

## 光ファイバ温度センサの極低温特性(その4) — 振動・熱変動に対する耐久性と極低温特性への影響の評価 —

### Cryogenic characteristics of an optical fiber sensor (Fourth Report)

#### — Evaluation of the influence of vibration and thermal fluctuation on the durability and cryogenic characteristic of an optical fiber sensor —

杉野 元彦, 水野 克俊, 小方 正文, 長谷川 均(鉄道総研)

SUGINO Motohiko, MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, HASEGAWA Hitoshi (RTRI)

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

#### 1. はじめに

光ファイバ温度センサは高磁場、低温下での使用に優れた特性を持つため、超電導磁石内部の極低温環境での温度を測定する技術の開発を行っており、第1報より3報にて極低温特性の向上について報告した。<sup>1-3)</sup>

リニア用車載超電導磁石を対象に温度センサとして使用する場合、熱変動、振動などの使用環境に対する耐久性を有している必要がある。今回、耐久性検証のため、ヒートサイクル、ヒートショック、振動の耐久試験を行ったので報告する。

#### 2. ヒートサイクル試験

長期間の温度計測に使用した場合、昇温、冷却を繰り返すことでめっき剥離が進行し、測定値の再現性が低下する可能性がある。このため、室温から16Kまでの冷却-昇温サイクルを15回繰り返し、再現性の検証試験を実施した。

Fig.1として、試験結果を示す。試験の結果、再現性低下や測定値の異常な変化等、めっき剥離を示す挙動は見られず、ヒートサイクルに対する耐久性に問題ないことを確認した。

#### 3. ヒートショック試験

光ファイバは表面に3層のめっき処理を行い、そのコーティング部の熱収縮を反射波長の変化として検知する方法を取っている。ヒートショックを受けた場合、熱収縮によって光ファイバとめっき部の界面でめっき剥離を生じる可能性があるため、液体窒素に浸漬することで室温から77Kまで急冷し、ヒートショックに対するめっき処理部の耐久性検証試験を実施した。

Fig.2として、同一サンプルに対し3回の試験を実施した結果を示す。波長は急冷時に急速に減少し、浸漬中は変化せず、自然昇温時に徐々に増加し試験前の波長に回復するという挙動を示した。

めっき剥離が発生した場合、波長は断層状の不連続な波長変化や出力断などの異常な変化を示すが、全ての過程で光ファイバの波長は安定した変化を示しており、ヒートショックに対してめっき処理部が機能を維持することを確認した。

#### 4. 加振試験

光ファイバを温度センサとして使用する場合、走行中のリニアなどの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上下方向の加振試験を行い、振動による断線やめっき剥離発生について検証試験を行った。

試験条件はリニアの走行条件を想定し $\pm 15G$ とした。また目標時間は、営業運転で加減速中に共振点を通過する時間10秒間の15年相当分を想定し、556時間とした。<sup>4)</sup>

所定の加振時間経過後、光チェッカによる導通確認とLN2浸潤したガーゼによるLN2温度の測定試験を行い、試験前後でもセンサとしての出力に変化がないことを確認した。

#### 5. まとめ

光ファイバ温度センサについて、実際の使用を想定し、ヒートサイクル、ヒートショック、振動に対する耐久性の検証試験

を実施した。試験の結果、光ファイバはいずれの耐久試験においても異常や故障を生じることはなく、温度センサとしての機能を維持することを明らかにした。

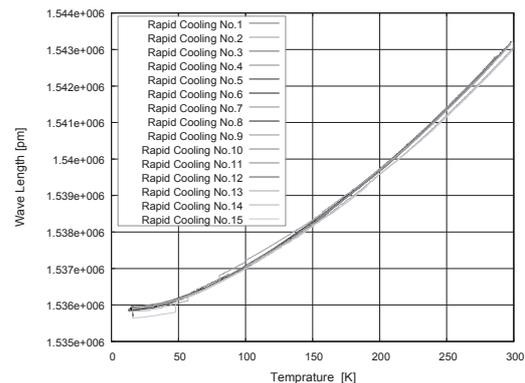


Fig.1 Temperature characteristics of the wavelength (verification of reproducibility by the repeated cooling)

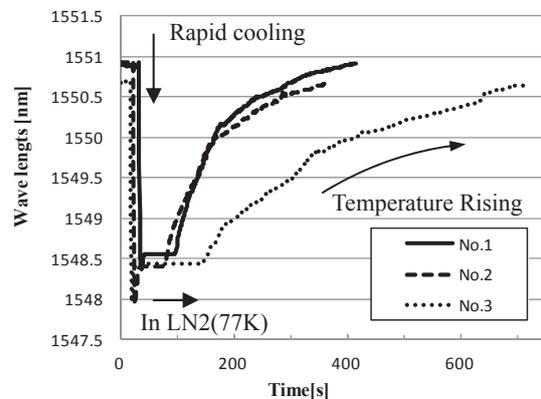


Fig.2 The wavelength shift by the rapid cooling

本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施した。

#### 参考文献

1. Yamada et al.: "Characteristics of optical fiber sensor at cryogenic temperature (Tertiary Report)", Spring meeting of Cryogenics and Superconductivity, May 2014 (in Japanese), 1P-p01
2. Yamada et al.: "Characteristics of optical fiber sensor at cryogenic temperature (Secondary Report)", Spring meeting of Cryogenics and Superconductivity, May 2013 (in Japanese), 1P-p03
3. Yamada et al.: "Characteristics of optical fiber sensor at cryogenic temperature", Autumn meeting of Cryogenics and Superconductivity, November 2012 (in Japanese), 1P-p02
4. Inoue et al.: "Durability Evaluation of Superconducting Magnets", RTRI Report Vol.19 No.6, 2005

# 圧電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 a piezoelectric 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、膝関節の軟骨や骨の再生医療で研究が進められている、核磁気共鳴画像装置用造影剤を磁性微粒子として取り込ませた間葉系幹細胞（以下磁性幹細胞と称す）の外部誘導手段として、強磁気力を提供できる超電導バルク磁石の適用が、臨床応用を目標に積極的に進められている[1] [2]。現状の再生試験では、超電導バルク磁石の磁界内で、前記磁性幹細胞の注入部位や誘導先への細胞の軌跡を、内視鏡を使用しながら確認して行っている。しかし、多数のデータを整理する場合、両部位における磁気力の重要なファクターの一つ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であると考えられる。

本報告では、磁場中に配置した磁気センサーを、ピエゾ素子を積層した圧電アクチュエータで位置制御し、2点間の磁束密度を短時間に計測して、その計測結果から磁気力を数値化する安価な磁気力計測器構造[3]によ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  $B$  とすると、磁気力  $F_m$  は、磁束密度  $B$  と磁気勾配  $\Delta B$  の積（以下、磁気力係数  $f_m$  [T<sup>2</sup>/m] と記す）に比例する。ここで、 $\chi$  は磁化率[-]、 $\mu_0$  は真空透磁率[N/A<sup>2</sup>]である。

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

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

ここで、磁気力係数  $f_m$  の計測は、磁場空間内の微小距離  $\delta L$  の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、前記磁束密度  $B_a, B_b$  の平均値との積値として定量的に算出できる。この計測は  $\delta L$  離れた位置に2個の磁気センサーを配置しても可能であるが、磁気センサーの電子回路も2セットが必要で、かつ特性が異なるセンサーを使用するため磁気勾配  $\Delta B_{ab}$  の計測精度も低下する問題がある。

本研究では、図1の構成図に示すように、1つの磁気センサーを圧電アクチュエータ先端に取り付け、圧電アクチュエータに直流電圧器により電圧を加えて数十  $\mu m$  の  $\delta L$  を短時間で移動させ、移動前後の2点の磁束密度  $B_a, B_b$  を計測して磁気力係数  $f_m$  を算出した。

### 3. 計測結果

表面最高磁束密度約 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ホール素子磁気センサーと圧電アクチュエータの仕様を表1に、図2に供試圧電アクチュエータと磁気センサーの取付け写真を示す。作動直流電圧 0V と 150V における  $\delta L$  を最小目盛 1  $\mu m$  のダイヤルゲージで計測した結果、47  $\mu m$  であった。

圧電アクチュエータにより  $\delta L=47 \mu m$  移動させた2点 a, b 位置（b 点は磁気センサーを磁石表面に最接近した位置）での実測値は、それぞれ  $B_a=449.1 mT$ ,  $B_b=454.3 mT$  であった。したがって、2点 a, b 間の平均磁束密度は 451.7 mT、磁気勾配は 110.6 T/m で、磁気力係数  $f_m$  は 50.0 T<sup>2</sup>/m となる。ここで、測定前後の圧電アクチュエータの温度変化は、0.2 °C 未満で測定時間内での熱変形の影

響は無視できる。

また、本構造によれば、使用する1つの磁気センサーで複数点間の磁束密度差を短時間で計測すればよく、磁気センサーの0点シフトの影響をほとんど受けず、ゼロサプレス操作も必要ないので、簡便にかつ、精度良く磁気力係数  $f_m$  を計測できる。これにより、スパナ等の磁性体を強磁場磁石の漏洩磁場内で使用する際、磁気吸引事故の危険度を定量的に検知し、警報を発する携帯保安安全器具として提供することも可能になる。

Table 1 Specifications of a piezoelectric actuator and a magnetic sensor

Piezoelectric actuator	Amount of displacement * ( $\mu m$ )	Length (mm)	Cross-sectional size (mm)	Insulation resistance (M $\Omega$ )
	42.0 $\pm$ 6.6	40	2 $\times$ 4	20
Magnetic sensor	Type of sensor	Outer diameter (mm)	Magnetic sensitivity (mV/T)	
	Hall element	6.4	7.460	

\*: Applied voltage 150VDC

### 4. まとめ

本研究の構成によれば、1個の磁気センサーを圧電アクチュエータで移動させ、磁場中の2点間の磁束密度を短時間に計測して平均磁気力係数を算出できるので、安価で高精度の磁気力計測器を提供できる見通しを得た。

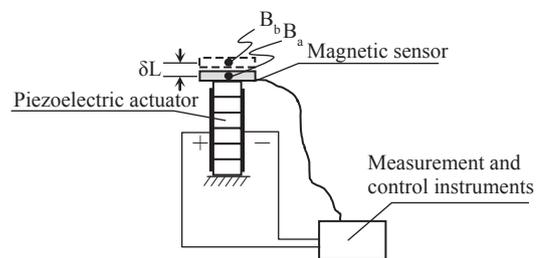


Fig. 1 Illustration of measuring device of the magnetic flux density between two points with a magnetic sensor using the piezoelectric actuator

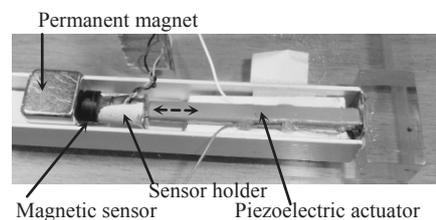


Fig. 2 Photograph of measuring device

### 参考文献

1. M. Ochi : Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons, Vol 21, No 1, pp61-62 (2013)
2. M. Ochi : JST Regenerative medicine based network implementation program report p69 (2013)
3. M. Ono : Japanese Patent Application No. 2013-195172 (2012)

# 極低温用セミリジッドケーブルの開発と評価

## Development and evaluation of cryogenic semi-rigid cables

久志野 彰寛(旭川高専); 笠井 荘一(コアックス)

KUSHINO Akihiro (Asahikawa National College of Technology); KASAI Soichi (COAX CO., LTD.)

E-mail: kushino@asahikawa-nct.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導を用いた光子・粒子検出器は、量子情報通信、材料分析、宇宙観測等、さまざまな分野での利用が期待されている。中でも測定の効率を高めるため、1000ピクセルを超えるような多数の超伝導素子を敷き詰めた、大規模アレイ検出器の研究開発が進められている。多数の超伝導素子からの信号を正確に、かつ高速で読みだすためには、中心導体が外部導体によって完全シールドされた、セミリジッドケーブルと呼ばれる同軸線による配線が有望である。一方でヘリウム温度やそれ以下の極低温では、測定の妨げとなる熱侵入を抑える点から、ケーブル材料の選定に注意を払わなければならない。一般に、金属の電気抵抗率と熱伝導率の間にはウィーデマン-フランツ則が成り立つため、信号の減衰を低く抑えようとするれば熱侵入が大きくなってしまふ。このため、高周波特性や熱特性、コスト等を考慮し、ユーザーが検出器や冷凍機の能力等に応じたケーブルを選定してきた[1][2][3]。

我々は、キュプロニッケル、ステンレス 304、真鍮、ベリリウム銅といった、比較的熱伝導率の小さな合金を外部導体と中心導体に用いたセミリジッドケーブルを作製し、加えて高周波特性を向上させるために、中心導体に銀メッキを施す試みも行ってきた。さらに、ニオブやニオブチタンといった超伝導体を用いることで、 $T_c$  以下でウィーデマン-フランツ則の制限を受けないセミリジッドケーブルも作製した。今回、これらセミリジッドケーブルの熱特性と高周波特性を中心に報告を行う。

### 2. セミリジッドケーブルの作製と測定

セミリジッドケーブルは、ダイスと潤滑油を用いた引き抜き法により作製を行った。引き抜き後、外部導体と中心導体との絶縁に用いている PTFE(polytetrafluoroethylene)のストレスを除去するためのエージングを施した。セミリジッドケーブルの熱伝導度は、3K-GM 冷凍機(Iwatani HE05)の 1st ステージ上のマグネットと熱スイッチによる断熱消磁により実現された、1K から 9K の温度において、定常熱流法[4]を用いて測定した。極低温での高周波特性取得のため、測定対象のセミリジッドケーブル 1m をコイル状に巻き、インジウムを介して 3K の 1st ステージに接触させた。作製したセミリジッドケーブルの構成を **Table 1** に、3K ステージの高周波特性測定部を **Fig.1** に、1K ステージの熱伝導度測定部を **Fig.2** に示す。

Table 1 Measured semi-rigid cables

	Center conductor (diameter in mm)	Outer conductor (outer diameter in mm)
1	Beryllium-Copper (0.20)	Beryllium-Copper (0.86)
2	Brass (0.20)	Brass (0.86)
3	CuNi (0.20)	CuNi (0.86)
4	CuNi (0.20)	Ag-plating CuNi (0.86)
5	Nb (0.20)	Nb (0.86)
6	NbTi (0.20)	NbTi (0.86)
7	NbTi (0.20)	CuNi-clad NbTi (0.86)
8	Phosphor-Bronze (0.29)	Phosphor-Bronze (1.19)
9	SUS304 (0.20)	SUS304 (0.86)
10	SUS304 (0.20)	Ag-plating SUS304 (0.86)

CuNi : Cu-30% Ni, NbTi : Nb-47%Ti

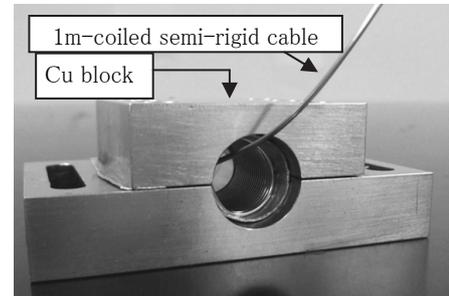


Fig. 1 3K thermal anchor and coiled semi-rigid cable

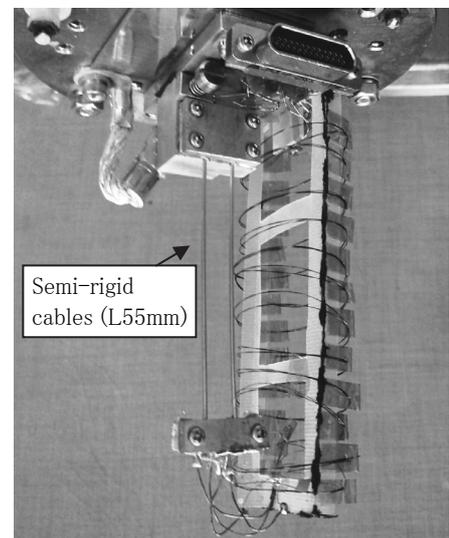


Fig.2 Apparatus of thermal conductance measurement

### 3. 測定結果

熱伝導度の測定において、ほぼ全てのセミリジッドケーブルで予想された値が得られたが、ニオブを用いたケーブルは文献値よりも2桁ほど小さな熱伝導度を示し、引き抜き加工の影響も見られた。150MHz-10GHzでの高周波特性では、中心導体に銀メッキを施した場合に減衰の低減が見られ、超伝導体を用いた場合では抵抗の消失に伴って減衰がほぼゼロになるという良好な特性を得ることができた。

今後、超伝導検出器をはじめとする様々なアプリケーションに対応するため、より多くの種類のセミリジッドケーブルで、室温と極低温の中間温度も含めた特性を調べていきたいと考えている。

### 参考文献

1. A. Kushino, et al.: Cryogenics, Vol. 45 (2005) p.637
2. E. Smith, et al, et al.: Cryogenics, Vol. 52 (2012) p.461
3. G. Tancredi, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 85 (2014) p.026104
4. A. Kushino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 71 (2004) p.153

# 小動物用 SQUID を用いたラット心磁図による肺動脈性高血圧検出法

## MCG detection of pulmonary hypertension in rat model using SQUID system

安田 昌太郎, 日向野 将, 石山 敦士(早大); 小野 弓絵(明治大); 梶村 いちげ, 南沢 享(慈恵医科大)

YASUDA Shotaro, HIGANO Sho, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

ONO Yumie (Meiji Univ.); KAJIMURA Ichige, MINAMISAWA Susumu (Jikei Univ.)

