

# 金属のヤング率と減衰の温度変化測定

## Temperature dependence of Young's modulus and damping of metals

野村 秋之, 山崎 諒, 藤井 佳子, 堀 純也, 畑中 啓作(岡山理大)

NOMURA Akiyuki, YAMASAKI Ryou, FUJII Yoshiko, HORI Jun'ya, HATANAKA Keisaku (OUS)

E-mail: s09pm12na@std.ous.ac.jp

### 1. はじめに

バイブレイティングリード法では、低温装置内に配置できる程度の小さな試料でもヤング率  $E$  と減衰  $\Gamma$  の測定ができる。本研究では、バイブレイティングリード法を用いて種々の金属のヤング率および減衰の温度依存性を測定した。特にAl試料について詳しく調べた。

### 2. 試料および測定方法

Fig.1 に測定回路の模式図を示す。バイブレイティングリード法では、試料の一端をホルダーに固定し、自由端側の両面に電極を配置する。このことにより、試料と電極の間でコンデンサーが形成される。測定では Drive 電極からの交流電場により試料を電氣的に振動させ、Detect 電極で電気容量の変化からその共振周波数と振幅の検出を行う。

バイブレイティングリード法において、角振動数  $\omega$  とヤング率  $E$  の関係は、次式で表される。

$$E = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot l^4}{d^2}$$

ここで、 $\rho$ :密度、 $l$ :固定端から上端までの長さ、 $d$ :試料の厚さである。

また、減衰  $\Gamma$  は次式で求められる。

$$\Gamma = \Delta \omega / 2$$

ここで、 $\Delta \omega$  は半値幅である。半値幅は共振周波数  $f$  における振幅を  $1/\sqrt{2}$  倍した大きさになる周波数の幅である。

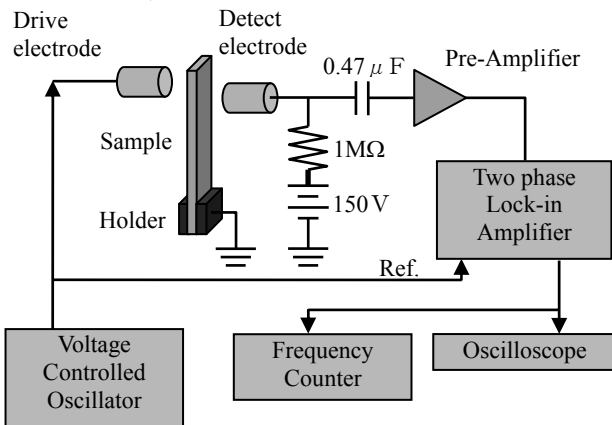


Fig.1 Schematic set-up of a vibrating reed and block diagram.

### 3. 測定結果

Fig.2 (a) (b) にヤング率の温度依存性を示す。(a) はCu、Al(5N)、Al合金の結果である。室温での値は物理定数表とほぼ一致した。室温と液体窒素温度の間でCuでは16%、Al(5N)では10%、Al合金では12%だけ  $E$  が増加した。(b) にAl試料の詳細な  $E$  の結果を示す。純度が高くなるにつれ  $E$  の値が小さくなっていることが分かる。Al(2N)では9%、6Nでは6.7%増加した。

Fig.3 に減衰の温度依存性を示す。Al(2N)、Al合金では単調に下がるが、5N、6Nでは約150K付近でピークが見られた。我々はこのピークを、塑性変形によって導入された転位が原因となって生じるボルドーニ・ピークではないかと考えている。

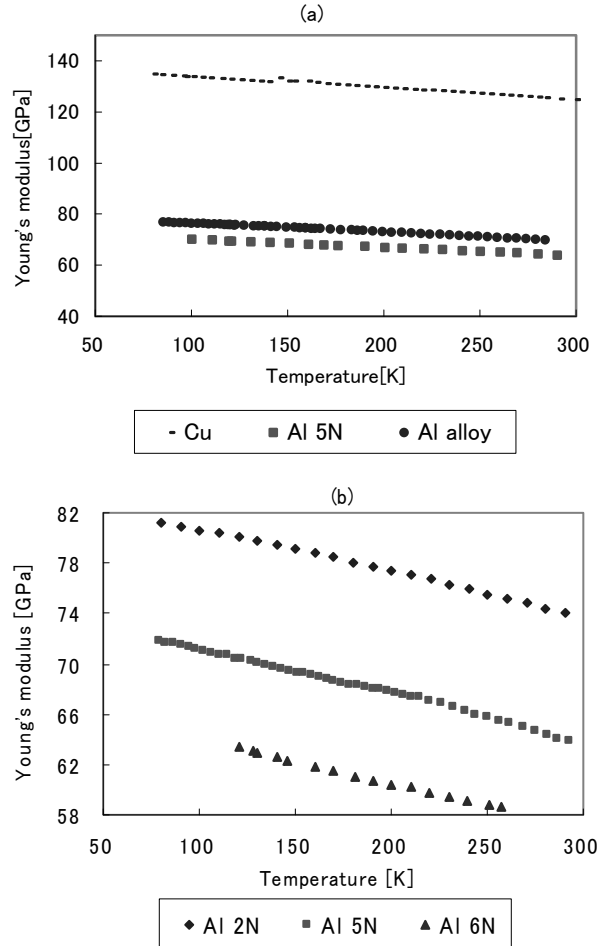


Fig.2 Temperature dependence of Young's modulus.

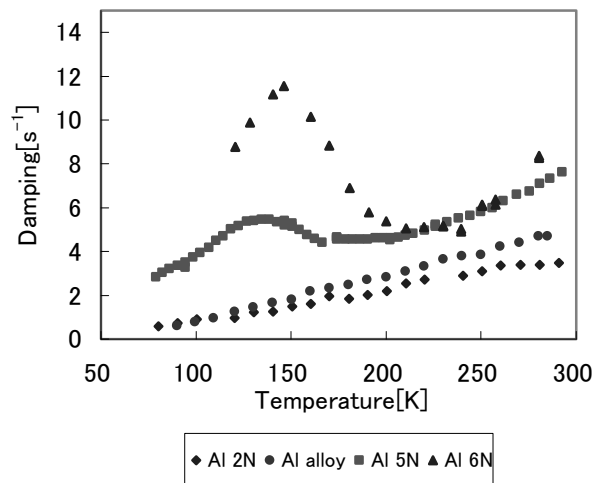


Fig.3 Temperature dependence of damping.

# 擬一次元構造をもつカルコゲン化合物超伝導体の比熱測定

## Specific Heat of Chalcogenide Superconductor with Quasi One-Dimensional Structure

山田 真一郎(岡山理大); 赤塚 智紀(ジェック東理社); 大田 修平, 外園 剛士, 藤井 佳子, 堀 純也(岡山理大)  
 YAMADA Shinichiro, AKATUKA Tomonori(JECC Torisha), OTA Shuhei, HOKAZONO Goushi  
 FUJII Yoshiko, HORI Jun'ya(OUS)  
 E-mail: s09pm16ys@std.ous.ac.jp

### 1. はじめに

カルコゲン化合物  $A_xV_6S_8$  ( $A=In, Tl, K$ ) は、 $Nb_3S_4$  構造を有し、 $c$  軸方向に六角形のトンネルを形成し、 $A$  元素はトンネルの中に位置している。また、 $a$  軸- $b$  軸面における  $V-V$  間距離に比べ、 $c$  軸方向の  $V-V$  間距離が短くなっていることから、 $V-V$  ジグザグ鎖が  $c$  軸方向に並んだ擬一次元構造をなしている。

これらの物質の超伝導転移機構を明らかにするため、熱緩和法により 0.1K から 3.7K の温度域で比熱測定を行っている。熱容量の小さな試料の比熱を精度良く測定するためにこれまで工夫を重ねてきた。

### 2. 測定

試料は、 $TiV_6S_8$  の微結晶を焼結したもの(岡山理大・化学科・大谷研製作)を用いた。Fig.1 にこれまでの測定で得られた比熱  $C$  の結果を、縦軸  $C/T$ 、横軸  $T^2$  で示す。2.5K 付近に小さな比熱の山が見られた。一方、磁化率測定では約 2.6K で磁化率の大きな減少が見られた。常伝導状態の比熱は  $C = \gamma T + \beta T^3$  で表され、転移温度  $T_c$  以上の測定より、電子比熱定数( $\gamma$ )と格子比熱定数( $\beta$ )が求められる。 $T_c$  以下の電子比熱の値は、測定した熱容量より格子比熱の値を引いて求めるので、 $\beta$  の値を正確に知る必要がある。希釈冷凍機を使った測定では 4K 以上の測定は難しいので、試料に磁場を印加し、常伝導領域を低温側に広げて測定を行うことにした。

試料部の形状は Fig.2 に示すように前回までの測定と同じである。今回、混合室に連なる熱浴の部分に Fig.3 に示すように製作した。試料部の温度計には  $RuO_2$  抵抗温度計(1mm × 2mm × 0.5mm)を、ヒーターにはストレインゲージ(室温抵抗 350Ω)を用いた。温度計とヒーターのリード線には Nb-Ti 超伝導線を用い、ヒーターのリード線で測定セルを支持した。熱浴と試料部を結ぶ熱抵抗線には白金線(φ 50 μm × 20mm)を用いた。試料部と混合室の間の銅の支柱は、熱伝導を良くすると共に、渦電流による温度の変動を抑えるような構造にした。

温度測定には交流ブリッジ(AVS-46)を、試料の熱緩和測定にはロックインアンプ(SR830)を用いた。学会では測定結果について報告する。

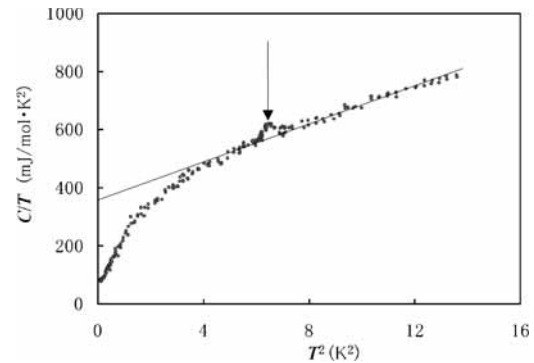


Fig.1  $C/T$  vs.  $T^2$ .  
 Small shoulder is seen near an arrow.

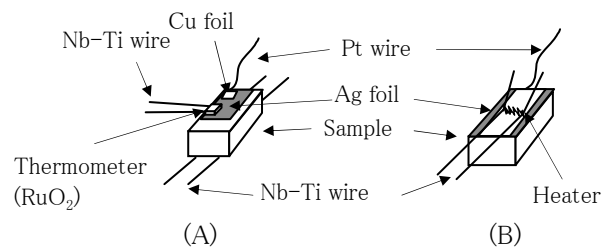


Fig.2 Schematic drawing of a sample cell.  
 (A) Upper side. (B) Under side.

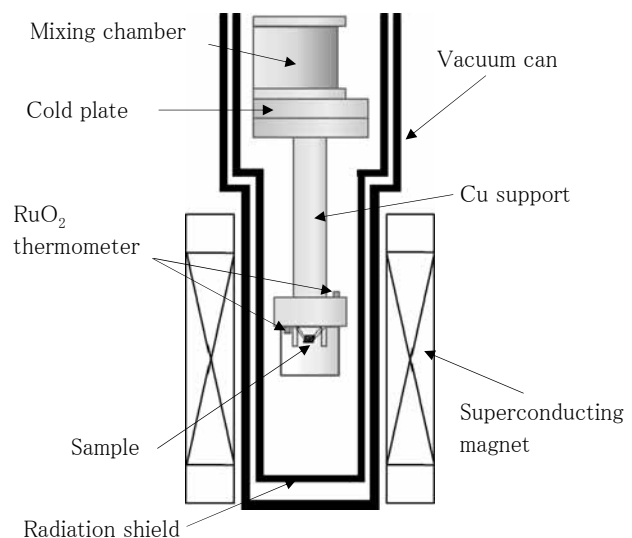


Fig.3 Schematic drawing of a cryostat below mixing chamber.

# 希釈冷凍機用 NMR 共振回路の改良 Improvement of NMR circuit for dilution refrigerator

平岡知威, 古閑顕一, 岡田邦英, 藤井宗明 (熊本大)  
HIRAOKA Tomotake, KOGA Keniti, OKADA Kunihide, FUJII Muneaki (Kumamoto university)  
E-mail: fujimune@sci.kumamoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

希釈冷凍機を用いて mK 温度域での強磁性体の磁気秩序の研究を行っている。スピン間の交換相互作用、超交換相互作用、超微細相互作用について核磁気共鳴 (NMR) を測定して詳細な情報を得ている。NMR の信号強度を大きくするには、試料と共振回路の距離は近い方が良いが、試料の冷却のためには離れている方が良い。この矛盾を解決するための改良について発表する。

## 2. 低温での実験

通常の NMR 実験においてコイルの中に挿入する試料を、今回の実験ではコイルから 2cm 程度放して実験したところ、十分な感度で NMR 信号が観測された。図 1 に希釈冷凍機の混合室部分における試料とコイルの配置を示す。

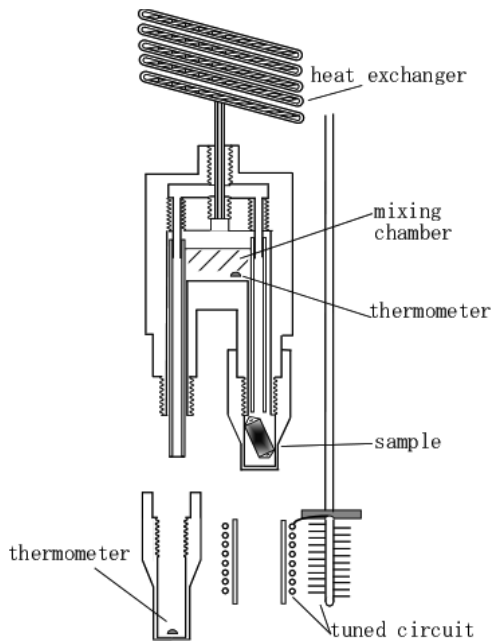


Fig.1 Dilution refrigerator for NMR

共振回路のコイル中に試料がなくても十分な信号強度が得られた理由はコイルを囲んでいる断熱銅管に強い高周波電流が誘起されたためと考えられる。これを検証するため、以下の実験と数値計算を行った。

## 3. 室温での実験と数値計算

図 2 の (A) に 4 巻きのコイルに電流を流したときのコイルの周囲に出来る磁力線を示す。(B) に銅管の中にコイルを入れたときの磁力線の様子を示す。図から明らかなように磁力線は銅管の中に圧縮されている。その磁場の強度の変化を具体的に見積もるために鏡像電流の方法を適用し、数値計算を試みた。

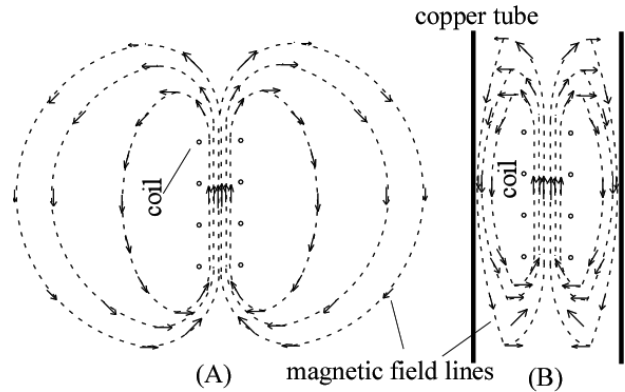


Fig.2 (A) Magnetic field lines made by a coil. (B) The lines made by a coil in a copper tube.

