉄基材の表面の原子配列の影響を受け, 歪んでいることが確認できた。

### 参考文献

1. T. Doi, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.11
2. Y. Uchima, *et al.*: Abstracts of the 61st JSAP spring meeting (2014) p.11-086
3. J. Naka, *et al.*: Abstracts of the 75th JSAP autumn meeting (2014) p.11-094

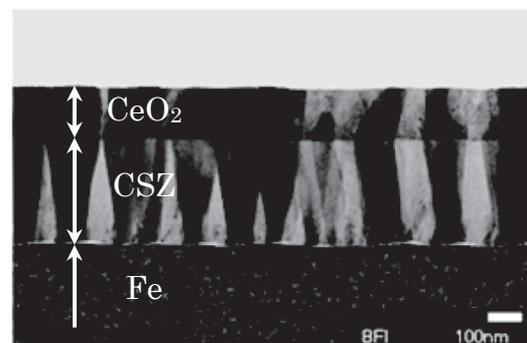


Fig. 1. A cross-sectional STEM image of  $\text{CeO}_2/\text{CSZ}/\text{Fe}$  tape

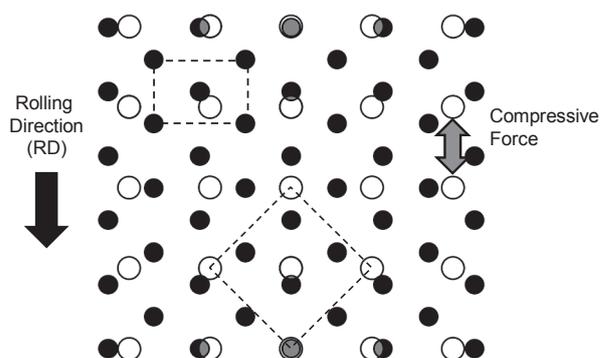


Fig. 2. Atomic ordering of Fe{110} (●) and CSZ{001} (○)

## YBCO薄膜の歪と $J_c$ の相関に関する簡便な測定法

### Easy measurement method of correlation between $J_c$ and distortion of YBCO thin films

坂元俊輔、齊藤敦、大嶋重利 (山形大)

SAKAMOTO Shunsuke, SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)

E-mail; ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

#### 1. はじめに

金属テープやフレキシブルな基板上的 YBCO 薄膜は、曲げ歪が加わると $J_c$ の低下が生じると報告されている。その測定は通常、試料に通電した状態で歪を加え $J_c$ の変化を測定することが多く、装置も比較的大型となる。我々は、以前から永久磁石法で $J_c$ を評価することを報告している。その手法を応用し、試料を円筒ホルダー上にセットし、試料に歪を加え、その状態で $J_c$ を評価することにより、簡便に歪と $J_c$ の相関を測定できることを明らかにした。本報告では、 Hastelloy やステンレステープ上や YSZ 基板上に形成された YBCO 薄膜の歪— $J_c$  特性を測定し、従来の手法と比較したので、その結果を報告する。

#### 2. 実験手法

永久磁石法による曲げ歪と $J_c$ の相関を求める実験手法の概要を図1に示す。永久磁石を超伝導薄膜に近づけると磁石と超伝導薄膜の間に斥力が生じる。この斥力の大きさは、薄膜の臨界電流値に比例し、その大きさから $J_c$ が求められることを我々は報告している[1]。図1に示すように、円筒状のホルダーに YBCO 薄膜を密着させ、薄膜に歪を加える。その状態で永久磁石を近づけ、磁石に働く斥力を測定し $J_c$ を求めた。試料は液体窒素に浸されている。薄膜面を内側にして曲げると薄膜に圧縮応力が加わり、外側にして曲げると引っ張り応力が加わる。また、用いた試料は、SuperPower 社製及び SuNAM 社製の金属テープ上に形成した YBCO 薄膜及び、THEVA 社製の YSZ 基板上の YBCO 薄膜である。また、薄膜の X 線解析の結果、YBCO 薄膜はテープ長手方向に a-b 軸が平行に配向していることが分かった。

#### 3. 実験結果

図2に、YBCO 薄膜の歪と $J_c$ の関係について示す。実験は、まずフラットな板状にセットした YBCO 薄膜の $J_c$ を測定後(この状態を歪ゼロと定義する)曲率半径の異なる治具に YBCO 薄膜を内側にして密着させ、薄膜に圧縮応力を加える。その後、曲率半径を徐々に小さくし、薄膜に印加される歪を大きくし $J_c$ を測定した。その後、また徐々に曲率半径の大きな治具に薄膜をセットし、 $J_c$ を測定する。次に、薄膜面を外側にして曲げ、薄膜に引っ張り応力を印加し、 $J_c$ を測定した。これを順次行い、歪— $J_c$ の関係を測定した。歪が圧縮になるのは、薄

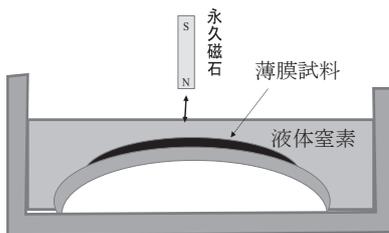


Fig.1. Schematic drawing of  $J_c$  measurement system using a permanent magnet method.

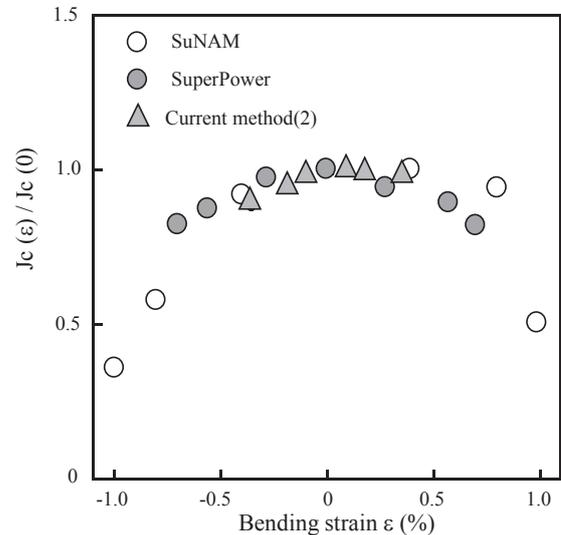


Fig.2 Relationship between  $J_c$  and  $\epsilon$ .

膜面を内側に、引っ張りになるのは外側にして曲げて測定した結果である。測定は全て液体窒素中(77K)で行った。図2にその結果を示す。SuNAM社及びSuperPower社製の YBCO 薄膜の歪— $J_c$  特性はほとんど同じであることが分かった。また、通電法で測定した結果ともよく一致している。歪が約0.7%を超えると急激に $J_c$ が低下することが分かる。YSZ 基板上の YBCO 薄膜も同様に測定したが、ほとんど同じ傾向を示すことが分かった。

#### 4. まとめ

永久磁石法を用いると、簡便に歪— $J_c$ の関係が測定できることが分かった。ただしこの測定は、現在のところ、77Kの液体窒素中で、無磁場中だけの測定である。我々は現在 NMR の検出コイルを超伝導薄膜で作製することを検討している。通常は、サファイア基板上の YBCO 薄膜を用いてコイルを設計するが、その形状では、フィリングファクターが低下し、感度が落ちる。薄い YSZ 基板上の YBCO 薄膜を曲げてコイルを形成すれば、フィリングファクター低下を防ぐことができる。今回の結果はその可能性を示している。詳細は学会で報告する。

#### 参考文献

1. S.Ohshima et al., IEEE. Trans. Applied Superconductivity 15 (2005) 2911.
2. M. Sugano, et.al., Physica C, 463-465, (2007) 742.

# 基板装飾法による YBCO 薄膜への人工ピン導入 —磁場中での表面抵抗の低減を目指して—

## Introduction of artificial pins in the YBCO thin film by substrate decoration method —Aiming to reduce the surface resistance in a magnetic field—

市川 光、吉田雄平、齊藤 敦、大嶋重利(山形大)

ICHIKAWA Kou, YOSHIDA Yuhei, Saito Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)

E-mail; ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導薄膜(YBCO)を NMR 用検出コイル材に応用する場合、15T以上の強磁場下で低表面抵抗(低 $R_s$ )を有することが必須である。特に、基板面に平行に磁場を印加した状態で。我々は基板面に垂直及び平行に磁場を印加した時のYBCO薄膜の $R_s$ (これを $R_s(90)$ ,  $R_s(0)$ と定義)を測定した結果、磁場中の $R_s(90)$ は人工ピンを導入することにより低減できるが、 $R_s(0)$ は逆に大きくなることを見出した。それは、 $R_s(0)$ はYBCOの固有ピンに影響され、ブロック層の周期を乱すと固有ピンの力が落ちるためと考えられている。従って、ブロック層の周期を乱さないで、人工ピンを導入する手法を検討することが重要である。その方法として、基板装飾法及び基板加工法による人工ピンを検討したので、報告する。

### 2. 実験手法

基板装飾法によるピンの導入は、レーザー蒸着法により MgO 基板上に BaZrO<sub>3</sub>(BZO)ナノ微粒子を形成し、その上に YBCO

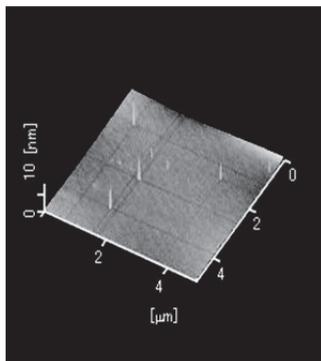


Fig.1. AFM image of MgO substrate decorated by BZO nano-particles.

