

# 空圧アクチュエータを使用した磁気力計測器の開発

## Development of magnetic force measuring instrument with the pneumatic actuator

佐保 典英, 小野 瑞絵 (クライオイン)  
 SAHO Norihide, ONO Mizue (LLC CRYOIGN)  
 E-mail : norihide\_saho@ybb.ne.jp

### 1. はじめに

近年、急速な進展を示す再生医療分野において、磁気力を使用した軟骨や骨の再生医療の研究が進められている[1]。膝関節の軟骨の治療では、患者自身の幹細胞内に造影剤の鉄の粒子を導入させ、体外から電磁石や永久磁石を使ってこの磁性幹細胞を患部に導き再生治療する臨床研究が、治療試験（治験）で精力的に行われている。現状では、磁石の磁界内で磁性幹細胞の注入部位から誘導先への細胞の軌跡を、内視鏡等で確認して試験を行っている。しかし、多数のデータを整理する場合、磁気力の重要なファクターである磁気力係数を定量的に把握し、治療効果を比較検討することが重要になると考えられる。

本報告では、磁場中に配置した磁気センサーを、安価な空圧アクチュエータで位置制御する構造[2]を提案し、2点間の磁束密度を短時間に計測して磁気力を数値化する基礎的計測方法を検討する。

### 2. 磁気力係数計測方法

磁気力  $F_m$  [N] の計算式を (1) 式に示す。体積が  $V$  [m<sup>3</sup>] の磁性粒子が置かれた磁場空間の磁束密度  $B$  [T] とすると、磁気力  $F_m$  は、 $B$  とその場の磁気勾配  $\Delta B$  [T/m] の積（以下、磁気力係数  $f_m$  [T<sup>2</sup>/m] と記す）に比例する。式中  $\chi$  は磁化率[-]、 $\mu_0$  は真空透磁率[N/A<sup>2</sup>]である。

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

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

$f_m$  の計測は、磁石から距離  $L_a$  離れた位置での微小移動距離  $\delta L$  離れた2点 a, b の磁束密度  $B_a, B_b$  を磁気センサーで計測し、その差分を  $\delta L$  で除して磁気勾配  $\Delta B_{ab}$  を算出し、前記  $B_a, B_b$  の平均値  $B_{ab}$  との積値で算出する。

本研究では、図1の構成図および挿入写真に示すように、1個の磁気センサーを非磁性の空圧アクチュエータ先端に取り付け、ミニエヤーポンプからチューブで供給される圧縮空気でゴム製の可動体を膨らませる。この膨張により、所定の  $\delta L$  を確保した拘束体内の移動台で磁気センサーを短時間で移動させ、移動前後の  $B_a, B_b$  を計測して  $f_m$  を算出した。

### 3. 計測結果

磁束密度約 0.5 T のネオジウム磁石（サイズ 10 mm 立方）の磁場中に配置された、空圧アクチュエータと磁気センサーの仕様を表1に示す。電圧 2.4 VDC の汎用ミニエヤーポンプの作動前後における、移動台の実移動距離  $\delta L$  を最小目盛 1  $\mu$ m のダイヤルゲージで計測した結果、平均 231  $\mu$ m であった。

磁石表面から垂直方向距離  $L_a$  における、測定結果を表2に示す。 $L_a=0.45$  mm での  $B_{ab}$  は 0.473 T で、 $f_m$  は 53.92 T<sup>2</sup>/m であった。これは前回の圧電アクチュエータを用いた測定値[3]とほぼ一致している。また、 $L_a=4.30$  mm では  $B_{ab}=0.158$  T、 $f_m=7.31$  T<sup>2</sup>/m、 $B_a, B_b$  の差分は 10.7mT で十分大きくとれ、 $\Delta B_{ab}$  の精度向上に寄与している。これは  $\delta L_a$  を大きく確保できたためであり、移動距離が小さい圧電アクチュエータより有利な点である。また、水平に設置したアルミニウム板上に静置させた直径 3 mm の鉄球に、球中心の水平方向から同磁石を近づける際の球の転がり始めの磁気力を検討した。実験から求めた転がり

始めの位置における  $B_a, B_b$  の差分、 $\Delta B_{ab}$  および  $f_m$  は、それぞれ 0.10 mT、0.43 T/m、 $1.9 \times 10^{-3}$  T<sup>2</sup>/m で、磁気センサーの分解能で測定可能な差分値を確保できた。以上の計測で、ミニエヤーポンプの空圧脈動の影響は無かった。

本アクチュエータの構造により、差分の値に磁気センサーの0点シフトの影響をほとんど受けないので精度良く  $f_m$  を算出でき、小さい磁気力域において、磁気力の計測を良好に行える見通しを得た。本性能により、強磁場磁石の漏洩磁場内でスパナ等の磁性体を使用する際、磁気力による吸引事故の危険度を定量的に検知し、警報を発することが可能となる。

### 4. まとめ

本研究の構成によれば、低電圧で駆動する空圧アクチュエータで1個の磁気センサーを移動させ、磁場中の2点間の磁束密度を計測して磁気力係数を算出できるので、安価で高精度の携帯型磁気力計測器を提供できる。

Table 1 Specifications of the pneumatic actuator and a magnetic sensor.

Actuator	Amount of displacement ( $\mu$ m)	Power source (VDC)	Size of the actuator part (mm)	Air pump discharge pressure (kPa)
	231	2.4	$\Phi 30 \times 29$ (H)	45
Sensor	Type of sensor	Size of sensor (mm)	Analytical Ability (Measuring Range) (mT)	
	Hall element	4(W) $\times$ 1.2(t)	0.01(0~300), 0.1,1 (~999)	

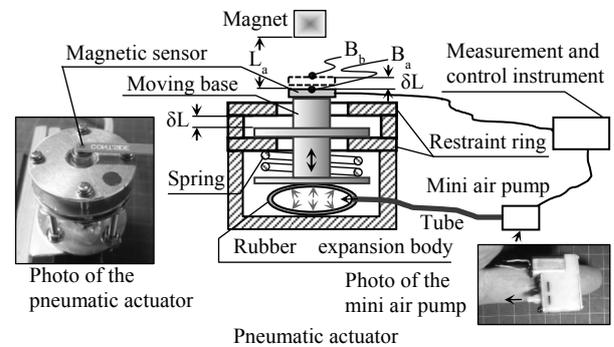


Fig. 1 Illustration of measuring device of the magnetic flux density between two points with a magnetic sensor using the pneumatic actuator.

Table 2 Experimental results.

$L_a$ (mm)	$B_{ab}$ (T)	$\Delta B_{ab}$ (T/m)	$f_m$ (T <sup>2</sup> /m)
0.45	0.473	114.00	53.92
1.30	0.385	101.01	39.00
2.30	0.295	86.58	25.54
3.30	0.224	69.26	15.51
4.30	0.158	46.75	7.31

### 参考文献

1. M. Ochi : JST Regenerative medicine based network implementation program report p.69 (2013)
2. N. Saho, M. Ono : Japanese Patent Application No. 2016-04576 (2014)
3. N. Saho, M. Ono : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 9 (2014) p. 75

## 120 K 付近の氷エレクトレットの脱分極電流特性

### The depolarization current characteristics of ice electret around 120 K

大鹿 佳子, 土屋 雄大, 村本 裕二(名城大学)

OSHIIKA Yoshiko, TSUCHIYA Yudai, MURAMOTO Yuji (Meijo University)

E-mail: 143441503@c alumni.meijo-u.ac.jp

#### 1. はじめに

氷は低環境負荷材料であり、低温で安定な材料である。本研究では、これまで氷を極低温における誘電・絶縁材料としての応用について検討してきた[1-3]。極低温では、強誘電性をもつ氷として氷 XI が存在するが、作製は大変困難である[4]。著者らは、氷 XI と同様に分極を保持した氷を作製するために、氷に直流電界を印加することで氷中のプロトンを負電極側へ移動させ、そのまま 77 K まで冷却することでプロトンの動きを固定し、氷中に分極を保持させた[3]。このように電界を印加したまま冷却し、分極を保持させた物質をエレクトレットと呼ぶため、この氷を氷エレクトレットと呼ぶ。これまで筆者らは、氷エレクトレットを作製し、温度上昇による脱分極電流から蓄積電荷量について報告してきた[3]。今回は、氷エレクトレットの脱分極電流特性を詳しく観測し、120 K 付近での脱分極電流と印加電界および印加時間の関係について検討したので報告する。

#### 2. 実験方法

実験には、ステンレス製の平行平板電極系を使用した。高電圧側電極の直径は 25 mm、接地電極の直径は 16 mm、その周囲に外径 26 mm、内径 18 mm のガード電極がある。電極間距離は室温下で 1.0 mm とした。

試料は、電極間を蒸留水で満たし 4 時間以上かけて冷凍庫内にて 253 K まで冷却することで作製した。作製した試料に 253 K で直流電界印加を一定時間行なった後、電界を印加したまま 77 K まで冷却した。77 K への冷却は、液体窒素蒸気を使って 3 時間かけて行った。試料を液体窒素中に浸漬した後、電界印加を停止した。その後、試料を液体窒素内から室温環境下の電磁シールド内に入れ、試料を昇温させながら脱分極電流の時間依存性を測定した。印加電界をポーリング電界と呼び、30 ~ 700 V/mm、253 K での電界印加時間をポーリング時間と呼び、3 または 12 時間とした。

#### 3. 実験結果と考察

Fig. 1. に氷エレクトレットの脱分極電流の時間依存性を示す。図中の温度は、ダミー試料を用いて測定したものである。電界印加試料で電流がピークを示した温度は、約 270 K であり、電流値は約 250 nA であった。無印加試料では、明確な電流のピーク値は観測されなかった。このことから、電界印加試料内のプロトンは、電界印加と冷却によって負電極側に偏ったまま固定され、電流がピーク値を示した約 270 K で最も動きやすくなったと考えられる。Fig. 2. に Fig. 1. の測定開始から 50 分までの電流値を拡大したときの特性を示す。電界印加試料の電流は、約 126 K で約 430 pA のピーク値を示し、約 215 K 付近から再び Fig. 1. のピークまで上昇した。無印加の試料では、約 232 K で電流の起伏が観測された。この原因については現在検討中である。Fig. 3. に、126 K 付近の電流のピーク値を積分し、得られた電荷量のポーリング電界およびポーリング時間依存性を示す。電荷量は、ポーリング時間に対して明確な依存性は得られなかったが、ポーリング電界とともに増加する傾向を示した。これは、126 K 付近で解消される分極が存在し、この分極の形成には、ポーリング時間は 3 時間程度必

要であることが示唆された。今後は、126 K 付近と 270 K 付近で解消する分極について検討する。

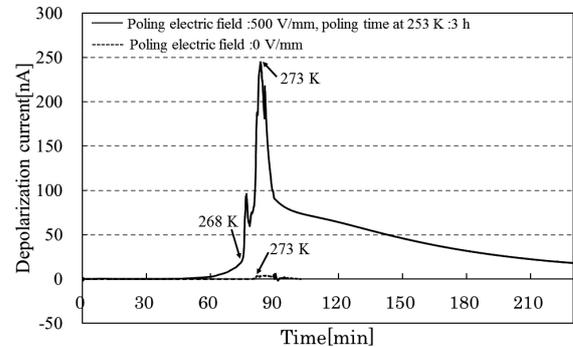


Fig. 1. Time dependence of depolarization current of ice electret (77 - 294 K)

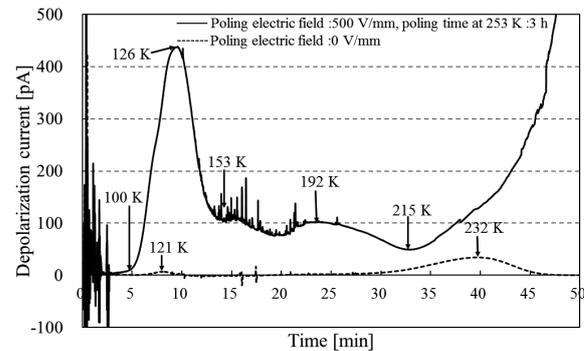


Fig. 2. Time dependence of depolarization current of ice electret (77 - 247 K)

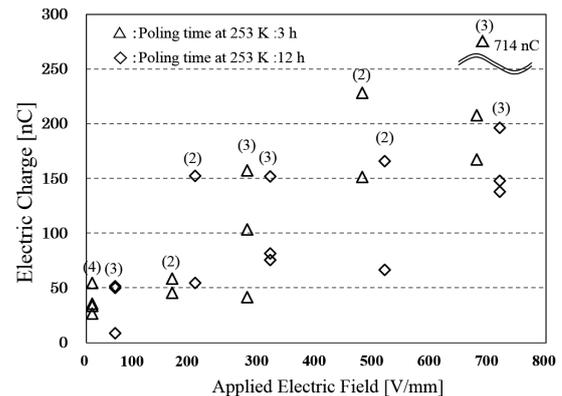


Fig. 3. Electric charge as a function of poling voltage and poling time around 126 K

#### 参考文献

1. Y. Shiji, Y. Muramoto and N. Shimizu : IEEE Trans. Dielect. Electrical Insulation, Vol.14, No.2, (2007), pp.296-301.
2. R. Tsuchiya, Y. Muramoto and N. Shimizu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol.51, No.1, (2016), pp9-14
3. Y. Oshika, T. Hashimoto, Y. Muramoto, N. Shimizu: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol.51, No.1, (2016), pp15-20.
4. G. Malemkov, J. Phys.: Condens. Matter. Vol.21, No.28, 283101, 2009.