図 3 は室温での NMR の実験装置を示す。用いた試料はゴムの中のプロトンであり、NMR 周波数は 36MHz であった。試料をコイルから 2mm 間隔で外に動かした。その時の NMR 信号の強度変化を測定し、数値計算の結果と比較した。

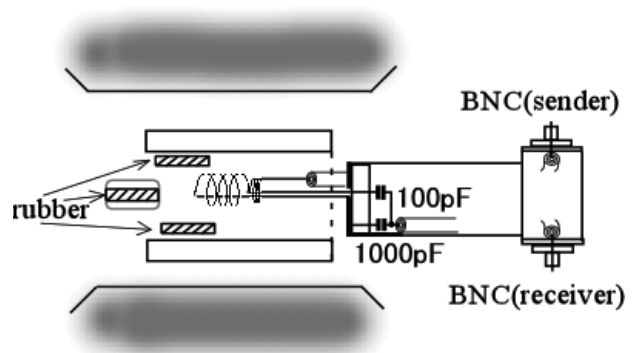


Fig.3 Rubber (sample) in and out of coil for NMR experiment

### 参考文献

1. T. Hiraoka, T. Simamoto, K. Okada and M. Fujii: Cry. Rep. Kumamoto Univ. Vol.18(2007)pp.55-69.

## Vibrating Reed 法による水素拡散状態の観察 State observation of hydrogen scattering by vibrating reed method

重松 利信(佐世保高専);小野 文慈(佐賀大);河江 達也(九大工);橋爪 健一(九大総理工)  
 SHIGEMATSU Toshinobu (Sasebo National College of Tech.);  
 ONO Bunji(Saga Univ.); KAWAE Tatsuya(Kyushu Univ.); HASHIZUME Kenichi(Kyushu Univ.)  
 E-mail: shige@post.cc.sasebo.ac.jp

### 1. はじめに

我々はこれまで金属中の水素の挙動を観測する目的で Vibrating Reed 法による実験装置の開発を進めてきており、金属の共振周波数の温度依存の測定結果 (Fig.1 参照) や、水素を含んだ金属の共振周波数の温度依存の first data を報告した<sup>2)</sup>。

ところで、金属内の水素の拡散現象は室温付近では熱拡散が主であるが、窒素温度以下ではトンネル効果による拡散が主となり、その拡散速度も室温で 0.1mm/h と比較的速いことが知られている<sup>1)</sup>。

そこで、その装置の水素の存在有無による感度を調べる目的で、室温で水素拡散中の金属薄板の共振周波数の変化及びQ値の変化を測定した。

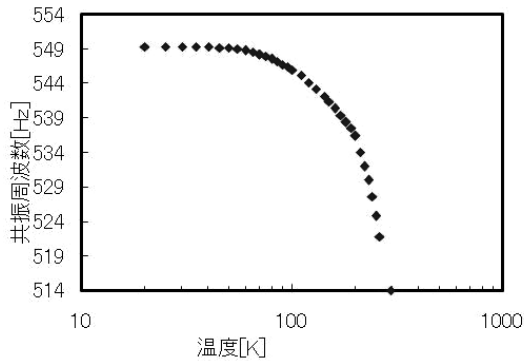


Fig.1 Temperature dependence of resonance frequency of Aluminum sample.

### 2. 実験装置

Vibrating Reed法を用いた測定回路系統図をFig.2 に示す。室温の発振器からの信号が低温部の実験セル部の電極に伝えられ、サンプルは次式に従う力で引かれる。

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left( \frac{V}{\ell} \right)^2 S$$

ここで、Vは電圧、Sは電極面積、ℓは電極-サンプル間距離である。その振動を室温に設置したレーザドップラ干涉計でピックアップする。ところで、実験セルは蒸着装置を改良した

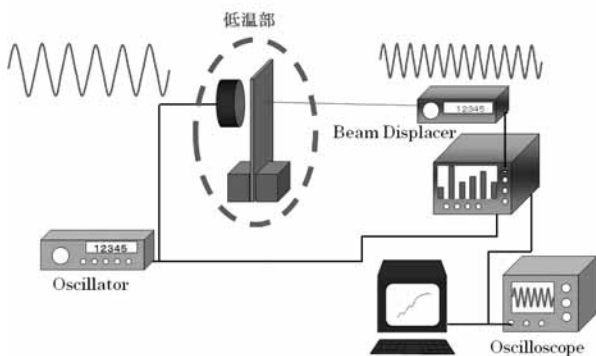


Fig.2 Schematic setup of vibrating reed and block diagram for measurements

恒温槽のチャンバー内で水素雰囲気を作って実験を行っている。その際、レーザドップラ干涉計はチャンバー外に設置し、ガラス窓を通して測定できるようにした。

### 3. 測定結果

試料はSUS304 であり、測定温度は室温である。水素雰囲気中と真空中での共振数周波数の時間変化をFig.3にQ値の時間変化を Fig.4 に示す。測定データのばらつきが大きく、明らかなことは言えないが、共振周波数、Q値ともに水素雰囲気中での測定結果の方が時間経過に伴って下がっているように見える。

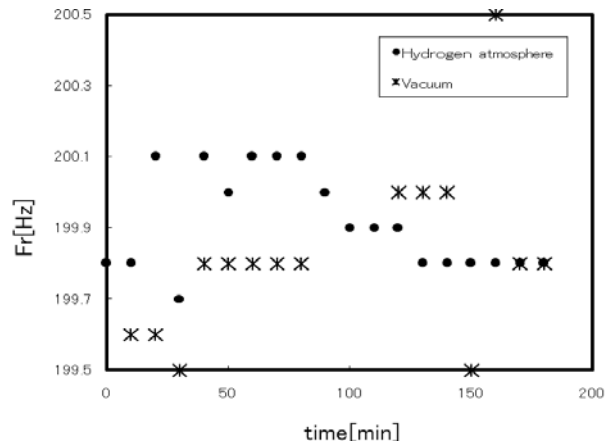


Fig.3 Time dependence of resonance frequency at room temperature.

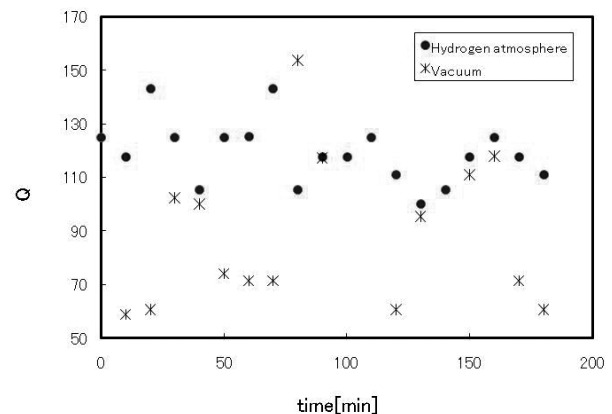


Fig.4 Time dependence of Q-value at room temperature.

### 参考文献

1. 水素と金属, 深井有・田中一英・内田裕久著, 内田老鶴圃 p.123 (1993)
2. T.Shigematsu et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.229

## 液体ヘリウム中でのカーボンナノチューブの生成実験および生成シミュレーション

## Experiments and Simulations of Creating Carbon-Nanotubes in liquid Helium

佐世保工業高等専門学校 寺崎 義朗、城野 祐生、重松 利信、川崎 仁晴

Sasebo National College of Technology : T.Yoshiro, Y.Johnno, T.Shigematsu, H.Kawasaki

## 1.はじめに

低温液体中を用いたカーボンナノ物質生成は、炭素原子の TOF が延びることから、生成メカニズムの解明の糸口になると期待されている。そこで、我々は液体ヘリウム中でカーボンナノ物質を生成する実験を、アーク放電法を用いて行っている。現在のところ多層カーボンナノチューブの生成には成功している<sup>1)</sup>。さて、生成過程を観測するためには、生成スピードを見積もる必要がある。そこで、今回、分子動力学法を用いて、放出された炭素原子が適度なサイズまでどのくらいの時間で成長するのかを予測した。

## 2.エネルギー損失

液体ヘリウム中での放電実験において放出された炭素原子がエネルギーを損失する手順は次のようになると考えている。

①24.6eV まで、電磁相互作用によるエネルギー損失

②4.2K まで、He 原子との弾性散乱によるエネルギー損失

このエネルギー損失による TOF は、約 40 μm と見積もられる。一方、放出された炭素原子の mean free path は ~200 μm と見積もれることから、カーボン原子は 4.2K のエネルギー状態で結合すると考えることができる。そこで、本シミュレーションは、炭素原子が 4.2K のエネルギーで液体ヘリウム中を漂っているところからスタートさせた。

## 3.シミュレーション

このシミュレーションでは分子動力学法を用いた。炭素原子にはそれぞれ位置と速度を与え、その位置は乱数で、速度はマクスウェル分布に従うように設定した。炭素原子の密度は我々の過去の実験結果を基に決めている。炭素原子同士が衝突するときには、必ず結合し、カーボンクラスタになるとした。また、クラスタ同士が衝突するときには、クラスタの端同士が衝突すれば結合するとし、そうでないときには結合せず、完全弾性衝突するとした。衝突後のクラスタの速度と質量は運動量保存則に従う次の式で計算している。

$$V = \frac{M_1 V_1 + M_2 V_2}{M_1 + M_2}$$

## 4.結果と考察

Fig.1 はシミュレーション結果、Fig.2 は実験によって得られた分光測定結果である。

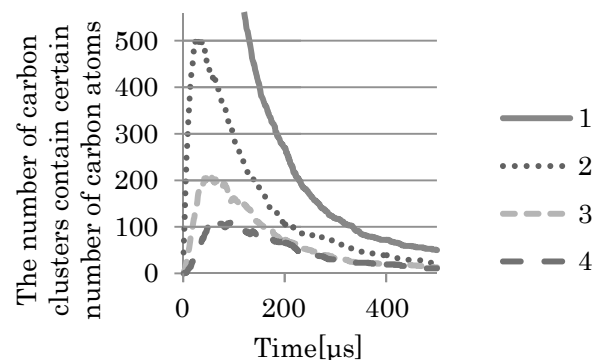


Fig.1 The number of carbon cluster

この図から炭素原子 2 個を含んだクラスタの数は 0.1ms までに数多く生成されていることがわかる。

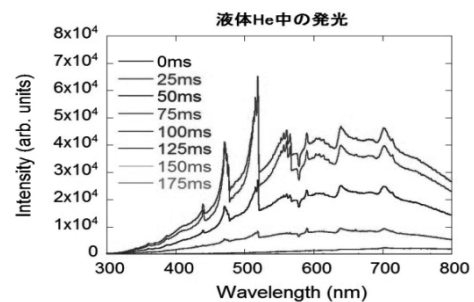


Fig.2 Emission intensity of every wavelength

液体ヘリウム中での放電実験において得られた分光スペクトルを Fig.2 に示している。C2 分光スペクトルがどの時間帯にもそれが見られることから、少なくとも 25ms 時には C2 が生成されていると考えられる。このことは、0.1ms 時にはすでに C2 が生成されているというシミュレーション結果と一致する。

## 参考文献

1) T.Shigematsu., Trans.Mater.Res.Soc.Jpn.,32[1](2007)

# シールド付ダイレクトカップル型 HTS dc-SQUID マグネトメータの特性解析

## Characteristic analysis of directly coupled HTS dc-SQUID magnetometer covered by superconducting shield

寺内 直也, 野口 聡, 五十嵐 一 (北海道大学)

TERAUCHI Naoya, NOGUCHI So, IGARASHI Hajime (Hokkaido University)

E-mail: terauchi@em-si.eng.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

現在、磁気シールドルーム外でも安定して動作する、より高い磁界耐性を持った SQUID センサが求められている。それを実現する一つの手法として、SQUID マグネトメータに超電導薄膜シールドを取り付けることが提案されている[1]。超電導薄膜シールドは、そのマイスナー効果により SQUID マグネトメータを磁気ノイズから保護することができる。実際に、超電導薄膜シールドの効果は実験によって検証されている[1]。本研究では、3次元辺有限要素法を用いて解析を行い超電導薄膜シールドの効果を検証する。

### 2. 解析手法

#### 2.1 支配方程式

解析手法として、3次元辺有限要素法を用いる。本解析で解くべき支配方程式は(1)、(2)式で表される。

$$\text{rot}(\text{vrot}A) = J_0 + J_{sc} \quad (1)$$

$$\text{div}(J_0 + J_{sc}) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\nu$ は磁気抵抗率、 $A$ は磁気ベクトルポテンシャル、 $J_0$ は SQUID マグネトメータのバイアス電流密度、 $J_{sc}$ は超電導遮蔽電流密度である。超電導遮蔽電流密度は次のように示される。

$$J_{sc} = [\sigma_{sc}] E_{sc} = \begin{bmatrix} \sigma_{sc,x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{sc,y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{sc,z} \end{bmatrix} E_{sc} \quad (3)$$

$$E_{sc} = -\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad}\phi \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{sc,x}$ ,  $\sigma_{sc,y}$ ,  $\sigma_{sc,z}$ は仮想導電率 $[\sigma_{sc}]$ の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向成分である。また、 $E_{sc}$ は超電導遮蔽電流を発生させる電界であり、 $\phi$ は電気スカラーポテンシャルである。なお、時間微分項に対しては、後退差分を取り、Step-by-Step法を用いて解析を行っている。