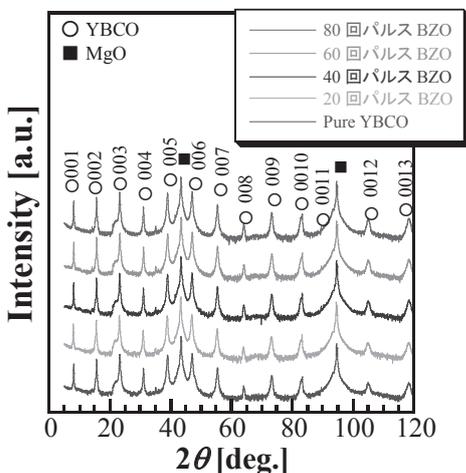


Fig.2. X-ray diffraction patterns of YBCO thin films deposited on MgO substrate with BZO nano-particles.

薄膜を成長させる手法を用いた。その場合、BZO ナノ微粒子のサイズ・高さ・密度により、YBCO 薄膜中に導入されるピンの密度、大きさ等が異なる。我々は、従来から報告されている手法、レーザーパルスのショット数を変えてそれを制御した。レーザーショット数と BZO 微粒子の密度、大きさをあらかじめ求め、BZO 微粒子の分散と YBCO 薄膜の  $R_s(90)$ ,  $R_s(0)$  の関係を求めた。基板加工法では、MgO 基板表面に微細な凹凸を加工し、その上に YBCO 薄膜を形成し、人工ピンを形成した。YBCO 薄膜の  $R_s$  は誘電体共振器法により測定した。

### 3. 実験結果

図1に40回ショットで形成した MgO 基板上の BZO 微粒子の AFM 像を示す。基板表面に BZO 微粒子が分散しているのが分かる。次に BZO 微粒子を形成した MgO 基板上に YBCO 薄膜をレーザー蒸着で形成した。図2に作成した YBCO 薄膜の X 線回折図を示す。異なる BZO 微粒子が分散されている MgO 基板上に形成した YBCO 薄膜はほとんど同じ、配向性を持つことが明らかとなった。

図3に YBCO 薄膜の磁場中  $R_s(0)$  を示す。BZO を装飾しない MgO 基板上に形成した YBCO 薄膜の  $R_s(0)$  と比較し、装飾した基板上の YBCO 薄膜の  $R_s(0)$  は磁場依存性が小さいことが判明した。また、 $R_s(90)$  を測定した結果、ショット数 40 で BZO を形成した基板上の YBCO 薄膜だけが、BZO を装飾しない基板上に形成した YBCO 薄膜の  $R_s(90)$  より磁場依存性が小さいことが分かった。その原因は現在、検討している。

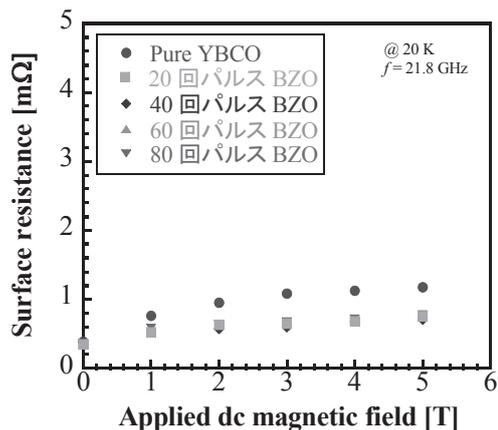


Fig.3. Surface resistance of YBCO thin films deposited on MgO substrate with BZO nano-particles.

### 4. まとめ

基板装飾法による人工ピンの導入で  $R_s(0)$ ,  $R_s(90)$  の磁場依存性の低減を試みた。BZO 微粒子を適量分散させた MgO 基板上に形成した YBCO 薄膜は、 $R_s(0)$ ,  $R_s(90)$  ともに磁場依存性が小さくなることを見出した。その原因は、磁束量子の動きに起因しているものと思われる。詳細は、当日発表する。

希土類系高温超伝導薄膜の  $J_c$  の磁場角度依存性制御Control of angular dependent  $J_c$  in rare-earth based high- $T_c$  superconducting films

松本 要, ジャー アロク, 堀出 朋哉(九工大)

MATSUMOTO Kaname, JHA Alok, HORIDE Tomoya (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: matsu@post.matsc.kyutech.ac.jp

REBCO 高温超伝導体を用いたコーテッドコンダクター型の超伝導線材開発が進んでいるが、量子化磁束のピン止め点として人工ピン APC の導入<sup>1)</sup>は臨界電流制御の重要技術として認知されるようになってきている。しかしながら線材の観点から見たとき、コーテッドコンダクターはエピタキシャル薄膜を利用しているため、その結晶異方性に起因する磁場印加方向によって臨界電流密度  $J_c$  が大きく変化してしまうという課題を抱えている。今後、幅広い応用に向けて  $J_c$  の角度依存性の低減化技術が強く望まれている。そこで我々はこの課題の解決策として、ナノロッドの  $B//c$  方向の優位性を生かしながら  $J_c$  角度依存性の等方化を進める手法として、ナノロッドに加えてナノ粒子（あるいはセグメントナノロッド）を薄膜中に同時に導入するハイブリッド APC を提案しその可能性を探ってきた。<sup>2)</sup>ここでは、このようなハイブリッド APC を導入した  $J_c$  の角度依存性を理解するために“vortex staircase”モデルを提案し、その解析手法について報告する。

$B//c$  方向のブロードな  $J_c$  ピークを理論的に説明するのは難しくこれまでもいくつかの手法が試みられてきたが、その理論的妥当性等については不明な点も多い。すでに  $J_c$  の角度依存性を異方的な成分と等方的な成分に分ける方法<sup>3)</sup>や、vortex pass モデル<sup>4)</sup>といった統計的な手法などが提案されているがその理解には不十分である。本提案の“vortex staircase”モデルではピン止めエネルギー、階段状量子化磁束の自己形成エネルギー  $\varepsilon_1$ 、ケージポテンシャル  $\frac{K}{2}u^2$ 、およびピンニングエネルギー  $U_p$  を考慮した次式の量子化磁束全系のエネルギーに着目し  $J_c$  を予測する。

$$\Delta E_{rod} = \int_0^{z_1} \left\{ \frac{\varepsilon_1}{2} \left( \frac{du}{dz} \right)^2 + \frac{K}{2} u^2 \right\} dz - U_p l_{tr}$$

実験との比較のために、PLD 法によって SrTiO<sub>3</sub> 基板上に YBCO+BSO ナノロッド(3%)薄膜とナノ粒子を添加し

た YBCO+BSO(3%)+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を作製し、その  $J_c$  の角度依存性 (77 K, 1 T) を求めた。図 1 は得られた YBCO+BSO(3%)+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の規格化  $J_c$  とモデルとの比較結果である。このモデルによって実験結果から重要なパラメータを求めることができ、理論的考察との比較からその妥当性を検証できる。詳細については当日報告する。

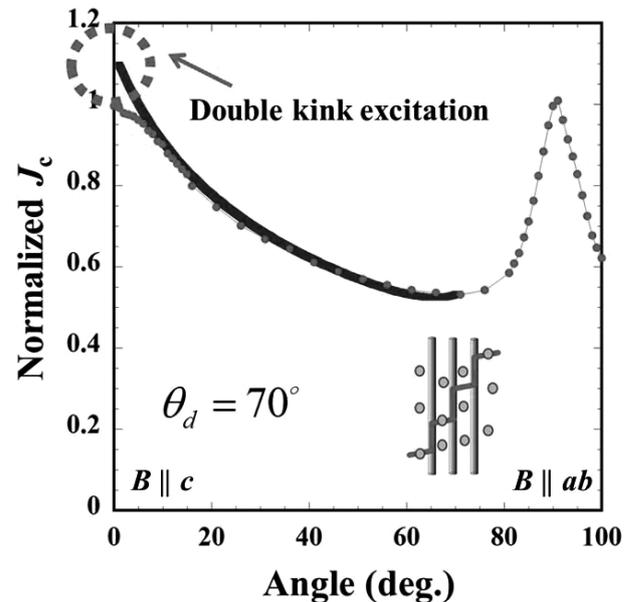


図 1 “vortex staircase”モデルによる  $J_c$  角度依存性のフィッティング (YBCO+BSO(3%)+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜)。実線がモデル。

## 文献

- 1) K. Matsumoto *et al*, Supercond. Sci. Technol., **23**, 014001, 2010.
- 2) T. Horide *et al*, Supercond. Sci. Technol., **26**, 075019, 2013.
- 3) J. Gutierrez *et al*, Nat. Mater., **6**, 367, 2007.
- 4) P Paturi, Supercond. Sci. Technol., **23**, 025030, 2010.

フッ素フリーMOD法Y123薄膜の $J_c$ 特性および微細組織におよぼすClドーピング効果Effects of Cl-doping on  $J_c$  properties and microstructures of Y123 films prepared by fluorine-free MOD method

元木 貴則, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二, 幾原 雄一(東大院工), 下山 淳一(青学大),  
堀井 滋, 土井 俊哉(京大), 本田 元気, 永石 竜起(住友電工)

MOTOKI Takanori, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji, IKUHARA Yuichi (Univ. of Tokyo),  
SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.), HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ.),  
HONDA Genki, NAGAISHI Tatsuoki (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: 3064622801@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123)超伝導体薄膜の作製法のなかで、フッ素フリーMOD法は単純な固相反応により、均質なRE123相が短時間で生成するという特徴がある<sup>[1]</sup>。しかし、他の手法で作製された薄膜より磁場中での $J_c$ が低く、材料開発に向けた研究例は少ない。これまで我々は原料溶液へのClドーピングにより $c$ 軸配向したBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> (Ba2342)酸塩化物が膜中に析出することを報告してきた。この酸塩化物はY123の2軸配向を促進し磁場中の $J_c$ 特性を改善することがわかっている<sup>[2]</sup>。また、ClドーピングやClとSnの共ドーピング薄膜では、溶液法で作製した薄膜としてはこれまでに報告のない特異な $J_c$ の磁場印加角度依存性を示し、 $c$ 軸相関ピンなどの存在が示唆されていた。