E-mail: yasu-013-show@toki.waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、LTS-SQUID を用いた小動物用生体磁気計測システム[1]を用いて、ラット心磁図(MCG)の計測を行い、MCG の変化と心疾患との関係を明らかにするための研究を行っている。本研究ではラットに薬物(モノクロタリン(MCT))を投与することで右心室肥大を引き起こす、モノクロタリン誘発性肺高血圧モデルラット(MCT ラット)を作製し、心磁図を継続的に計測した。計測終了後、病理解剖検査により疾患の有無が確認されたラットの計測データに積分図法を適用し、本手法の有効性の評価を試みたので報告する。全ての実験は早稲田大学動物実験審査委員会の承認を得て行われた。

### 2. 実験方法

MCT ラットのオス 2 匹, コントロールラット(CTRL ラット)のオス 4 匹の心磁図計測を 12~19 週齢にわたり継続的に行った。MCT ラットは 12 週齢雄性 Wistar rat に MCT を 60mg/kg の用量で皮下投与することで作製した。MCT 投与モデルは「肺高血圧→右室肥大→右室不全」の実験モデルとして確立され、病態生理の検討に活用されている。CTRL ラットには同量の生理食塩水を皮下投与した。ラットの心磁図計測は日向野らの方法[2]により、LTS-SQUID システム(Figure1)を用いて行った。得られた心磁図データに 400Hz のデジタルローパスフィルタ, 1Hz のハイパスフィルタ, ベースライン補正処理をした後に加算平均し, 独立成分分析(ICA)によるノイズ除去を行った。ICA のアルゴリズムには fastICA を用い, SN 比が 2 以上である独立成分を MCG 成分として選択し, ノイズ成分は 0 とした。SN 比は同時計測した心電図の P 波帯, QRST 波帯のいずれかにある心磁図におけるピーク値をシグナル値, その他の時間帯にあるピーク値をノイズ値として計算した。この心磁図データに対して積分図法を適用した。積分図法とは心磁図を脱分極相(QR 区間)と再分極相(ST 区間)において時間積分し, 各時相での総心磁データ強度の積分値を定量化比較する方法である[3]。また, 心磁図計測と並行して心エコー検査を行い, B モード法, ドブラ法による肺高血圧症の評価を行った。

### 3. 実験結果と考察

積分図は CTRL ラット A, B, C, D および MCT ラット A, B において QR 区間, ST 区間で作成した。また, ST 区間の積分値から QR 区間の積分値を差し引いた差分図を作成した。磁場強度を QR 区間, S 区間, T 区間の時間積分値として算出し, 測定した全チャンネルの総和,  $QR_i$ ,  $Si$ ,  $Ti$  を求めて評価したところ, 右室肥大の進行に伴い,  $QR_i$  の低下,  $Si$  の増加,  $Ti$  の増加が確認でき, 心磁図の結果と生理学的なモデルとの対応を確認できた(Figure2)。 $QR_i$  の低下に関しては, 肺高血圧症の進行に伴う右室壁肥大および右室拡大が原因であると考える。SQUID の計測磁場は距離の 2 乗に反比例した値となるため, 病態の進行により SQUID センサと信号源である心室中隔との距離が増加した結果  $QR_i$  が減少したと考えられる。さらに, 右室拡大の進行に伴い心室中隔の形態が変化することにより, 興奮伝導の方向が SQUID の感度が低い方向に変化していくことも原因であると考えられる。 $Si$  の増加に関しては右室壁肥大に伴う活動電位の増加が原因であると考えられる。 $Ti$

の増加に関しては T 持続時間の延長が原因であると考えられる。心エコー検査では 19 週齢で MCT ラット A および B の肺高血圧症の所見を得た。また, 心磁図における  $(Si+Ti)/QR_i$  の変化を追った場合, MCT ラット A および B は 17 週齢でその値の変化を確認できた(Figure3)。したがって, 心エコー検査で形態変化を確認できない早期の段階で, 右室肥大を検出することが出来た。心磁図の積分値が右室肥大の検出に有用な理由として, 各時間帯の心筋興奮の状態を定量化していることと, 活動電位の振幅と時間成分の両方を含んでいるためであると考えられる。

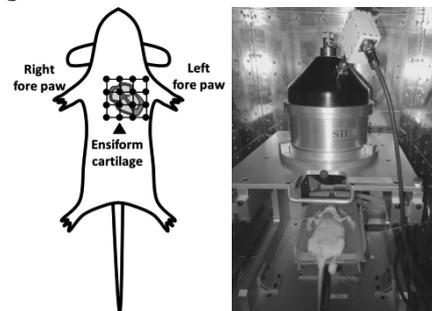


Figure1. Chest 16 points and picture of LTS-SQUID system

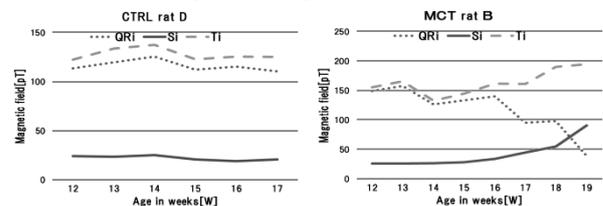


Figure2. Integrated parameter of CTRL rat D and MCT rat B

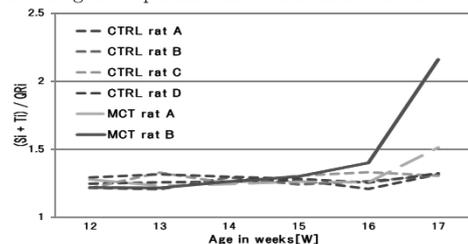


Figure3. Changes in  $(Si+Ti)/QR_i$  of CTRL and MCT rats

### 4. まとめ

本手法は肺高血圧モデルラットの心筋状態を非侵襲的かつ継続的にモニタリングするための有用なツールとなりうる。今後は, 計測データを増やしていき, 本手法の正確性を示していくことが必要である。

### 参考文献

1. Y.Ono, A.Ishiyama, N.Kasai, K.Chinone. : Development of biomagnetic measurement system for mice with high spatial resolution. Appl Phys Lett 85 (2004) p.332-334
2. S.Higano, S.Yasuda, A.Ishiyama, Y.Hatsukade, Y.Ono : Application of HTS-SQUID system to measurement of magnetocardiography of small animals, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 90 (2014) 1P-p05
3. 山口巖, 塚田啓二, 心磁図の読み方, コロナ社, 2006

## 小動物心磁図計測への HTS-SQUID の適用

### Application of HTS-SQUID system to measure magnetocardiography of small animals

日向野 将, 安田 昌太郎, 石山 敦士(早大), 廿日出 好(近畿大), 小野 弓絵(明大)

HIGANO Sho, YASUDA Shotaro, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ); HATSUKADE Yoshimi(Kinki Univ); ONO Yumie (Meiji Univ)

E-mail: s.t-show@akane.waseda.jp

#### 1. はじめに

高感度な磁気センサである SQUID 磁束計を用いた生体磁気計測は、神経や心筋の電気生理学的活動を非侵襲的に計測でき、基礎研究や臨床応用に展開されている。しかし、液体ヘリウムで冷却する LTS-SQUID を用いるものが多く、ランニングコストの高さが問題視されている。そこで我々は、液体窒素冷却による低運転コストの小動物用磁気センシング装置として、高感度、高空間分解能を有する HTS-SQUID 磁気センサシステムを開発し、これをラット心磁図計測に適用したのでその結果を報告する。

#### 2. HTS-SQUID 磁気センサシステムの評価

作製した HTS-SQUID 式磁気センサシステムのノイズ特性を測定・評価した。まず予備実験として、AC バイアス法と DC バイアス法の2つのバイアス電流印加下にてノイズ特性を測定した。この実験系を Figure1 に、ノイズ特性評価結果を Figure2 にそれぞれ示す。これらの結果から、生体磁気計測においては低周波領域の信号が重要になるため本実験では AC バイアス法を用いることにした。

また、SQUID に対して既知磁場を印加することで有効捕獲面積を算出すると  $0.02 \text{ mm}^2$ であった。更に、電圧磁束変換係数は  $1.43 \phi_0/\text{V}$ 、電圧磁場変換係数は  $1.43 \times 10^{-7} \text{ T/V}$  であった。

#### 3. 実験方法

本実験には 12 週齢雄性的 SD ラットを用いた。開発した HTS-SQUID を組み込んだ小動物用生体磁気計測システムを用い、胸部の  $4 \times 4$  点 (6mm 間隔) を各点ごとに 1 分間計測した。麻酔には酸素及び笑気を 3:7 の比率で配合した混合ガスに、イソフルランを 1.0% 加えたものを使用した。計測の際は麻酔による体温の低下を防ぐために温水ベッド (約  $40^\circ\text{C}$ ) 上にラットを仰向けに固定して行った。

サンプリング周波数は  $4000\text{Hz}$  であり、 $300\text{Hz}$  のローパスフィルタと  $1\text{Hz}$  のハイパスフィルタ及び  $50\text{Hz}$  のノッチフィルタを用いた。また、心磁図計測と同時に心電図も計測し、R 波ピークをトリガとして用いることで約 400 回加算平均を行った。更に、得られた 16 点の心磁図を用いて R 波ピークについての磁場コンターマップを作成した。

#### 4. 実験結果と考察

本実験の結果を Figure3 に示す。計測した 16 点の内ほぼ全ての点で R 波ピークを確認することが出来た。R 波ピークについての磁場コンターマップを同条件下で LTS-SQUID を用いて測定したものと比較したものを Figure4 に示す。R 波は心室中隔での電氣的な興奮によって発生するため、心臓の構造から磁場コンターマップの右上が湧き出し、左下が吸い込みになるはずである。Figure4 より、LTS-SQUID によって得られた結果と同様に HTS-SQUID においてもそのような結果が得られた。本実験で用いた HTS-SQUID によって小動物の心磁図を測定することが可能であるということが確認出来た。

#### 5. まとめ

本実験によって、我々が開発した HTS-SQUID を用いて小動物の心磁図の測定が出来ることを示した。ただし、今回は S

波、T 波がノイズに埋もれてしまい確認することが出来なかったため、今後は ICA(独立成分分析)などの解析手法や、計測時間を延ばすことで加算平均回数を増やすなどして解決していく必要がある。

また、本システムは高価な液体ヘリウムを用いる LTS-SQUID 式小動物用生体磁気計測システムの代替になることも期待される。

#### 6. 謝辞

本研究に用いた HTS-SQUID を作製するにあたり、ご指導を頂きました豊橋技術科学大学の田中 三郎教授に心から感謝致します。

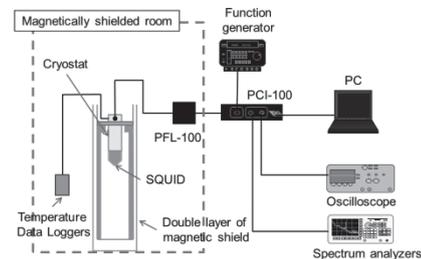


Figure1. Experimental system for evaluating noise characteristic

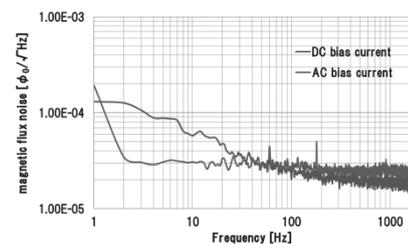


Figure2. Noise characteristic of HTS-SQUID

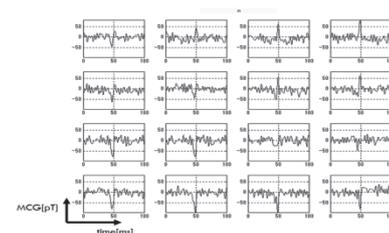


Figure3. Representative result of rat magnetocardiography

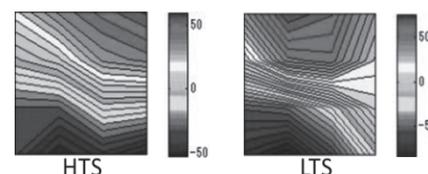


Figure4. Comparison of magnetic contour maps at the peak of R wave measured by HTS and LTS

#### 参考文献

1. S. Aihara, A. Ishiyama, Y. Ono, Y. Hatsukade, S. Minamisawa: Development of small animals biomagnetic measurement technique by SQUID (in Japanese)

# 理研 RIBI における HTc-SQUID ビーム電流モニターの実用化

## Practical Application of High-Tc SQUID Beam Current Monitor at the RIBF

渡邊 環, 福西 暢尚, 加瀬 昌之(理研); 稲森 聡, 今 康一(ティーイービー株式会社)

WATANABE Tamaki, FUKUNISHI Nobuhisa, KASE Masayuki (RIKEN); INAMORI Satoru, KON Kouichi (TEP Corporation)

E-mail: wtamaki@riken.jp

### 1. はじめに

理研仁科加速器研究センターにおいて、現在稼働中の RI ビームファクトリー (RIBF) では、重イオンビームの DC 電流を、非破壊で高感度に測定するために、高温超電導 SQUID を応用した、ビーム電流モニター (以下、“SQUID モニター”と略) の開発を行ってきた[1]。本研究では、臨界温度の高い高温超電導体を用い、冷凍機によって冷却を行っているため、装置はコンパクトになり、ランニングコストの大幅な低減が可能となる。今回、ビーム電流を検出する高温超電導電流センサーを製作するための超電導材塗布装置の製作を行った。また、磁気シールドに関しては、ハイブリッド磁気シールド法の実現、ノイズキャンセラを導入等により、大幅なシールドの強化を行った。実用機としての使用を開始するため、既存の SQUID モニタープロトタイプを解体し、上記の改良を加えた装置と交換し、再組立て作業の終了後、加速器施設のビームトランスポートラインへインストールした。現在、サイクロトロンで加速されたウラン等の重イオンビームの電流測定と、ビーム物理に関する解析を鋭意進めている。今回の学会においては、これまでの開発経緯とビーム電流の測定結果について報告をする。

### 2. 高温超電導電流センサーの改良

高温超電導電流センサーの内部をビームが通過すると、マイスナー効果によって超電導の表面を遮蔽電流が流れる。SQUID モニターには、高温超電導電流センサーの一部 (ブリッジ部) に遮蔽電流が集中するような工夫を施しており、その遮蔽電流が方位角方向に形成する磁場を、SQUID によって高感度に測定し、ビーム電流値に換算している。この高温超電導電流センサーは、99.7%の純度の酸化マグネシウム (MgO) で作られた筒状のセラミックスに、ビスマス系の高温超電導材 ( $\text{Bi}_2\text{-Sr}_2\text{-Ca}_2\text{-Cu}_3\text{-O}_x$  (Bi-2223)) を 500  $\mu\text{m}$  の厚さで塗布焼成して製作する。今回、高温超電導材の塗布装置を新たに製作した。この塗布装置の製作により、従来行われてきた手塗による塗布作業とは違い、むらがなく、均一に超電導材

を塗布する事ができ、焼成中に起きる剥離を減らす事が可能となった。高温超電導電流センサーの塗布焼成と並行して、同じ条件で高温超電導のサンプルを作製し、X 線結晶解析によって Bi2223 相の形成を確認し、サンプルの臨界温度は 105 K、臨界電流は 3250 A/cm<sup>2</sup> という測定結果が得られた。焼成時に高温超電導材が剥離する、という最大の問題点を克服し、高温超電導材の塗布焼成に関するノウハウを確立した。

### 3. 磁気シールドの強化

SQUID 電流モニターの性能は、SQUID の出力とノイズの比、すなわち SN 比で決まる。そのために、超電導体による完全反磁性と強磁性体による磁気遮蔽の特性を活かしたハイブリッド磁気シールド法を考案し、SQUID 電流モニターに適用した。その結果、コンパクトながらも、高いシールド効果が得られるシステムの開発に成功した。この磁気シールドシステムのデザインでは、有限要素法を用いた電磁界シミュレーター TOSCA を用いた磁場計算を行い、最適化を行った。さらに、3 軸高感度磁気センサー及び制御コントローラーが外界変動磁界を常に検知解析し、3 対の X, Y, Z 軸ヘルムホルツコイルにより、その外界変動磁界を打ち消す磁界を発生させ、安定した磁場環境を作り出す、アクティブ磁場キャンセラーシステムを導入した。その結果、外界磁気ノイズの内、最も強い 50 Hz の AC 磁場を、ほぼ 1/10<sup>10</sup> までシールドする事が可能となった。

### 4. ビームトランスポートラインへの設置とビーム電流の測定

実用化のために、SQUID モニタープロトタイプを解体し、上記に記した様に、新たに製作した高温超電導電流センサー、高温超電導 SQUID に入れ替え、ハイブリッド磁気シールド、ノイズキャンセラをインストールした。組み立て終了後、冷却を開始した。SQUID モニター内に模擬電流を流す事により、周波数特性の測定と電流ソースを用いたキャリブレーションを行った。その後、Fig.1 に示すように RIBF のビームトランスポートラインへインストールした。

今年の 4 月から 6 月にかけて、RIBF では重イオンを用いた原子核実験が連日行われてきた。その間、SQUID 電流モニターのデータ収集と制御システムのプログラミングに改良を加えながら、<sup>238</sup>U と <sup>70</sup>Zn のビーム電流の観測を行ってきた。実験のユーザーによってビーム電流量は変わるが、代表的には 2~4  $\mu\text{A}$  のビームを約 300 nA の分解能で測定をする事ができた。今後は、さらに整備を進め、今年度後期の実験で加速予定の <sup>48</sup>Ca ビームを用いて、ビーム電流の測定と周波数解析を進めてゆく予定である。

なお、本研究の一部は、学術研究助成基金助成金(基盤研究(C):課題番号23600015)によって行われている。

### 参考文献

1. T. Watanabe et al., "DEVELOPMENT OF BEAM CURRENT MONITOR WITH HIGH-Tc SQUID AT RIBF", Proc. 2010 Beam Instrumentation Workshop (BIW10), Santa Fe, New Mexico, U.S.A pp. 523-532 (2010).

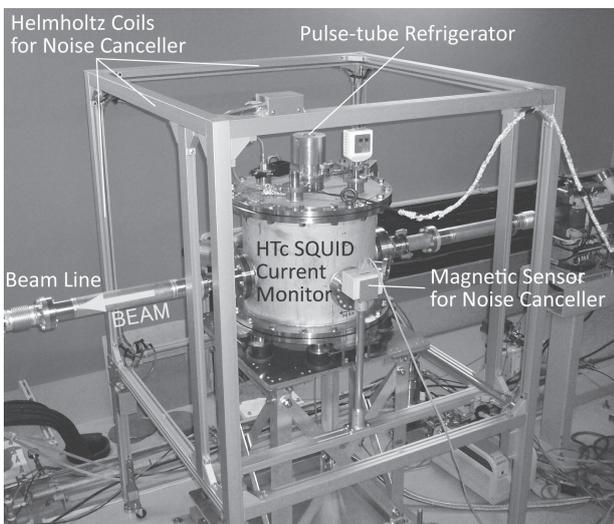


Fig.1 HTc SQUID current monitor with active magnetic field canceller system, which was installed in the beam transport line for use in the RIBF at RIKEN.