#### 2.2 仮想導電率

一般に、高温超電導体には  $E$ - $J$  特性と呼ばれる非線形性が存在する。 $E$ - $J$  特性を表現するために、次式で表される  $n$  値モデルを用いる。

$$|E| = E_c \left( \frac{|J|}{J_c} \right)^n \quad (5)$$

ここで、 $E_c$ は基準電界、 $J_c$ は臨界電流密度、 $n$ は非線形性に関するパラメータで  $n$  値と呼ばれる。本研究では、 $E_c = 1.0 \times 10^{-3}$  V/m,  $J_c = 2.80 \times 10^{10}$  A/m<sup>2</sup>,  $n = 10$ と設定した。この(5)式を元に、仮想導電率を次のように求める。

$$\sigma_{sc,x}, \sigma_{sc,y} = \frac{J_c}{|E|} \left( \frac{|E|}{E_c} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$\sigma_{sc,z} = \text{constant} = 1.0 \times 10^{-10} \quad (7)$$

(6),(7)式に示したように  $z$  軸方向の仮想導電率を  $xy$  方向に比べて小さく設定することで、 $c$  軸異方性を表現している。このように設定した仮想導電率を導入することで、超電導体の  $E$ - $J$  特性および異方性を考慮した解析が行うことができる。

### 3. 解析モデル

本研究では、超電導薄膜シールドの効果を確認するために、複数の解析モデルを用いて解析を行う。Fig. 1は超電導薄膜シールドを取り付けた場合の解析モデルの一例である。これに加えて、超電導薄膜シールドと SQUID マグネトメータとの間隔、超電導薄膜シールドの形状を変更したモデルでも同様に解析を行う。解析時には、超電導薄膜シールドの効果を検証するために、モデル全体に磁気ノイズを模した交流外部磁界を印加する。

### 4. 解析結果

解析結果の評価を SQUID リング部の鎖交磁束量、電流密度分布から行う。Fig. 2に超電導薄膜シールドを取り付けたモデル、取り付けしていないモデルでの鎖交磁束量の時間変化を示す。超電導薄膜シールドを取り付けたモデルでは、振幅が大幅に減少しており、磁気ノイズ低減効果が確認できる。

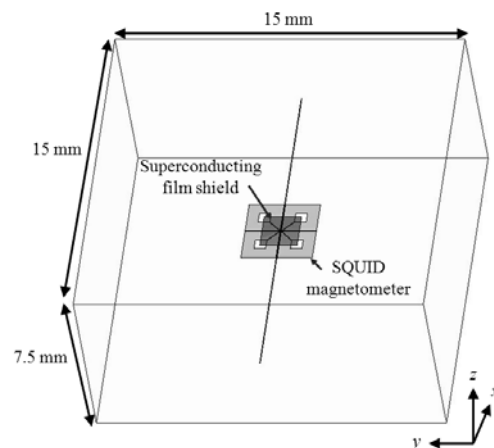


Fig. 1 Overall view of analysis model (Shielding model)

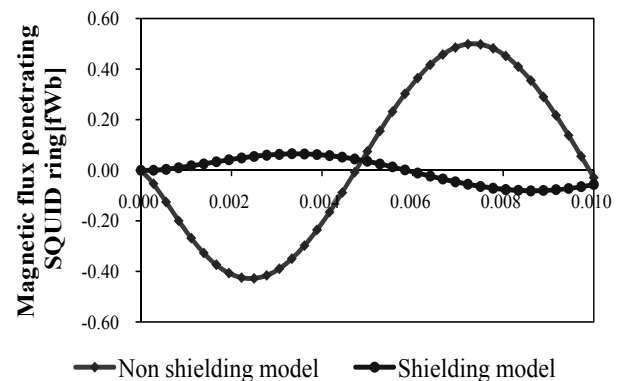


Fig. 2 Transition of the magnetic flux penetrating the SQUID ring

### 参考文献

1. Y Hatsukade, et al., Supercond. Sci. Technol. 22, (2009), 114010.

# 光ファイバ内視鏡を用いた極低温機器内の視覚モニタリング方法の開発

## Development of optic monitoring method inside cryogenic equipment using optical fiber endoscope

山田 秀之、小方 正文、水野 克俊、長嶋 賢(鉄道総研); 田中 芳親(CKK)

YAMADA Hideyuki, OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI); TANAKA Yoshichika (CKK)

E-mail: hiyamada@rtri.or.jp

### 1. はじめに

超電導磁石のような極低温機器の内部の状態を視覚的に観察することにより、内部の異常を早期に発見して、大きな故障を未然に防ぐことが可能になる。内部観察のためには内視鏡が有効であり、その種類としては、硬性鏡、軟性鏡、ビデオスコープ等がある。超電導磁石の内部は複雑であり、また、極低温を保持するため熱侵入を極力減らす必要もある。さらに、電気絶縁性が高い方がよいことから、軟性鏡を選択して検討することにした。なお、医療用光ファイバ内視鏡等で内部を自由に観察できるように遠隔操作ができる構造を備えたものがあるが、熱侵入を少なくする、電気絶縁性を高くする、信頼性も高くするなどの理由により、遠隔操作は行わず観察箇所は固定することにした。今回、外部から極低温機器内に光ファイバ先端部を気密がとれる栓を通して設置し、極低温容器内の真空排気及び冷却を行い、観察対象を 20K 程度まで冷却しても内部観察ができることを確認した。

### 2. 単体確認試験(予備試験)

光ファイバ内視鏡が極低温で使用可能かどうかについて、まずは単体試験を実施した。光ファイバ内視鏡のうち軟性鏡について、R200mm の曲げを加えて液体窒素浸漬により約 77K に冷却したところ、外観上問題ないことを確認した。次に、室温と伝導冷却による約 20K までのヒートサイクル(約 20K を約 60h 保持した後、室温と約 20K を 3 回繰り返した)を行った後、室温での視認性に問題のないことを確認した。

また、参考として、硬性鏡を高温超電導線材評価装置の上部からシリコンゴム製の試験管栓により気密シールして挿入し、内圧  $2 \times 10^{-3}$  Pa まで真空排気した後、伝導冷却を行い、輻射シールド 43K、硬性鏡先端 107K まで冷却したところ、視認性に問題のないことを確認した。なお、内部への照明用として、LED 光を導入するための光ファイバ(ライトガイドファイバ)も硬性鏡と共に挿入した。

### 3. 装置組込確認試験

参考に実施した硬性鏡と同様に、Fig.1 に示すイメージガイドファイバ及びライトガイドファイバを高温超電導線材評価装置の上部からシリコンゴム製の試験管栓を使用し、さらにエポキシ樹脂で固めてシールして挿入し、超電導線材をハンダ付けしたステージが見えるようにセット(Fig.2)して、冷却した状態での視認性の確認を行った。

内圧約  $10^{-4}$  Pa まで真空排気した後、伝導冷却を行い、約 20K もしくは約 77K まで線材を冷却した。なお、光ファイバ内視鏡先端の温度は約 160K であった。

この冷却した状態で、超電導線材をハンダ付けしたステージが回転する状況及び臨界電流以上の電流を流した場合の超電導線材の焼損する状況を観察することができた。

よって、極低温機器内の真空排気及び冷却ができること、及び、極低温まで冷却した状態でも視認性に問題のないことが確認できた。

### 4. 考察・まとめ

軟性鏡である光ファイバ内視鏡を、外部から極低温機器内へ挿入する箇所について、シリコンゴム製の試験管栓を使用してエポキシ樹脂で固めてシールすることで、内圧約  $10^{-4}$  Pa まで真空排気でき、さらに、伝導冷却により約 20K まで線材を冷却できることがわかった。また、光ファイバ内視鏡を約 160K まで冷却しても視認性に問題のないことがわかった。当日に、確認した画像を紹介する。

今後は、更なる視認性の向上のために、光ファイバ内視鏡(軟性鏡)の画素数増大について検討を行い、確認試験を行う。また、これまで6~7回室温と約20Kの間のヒートサイクルを繰り返しても問題なかったが、さらに、ヒートサイクルを繰り返して耐久性を確認する。

極低温対応内視鏡を検討するにあたり、ご協力いただいた(株)町田製作所及び(有)アイデック企画に感謝する。

本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施した。

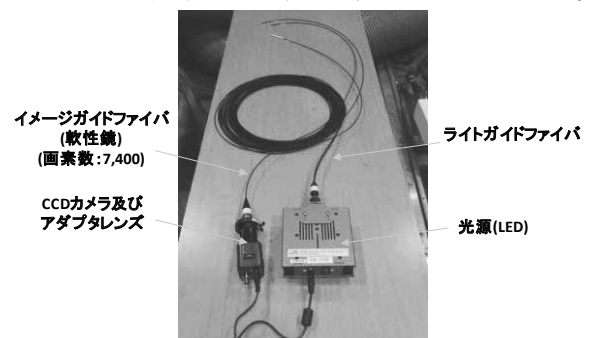


Fig.1 Image Guide Fiber and Light Guide Fiber

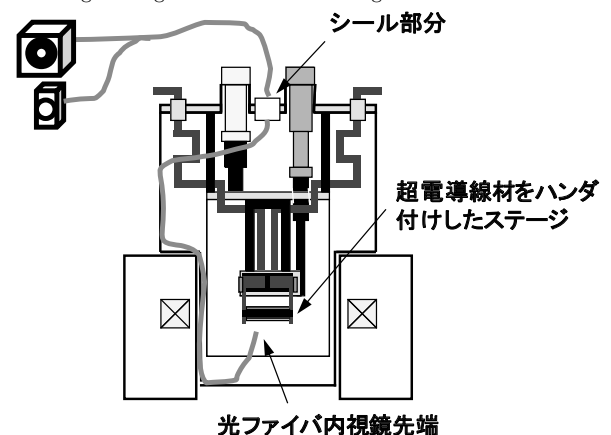


Fig.2 Schematic Illustration of Experimental Equipment

### 参考文献

1. 中村 剛:「科学機器入門新シリーズ 35 工業用内視鏡」科学機器(東京科学機器協会), No. 724, P.30 (2008.10)
2. 鷲塚信彦:「内視鏡の歴史と内視鏡技術の進化」繊維と工業(繊維学会誌), Vol.64, No.8, P.258 (2008.8)
3. 小方正文ら:「高温超電導線材評価試験装置の開発」2008 年度春季低温工学・超電導学会, 1P-p28

## 4KG-M 冷凍機の磁性体蓄冷材分量の影響

## Influence of the magnetic regenerator material quantity of a 4K G-M cryocooler

田村 昂大, 福田 祐介, 増山 新二(大島商船高専); 沼澤 健則(NIMS)

TAMURA Kota, FUKUDA Yusuke, MASUYAMA Shinji(Oshima National College); NUMAZAWA Takenori(NIMS)

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

## 1. はじめに

小型冷凍機では冷却性能向上に左右される要素として蓄冷材が挙げられ、特にその比熱が大切である。HoCu<sub>2</sub>やEr<sub>3</sub>Niなどの磁性体蓄冷の開発により、2段小型冷凍機で4Kレベルの冷却が可能となっているものの、その効率はよいとは言えない状態である。そこで次世代の蓄冷材としてGd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S (GOS)などのセラミックス蓄冷材も期待されている。

本研究では、4.2Kでの冷凍能力向上のために、これまで2段階蓄冷材にPb, HoCu<sub>2</sub>, GOSを充填させ、Pbを高温端から40%の体積比一定で冷凍性能評価を行ってきた[1-3]。今回はPbの体積比を変え、冷凍能力評価を行い、その影響を実験的に調査した結果を報告する。

## 2. 実験装置

本研究で使用した4KG-M冷凍機はSHI製で0.1W@4.2Kの仕様となっている。本冷凍機の特徴は、消費電力1.3kW@60Hzの空冷コンプレッサを使用しているため、実験・計測が手軽に行えることである。冷凍機は、全ての実験において同じ1段階蓄冷器を使用し、等しい充填圧力で測定を行った。コールドヘッドは上向きに使用している。

## 3. 実験方法

Fig.1に2段階蓄冷材の概略図を示す。長さ100mm、内径15mmの円筒空間内に蓄冷材を充填させる。今回は、高温端からPb球(直径0.2mm)、HoCu<sub>2</sub>球(直径0.2mm)、GOS球(直径0.25mm)の順番に充填し、それらの割合を変化させながら性能試験を行った。なお、異種の蓄冷材を分離させるために、フェルトとメッシュを使用している。

## 4. 実験結果

Fig.2は各蓄冷材での2段階ステージの冷凍能力を示す。性能評価を行ったすべての蓄冷材の組み合わせにおいて、到達温度はほぼ等しい値として約3.1Kが得られた。

2段階ステージに取り付けられた電気ヒータで冷凍能力を測定すると、冷凍能力はPb:HoCu<sub>2</sub>=30:70とPb:HoCu<sub>2</sub>=40:60にはほとんど差が無いことがわかる。また、低温側にGOSを充填している状態では、温度が7K以上になると冷凍能力が小さくなった。

Fig.3は、4.2Kにおける冷凍能力の実験結果を示す。Pb:HoCu<sub>2</sub>では、Pbの割合が50%を超えると冷凍能力が低下している。したがって、Pbの割合は、高温端から40%までが効果的であると考えられる。また、GOSを加えることにより、冷凍能力が向上し、Pb:HoCu<sub>2</sub>:GOS=40:30:30の時に最もよい冷凍能力を示し、その値は0.24Wが得られた。

## 5. まとめ

2段階蓄冷材にPb, HoCu<sub>2</sub>, GOSを充填させ、Pbの体積比を変えて冷凍能力評価を行った結果、Pbの割合が50%を超えると冷凍能力が低下することが明らかになった。

また、Pbを高温端から40%の状態にGOSを充填することにより、4.2Kにおける冷凍能力はPb:HoCu<sub>2</sub>:GOS=40:30:30の時に最もよい冷凍能力を示し、その値は0.24Wが得られた。

今後は、蓄冷材の分離に使用しているフェルトとメッシュの影響を調査するつもりである。

## 参考文献

1. S. Masuyama, Y. Fukuda, T. Imazu, T. Numazawa: Cryogenics to be published.
2. T. Imazu, Y. Fukuda, S. Masuyama, T. Numazawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.79
3. Y. Fukuda, T. Imazu, S. Masuyama, T. Numazawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.74