本研究では、ClとSnを共ドーピングしたY123薄膜の $J_c$ の磁場印加角度依存性および断面の微細組織を評価することにより、特異なピンニング機構の解明を目指した。また、金属基板を用いたClドーピングY123薄膜作製を試み、成膜条件を系統的に調べた。

## 2. 実験方法

Y, Ba, Cuのプロピオン酸塩溶液に塩酸および金属溶液を微量混合し、仕込組成がYBa<sub>2+2x</sub>Cu<sub>3+3x</sub>O<sub>y</sub>Cl<sub>2x</sub>Sn<sub>z</sub> ( $x = 0, 0.05, z = 0, 0.01$ )となるように溶液を調製した。SrTiO<sub>3</sub>(100)単結晶基板上もしくは金属クラッド基板に溶液を塗布後、酸素気流中~500°Cで仮焼して有機物を分解した。この操作を複数回繰り返して仮焼膜を作製し、続いてO<sub>2</sub>(10 Pa)/Arフロー中、750-800°C、1-720 minの条件下で焼成した後、酸素気流中450°Cでのアニールによってキャリア濃度を調節した。膜厚は0.4-0.5 μmである。これらの薄膜に対して、X線回折による構成相の同定、STEMによる微細組織観察、4端子法による通電測定で $J_c$ - $\theta$ 特性を評価した。

## 3. 結果

Fig. 1に800°C、30 min焼成により作製したノンドープおよびClとSnを共ドーピングしたY123薄膜の $J_c$ の磁場印加角度依存性を示す。ClとSnの共ドーピングにより全磁場印加角度において大きく $J_c$ 特性が改善した。さらに、イントリジックピンに対応する $H \parallel ab$ でのピークのまわりにシヨルダーが見られる。これは、 $c$ 軸相関ピンが強くなると現れることが報告されており<sup>[3]</sup>、 $H \parallel c$ におけるピーク存在とあわせて $c$ 軸相関ピンが導入されたことを示している。実際に、断面観察から膜中の析出物の周囲に $c$ 軸方向に平行に広がる欠陥を確認している。Fig. 2にClとSnを共ドーピングした薄膜の断面STEM像を示す。Cl由来のBa2342酸塩化物が基板との界面に析出しているほか、~10 nm角程度の微細なBaSnO<sub>3</sub>析出物が膜中に分散している

ことがわかった。この析出物が磁場印加角度に依らない等方的な $J_c$ 特性の改善に寄与していると考えている。

また、金属クラッド基板におけるY123薄膜の成膜条件を系統的に調べたところ、Clドーピングによって配向膜の得られる焼成温度、焼成時間条件が大きく変わることが明らかになってきた。当日詳しく報告する予定である。

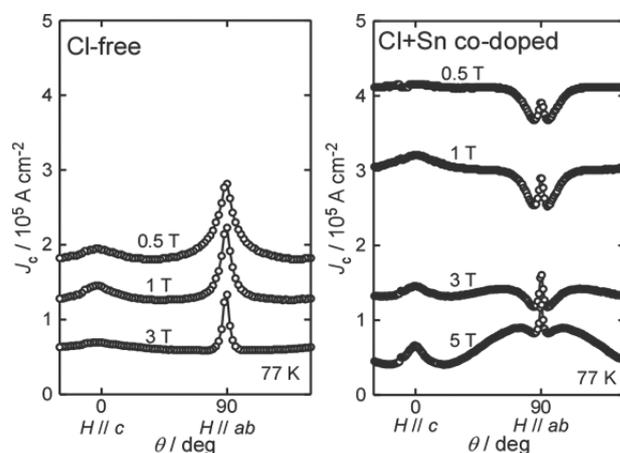


Fig. 1 Angular dependence of  $J_c$  of Cl-free and Cl,Sn co-doped Y123 films on STO(100) substrates at 77 K.

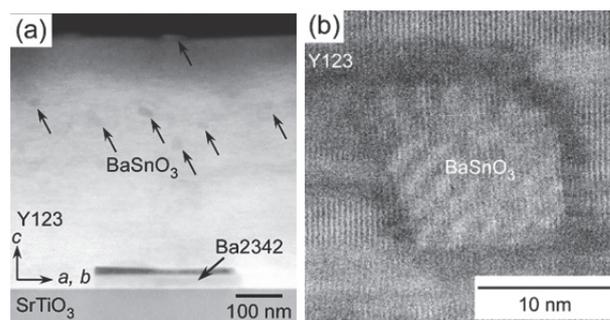


Fig. 2 HAADF-STEM images of the cross-section of a Cl,Sn co-doped Y123 film. (a)full-thickness image (b)enlarged view around a BaSnO<sub>3</sub> precipitate

## 参考文献

- [1] Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 095017.
- [3] N. J. Long, *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 025007.

# 高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイルの開発 —モデルコイルの設計と巻線技術の検討—

## Development of High Temperature Superconducting Force-Balanced Helical Coils: Model Coil Design and Winding Techniques

木村 祐介, 鎌田 太陽, 野村 新一(明治大); 谷貝 剛(上智大); 中村 武恒(京大); 筒井 広明(東工大);  
力石 浩孝, 柳 長門, 今川 信作 (NIFS)

KIMURA Yusuke, KAMADA Hiroharu, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.);  
TSUTSUI Hiroaki (Tokyo Tech); NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.);  
CHIKARAISHI Hirotaka, YANAGI Nagato, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)  
E-mail: ce41029@meiji.ac.jp

### 1. はじめに

超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) など強磁界, 大電流を必要とするコイルは, コイルに発生する強大な電磁力が大きな問題となっている。電磁力平衡コイルはトーラス型ヘリカルコイルであり, 最適なヘリカル巻数を選定することで電磁力を大幅に低減することが可能である[1]。テープ状の高温超電導線をヘリカル状に巻く場合, 線材に印加される余分な機械的応力を低減させるために超電導線を収納するボビンをヘリカル巻線軌道に沿って傾けながら巻線を行う必要がある。

本稿では高温超電導線を使用した電磁力平衡ヘリカルコイルのモデルコイルの設計と, ヘリカルコイル軌道に沿ったボビンの傾き角を定式化し, 自動巻線機に必要となる動作の検討を通して, 高温超電導線テープ線材のヘリカル巻線技術について述べる。

### 2. モデルコイルの設計

Table.1 に設計したモデルコイルの仕様を示す。Fig.1 にヘリカルコイル図を示す。4.2 K の温度下で通電電流 1000 A, 最大磁束密度 1 T の励磁を目指す。

### 3. ヘリカル巻線技術

トーラス環上のヘリカル軌道式はポロイダル角  $\theta$ , トロイダル角  $\phi$  を用いて以下の式で表わされる。

$$\phi = \frac{1}{N} \left( \theta + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \frac{\sin k\theta}{k} \right) + \phi_0 \quad (1)$$

上式をもとに, トーラスの小円周方向 ( $\theta$  方向) と大円周方向 ( $\phi$  方向) にボビンを旋回させることでボビンをヘリカル軌道上に位置させることができる。しかし, 以上の動作のみではヘリカル軌道とボビンの向きの違いからテープ線に振れが生じてしまう。そこでボビンをヘリカル軌道に沿わせるために傾きの動作が必要となる。この傾き角を2方向に分割し, 定式化した。まず円筒座標系  $r, \phi$  平面における傾きが必要となり, この傾き角をヨウ角  $\beta$  とし,  $\beta$  角は以下の式で表される。

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\mathbf{b}_{r\phi} \cdot \mathbf{e}_\phi}{|\mathbf{b}_{r\phi}| |\mathbf{e}_\phi|} \quad (2)$$

ただし,  $\mathbf{b}_{r\phi}$  はコイル軌道の単位従法線ベクトル  $\mathbf{b}$  を  $r, \phi$  平面に投影したものである。また, 円筒座標系  $\phi, z$  平面を  $z$  軸を中心に  $\beta$  だけ回転させた  $\phi', z$  平面における傾きが必要となり, この傾き角をピッチ角  $\gamma$  とし,  $\gamma$  角は以下の式で表される。

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{\mathbf{b}_{\phi'z} \cdot \mathbf{e}_{\phi'}}{|\mathbf{b}_{\phi'z}| |\mathbf{e}_{\phi'}|} \quad (3)$$

ただし,  $\mathbf{b}_{\phi'z}$  はコイル軌道の単位従法線ベクトル  $\mathbf{b}$  を  $\phi', z$  平面に投影したものであり,  $\mathbf{e}_{\phi'}$  は  $\phi$  方向の基底ベクトル  $\mathbf{e}_\phi$  を  $z$  軸を中心に  $\beta$  回転させたものである。以上より, 高温超電導テープ線をヘリカル状に巻くためには  $\theta, \phi$  方向の回転制御に加え, 2方向の傾き制御 ( $\beta$  角,  $\gamma$  角) が必要となる。このような動作をする自動巻線機の試作機を開発した[2]。今後はこの巻線機を使用して製作したヘリカルコイルの超電導特性を評価していく予定である。

Table.1. Specification of the Model Coil.

Max magnetic field	1 T
Coil current	1000 A
Cooling temperature	4.2K
Total poloidal turns	6×6coils×13
Major radius	0.12 m
Minor radius	0.03 m

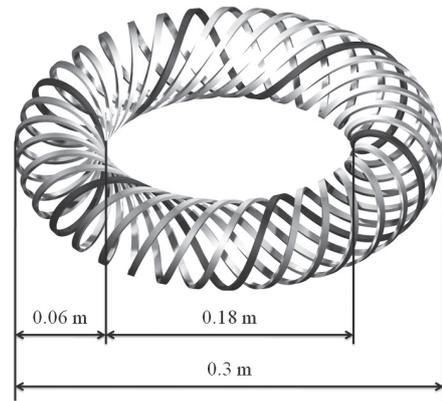


Fig.1. Illustration of a high temperature superconducting model coil.