# MgB<sub>2</sub> ナノストリップを用いた分子イオン検出器の TDGL シミュレーション

## Time-Dependent Ginzburg-Landau Simulation on Molecular Ion Detectors Using MgB<sub>2</sub> Nanostrips

馬渡 康徳, 全 伸幸, 柏谷 聡, 小池 正記, 大久保 雅隆 (産総研); 柴田 浩行 (NTT 物性研)  
 MAWATARI Yasunori, ZEN Nobuyuki, KASHIWAYA Satoshi, KOIKE Masaki, and OHKUBO Masataka (AIST);  
 SHIBATA Hiroyuki (NTT Basic Res. Lab.)  
 E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

### 1. はじめに

超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器や分子イオン検出器は、高感度、高速応答、および低暗計数といった優れた特徴を持ち、量子情報通信やライフサイエンス等の広い分野への応用が期待されている。産総研では、飛行時間型質量分析計の検出部として Nb ストリップを用いた分子イオン検出器を搭載した次世代分析機器の開発を進めており[1]、さらに MgB<sub>2</sub> ナノストリップを用いた検出器による単一の生体分子イオンの検出にも成功している[2]。MgB<sub>2</sub> は、金属系としては臨界温度が高いことや電子・フォノン緩和時間が極めて短いことにより、冷凍機の小型化や熱的に安定動作が可能である等の点で有望と考えられ[2,3]、MgB<sub>2</sub> を用いた単一光子検出器の開発も行われている[3]。

本研究では、MgB<sub>2</sub> ナノストリップを用いた生体分子イオン検出器の動作原理の解明と高性能化を目指し、検出器動作を再現する数値シミュレーションを行った。また MgB<sub>2</sub> 検出器の実験結果との比較を行った。

### 2. 超伝導ストリップイオン検出器(SSID)とその実験

MgB<sub>2</sub> による超伝導ストリップイオン検出器(Superconducting Strip Ion Detector : SSID)の開発と実験についてはすでに全[2]により報告されており、以下にその概要を述べる。

膜厚  $d = 10\text{nm}$  の MgB<sub>2</sub> 薄膜を幅  $w = 250\text{nm}$  のミアンダ状ストリップに加工し、検出面積  $10 \times 10\mu\text{m}^2$  の検出器を作成した。加工後の臨界温度  $T_c = 20\text{K}$  に対して検出器動作温度は  $3.3\text{K}$  であり、ストリップの臨界電流  $I_c = 96\mu\text{A}$  に対してバイアス電流  $I_b = 94\mu\text{A}$  を流した。生体分子イオンとして分子量 1296 のアンジオテンシンを  $20\text{keV}$  に加速し、分子イオンが超伝導ストリップに付着した時に生じる電圧パルスを計数することにより、単一分子イオンの検出を行った[2]。

Fig. 1 に、出力電圧パルス波形の実験データを丸印で示した。応答時間は  $400\text{ps}$  以下と高速である。Nb に比べて MgB<sub>2</sub> は極めて熱的に安定であるため、 $I_b$  が  $I_c$  の 98% という高いバイアス条件でも安定動作が可能であり、また熱輻射防止用の赤外反射フィルタ等が不要となってイオン透過率 100% を実現することができた[2]。

### 3. 時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式

超伝導ナノストリップにおける局所的常伝導転移を調べる基礎方程式として、次の time-dependent Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式を用いた[4]。

$$\tau_0 \left( \frac{\partial}{\partial t} + i \frac{2\pi}{\phi_0} \Phi \right) \psi = \xi_0^2 \left( \nabla - i \frac{2\pi}{\phi_0} \mathbf{A} \right)^2 \psi + \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right) \psi - |\psi|^2 \psi \quad (1)$$

ここで、 $\psi = |\psi| \exp(i\varphi)$  は絶対零度での平衡解が  $|\psi| = 1$  となるよう規格化した order parameter,  $\Phi$  はスカラーポテンシャル,  $\mathbf{A}$  はベクトルポテンシャル,  $T$  は温度,  $T_c = 20\text{K}$  は臨界温度,  $\phi_0$  は磁束量子,  $\tau_0 = 0.15\text{ps}$  は GL 緩和時間, および  $\xi_0 = 5\text{nm}$  は絶対零度におけるコヒーレンス長である。ストリップ幅は狭い ( $w < \lambda^2/d$ ) ので、電流による自己磁場の効果は無視することができる。このとき、(1)式で  $\mathbf{A} = 0$  とするゲージを選ぶことができ、電磁場の Maxwell 方程式とは切り離して解けばよい。また、電流密度  $\mathbf{j}$  は  $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$  を満たすことから、さらに  $\Phi$  を

決める方程式も得られる。 $\psi$  および  $\Phi$  の境界条件として、ストリップのエッジでは超伝導・常伝導電流の垂直成分がゼロとし、またストリップ端部から輸送電流が流れる条件を課する[4]。

### 4. 超伝導ストリップイオン検出器の数値シミュレーション

温度  $T$  については、次の熱拡散方程式を考える[4]。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T + \frac{C}{\tau_{ep}} (T - T_0) = P_d + Q_i \quad (2)$$

ここで、 $T_0$  は熱浴の温度,  $C$  は熱容量,  $k$  は熱伝導率,  $\tau_{ep} = 2\text{ps}$  は電子・フォノン緩和時間,  $P_d$  はジュール発熱等の散逸による発熱,  $Q_i$  は分子イオンの付着による発熱である。加速された分子イオンが超伝導ストリップに付着すると、 $Q_i$  によるフォノン生成を介して局所的に超伝導電子密度が小さくなるホットスポットが形成される[5]。こうして超伝導ストリップが局所的に常伝導転移し、ストリップに電圧パルスが発生する。

(1),(2)式等を連立して  $\psi$ ,  $\Phi$ , および  $T$  について数値的に解き、超伝導ナノストリップにおける局所的常伝導転移についてシミュレーションを行った。また、超伝導ストリップのインダクタンスや検出器のシャント抵抗等を考慮した回路方程式も連立して解き、超伝導ストリップが局所的に常伝導転移したときにバイアス電流はシャント抵抗に分流し、再び元の超伝導状態に復帰する様子についてもシミュレーションを行った。数値シミュレーションによる出力電圧の計算結果を、Fig. 1 に実線で示した。シミュレーション結果は MgB<sub>2</sub> ナノストリップ検出器の実験データと良い一致を示した。

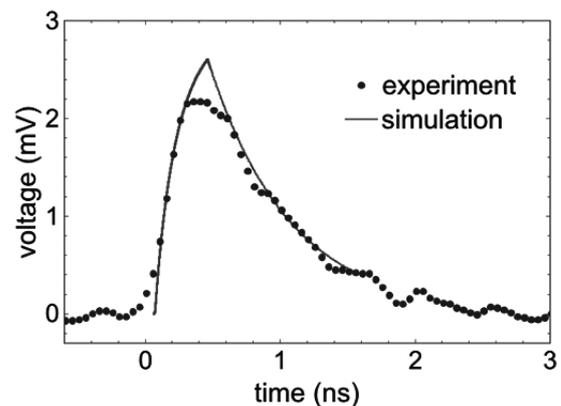


Fig.1: Output voltage of a superconducting strip ion detector (SSID) using MgB<sub>2</sub> nanostrips: the symbols show the experimental data and the line shows the simulation result.

### 参考文献

- [1] N. Zen *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 012601 (2014).
- [2] 全ほか, 第 61 回応用物理学学会春季学術講演会 講演予稿集 19a-PG2-26 (2014).
- [3] H. Shibata *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 212504 (2010).
- [4] Y. Mawatari *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, **86**, 209 (2012).
- [5] M. Ohkubo, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) **46**, 47, (2011).

# 作製法の異なる Y 系超電導体の縦磁界下での臨界電流特性

Critical current properties in longitudinal magnetic field of REBCO superconductor produced by various methods

木内 勝, 秀島 匡彦, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大); 佐藤 迪夫, 三浦 正志 (成蹊大)  
 KIUCHI Masaru, HIDEISHIMA Masahiko, OTABE S. Edmund, TERUO Matsushita (Kyushu Inst. of Tech);  
 SATO Michio, MIURA Masashi (Seikei Univ.)  
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

## 1. はじめに

電気抵抗なしで流せる最大の電流密度である臨界電流密度  $J_c$  は、超電導体の結晶軸を揃えることや、磁束線を止めるピンの導入及びその最適化で大きく向上させることが出来る。一方で、通電電流と平行に磁界を加える縦磁界でも  $J_c$  値を大きく増加させることが出来る。一般にこの現象を縦磁界効果といい、現在精力的に研究開発が行われている Y 系超電導コート線材においても、縦磁界効果により  $J_c$  は増加する [1]。さらにこの効果を利用した直流電力電流ケーブルの開発も進められている [2]。

しかし、この縦磁界効果による  $J_c$  の増加は、電流と磁界の平行度の具合により大きく変化し、結晶軸の乱れによる電流路の不均一さの影響も受ける。したがって、Y 系コート線材の作製法等の違いでも、この  $J_c$  特性が大きく影響を与えることが予想される。

本研究では、様々な手法により作製された Y 系超電導体の縦磁界下での  $J_c$  特性を測定し、作製方法の影響を調べた。

## 2. 実験

測定に用いた Y 系超電導体は、市販されている 2 つの線材で、PLD (Plus Laser Deposition) 法で作製されたフジクラ社製線材と MOCVD (Metal-Organic Vapor Deposition) 法で作製された Super-Power 社製線材である。さらに、STO 単結晶基板上に TFA-MOD (Metal Organic Deposition using TriFluoroAcetates) 法を用いて超電導層を作製した  $Y_{0.77}Gd_{0.23}B_2Cu_3O_y$  超電導薄膜の測定も行った。全ての試料は長さが 1 mm、幅が 100  $\mu\text{m}$  のマイクロブリッジに加工した。超電導層の厚さは市販線材がおおよそ 1  $\mu\text{m}$  で、TFA-MOD は 0.25  $\mu\text{m}$  である。

$J_c$  特性は、直流四端子法を用いて電流密度  $J$  - 電界  $E$  特性を測定し、電界  $E = 1.0 \times 10^{-4}$  V/m の基準を用いて決定した。全ての測定は液体窒素で行った。Fig. 1 に印加した磁界の方向と電流の通電方向との関係を示す。

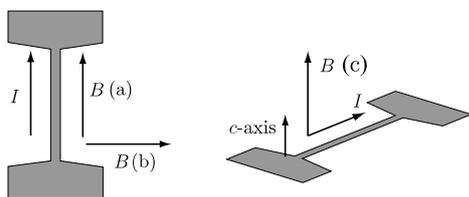


Fig. 1 Arrangement of current  $I$  and magnetic field  $B$  for the measurement of the critical current density. (a)  $B // I$  ( $I // ab$ ), (b)  $B \perp I$  ( $I // ab$ ) and (c)  $B \perp I$  ( $I \perp ab$ ).

## 3. 結果および考察

Fig. 2 に市販線材の、3 つの方向に磁界を加えた場合の自己磁界  $J_c$  (s. f.) で規格化した  $J_c$  の磁界依存性を示す。なお、自己磁界中の  $J_c$  (s. f.) はフジクラ社製線材が  $J_c$  (s. f.) =  $3.7 \times 10^{10}$  A/m<sup>2</sup>、Super-Power 社製線材が  $J_c$  (s. f.) =  $3.2 \times 10^{10}$  A/m<sup>2</sup> である。作製法が異なる 2 つの線材の磁界依存性は 3 つの磁界方向の  $J_c$  の依存性は

まかに同程度であるが、縦磁界下では PLD 法の方が  $J_c$  の磁界依存性がよいことがわかる。これは PLD 法の方が、面内配向性がよいためと考えられる。

Fig. 3 に TFA-MOD の  $J_c$ - $B$  特性を示す。TFA-MOD 法は  $J_c$  (s. f.) (=  $5.6 \times 10^{10}$  A/m<sup>2</sup>) が高いために縦磁界効果による大きな  $J_c$  増加が期待できるが、得られた磁界依存性は先の線材に比べて大きな向上になっていない。この結果から、縦磁界効果によるより優れた  $J_c$  特性を得るためには、面内配向ばかりでなく適切なピンの導入が必要であるとされる。詳細は当日議論する。

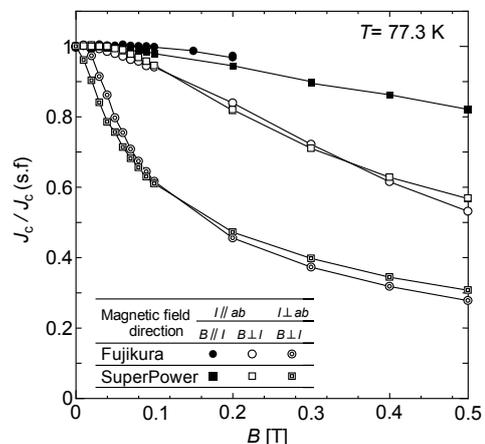


Fig. 2 Normalized Critical current density at 77.3 K for commercial YBCO coated conductors.

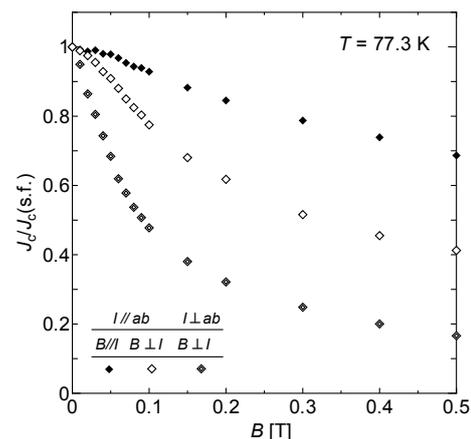


Fig. 3 Normalized Critical current density at 77.3 K for TFA-MOD processed YGBCO film.

## 参考文献

- M. Kiuchi, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p. 76
- T. Matsushita, *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p. 26

電磁鋼板による高温超伝導テープ線材の積層導体の臨界電流向上

Enhancement of the critical current of BSCCO tapes in stacked conductors with ferromagnetic sheets

小原 久人, 山内 健吾, タロウリ モハメド, 孫 建,

浜辺 誠, 渡邊 裕文, 筑本 知子, 山口 作太郎 (中部大学)

OHARA Hisato, YAMAUCHI Kengo, TALLOULI Mohamed, SUN Jian,

HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (CHUBU UNIVERSITY)

1. Introduction

DC superconducting power transmission system has been mainly studied at Chubu University [1]. The critical current of HTS tape has been extensively studied with respect to their layout in the cable to improve the performance of the HTS tapes in the cable [2]. In the stacked tape conductors, the critical current of BSCCO tapes shows strong dependence on the current feeding directions between the tapes. The critical current is improved when the opposite-direction current applied to them and diminished for the same-direction current feeding mode because of strong magnetic field interaction between them [3]. By using the ferromagnetic sheets, the self-field distribution of HTS tapes will be affected and may improve their critical current in the cable [4]. This work present the measurements of the critical currents of BSCCO tape in the stacked tape conductors with ferromagnetic sheets under different current feeding mode.

2. Samples and experiments

BSCCO tapes are used as shown in Table 1. In the present experiments several HTS tapes were used and are insulated with each other and the critical current measurement is performed at 77 K. Different currents are applied to the tapes using two power supplies. The critical current is measured by varying the neighboring current in the stacked tape conductor with and without ferromagnetic sheets. The experiments show the enhancement of the critical current of BSCCO tapes in stacked tape conductors due to the correlated magnetic field interaction by the applied current in the tapes and ferromagnetic sheets.

3. Experimental results and discussion

Fig. 2 shows  $E-I$  curves for single and five tapes conductor with different gaps. The transport current in the neighboring tapes are  $\pm 100$  A and  $\pm 160$  A.  $E-I$  curves are different for different neighboring currents. Fig.3 shows comparison of performance improvement of the critical current for a two-layer stacked tape conductor covered with and without ferromagnetic sheets for the neighboring current of  $\pm 100$  A and  $\pm 160$  A. When the neighboring current is  $-160$  A, the critical currents are improved to more than 13% for the stacked tape conductor in spite of with and without ferromagnetic sheets. When the same-direction currents are applied, the critical current of BSCCO tape can enhanced with ferromagnetic sheets. We will present effects on the critical current of HTS tape of the magnetic field from the currents applied to the neighboring tapes and the ferromagnetic sheets through the magnetic field analysis.

2. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.22
3. H. Ohara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p.99
4. H. Ohara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88(2013) p.163

HTS tape	DI-BSCCO
Thickness	0.35 mm
Width	4.5 mm
Ic (s.f. 77 K)	200 A
Type	HT-CA

Table 1 Specifications of HTS tapes

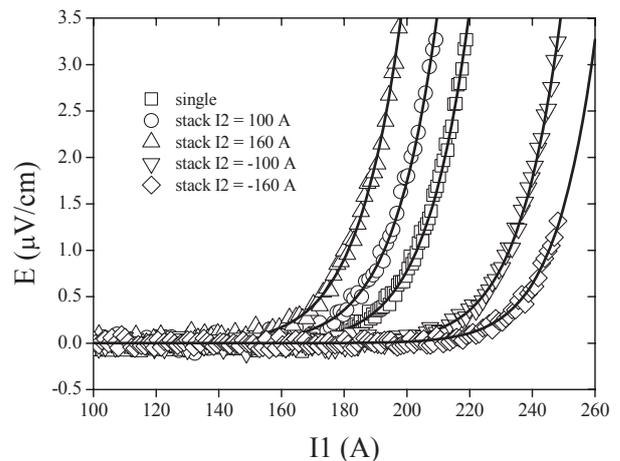


Fig.2 E-I curves of BSCCO tape for single and two-layer stacked tape conductors without ferromagnetic sheets

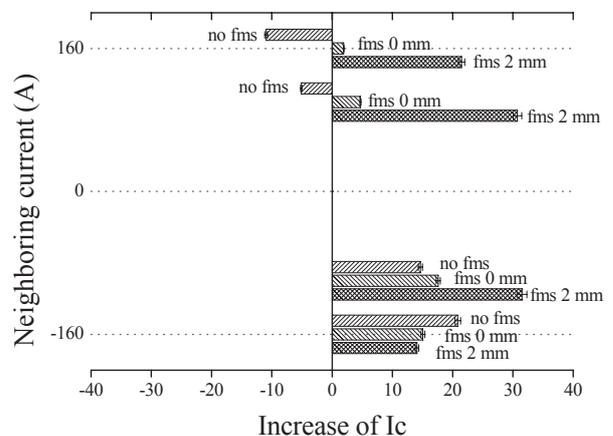


Fig.3 Comparison of enhancement of the critical current with and without ferromagnetic sheets

参考文献

1. S. Yamaguchi. et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2008) p.57

# ホールプローブによる BSCCO 及び YBCO テープの残留磁場測定

## Residual magnetic field measurement of BSCCO and YBCO tapes by a Hall probe

タロウリ モハメド, 孫 建, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, 筑元 知子, 山口 作太郎(中部大);シーシキン オレグ(3V. N. Karazin Kharkov National University, Ukraine); 小田部 荘司(九州工大); シャルフィーカッドウル サミア (Univ. of Tunis El Manar)

TALLOULI Mohamed, SUN Jian, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, CHIKOMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); SHYSHKIN Oleg (V.N.Karazin Kharkiv National Univ.); Otabe Edmund Souji (Kyushu Technical Univ.); CHARFI-KADDOUR Samia (Univ. of Tunis El Manar)

E-mail: te13802-3107@sti.chubu.ac.jp

### 1. Introduction

Damages can happen to a HTS power cable caused by overcurrent or fault conditions. Quick interruption of current is necessary in a fault case and a better understanding of effects of the current cut off time on HTS tapes is required to restart the operation. The purpose of our experiment is to compare the residual magnetic field profiles between the fast and slow cut off the current.

### 2. Experiment

Figure 1 shows a photo of the scanning Hall probe system and right figure shows a scheme of the setup for measuring the magnetic field above a tape conductor by a Hall probe. The Hall probe sensor is situated at 0.3mm above the tape. We scanned the perpendicular component of the magnetic field of each HTS tape along the Y direction to cover the tape width. A constant current is applied to BSCCO tape and then cut off by two operations; slow and fast cut Fig. 2.