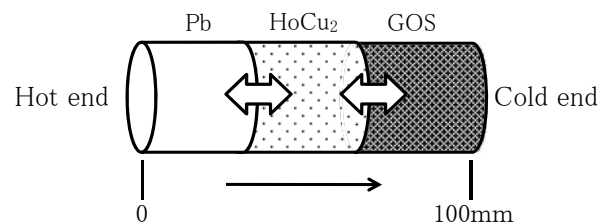


Fig.1 A schematic of three-layer regenerator materials

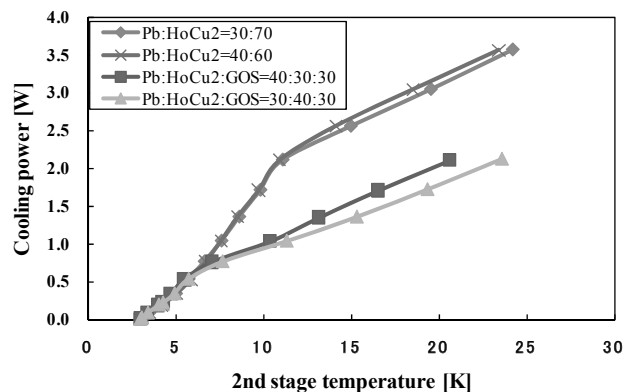


Fig.2 Cooling power of the 2nd stage altering regenerator materials

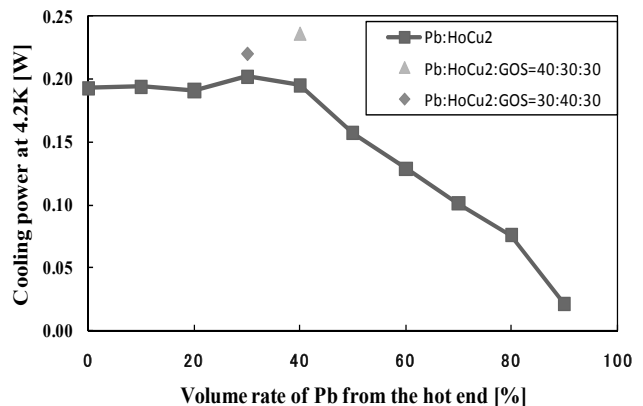


Fig.3 Cooling power at 4.2K



# 磁性蓄冷材 HoCu を用いた GM 冷凍機の高性能化

Improvement of GM cryocooler performance by using magnetic regenerator material of HoCu

杉本 堯, 岡村 哲至(東工大);  
 SUGIMOTO Gyo, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech);  
 E-mail: sugimoto.g.aa@m.titech.ac.jp

## 1. はじめに

近年、鉛は人体や環境へ毒性があることから使用が抑制されており、GM 冷凍機の蓄冷材にも鉛の代替材料が検討されている。そこで本研究では磁性蓄冷材 HoCu に注目した。GM 冷凍機の性能は蓄冷材の比熱に大きく依存するが、鉛は 10K 以下において比熱が極端に低下するため Er<sub>3</sub>Ni や HoCu<sub>2</sub> などの磁性蓄冷材と組み合わせて用いられてきた。Fig.1 より HoCu は 10K 以上の温度範囲において鉛より高い比熱を有するため代替材料として期待できる上、冷凍能力の向上も見込める。本実験では HoCu 及び鉛を用いた場合の性能比較を、単層蓄冷器及び低温側に HoCu<sub>2</sub> を組み合わせた 2 層蓄冷器について、1 段ステージと 2 段ステージにそれぞれヒーターで熱負荷をかけた時の各々のステージ温度を測定することでを行った。

## 2. 実験方法

実験ではシリンダ内径が 1 段 70mm、2 段 32mm の 2 段コールドヘッドを用い、圧縮機は 5kW 入力のものを使用し、ストロークは 20mm で運転した。また全ての実験で同じ 1 段蓄冷器を用い、運転周波数は 1.23Hz、圧力は高圧 2.0MPa、低圧 0.8MPa とした。2 段蓄冷材の球径は HoCu と Pb が 0.15mm ~ 0.25mm、HoCu<sub>2</sub> が 0.21mm ~ 0.25mm のものを用いた。

Fig.2 に 2 層蓄冷器の概略図を示す。蓄冷器は長さ 157mm、内径 28mm で低温側に HoCu<sub>2</sub> を体積比 25%、高温側に HoCu もしくは Pb を 75% 充填して実験を行った。

## 3. 実験結果

Fig.3 に単層蓄冷器 HoCu(100%)、鉛(100%)及び低温側に HoCu<sub>2</sub>(25%)を充填した 2 層蓄冷器の性能試験の測定結果を示す。まず HoCu と鉛の単層蓄冷器の結果では全ての 9 点において HoCu の方が 2 段ステージ温度は低くなり GM 冷凍機の冷凍性能が向上していることがわかる。次に低温側に HoCu<sub>2</sub> を 25% 充填した 2 層蓄冷器の場合は単層蓄冷器と比べ 2 段ヒーターが 0W 及び 7W の 6 点で冷凍温度が低くなっており、約 13K 以下の温度領域では性能が向上していることがわかる。2 段の最低到達温度においては HoCu+HoCu<sub>2</sub> の場合は HoCu(100%)と比べて 4.22K から 2.48K に改善された。しかし 2 段ヒーターが 14W の 3 点では逆に冷凍温度が上がっている。この結果について Fig.4 で考察する。Fig.4 は 1 段ステージ温度を 40K に固定した場合の 2 段ステージの冷凍能力を示したものである。この結果から低温側に HoCu<sub>2</sub>(25%)を充填すると冷凍能力は約 13K 以下では良いがそれ以上の温度領域では悪くなり Fig.3 の性能試験と一致する。これは Cold End の温度が 13K 以下では HoCu<sub>2</sub> の比熱が HoCu や Pb に比べて高いため良い冷凍能力を発揮できるが、13K 以上では HoCu に比べて比熱が劣り冷凍能力が低下してしまうからであり比熱との相関が高いことを示している。

## 4. まとめ

2 段蓄冷材に Pb の代わりに HoCu を用いることで GM 冷凍機の性能が向上することがわかった。さらに低温側に HoCu<sub>2</sub> を充填した 2 層蓄冷器にした場合には 13K 以下の極低温領域において冷凍能力が大きく改善された。

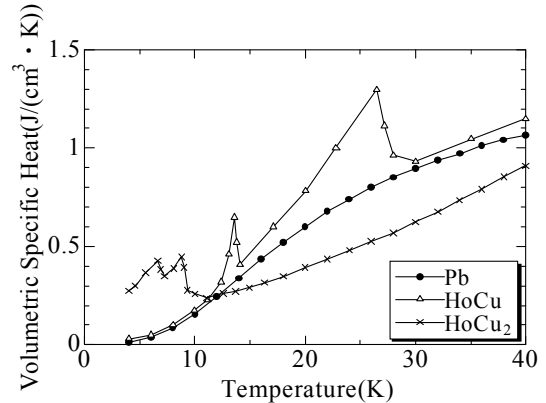


Fig.1 Specific heat of regenerator materials

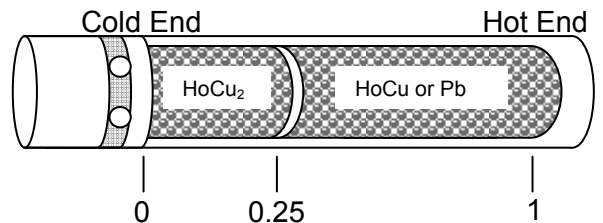


Fig.2 A schematic of two-layer regenerator materials

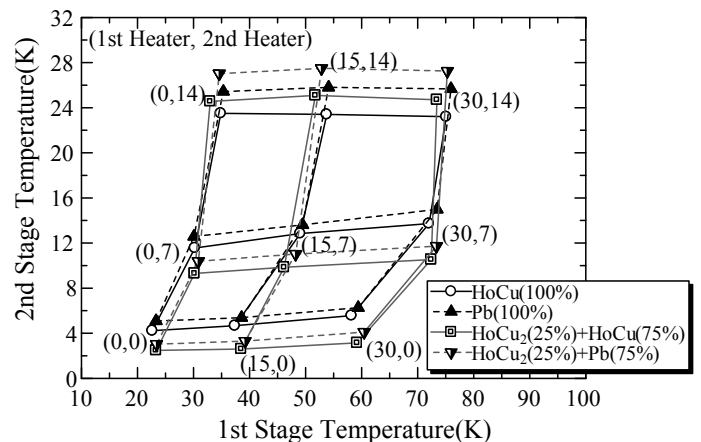


Fig.3 Performance examination

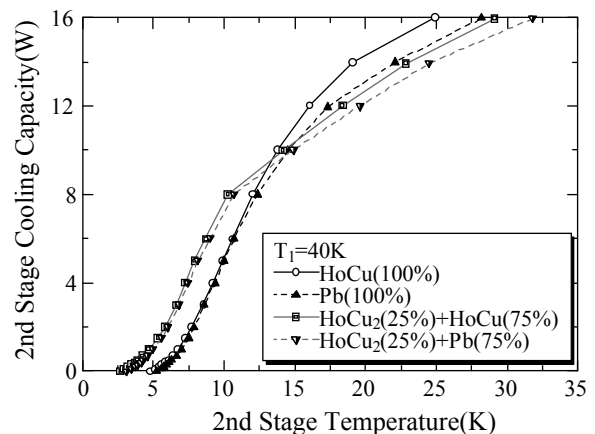


Fig.4 Refrigeration capacity

## 並列パルス管冷凍システムの開発(数値解析)

### Development of novel refrigeration system with multi pulse tubes (Numerical simulation)

水野 克俊, 池田 和也, 長嶋 賢(鉄道総研); 平井 靖夫, 高橋 貞充, 岩本 慎平(エア・ウォーター)  
 MIZUNO Katsutoshi, IKEDA Kazuya, NAGASHIMA Ken (RTRI);  
 HIRAI Yasuo, TAKAHASHI Sadamitsu, IWAMOTO Shinpei (AWI)  
 E-mail: mizuno59@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

大型の極低温機器の冷却を伝導冷却で行う場合には、熱伝導の観点から大型の冷凍機単体よりも小型の冷凍機を複数用いることにより、冷却効率が改善される可能性がある。そのため、我々は複数の冷凍機を1台の圧縮機で運転する方法を検討している。

本報では、2台の冷凍機と1台の圧縮機を組み合わせた場合の、各冷凍機の制御バルブの開閉タイミングが同位相および逆位相での運転を対象とした。これらの運転モードの違いによる冷凍能力、圧縮機仕事を数値解析により検証した。

#### 2. 解析モデル

解析に用いている冷凍機は GM 方式パルス管冷凍機(アクティブバッファ型)である。単体運転のとき、冷凍能力は約 100 W@50 K となっている。

解析には断熱モデルを用い、パルス管以外の箇所は等温条件、パルス管部分では断熱条件となっている。なお、蓄冷損失のみを考慮しており、シャトル損失や伝導損失は考慮していない。複数のパルス管を運転する際には圧縮機能力の影響が顕著になると考えられるため、交流誘導機の特性を考慮し、負荷によって体積流量が変化するように設定した。

Fig.1 に 並列運転時のパルス管冷凍機モデルを示す。また、Fig.2 には一周期におけるバルブの on-off を示しており、圧縮機高圧と高圧バッファ、圧縮機低圧と低圧バッファのバルブは同時に開閉するものとした。塗りつぶされた区間が“on”を示し、(a),(b)は対応するパルス管を示す。

#### 3. 解析結果

同位相と逆位相運転時の 2 種類について解析を行った。条件は運転周波数 1.2 Hz, 初期ヘリウム充填圧 1.9 MPa とした。圧縮機高圧、低圧およびパルス管内部圧力の時間変化を Fig.3, 4 に示す。同位相運転時には圧縮機圧力が大きく変動していることがわかる。このとき(a),(b)各パルス管の冷凍能力の和が 99 W, 断熱仕事を仮定した圧縮機仕事は 1340 W となった。逆位相運転においては冷凍能力 131 W, 圧縮機仕事 1100 W となり、冷凍能力だけでなく、効率も大幅に改善されていることがわかる。実験においても、逆位相運転の方が冷凍能力、効率ともに優れており、解析と傾向が一致した。これは以下のように説明できる。

①同位相運転では圧縮機の高圧、低圧いずれかのバルブが開いている時間が存在するため、出口圧の上昇、もしくはは入口圧の下降が起きており、圧力差が広がった分だけ圧縮機負荷が増えてしまう。逆位相運転では片側のバルブが常に開いているため、圧縮機入口、出口圧力がほぼ一定となり、圧縮機負荷が小さくなる。

②配管、バルブ、蓄冷器等での圧力損失は作動流体の運動エネルギー、すなわち流速の 2 乗に比例する。よって、同じ質量流量に対しては流速が均一なほど損失が小さくなる。逆位相運転では、圧縮機の圧力変動が小さいことからわかるように、流れが均一である。そのため圧縮機とパルス管内部の圧力差が小さくできるので、少ない圧縮機仕事でも同位相運転と同様、もしくはそれ以上の冷凍能力を発生できる。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

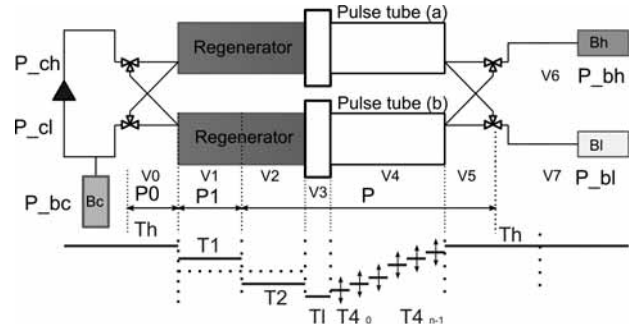


Fig.1 Model of GM type active buffer multi pulse tubes cryocooler.

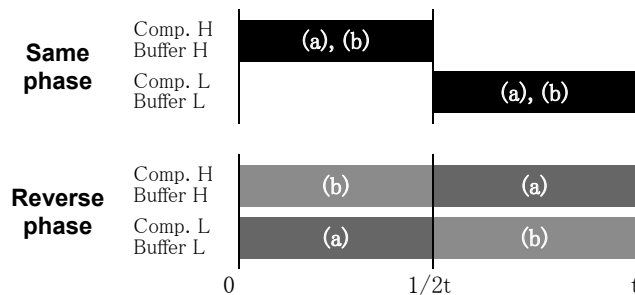


Fig.2 Valve sequence of each drive mode.