## 極低温環境下での可視化技術の開発

Development of the technology that can visualize object at cryogenic temperature

杉野 元彦, 水野 克俊, 田中 実, 小方 正文

Motohiko SUGINO, Katsutoshi MIZUNO, Minoru TANAKA, Masafumi OGATA

E-mail: sugino.motohiko.79@rtri.or.jp

### 1. 諸言

超電導機器の運用中に振動や温度等で異常な計測値が発生した場合、運用を停止して内部の状態を実際に目視確認する必要がある。このためには、昇温処置や機器の分解など多くの作業を要することになる。超電導技術の産業機器への実用化を考えた場合、運用停止せずに内部の状態を確認できる技術は有用であり、過去、真空槽内の可視化技術の開発が行われた [1,2]。

鉄道総研では、磁気浮上式鉄道用超電導磁石開発の中で、例えば振動や冷却昇温サイクル等の負荷を受ける液体ヘリウムや液体窒素用低温配管の状態監視を想定し、極低温環境下での可視化技術の検討を進めてきた。過去に光ファイバとCCDカメラを用いた可視化試験を実施して、両方式の有効性を確認しており [3,4]、今回、CCDカメラを対象として各種耐久試験を実施したので報告する。

### 2. ヒートサイクル試験

極低温環境下での実用を想定した場合、冷却、昇温を繰り返すことで素子や基盤の損傷が進行し、受像が不可能となる可能性がある。このため、ヒートサイクル試験により、CCDカメラの冷却昇温の繰り返しに対する耐久性の検証試験を実施した。

CCDカメラ(720×540 画素)とLEDライトを取り付けたアルミ板のベースを真空槽内に設置し、300 mm 程度離れた冷却ステージ全体を確認できるように配置した。

また、光ファイバ温度センサ(直径 0.15 mm)を CCD カメラから 300 mm 程度離れた冷却ステージ内に設置し、受像状態の確認対象とした。そして、以下のサイクルを 15 回繰り返し、機能の評価を行った。

[試験サイクル]

- ① CCDカメラを含めた試験体を 20K 以下まで冷却
- ② ヒータにて CCDカメラのベースを CCD 動作温度の 250 K まで温度調節
- ③ 受像状態を確認
- ④ 20 K 以下まで再冷却し、温度安定後、室温まで昇温

Fig.1 として、繰り返し試験終了後の受像結果を示す。15 回の繰り返し後も CCD カメラは良好な受像状態を維持した。受像した画像は鮮明であり、全体の様子とともに、光ファイバ温度センサ(図中央部矢印)の様子も明確に確認することができた。

### 3. 振動試験

実際の低温機器では配管によって生じる振動や装置本体の剛性による振動などが発生するため、さまざまな振動環境での計測が考えられる。

そのため加振器を用いて加振試験を行い、振動による回路損傷や断線を想定した耐久性の検証試験を行った。試験条件は鉄道の振動条件を基準に±15Gとし、5 時間毎に受像状態の確認を行い500 時間の加振を行った。

試験の結果、CCD カメラは常に良好な受像状態を維持し続け、試験後も正常に動作した。これにより、振動環境でも十分な耐久性を持つことを確認した。

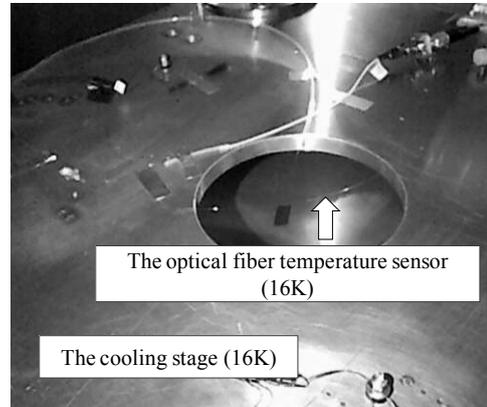


Fig.1 The image in a cooled vacuum vessel at 16 K after the repeated cooling test

### 4. 冷媒浸漬試験

真空槽内以外の可視化の適用箇所として、冷媒タンク内などの低温冷媒設備がある。当該箇所で使用する場合、冷媒に曝されるため、ヒートショックに対する耐久性が必要となる。その検証として冷媒浸漬試験を実施した。

試験では、液体窒素を満たした容器内に、CCD カメラを入れて 77 K まで急冷し、後引き上げて室温まで自然に温度上昇させるサイクルを 3 回繰り返した。3 回とも、CCD カメラは 250 K 付近で信号が回復し、受像可能な状態となった。

### 5. 結論

CCD カメラの耐久性試験を行い、ヒートサイクル、振動、冷媒浸漬に対する耐久性を確認した。

真空槽内の可視化試験では 20 K まで冷却した直径 0.15 mm の光ファイバ温度センサの本体細線を確認し、受像状態も非常に良好であった。

CCD カメラは、ユニバーサル・シリアル・バス接続タイプを用いることで、配線数を 4 本に簡素化できる、配線を共用して増設しやすい等のメリットもある。今後も実際の使用環境を模擬した試験を行い性能の評価を行う。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

### 参考文献

1. K. Hashi, et al.: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, Vol.48 (2013) p.607
2. S. OHKI, et al.: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, Vol.48 (2013) p.614
3. H. Yamada, et al.: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, Vol.48 (2013) p.603
4. H. Yamada, et al.: Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, Vol.48 (2013) p.611

# 鞍型ピックアップコイル法による REBCO 超伝導テープ線材の磁化・交流損失特性の評価

## Observation of magnetization and AC loss of REBCO superconducting tapes by saddle-shaped pickup coil

伊藤 哲也, 上野 達人, 岩熊 成卓(九州大学); 町 敬人, 衣斐 颯(ISTEC); 和泉 輝郎(AIST)  
 ITO Tetsuya, UENO Tatsuhito, IWAKUMA Masataka(Kyushu Univ.); MACHI Takato, IBI Akira(ISTEC); IZUMI Teruo(AIST)  
 Email:ito-t@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導線材を交流電力機器に応用する際、超伝導巻線部分で発生する交流損失が冷凍機にかかる全熱負荷の大部分を占める。また、酸化物超伝導テープ線材の交流損失は線材の温度、磁界の印加角度、積層枚数に依存するため、様々な条件における損失の見積が重要になる。

今回 BaHfO を添加した EuBCO+BHO 超伝導テープ線材について、積層枚数を変えた場合の交流損失特性を鞍型ピックアップコイル法により測定し、温度スケール則が適用できることを確認し、積層枚数 1 枚の場合の交流損失から、他の積層枚数の場合の交流損失を予測する手法について検討した。

### 2. 線材諸元と試験方法

試料の諸元を Table.1 に示す。これを 1,3,6 枚積層し、鞍型ピックアップコイル法を用いて測定した。冷凍機による伝導冷却を用いて 25K,40K,50K,64K,77K まで冷却し、磁界をテープ面に対して垂直で印加した。

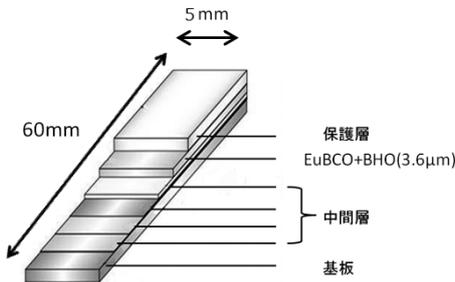


Table. 1 Specifications of EuBCO+BHO tapes

Width	5mm
Length	60mm
Thickness of EuBCO+BHO layer	3.6 μ m
filaments	Nothing

### 3. 実験結果

各積層枚数、40K における交流損失の測定結果を Fig.1 に示す。積層枚数が増加するにつれて、交流損失は磁界振幅が中心到達磁界より小さい領域では、積層枚数増加に伴い交流損失の低下がみられる。しかし、中心到達磁界を超える領域では、交流損失は積層枚数にほとんど依存しないことが分かった。

また、積層枚数 6 枚の場合の交流損失特性に温度スケール則を適用した結果を Fig.2 に示す。また、印加磁界が中心到達磁界より小さいときの、1 枚の場合の交流損失に対する、3 枚の場合の交流損失及び 6 枚の場合の交流損失の比を表し

た図を Fig.3 に示す。これを見ると n 枚の場合の交流損失は、1 枚の場合の交流損失の n 分の 1 であることがわかる。

### 4. まとめ

以上の結果より、今回の EuBCO+BHO 線材に対しても積層枚数によらず、温度スケール則が適用可能であり、積層枚数を変化させた場合の交流損失は、積層枚数 1 枚の場合の交流損失から予測できることがわかった。

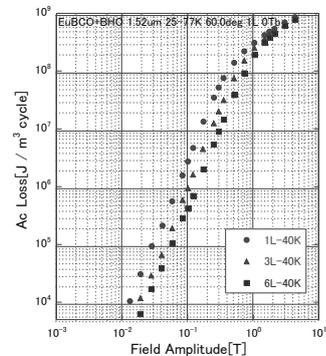


Fig. 1 AC losses of EuBCO+BHO tapes at 40K

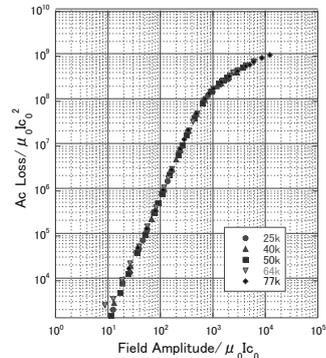


Fig. 2 Temperature scaling of AC losses of EuBCO+BHO with 6 stacked tapes.

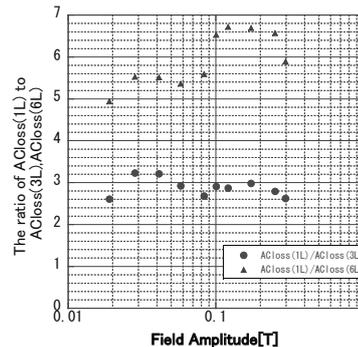


Fig.3 The ratio of ACloss(1L) to ACloss(3L),ACloss(6L)

# 強磁性体を用いた HTS テープ線材臨界電流の向上

## Decreasing of self-magnetic field of HTS tapes with ferromagnetic coating

VYATKIN Vladimir (中部大); 柏木啓 (九工大); 平松佑太 (九工大); SUN Jian (中部大); IVANOV Yury (中部大);  
小田部 莊司 (九工大); 山口 作太郎 (中部大)  
E-mail: vyatkin@isc.chubu.ac.jp

### 1. Introduction

In the last years, it appears interest to the superconducting machines such as aircrafts with superconducting motors [1]. For these devices, it is need to transport electrical energy to the superconducting motors. In this case it is preferable to use the superconducting wire with transport current of about 200 A.

Modern HTS conductors have the tape form and HTS has the sharp dependence of critical current density vs. perpendicular magnetic field. For example, the critical current density of Bi2223 tape decreases by about 3 times from  $8 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$  at zero magnetic field till  $3 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$  at the magnetic field of  $2.5 \times 10^{-2} \text{ T}$  [2]. Such field under transport current 200 A appears at the edge of HTS tape with 4 mm width.

For providing of working temperature around HTS tape, it is necessary to use the cryostat with liquid nitrogen. For elimination of scattered magnetic field, one of the element of the cable can be the ferromagnetic shield which can deform the self-magnetic field of the tape with current, and on the surface of the HTS tape the magnetic field is almost zero.