We measure the residual magnetic field profile above the tape by scanning a Hall probe. We change the X position along the longitudinal direction. We repeat these measurements for both current operations. During the experiment we keep the constant level of LN2 in the open cryostat. See Fig. 3. From each vertical component of the residual magnetic field we calculated the current density profile by solving the inverse problem of Biot-Savart equation. For the BSCCO tape and the YBCO tape we got then current densities profiles corresponding to X-axis positions along the HTS tape. See Fig.4

### 3. Result and discussion

The profiles of the residual magnetic fields in BSCCO tape are almost the same on the different positions along the direction of transport current. Therefore, their current density profiles along this direction are almost uniform they are almost symmetric profile for the center of the tape, which means that the uniformity of the BSCCO tape is high. On the other hand, the residual magnetic fields of the YBCO tape are not uniform. This is the fundamental difference between these two tapes in the present samples.

The quality of the BSCCO filaments near the edge would be lower than the center's. This is one of the reasons why the current density profile is peaked at the center, which is not same for YBCO Fig.4. We should consider the shielding effect of the superconducting filaments and the matrix materials, such as copper and silver. These resistive materials can consumes electric power. On the other hands, the quality of the superconducting layer of the YBCO tape would be the same all over the tape. This is the reason that the current density is high near the edge.

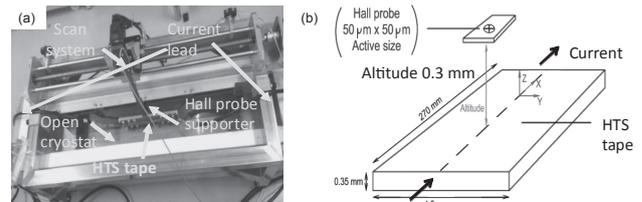


Fig.1 Experimental setup

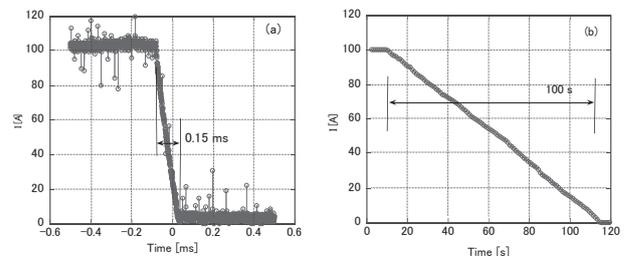


Fig.2 Wave forms of current off, (a) fast-off (Fast op.), (b) 1A/s decreasing (Slow op.).

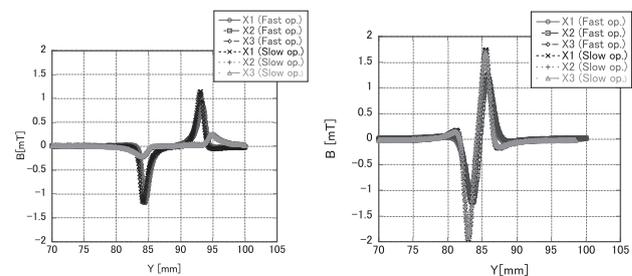


Fig.3 Vertical components profiles of the residual magnetic field of BSCCO (write) and YBCO (left) tapes measured for the operation 1 and 2 on three X-axis positions.

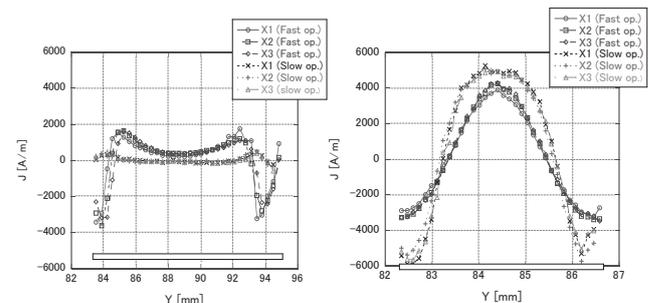


Fig.4 Current density profiles of BSCCO (wright) and YBCO (left) tapes at different longitudinal positions.

## ローレンツ力による YOROI モデルコイルの応力ひずみ評価実験と数値解析

## Experiment and numerical analysis on stress-strain of YOROI model coil due to Lorentz force

王 旭東(KEK/総研大); 辻 義明, 梅田 大貴, 田代 真樹, 山川 宏, 石山 敦士(早大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)  
 WANG Xudong (KEK/SOUKENDAI); TSUJI Yoshiaki, UMEDA Hirotaka, TASHIRO Masaki, YAMAKAWA Hiroshi,  
 ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)  
 E-mail: wanxdon@post.kek.jp

## 1. はじめに

REBCO コイルの高磁場応用において、巻線に発生するローレンツ力に対する耐性の高いコイル構造が必須である。先行研究で開発された YOROI コイル構造[1]は、Y 系線材の強度のみに依存するのではなく、ローレンツ力を巻線外周に配置された枠材を介して、巻線を上下から挟み込む側板に伝えることで、巻線に加わる応力を軽減することが実験と数値解析により証明された[1, 2]。YOROI コイル構造の実用化のためには補強材である外枠や側板の最適化設計が必要不可欠である。そこで今回は、作製した YOROI モデルコイルに対して、側板の厚みをパラメータに応力分担効果を実験と数値解析により評価したので報告する。本研究は科研費(若手研究 B, No. 26820100)「高温超伝導磁石の高機械強度設計技術の開発」において実施したものである。

## 2. 実験と数値解析

実験に用いた YOROI モデルコイルの写真と諸元をそれぞれ Fig. 1 と Table 1 に示す。巻線はダブルパンケーキ構造であり、上下段のコイル最内層表面と最外層表面に計 8 個のひずみゲージを設置して、ローレンツ力による周方向のひずみを測定した。先行研究より側板の厚みが YOROI コイル構造の応力分担を大きく左右するため[2]、同一のモデルコイルに 3 種類の側板(厚み 1.0, 1.5, 2.0 mm)を取り付けてそれぞれの補強効果を評価した。実験は、真空断熱のクライオスタット内に YOROI モデルコイルを取り付け、30 K まで伝導冷却した後、REBCO 線材 ab 面に平行に 10 T の外部磁場を印加し、コイルを 20 A (0.5 A/s) まで励磁してコイル内外層のひずみを測定した。一例として側板の厚みが 1.5 mm の場合におけるコイル内外層のひずみを Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、20 A 励磁時にコイル内層のひずみは最大 29  $\mu$  strain、外層は最大 18  $\mu$  strain となった。数値解析では、10 T の外部磁場を考慮して、コイルのオーバーオール電流密度よりローレンツ力を解析した。巻線部を複合則により Hastelloy(厚み 75  $\mu$ m)、銅層(厚み 75  $\mu$ m)と絶縁層(厚み 50  $\mu$ m)の一体モデルとし、補強部(GFRP)の外枠と側板のボルト接合を考慮して構造解析を行った。構造解析に用いた 1/2 解析モデルを Fig. 3 に示す。境界条件として、最内層は回転しないように設定し、巻線と GFRP 補強部の間は接触条件とした。Fig. 2 の実験条件を模擬し、側板の厚みが 1.5 mm の場合におけるコイル内外層の周方向のひずみと応力の解析結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 はひずみゲージ取り付け位置(Fig. 3 コイル横断面)における解析結果である。Fig. 4 より、20 A 励磁時にコイル内層の周方向ひずみは 30–35  $\mu$  strain、外層は 20–25  $\mu$  strain となった。また、周方向応力はコイル内層が約 4 MPa、外層が約 3 MPa となった。Fig. 4 の周方向ひずみの解析結果は Fig. 2 の実験結果とよく一致しており、解析モデルの妥当性を確認した。冷却時の熱ひずみや他の側板の厚みに対する詳細な結果は発表当日に報告する。

## 3. まとめ

補強構造の設計最適化に向けて、YOROI モデルコイルを用いた実験と数値解析を行い、解析手法の妥当性を確認した。今後は、実機サイズの YOROI コイルの補強構造の解析評価を行う予定である。

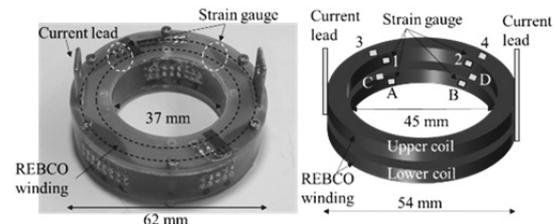


Fig. 1 Photograph and schematic drawing of YOROI model coil

Table 1 Specifications of YOROI model coil

	REBCO winding	YOROI structure
Inner diameter (mm)	45	37
Outer diameter (mm)	54	62
Height (mm)	11.6 (5 per a pancake)	13.6, 14.6, 15.6
$I_c$ @77 K, self-field (A)	105 (0.01 $\mu$ V/cm)	-
Thickness of plate (mm)	-	1.0, 1.5, 2.0

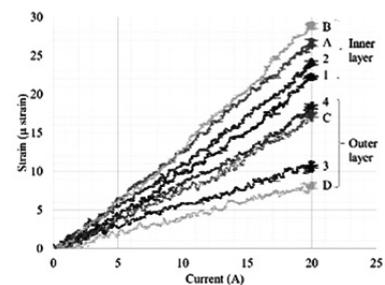


Fig. 2 Experimental results of 1.5-mm-thick plate

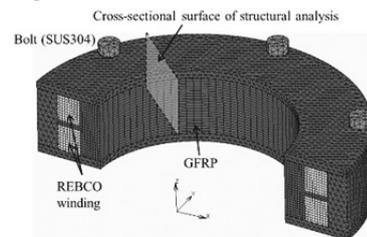


Fig. 3 Structural analysis model

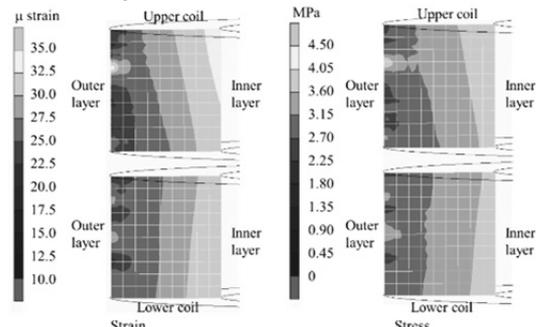


Fig. 4 Analysis results of strain and stress on the winding direction of 1.5-mm-thick plate

## 参考文献

1. S. Nagaya, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, (2013), 4601204
2. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, (2014), 4601605

# 超電導サイクロトロンを想定した高強度円形コイルの設計最適化に関する基礎研究

## Fundamental study on optimization design of high strength circular coil for superconducting cyclotron

辻 義明, 梅田 大貴, 田代 真樹, 石山 敦士, 山川 宏(早大);  
王 旭東(KEK); 植田 浩史(阪大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

TSUJI Yoshiaki, UMEDA Hirotaka, ISHIYAMA Atsushi, YAMAKAWA Hiroshi (Waseda University); WANG Xudong (KEK);  
UEDA Hiroshi (Osaka University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.,Inc.)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、高温超電導技術を活用した重粒子線がん治療用加速器として、小型の高温超電導サイクロトロンを開発を目指している[1]。小型のサイクロトロンを実現するためには、高磁場と高電流密度が求められ、発生する高いローレンツ力に対する高機械強度化が必須である。今回は、先に行った HIMAC と同等の出力 (400 MeV/n, 300 nA) の超電導サイクロトロンの試設計で得られたすべてのコイルによる発生磁場を考慮し、サイクロトロンに用いられる  $m$  級円形スプリットコイルに先行研究で開発された補強構造である YOROI コイル構造 [2] を適応した。そこで、磁場精度も含めた補強構造の設計最適化について検討を行ったので報告する。なお、本研究は科研費(基盤研究 A, No. 26249036)「次世代医療用サイクロトロン開発のための 5H 超伝導コイルシステムの基盤技術の確立」において実施したものである。

### 2. 円形スプリットコイルの設計最適化

先行研究において YOROI コイル構造による円形コイルへの高機械強度化の解析評価を行った[3]。Fig. 1 に試設計した 4 対の円形スプリットコイルの断面構造を示す。また、Fig. 2 に円形スプリットコイルに YOROI コイル構造を適用した解析モデルの断面構造を示す。解析モデルの簡素化のために各コイルが多段パンケーキ構造であることを考慮せず、それぞれを一体として評価した。先行研究の結果、補強構造の体積とローレンツ力によるコイルの変位、応力、ひずみにはトレードオフの関係があり、特に Fig. 2 における上下側板の厚さ ( $t$ ) と外枠の厚さ ( $R_1$ ) が主要なパラメータである[3]。今回はこの二つのパラメータに対して、ESTECO S.p.A の modeFRONTIER を用いて多目的遺伝的アルゴリズムにより円形スプリットコイルの補強構造の体積が最小となるように設計最適化を行った。コイル間の干渉を考慮して  $t$  を 1-50 mm,  $R_1$  を 10-100 mm の範囲に設定した。設計最適化の拘束条件として、コイルの許容変位 (AD) は電磁力によりコイルが一樣に拡張したと仮定し、磁場精度が  $2.0 \times 10^{-3}$  以下を満足するように設定した (Table 1)。また、許容引張応力と歪みは、REBCO 線材の機械強度を考慮して 500 MPa, 0.004 と設定した。以上の条件により、目的関数と拘束条件を式 1, 2 のように定式化した。 $V$  は補強体積,  $D$  は変位,  $\varepsilon$  は歪み,  $\sigma$  は応力である。

$$\text{Minimize } f(x) = V \tag{1}$$

$$\text{subject to } g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, 3 \tag{2}$$

$$x = (t, R_1)^T$$

$$g_1 = \varepsilon - 0.004, g_2 = \sigma - 500, g_3 = D - AD$$

Coil 2 に対する最適設計の結果を Fig. 3 に示す。菱形プロットは実行不可能解、四角プロットは実行可能解となり、丸で示した部分において体積が最小となる最適解である。本結果から、磁場精度による許容変位が最も厳しい拘束条件となった。また Fig. 1 と Table 2 から、厚み 5 mm のシングルパンケーキを想定した場合のパンケーキ間の側板は 1-6 mm 程度となる。

今後は、高温超電導サイクロトロンに必要となる磁場精度、超電導線材の強度を考慮した非円形スパイラルコイルの YOROI コイル構造の設計最適化を行っていく予定である。

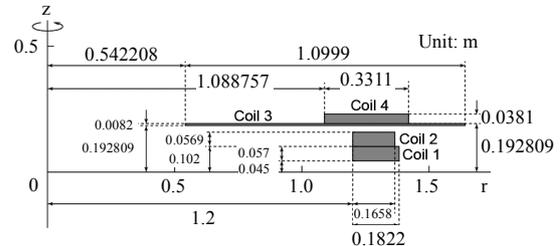


Fig. 1 Schematic drawing of four split main coils

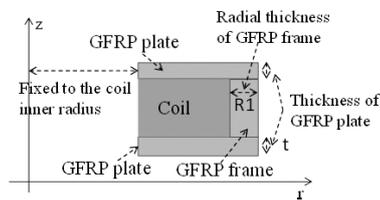


Fig. 2 Cross-section of the numerical model

Table 1 Admissible displacement of coil 1-4

Coil	#1	#2	#3	#4
Admissible displacement (mm)	2.035	2.410	3.226	2.496

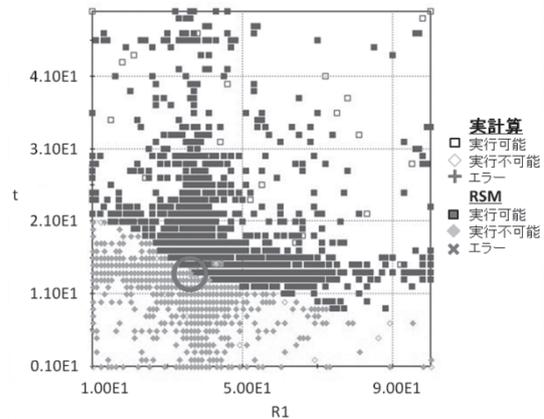


Fig. 3 Optimization design of reinforcing structure of coil 2

Table 2 Optimally-designed reinforcing structure of all coils

Coil	#1	#2	#3	#4
R1 (mm)	14	37	55	14
t (mm)	50	14	8	40
V ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	2.51	1.41	1.96	3.23
Stress (MPa)	172	206	471	214
Strain	0.0019	0.0018	0.0038	0.0026
Displacement (mm)	2.033	2.410	3.226	2.496

### 参考文献

- H. Ueda, X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4100205
- S. Nagaya, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4601204
- X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24 (2014), 4601605

# φ 20 cm 室温ボア RE 系 5 T 超電導マグネットの通電特性

## Evaluation of the 5T REBCO magnet after the fabrication

大保 雅載, 藤田 真司, 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)

DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (FUJIKURA)

E-mail: masanori.daibo@jp.fujikura.com

### 1. はじめに

RE 系超電導線材は高い機械強度を有し、20 K 以上の温度領域でも高い臨界電流-磁場特性を示すため、様々な機器への応用が期待されている。我々は 2012 年に φ 20 cm 室温ボアの RE 系 5 T 超電導マグネットを開発し[1], 12 時間連続通電によるマグネット安定動作確認や自社内の超電導コイル外部磁場試験などに活用している[2], [3]。本報告では φ 20 cm 室温ボア内のホール素子による磁場分布測定結果について報告する。また、RE 系超電導マグネットの製作後の運転実績報告例は多くないため、マグネット製作 21 ヶ月後の通電測定例についても併せて報告する。

### 2. RE 系超電導マグネットのホール素子による磁場分布測定

RE 系 5 T 超電導線マグネットの諸元を Table 1 に示す。室温ボアは φ 20 cm である。今回、この室温ボアにホール素子を設置し、RE 系超電導マグネットを 4.02 A/min にて励磁した。中心磁場が 5.0 T 到達した際に通電電流を保持し、9 分後にコイル軸(Z)方向、コイル径(r)方向にホール素子を動かし磁場分布を測定した。この 9 分後のシャント抵抗によるコイル通電電流は 333 A であり、コイル中心磁場は 5.04 T であった。ビオサバルの式による計算値と測定値を比較した結果を Fig. 1, 2 に示す。遮蔽電流の影響によりコイル中心磁場は計算値よりも 1.1% 小さい値を示している。

### 3. マグネット製作 21 ヶ月後の通電測定例

マグネット製作 21 ヶ月後の励磁速度 4.02 A/min、消磁速度 10.7 A/min の通電測定例を Fig.3 に示す。最上下冷却板温度、冷凍機 2nd ステージの温度も併せて示す。中心磁場 5.0 T 発生させた状態で約 50 分間安定して動作していることを確認した。なお、マグネット製作後、工場の長期休暇等により、3 回冷凍機を停止し、運転温度まで 3 回冷却を行っている。本マグネットについては引き続き自社内の超電導コイル外部磁場試験用などに活用していく予定である。

### 参考文献

1. M. Daibo, et al.: TEION KOGAKU Vol. 48 (2013) p. 226
2. M. Daibo, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24 (2013) 4900304
3. M. Daibo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.83

Table 1 Specifications of the 5 T REBCO magnet [1],[2]