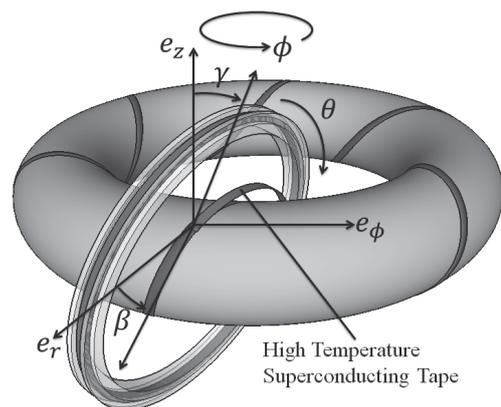


Fig.2. Torsion control angles of a helical winding machine using HTS tapes.

### 謝辞

本研究はLHD計画共同研究の助成を受けて行われている。

### 参考文献

1. 野村他: 電学論, Vol. 129(2009), no.11, P.1311-1317
2. H.Kamada, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 91(2015) 1A-p02

# 高温超電導磁力平衡ヘリカルコイル - ヘリカル巻線機試作機開発 -

## Development of High Temperature Superconducting Force-Balanced Helical Coils: Development of a Prototype Winding Machine

鎌田太陽, 木村祐介, 野村新一 (明治大); 谷貝剛 (上智大); 中村武恒 (京大); 筒井広明 (東工大); 力石浩孝, 柳長門, 今川信作 (NIFS)

KAMADA Hiroharu, KIMURA Yusuke, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); NAKAMURA Taketsune (KyotoUniv.); TSUTSUI Hiroaki (Tokyo Tech); CHIKARAISHI Hirotaka, YANAGI Nagato, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)  
E-mail: ce51015@meiji.ac.jp

### 1 はじめに

高温超電導線を適用した高温超電導磁力平衡ヘリカルコイルの開発にあたり、巻線技術の検討と巻線機の開発を行っている。テープ形状の高温超電導線材は機械的なひずみにより臨界電流が大幅に低減するため、ヘリカル巻線を施す過程で印加されるひずみを低減する巻線方法の検討が重要になる。そこで本研究では高温超電導線の臨界電流を低下させない巻線技術を確立するために、ヘリカル巻線機試作機の開発を進めている。本稿では、試作機開発の進捗状況について報告する。

### 2 巻線時にテープ線の捩れを解消する動作

ヘリカル巻線を施すにあたり、ボビンをトロイダル方向とポロイダル方向へ回転させるだけではテープ形状である高温超電導線は捩れてしまい、巻線が困難である。そこでこの捩れを解消し、かつ巻線過程で高温超電導線に印加するひずみを低減するために、トーラス面に対してテープ線材面が平行となるように、トロイダル方向とポロイダル方向の回転に加えて2方向へとボビンを傾ける巻線方法を提案し [1]、この巻線方法に従って動作できる試作機を製作を行っている。

Fig. 1 はヘリカル巻線機試作機の全体像であり、トロイダル方向とポロイダル方向へ回転するとともに、Fig. 1 中に示すようにヨウ角とピッチ角の傾きを制御することで、提案する巻線方法を再現できる機構となっている。ボビンが設置されている円形部分は内輪と外輪とに分離しており、内輪が独立してポロイダル方向へ旋回し、この内輪を保持している外輪がピッチ角方向およびヨウ角方向に傾くようになっている。そして巻線機全体をトロイダル方向へ旋回させることで、4方向の回転動作を可能にしている。動力には2相励磁式ステッピングモータを用いており、ポロイダル方向回転を一定速度とし、それを基準としてトロイダル方向、ヨウ角方向およびピッチ角方向の回転速度を変調させて、測地線軌道を再現している。

Fig. 2 はテープ状の高温超電導線を模擬した5 mm幅のステンレス線を用いて、トロイダル方向とポロイダル方向のみを動作させて巻線を行った場合 (Fig. 2(a)) と、ヨウ角とピッチ角の動作を加えて巻線を行ったもの (Fig. 2(b)) である。ヘリカル巻線を施した場合、捩れが解消されていることが確認できた。

### 3 今後の課題

自動でトロイダル方向に1ターン巻くとし、そのために大別して以下の2点が今後の課題である。

#### (1) 巻線機に関して

試作機にはヘリカル巻線を自動で行い、かつ再現性を得られることが要求される。現在、巻線開始時は手で巻線機の位置を調整しており、開始位置が一定かどうかは正確に評価できていない。巻線開始を定位置にするため、始動

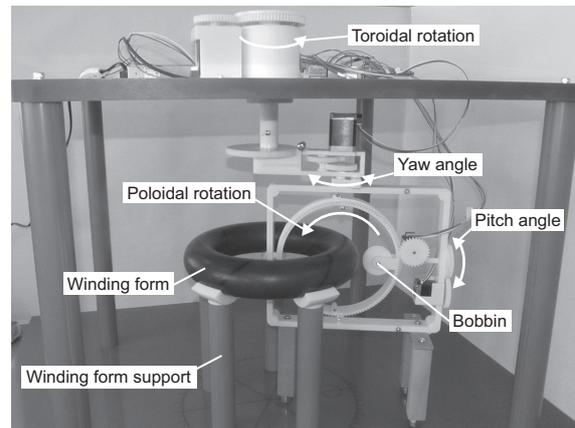


Fig. 1. Photograph of the prototype winding machine.

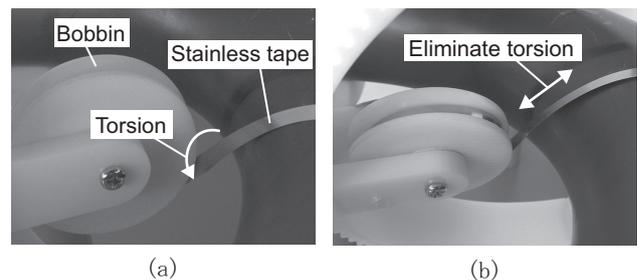


Fig. 2. Photographs of the test winding using stainless steel tapes.(a)Without torsion control and(b)with torsion control.

位置を検出することが必要である。また、巻棒支持脚は固定されておらず、巻棒を乗せている状態であり、巻線機をトロイダル方向に回転させる時にこの支柱が障害となるため、巻棒支持脚の電動化が不可欠である。さらに、線材を格納しているボビン部分は直径40 mmで、格納時には線材にある程度のひずみが印加されている状態である。線材にできるだけひずみを印加しない格納方法を有し、かつ巻線張力の制御が可能なボビンへの改良が必要である。

#### (2) 巻線動作の評価方法に関して

提案する巻線方法でテープ線材に印加されるひずみがどの程度低減されているかを定量的に評価する方法の検討も同時に必要となる。まずは巻線張力の制御法の検討を進めていく。

### 4 おわりに

本研究はLHD計画共同研究の助成を受けて行われている。

#### 参考文献

- [1] Y. Kimura et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.91(2015)1A-p01

# HTS コイルを用いた磁気共鳴型非接触電力伝送システムにおける 電力伝送特性の基礎検討

## Fundamental study on power transmission characteristics of a magnetic resonance type wireless power transmission system using HTS coil

津田 理, 奈良光翼, 宮城大輔 (東北大)

TSUDA Makoto, NARA Kosuke, MIYAGI Daisuke (Tohoku University)

E-mail: tsuda@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

非接触電力伝送システムは、携帯電話や自動車への新たな給電方法として期待されているが、HTS コイルの適用については十分検討されていない。そこで、非接触電力伝送システムに HTS コイルを適用した場合の HTS コイル間の非接触電力伝送特性を評価し、銅コイルの場合と比較した[1]。しかし、非接触電力伝送システムでは、2次側の多くは移動体となることから、コイルの設置場所が制約を受けるため、HTS コイルの2次側への適用は得策ではない。そこで、本研究では、1次側だけに HTS コイルを適用する場合を想定し、1次側が Bi2223 コイル、2次側が銅コイルで構成される非接触電力伝送モデルシステムを用いて非接触電力伝送特性を検討した。

### 2. 実験方法

厚さ 0.35mm、幅 5mm の銅テープ線と厚さ 0.25mm、幅 5mm の Bi2223 テープ線を用いて Table.1 に示すパンチンコイルを作製した。また、本コイルを用いて Fig.1 に示す様なモデル回路を作製した。Fig.1 における  $L_1$ 、 $R_1$  は1次側コイルの自己インダクタンスと抵抗、 $L_2$ 、 $R_2$  は2次側コイルの自己インダクタンスと抵抗である。本試験では、1次側回路の力率が1となる周波数を共振周波数  $f_0$  と定義し、 $f_0$  がほぼ 15kHz となる様に Fig.1 の  $C_2$ 、 $C_2$ 、 $R_L$  の値を定めた。なお、実際に測定した Bi2223 コイルと銅コイルの共振周波数は、それぞれ 14.3kHz、15.7kHz であった。この Bi2223 コイルと銅コイルを用いて、1次側に Bi2223 コイル、2次側に銅コイルを用いた場合 (HTS-Cu)、1次側と2次側が Bi2223 コイルの場合 (HTS-HTS)、銅コイルの場合 (Cu-Cu) の伝送効率と伝送電力を評価した。なお、1次側と2次側間の伝送効率  $\eta$  は次式で定義した。

$$\eta = \frac{P_L}{P_1 + P_2 + P_L} \quad (1)$$

ここで、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_L$  は1次側コイル、2次側コイル、負荷抵抗における消費電力である。