### 2. Calculation

The calculation by the program FEMM shows that the ferromagnetic shield around the HTS tape should be like shown on Fig. 1. Near the sides of tape, the gap in the ferromagnetic screen is located. In the calculation, the parameters  $a = 1.5 \text{ mm}$ ,  $b = 1.1 \text{ mm}$  and  $c = 4 \text{ mm}$  are used, and they do not depend on the width of the tape and value of transport current. By variation of parameter  $a$  and  $b$  it was found the optimal ratio of  $a:b:c$ . The dependence of perpendicular magnetic field in the cross section of the tape for different parameters is shown in Fig. 2. It should be noted that the transport current is uniform and maximum in the HTS tape at the optimal ratio between  $a$ ,  $b$  and  $c$ , because it provides the minimum of self-magnetic field.

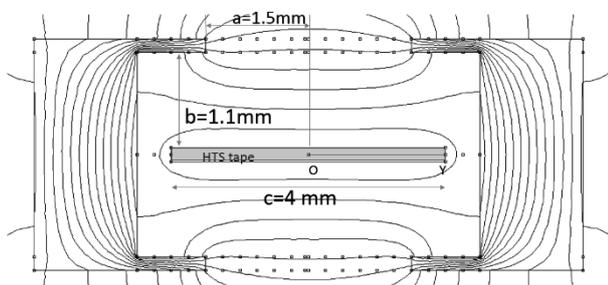


Fig. 1. The FEMM calculation of magnetic field around HTS tape with ferromagnetic screen.  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - parameters of tape, screen and gap. OY is the axis for the calculation of the perpendicular component of magnetic field shown in Fig. 2.

This research discussed also the twisting of the HTS tape. In Fig. 3, it is shown the twisted tape. The JMAG calculation shows that the magnetic field dependence on the edges becomes smooth by the twisting (dotted plots of the Fig. 2).

The twisting like in Fig. 3 improves the characteristics of the cable.

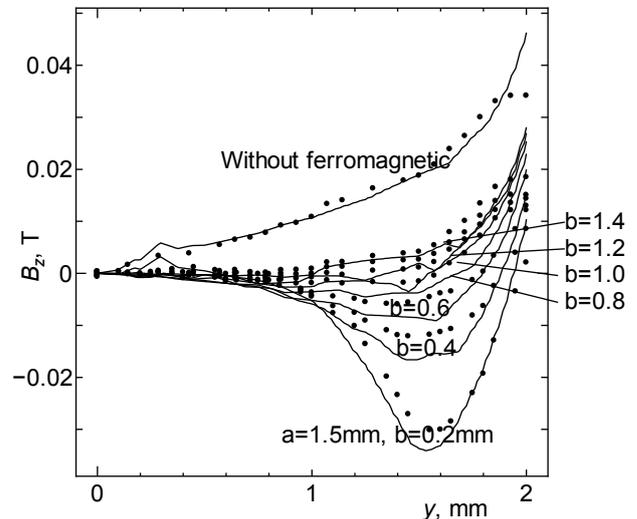


Fig. 2. The finite element method calculation of magnetic field distribution in the cross section of the tape. From the center ( $y = 0 \text{ mm}$ ) till edge ( $y = 2 \text{ mm}$ ).



Fig. 3. The twisting of the 4mm tape in the JMAG calculations.

In the present work we also discussed the influence of ferromagnetic shield on the self-magnetic field of the cable with two opposite current direction HTS tapes. In this case, the ferromagnetic ribs along the gap between tapes exhibit the optimum effect, and the shield on the side of HTS tape is not obligatory

### 3. Conclusion

The present work contains the optimization of the ferromagnetic screen around the HTS tape for the minimization of scattered magnetic field. It was found the optimal ratio between parameters of screen for the 1 tape and 2 opposite directed tapes cable. Also it is calculated the influence of twisting on the characteristics of such cables. It was found that twisting improved uniformity of magnetic field acting on the tape.

### References

- [1] S. Fetisov et. al., Development and characterisation of a 2G HTS Roebel cable for aircraft power systems, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 26 (2016) <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2016.2549036>.
- [2] T. Matsushita, World Scientific Series in Applications of Superconductivity and Related Phenomena. Edited by Kenichi Sato. Volume 1. Chapter 1.4. pp. 39-48. Electro-Magnetic Properties of Bi-2223 Wires. [http://dx.doi.org/10.1142/9789814749268\\_0004](http://dx.doi.org/10.1142/9789814749268_0004).

## クエンチ検出機能を備えた LTS/HTS ハイブリッドテープ線材の提案

## Proposal of Quench Detectable LTS/HTS Hybrid Superconducting Tape

泊瀬川 晋, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)

HASEGAWA Shin, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: shase@karma.qse.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

現在、超伝導線材のクエンチの検出方法としては、線材の電圧を直接計測する方法が一般的であるが、高温超伝導 (HTS) 線材を対象とした場合、検出可能な電圧が微小であるという課題がある。また、光ファイバーを用いたクエンチの検出方法も提案されているが、50 K 以下の極低温においては検出精度が低下するという課題がある[1, 2]。本研究では、RE 系 HTS 線材に、クエンチ検出用の低温超伝導体(LTS)を組み込んだ、LTS/HTS ハイブリッドテープ線材を提案する。新型線材では、極低温で LTS の電圧から十分にクエンチの検出ができる可能性がある。本報告では新型線材のコンセプトを述べ、また LTS に NbTi を使用した場合の新型線材のクエンチ検出性能の評価結果および新型線材のクエンチ検出性能の LTS の熱物性依存性の評価結果について報告する。

## 2. LTS/HTS ハイブリッドテープ線材

LTS/HTS ハイブリッドテープ線材は、液体 He 等の極低温冷媒による冷却環境下での使用を対象としたものである。LTS/HTS ハイブリッドテープ線材の概念図を Fig. 1 に示す。まず、クエンチ検出機能を担う、周囲の領域と電気的に絶縁された LTS に検査電流を流しておく。電流輸送を担う HTS 中において、常伝導部が発生した場合、輸送電流はその領域を迂回して、安定化層に流れる。安定化層で生じた Joule 熱が LTS に伝導し、LTS 内で常伝導部伝播が生じれば、LTS での電圧をモニターすることで、HTS でのクエンチを間接的に検出することが可能となると考えられる。

## 3. 数値解析

まず、例として LTS に NbTi を、HTS に YBCO を使用した場合の新型線材のクエンチ検出性能を評価するために数値解析を行った。次に、新型線材のクエンチ検出性能は、LTS の熱物性および電気物性が支配していると考えられるため、今回は、新型線材のクエンチ検出性能の、LTS の比熱依存性および熱伝導率依存性を評価するために数値解析を行った。Fig. 2 に示すように、HTS、銅、LTS を重ねたものをハイブリッド線材の簡易的な 2 次元解析モデルとした。数値解析では、温度場と電流分布の連成計算を、自作コードを用いて行った。まず、有限体積法を用いて 2 次元熱伝導方程式より全体の温度場を計算し、LTS 内では、臨界温度以下では微小な値、臨界温度以上では常伝導状態の値となる抵抗率の分布から、電流分布を計算した。また HTS と銅の体系内では、HTS 内の臨界電流密度を超えた分の電流が銅に流れるように操作した。以上の計算を収束するまで繰り返し、最終的に電流密度と抵抗率の積を積分することで電圧分布を計算した。境界条件は、Fig. 2 に記載した通りである(4.2K 冷却を仮定)。また、本解析においては各層間の界面熱抵抗は考慮していない。さらに、HTS でクエンチが生じた場合の解析を行うため、HTS 内で局所的に臨界電流密度を 90%低下させ、最初にその部分で電流が銅層に迂回する条件を設定した。また、LTS、銅、HTS の密度は  $6500.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $9021.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $6222.9 \text{ kg/m}^3$  とし、各物質の熱伝導率および比熱の温度依存性は文献[3-7]を参考にした。そして、LTS(常伝導状態)、銅の電気抵抗率は、4.2K での値が  $5.59 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ,  $5.33 \times 10^{-13} \Omega\text{m}$  となる温度の一次関数とした。

Fig. 3 に LTS に NbTi を、HTS に YBCO を使用した場合の、HTS の中心部での最大温度および LTS での検出電圧の時間変化の解析結果を示す。Fig. 3 に示すように、HTS で急激な温度上昇が生じる前に、LTS において銅層よりも高い電圧が検出できるという結果となった。新型線材のクエンチ検出性能の、LTS の熱物性依存性の評価結果については、発表当日に報告する。

## 4. まとめ

本報告においては、クエンチ検出機能を備えた新型のテープ線材を提案し、LTS に NbTi を、HTS に YBCO を使用した場合の、新型線材の検出性能について、数値解析を用いて検証した。今後はさらに、新型線材の性能に影響を与えるパラメータについて検証する。

## 参考文献

1. M. Turenne, et al.: 23rd IEEE/NPSS SOFE (2009)
2. H. Yamada, et al.: Physica C, Vol. 471, (2011) pp. 1570-1575
3. J. E. Jensen, et al.: "Bubble Chamber Group Data Handbook - Selected Cryogenic Data Notebook" (1966)
4. M. N. Wilson, "Superconducting Magnets" (1983)
5. M. Ikebe, et al.: Appl. Phys., Vol. 33, (1994) pp. 4971-4976
6. H. Brechna, "Superconducting Magnet System" (1973)
7. E. D. Marquardt, et al.: 11th ICC (2000)

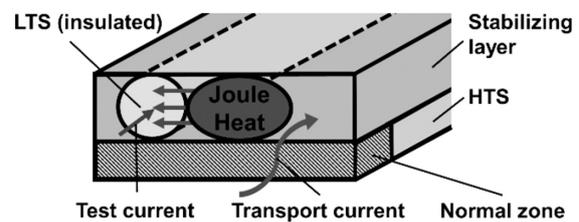


Fig. 1 LTS/HTS hybrid superconducting tape

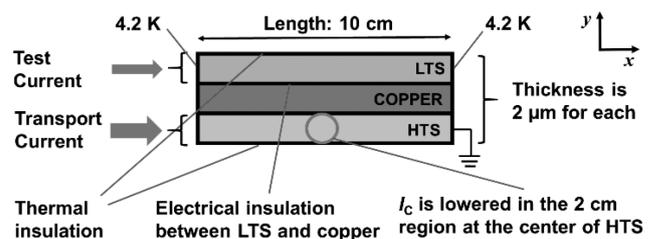


Fig. 2 Analysis model of hybrid superconducting tape

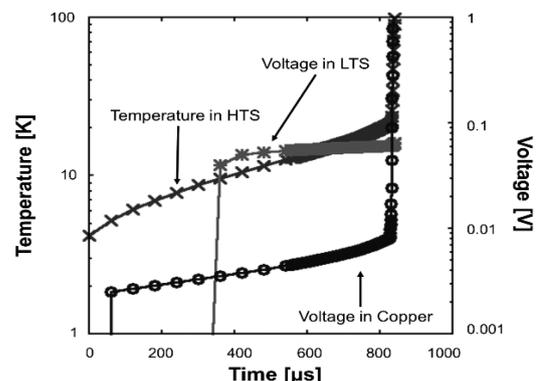


Fig. 3 Change of temperature in HTS and voltage in LTS and copper over time

# パイロクロア構造を持つ $Gd_3TaO_7$ を導入した $YBa_2Cu_3O_y$ 薄膜の作製

## Fabrication of $YBa_2Cu_3O_y$ films introduced $Gd_3TaO_7$ with pyrochlore crystal structure

牧原 隆博, 利光 直也, 石田 貴廣, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則 (熊本大学)

MAKIHARA Takahiro, TOSHIMITSU Naoya, ISHIDA Takahiro, SUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)

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

### 1. はじめに

高温超伝導体には、印加磁場方向に対する臨界電流密度  $J_c$  の異方性が存在しており、応用のためにはその改善が必要である。高温超伝導体にピンニングセンターを導入することで磁場中の  $J_c$  の向上や異方性が改善されることが知られており、その中でもパイロクロア構造のピンニングセンターは  $BaZrO_3$  や  $Y_2O_3$  よりも  $YBa_2Cu_3O_y$  (YBCO) との格子ミスマッチが小さいため、さらなる  $J_c$  の向上が期待されている[1]。

本研究では、パイロクロア構造を持つ  $Gd_3TaO_7$  をピン物質として導入することにより、超伝導体の結晶格子に与える影響を小さくし、 $T_c$  の低下を小さくすることで、 $J_c$  の向上および異方性の改善を目指す。また、幅広い応用のために  $c$  軸方向に相関のある人工ピンを導入することで  $J_c$  の磁場角度依存性における最小値の向上を試みる。