Parameters	Values
Tape width	10 mm
Thickness of substrate of tape	0.1 mm
Thickness of copper stabilizer of tape	0.3 mm (laminated)
Critical current ( $I_c$ ) of tape at 77 K, s. f.	> 467 A
Inner diameter of coil	260 mm
Outer diameter of coil	535 mm
Coil height	271 mm
Number of pancakes coils	24
Total tape length	7200 m
Total number of turns	5775
Magnetic field	5.0 T
Inductance	7.68 H
Stored energy	426 kJ

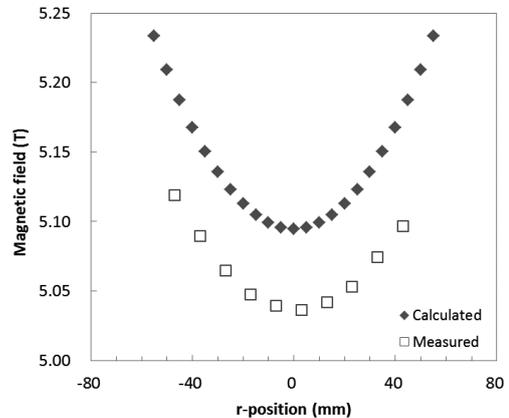


Fig.1 Measured results of magnetic field distribution (Radial direction)

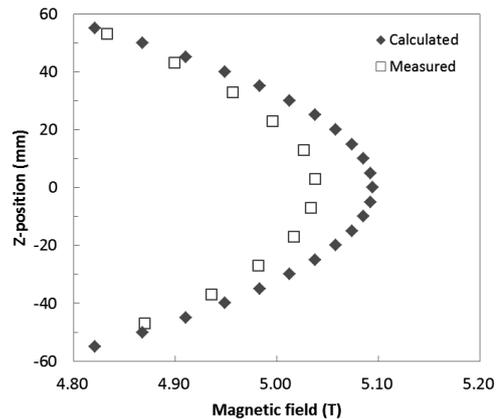


Fig.2 Measured results of magnetic field distribution (Axial direction)

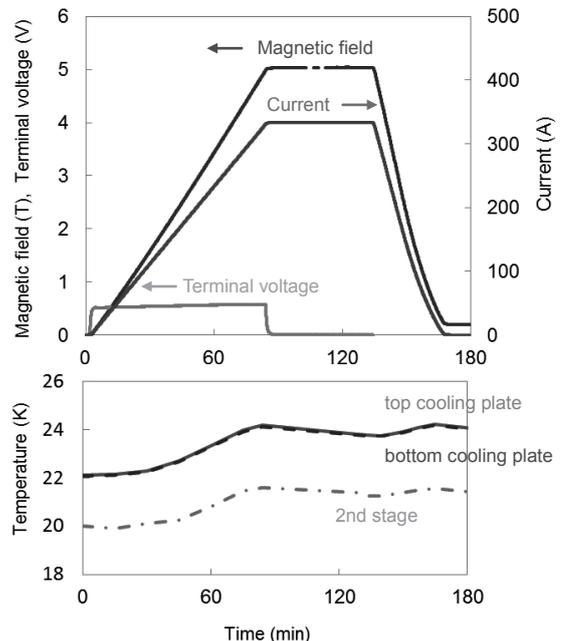


Fig. 3 Time variation of the 5 T magnet as 333 A supplied

## ～高電流密度 Bi-2223 コイルの保護技術確立に向けて～ 非絶縁 Bi-2223 コイルにおける自然熱暴走の振る舞い

– Towards the protection technology of high-current density Bi-2223 coils –  
Natural thermal runaway of uninsulated Bi-2223 coils

名和 雅斗, 柳澤 杏子(千葉大学); 柳澤 吉紀(理研); 中込 秀樹(千葉大学); 前田 秀明(理研)  
NAWA Masato, YANAGISAWA Kyoko (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);  
NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MAEDA Hideaki (RIKEN)  
E-mail: masato.nawa@riken.jp

### 1. はじめに

Bi-2223 線材は引張強度が低い(250 MPa)ため、これまで高磁場中ではフープ応力の制限によって高い電流密度で運転できなかった。しかし最近、Ni-Cr 補強材とプレ圧縮技術を用いることで、引張強度が 400-500MPa へと向上した[1]。これにより、Bi-2223 コイルを 24 T 以上の高磁場中において 200 A/mm<sup>2</sup> を超える高電流密度で運転できる可能性が出てきた。しかし、このような高電流密度運転で問題となるのがコイル保護である。本研究では、高電流密度 Bi-2223 コイルの保護技術確立に向けた基礎的な検討として、非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイルの熱暴走時の振る舞いを実験によって調べた。結果を今年春の学会で発表した非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルの結果[2]と比較した。

### 2. 実験方法

今年春の学会で報告した非絶縁 REBCO レイヤー巻コイル (Fig.1(b)参照)[2]とほぼ同形状のコイルを Bi-2223 線材で製作した (Fig.1(a)参照)。住友電気工業株式会社製の高強度タイプの Bi-2223 線材 (HTi-XX, 幅 4.5 mm, 厚さ 0.29 mm, 77 K での臨界電流 >190 A, 総長 7 m) を使用し、内径 30 mm、外径 33.6 mm、レイヤー数 6、総ターン数 72 の非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイルを製作した。線材の 77 K における  $I_c-B_{\perp}$  特性とコイルの最大径方向磁場のロードラインから見積もったコイルの臨界電流  $I_{c,coil}$  は 65 A である。コイルを液体窒素中において REBCO は 0.7 A/s, Bi-2223 は 0.2 A/s の掃引速度でコイル臨界電流を超えて励磁した。コイル両端電圧 (電極電圧含む) とコイル内の上端、中心、下端の 3 箇所のコイル軸方向磁場を測定した。

### 3. 結果

Fig.2(a)に示すように、Bi-2223 コイルは電源電流 209A において熱暴走し、シングルターンモード転移が起きた。熱暴走が起きたときの電流の負荷率 ( $I_{c,coil}$  に対する比) は 322% である。Fig. 2(b)に示すように、REBCO コイルの場合、110 A で熱暴走が起き[2]、この時の負荷率は 172% である。すなわち、臨界電流以上での自然熱暴走は、Bi-2223 コイルのほうが 1.9 倍も高い負荷率で起きている。

### 4. 考察

実験結果が示すように、REBCO と Bi-2223 の非絶縁レイヤー巻コイルでは、Bi-2223 のほうが高い電流値まで熱暴走が起きにくい。Bi-2223 コイル、REBCO コイルの  $I_{c,coil}$  における線材電流密度  $J_{cond}$  と安定化材電流密度  $J_{stab}$  を table 1 に示す。REBCO コイルでは Bi-2223 コイルと比べ  $I_{c,coil}$  における  $J_{stab}$  の値が 4 倍高い。ジュール発熱量は基本的に  $J_{stab}$  の 2 乗に比例するため、単純に見積ると Bi-2223 コイルのほうが、ジュール発熱量が 1/16 も小さい。そのため、熱暴走に至りにくいのである。また REBCO 線材の  $n$  値は 20 を大きく上回るが、Bi-2223 線材は 20 以下と低いため、温度上昇・発熱のフィードバックが弱く、より熱暴走が起きづらくなっていると推察される。

### 5. まとめ

非絶縁 Bi-2223 コイルではコイル臨界電流の 300% 以上の高い電流値まで自然熱暴走が起きなかった。これは、安定化材電流密度と  $n$  値が低いためである。

### 参考文献

- Nakashima et al., ASC2014 preprint.
- 柳澤他, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2A-a09

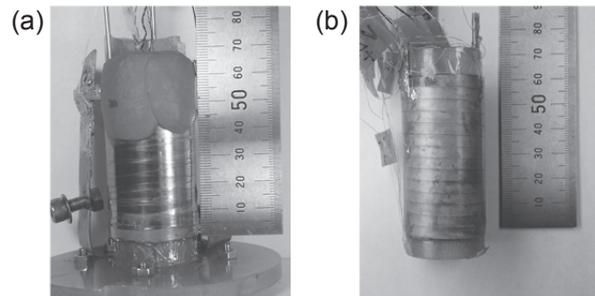


Fig.1 (a) No-insulation (NI) Bi-2223 layer-wound coil. (b) NI REBCO layer-wound coil.

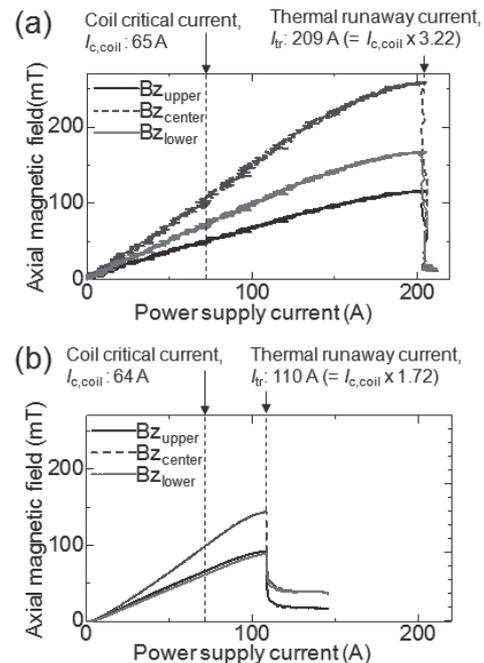


Fig.2 Axial magnetic field vs. power supply current for (a) NI Bi-2223 layer-wound coil and for (b) NI REBCO layer-wound coil.

Table 1. Key current density for Bi-2223 and REBCO coils

	Bi-2223	REBCO
Coil critical current, $I_{c,coil}$	65	64
Conductor current density, $J_{cond}$ , for $I_{c,coil}$ (A/mm <sup>2</sup> )	49	163
Stabilizer current density, $J_{stab}$ , for $I_{c,coil}$ (A/mm <sup>2</sup> )	107	400
Thermal runaway current, $I_{tr}$	209	110
Conductor current density, $J_{cond}$ , for $I_{tr}$ (A/mm <sup>2</sup> )	160	275
Stabilizer current density, $J_{stab}$ , for $I_{tr}$ (A/mm <sup>2</sup> )	343	688

## 樹脂含浸が Gd123 バルク超伝導体の特性に及ぼす影響

## Effects of resin impregnation on the characteristics of Gd123 bulk superconductors

小林 紀之, Muralidhar Miryala, 井上 和朗, 村上 雅人(芝浦工大)

KOBAYASHI Noriyuki, MURALIDHAR Miryala, INOUE Kazuo, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology)

E-mail: mb13015@shibaura-it.ac.jp

## 1. 緒言

RE-Ba-Cu-O系バルク超伝導体は、永久磁石よりも高い強磁場を発生する高機能磁石として、様々な分野への応用が期待されている。しかし、バルク超伝導体は機械的強度が低く、熱応力やローレンツ力などによりクラックが生じ、特性の劣化が生じることが報告されている。

本研究では、応力緩和に有効と考えられる樹脂含浸がバルク超伝導体の捕捉磁場に及ぼす影響を調べた。樹脂には、低温下でも弾性と耐水性が良好であるシリコン樹脂を基材とし、フィラーとしてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加することで樹脂の線膨脹係数の調整を行った。また、Al粉末を添加することで樹脂の熱伝導性向上を図った。

## 2. 実験方法

市販のGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BaO<sub>2</sub>、CuOを原料粉末とし、GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(Gd123)とGd<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>(Gd211)を作製した。その後Gd123とGd211を10:5の比率で混合し、Ag<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を20wt%、Pt0.5wt%を添加し、φ30mmの治具を用いて圧粉成形を行い、種結晶熔融成長法によりバルク超伝導体を作製し、酸素アニール処理を施した。

Al、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の両粉末を添加したシリコン樹脂とバルク超伝導体の線膨脹係数から、樹脂含浸の実験においてAl、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加する割合を決定した。300Kに対する20Kでの熱膨張はGd系、Y系ともab-planeで約-0.0017、c-axis方向で約-0.0035と報告<sup>1)</sup>されることから、Gd系バルク超伝導体の線膨脹係数は近似値としてY系バルク超伝導体の線膨脹係数 $17.34 \times 10^{-6}$  (1/K)を用いた<sup>2)</sup>。

この値に近づけるため、シリコン樹脂にAlを80wt%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を120wt%添加した樹脂を含浸剤として用いた。

鋳型にバルク超伝導体をセットし、超伝導体を覆うように樹脂を流し込んだ。気泡を取り除くため、減圧環境下において含浸処理を施した。

超伝導特性の評価は、最大捕捉磁場により評価した。含浸したバルクと含浸していないバルクで捕捉磁場測定を行い、樹脂含浸が最大捕捉磁場に及ぼす影響を調べた。

## 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に樹脂含浸を施したバルク超伝導体の外観写真を示す。

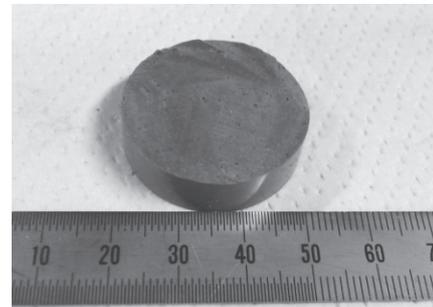


Fig. 1 Photo of a resin-impregnated Gd-Ba-Cu-O bulk superconductor.

Fig. 2に、樹脂含浸が捕捉磁場測定回数と最大捕捉磁場に及ぼす影響を示す。この際、1回目の測定値を100%とした。Fig. 2より含浸したバルクでは5回の測定を行ってもほとんど最大捕捉磁場に影響を及ぼさなかったが、含浸していないバルクでは回数を重ねると最大捕捉磁場が低下していることが分かる。

これは樹脂含浸を施したことにより、急激な温度変化が抑制され、その結果、バルク超伝導体に印加される応力が緩和されるためと考えられる。

今回の実験でGd系バルク超伝導体にシリコン樹脂にAlを80wt%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を120wt%添加した樹脂を含浸させることで繰り返し冷却を行うことによる最大捕捉磁場の低下を抑えられることが確認された。

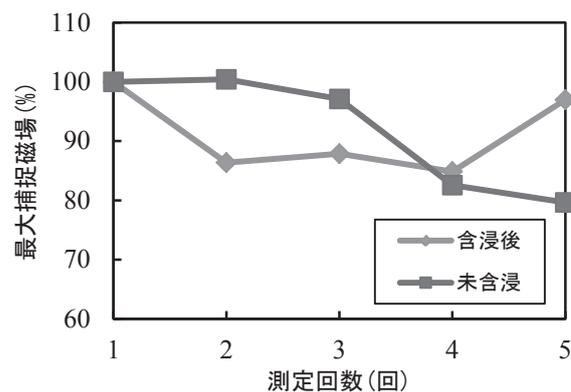


Fig. 2 Change of trapped magnetic field with the number of measurements

## 参考文献

- 1) H. Fujishiro *et al.*: CSJ 37(2000) p.662
- 2) H. Fujishiro *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol 16, No.2 (2006) p. 1007

## バルク超電導体のパルス着磁特性の向上に関する数値解析に基づく検討

Study on the improvement of pulsed field magnetization characteristics of bulk superconductor

横山 悠介, 大崎 博之 (東大)

YOKOYAMA Yusuke, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

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

## 1. はじめに

バルク超電導体は強いピンニング特性を有することから、強力な磁束源として様々な産業応用が期待されている。現在、バルク超電導体の着磁技術には主に磁界中冷却着磁法 (FCM) とパルス着磁法 (PFM) の2つがある。中でも装置が比較的安価かつ小型になる PFM 法が応用上期待されている。

PFM 法の着磁特性向上にはバルクの熱特性を改善する方法や、バルクに細孔加工を施す方法などが考えられている。しかし、これらの方法においては電磁現象に軸対称性が成立しないため数値解析例が少なく、実験だけで様々な条件下における着磁特性を調べるのは難しいのが現状である。そこで本研究では、軸対称性が成立しない解析例として穿孔バルクの3次元数値解析モデルを作成し、有限要素法を用いた解析を行った。

## 2. 数値解析モデル

本研究では有限要素法連成解析ソフト COMSOL を用いて数値解析を行った。半径 23 mm 高さ 15 mm の RE 系バルクを液体窒素による浸漬冷却を行い、3 T のパルス磁界(立ち上がり時間:10ms)を印加することを想定した。3次元解析モデルの断面図を Fig.1 に示す。穿孔バルクは角度方向に均等に16箇所穴を開けたモデルを作成した。穴は直径 2 mm であり、その位置はそれぞれ、バルク中心から 15、17.5、20 mm の位置にある。超電導体の非線形特性は  $n$  値モデルで与え、臨界電流密度の温度・磁界依存性は(1)式を用いた[1]。

$$J_c(\mathbf{B}, T) = J_{c0} \frac{B_0}{\|\mathbf{B}\| + B_0} \frac{T_c - T}{T_c - T_0} \quad (1)$$

## 3. 解析結果

Fig.2 にパルス磁界印加後の  $z=0$  の面における穴を開けた方向の径方向磁束密度分布を示す。均一バルクでは磁束はバルク中心から 10 mm 地点までの侵入であるが、穴を開けたことによってそれ以上の磁束侵入が確認された。また、穴を開ける位置がバルクの中心に近いほど、より磁束が侵入しやすくなるという結果が得られた。

また、Fig.3 にバルク中心と穴の中心とを結んだ線上においてバルク中心から 9 mm 地点におけるバルク表面の磁束密度の時間変化を示す。穴の位置が中心に近いほど、最大の磁束密度が大きくなっていることが見られる。しかし、100 ms において磁束密度は 17.5、20、15 mm 地点に穴を開けたバルクの順に大きくなった。これは、バルク内部に穴を開けたことによって、磁束侵入過程で生じた熱が穴から冷却されたため、バルク内の磁束を捕捉する電流が大きくなった。ただし、15 mm に穴を開けた場合はバルクが冷却される前に磁束が流出してしまったために、最も磁束密度が小さくなった。

## 4. まとめ

穿孔バルクに対する 3 T PFM の 3 次元有限要素法を用いた解析を行った。

バルク中心付近に穴を開けるほど、磁束侵入が促されるが、一定時間経過後には磁束が流出してしまうため、穴の位置について今回検討したところ、半径 15~20 mm の地点に穴を開けることで着磁特性が向上されるのではないかと考えら