### 3. 実験結果と考察

HTS-Cu、HTS-HTS、Cu-Cu の場合における伝送効率の実験結果および解析結果を Fig.2 に示す。これより、共振周波数より周波数が低下するにつれて、Cu-Cu の場合は伝送効率が低下するのに対し、HTS-Cu では、HTS-HTS の場合と同程度の高い伝送効率を得られることがわかった。これは、HTS コイルにおける低周波数領域の低抵抗特性 (高 Q 値) に起因していると考えられる。また、HTS-Cu、HTS-HTS、Cu-Cu の場合における負荷抵抗への伝送電力の実験結果を Fig.3 に示す。これより、HTS-Cu の場合は、HTS-HTS の場合に比べて小さくなるものの、Cu-Cu の場合より大きくなるのがわかった。以上より、1次側コイルのみに HTS コイルを採用する場合でも、低周波数領域での高効率な非接触電力伝送が可能となることがわかった。ただし、銅コイルを非接触電力伝送システムに適用する場合は、より低抵抗なリッツ線が使用されるため、本試験結果に比べて伝送効率や伝送電力は改善されることが予想される。このため、今後は、より高効率な非接触電力伝送を可能とする銅コイルを用いて、1次側への HTS コイルの適用効果について検討していく予定である。

Table. 1 Specifications of HTS and copper coils

Wire	Bi2223	Copper
Radius [mm]		45
Height [mm]		10
Turns		10
Gap of coils [mm]		10
Self-inductance [ $\mu$ H]	18.9	15.5

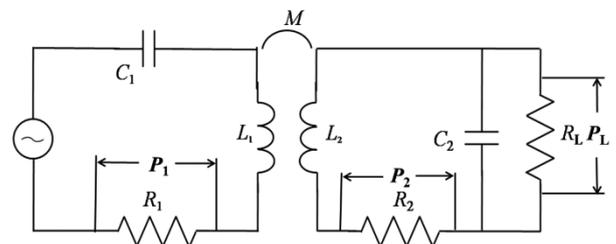


Fig. 1 Experimental circuit of wireless power transmission

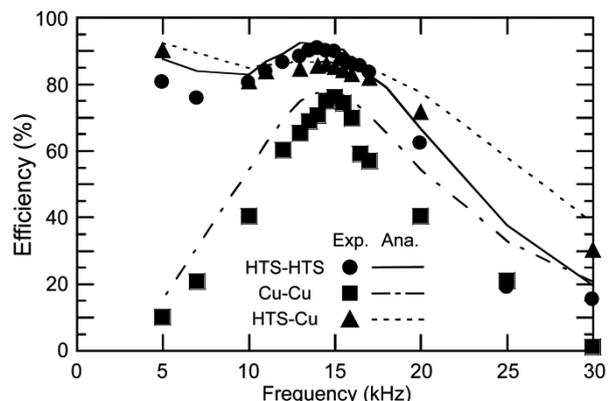


Fig. 2 Experimental and analytical results of transmission efficiency in HTS-HTS, Cu-Cu, and HTS-Cu systems

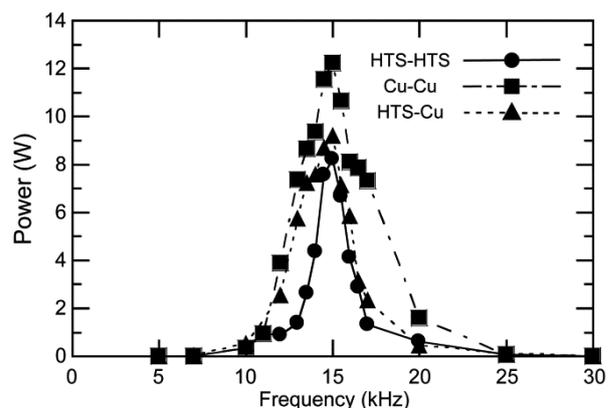


Fig. 3 Transmission power in HTS-HTS, Cu-Cu, and HTS-Cu systems

### 参考文献

1. K. Nara, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.110

# 実時間デジタルシミュレータを用いたハードウェア閉ループ試験による 鉄道用直流き電系統と超伝導電力機器の過渡的相互作用の評価

## Interaction between DC Electric Railway System and Superconducting Power Applications Simulated by Hardware-in-the-loop Simulation Using Real-time Digital Simulator

東川 甲平, 浦崎 祥悟, 井上 昌睦 (九大); 富田 優 (鉄道総研); 木須 隆暢 (九大)  
 HIGASHIKAWA Kohei, URASASHI Shogo, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);  
 TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); KISS Takanobu (Kyushu Univ.);  
 E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導電力機器は、ゼロ抵抗特性や抵抗状態への遷移を利用した高効率化や新機能の創出により、電力系統への導入展開が期待されている。一方、実際に超伝導機器が電力系統に導入されるためには、導入時の機器と系統の双方の信頼性を高いレベルで実証しておくことが必要となる。一般に、機器側の試験としては、系統事故から予測される負荷が超伝導機器に加わっても機器が健全であることを確認するという方策がとられる。逆に、超伝導機器が電力系統に与える影響については、主に数値シミュレーションで検討されている。しかしながら、特に冷却の喪失や抵抗状態への急速な遷移といった機器の過渡的な振る舞いと、その際の系統の挙動を正確に予測することは、これまでのところ困難となっており、超伝導機器と電力系統の過渡的な相互作用を模擬できる新たな手法の確立が求められる。そこで本研究では、実時間デジタルシミュレータ (RTDS) を用いたハードウェア閉ループ試験 (HILS) システムを構築し、実際の超伝導線材の挙動をリアルタイムに電力系統内の機器の特性として反映することで、機器と系統との過渡的相互作用を模擬することを目指した。

### 2. 方法

前回は、鉄道用の直流き電系統に超伝導ケーブルを導入した際の振る舞いを、超伝導線材を用いて模擬することに成功しており、超伝導状態と常伝導状態のそれぞれでその特性が反映されることを報告した<sup>[1]</sup>。そこで今回は、このような試験手法が最も威力を発揮する速い過渡現象を表現できるかを確認することを目的とした。例として、事故電流の限流動作を想定し、Fig. 1 のようなモデルを対象とした。変電所から列車に電力を供給している際に、き電系統に地絡事故が発生し、0.2 秒後に事故が除去されるような状況を想定した。この際の無誘導抵抗型の超伝導限流器 (SFCL) の動作を、コート線材で模擬するために、Fig. 2 のような HILS システムを構成した。具体的には、まず RTDS 内で実規模系統の計算が行われ、臨界電流の比 (2.6 kA → 60 A) を考慮してコート線材に電流を通電する。この際にコート線材に発生する電圧を長さの比を考慮して RTDS にフィードバックする。以上の手順は 50 マイクロ秒ごとに行われ、これによりコート線材の抵抗成分の挙動が SFCL の挙動としてリアルタイムに実規模系統の振る舞いに反映される。

### 3. 結果・考察

結果を Fig. 3 に示す。SFCL を用いない場合に事故電流が 8 kA となるような条件を想定しているが、SFCL を想定してコート線材による HILS を行った結果、事故電流が半分以下に抑制されている様子がわかる。実際にコート線材に流れている電流も同図に示しているが、臨界電流の 60 A に対して、90 A 程度まで電流が流れており、この際の抵抗によって限流されていることがわかる。このように、プロトタイプがどのような規模であっても実規模相当のシミュレーションがモデル化の困難な過渡現象まで含めて行え、系統導入時の挙動を確認しながら、導体構成や負荷率などの設計を行っていくことが可能となる。

### 参考文献

[1] K. Higashikawa et al., Abstract of CSSJ Conference 90 (2004) 109.

### 謝辞

本研究は、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ) 「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の一環として実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (26630113) の助成を得て行ったものである。

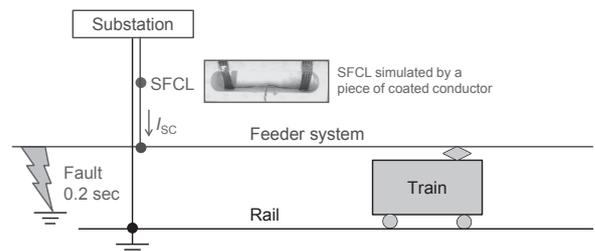


Fig. 1. Simple model for DC railway system with SFCL.

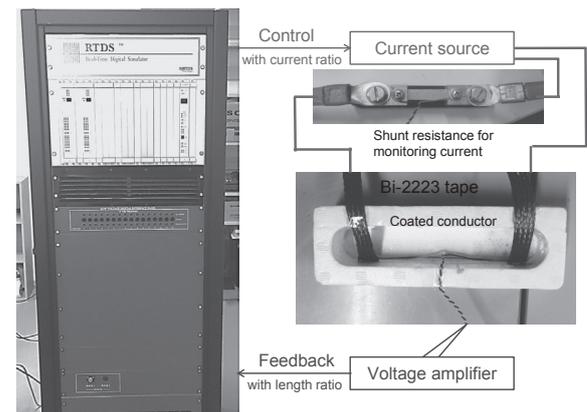


Fig. 2. Setup for the hardware-in-the-loop simulation (HILS).

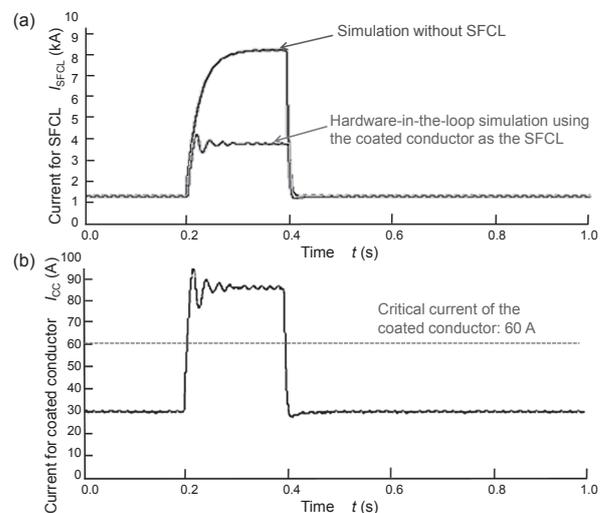


Fig. 3. Current waveforms (a) in the simulation in RTDS and (b) in the coated conductor at a fault occurred in  $t = 0.2-0.4$  s.