### 2. 実験方法

PLD 法の中でも YBCO ターゲットにピン物質の矩形バルクを貼り付けるターゲット表面修飾法を用いることにより  $Gd_3TaO_7$  を導入した YBCO 薄膜を  $SrTiO_3(100)$  基板上に作製した。使用した KrF エキシマレーザの繰り返し周波数は 5Hz、酸素圧 300mTorr、基板温度 760°C の下で成膜を行った。表面修飾ターゲットに用いた矩形バルクは  $Gd_3TaO_7$  に反応させたバルクまたは  $Gd_3TaO_7$  に反応させないで焼結させたバルクを用いた。導入量の参考として、成膜後にターゲット上に残るレーザ跡を元に、レーザ照射領域内におけるピン物質矩形バルクの比率を面積比 Area% で算出する。試料の詳細を Table 1 に示す。 $J_c$  は電界基準  $1.0 \times 10^{-4}$  V/m を用いて定義した。また、 $J_c$  の磁場角度依存性は、電流と磁場の方向を常に垂直にして、磁場と  $c$  軸のなす角度を  $\theta$  として測定を行った。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 1 に各試料の XRD 測定結果を示す。混合ターゲット法で  $Gd_3TaO_7$  を導入する際は YBCO と  $Gd_3TaO_7$  が反応し  $Ba_2GdTaO_6$  が生じることが報告されている[2]。今回作製した試料では  $Ba_2GdTaO_6$  のピークが存在していなかったことから表面修飾法では二つの物質が反応しないことが確認できた。

Fig. 2 に  $T=65K$ ,  $B=1T$  における各試料の  $J_c$  の磁場角度依存性を示す。ピン物質を導入した試料は pure と比較して殆ど  $J_c$  が向上していなかったが、GTO1mm, GOTO2mm において  $c$  軸方向を中心にブロードなピークを確認できた。これは  $Gd_3TaO_7$  ナノロッドの寄与と考えられる。

Table 1 Specification of samples

Sample	Pinning material	Introduction amount [Area%]	$T_c$ [K]
pure	-	-	89.4
GTO1mm	$Gd_3TaO_7$	4.02	88.9
GOTO1mm	$Gd_2O_3 + Ta_2O_5$	4.07	88.4
GOTO2mm	$Gd_2O_3 + Ta_2O_5$	8.11	88.2

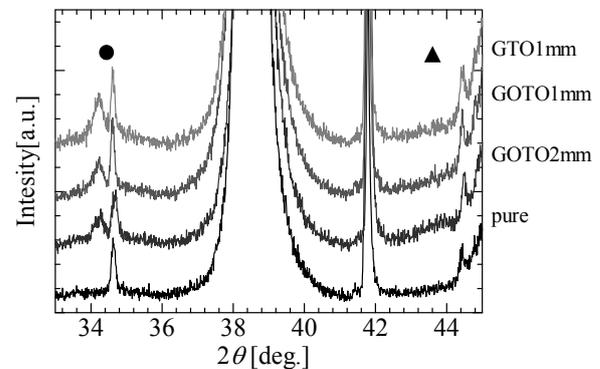


Fig. 1 XRD of YBCO thin films with  $Gd_3TaO_7$  for  $Gd_3TaO_7$  peak (●) and for  $Ba_2GdTaO_6$  peak (▲)

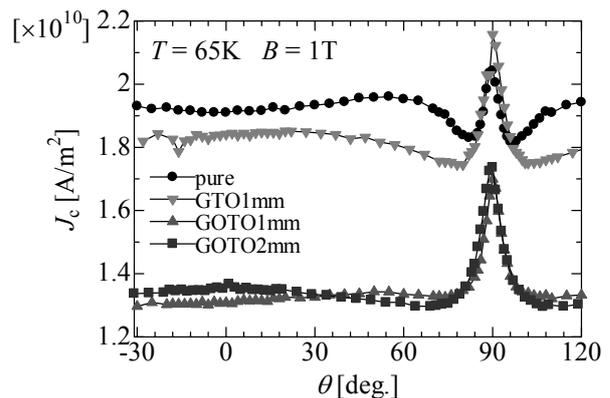


Fig. 2 Angular dependence of  $J_c$  in YBCO thin films with  $Gd_3TaO_7$  at 65 K and 1 T

### 参考文献

- [1] S. A. Harrington, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 022001
- [2] S. H. Wee, *et al.*: J. Am. Ceram. Soc. 95 (2012) 1174-1177

# BaSnO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 擬似多層膜の臨界電流密度に対する層構造の影響

## Influence of layer structure on critical current density in BaSnO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> quasi-multilayered films

末永 桃太郎, 浦口 雄世, 古澤 隆章, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則 (熊本大学)

SUENAGA Momotaro, URAGUCHI Yusei, FURUSAWA Takaaki, SUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)

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

### 1. はじめに

高温超伝導体の臨界電流密度  $J_c$  の異方性の改善の一つの手段として人工ピンの導入がある。通常、3次元ピンを超伝導体内に均一に導入すると等方的なピンニング効果を発揮する。しかし、3次元ピンの空間分布を制御することで、試料の  $c$  軸方向に相関を持った1次元ピンの様に導入でき、 $c$  軸方向の  $J_c$  を向上させることができる。また、試料の  $ab$  面方向に3次元ピンを面状に導入することで、 $ab$  面方向の  $J_c$  を向上させることも可能となる。

本研究では、BaSnO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 擬似多層膜を作製することで、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(YBCO)薄膜中にBaSnO<sub>3</sub>(BSO)をナノ粒子として導入し、層構造によりナノ粒子の空間分布の制御を試み、 $J_c$  の磁場角度依存性に与える影響について調べた。

### 2. 実験方法

測定に用いたBSO/YBCO擬似多層膜はPLD法を用いてSrTiO<sub>3</sub>(100)基板上に作製した。使用したKrFエキシマレーザーの繰り返し周波数は5Hz、基板温度755°C、酸素分圧300mTorrの雰囲気中で成膜を行った。成膜の際はYBCO層を堆積させ、その後ターゲットをピン物質のターゲットに交換して  $m$  回パルスレーザーを照射してピン物質を堆積させた。ピン物質のターゲットへのレーザー照射エネルギーは、プルームの大きさがYBCOターゲットに照射した時と同程度になるように調整した。これを  $n$  回繰り返して作製した試料をBSO( $m, n$ )と定義する。これによりピン物質は完全な層状にはならず、ナノ粒子の形状を取る3次元ピンとして導入することができる。

また特定の層でピン物質の導入量を変化させた試料はBSO( $1, n_1$ )+(10,  $n_2$ )と定義する。 $n_1$ はBSOを1パルスで堆積する層数、 $n_2$ はBSOを10パルスで堆積する層数を示しており、 $n_1$ と $n_2$ を足し合わせたものがトータルの層数を表している。YBCO層の総堆積パルス数は3000パルスである。また、成膜後はアニール処理を行った。Table 1に今回作製した試料のピン物質パルス数、層数、臨界温度  $T_c$  を示す。

超伝導特性の測定には直流四端子法を用い、 $J_c$  は電界基準  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  となる電流密度で定義した。また、 $J_c$  の磁場角度依存性では、電流と常に垂直となるように磁場を印加し、磁場と  $c$  軸のなす角度を  $\theta$  として測定を行った。

### 3. 結果と考察

Fig. 1に温度  $T = 65\text{K}$ 、磁場  $B = 1\text{T}$  における pureYBCO, BSO(1, 100), BSO(10, 10), および BSO(1,90)+(10,10)の  $J_c$  の磁場角度依存性 ( $J_c - \theta$  特性)を示す。Fig. 1から、BSO(1,100)では  $c$  軸方向を中心としたブロードなピークが確認できるのに対し、BSO(1,90)+(10,10)では pureYBCO よりも高い  $J_c$  を示しているがピークは確認できない。これは BSO(1,100)では層数

が100層であるため、1層あたりの層厚が薄く、下層のBSOによる歪みが緩和されずに上層に影響しやすいと考える。そのため、上層と下層のBSOが相関して分布している可能性がある[1]。しかし、BSO(1,90)+(10,10)では特定の層でBSOを10パルス導入しているため、面内方向に分布した配置で導入されることになり、BSOの  $c$  軸方向の相関が切れるためだと考えられる。またBSO(10,10), BSO(1,90)+(10,10)では  $ab$  面方向で高い  $J_c$  のピークを示している。これは試料の面内方向に分布した配置で導入されたBSOが、導入方向の磁場に対して有効なピンニングセンターとして働いているためだと考えられる。

以上のことから、特定の層でBSOを10パルス導入した100層の試料BSO(1,90)+(10,10)のナノ粒子の空間分布は広い磁場角度範囲でピンニング効果を発揮していると言える。しかし、 $c$  軸方向では100層の試料であるBSO(1,100)よりも低い  $J_c$  となってしまうことが判った。

Table 1. Specification of samples

Sample	$m$	$n$ ( $n_1, n_2$ )	$T_c$ [K]
pureYBCO	-	-	89.2
BSO(1,100)	1	100	87.8
BSO(10,10)	10	10	89.7
BSO(10,5)	10	5	89.6
BSO(1,90)+(10,10)	1, 10	90, 10	88.0
BSO(1,95)+(10,5)	1, 10	95, 5	89.2

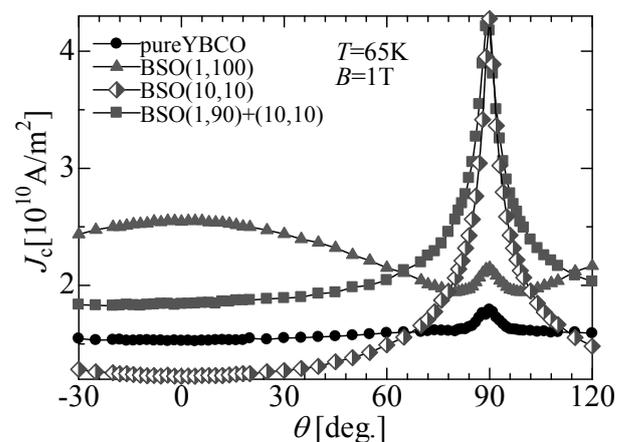


Fig. 1 Angular dependences of  $J_c$  at  $T = 65\text{K}$  and  $B = 1\text{T}$

### 参考文献

- [1] T. Ozaki, Y. Yoshida, Y. Ichino, Y. Takai, A. Ichinose, K. Matsumoto, S. Horii, M. Mukaida, Y. Takano, J. Jpn. Inst. Met. Mater. 74 (2010) 422-427.

# 縦磁場下における YBCO 薄膜の臨界電流密度に対する重イオン照射効果

## Effect of heavy-ion irradiation on the critical current density of YBCO films in longitudinal magnetic field

岩永 泰弥, 甲斐 隆史, 溝口 剛史, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則 (熊本大学)

IWANAGA Yasuya, KAI Takafumi, MIZOGUCHI Tsuyoshi, SHUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)  
E-mail: yasuya@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導応用研究の一つに、縦磁場効果を利用した超伝導ケーブルがある。現在、横磁場下と同様に人工ピンニングセンターの導入による磁束ピンニングを行うことで、縦磁場下での臨界電流密度  $J_c$  を向上させる試みが行われているが、未だ効果的なピンニングセンターの種類や導入量が明らかになっていない。高温超伝導膜へのイオン照射欠陥の導入は、試料の作製過程とは独立に任意のピンニングセンターを系統的に導入することができるため、縦磁場下の  $J_c$  の改善に有効なピンニング構造を明らかにすることが出来る。

本研究では、YBCO 薄膜に対して 200MeV の Xe イオンを異なる照射量で照射し、 $J_c$  に対する照射欠陥の影響について調べた。

### 2. 実験方法

重イオン照射に用いた試料は、PLD 法で作製した YBCO 薄膜で、フォトリソグラフィにより長さ 1 mm、幅約 40  $\mu\text{m}$  のブリッジ状に加工した。重イオン照射には 200 MeV の Xe イオンを使用し、柱状欠陥と呼ばれる連続的な照射欠陥を  $c$  軸方向と平行に導入した。柱状欠陥の導入量を変化させるために、重イオン照射の照射量を  $2.42 \times 10^{10}$ ,  $7.26 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> (それぞれマッピング磁場  $B_\phi = 0.5, 1.0$  T に相当) とした。

臨界電流密度  $J_c$  は、電界基準  $E_c = 1.0 \mu\text{V}/\text{cm}$  で定義し、 $J_c$  の磁場依存性の測定を行った。また、縦磁場効果への影響を評価するため、磁場を  $ab$  面方向と電流方向に平行に印加し、 $J_c$  の磁場依存性の測定を行った。