れる。今後は、穿孔バルクのみならず非軸対称性を持つ条件においてパルス着磁解析を行い、特性向上を目指した検討を行う。

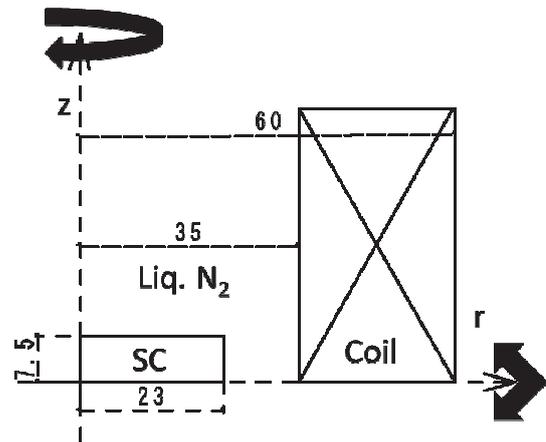
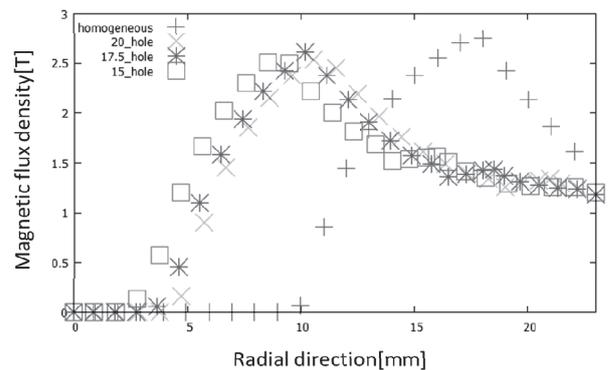
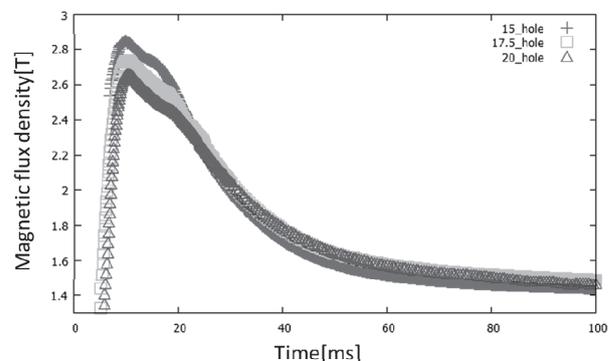


Fig.1 Numerical analysis PFM model

Fig.2 Magnetic flux density distribution in radial direction ( $t = 30$  ms)Fig.3 Time dependence of magnetic flux density on bulk surface ( $r = 9$  mm)

## 参考文献

1. K. Berger, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, No.2, pp.3028- 3031, 2005

## MgB<sub>2</sub>超電導バルク磁石の捕捉磁場の距離依存性

### Distance dependence of trapped field in MgB<sub>2</sub> superconducting bulk magnets

石原 篤, 赤坂 友幸, 富田 優(鉄道総研); 山本 明保(東大, JST さきがけ); 杉野 翔, 岸尾 光二(東大)  
 ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute);  
 YAMAMOTO Akiyasu (The Univ. of Tokyo, JST-PRESTO); SUGINO Sho, KISHIO Kohji (The University of Tokyo)  
 E-mail: ai@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub>は、金属系超電導体最高の約40 KのT<sub>c</sub>をもち[1]、冷凍機冷却による超電導磁石などへの応用が期待される。さらにMgB<sub>2</sub>は異方性が低く、比較的長いコヒーレンス長を持つことから、無配向の多結晶体においても粒間の弱結合の問題がなく、優れた臨界電流特性を示し[2]、試料全体で均一な超電導特性[3]を示すことが期待される。すなわち、MgB<sub>2</sub>は超電導バルク磁石としてNMR等の計測機器への応用に実用上有利であると考えられる。

これまで我々は、均質性の優れた、大型MgB<sub>2</sub>バルク体の開発を行ってきた[4]。本研究では、計測機器等への応用ポテンシャルを明らかにするために、MgB<sub>2</sub>超電導バルク磁石の捕捉磁場分布の距離依存性の評価を行った。

#### 2. 実験方法

Mg粉末、B粉末を混合し、プレスにより、直径50 mmφ、厚さ10 mmの円盤状に成型し、Ar雰囲気下で850°C、3 hの熱処理を行いMgB<sub>2</sub>バルク体を作製した。得られたバルク体試料を冷凍機で15 Kまで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場中冷却により6 Tの磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場特性に関してはバルク体表面に配置したホール素子と、室温空間で走査型ホールプローブを用いて三次元スキャンを行った。なお、試料温度はバルク体底面の温度とした。

#### 3. 結果と考察

直径50 mmφ、厚さ10 mmのMgB<sub>2</sub>バルク体試料を着磁後、ホールプローブにより磁場測定を行った。バルク体表面(z=0)から高さ6 mm位置(z=6 mm)での捕捉磁場の表面分布をFig.1に示すが、理想的なコーン上の磁場分布を示すことが分かった。

バルク体表面から高さを変えたときの、捕捉磁場の径方向依存性をFig.2に示すが、いずれの高さにおいても、左右対称の均一な磁場分布を有することが分かる。また、バルク体表面からの捕捉磁場の高さ依存性を評価した結果をFig.3に示す。zが大きくなるにつれ、捕捉磁場が減衰していくことが分かり、この傾向はBiot-Savart則から算出される傾向とよい一致を示した。

#### 4. 結論

MgB<sub>2</sub>バルク体を作製し、超電導バルク磁石としての素質を検討した結果、捕捉磁場の空間分布は超電導バルク磁石として、優れた均一な特性を示し、NMR等の分析機器への応用に有望であることが示唆された。

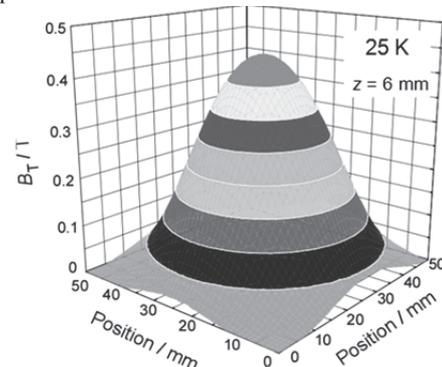


Fig.1 Position dependence of trapped magnetic field for a MgB<sub>2</sub> bulk magnet with 50 mmφ×10 mm<sup>t</sup> (z = 6 mm).

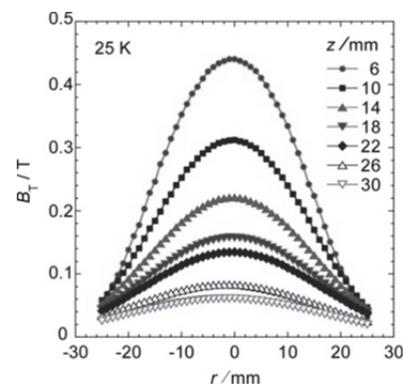


Fig.2 Radial directional distributions of trapped magnetic field of a MgB<sub>2</sub> bulk magnet with 50 mmφ×10 mm<sup>t</sup>.

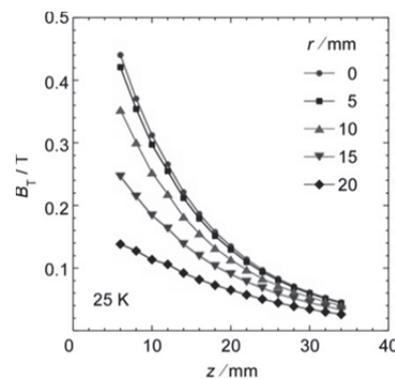


Fig.3 Height directional distributions of trapped magnetic field of a MgB<sub>2</sub> bulk magnet with 50 mmφ×10 mm<sup>t</sup>.

#### 5. 謝辞

本研究はJSPS科学研究費補助金(23246110)ならびにJST さきがけの助成を受けて実施したものである。

#### 参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 山本明保 ほか, *応用物理* **79**, 48 (2010).
- [4] 例えば、富田優 ほか, 第 83 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.86 (2010).

## 冷凍機冷却による大型リング状バルク超電導体の性能評価 Property of large ring-shaped bulk superconductor annuli operated by cryocooler

赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研); 禹 泰城, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)  
AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (RTRI);  
WOO Taeseong, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)  
E-mail: akasaka.tomoyuki.65@rtri.or.jp

### 1. はじめに

RE系高温超電導バルク材は、液体窒素温度(77 K)で高磁場まで高い臨界電流密度を有するため、コンパクトで強い磁場発生が実現できる。本研究ではリング状に加工した高温超電導バルク体[1]を用いてマグネットを構成し、その磁場特性について評価を行った。



Fig.1 Bulk superconductor annuli

### 2. 実験方法

リング状に加工した超電導バルク体外観を Fig.1 に示す。機械強度および熱安定性を向上させるため、金属リング補強ならびに樹脂含浸補強を施している。これらのリング状バルク超電導体の積層数を変えマグネットを構成し、超電導マグネットにより最大 8 T の外部磁場を印加し、冷凍機冷却、もしくは液体窒素浸漬冷却で磁場中着磁を行い、極低温ホール素子で捕捉磁場分布を計測した。

### 3. 結果

大気圧液体窒素浸漬冷却において、リング状バルク体の中心部における捕捉磁場分布を Fig.2 に示す。高さ方向と半径方向における捕捉磁場の均一性を解析した結果、最大磁場を基準として 20mm 幅の中では、高さ方向では 10%、半径方向では 7%程度程度の差が見られた。

リング状バルク体を冷凍機により冷却し、捕捉磁場の高さ依存性を評価した結果を Fig.3 に示すが、より低温で冷却するほど相対的に磁場値が上昇していることが分かる。

### 4. 結論

冷凍機冷却により、リング状バルク体の中心磁場値の評価を行った。今後はさらなる磁場特性の改善のために、バルク体を積層し均一性の評価を行うとともに、コイルによる補正を行う。

### 5. 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金 (24300185) の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

[1] 富田優 ほか, 第 80 回低温工学・超電導学会 講演概要集 p.168 (2009).

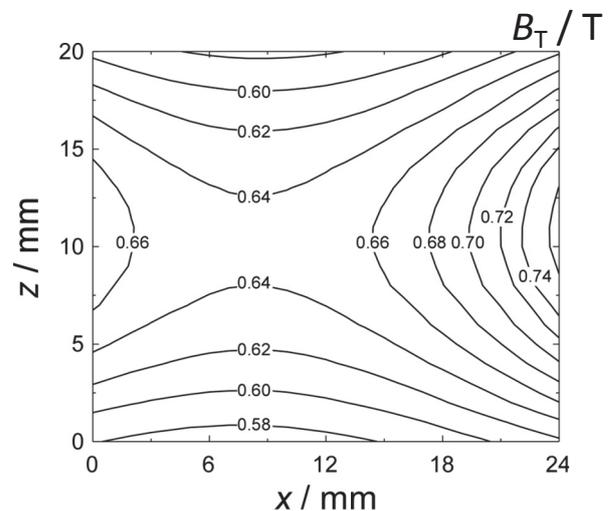


Fig.2 Trapped field distributions of the bulk superconductor annuli center at 77 K.

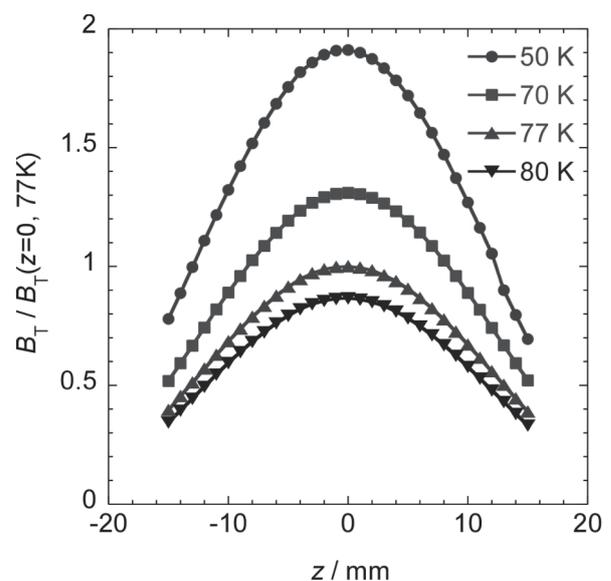


Fig.3 Height directional distributions of trapped magnetic field of the bulk superconductor annuli.

# バルク超伝導体アレイによる磁場分布制御法

## Design study of magnetic field distribution control by using bulk HTS array

紀井 俊輝, 吉田 恭平, Negm Hani, Torgasin Konstantin, Suphakul Sikharin, 榎村 勇輔, 犬飼 元晴, 村田 友哉, 全 炳俊, 増田 開, 大垣 英明 (京大)

Kii Toshiteru, YOSHIDA Kyohei, NEGM Hani, TORGASIN Konstantin, SUPHAKUL Sikharin, TSUGAMURA Yusuke, INUKAI Motoharu, MURATA tomoya, ZEN Heishun, MASUDA Kai, OHGAKI Hideaki (Kyoto University)

E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

従来のバルク超伝導体の応用は、主に超強力永久磁石や強力ソレノイドを模擬する機器を中心に研究・開発が進められてきた。それに対し、近年我々はバルク超伝導体アレイを用いて周期交替磁場を生成し放射光発生用のアンジュレータへ応用することを提案し研究を進めてきた[1]。

希土類銅酸化物系超伝導体バルク超伝導体やMgB<sub>2</sub>バルク超伝導体を低温で用いることで、数 kA/mm<sup>2</sup> を超える高い臨界電流密度を活用することができる。この値は永久磁石の等価電流密度を大きく上回るだけでなく、4.2 K における実用線材の有効電流密度も上回っており、電流密度の観点から極めて高い潜在的能力が期待できる。

### 2. バルク超伝導体アンジュレータ

バルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータ(Bulk HTSC SAU)はソレノイド内部に周期的にバルク超伝導体を配置した構造を持ち(Fig. 1)、外部磁場を変化させた際に超伝導体内部に生じる超伝導誘導電流(白矢印)によって中心軸上に周期磁場を生成するものである。

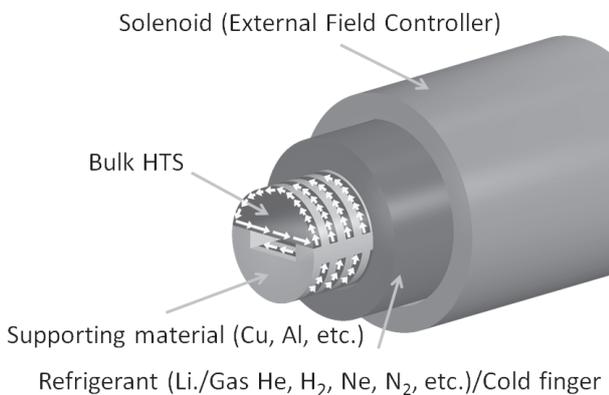


Fig. 1 Schematic drawing of Bulk HTSC SAU

これまでに、周期 10 mm 磁極間隔 4 mm の条件でソレノイド磁場に直交するアンジュレータ磁場強度 0.85 T の生成を達成している[2]。この値は永久磁石で到達可能な磁場強度を超えるものであり、アンジュレータ開発の上で大きなブレイクスルーとなる可能性がある。

### 3. 磁場制御の基本原則

従来のバルク超伝導体の応用では、バルク超伝導体の着磁により磁場を生成し、バルク表面における磁場強度や均一度・分布形状の向上が対象であったが、超伝導体アレイによる磁場生成では、バルク超伝導体アレイへの誘導電流により、着磁方向とは異なる向きの磁場を制御する。磁場生成の模式図を Fig. 2 に示す。従来方式(Fig. 2-a)においては、バルクの着磁そのものを利用して、アレイによる磁場生成(Fig. 2-b)では、バルク超伝導体への誘導電流による漏洩磁束を利用している。

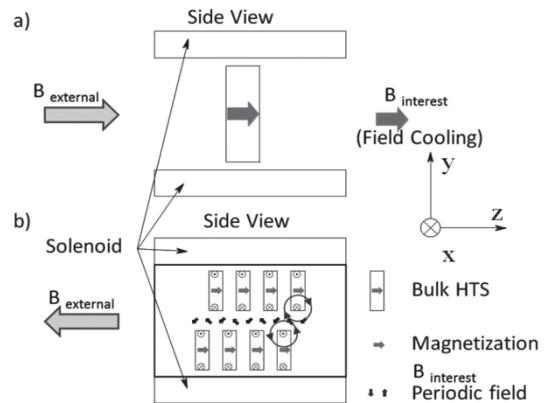


Fig. 2 Schematic drawing for magnetization of bulk HTS.

a) Conventional strong magnet.  $B_{interest} \parallel B_{external}$

b) Field generation using HTS array.  $B_{interest} \perp B_{external}$

### 4. アレイ方式による磁場生成の適用例

アンジュレータとして利用する場合には、漏洩磁束の直交成分が強め合うように半周期ずらしたアレイ配置を取る。(Fig. 3-a)複数のバルクを平面内に配置すると、その中心部には逆方向に強力な漏洩磁束が生成される。(Fig 3-b)

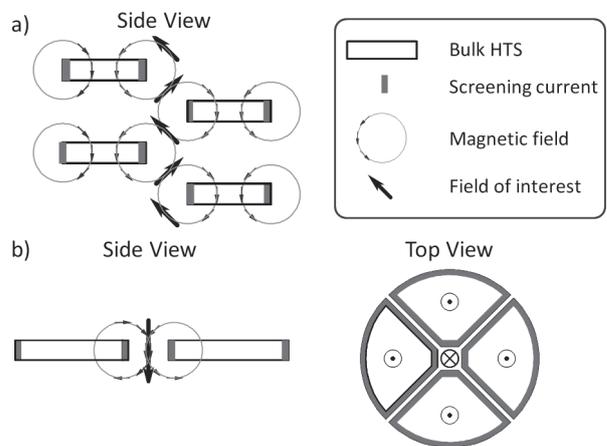


Fig. 3 Example of application of bulk HTS array.

a) Strong periodic magnetic field  $B_{interest} \perp B_{external}$

b) Localized strong magnetic field.  $B_{interest} \parallel -B_{external}$

アンジュレータ以外の応用例としては、交互に変化する強い磁気勾配の活用(アンジュレータ試験機では 3.4 T/cm に相当)、局所的な強磁場生成などが考えられる。講演では、より具体的な応用例とともに、数値計算に基づく磁場強度予測や簡単な設計指針について詳細な報告を行う。

### 参考文献

1. T. Kii, et al.: Proc. FEL2006 (2006) p. 653
2. R. Kinjo, et al.: Applied Physics Express Vol. 6 (2013) 042701

## 中空円筒バルク高温超電導体の応力解析時の境界条件 Boundary Conditions in Stress Analysis of a Hollow Cylindrical Bulk HTS

槌本 昌則(北科大)

TSUCHIMOTO Masanori (Hokkaido Univ. Sci.)