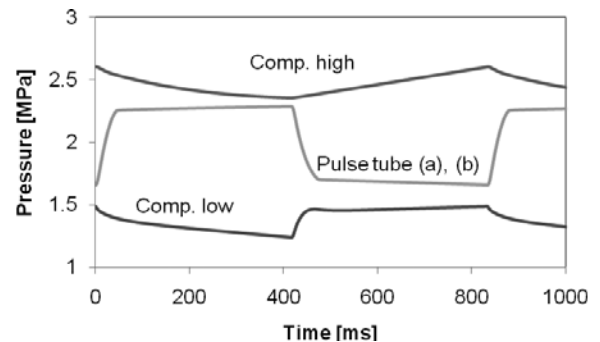


Fig.3 Pressure wavefomes of compressor and pulse tubes (same phase).

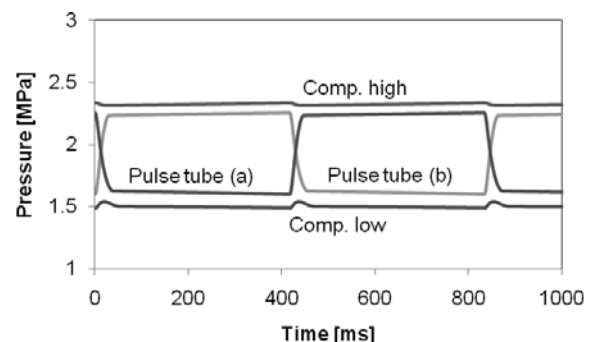


Fig.4 Pressure wavefomes of compressor and pulse tubes (reverse phase).

#### 参考文献

1. K. Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.98

## 並列パルス管冷凍システムの開発

### Development of novel refrigeration system with multi pulse tubes

池田和也, 水野克俊, 長嶋 賢 (鉄道総研);高橋貞充, 岩本慎平, 平井靖夫 (エア・ウォーター)

IKEDA Kazuya, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken(RTRI);

TAKAHASHI Sadamitsu, IWAMOTO Shinpei, HIRAI Yasuo (AWI)

E-mail: k-ikeda@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

4 コイル、1 クライオスタットの高温超電導磁石に対して、圧縮機、位相制御を共通化した並列パルス管冷凍機による冷却システムを検討している。

パルス管を上下方向の荷重支持材として併用させる場合を想定して、パルス管を FRP 円筒で補強した場合の冷凍能力変化について補強方法の違いによる比較を行った。

さらに、前回発表[1]において並列運転時の冷凍能力が単体運転時より低下したことについて、制御バルブの開閉タイミング位相を冷凍機間で 180° ずらすことにより、十分な冷凍能力が得られることを確認した。

#### 2. 実験装置

パルス管を FRP 円筒で補強した試験は、パルス管周りに FRP 半円筒 2 つを抱き合わせることで行った。FRP がパルス管から離れている場合と、密着した場合と、FRP をつけない場合の 3 パターンで実施した。

並列パルス管冷凍機運転試験では、Fig.1 に示すバルブ配置、ガスフローにより、右図に示すバルブ開閉タイミングで冷凍機の運転を行った。

#### 3. 実験結果とまとめ

パルス管を FRP 円筒で補強した試験結果を Fig.2 に示す。補強しない場合と密着させて補強した場合とでは、冷凍能力にほとんど差が発生しない。非接触の場合は、FRP 円筒とパルス管に温度差が生じ、その輻射熱により約 10W の冷凍能力低下となった。常温域から熱伝導による侵入熱は約 0.3W で無視できる範囲である。このことより、パルス管を FRP で密着補強し、クライオスタット中における超電導コイルの上下荷重支持としての可能性が検証された。

パルス管冷凍機 2 台の並列運転結果を Fig.3 に示す。グラフ上部は圧縮機高低圧のガスを PTR1 と PTR2 とで 180° 位相をずらしたもので、グラフ下部が同位相運転時である。実線が冷凍能力を表し、波線は COP を示す。50K における PTR1 と PTR2 の冷凍能力の和は、180° 逆相時が 118.6W、同相時は 76W となり約 1.6 倍の冷凍能力向上となった。消費電力を揃えての運転比較であるため、COP についても同様の向上となる。

50K で運用可能な高温超電導磁石が超電導リニアで採用された場合の冷却システムとして必要な能力を有する結果が得られた。今後は、さらなる効率向上を図りたい。

本実験は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

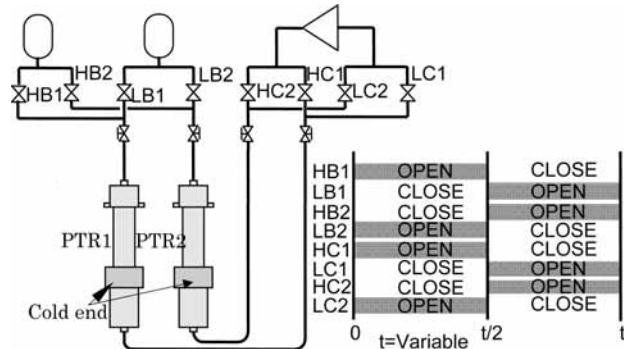


Fig.1 Gas flow and valve open-and-close sequence

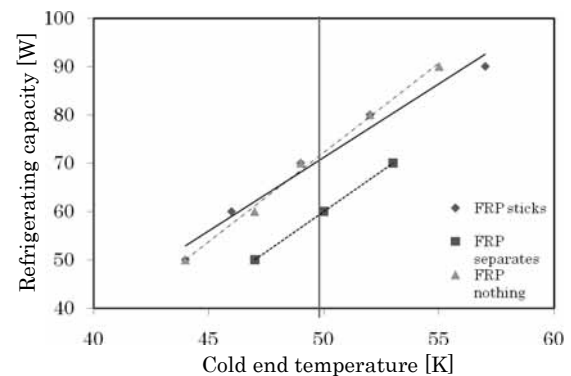


Fig.2 Refrigerating capacity according to FRP attachment position

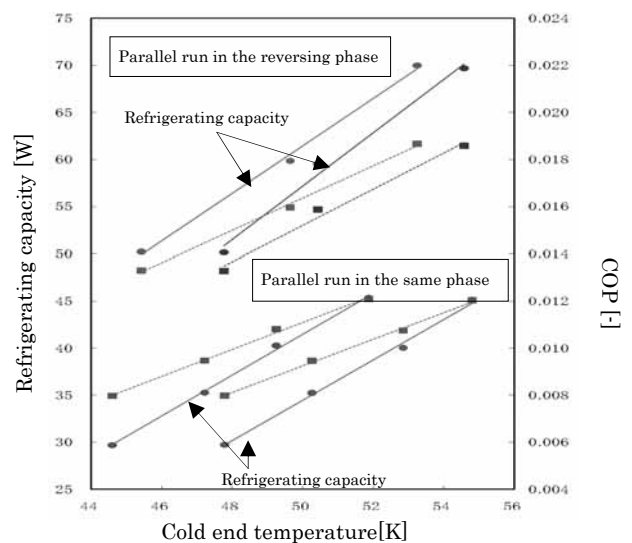


Fig.3 The parallel-run result by the difference in a gas phase

#### 参考文献

[1]K.Ikeda, et al.:Abstract of CSJ Conference, Vol.82(2010)p.98

## 振り子を用いた超低温冷凍機の除振とその計測

## Vibration isolation using a pendulum for a ultra low temperature cryostat

宮 利雄 (東大物性研); 北村 玲(新潟大); 柄木 良友, 久保田 実 (東大物性研)

MIYA Toshio (ISSP, U-Tokyo); KITAMURA Akira (Niigata Univ); KARAKI yositomo, KUBOTA minoru (ISSP, U-Tokyo)  
E-mail: miya@issp.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

固体状態で而も同時に超流動性を示す「超流動固体状態」は1960年代後半から1970年までに、理論的に「必ず存在する」と予言されて来た。が、長年の研究にも関わらず見付かって来なかった。2004年1月号のNature誌の記事(E. Kim & M. H. W. Chan, NATURE |VOL 427 | 15 JAN 2004 | P.225; Probable observation of a supersolid helium phase) 以降急速な展開が起きている。我々は固体<sup>4</sup>Heについて渦液体状態のオンセット温度を定量的に決定する[1]等ユニークな研究を行っている。が、今日迄に判明している固体ヘリウムの特性、特に固体超流動及びその量子渦液体状態は、著しく微小な振動に敏感である。特に10  $\mu$  m/s 程度以下迄の速度に大変敏感である事が判明している[2]。一方、固体ヘリウム試料は、加圧下で低温に長時間保持して初めてその特性を定量的に議論出来る。測定は数ヶ月から年の長さ及びぶ事もある。

そこで我々は、希釈冷凍機温度(0.01K~1 K)を長時間連続的に保持しつつも無振動状態での連続測定の為の技術を開発中である。これには、従来から我々が用いて来たパルス管冷凍機と独自のJT予冷希釈冷凍機を用いる計画である。

## 2. 装置の狙いと構造

冷凍機の微小な振動は、我々にとって二つの点で取り除く必要がある。(1). 我々の測定は極低温下においてねじり振子法Torsional Oscillator method (以下、TO法)を用いる。我々が用いる高感度捻(ねじり)振子TOの共振周波数は約1kHzである。我々の測定では数十 pico sec迄という非常に微小な共振周期の変化を観測することが求められる。そのため、TOには非常に鋭い共振周波数のピーク、すなわち、高いQ値が必要になる。外部からの振動は別のモードの振動を引き起こしたりしてこの高感度捻り振子Q値の低下を招く。(2). 1.でも述べたが、固体ヘリウムの超流動特性及び量子渦特性は、微小速度場に依って大きな影響を受ける。そこで我々は測定に影響する周波数の付近の外部振動を遮断すべく、大型の振り子構造をもった除振機構を伴う冷凍機を開発している。Fig. 1で真空配管中に天井から、3mm  $\phi$ 長さ4mの3本のSUSの撚り線で吊った振り子構造を取る事により振り子の長さから決まる低周波以上の水平振動は遮断される事を期待している。

## 3. 装置の各部と低温での振動観測

おおきく分けて壁に支えられたアルミのフレーム(Fig.1)に搭載された厚さ 30mmのAL板に取り付けされたパルス管冷凍機の本体と300K, 50K輻射シールド用の銅フランジ部分とそれらの構造物と全く機械的に切り放され建屋天井部に吊るされた特殊防振ゴムを介したワイヤ取付板に $\phi$ 3SUSワイヤ 4,000 mm 長を装着しその末端の 0.7Kフランジ固定されている。組み立て直後はブランコ状態にある。超低温にてTO測定するので当然ワイヤ周辺には真空保持の為の配管施工がされる。

我々は、低温実験時の振動状態をその場で計測する事を計画して居り、これには、実験に用いる高感度捻り振子を用い、Q 値の変化から振動を計測する事を計画している。尚、我々は BeCu 製捻り振子を用いているが、この感度は低温程著しく大きくなる。Q 値は室温真空中で  $10^4$ 、液体ヘリウム温度で  $10^6$  のオーダーとなる。

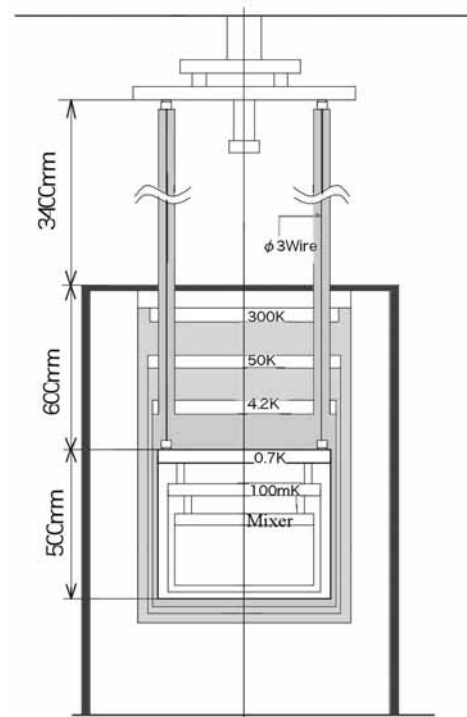
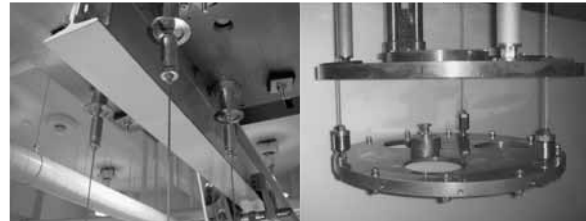


Fig.1 Schematics of Pendulum supported DR 0.7 K stage. Upper left photo shows the ceiling structure to fix three SUS wires. Upper right photo shows the 0.7 K stage hanged by the wires.

## 4. まとめ

これまで、室温、1気圧中での大雑把な振動測定しか出来ていないが、真空中、低温真空中での測定を報告したい。外部からの振動の他、パルス管冷凍機自体の振動等が如何に除去されるか、報告したい。

## 参考文献

1. A.Penzev, Y.Yasuta, M.Kubota: PRL **101**, 065301 (2008).
2. E. Kim and M. H.W. Chan, Nature (London) **427**, 225 (2004); Science **305**, 1941 (2004); Phys. Rev. Lett. **97**, 115302 (2006).

# 液体窒素の自然循環によって200m高温超伝導直流送電実験装置

## Natural circulation of LN2 in the 200 m HTS DC experimental facility

イワノフ・ユリー、渡邊 裕文、河原 敏男、浜辺 誠、孫 建、山口 作太郎 (中部大)

IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, HAMABE Makoto, SUN Jian, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)  
E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

### 1. Introduction

Conventional design of HTS cable cooling system presupposes application of cryopumps to circulate liquid refrigerant. However, they are powerful source of heat load and possess a number of other disadvantages. Alternatively, thermal siphon effect can be used. The new 200 m HTS DC facility in Chubu University is equipped with heaters to affect temperature distribution, and 4–5 m elevation difference provides conditions for natural circulation of LN2. Preliminary experiments were carried out to investigate the behavior of LN2 flow under local heating.

### 2. Experimental facility

Construction of a new experimental facility at the Chubu University was launched in 2009 and completed in Jan. 2010. 200 m DC cable using Bi-2223 HTS tapes was manufactured by Sumitomo Electric Industries, Ltd. in accordance with our design. The facility is equipped with several enhancements that distinguish it from all the existing ones. In particular, the current leads are equipped with a Peltier element to reduce heat leakage; smooth cryogenic pipes instead of corrugated ones are used in order to reduce hydraulic friction and pressure drop; terminal units are made movable to compensate for thermal contraction/expansion of the cable. Automated measurement system read data from more than 500 sensors with a period of 3 s.