### 3. 実験結果及び検討

Fig. 1(a)に測定した YBCO 薄膜の 77.3 K における  $J_c$  の磁場依存性について示す。また、Table 1 に各試料の自己磁場での  $J_{c0}$ 、最大の値である  $J_c^{\text{max}}$  及びその比の値を示す。

各試料の  $J_c^{\text{max}}$  は、 $J_{c0}$  より高い値であり縦磁場効果が生じていることが分かる。しかし、縦磁場下における 1DPC\_0.5 と 1DPC\_1.0 では  $J_c$  の向上に明らかな違いが確認できる。どちらの照射試料でも 0.8 T 以下では pure を上回る  $J_c$  が得られたが、1DPC\_1.0 では印加磁場 0.8 T 以上の磁場領域において pure よりも低い  $J_c$  を示しており、 $J_c$  が逆転している。また、Table 1 の  $J_c^{\text{max}}/J_{c0}$  において 1DPC\_1.0 の値が著しく低いことから、1DPC\_1.0 は縦磁場効果が得られにくいことが分かった。つまり柱状欠陥の導入量が多いほど  $J_c$  の値が低くなること分かる。これは柱状欠陥の導入量が増えることで、自己磁場により磁束線にローレンツ力が働き、柱状欠陥内を磁束線が  $c$  軸方向に動くことにより、 $J_c$  が低下したことが起因していると考えられる[1]。このように柱状欠陥の導入量が増えると、磁場と電流の平行関係が崩れやすくなることで、縦磁場効果が得られにくくなること分かる。

また、Fig. 1(b)に 77.3 K における  $J_{c0}$  で規格化した  $J_c$  の磁場依存性について示す。規格化する前の  $J_c$  では 1DPC\_0.5 が最も大きい  $J_c$  を示したが、規格化した  $J_c$  では常に pure が最も高い値を示した。これにより、縦磁場効果に有効なピンニングセンターの導入量は  $B_\phi = 0.5$  T であるが、上記のように縦磁場下の磁束線に対しては、柱状欠陥の長手方向にローレンツ

力が作用するため、柱状欠陥は縦磁場下での  $J_c$  に対してあまり有効に作用しないことが分かる。

以上の結果より、縦磁場下において次のことが考えられる。(i)ピンニングセンターは少ない導入量が無効に作用する。(ii)柱状欠陥はローレンツ力を受けた磁束線の影響に強く依存するため  $J_c$  に対して有効に作用しないと考えられる。

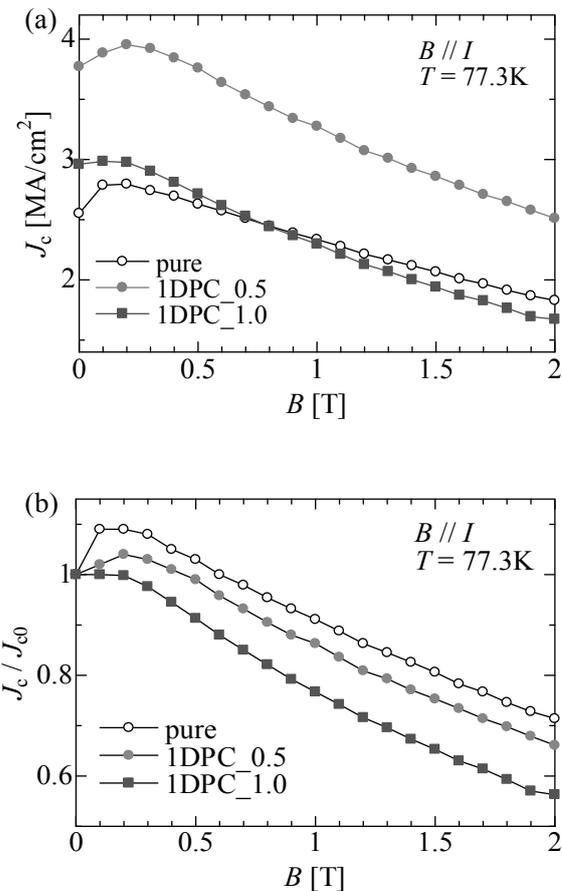


Fig.1: Magnetic field dependence of (a)  $J_c$  and (b)  $J_c/J_{c0}$  at 77.3K

Table 1:  $J_{c0}$ ,  $J_c^{\text{max}}$  and  $J_c^{\text{max}}/J_{c0}$  of each sample

sample	$J_{c0}$ [MA/cm <sup>2</sup> ]	$J_c^{\text{max}}$ [MA/cm <sup>2</sup> ]	$J_c^{\text{max}}/J_{c0}$
pure	2.55	2.80	1.10
1DPC_0.5	3.77	3.95	1.05
1DPC_1.0	2.96	2.99	1.01

### 参考文献

- [1] K. Sugihara, et al. : Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 104004

## 超電導き電ケーブルシステムの断熱管試作

## Development of heat insulation pipes for the superconducting feeder cable systems

富田 優, 福本 祐介, 石原 篤, 恩地 太紀, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 鈴木 賢次(鉄道総研); 佐藤 政弘(MESCO)  
 TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke, ISHIHARA Atsushi, ONJI Taiki, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, SUZUKI  
 Kenji (Railway Technical Research Institute); SATO Masahiro (MITSUI KINZOKU ENGINEERING SERVICE COMPANY)  
 E-mail: tomita@rtri.or.jp

## 1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導ケーブルシステムの開発を進めている[1, 2]。超電導ケーブルを鉄道の送電線に適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制などが期待できる。

本講演では超電導き電ケーブルシステムへの適用を目指し、断熱管を試作、評価したので報告する。

## 2. 実験方法

真空多層断熱の構造を変化させ、数種類の長さ約 5 m の断熱管を試作した(内管:内径約 76 mm, 外径約 88 mm, 外管:内径約 111 mm, 外径約 122 mm)。試作した各断熱管に対し、直線状態、曲げ半径 40D, 30D, 20D, 15D, 10D の状態で、真空度を変化させながら熱侵入量の変化を測定した。

## 3. 結果

Fig.1 に直線状態の断熱管を横から撮影した X 線画像を示す。両端部では内管と外管の同軸構造が維持されているが、中心部では自重と液体窒素の重さで、やや軸ズレを起こしていることが確認できる。

Fig.2 に曲げた状態の断熱管を上から撮影した X 線画像を示す。両端部では内側に、中心部では外側に、軸ズレを起こしていることが確認できる。すなわち、曲げ半径が小さいほど内管と外管間の真空層が狭まることにより、真空多層断熱の接触圧が高まり、内管及び外管と断熱材の接触面積が増加し、熱伝導の増加が懸念される。

Fig.3 に試作した断熱管の真空度と熱侵入の関係の一例を示す。真空度が  $10^{-2}$  Pa 以下ではほぼ一定の熱侵入量となり、 $10^{-2}$  Pa 以上の低真空時には大きく真空度に依存し、指数関数的に熱侵入量が増加した。また、直線状態と 10D で曲げた状態における測定結果の比較により、熱侵入量の増加を確認した。

## 4. 謝辞

本研究の一部は、(国研)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超電導技術イノベーション」の支援を受けて進めたものである。

## 参考文献

1. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.30
2. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.25

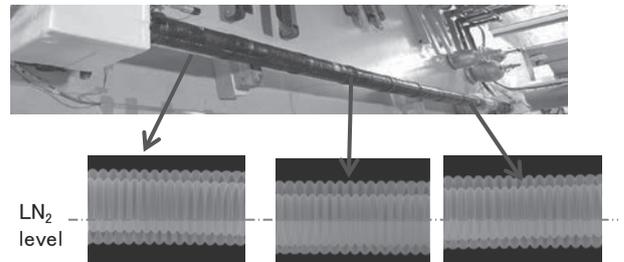


Fig.1 Transmission X-ray images with heat insulation pipes extended.

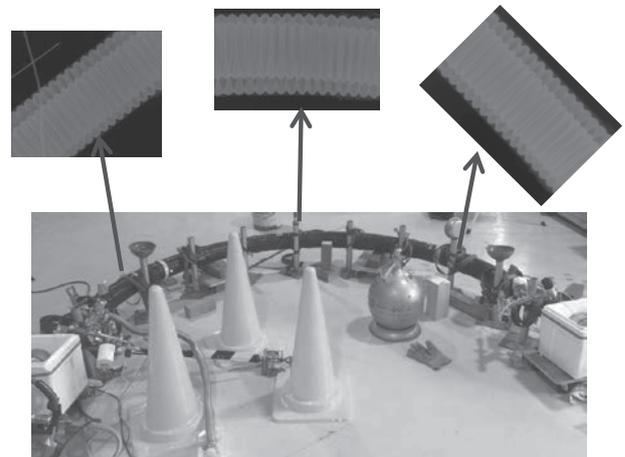


Fig.2 Transmission X-ray images with heat insulation pipes bent.

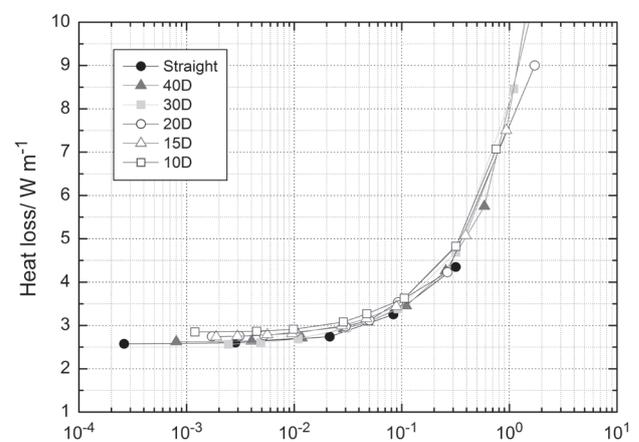


Fig.3 Degree of vacuum dependence of heat loss in a heat insulation pipe.

# 超電導き電ケーブルシステムの予知保全技術に関する研究

## Research about forecast preservation technology for the superconducting feeder cable systems

富田 優, 小林 祐介, 恩地 太紀, 赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 鈴木 賢次 (鉄道総研); 陳山 鵬 (三重大)  
 TOMITA Masaru, KOBAYASHI Yusuke, ONJI Taiki, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, FUKUMOTO Yusuke,  
 SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute); JINYAMA Ho (Mie University)  
 E-mail: tomita@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、超電導き電ケーブルシステムの開発を進めている[1]。超電導ケーブルを鉄道のき電線に適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制などが期待できる。

超電導き電ケーブルシステムは超電導ケーブルのほか冷凍機、循環ポンプ等の冷却システムからなり、超電導ケーブルの超電導状態を維持するためには冷却システムの性能低下、故障等を未然に防ぐ必要がある。

そこで、本講演では超電導き電ケーブルシステムの予知保全技術に関して報告する。

### 2. 予知保全技術の冷却システムへの適用

予知保全技術はシステムの異常を早期に発見し、その異常を精密診断により明確にすることで、システム保全を行う技術であり、冷却システムに適用できれば、冷却システムの性能低下、故障等を未然に防ぐことが可能となる。

冷却システムへの予防保全技術の適用として、まず各種センサーを冷却システムに設置し、振動加速度、AE (Acoustic Emission)、電流・電圧、温度、圧力等のデータ(信号)を同時測定できるようにする。次に測定で得られた信号から、異常信号の検出・状態識別指標の抽出・状態判定基準の設定を行い、リアルタイムに異常を検知できるようにする(簡易診断)。簡易診断で検知された異常については精密診断を行い、異常個所の同定・異常種類の識別・異常程度の把握を行うようにする。その後、余寿命の予測を行い、保全計画を立てる。

### 3. 結果

簡易診断プログラムの作成状況を Fig.1、2 に示す。実効値(1式)等の有次元特徴パラメータと歪度(2式)・尖度(3式)等の無次元特徴パラメータを用いて状態を判定した。

$$p_{d1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (\text{実効値}) \quad (1)$$

$$p_{t1} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma^3} \quad (\text{歪度}) \quad (2)$$

$$p_{t2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4} \quad (\text{尖度}) \quad (3)$$

ここで、測定した離散の時系列データを $x_i (i = 1 \sim N)$ とし、

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

一例としてターボブレイトン冷凍機の圧縮タービンに加速度センサーを取り付け、加速度データを取得した結果を Fig.3 に示すが、一定の波形が得られており、正常時にデータの取得に成功していることがわかる。