## 超電導フライホイール蓄電装置・実証機の開発

### Experimental production of flywheel energy storage demonstration machine using superconducting magnetic bearing

長谷川 均, 山下 知久, 長嶋 賢(鉄道総研); 前田 忠和(クボテック); 松岡 太郎(古河電気)  
清水 秀樹(ミラプロ); 堀内 伸一(山梨県)  
HASEGAWA Hitoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI); MAEDA Tadakazu (KUBOTEK)  
MATSUOKA Taro (FURUKAWA ELECTRIC); SHIMIZU Hideki (MIRAPRO);  
HORIUCHI Shinichi (YAMANASHI Pref.)  
E-mail: hasegawa.hitoshi.10@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

現在、NEDO の助成事業により、系統安定化用蓄電装置をプロジェクト各社とともに開発している。蓄電媒体としては、寿命、コスト、蓄エネルギー容量、出力等を検討し、フライホイールを用いた蓄電装置の適用を検討している。フライホイール蓄電装置は、電力を回転エネルギーに変換して蓄エネルギーを行うため、電気化学的な反応を使用しない。このため、二次電池等で課題となっている、化学的な劣化を生じない。蓄電量に対し、繰り返し出し入れできるエネルギー量が大きい。また、鉛やカドミウムなどの有害物質を含まない、リチウムなどの希少な元素を蓄エネ部では使用しないなどの特徴がある。さらに、蓄電容量と出力を独立して設計できるため、高出力低容量や低出力高容量といった機器設計の自由度が大きい。これまでは、体積当たりの蓄エネルギー量が二次電池等に比べると小さいといった課題があり、フライホイールの大質量化や高回転化の必要がある。

高容量化に必要なロータの大質量化や高回転化については、円形螺旋織物技術を応用した炭素繊維による直径 2m の CFRP ロータの製作、高荷重高速回転に耐える超電導磁気軸受の開発を行っている。

このほど、試験に供する実証機の組立が完了し、ロータの浮上及び低速回転に成功した。そこで本報告では実証機の詳細について述べる。

#### 2. 実証機の詳細

実証機には、質量約 4,000kg のロータを定格回転数 3,000 ~ 6,000min<sup>-1</sup> で運転する 100kWh 級の容量を持った装置を製作した(Fig. 1)。CFRP ロータは直径 2,000mm 高さ 0.9m で縦軸となっている(Fig. 2, Fig. 3)。また、超電導磁気軸受はロータ側に REBCO 高温超電導バルク、ステータ側に REBCO 高温超電導コイルを使用している。超電導磁気軸受は零磁場冷却後、超電導コイルに通電することで反磁性による反発力でロータを非接触浮上させる。超電導磁気軸受のメカニカルクリアランスは約 20mm となっており、高荷重かつ大きなギャップを保っている。ちなみにラジアル方向については能動型磁気軸受を補助軸受として設置している。

#### 3. 今後の予定

本実証機は、今夏を目処に山梨県米倉山太陽光発電所(出力 1MW)に移動設置し、系統連系試験を行っていく予定である。系統連系試験では、回転速度向上、連続運転試験等を行うことで、本システムの基本性能確認、耐久性信頼性に関する知見を蓄積していく。

なお、この研究開発は NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」にて行われている。

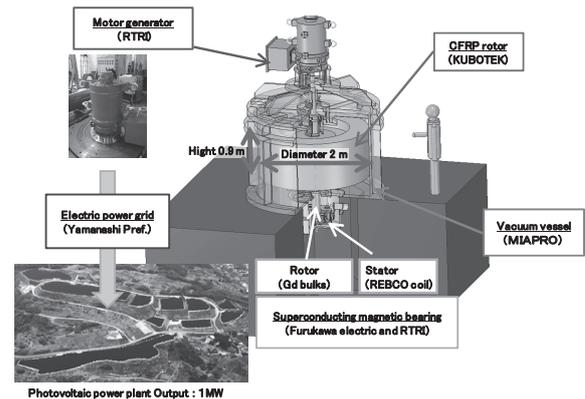


Fig.1 Flywheel energy storage system using superconducting magnetic bearing

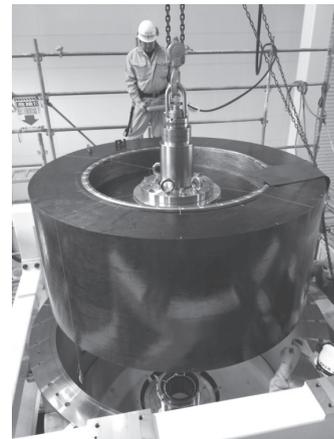


Fig.2 Over view of CFRP rotor

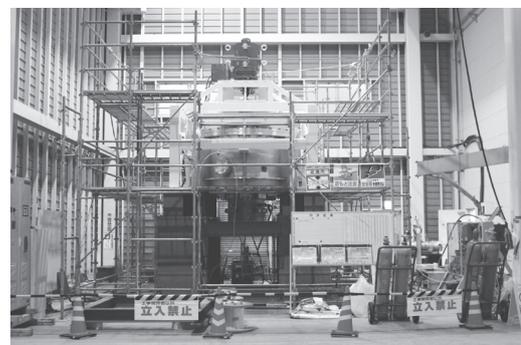


Fig.3 Over view of Flywheel energy storage system

#### 参考文献

1. H. Hasegawa et al: "Study of superconducting flywheel energy storage system for power plant", Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88( 2013), p.202 (in Japanese)

# フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発 ～高耐荷重、低熱侵入SMB開発～

## Development of Superconducting Magnetic Bearing for flywheel energy storage system -Superconducting Magnetic Bearing with High Load Resistant and Low Heat leak -

古川 真, 松岡 太郎, 中尾 健吾 (古河電工); 山下 知久, 小方 正文, 水野 克俊 (鉄道総研);  
清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁 (ミラプロ)

FURUKAWA Makoto, MATSUOKA Taro, NAKAO Kengo (Furukawa Electric Co., Ltd.);

YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi (RTRI);

SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (MIRAPRO Co., Ltd.)

E-mail: furukawa.makoto@furukawa.co.jp

### 1. はじめに

超電導フライホイール蓄電装置は超電導磁気軸受(SMB)により浮上させた重量物を回転させることでエネルギーの出し入れを行う。軸受部分での機械的な接触がないため、機械式軸受よりも回転に伴う損失やメンテナンス面で優れている。

出力 300 kW、蓄電量 100 kWh の超電導フライホイール蓄電装置実証機のSMBでは、REBCO 高温超電導コイル(HTS コイル)によってREBCO 高温超電導バルク(HTS バルク)を内蔵したロータを含む 4,000 kg の主軸を押し上げるため、耐荷重性と冷却特性が重要で、これまで HTS コイルの設計[1]と冷却試験[2]を行ってきた。今回、高耐荷重、低熱侵入であるSMBを設計し、熱解析を行った結果について報告する。

### 2. 高耐荷重、低熱侵入SMBの設計

SMB内槽は、高強度な断熱支持材を用いてコイルユニットを含め支持し、主軸を含めたフライホイールロータ質量 4,000 kg を浮上させる構造となっている。

HTS コイルの冷却は内槽壁面に設けた熱伝導銅ブロックと伝導冷却板を介して行っている。本銅ブロックを採用することで、外槽の真空断熱に加え、内槽との空気の遮断を成立させ、内部の HTS コイルを効率的に冷却する。HTS コイル下部には銅の熱浴を設けている。銅の熱浴は冷凍機停止時の HTS コイルの温度上昇を防ぎ、緊急時の安全性を担保する。

### 3. SMB伝熱解析

伝熱解析では実際の熱侵入と冷凍機の冷却能力を考慮した解析を行い、HTS コイルと HTS バルクの温度を求めた。解析条件を表 1 に示す。解析は初期温度 300 K からの非定常解析を行い、冷凍機の吸熱能力を内槽壁面に設けた熱伝導銅ブロックに適用することでSMBを冷却する。内槽壁面に 5 W/m<sup>2</sup> の発熱条件を設けることで外槽壁面から内槽壁面への熱輻射を考慮している。電流リードからの侵入熱は、30 K で 10 W、300 K で 0 W の侵入熱と仮定し、直線近似した 10×(300-電流リード接続部温度)/270 W の発熱を電流リード接続部に与えている。この条件でSMB内の温度が安定するまで解析を行った。

解析した温度分布について図 1,2 に示す。SMB内部の温度分布については、内槽左側の電流リード接続部とSMB上部に設けたシャフトからの熱侵入が支配的となっているが、HTS バルクと HTS コイルへの影響は小さい。図 2 では図 1 の HTS バルクと HTS コイルの温度分布を表している。HTS バルク上部は、シャフトからの侵入熱によって温度が上昇しているが、それでも 24 K まで冷却可能である。HTS コイルは熱源となる電流リード接続部と冷却部の熱伝導銅ブロックの位置関係により、温度差が生じている。しかし、温度勾配は 17.0 K～17.8 K の範囲に収まっており、ほぼ均一に HTS コイルを冷却可能な構造となっている。運転温度は 50 K を想定しているため、SMBの冷却特性に余裕があることを確認した。

### 4. まとめと今後の展望

高耐荷重、低熱侵入SMBを設計し、伝熱解析を行うことで、冷却特性の評価を行い、設計が成立することを確認した。本解析結果の確からしさの検証結果は別報にて詳述する。

### 5. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として実施している。HTS コイルは中部電力(株)の「YOROI コイル」構造の設計を適用している。

Table 1 Analysis condition

Item	Description
Analysis basis	Non-stationary analysis
Initial temperature	300 K
Refrigerator capacity	135 W(50 K) @Cu block
Heat radiation	5 W/ m <sup>2</sup> @side wall
Heat load form current lead	10 W(30 K)～0 W(300 K)