### 3. Pressure drop

LN2 flow in crypipe was characterized by Reynolds number within the range of 9000–20000. The pressure difference between terminals as a function of flow rate was measured. Results are shown in Fig. 1. Smooth curve exhibits the theoretical estimation; it agrees with the experimental data reasonably well and can be used for design of long distance power transmission lines.

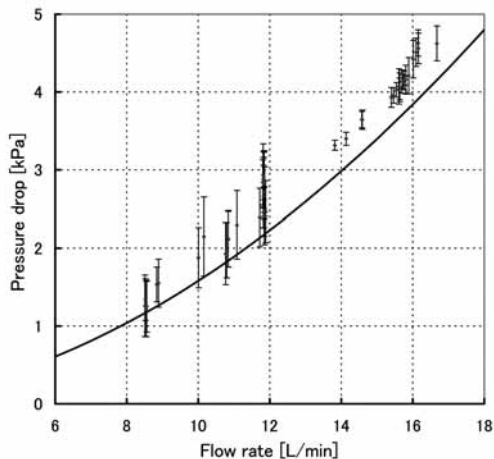


Fig.1 Pressure drop as a function of LN2 flow rate. Smooth curve shows design values.

### 4. Heater experiment

The crypipe is equipped with three compact heaters with capacity of up to 350 W mounted at the upper surface of inner pipe. The temperature distribution was measured by 7 pairs of platinum resistance thermometers located at different distances from the inlet. Effect of local heating on the parameters of LN2 flow was studied (Fig. 2, 3).

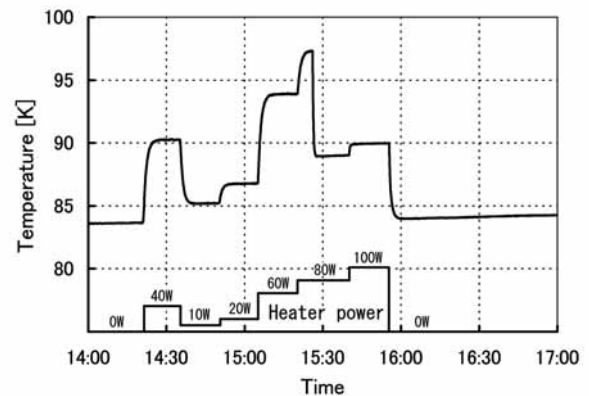


Fig. 2 Power and temperature of the heater HT3. Boiling of LN2 begins at about 80 W. Heater temperature drops suddenly due to heat transfer coefficient increases.

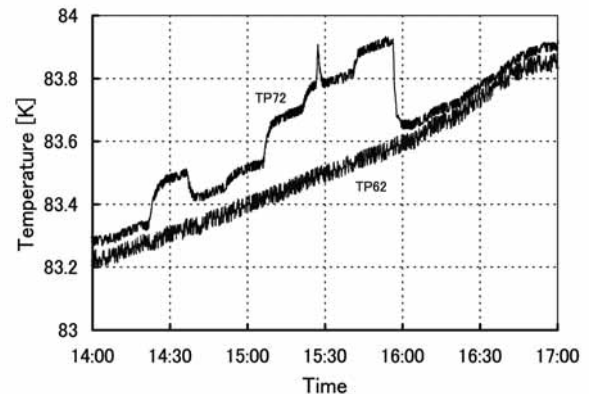


Fig. 3 Temperature of LN2 before and after the heater. The distance between thermometers TP62 and TP72 is 12 m.

### 5. Conclusion

The data obtained confirmed our understanding of the behavior of the experimental facility at different heat loads and allow design a full-scale LN2 natural circulation experiment.

### References

1. A. Radovinsky, A. Zhukovsky: (2006) HVDC-MIT-Aradovinsky-022106-1
2. A. Radovinsky, A. Zhukovsky: (2006) HVDC-MIT-Aradovinsky-022806-1
3. Yu. Ivanov, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p. 102

# トロイダル 形状 高温超伝導 SMES 用 極低温 冷却 システムの 熱構造 解析

## Structural and Thermal Analysis of the Toroidal Configuration of the HTS SMES Cooling System

高 得龍, 廉 漢吉, 金 孝峰, 高 準錫, 洪 溶柱, 朴 聖濟 (韓國機械研究院)

Deuk-Yong Koh, Hankil Yeom, Hyo-Bong Kim, Junseok Ko, Yong-Ju Hong, Seong-Je Park (KIMM)

E-mail: dykoh@kimm.re.kr

### 1. Introduction

The SMES can be used in areas of high load variance such as sunlight and wind power, requires frequent repetition of charging and discharging, which causes the SMES coil to overheat because of excessive AC loss [1].

To overcome this problem, the system was designed as a toroidal type. By arranging the superconductive coils in a toroidal format, the leaked magnetic field could be greatly reduced, and the perpendicular magnetic field applied to the superconducting wire surface was reduced to significantly reduce AC loss [2]. However, it is difficult to design or manufacture the cooling structure, and structurally weak parts may be created as it is structurally complex. Therefore, this paper intends to analyze the temperature distribution and thermal stress of the designed cooling structure in order to determine its cooling performance and structural stability.

### 2. Design of cooling structure

The SMES coil is arranged in a toroidal format with an inner radius of 162 mm and an outer radius of 599 mm of 28 double pancake coils. A conduction cooling plate is installed at the top and bottom of the toroidal coil to maintain the toroidal shape and cool the coil.

The toroidal coil was cooled by connecting the conduction cooling plate installed at the top and bottom to the coil conduction plate contacting both sides of the coil with the conduction connector to remove the heat generated by the coil (Fig. 1). The 2nd stage of the GM cryocooler contacts on the conduction cooling plate to cool the coil, while the 1st stage cools the current lead and radiation shield. Such a cooling structure minimizes the cooling path to increase cooling efficiency, and serves as a support to maintain the coil in a toroidal shape and as a guide to position the coil during assembly.

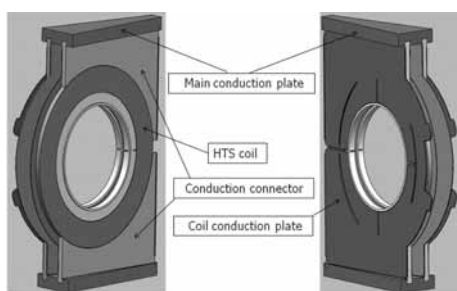


Fig.1 Conduction coil cooling structure

### 3. Analysis

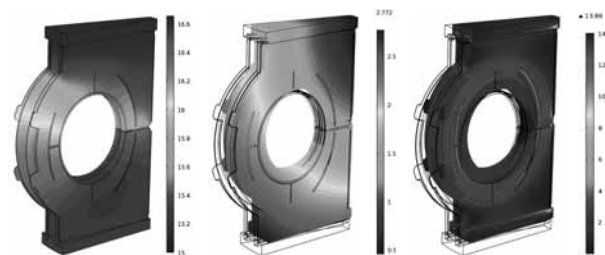
The joint resistance of the double pancake coil was measured to be 120 nΩ, while the contact resistance between the toroidal shaped double pancake coils was measured to be 120 nΩ, while the contact resistance between the toroidal shaped double pancake coils was measured to be 50 nΩ. Based on these measurements, the internal heat generated by the coil was calculated to be around 4.3 W at an operating

current of 960 A, and the conduction heat radiated through the support bar and sensor line from 80 K radiation shield around 1.4 W, making the total heat load to be processed at the whole 15 K domain to be 5.7 W.

Based on this calculation, four levels of coil load in 0~10 W ranges were used as the condition for temperature distribution and thermal stress analysis. When the coil load was 10 W, the heat load of each double pancake coil was 0.357 W. Assuming the insertion of an indium sheet between the conduction cooling plate and the conduction connector, 100 W/(m.K) was used as the thermal conductivity for the contact resistance. Assuming epoxy impregnation between the coil cooling plate, conduction connector and coil surface, 0.05 W/(m.K) was used as the thermal conductivity.

### 4. Results

The temperature distribution of the designed cooling structure was very uniform and the thermal stress analysis indicates that geometric deformation and maximum stress were within the structurally safe range.



(a) Temperature (b) Deformation (c) Von Mises stress  
Fig.2 Results of analysis

### 5. Conclusions

The conduction cooling plate was installed at the top and bottom of the toroidal coil to maintain the toroidal shape and cool the coil. Such a cooling structure not only provides efficient cooling but also acts as a support to maintain the toroidal shape and as a guide to position the coil during assembly.

To design a more reliable cooling system, further studies on the thermal load analysis of charging and discharging, and stress analysis of the magnetic field will be necessary.

### Acknowledgement

This work was carried out under the support of the Ministry of Commerce, Industry and Energy, Korea.

### References

1. H. K. Yeom, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 18 (2008) p. 743
2. K. P. Juengst, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 12 (2002) p. 753

# 保冷システムにおける高温超伝導コイルの伝熱解析

## Heat transfer analysis on HTS coil of cold storage system

安藤 洋介, 岡村 哲至 (東工大); 長嶋 賢, 水野 克俊 (鉄道総研)

ANDO Yosuke, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech);

NAGASHIMA Ken, MIZUNO Katsutoshi (RTRI)

E-mail: ando.y.ae@m.titech.ac.jp

### 1. はじめに

超電導マグネットは冷却することが必須であるが、磁気浮上式列車のような移動体に超電導磁石を搭載する場合には冷却システムの重量や消費電力を低減することが有効である。そこで磁気浮上式列車が使われない夜間に冷凍機でマグネットの冷却を行い、列車の運行時には軽量化のために冷凍機を切り離す、というような冷凍機なしで長時間極低温に保つことのできる保冷システムの検討を行っている[1]。これまで我々が用いた実験装置では HTS コイルを模擬するものとして銅のブロックを用いてきた。将来的には銅ブロックではなく HTS コイルを用いて詳細な温度分布の検討などをする必要があるが、今回はその前段階として 2 次元の伝熱シミュレーションによって Fig.1 に示されるようなレーストラック型コイルの温度分布や温度の時間変化を見積もり、より実機に近い状態での解析を行った。

### 2. HTS コイルの計算モデル

これまでの実験で用いた超電導コイル模擬の銅ブロックは非常に熱伝導率が良い無酸素銅が用いられていた。よって熱の侵入源が銅ブロックの上部に偏っていても銅ブロックの温度分布は上部から下部までほぼ均一であった。しかし HTS コイルの場合は線材の熱伝導率に異方性があるためこのような均一な温度分布を持たないことが予想される。そこで今回の計算では Fig.2 に示す線材モデルを想定して、Fig.2 の  $\lambda_x$  方向には銅、 $\lambda_y$  方向には YBCO と Hastelloy とエポキシ樹脂の物性値を用いて伝熱計算を行った。またレーストラック型のコイルは Fig.3 に示すように長方形と近似した。また境界条件としては、左上と右上のセルが冷凍機と繋がっているとして 20K に固定した。熱の侵入については、上段の左から 4 番目と右から 4 番目のセルにふく射シールド板(50K 固定)とコイルを繋ぐ荷重支持材からの熱伝導を算入した。また全てのセルにふく射シールド板からのふく射熱を算入した。そして Fig.3 の左上のセルが Fig.4 と Fig.5 のグラフの左の奥のプロット点に相当するように計算結果をまとめた。

### 3. 解析結果とまとめ

本研究では冷凍機を切り離れた後、HTS コイルを模擬している 10.3kg の銅ブロックの温度が 20K から 50K まで上昇する時間を保冷時間と定めている。そして今回の計算では銅ブロックとコイルの保冷時間を比べるために、温度が 20K から 50K まで上昇するのに必要な熱量が同等になるようにコイルの質量を 21.4kg と決定した。

保冷時間を計算する前の初期条件となる、冷凍機に繋がった定常状態での温度分布を Fig.4 に示す。この系は浮上式鉄道用を想定しているため、荷重支持材からの熱侵入が多めに見積もられている。そのため 20K の場合は、全体のセルに入るふく射よりも一部のセルにしか入らない熱伝導の方が 22 倍も大きく、温度分布の偏りが生じやすい。特にモデルの Y 軸方向(コイルの径方向)では 3K ほどの温度差が付き HTS コイルの熱伝導の異方性が反映されている。また冷凍機を取り外した非定常状態では、銅ブロックの場合の保冷時間は 6.5 時間と見積もられていた。しかし HTS コイルを冷凍機から外し、

非定常状態にして 5 時間経過した解析の結果(Fig.5)を見ると一部のセルが 50K に達している。この結果より、コイルの径方向の熱伝導を補強する必要があることがわかった。本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

### 参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.139

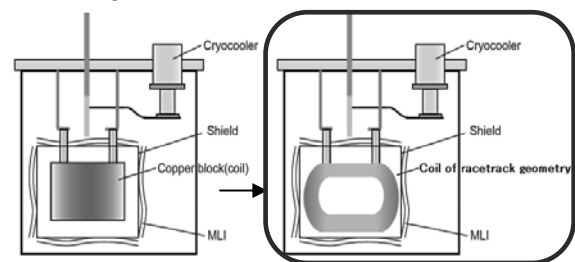


Fig.1 Image of the new experimental apparatus

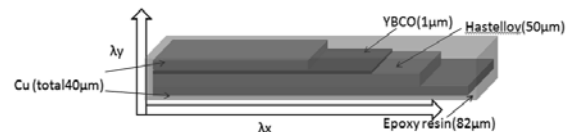


Fig.2 Model of the HTS wire

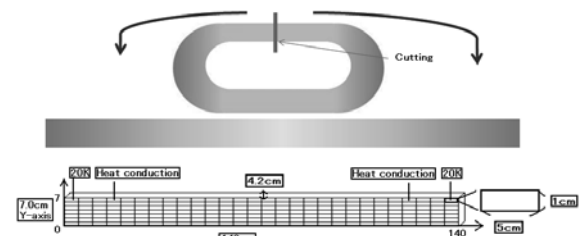


Fig.3 Model for numerical calculation

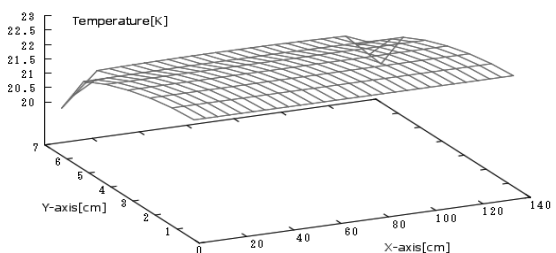


Fig.4 Steady state temperature distribution in a coil

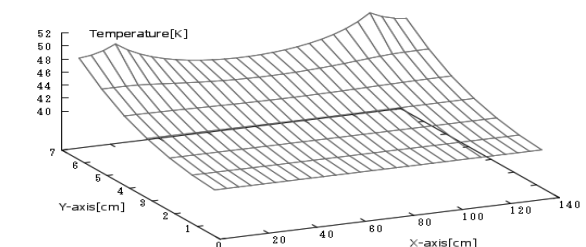


Fig.5 Unsteady state temperature distribution in a coil after five hours

## 超伝導送電用長距離断熱配管の真空排気

## Evacuation of long cryogenic pipes for superconducting power transmission

渡邊 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大)