### 4. 結論

予知保全技術の冷却システムへの適用を目指し基礎試験を実施したところ、正常時にデータ取得に成功した。

今後は異常信号の検出・状態識別指標の抽出・状態判定基準の設定に必要な基礎データを蓄積していくとともに、プロ

グラムのプロトタイプを完成させ、実システムでの簡易診断初期試験を行う。

### 参考文献

1. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.181

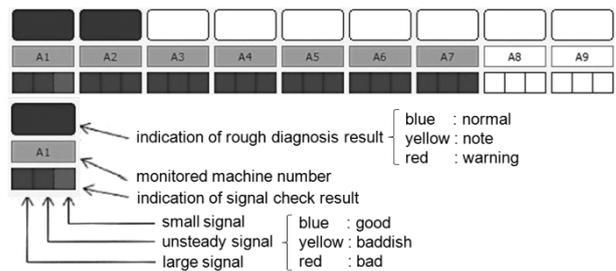


Fig.1 Monitor sample of rough diagnosis result

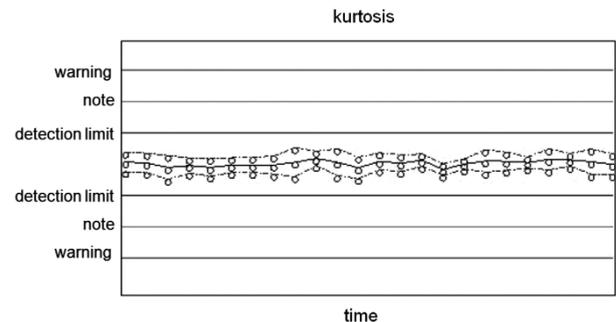


Fig.2 Trend graph sample of kurtosis

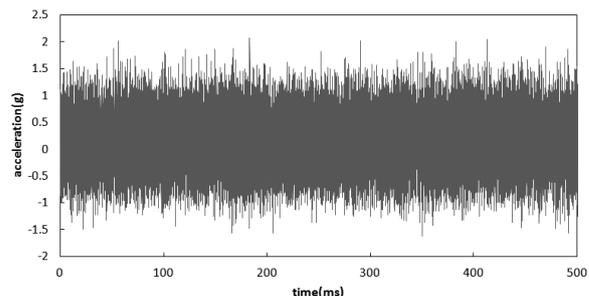
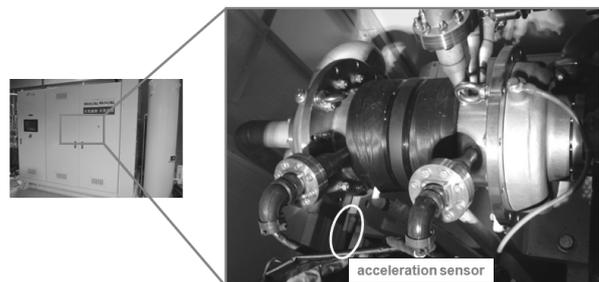


Fig.3 Photograph of the acceleration sensor attached to the compressor of Turbo-Brayton refrigerator and its data

## 500kW 全超電導同期電動機の設計検討(2) Design study of 500kW Fully Superconducting Synchronous Motor(2)

福田 翔吾, 田村 亮人, 岩熊 成卓, 佐藤 誠樹, 吉田 幸市(九州大学);  
長谷 吉二, 富岡 章, 今野雅行(富士電機); 和泉 輝郎(AIST)

FUKUDA Shogo, TAMURA Katsuhito, IWAKUMA Masataka, SATO Seiki, YOSHIDA Koichi (KYUSHU University);  
HASE Yoshiji, TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric); IZUMI Teruo (AIST)  
E-mail; fukuda@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

同期電動機を超電導化する場合、超電導巻線が鉄心の飽和磁束以上の磁界を容易に発生しうることから、界磁・電機子ともに無鉄心化しうる。また同期機は回転界磁子の高磁界化によりギャップ磁束密度を大きく設計でき、無鉄心化による小型・軽量化とともに、損失低減による高効率化も期待できる。これまで同期機超電導化の研究は直流磁界を発生する回転界磁子のみを超電導化する半超電導機が主流であった。本研究では、回転機の究極の小型・軽量・高効率化を図るために、界磁に加えて電機子をも超電導化することを目指している。我々は 500kW 全超電導機について設計検討を行うに際し、磁束密度分布及び交流損失特性の極数依存性について、4極、8極、16極の電動機のモデルを作成し、数値解析により検討した。

### 2. 500kW 級全超電導機電動機の仕様

Table. 1 に例として8極で想定した全超電導機の仕様を示す。超電導線材としては、厚さ 100 $\mu$ m のハステロイを基板とする幅 5mm、超電導層 3.6 $\mu$ m 厚、銀層 10 $\mu$ m 厚で銅安定化層を加えた全体が 200 $\mu$ m 厚の IBAD-PLD 法 EuBCO テープを想定した。この臨界電流  $I_c$  の温度 T、磁場 B 依存性としては、現在開発されているテープ線材を参考に Fig. 1 を仮定した。BHO 人工ピンニングセンター導入により  $I_c$  の磁場特性向上を図ったものであり、 $I_c=1334A@65K, 0T$  である。

### 3. 数値解析

解析には市販の電磁場解析ソフト JMAG を用いた。解析により4極、8極、16極それぞれの電動機内の磁場密度分布を計算し、それから得られる界磁巻線及び電機子巻線にかかる垂直磁場分布の振幅と Fig.2 に示す超電導線材の交流損失特性から各巻線に発生する交流損失の値を見積もった。

### 4. 解析結果と考察

8極の電動機の交流損失が最も小さい結果となった。8極の電動機の磁場分布を Fig.3 に示す。電動機内に発生する最大の磁束密度は 3.0T となった。各巻線に発生する交流損失などその他特性は当日報告する。

Table.1 Specifications of REBCO Superconducting Motor

Output power	500kW
Number of revolutions	300rpm
Armature current	487A
Field current	307A
Outer diameter	476mm
Effective length	800mm
Gap	3mm

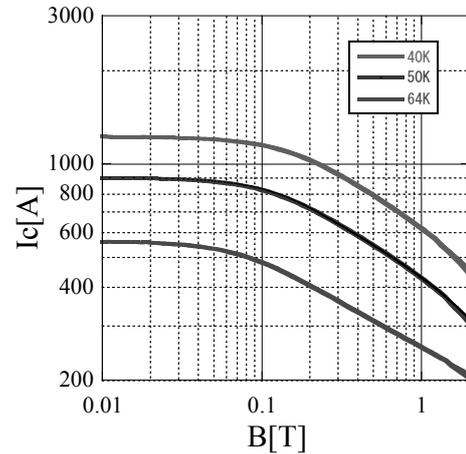


Fig.1  $I_c$ -B characteristics of REBCO tapes

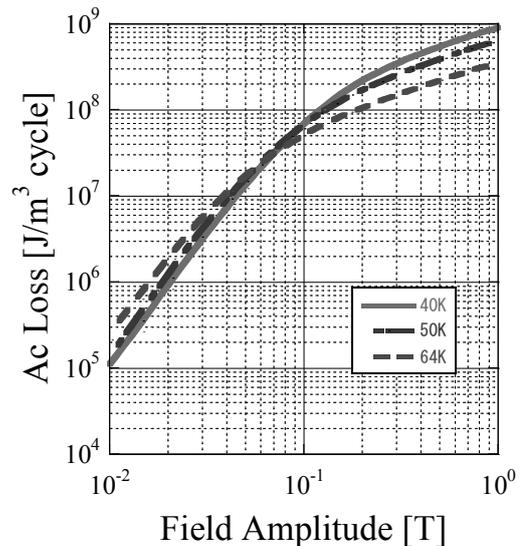


Fig.2 Ac Loss characteristics of REBCO tapes

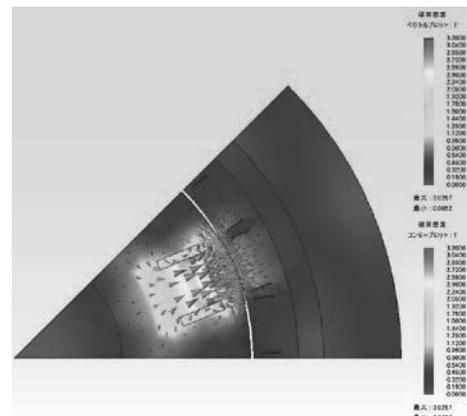


Fig. 3 Magnetic flux density distribution

# 電磁石による超電導バルク冷却容器の浮上・案内支持試験装置

## Test apparatus of Magnetic Levitation-Guidance using HTS bulk and electromagnet

宮崎佳樹, 池田和也, 福本 祐介, 柏木 隆行, 齋藤 実俊(鉄道総研)

MIYAZAKI Yoshiki, IKEDA Kazuya, FUKUMOTO Yusuke, KASHIWAGI Takayuki, SAITO Sanetoshi (RTRI)

E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研ではトンネル内の圧力や流速変動を測定するための高速列車模型発射装置を使用した模型実験や数値シミュレーションによって、予測手法の開発や低減対策の検討などを行っている[1]。Fig. 1 に現状の模型実験装置の概略を示す。走行路に沿ったピアノ線をガイドとして、打ち出し装置により高速で発射された円筒形列車模型は、走行路に沿って張られたピアノ線をガイドとして進行する。

新幹線車両の高速化に伴い、より詳細な空力音測定ができる車両模型試験装置が必要となっている。しかし Fig.1 の装置では発射装置の制約から車両模型形状が円筒であることや、走行時のピアノ線などの音が暗騒音となり、詳細な測定が困難な場合もある。こうした問題を解決する方法として、非接触で車両模型が支持できる磁気浮上方式の適用が考えられる。

### 2. 非接触支持方式の検討

模型車両の測定部位以外からの暗騒音を無くすために、地上側走行路には突起などがなく、かつ側面のガイドなどもない状態で3次元的に安定した姿勢を得るためには、磁気浮上を利用することが考えられる。磁気浮上による非接触支持・案内を行うには幾つかの方式がある。代表的なものは、超電導バルク体のピン止め効果を利用した方式で、制御することなく、一定の高さで浮上させることができる。一般的には、ピン止めされる磁力線の発生源となる磁石は、ネオジウム磁石などが用いられるが、電磁石であっても必要な磁場を発生できれば代替は可能である(Table 1)。ピン止め効果以外の磁気浮上方式としては、電磁誘導を利用した浮上、案内方式も考えられる。

車両模型試験装置として、地上側に永久磁石を敷き詰める方式よりも、試験時のみ磁場を発生する電磁石方式のほうが取り扱いが容易である。そこで地上走行路:電磁石, 走行模型:超電導バルクとした方式について予備試験, 基礎試験装置製作, 基礎試験を行うことにした。

### 3. 試験装置

超電導バルク (以下バルク) 保冷用低温容器(以下クライオ)と、磁場発生装置となる電磁石の写真を Fig. 2 に示す。直径 90 mm, 厚さ 20 mm のバルクを低温容器真空槽側の内槽底面銅部に 1 個取り付け、内槽に溜めた液体窒素により伝導冷却・保冷を行う。クライオ外槽底面からバルク底面までの距離は 2 mm となっている。保冷時間は約 10 時間、液体窒素注液後の重さは約 6 kg である。クライオは 2 個製作した。磁場発生装置は、SS400 ヨーク(幅 180 mm, 長さ 2.2 m)に水冷式ケーブルを等間隔 4 条 4 層のミアンダ状に巻き線した。ケーブルピッチは 45 mm としている。ケーブルコイルから装置表面までの高さは 1.5 mm である。最大磁束密度は通電電流 1700 A のとき、装置表面で約 0.3 T である。

### 4. 浮上試験

Fig. 3 に、1700 A 通電時のクライオ浮上の様子を示す。No. 1 クライオは実ギャップ 10 mm, No. 2 クライオは 30 mm の高さにて着磁したところ、それぞれ浮上高さは 4 mm, 10 mm 程度となった。浮上力, 左右案内力をバネバカリで測定したところ、No. 1 クライオで(浮上力: 25 N, 案内力: 30 N), No. 2 クライオ

で(浮上力: 14 N, 案内力: 10 N)となり、浮上高さが高くなるに従い、発生力が小さくなる。

### 5. まとめ

車両模型試験装置への適用のため、磁気浮上による非接触方式の基礎試験を行い、浮上高さ 10 mm にて浮上力: 14 N, 案内力: 10 N 程度を得た。今後は他の方式の浮上案内方式についても検討を行う。