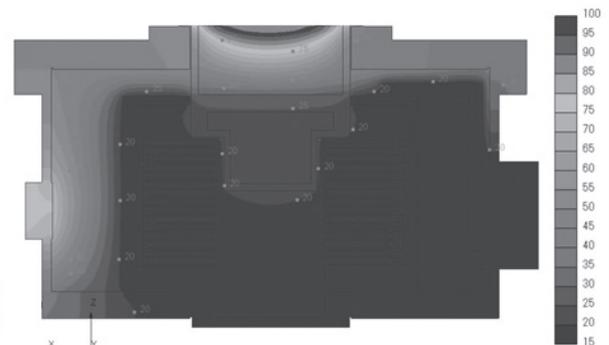


Fig.1 Temperature distribution (SMB)

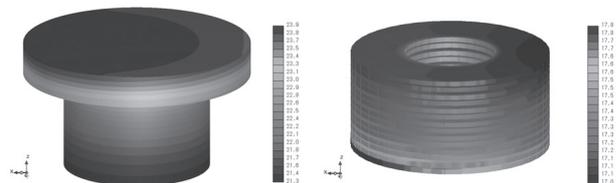


Fig.2 Temperature distribution (REBCO HTS bulk, REBCO HTS coil)

### 参考文献

1. M. Furukawa, et al.: Abstracts of CSSJ conference, vol. 90 (2014) p.27
2. S. Mukoyama, et al.: Abstracts of CSSJ conference, vol. 90 (2014) p.28

## フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発 ～荷重支持試験と異常時を想定した検証試験結果～

Development of Superconducting Magnetic Bearing for flywheel energy storage system  
-Result of load weight test and validate for stable lifting in unusual situation-

中尾 健吾, 松岡 太郎, 古川 真(古河電工); 山下 知久, 宮崎 佳樹, 水野 克俊(鉄道総研)

NAKAO Kengo, MATSUOKA Taro, FURUKAWA Makoto (Furukawa Electric Co., Ltd);

YAMASHITA Tomohisa, MIYAZAKI Yoshiki, MIZUNO Katsutoshi (RTRI)

E-mail: mr251726@mr.furukawa.co.jp

### 1. はじめに

超電導フライホイール蓄電装置(FESS)は超電導磁気軸受(SMB)によってフライホイールを浮上、回転させるため、SMB部でのエネルギー損失が無く、また、摩擦することも無いためメンテナンス性にも優れている。SMBは、ステータ側のREBCO高温超電導コイル(HTSコイル)に通電し、発生磁界とロータ側のREBCO高温超電導バルク(HTSバルク)の完全反磁性により得られる大きな反発力により浮上させる。

今回開発したSMBで4,000 kgのフライホイールをHTSコイル・HTSバルク間の距離20 mmでバランスさせて浮上するにはHTSコイルおよび非接触で浮上するHTSバルクの冷却が可能な伝熱・断熱構造と、4,000 kgの耐荷重性能とを両立する必要がある。

今回、FESS本体に実際に組み込むSMBを完成させ、冷却状態、磁界、浮上力などを実測したためそれを報告する。また、停電など異常事態が発生した場合でも一定時間フライホイールを浮上可能でありフェールセーフとなっていること、約1か月の工場試験において延べ500時間浮上状態を維持できること等を確認検証したので報告する。

### 2. 熱設計の検証

HTSコイルは冷凍機から伝熱板を用いて冷却し、HTSバルクはHTSコイルケース内を満たした10 Paの希薄ヘリウムガスの熱伝導を利用して冷却した。この状態で、HTSコイルとHTSバルクの到達温度を実測し、HTSコイルの伝熱と断熱構造の妥当性を検討した。

Table 1に各部の到達温度を示す。コールドヘッド温度が14.4 Kであることから断熱構造が、HTSコイルとコールドヘッドの温度差から伝熱構造が概ね設計通りであることが検証できた。HTSバルク温度も22.2 Kと希薄ヘリウムガスにより冷却されていることが検証できた。

### 3. 発生浮上力特性

浮上力は、HTSバルクを組み込んだシャフトとHTSコイルを組み合わせて通電し、ひずみゲージで発生荷重を実測し、浮上力換算する方法で特性を確認した。

Fig. 1からHTSコイル温度30 Kでは低電流側では計算値に近い浮上力特性が、定格電流77.0 Aでは計算値の95%に相当する40.3 kNの浮上力が発生する事を確認できた。これにより、SMBが目標の4,000 kgの荷重に耐え、浮上可能と判断した。

50 KではHTSバルクへの磁場侵入が増えることから計算値とのかい離がみられるが、通電電流を80.7 Aに制御すれば39.8 kN(4,000 kg強)の浮上力が得られることも確認している。

### 4. 異常時想定試験

FESSは最大100 kWhの大きなエネルギーをためているため、停電などの緊急時も一定時間浮上を続けられることが必要である。FESSには緊急時のタッチダウン軸受けも設置されているが、冷凍機が停止した場合でも30分間浮上ができるようにHTSコイルの保冷機能を持たせる熱設計をしている。今回、通電中に冷凍機を停止し、温度上昇特性を実験的に確認する異常時想定試験を実施した。

本SMBでの専用電源には30分間通電可能な容量のUPSを備えており、万一冷凍機や圧縮機が停止しても30分間フライホイールを浮上させ続け、その間にフライホイールを安全に停止出来るようなフェールセーフの設計としている。

Fig. 2より、冷凍機を停止した直後から温度が上昇し、30分経過した後も10 K程度の温度上昇であり、今回の熱設計の妥当性を検証できたと言える。

### 5. まとめと今後の展望

FESS用SMBを作製し、HTSコイル・HTSバルクの冷却特性、発生浮上力特性を確認し、停電時などの異常時想定試験での安全確認や500時間超の長時間安定浮上を実証できたことから、本SMB構成は実運用に供せる完成度を有したものだと考えている。今夏より山梨県甲府市の米倉山・太陽光発電所での長時間連続運転試験を実施する予定である。

### 6. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として実施している。HTSコイルは中部電力(株)の「YOROIコイル」構造の設計を適用している。

Table 1 Achieving temperature

Cold head	1st DPC	5th DPC	Bulk
14.4 K	17.2 K	16.5 K	22.2 K

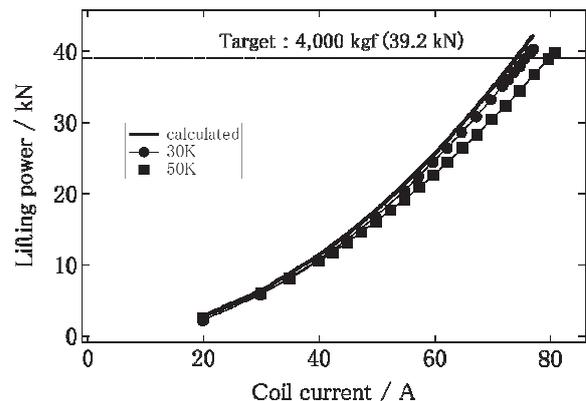


Fig. 1 Current dependence of lifting power

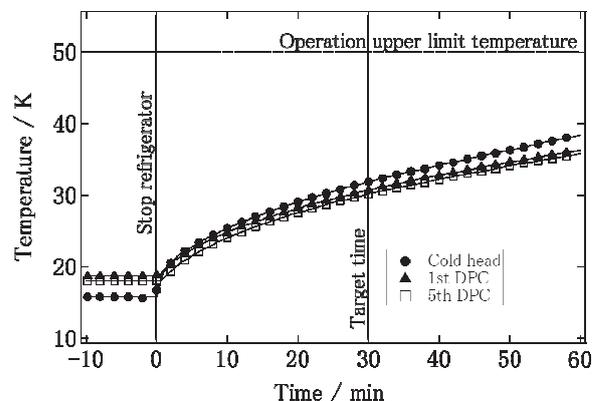


Fig. 2 Time dependence of the temperatures after stop refrigerator

### 参考文献

1. M. Furukawa, *et al.*: Abstracts of CSSJ conference, vol. 90 (2014) p.27
2. S. Mukoyama, *et al.*: Abstracts of CSSJ conference, vol. 90 (2014) p.28

# 超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発 低熱侵入・高速回転荷重支持体の開発

Development of Superconducting Magnetic Bearing for flywheel energy storage system  
High-speed rotor support with a good balance, low heat leak and high stiffness

山下 知久, 宮崎 佳樹, 長谷川 均(鉄道総研); 松岡 太郎, 中尾 健吾(古河電工);

松井 義, 土肥 哲也(松井鋼材); 上島 史生(ステンレスプロダクト);

森本 富治, 徳永 宏, 浅野 幸雄(三星工業)

YAMASHITA Tomohisa, MIYAZAKI Yoshiki, HASEGAWA Hitoshi (RTRI);

MATSUOKA Taro, NAKAO Kengo (Furukawa Erectric Co.,Ltd.); MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya (Matsukoza Co.,Ltd.);

UEJIMA Fumio (Stainless-product, Ltd.); MORIMITO Tomiji, TOKUNAGA Hiroshi, ASANO Yukio (Mitsuboshi-kogyo, Ltd.)