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

E-mail: h\_watanabe@isc.chubu.ac.jp

## 1. はじめに

超伝導送電用真空断熱配管は、真空工学的には細く長い管としてとらえることができる。その排気時間は管のコンダクタンス、放出ガス速度、排気に用いるポンプの性能に大きな影響を受ける。特に長距離送電に用いる場合、場合によっては、極めて長い排気時間が必要となる。中部大学の 200m 超伝導直流送電実験装置(CASER2)の断熱配管の真空引きから得られたデータを元に、理論的な検討を行うことで、超伝導送電の断熱配管の排気に必要とされる真空システムについて議論する。

## 2. 真空排気システム

図 1 に CASER2 の断熱配管及び真空システムの略図を示す。CASER2 の断熱配管は L 状に配置されている。断熱配管を真空引きするために一台のメカニカルブースターポンプと一台のターボ分子ポンプが備え付けられており、それぞれ 1Pa 程度以上の低真空側と、それ以下の高真空側を担当する。断熱配管の端は隣り合っているため、門型の配管で接続し、ポンプはその配管に取り付けられている(図 2)。従って、この排気方法は長距離の配管を考えた場合に 200m 毎にポンプを設置している状況に対応する。真空の状態を測定するために断熱配管には 4 つのピラニー真空計と 1 つの電離真空計が備え付けられている。

## 3. 排気実験

図 3 にターボ分子ポンプで排気している途中の排気曲線を示す。時間が経つにつれ徐々に真空が良くなっているが、途中で瘤状の盛り上がりが見られる。この時間帯は日中に対応しており、これは、CASER2 の断熱配管のほとんどが屋外に設置されているため、日光により熱せられた断熱配管の外管からの放出ガスが増加しているためであると考えられる。真空度はポンプから離れるに従って悪くなっている。これは分子流域の配管のコンダクタンスが小さいために圧力勾配が生じていることによる。

真空度の変化は非常に緩やかであるが、これは排気速度と放出ガス速度が釣り合った状態であり、放出ガス速度が緩やかに減少しているためであると考えられる。このことから真空排気を早く行うためには放出ガス速度を小さくする必要があり、通常の真空機器の場合、機器を熱するベーキングが行われるが、断熱配管は元より断熱であり、外から内管を暖めるのは容易ではない。又、長距離送電を想定した場合、屋外で配管にヒーターを巻くということも現実的ではない。従って、断熱配管建設の際には放出ガスを増やさないよう注意した取り扱いが必要であると考えられる。

図 3 で得られた排気曲線から、CASER2 の断熱配管の実効的なコンダクタンスと放出ガス速度の時間依存性を求めた。結果は、コンダクタンスは 1m あたりに換算して  $300\text{l}\cdot\text{m}/\text{s}$  であり、放出ガス速度は  $1\text{m}^2$  あたりに換算して  $6.8\text{t}^{-0.5}\text{Pa}\cdot\text{l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  であった。放出ガス速度などは配管の状態に依存するため、これらの値は一般化出来ない。しかし、この値が得られれば、CASER2 の断熱配管を拡張した場合の排気状態を計算により予測することができる。この結果より、真空断熱が十分に得られる  $0.05\text{Pa}$  の真空度に到達するまでに 41 日かかると見積もることが出来る。

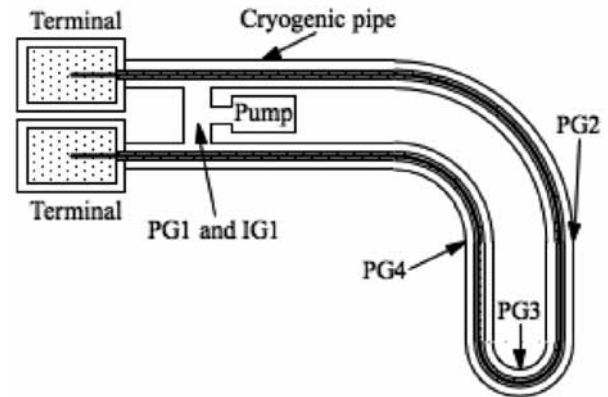


Fig.1 The schematic picture of CASER2. PG1, PG2, PG3, PG4 are Pirani gauges and IG1 is an ionization gauge.

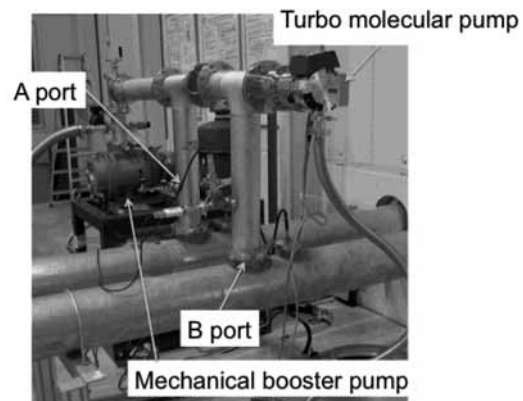


Fig.2 The pump system of CASER2. One mechanical booster pump and one turbo molecular pump are used for the evacuation of whole the system.

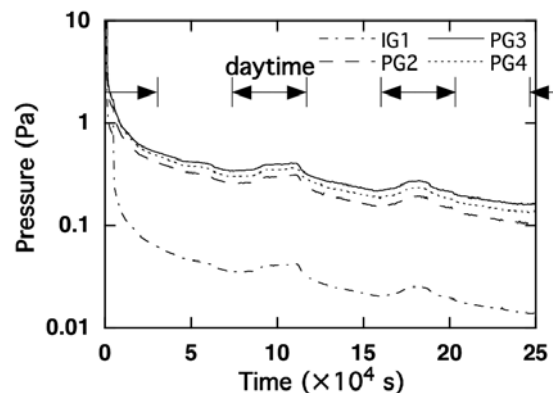


Fig.3 The time evolution of the vacuum evacuated by the turbo molecular pump.



## 直流超伝導ケーブル用断熱二重管における熱侵入量の精密測定

### High accuracy measurement of heat leak on cryogenic pipe for DC superconducting cable

杉野 慎, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 山口 作太郎(中部大学); 石黒 康英, 新司 修(JFE スチール)  
 SUGINO Makoto, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);  
 ISHIGURO Yasuhide, SHINSHI Osamu (JFE Steel)  
 E-mail: te09009@isc.chubu.ac.jp

#### 1. はじめに

中部大学では高温超伝導体を送電ケーブルに用いた直流超伝導送電システムの実用化に向けて、研究を行っている。直流超伝導送電システムを数百 km 規模の距離で利用したときの効率が従来の銅ケーブルを使用した直流送電システムを上回るためには、断熱二重管での熱侵入量を 0.5 W/m 以下に抑える必要がある。そのために、断熱二重管の熱輻射シールドの簡素化を図る研究を、縦置き型の熱侵入量測定装置を用いて、長さ 1.65m の断熱二重管で行ってきた。その結果、外管 150A(φ165.2mm)、内管 80A(φ89.1mm)において輻射熱侵入量を 0.5W/m 程度まで低減できることが確認できた[1]。そこで、これらのような低熱量の輻射熱をさらに高精度で測定するために、新たに精密熱侵入量測定装置を設計・製作し[2]、測定を行っている。本報告では、精密測定を行うための手順を示すとともに、熱侵入量測定の結果について述べる。

#### 2. 測定装置

新たに製作した精密熱侵入量測定装置の概略図を Fig.1 に示す。長さ300mm、内径 φ19mm の液面測定部における液面の時間変化から熱侵入量を測定している。この測定装置の垂直部は被測定管以外からの熱侵入が極力少なくなるように設計されている。今回の測定では、被測定管には、外管が 200A(φ216.3mm) の亜鉛メッキ鋼管、内管が外径 50A(φ60.5mm)、長さ 2.82m の SUS 管、亜鉛メッキ SUS 管を使用した。さらに、内管に MLI を 10 層巻いた状態でも測定を行った。

#### 3. 熱侵入量測定

各内管について測定した LN2 液面の時間変化を Fig.2 に示す。被測定管がない状態での熱侵入量は 0.25W となり、前装置の 1.2W[1]から約 80%低減することができた。Fig.2 の結果からステファン・ボルツマンの法則を用いて算出した被測定管の熱侵入量の実測値や単位長さあたりの熱侵入量を Table.1 に示す。結果として通常の SUS 管に比べ、亜鉛メッキ SUS 管は熱侵入量を約 0.4W/m 低減することができた。さらに、MLI を 10 層使用することで目標である 0.5W/m より少ない 0.20W/m という値を得ることができた。

現在、これらの結果に対する測定精度について検討を行っている。

#### 参考文献

1. Y. Nasu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.97
2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.60

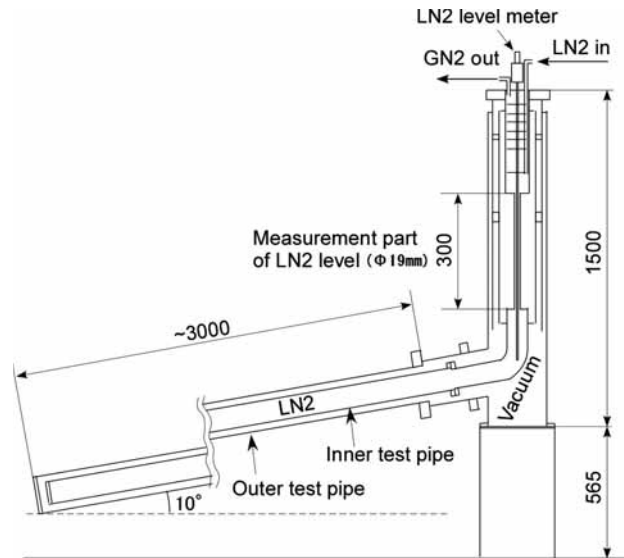


Fig.1 A Schematic Diagram of New Test Bench for Heat Leak Measurement on Cryogenic Pipes.

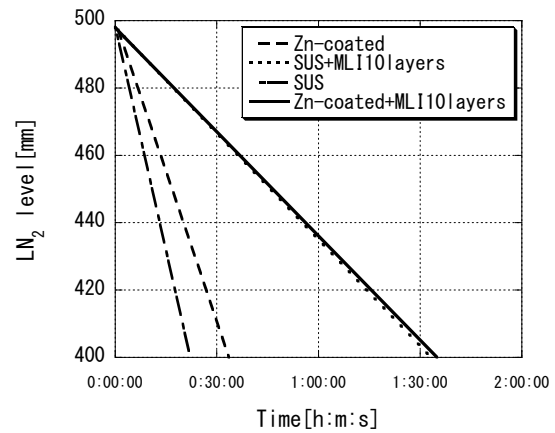


Fig.2 Evaporation time of LN2 on New Test Bench.

外管 (外径: 216.3mm)	内管 (外径: 60.5mm)	熱侵入量 [W]	熱侵入量 [W/m]
亜鉛メッキ鋼管	SUS管	3.30	1.12
	亜鉛メッキSUS管	2.14	0.72
	SUS管+MLI10層	0.86	0.22
	亜鉛メッキSUS管+MLI10層	0.78	0.20

Table.1 Heat leak measurement on New Test Bench.

# 粉粒体の気層搬送を利用した高勾配磁気分離システムにおける 粒子間相互作用評価

## Evaluation of Interaction between Particles for High Gradient Magnetic Separation of Pneumatic Conveyed Powder Products

千川浩平, 中井祐樹, 三島史人, 秋山庸子, 西嶋茂宏(阪大)

SENKAWA Kohei, NAKAI Yuki, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.)

E-mail: senkawa@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

食品・薬品・工業製品などの粉体製品製造ラインにおいて、金属磨耗粉などの強磁性不純物の混入が問題となっている。そこで、分離・回収技術としての乾式 HGMS (high gradient magnetic separation) 法について研究を行った。乾式 HGMS においては粉体の凝集及び沈着による磁気フィルタの閉塞の解消が最大の課題であったが、これまでの研究により、粉体の安息角を考慮したフィルタ設計を行うことで閉塞の低減に成功している[1]。本研究ではさらに根本的な閉塞の解消を狙い、新たな粉体の搬送形態として粉粒体気層搬送を利用した磁気分離法を用い、粒子間相互作用の観点から粒子の凝集を解消する方法について検討した。

### 2. 磁気分離実験

実験試料として、凝集性の異なる二種類の粉体試料を準備した。Sample A として高い凝集性を有するアルミナ微粒子 (平均粒子径  $5 \mu\text{m}$ ) に強磁性 SUS ビーズ (粒径  $35 \mu\text{m}$ , SUS304) を 0.1wt% の割合で混入させたもの、Sample B として比較的凝集性の低いシリカ微粒子 (平均粒子径  $20 \mu\text{m}$ ) に強磁性 SUS ビーズを混入させたものを用意した。

分離実験を行うために設計した粉粒体磁気分離装置を Fig. 1 に示す。本装置は流動層と磁気分離層からなる。流動層では、粉体試料及び流動媒質ペレットを圧縮空気により流動化させ、試料の分散性を向上させている。磁気分離層では、2.0 T の外部磁場中に SUS430 製磁気フィルタが設置されており、分散した試料がフィルタを通過する際に強磁性粒子のみが選択的に捕捉される構造となっている。

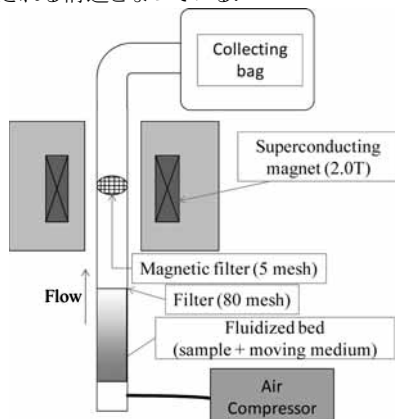


Fig. 1 A schematic diagram of magnetic separation apparatus using pneumatic conveying method.