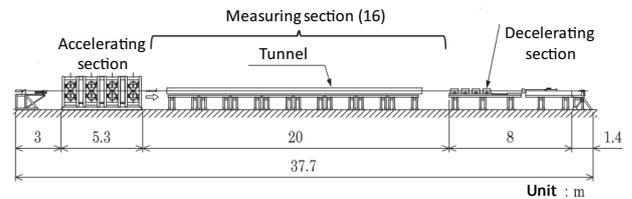


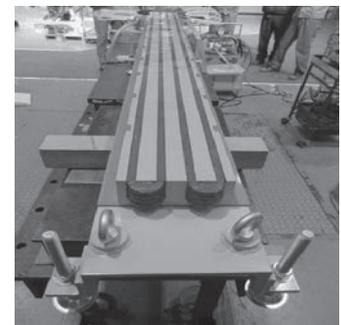
Fig. 1 Schematic drawing of aerodynamic testing equipment

Table 1 Comparison of magnetic levitation method

方式	電磁石	永久磁石
地上側	電磁石 (超電導or常電導)	永久磁石
車両側	超電導バルク	超電導バルク
特徴	使用しないときの安全性	実施例有
課題	強磁場の発生	試験使用時以外の安全確保



Cryostat



Electromagnet circuit

Fig. 2 Photograph of experimental set up



No. 2 クライオ 着磁位置: 30 mm※実ギャップ 浮上高さ: 10 mm※実ギャップ 浮上力: 14 N※2 mm下がった位置 左右力: 10 N※3 mm移動した位置	No. 1 クライオ 着磁位置: 10 mm※実ギャップ 浮上高さ: 4 mm※実ギャップ 浮上力: 25 N※1 mm下がった位置 左右力: 30 N※2 mm移動した位置
--	---

Fig. 3 Results of levitation test

[1] 鉄道総研ホームページ

<http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd51/rd5120/rd51200106.html>

# コアレス励磁巻線をもつ高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータの設計

## Design of linear switched reluctance motor with coreless HTS excitation windings

平山 齊, 平石 貴将, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, HIRAISHI Takamasa, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: hirayama@eee.kagoshima-u.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では、工作機械などで大推力が要求される直動装置の電動化を目指して、高温超伝導線材で巻線された励磁巻線をもつリニアスイッチトリラクタンスモータ (HTS-LSRM) の研究を進めている [1]。今回、励磁巻線をコアレスとした HTS-LSRM について検討し、3次元有限要素法を用いた磁場解析により、モータの設計のために4種類のモータ構造について特性を算出したので、その結果について報告する。

### 2. HTS-LSRM の基本構造

Fig. 1 に、コアレス励磁巻線をもつ HTS-LSRM の概形図を示す。Fig. 1 (a) は全体図、Fig. 1 (b) は可動子の進行方向から見た断面図である。本 HTS-LSRM は一次側を固定子とし、突極をもたない固定子継鉄の上に容器を設置し、その中にシングルパンケーキ型のコアレス HTS 励磁巻線が固定される。1つのコアレス HTS 励磁巻線で、一次側に1つの磁極が作られる。HTS 励磁巻線は、液体窒素に浸して冷却を行う。二次側である可動子は、突極構造をもつ鉄心のみで構成される。

### 3. 解析モデル

コアレス励磁巻線をもつ HTS-LSRM を設計するにあたり、ここではまず Fig. 2 に示すような4つのモータ構造について検討した。Fig. 2 (a) は固定子6極、可動子4極、いわゆる6/4機で片側式の構造、Fig. 2 (b) は固定子8極、可動子6極、いわゆる8/6機で片側式の構造、Fig. 2 (c) は6/4機で両側式の構造、Fig. 2 (d) は8/6機で両側式の構造である。HTS 励磁巻線と可動子突極鉄心間のエアギャップは6 mm であり、鉄心の積厚は16 mm である。解析には、幅4 mm、厚さ0.2 mm、77 K で自己磁場中の臨界電流が110 A の YBCO テープ線材を使用した。また、4つのすべてのモデルにおいて、1極あたりのコアレス HTS 励磁巻線のターン数は35ターンである。

### 4. 解析結果

まず、HTS-LSRM の1つの相に一定電流を流し、可動子位置を変えたときの磁場分布を算出した。その結果より、HTS 励磁巻線に垂直に印加される磁束密度の最大値を求め、HTS 励磁巻線のロードラインを作成した。YBCO テープ線材の  $I_c$ - $B$  特性より HTS 励磁巻線の臨界電流を求めると、Type 1 が97.2 A、Type 2 が97.7 A、Type 3 が97.5 A、Type 4 が98.0 A となり、4つの構造でほぼ同じになった。

次に、先に求めた臨界電流の約50%である50 A の電流を流したときの、可動子位置に対する推力および垂直力を算出した。結果を Fig. 3 (a) および (b) に示す。また、これらの結果より平均推力  $F_{avg}$ 、推力脈動率  $F_{rip}$ 、垂直力に関する評価関数  $NF$  [2] を求めた結果を Table 1 に示す。平均推力は6/4機の方が8/6機に比べ高くなり、また推力脈動率は両側式の方が片側式より小さくなるのがわかった。 $NF$  値については、6/4機の方が若干高くなった。ここで、一般的な LSRM と比較すると、推力脈動率はほぼ同程度であるが、 $NF$  値については2倍ほど大きくなり、コアレス励磁巻線とした利点を確認された。

また、4つのモデルにおいて、使用した HTS 励磁巻線の体積と静推力の比を算出した結果を Fig. 4 に示す。図より、片側式の方が両側式に比べ、6/4機では1.5倍、8/6機では1.3倍程度大きくなるのがわかった。

詳細な解析結果の検討については、当日報告する。

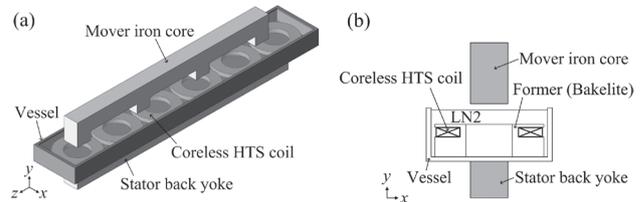


Fig. 1 Structure of the HTS-LSRM with coreless excitation windings. (a) Overall view. (b) Cross-section view.

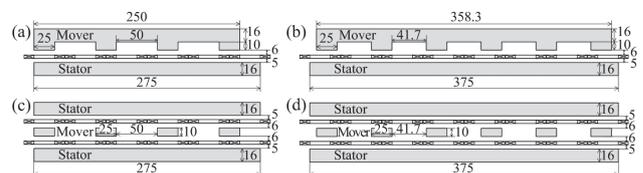


Fig. 2 The structure of four analytical models. (a) Type 1. (b) Type 2. (c) Type 3. (d) Type 4.

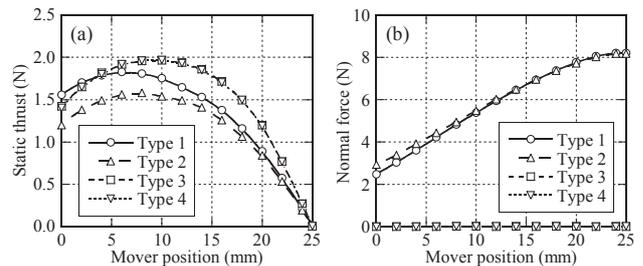


Fig. 3 Numerical results. (a) Static thrust. (b) Normal force.

Table 1 Calculation results of average thrust, thrust ripple rate and evaluation function of normal force.

Item	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Average thrust $F_{avg}$ (N)	1.27	1.11	1.43	1.42
Thrust ripple rate $F_{rip}$ (%)	143	142	137	138
Evaluation function $NF$	0.16	0.14	none	none

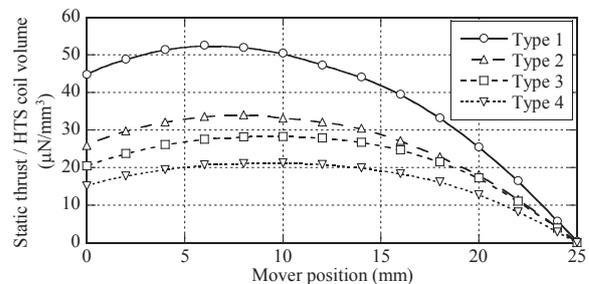


Fig. 4 The ratio of static thrust to HTS coil volume of four HTS-LSRM.

### 参考文献

- S. Oto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 90 (2014) p.184
- M. Kaneda, et al.: T. IEEJ, Vol. 120-D, No. 1 (2000) pp.67-72

# 自己無誘導型超電導モーターの研究開発

## Research and development of superconducting motor without self-induction

河村 実生 (岡山理科大学)

KAWAMURA Minaru (OUS)

E-mail: minaru@ee.ous.ac.jp

### 1. はじめに

超電導体の抵抗ゼロの性質を利用することにより、エネルギー密度の高い回転機の製作が可能と考えられ、多くの努力が積み重ねられてきている。特に、最近のイットリウム系薄膜超電導ワイヤーのような磁場中で高い超電導臨界電流密度を維持できる線材を用いることにより、高い出力重量比が達成可能と考えられる。我々の研究室では、電機子内の磁束をキャンセルさせる新しいタイプの超伝導回転機の開発を行ってきており、冷却システム全体の重量を考慮した高い出力重量比の達成を目標としている。今回の発表では、昨年度の本学会で報告したプロトタイプ超電導ワイヤーの交流損失や磁界シミュレーション結果に基づく最大出力や効率について報告する。

### 2. 自己無誘導型超伝導モーターの交流損失

原理的には、電機子内の磁束をキャンセルさせているため、超電導コイルの磁束による損失が殆ど無いため、回転子に埋め込まれている永久磁石の回転磁界による超電導ワイヤーの交流損失が主な損失となる。このため、この交流損失の大きさが冷凍機を含むシステム全体の重量を決定するといつてよい。本研究では、この交流損失を測定するため熱力学的測定法を用いた。冷凍機の消費電力を一定に保ち、回転子を外部のモーターで回転速度をステップ状に変えながら熱平衡温度の測定を行った。その実験結果を図1(a)に示す。また、その熱平衡温度と回転数の関係を図1(b)に示す。ただし、図(b)中の横軸は電流の周波数を表す。

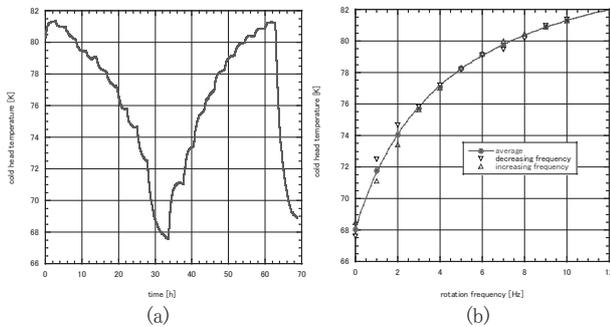


図1 超電導電機子コイルの温度変化

臨界温度付近では、臨界電流は温度に比例すると考えられるため、Bean モデルを仮定した場合、交流損失  $Q(\theta)$  は、

$$Q(\theta) \equiv af(T_c - \theta)$$

と書くことができる。また、冷凍機の冷却能力は、

$$C(\theta) \equiv b(\theta - \theta_0)$$

と表すことができるため、熱平衡状態の温度  $\theta_{eq}(f)$  は、

$$\theta_{eq}(f) = \frac{fT_c + r\theta_0}{f + r}$$

と表すことができる。ただし、ここで、 $r=b/a$ 、 $f$ は回転数である。これにより、液体窒素温度における交流損失が次のように得られる。

$$Q(\theta=77K) = 1.07[W/H_z]$$

この値は、文献[1]から、有効体積  $10^{-7}m^3=50m \times 2mm \times 1\mu m$  の超電導ワイヤーに振幅  $0.28[T]$  の交流磁束が垂直にかかることと仮定して得られる予測値  $1.24[W/H_z]$  と矛盾しない。

### 3. シミュレーション結果

作製したプロトタイプは、ディスク型であるが、等価なラジアルギャップ型に変換し、2次元有限要素法による磁界シミュレーションにより解析を行った。プロトタイプで使用している線材の長さは 100m、コアの総重量は 3.6kg で、モーターギャップは 20mm であるが、磁極数、コアの有無や超電導ワイヤーの巻き数(長さ)を変えた、トルクの計算結果を図2に示す。図中の破線は、20A までの測定値の外挿を示すが、対応する丸印のシミュレーション結果と低電流領域で一致していることが分かる。また、トルクひずみの磁極数、コアの有無や超電導ワイヤーの巻き数による計算結果を図3に示す。この結果から磁極数を多くするとひずみが大幅に減少しているのが分かる。これは、極数を増やすと各相のコイルが密接になるため、磁束のキャンセルが向上し、磁気飽和がより抑制されているためと考えられる。