E-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

## 1. はじめに

鉄道総研は、REBCO 高温超電導コイルと REBCO 高温超電導バルク体 (HTS バルク) を組合せた超電導磁気軸受 (SMB) で大質量フライホイールを非接触支持することを特徴とした高温超電導フライホイール蓄電装置を提唱し、現在、NEDO の助成を受けて希薄ガスヘリウム中で 4000 kg の大質量フライホイールを  $3000 \leftrightarrow 6000 \text{ min}^{-1}$  で回転 (加速・減速) させ、100 kWh の蓄電と放電が可能であることを実証するモデル機を開発を進めている [1]。装置内部を 10 Pa @ ガスヘリウムで満たすのは、直径 2000 mm の大質量フライホイールの風損低減および SMB の高速回転ロータ (HTS バルク) を冷却するためである。

今回、高強度で断熱性に優れたアルミナ繊維とエポキシ樹脂からなる複合材料 (AFRP) と直径の異なる 2 種類の HTS バルクを組合せた独自の構成を考案・設計し、直径 161 mm の低熱侵入・高速回転ロータ荷重支持体を開発した。その荷重支持体を組込んだ SMB で 4000 kg の大質量フライホイールを約一カ月間の工場試験期間で延べ 500 時間安定浮上させることに成功したので報告する。

## 2. 開発コンセプト

SMB ロータ荷重支持体が満足すべき条件は以下のとおり

- ① 大径フライホイールの荷重を支え安定浮上できること
- ② 高い同心性を有し、高速回転に対応できること
- ③ 冷凍能力に対して、低熱侵入化を実現できること
- ④ HTS バルクを強固に固定しつつ効率良く冷却できること

## 3. 設計上の特徴

Table 1 に今回開発した荷重支持体の設計諸元を示す。Fig.1 に今回開発した SMB 高速回転ロータの外観を示す。SMB ロータ荷重支持体の設計は、大口径・薄肉 AFRP 筒を介して低温部の HTS バルク [2] を収納する GFRP ホルダーと SUS 製の常温側フランジが組合せることで大荷重と断熱性を両立し、高速回転に対応するため低温側ホルダーと常温側フランジを直結する AFRP ロッドを回転中心部に配置し、断熱性と高い同心性を両立することが特徴である。大口径・薄肉 AFRP 筒は、この開発の最終目標の仕様 (最大荷重 10,000 kg) に対応可能な設計とするため、肉厚を  $t=2.5 \text{ mm}$  と設定しフィラメントワインディング法により部品製作した。その圧縮強度は 30,000 kg 弱であることを実験的に検証し、最大荷重 10,000 kg に対して強度余裕があることを確認できたと考えている。

なお上述の AFRP ロッドは前報の SMB ステータ REBCO 高温超電導コイル内槽の荷重支持材と同仕様のものである。

## 4. 検証試験内容と結果について

荷重支持体の開発検証試験として、回転バランス調整試験、熱侵入試験、荷重試験、高速回転試験を行い、荷重支持体の単体特性を確認した後、モデル機に組み込み、超電導フライ

ホイール蓄電装置における SMB の総合試験を進めている。

Table 2 にこれまでに確認されたおもな検証結果を示す。

総合試験で実施した延べ 500 時間超の SMB の浮上安定性検証試験等の詳しい試験結果については当日報告する。

## 5. 今後の予定

今回開発に成功した SMB 高速回転ロータ荷重支持体を組んだ 100 kWh の蓄電・放電実証モデル機の米倉山太陽光発電所における連続運転試験を通じて、SMB の運用に関するベースデータを取得・蓄積し、信頼性・耐久性検証の考察に役立てていく。

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業として実施している。

Table 1 Specifications of SMB high speed rotor support

Maximum load	10,000 kg
Maximum speed	$7,000 \text{ min}^{-1}$
Levitated gap	20 mm
HTS bulk for levitation	dia. 120 × t20 mm, 1 peace
HTS bulk for guidance	dia. 90 × t20 mm, 2 peace
Temperature of HTS bulk	Less than 65K
Heat load	Less than 3W
Diameter	dia. 161 mm
Length	Around 385 mm

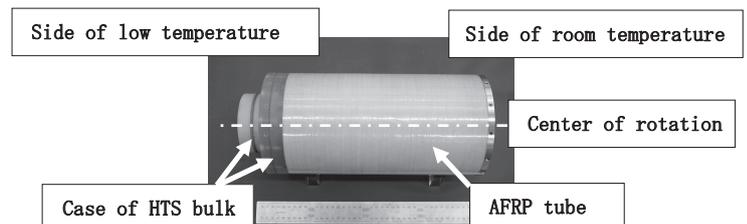


Fig.1 Outside view of SMB high speed rotor support

Table 2 Test result of SMB high speed rotor support

Test item	Result
Balance adjusting test	○ Less than G2.5 @ $1,000 \text{ min}^{-1}$
Heat load test	○ Around 3W
Maximum load test	○ 4,000 kg
Maximum speed test	○ $7,200 \text{ min}^{-1}$

## 参考文献

1. H. Hasegawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.26
2. E. Teshima, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 46 No. 3 (2011) p.73

# フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発 ～磁気軸受低発熱化対策～

## Development of Superconducting Magnetic Bearing for flywheel energy storage system - Measures to Eddy Current Heating at HTS Magnetic Bearing -

宮崎 佳樹, 山下 知久, 長谷川 均, 荒井 有気 (鉄道総研); 松岡太郎, 中尾健吾 (古河電工); 石原 照正, 貝森 弘行 (サイエンスソリューションズ); 松井 義, 土肥 哲也 (松井鋼材); 上島 史生 (ステンレスプロダクト) MIYAZAKI Yoshiki, YAMASHITA Tomohisa, HASEGAWA Hitoshi, ARAI Yuuki (RTRI); MATSUOKA Taro, NAKAO Kengo (Furukawa Electric Co., Ltd.); ISHIHARA Terumasa, KAIMORI Hiroyuki (Science Solutions International Laboratory, Inc.); MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya (Matsukozai Co., Ltd.); UEJIMA Fumio (Stainless Product, Ltd.)  
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

### 1. はじめに

REBCO 高温超電導バルク(以下, バルク)とREBCO 高温超電導コイル(以下, コイル)を組み合わせ, 4,000 kg のフライホイールロータを浮上・回転させる超電導磁気軸受を開発した [1, 2]. 超電導磁気軸受回転時には, 振動などによりダブルパンケーキ間の冷却銅板に渦電流が生じて発熱する可能性がある。電磁界解析の結果, 5つの冷却銅板のうち, バルクに近い2枚の冷却銅板の渦電流発熱が, 他の銅板と比較して大きいことがわかった。そこで, 銅板をメッシュ材に変更し低発熱化を行ったので報告する。

### 2. 超電導磁気軸受

フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受構成を Fig. 1 に示す。超電導磁気軸受はロータ側にバルク(直径 140 mm: 1 個, 直径 90 mm: 2 個), ステータ側にコイル(5 ダブルパンケーキ)を使用している。超電導磁気軸受はゼロ磁場冷却後, 超電導コイルに通電することで反磁性による反発力でロータを非接触浮上させる。超電導磁気軸受のメカニカルクリアランスは上下方向に約 20 mm, 径方向に約 2 mm となっており, 高荷重かつ大きなギャップを保っている。

### 3. 冷却銅板の渦電流対策

冷却銅板の渦電流対策を講じるため, 電磁界解析による渦電流発熱の見積りを行った。電磁界解析にはサイエンスソリューションズの EMSolution を用いた。バルクがコイルに対して上下運動, 偏芯運動, コニカル運動をした場合の解析から, 5枚の冷却銅板のうちバルクに近い2枚に渦電流発熱が集中することがわかった。上下方向に振動した場合の, 冷却銅板の渦電流発熱量を Fig. 2 に示す。振動周波数は 100 Hz, 最大変位は±2 mm とした。分割数を増やすと 10 分割付近で最大となり, それよりも分割数を多くすると損失が小さくなる傾向となった。そこで, この上部 2 枚の冷却銅板を, 直径 1 mm の銅線をポリエステル繊維で織り込みメッシュ状としたものに変更した(冷却銅板 280 分割に相当, Fig. 3)。

開発した銅メッシュ材の熱伝導特性を Fig. 4 に示す。メッシュ材は超電導磁気軸受運転温度域の 20 K~50 K で 150 W/(m・K)以上の熱伝導率を有しており, コイルの冷却に十分な性能を有している。

完成した実証機のロータ浮上試験時におけるコイル温度変化については, 当日報告予定である。

本研究は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として実施している。

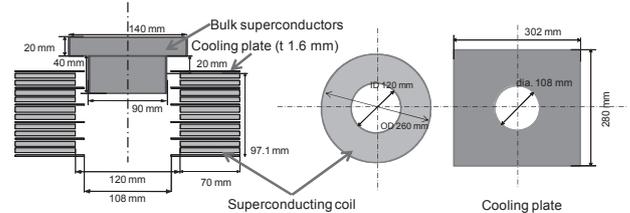


Fig. 1 Analyzed model of superconducting magnetic bearing (SMB).

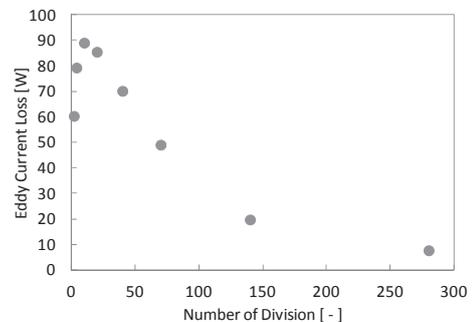


Fig. 2 Results of heat generation for various division number.

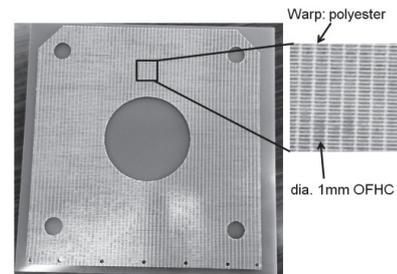


Fig. 3 Photograph of 280-divided cooling plate.

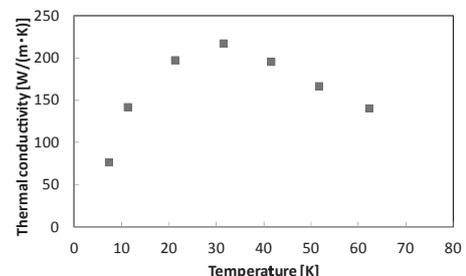


Fig. 4 Thermal conductivity of 280-divided cooling plate.

### 参考文献

- [1] Y. Arai, et al., Abstracts of CSSJ Conference **87**, 89 (2013).
- [2] H. Hasegawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, **90**, 26 (2014).