E-mail: tsuchi@hus.ac.jp

### 1. はじめに

超電導バルク磁石の応用として、中空部分に様な強磁場を捕捉させた中空円筒バルク材の小型 NMR への利用が提案されている。バルクの大型化や遮蔽電流密度の向上と共に電磁力に対する補強手段を評価することが重要になる。著者らは超電導体中の巨視的な電磁現象の数値解析から、円盤状バルク材内部の応力分布について1次元解析解と軸対称3次元数値解の違いを明らかにし、着磁中のバルク材破壊実験結果での最大応力の評価を行っている[1]。ここでは外部を補強した拘束境界条件下での中空円筒状バルク材の応力について解析を行う[2]。

### 2. 定式化

超電導体中での巨視的な電磁現象はマックスウェルの方程式で記述される。外部磁場の時間変化が十分ゆっくりな準静的な電磁界変化に対して、第2種超電導体での電界と遮蔽電流は標準的な臨界状態モデルで表される。

$$J_{sc} = J_c \frac{E}{|E|} \text{ if } |E| \neq 0, \quad \frac{\partial J_{sc}}{\partial t} = 0 \text{ if } |E| = 0. \quad (1)$$

上式が通常の導体でのオームの法則に代わる電界と遮蔽電流間の構成関係式であり、超電導の特性を表す。外部磁場の時間変化により電界が生じる要素では電界の方向に電流密度  $J_c$  の遮蔽電流が流れ、遮蔽効果で電界が生じない要素では電流状態に変化が生じないことを意味している。遮蔽電流密度  $J_c$  は磁場依存性を持つが、本解析では遮蔽電流密度一定のピンモデルを用いる。離散化したモデルに対して、各時間ステップで非線形な(1)式を満足する遮蔽電流分布を反復計算により求める。軸対称3次元解析では、それぞれの要素において反復  $n$  段目の電流密度  $J_n$  を  $J_n \leq J_c$  を満足する様に次式で決定する。

$$J_n = J_{n-1} + \delta J \cdot \text{sign}(E_n) \quad \text{if } |E_n| > \varepsilon$$

$$J_n = J_{n-1} \quad \text{if } |E_n| \leq \varepsilon \quad (2)$$

$\varepsilon$  は収束条件、 $\text{sign}(E_n)$  は磁場の時間変化の正負を表す。反復計算では  $\delta J$  を解の収束に従って小さくしていき、ほぼ  $J_c$  or ゼロの遮蔽電流分布を安定に求めている。

軸対称系において試料内で半径方向・軸方向のローレンツ力  $F_r \cdot F_z$  が生じると、微小体積中での力の釣り合いが得られる。半径方向・軸方向変位  $u, w$  を用いて表した半径方向・フープ・軸方向・せん断各応力を代入して次の支配方程式が得られる。

$$F_r = \frac{-Y}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{(1-2\nu)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{(1-\nu)}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - (1-\nu) \frac{u}{r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial z} \right\},$$

$$F_z = \frac{-Y}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{(1-2\nu)}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{(1-2\nu)}{2r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} + \frac{1}{2r} \frac{\partial u}{\partial z} \right\}, \quad (3)$$

$\nu, Y$  はポアソン比、ヤング率である。内径、外径、厚さが  $a, b, h$  の中空円筒モデルでの開放境界条件は次式になる。

$$\sigma_r = 0 \text{ on } r = a, b, \quad (4)$$

$$\sigma_z = 0 \text{ on } z = 0, h.$$

バルク材の着磁実験では金属リングをバルク材にはめて

補強する場合が多い。中空円筒の外径面をしっかりと固定した場合の  $r=b$  での完全拘束条件は次式になる。

$$u = 0 \text{ on } r = b \quad (5)$$

外径で境界条件に半径方向応力を与えることもできる。

$$u = \sigma_{rout} \text{ on } r = b \quad (6)$$

(3)式を差分法で離散化し、反復計算で境界条件を満足する変位  $u, w$  の収束解を求めてから各応力分布を求める。

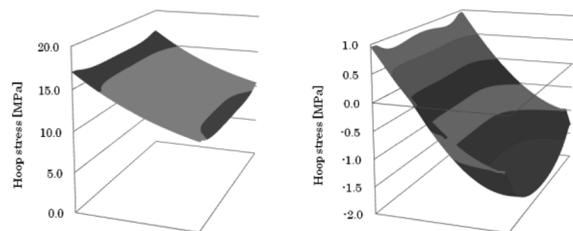
### 3. 解析結果

まず全面着磁状態の応力分布の解析を行った。内径  $a=16.0$  mm, 外径  $b=23.0$  mm, 厚さ  $h=40.0$  mm の中空円筒バルク材を考え、遮蔽電流密度  $J_c=5.0 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup> のピンモデルを用いた。ポアソン比  $\nu=0.3$  で解析を行った。内径  $r=a$  で開放時に Fig. 1(a) (b) が外径  $r=b$  でそれぞれ開放  $\sigma_r=0$  と完全拘束  $u=0$  のフープ応力分布になる。開放ではフープ応力が大きく出る、完全拘束では外径側に圧縮応力が出る、最大応力は内径で得られることがわかる。

境界条件を半径方向応力で与える場合は材料のヤング率を入れて解かなければならない。Fig. 1(b)を参考に外径  $r=b$  で圧縮応力-4MPa を境界条件に、ヤング率  $Y$  を  $117 \times 10^9$  Pa とした時のフープ応力分布が Fig. 2 になる。最大応力はさほど変わらないが Fig. 1(b) と分布が多少変わってくる事が分かる。

### 4. おわりに

中空円筒状バルク材の応力について、外部を補強した境界条件での応力について解析を行った。詳細計算を引き続き行っている。



(a)  $\sigma_r=0$  on  $r=b$       (b)  $u=0$  on  $r=b$

Fig.1 Hoop stress under  $\sigma_r=0$  on  $r=a$

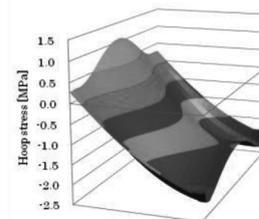


Fig.2 Hoop stress under  $\sigma_r=-4$ MPa on  $r=b$   
in addition to  $\sigma_r=0$  on  $r=a$

### 参考文献

1. 槌本, 村田, 高嶋: 低温工学, Vol. 37 (2002) pp. 671-674.
2. 槌本: 低温工学, Vol. 47 (2012) pp. 605-609.

# 中性子照射による Nb 薄板内のトラップ量子化磁束挙動の変化 Influence of Neutron Irradiation on Trapped Fluxoids in Nb Thin Plates

井上 昌睦, 金 グラシア, 東川 甲平, 出光 一哉, 木須 隆暢(九大);

西村 新(ITER 国際機構); 落合 謙太郎, 今野 力(原子力機構); 菱沼 良光, 今川 信作(NIFS)

INOUE Masayoshi, KIM Gracia, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu, IDEMITSU Kazuya (Kyushu Univ.);

NISHIMURA Arata (ITER-IT); OCHIAI Kentaro, KONNO Chikara (JAEA FNS); HISHINUMA Yoshimitsu, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: inoue@ees.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

核融合炉用の超伝導磁石は核融合で発生する中性子の照射に晒されるため、構成材料である超伝導線材の中性子照射に伴う超伝導特性の変化機構の解明が重要である。本研究では、モデル試料として純 Nb 薄板を用いて、中性子照射後の特性変化をメゾスコピックレベルの量子化磁束挙動観察および巨視的スケールの臨界電流特性の測定により実験的に明らかとした。

## 2. 実験

試料は圧延、熱処理により薄板上に加工した純 Nb で、日本原子力研究開発機構(JAEA)の核融合中性子源施設(FNS)にて DT 反応による 14MeV の中性子照射を行った。中性子の照射量は  $1 \times 10^{19} \text{ n/m}^2$  程度であった。

照射前後の試料に対して、SQUID 磁気顕微鏡による量子化磁束の観察ならびに磁化測定による磁場中臨界電流密度  $J_c$  の評価を行い比較した。

なお、本研究の実施のため、九州大学にて新たな核種の登録手続きを行い、中性子照射後の放射化した Nb 試料の受け入れ態勢を整えている。

## 3. 実験結果及び考察

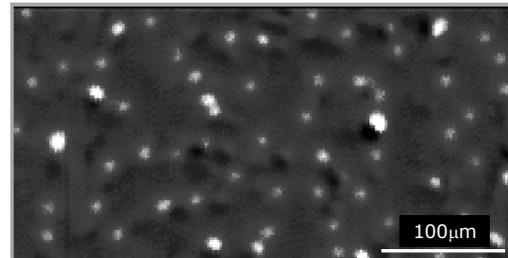
Fig.1 に SQUID 磁気顕微鏡像を示す。図中の白い点が磁場強度の強い領域であり、Nb 試料内で磁場が量子化されていることが分かる。中性子未照射試料(Fig.1(a))では、量子化磁束が複数本まとまって存在する領域や、逆向きの磁場として観察される anti-vortex の構造が多く確認されるが、中性子照射後の試料(Fig.1(b))ではそれらが減少していることが統計的な解析により明らかとなった。これは、マクロスケールの  $J_c$  には大きな変化は見られない  $1 \times 10^{19} \text{ n/m}^2$  程度の照射量において既に、中性子照射により多数の微小欠陥が結晶粒内に導入され、磁束のピンニングに寄与していることを示唆するものである。

一方、単一量子化磁束そのものの磁束プロファイルについて着目してみると、照射前後での変化は見られなかった。すなわち、Fig.2 に示すような磁束プロファイルに対して、磁場侵入長  $\lambda$  やピックアップコイルと試料表面との距離の関数として与えられる理論曲線のフィッティングを行ったところ、磁場侵入長に変化は見られなかった。また、磁束プロファイルの温度依存性を観察し、磁場侵入長の温度依存性についても調べたところ、Fig.3 に示すように両者とも磁場侵入長より得られる超伝導電子密度の温度依存性が良く一致しており、磁束プロファイルから得られる臨界温度  $T_c$  も変化していないことが分かった。このことは、中性子照射によるマトリクスの超伝導特性の劣化は生じていないことを示している。

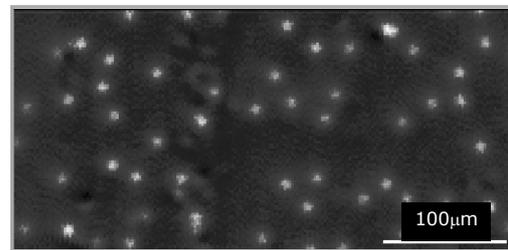
量子化磁束の統計分布および磁束プロファイルの解析の詳細については当日報告する。

## 謝辞

本研究は、核融合科学研究所の共同研究プログラム(NIFS11K0BF022)及び日本原子力研究開発機構との FNS 利用共同研究の一環として実施したものである。



(a)



(b)

Fig. 1 SSM images of Nb thin plate (a) before irradiation, (b) after irradiation ( $1 \times 10^{19} \text{ n/m}^2$ )

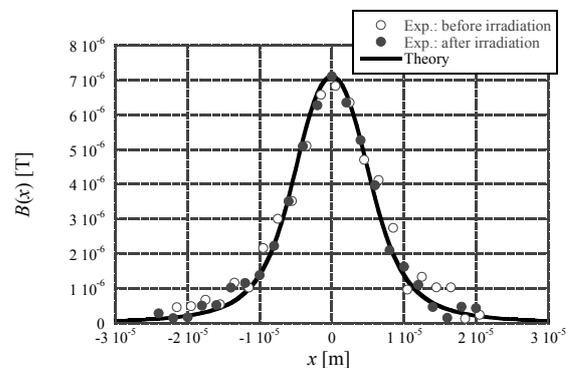


Fig. 2 Magnetic field density profile of single fluxoid for Nb thin plate

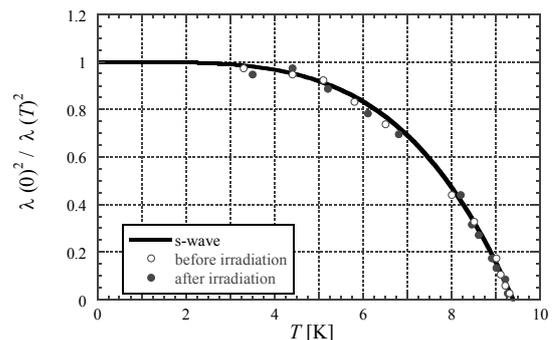


Fig. 3 Temperature dependence of superfluid density

# ヘリカル型核融合炉への適用をめざした大電流高温超伝導 単純積層導体の電流分布解析

Current distribution analysis of the large-current HTS simple-stacked conductor to be used for the LHD-type helical fusion reactor.

寺崎 義朗 (総研大); 柳 長門、濱口 真司、田村 仁、三戸 利行、相良 明男 (NIFS);  
伊藤 悟、清野 祐太郎、橋爪 秀利 (東北大)

TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); YANAGI Nagato, HAMAGUCHI Shinji, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki,  
SAGARA Akio (NIFS); ITO Satoshi, SEINO Yutaro, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: terazaki@nifs.ac.jp

## 1. 背景

現在、核融合科学研究所で設計活動が進められているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1[1]のヘリカルコイルには 100 kA 級の導体が必要とされており、著者らは高温超伝導 (HTS) 線材を用いた大電流導体の開発研究を行っている。今回我々が製作した 100 kA 級プロトタイプ導体は GdBCO 線材 (フジクラ製 FYSC-SC10) を銅ジャケット内に積層し、その周りをステンレスジャケットで囲った構造をしている。この導体をレーストラック形状の短絡サンプルとして試験を行った。試験の結果、4.2 K、0.3 T において 118 kA、20 K、5.3 T において 100 kA の電流を流すことができた。

## 2. 数値解析

臨界電流解析では積層された GdBCO 線材をひとつの導体のように見なし、その断面を細かく要素に区切った。区切られた要素には所定の輸送電流値を与え、ビオ・サバルの法則によって電流が作る磁場を求め、外部磁場を加えた磁場強度と印加角度から各要素の臨界電流値を決めた。輸送電流値が臨界電流値を上回ったとき、その要素は臨界に達したとみなし、余剰分を再配分しながらすべての要素が臨界に達したところで各要素の臨界電流値の和を導体全体の臨界電流とした。GdBCO 線材の臨界電流特性は文献[2]のパレーションモデルを用いて評価した。以前製作した 30 kA 級導体[3, 4, 5]に対して同様の解析を行ったところ、低磁場領域では解析値と実験値がよく一致するものの、高磁場領域では開きが見られることがわかっている[5]。Fig.1 に温度 20 K、自己磁場で臨界電流に達したときの線材内の自己磁場分布と電流密度分布、また Fig.2 には温度 20 K、磁場 6.1 T の時の分布を示す。低磁場領域では、線材面に垂直な成分の磁場が臨界電流値を決めている一方、高磁場領域では、線材面に水平な成分の磁場が支配的であることが分かった。

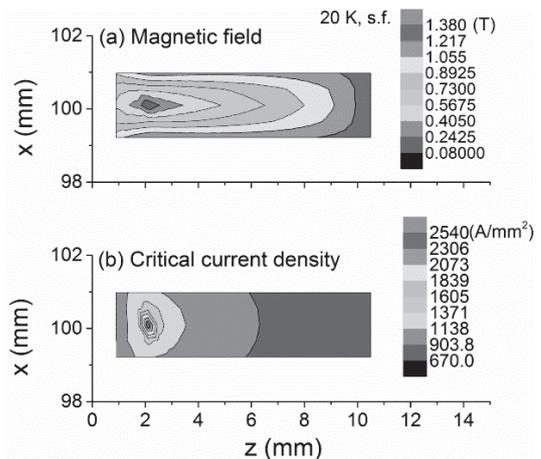


Fig.1 Self-magnetic field (upper) and current density (lower) distribution at 20 K and zero external magnetic field.

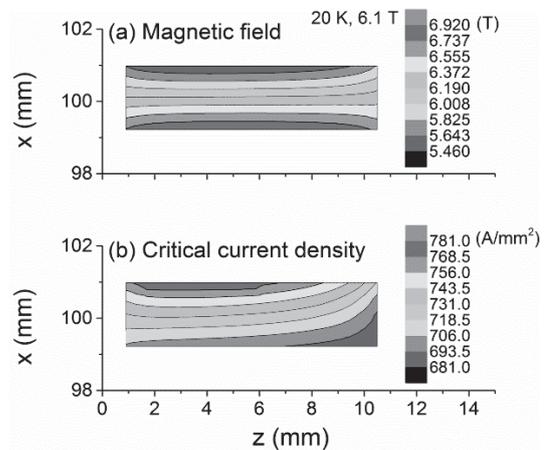


Fig.2 Self-magnetic field (upper) and current density (lower) distribution at 20 K and 6.1 T.

## 参考文献

- [1] A. Sagara et al., *Fus. Eng. Des.*, **87** (2012) 594
- [2] M. Inoue, et al., *IEEE Trans. Appl. SC.*, **21** (2011) 3206
- [3] N. Yanagi et al., *IEEE Trans. Appl. SC.*, **24** (2014) 4202805
- [4] S. Ito et al., *IEEE Trans. Appl. SC.*, **24** (2014) 4602305
- [5] Y. Terazaki et al., *IEEE Trans. Appl. SC.*, **24** (2014) 4801305

### 30m 級鉄道用超電導ケーブルの冷却試験

#### Cooling test of 30-meter class superconducting cable for railway systems

小林 祐介, 鈴木 賢次, 福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 富田 優 (鉄道総研)

KOBAYASHI Yusuke, SUZUKI Kenji, FUKUMOTO Yusuke, ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru  
(Railway Technical Research Institute)

E-mail: ykoba@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の開発を進めている[1]。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、構内試験線に敷設した30 m級鉄道用超電導ケーブル[2]を用いて、各種条件で冷却試験を行ったので報告する。

2. 30 m 級超電導ケーブルの概要

30 m 級鉄道用超電導ケーブルシステムの概要図を Fig.1 に示す。鉄道用超電導ケーブルシステムにはコンパクト性が要求されるので、超電導ケーブルは行きと帰りの液体窒素が一本の断熱管に流れる対向流循環方式を採用し、冷却システムとしては液体窒素循環ポンプや冷凍機などを 1 つにまとめた一体型冷却システムを開発した。

3. 冷却試験の結果

新たに開発した一体型冷却システムにおいて、対向流循環方式で液体窒素を循環させることに成功した。Fig.2 に冷却能力を変化させながら 5 L/min で液体窒素を循環させた際のケーブル内の温度分布を示す。流れに沿って温度が徐々に上昇しており、対向流循環方式で問題となる往路・復路の熱交換を抑えることに成功していることが分かる。

当日は液体窒素ポンプの故障模擬試験の結果や液体窒素の折り返し部に冷凍機を設置した場合の検証結果についても報告する予定である。

4. 謝辞

本研究は研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。また冷却システムの圧力制御について、NIMS北口仁氏にご助言を頂いた。

参考文献

[1] M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.181  
[2] M. Tomita, et al.: Abstracts of CCSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.30

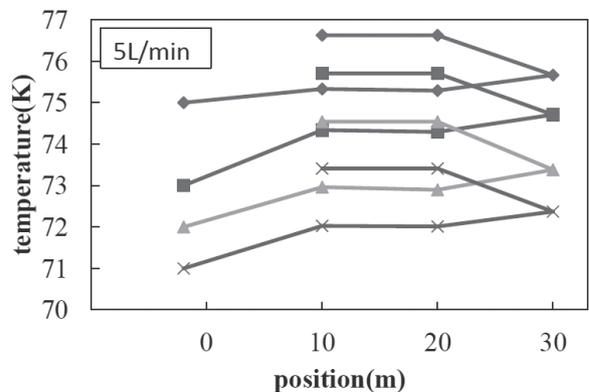


Fig.2 Result of circulation cooling test.