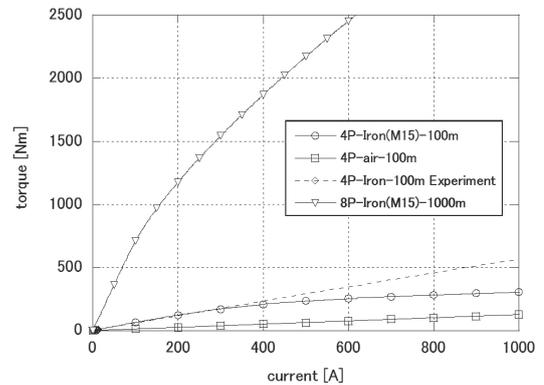


図2 トルクのシミュレーション結果

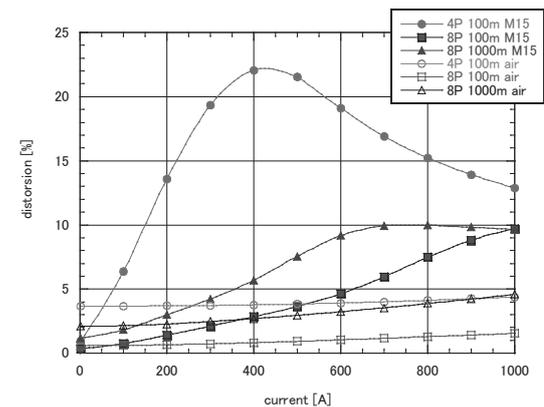


図3 トルクひずみのシミュレーション結果

### 4. まとめ

以上の結果から1kmの超電導ワイヤーに150Aの電流を流し、60Hzで回転した場合、最大出力 360kW が予測され、10kW/kg 以上の出力重量比が可能である。また、この時の損失は2.4kWで、最大効率99.3%である。目標達成のためには、システム全体の重量を考慮すれば、1/10 程度の交流損失の低減が必要であり、現在、改良形の試作機を準備中である。

### 参考文献

[1] N. Amemiya, Z. Jiang, Y. Iijima, K. Kakimoto and T. Saitoh, Supercond. Sci. Technol. 17 (2004) 983-988

# 電力・水素複合エネルギー貯蔵システムに用いる SMES コイル設計

## Design study of SMES coil for energy storage system combined with electricity and hydrogen

水落 空, 葛 雅志, 安藤 憲之介, 高尾 智明, 谷貝 剛(上智大学);  
 新富 孝和, 榎田 康博(KEK); 津田 理, 宮城 大輔(東北大学);  
 平野 直樹(中部電力); 岩城 勝也(岩谷産業); 駒込 敏弘(前川製作所)

MIZUOCHI Sora, KATSURA Masashi, ANDO Kennosuke, TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia University);

SHINTOMI Takakazu, MAKIDA Yasuhiro (KEK); TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke (Tohoku University);

HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co., Inc.); IWAKI Katsuya (Iwatani Corp.);

KOMAGOME Toshihiro (Mayekawa MFG. Co., Ltd.)

E-mail: sora.mizuochi@gmail.com

### 1. はじめに

今までの災害の経験から学んだこととして再生可能エネルギーの重要性、公共施設(今回は浄水場)における非常用電源の重要性があげられる。そこで私たちは、浄水場用電力・水素複合エネルギー貯蔵システム(Fig. 1)を提案し、実用化を目指している。普段は再生可能エネルギーである太陽光発電の変動補償を短周期ではSMESもしくは電気二重層キャパシタ、リチウムイオン電池を用いて、長周期では燃料電池と水電解装置を用いて行う。また、非常用電源として液体水素タンクと燃料電池により3日分のエネルギーを確保する。

### 2. 短周期変動補償用 SMES

本研究では、太陽光発電設備容量 1.0 MW と 2.78 MW に対応してそれぞれ 10 MJ/600 kW と 27 MJ /600 kW の SMES 容量について設計検討を行った。コイル構造は漏洩磁界を少なくするために 4 ポールマルチコイルとし、経済性の観点からコイルには  $MgB_2$  導体を用い、液体水素 (20 K) で冷却する。まずシングルコイルの設計を行い、経済性に影響する必要導体量を比較した。その後、4 ポールコイルにしたときの最大経験磁界や必要導体量を計算した。汎用シミュレーションソフトウェアである COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>を用いた。

### 3. 解析方法

シングルコイルの内径、外径、高さを設定し、モデルを作成し解析を行った。以下の条件に合うコイルパラメータを求め、必要導体量の比較を行った。

- ・貯蔵エネルギーは 2.4、6.3 MJ (4 ポールとしたときにカップリング作用により合計 10、27 MJ とするため)
- ・最大経験磁界は 4 T (将来の開発を考慮すると水素温度で 4 T 程度が可能であるため)
- ・シングルコイルの外径 1.5 m 以下 (運搬を考慮)
- ・電流密度を 30 A/mm<sup>2</sup> (これまで開発されてきた同等規模のコイルを参考にした)

### 4. 解析結果

上記の条件を満たした貯蔵エネルギーが 6.3 MJ のシングルコイルパラメータのコイル高さが必要導体量、外径の関係を Fig. 2 に示す。図に示すように、必要導体量が最小となるコイルパラメータが存在することが分かった。しかしながら、4 ポールの場合の運搬を考慮してコイル外径を 1.5 m 以下 (Fig. 2 中の点線以下) とすると、最小必要導体量は 13.62 MA・m となった。貯蔵エネルギーが 2.4 MJ の場合も同様な傾向になった。

### 5. まとめ

本研究では前述の条件を満たすコイルパラメータを探し、必要導体量が少なくなるコイル形状を求めた。条件を満たし、必要導体量が最小になるコイルパラメータは貯蔵エネルギー 10 MJ のときは、シングルコイルの内径、外径、高さはそれぞれ 0.91、1.40、0.26 m にしたときであった。27 MJ のときは、それぞれ 1.18、1.50、0.68 m にしたときであった。今回の結果から得られたコイルパラメータを 10、27 MJ それぞれ Table 1 に示す。

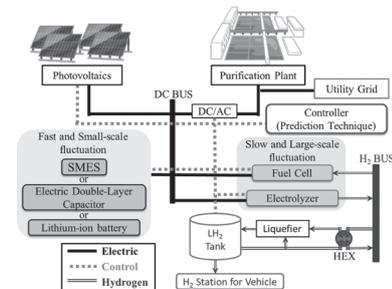


Fig. 1. The concept of energy storage system combined with electricity and hydrogen

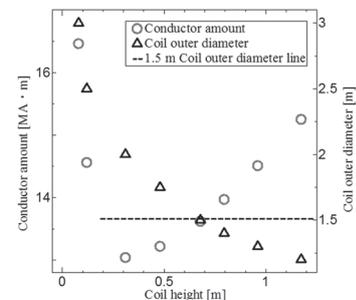


Fig. 2. Relationship of coil height, conductor amount and coil outer radius (Storage energy 6.3 MJ)

Table 1. Coil parameters

	10 MJ	27 MJ
Current density [A/mm <sup>2</sup> ]	30	
Central magnetic field [T]	2.20	2.91
Maximum magnetic field [T]	4.25	4.46
Storage energy [MJ]	10.11	27.07
Inner diameter [m]	0.91	1.18
Outer diameter [m]	1.40	1.50
Height [m]	0.26	0.68
Conductor amount [MA·m]	28.34	54.50

### 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) / 水素社会構築技術開発事業の委託を受け、実施したものである。

## 超伝導変圧器と超伝導ケーブルの限流協調に関する検討(2)

### Cooperation of the current limiting function of superconducting transformers and cables

徳地 貴行, 吉田 幸市, 岩熊 成卓 (九州大学); 富岡 章, 今野 雅行 (富士電機); 足立 和久 (昭和電線)  
 TOKUCHI Takayuki, YOSHIDA Koichi, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);  
 TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co. Ltd.); ADACHI Kazuhisa (SWCC)  
 E-mail: tokuchi@sc.kyushu-u.ac.jp

#### 1. まえがき

超伝導を電力機器に応用することにより、送電時の損失を低減し、電力系統における高効率な送電に大きく貢献すると期待される。また REBCO 超伝導巻線の特性を活かし、落雷時に発生する突発的な事故電流を抑制する機能(限流機能)を、変圧器自体に付加することも可能となる。我々はこれまでにこの限流機能付き超伝導変圧器の研究を行ってきた。

本研究では、将来、超伝導変圧器を実系統に投入する際には、ケーブルにも限流機能を持たせ、超伝導変圧器と超伝導ケーブルを組合せて、限流協調を行う方法が合理的であると考え、この検討を行った。

#### 2. 変圧器およびケーブルの設計、系統構成

Table.1 にケーブルの諸元を示す。ケーブル半径は 26.75[mm]で、磁界を 3.67[ $\mu$  T/A]の幅 5mm の超伝導線材を 24 本円筒状に並べ、ケーブルとして構成し二次側に接続した。

Table.2 に変圧器の諸元を示す。変圧器・ケーブルともに REBCO 線材を使用し、安定化材の Ag の厚さを 18[ $\mu$  m]、Cu の厚さを 50[ $\mu$  m]とした。

Fig.1 に系統構成のイメージを示す。落雷等が発生した場合、事故電流は超伝導変圧器とケーブルの両方により限流される。

#### 3. 数値解析

まず、有限要素法解析ソフトによる磁場解析を行い、この結果を磁束フロー抵抗まで考慮して過大電流に対する応答特性を解析する数値解析プログラムに代入し、突発短絡時の超伝導変圧器とケーブルの応答特性を解析した。本解析では、ケーブル長と変圧器巻線に使用した線材の臨界電流をパラメータとし、解析を行った。変圧器の臨界電流は、Table.2 に示した model 1-5 に設定した。

#### 4. 解析結果

Fig.2 に短絡から 0.2 秒後の各 model でケーブル長を変化させたときの一次巻線の電流値を示している。ケーブルが長くなるにつれ常伝導状態に転移しにくくなり、フラックスフロー抵抗によって限流効果が発揮された。また、変圧器巻線の臨界電流が大きくなるにつれて常伝導領域割合が少なくなり、各 model で複雑な電流変化が見られた。詳細な検討結果は当日報告する。

Table.1 Parameter of a superconducting cable

Superconducting wire	REBCO tape
Voltage	6.9kV
Current	1673A
Magnetic field	3.67 $\mu$ T/A
Ic	4400A

Table.2 Parameter of a 20MVA superconducting transformer

phase	3 $\phi$	
Capacity	20MVA	
Superconducting wire	REBCO tape	
Voltage(Prim. /Sec.)	66kV/6.9kV	
Current(Prim. /Sec.)	175A/1673A	
Frequency	60Hz	
Conductor(Prim. /Sec.)	3 parallel / 24parallel	
%IZ	15%	
Magnetic field	1.4T	
Ic(Prim. /Sec)	model1	340A/3800A
	model2	420A/4500A
	model3	480A/5100A
	model4	550A/5700A
	model5	620A/6200A

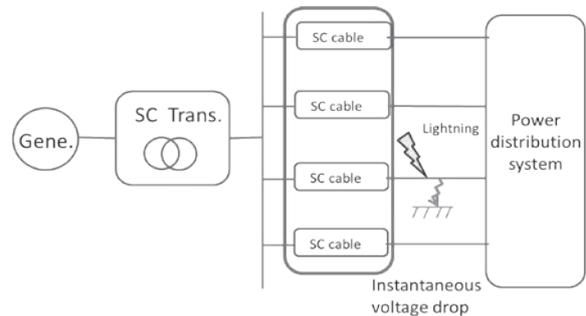


Fig.1 Superconducting grid composed of a superconducting transformer and cables

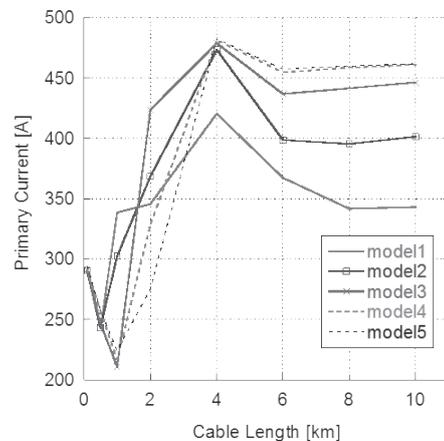


Fig.2 Primary Current 0.2s after the short circuit