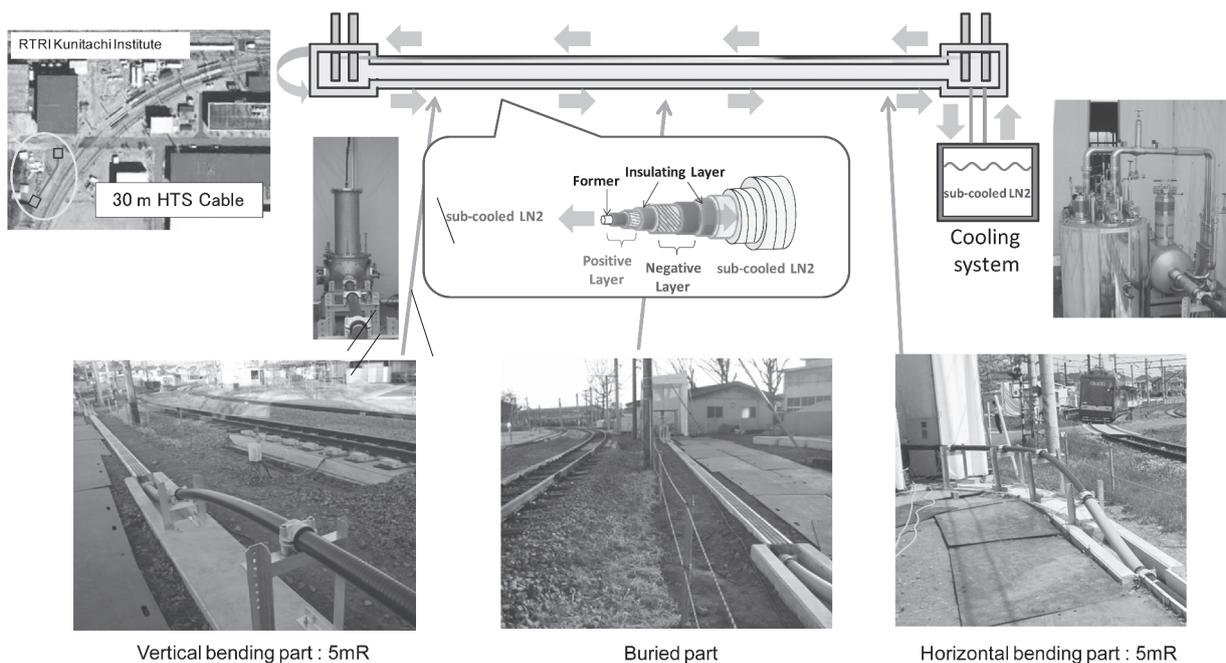


Fig.1 Outline of the constructed superconducting cable for railway systems.

# 直流超電導ケーブルの熱的特性および圧力損失の解析

## Analysis of Thermal Characteristics and Pressure Drop of DC Superconducting Cables

熊谷 大輔, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

KUMAGAI Daisuke, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

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

### 1. はじめに

鉄道への電力供給方式として直流き電システムが広く用いられているが、その低電圧・大電流という特徴から、き電線を持つ電気抵抗による影響でいくつかの課題が生じている。そこで導入が検討されているのが超電導ケーブルである。超電導ケーブルは極低温での使用が前提であり、導入する上で、その熱的特性や冷却システムに関わる諸課題を明らかにし、解決していくことが重要であるため、それらについてこれまで解析を行ってきた。本研究では、圧力損失の解析、およびそれによる発熱を考慮した温度分布の解析を行った。

### 2. 解析手法

解析の対象とするケーブルを Fig.1 に示す。解析モデルでは冷媒の往路を 21mm、冷媒復路の内径、外径をそれぞれ 50mm、54mm とし、全長は 300m としている。ケーブル単位長さ当たりの圧力損失  $\Delta P$  [W/m] は(1)式より計算する。また、管摩擦係数  $\lambda$  は(2)式より求めた値を用いている[1]。ここで  $D_e$  は代表長さ、 $\rho$  は冷媒密度、 $u$  は流速、 $p$  は断熱管のピッチである。本解析では冷媒往路におけるピッチを 10mm、冷媒復路におけるピッチを 15mm とした。

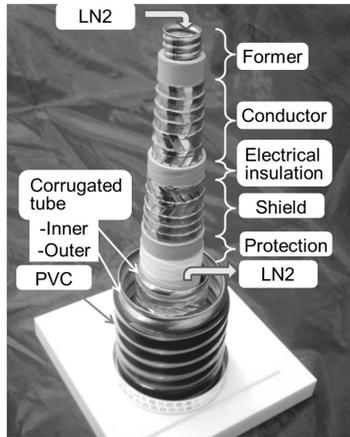


Fig. 1 Structure of superconducting power cable.

$$\Delta P = \lambda \frac{1}{D_e} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{D_e}{p} \left[ 1 - \left( \frac{D_e}{D_e + 0.438p} \right)^2 \right]^2 \quad (2)$$

圧力損失による発熱  $H$  [W/m] は  $\Delta P$  と冷媒流量  $M$  [m<sup>3</sup>/s] を用いて(3)式により計算される。

$$H = \Delta P \cdot M \quad (3)$$

### 3. 解析結果

Fig.2 に圧力損失による発熱の解析結果を示す。真空断熱層からの侵入熱は MLI 層数 10 層として、およそ 0.82W/m

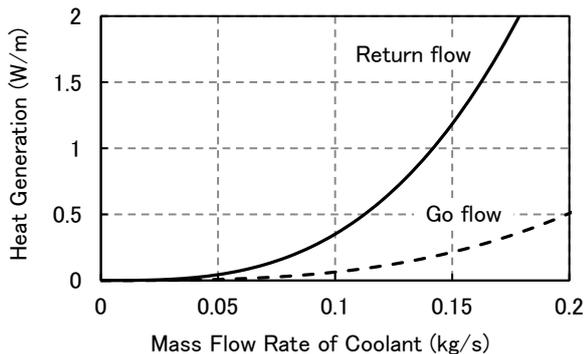


Fig. 2 Heat generation by the pressure drop.

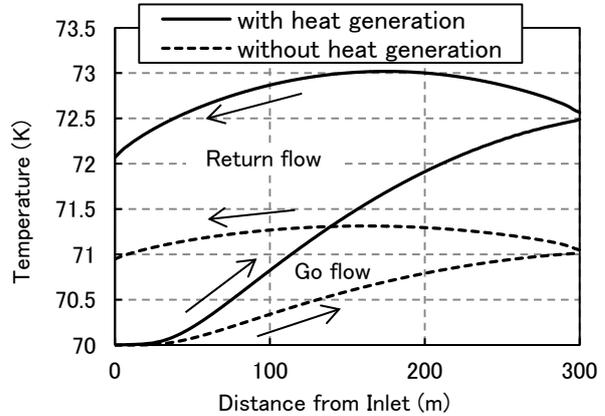


Fig. 3 Temperature distribution with and without heat generation by the pressure drop.

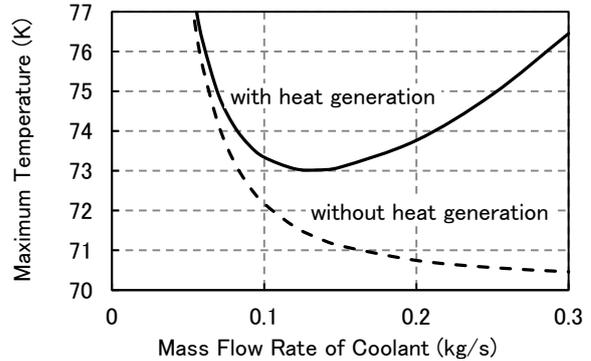


Fig. 4 Maximum temperature in the flow path with and without heat generation by the pressure drop.

と計算しており、流量によっては圧力損失による発熱が主な熱源となる。次に圧力損失による発熱を考慮したケーブル温度分布の解析結果を Fig.3 に示す。ここで侵入熱は 0.82W/m、冷媒流量は 0.135kg/s (≈10L/min) として解析している。そして、温度分布の最大値を冷媒流量ごとにまとめたものを Fig.4 に示す。圧力損失による発熱を考慮した場合、流量が少ない領域では流量の増加に伴い最大温度は低下していくが、流量の多い領域では最大温度が上昇していく結果となった。

### 4. まとめ

本研究では圧力損失を考慮した超電導ケーブルにおける温度分布解析を行い、圧力損失による発熱がケーブル温度上昇の大きな要因となり得るという結果を得た。今後圧力損失を低減する構造を検討していくことも重要である。

### 謝辞

本研究は科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

### 参考文献

1. Katsuhide Ohira, et al.: "Pressure drop of slush nitrogen flow in converging-diverging pipes and corrugated pipes," Cryogenics 52 (2012) 771-783.

# 超電導ケーブルを導入した直流電気鉄道き電系における事故電流対策の検討

## Study on Fault Current Protection for DC Electric Railway Feeding Systems using Superconducting Power Cables

銭 可植, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

QIAN Kezhen, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

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

### 1. 初めに

現在日本の電気鉄道では直流き電システムが広く採用されている。しかし、直流電圧の低さによる送電時の損失、回生失効による回生ブレーキ動作の不確実性、そしてこれらに起因する電力利用効率の低下などの問題が指摘されている。これに対し、き電線と並行に超電導直流ケーブルを導入することにより、電力回生率の向上、き電系損失の低減、また変電所の有効利用等の効果が得られることが、これまでの解析で示されてきた[1]。一方、き電系に短絡などの事故が発生した場合、過大な事故電流が流れ、き電設備の安全性が脅かされることが懸念される。そこで、MATLAB-Simulinkを用いて超電導ケーブルを導入した直流鉄道き電系を電気回路としてモデル化し、超電導ケーブルにとって最も厳しい変電所 5 近辺のき電線・レール短絡事故を想定し、その安全を確保できる保護装置の設定と、系統信頼性向上の手段としての限流装置について検討した。

### 2. 解析方法

Fig. 1に解析に使用したモデル路線の概略を示す。路線は全長 26.5km で、5 つの変電所を持つとする。複線の上下線に一括で電力供給されるとする(上下線一括き電方式)。超電導ケーブルは各変電所の出力を結ぶ形として導入する。

このモデル路線に基づき、変電所、き電回路、電気車、及び事故点の電気回路モデルを構築し、事故電流の過渡解析を行った。各電気車の設定は走行パターン[1]により全体回生電力最大の状況を想定した。また、超電導ケーブルは自己インダクタンスと微小な接続抵抗のみでモデル化する。

### 3. 解析結果

まず、変電所近辺、変電所間の地絡、短絡等のき電系事故を解析し、事故点の変電所に近いほど超電導ケーブルの導入による事故電流の増大が大きくなることが分かった。また、変電所5近辺のき電線・レール短絡事故時に超電導ケーブル4に最大な事故電流が流れることが示され、この事故を想定し、超電導ケーブルの安全性を確保できる遮断器設定を検討した。その際、超電導ケーブルの臨界電流を 10 kA とする。電気車の走行パターンにより各変電所の定常時最大出力電流が 2.5 kA であることが分かり、各遮断器の動作電流を 5 kA と設定した際の事故電流を Fig.2 に示す。実際の事故電流により近似する結果を得るために、遮断器の遮断時間と遮断器間の連絡遮断機能も考慮した。事故電流遮断により超電導ケーブルに流れる事故電流のピーク値は約 9 kA まで抑えられることが分かった。また、保護装置の事故検出時間と遮断時間には数 ms しか許されず、設備性能への厳しい要求も示された。

次に、遮断失敗の可能性を考慮し、き電システムの信頼性向上のために超電導限流器の有効性と可能性についても検討した。現在検討されている超電導コイル型の限流器は、SN 転移時に発生する抵抗分とコイルのインダクタンス分を用いて限流効果を発揮する。超電導線材には SuperPower 社の SF12100 線材の特性を仮定し、それを複数並列に接続し、臨界電流を 5 kA と想定する。この限流器を超電導ケーブルの両端に設置

し、事故電流の遮断を考慮せずに事故解析を行い、限流効果を考察した。Fig.3 に示されたように、事故点に流れる事故電流の立ち上がりとピーク値が共に大幅に抑えられた。また、超電導体の温度は事故発生後 50 ms 内で 300 K 以下を維持でき、実用可能と考えられる。

### 謝辞

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

### 参考文献

1. H. Ohsaki, et al.: "Characteristic Analysis of DC Electric Railway Systems with Superconducting Power Cables Connecting Power Substations," 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), 2P-LS2-02, September 2013

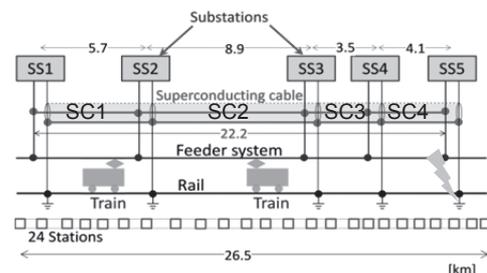


Fig. 1 Analysis model line

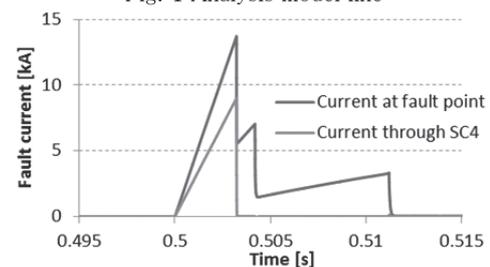


Fig. 2 Fault currents at the fault point and through the superconducting power cables (SC) 4 with circuit breakers

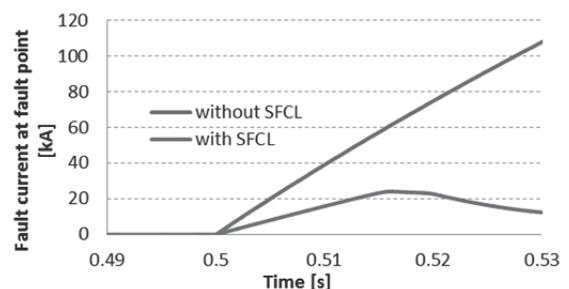


Fig. 3 Fault current at the fault point with/without superconducting fault current limiter (SFCL)

# サンクトペテルブルクプロジェクトのための HTS ケーブル製作と試験

## Fabrication and testing of HTS cable for St. Petersburg Project

SYTNIKOV Victor, BEMERT Sergey, ROMASHOV Maxim, KRIVETSKY Igor (FGC UES);  
 FEDOTOV Evgenii (Irkutskkabel); IVANOV Yury (Chubu Univ.)  
 E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

### 1. Introduction

Electric networks of large cities have a high density of consumer loads, extensive distribution networks, as well as should fulfill high requirements to reliability of power supply, ensuring the safety and environmental performance. Connection of new consumers and creating new links are often lead to the increase of short circuit currents, the less control over the network and ultimately a reduction in the reliability of power supply. Application of HTS DC cable provides the possibility of solving these problems by improving redundancy for power facilities without increasing of short circuit currents.

The objective of the Project is to demonstrate the possibility of lifting restrictions on the development of networks of the megacities, related to the limitation of short circuit currents, reducing the number of network gaps and improving the manageability of the network. HTS DC line will connect 330 kV substation *Tsentrlnaya* and 220 kV substation *RP-9*. The connection of these substations will create conditions for "deliverance" of reserve power network capacity in the power system to connect new consumers to the electric networks of the central district of St. Petersburg. Additionally, this link will increase the reliability of power supply of the existing consumers. The main characteristics of the cable line are presented in Table 1.

Table 1. Main characteristics of HTS DC line.

Transmission power	50 MW
Operating voltage	20 kV
Operating current	2500 A
Cable length	about 2.5 km
Operating temperature	65–80 K
Cooling capacity	12 kW at 70 K
Mass flow rate of LN <sub>2</sub>	0.1–0.6 kg/s

### 2. HTS cable design and testing

A unipolar cable with coaxial arrangement of the direct and reverse conductors was chosen as a basic design. The external cable diameter is 39 mm. The 1G HTS tape produced by SEI (type HT-CA) is used as current-carrying conductor. The electromagnetic field of this cable is only between two superconducting poles. The absence of stray fields and using of the liquid nitrogen as an impregnating agent makes these cables environmentally friendly and fire-safe.

Cable structure includes (from center to outside): former and stabilizing element; superconducting forward conductor consisting of 22 tapes with  $I_c=160$  A stacked in two layers; high voltage insulation; superconducting reverse conductor consisting of one layer of 19 tapes with  $I_c=180$  A; external copper stabilizer; external screening insulation; electric screen; cryostat with protecting layer produced by Nexans.

The cabling technology was developed for serial cable plant *Irkutskkabel*. Some special equipment and tools were made for the cable manufacture. Two 30-meters cable samples were made for cabling technology verification and preliminary

testing. Two full-scale cable lengths (430 meters each) were manufactured after successful test of two 30-meters samples.

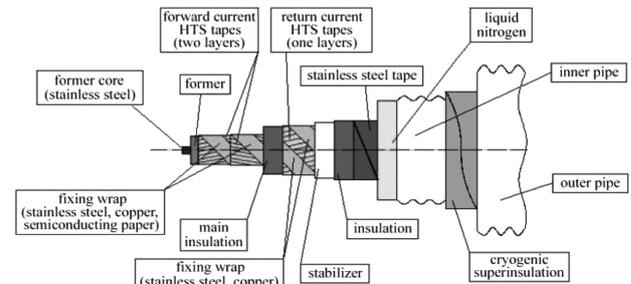


Fig. 1. HTS DC cable design.

The main goals of the first test were check of cabling technology and measurement of electrical resistance and vacuum tightness of terminals and coupling box. Current source *plus* pole was connected to the direct conductor and *minus* pole to the reverse conductor on one side of the test line. Current leads on another side of the line were shorted. The critical current of the cable is practically equal to the sum of critical currents used superconducting tapes that indicates the development of a reliable cabling technology (see Fig. 2).

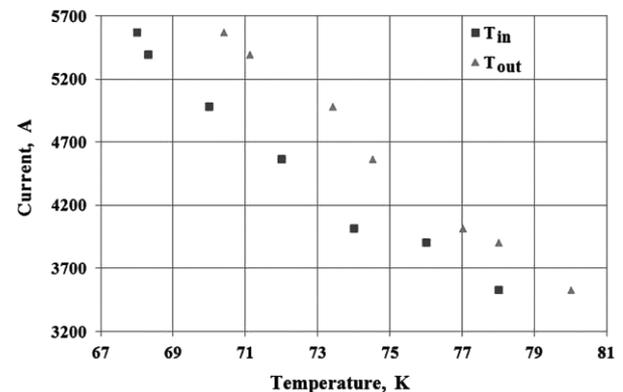


Fig. 2. Temperature dependence of the critical current.

### 3. Conclusion

St. Petersburg Project is carried out in accordance with the schedule. Positive results of two short samples test allow us to start manufacturing of full-scale cable lengths. The successful introduction of this HTS DC line into the St. Petersburg electric power system will allow checking up the basic technical solutions for this technology and get an experience for the commercial application. It will be first step for the further building of circular DC electric power chain in megalopolises.

### References

1. V. E. Sytnikov, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) Art. No 5401904
2. S. I. Kopylov, et al.: J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 507 (2014) Art. No 032047