本装置の磁気分離性能評価のために、高感度小型磁気天秤を用いて分離前後の試料の質量磁化測定を行い、不純物の分離率を求めた。凝集性の異なる Sample A, B いずれに対しても高い分離率を得ることができた。Sample A は 93%, Sample B が 100% であった。Sample A においてはアルミナ微粒子の凝集性が高いため、試料が流動層で十分に分散されず、凝集体として受けるドラッグ力が大きくなり、磁気フィルタに吸引されなかった可能性が考えられる。分散性を高めて分離

率を向上させるには、粒子間相互作用がどの程度働いているのかを把握し、それに応じて流速を制御する必要があると考え、AFM を用いて実験試料の粒子間相互作用を測定した。

### 3. 粒子間相互作用の評価

処理対象粒子の付着力を AFM コンタクトモードにより測定した。本研究では、コロイドプローブ AFM 法<sup>[2]</sup>を用いて、AFM カンチレバーチップに接着された粒子と、サンプルステージ上の導電性テープ上に表面が平坦になるように固定した粒子との間に働く力の変化を測定した。測定に用いた SUS 粒子を 1 個接着したカンチレバーの写真を Fig. 2 に示す。

Fig. 3 にフォースカーブの例を示す。付着力測定の結果、SUS-アルミナ間の付着力は  $23.7\text{nN}$  であり、SUS-シリカ間の付着力は  $9.71\text{nN}$  であった。これらの結果は、それぞれの粉体の凝集性と対応している。

### 4. まとめ

凝集性の異なる 2 種の粉体からの磁気分離実験による分離率の違いについて検討するため、AFM を用いて粒子間相互作用の評価を行った。その結果、粒子間の付着力は粉体の凝集性と対応しており、粒子に働く力を磁気力 > ドラッグ力 > 付着力とすることで凝集を解消し、分離率を高めることができると考えられる。今後はこれらの結果に基づいて、粉体の特性に応じた分離条件の設定を行っていく予定である。

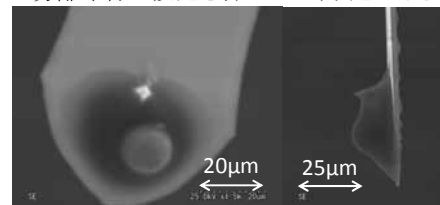


Fig. 2 SEM photograph of the cantilever tip attached SUS particle.

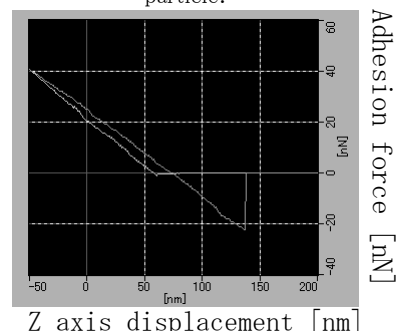


Fig. 3 Force curve graph of SUS-Alumina (humidity:56%)

### 参考文献

- [1] Y. Nakai, F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima "Development of High Gradient Magnetic Separation System under Dry Condition". Physica C In press.
- [2] M. Tanaka, M. Komaagata, M. Tsukada, and H. Kamiya, "Evaluation of the particle-particle interactions in a toner by colloid probe AFM." Powder Technology.

# 磁場中タンパク質結晶生成装置のハイスループット化

## High Throughput Protein Crystal Formation System using Magnetic Fields

和田 仁、廣田憲之、岡田秀彦、松本真治（物材機構）；清原元輔、大出孝博（清原光学）；  
田之倉 優、中村 颯、大塚 淳、澤野 頼子；（東大）；鈴木榮一郎、柏木立巳（味の素）；喜田昭子、沼本 修孝（京大）  
WADA Hitoshi, HIROTA Noriyuki, OKADA Hidehiko, MATSUMOTO Shinji (NIMS), KIYOHARA Motosuke, ODE Takahiro (Kiyohara  
Optics), TANOKURA Masaru, NAKAMURA Akira, OHTSUKA Jun SAWANO Yoriko (U.Tokyo),  
SUZUKI Ei-ichiro, KASHIWAGI Tatsuki (Ajinomoto), KITA Akiko, NUMOTO Nobutaka (Kyoto U)  
E-mail: WADA.Hitoshi@nims.go.jp

### 1. はじめに

タンパク質は薬品や触媒の開発に決定的な役割を果たす生体物質群であり、その研究は高齢化社会や地球環境に大きなインパクトを与える。タンパク質の精確な X 線構造解析には高品位な結晶が必要となるが、現状では高品位単結晶を効率的に得ることは困難であり、開発のボトルネックとなっている。本プロジェクトでは、強い磁場を用いて、高品位なタンパク質結晶を高効率に生成するシステムの開発を目的としている。

### 2. 研究プロジェクトの概要

X 線構造解析に使用するタンパク質結晶を高品位化する手段として、重力に起因する対流が抑制される微小重力環境が注目されている [1]。本研究では、高品位化とともに、システムのハイスループット化に重点を置き、Fig.1 に示したような「高効率・高品位タンパク質結晶生成システム」を開発する。このシステムは、以下の 3 要素から構成される。

#### ①高磁気力発生用超伝導マグネット

特殊な構造の超伝導マグネット。16T を発生する主コイル (NbTi+Nb<sub>3</sub>Sn) およびこれと逆向きの磁場を発生する副コイル (Nb<sub>3</sub>Sn) により高磁場と高磁場勾配を発生して重力を相殺し、反磁性体であるタンパク質結晶の磁気浮揚を可能にする。

#### ②光学プローブ

結晶化過程をマグネットの外から in-situ に観察できる 3 次元制御の光学系。タンパク質結晶を生成する場合、結晶の状態を確認するために、頻りに結晶化装置から取り出して観察しなければならない。本プローブは、結晶化過程で観察を中断することなく、磁場中で直接観察することを可能にする。

#### ③結晶化プレート

ハイスループットを実現するための結晶化プレート。多くの異なる条件で多数の結晶を一度に生成できるとともに、直接観察が可能な新しいデザインの結晶化プレートを開発する。

①によって高品位タンパク質結晶の生成が容易になり、②と③によって従来よりも効率の高いタンパク質結晶生成が可能となる。さらに、磁気力及び重力が作用する環境における流体の流れを計算機でシミュレートする [2]。これにより、タンパク質の結晶成長に適した磁場分布などの条件を調べて、システムの最適設計に反映させる。

### 3. プロジェクトの進捗状況

#### a) 高磁気力発生用超伝導マグネット

プロトタイプ超伝導マグネットを導入し、主としてタンパク質結晶生成に及ぼす磁気浮揚の効果を調べている。プロトタイプ機は磁気浮揚に関しては完成本機とほぼ同様の性能を有するが、新しい結晶化プレートと光学プローブの導入に必要な大きさのボア径を有していない。

#### b) 光学プローブ

非磁性材料などを選定し、観察系を 3 次元 (Y, Z,  $\theta$ ) コントロールできるプローブを作製した。今後、22 年度中に完成する本機と組み合わせて、調整等を行い、最適化する。

#### c) 結晶化プレート

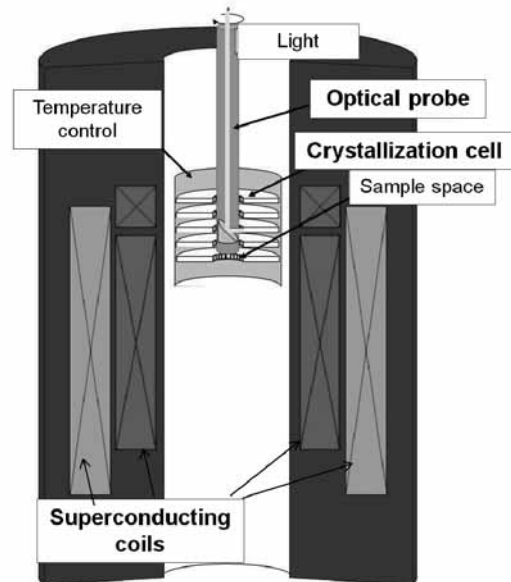


Fig.1 High throughput protein crystallization system.

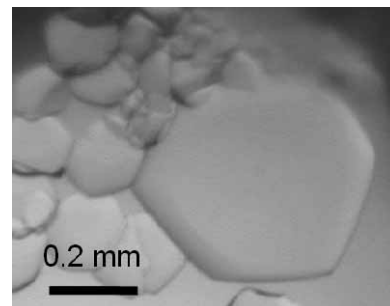


Fig.2 ( $V_1$ -ATPase) crystal.

代表的な結晶化法としては sitting drop 法および hanging drop 法が知られている。これらの手法に適した結晶化プレートをデザインし、作製している。

Fig.2 にはプロトタイプ機を用いて生成した、難結晶化タンパク質として知られる ( $V_1$ -ATPase) の結晶を示す。現在、結晶の品位、構造を解析中である。

シミュレーションからは、対流の制御には磁場以外の多くの因子が影響する可能性が予想される。

本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業機器開発プログラム 高効率・高品位タンパク質結晶生成システムの開発」の支援を受けて実施している。

#### 参考文献

1. E. Craig, et al.: Cryst. Growth. Des, Vol. 1 (2001) p.87
2. H. Okada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.169

# 13 K 冷凍機を用いた小型超伝導バルク磁石の高磁場化の検討

## Enhancement of the trapped field of a small superconducting bulk magnet using a 13 K refrigerator

横山 和哉(足利工大); 岡 徹雄(新潟大); 能登 宏七(岩手大)  
 YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.); NOTO Koshichi (Iwate Univ.)  
 E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

### 1. はじめに

超伝導バルク磁石(以下、バルク磁石と呼ぶ)は 2 T を超える大きな磁場を容易に発生することができ、磁気分離やモーター・発電機、薬剤搬送システム、マグネトロンスパッタリングなどの産業応用が検討されている。我々は発生磁場の拡大と装置の取り扱い易さを考慮した 2 段 GM 冷凍機を用いたバルク磁石装置を製作し、基礎的な着磁試験を行ってきた。これまでに  $\phi 60$  mm の  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  バルク体を用いてパルス着磁を行った結果、印加磁場 7.74 T においてバルク体表面で 2.76 T の捕捉磁場を達成した。

本文では捕捉磁場の向上を目指して、温度および印加磁場を変えた着磁実験の結果を報告する。

### 2. 実験

図 1 に 13 K 冷凍機を用いた小型バルク磁石装置の概略を示す。2 段式の GM サイクル冷凍機(RF273SA, アイシン精機製)を採用し、2nd ステージにおける最低到達温度は 13 K 以下、熱容量は 5 W@20 K となっている。入力 は 3 相 200 V、消費電力は 1.6 kW である。着磁方式をパルス着磁に限定したために磁極の小型化に成功し、装置の全長は 570 mm、磁極径は  $\phi 87$  mm となっている。

$\phi 60 \times 20$  mm の  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  バルク体を 2nd ステージに接続した銅ロッドの先端に取り付け、真空断熱したのち冷却した。これまでの実験結果を基に、温度および印加磁場を変えながら着磁を行った。なお、温度調整には温度コントローラ(TC-DB001, アイシン精機製)を用いた。磁場印加後のバルク表面の中心における捕捉磁場をホールセンサ(BHT-921, F.W.BELL 社製)で測定し、さらに磁極表面(バルク体表面から 4 mm)の磁場分布を三次元ホールセンサ(HGT-3030, LakeShore Cryotronics 社製)を用いて測定した。

着磁手順は、①高い温度にすることで  $J_c$  を下げて磁場を侵入しやすくし、さらに大きな磁場を印加することで磁束が進入経路(チャンネル)を作る。②徐々に弱い磁場を印加してチャンネルを埋めていく。③温度を下げて  $J_c$  を上げることで、磁場を膨らませることを考えた。

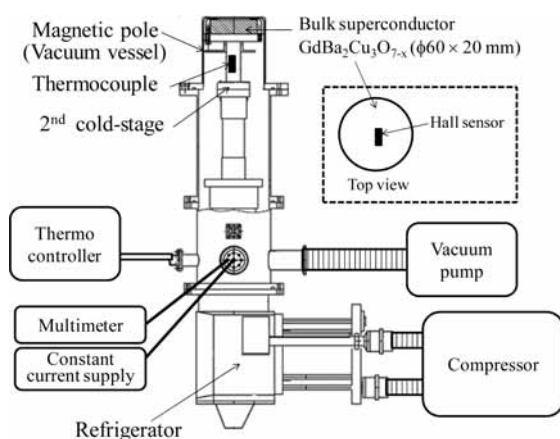


Fig. 1. Schematic of a small-size superconducting bulk magnet system using a 13 K refrigerator.

### 3. 結果および考察

図 2 に印加磁場と捕捉磁場の関係を示す。今回の実験では全 11 発目の磁場を印加している。ここで、□印で示す 1 から 6 発目までは 30 K、○印で示す 7 発目以降は 20 K に温度調節している。また、図 3 に 1, 3, 6, 11 発目の磁場印加後の磁極表面における磁場分布を示す。

図 3 において、1 発目の磁場印加では十分チャンネルができていないため、2 発目で大きな磁場を印加することとした。3 発目の磁場分布をみると第三象限に深いチャンネルができていくことが分かる。次に弱い磁場を印加することで、6 発目の分布ではチャンネルが埋まっている。さらに、温度を 20 K に下げることによって捕捉磁場が大きく向上し、最終的に 3.02 T を達成した。11 発目の磁場分布では中央部分に一部磁場の小さな部分があるが、ほぼ同心円状の分布となっている。

### 4. まとめ

13 K 冷凍機を用いた小型バルク磁石装置を用いて、これまでのデータに基づき温度および印加磁場の大きさを変えながらパルス着磁を行った。その結果  $\phi 60$  mm の大型高特性バルクにおいて 3.02 T の磁場を捕捉した。今後さらに大きな捕捉磁場を達成すべく、着磁方法を検討する予定である。

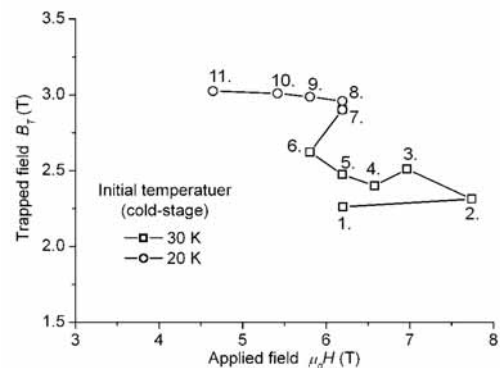


Fig. 2. The relationship between the applied field,  $\mu_0 H$ , and the trapped field,  $B_T$  in an advanced magnetization.

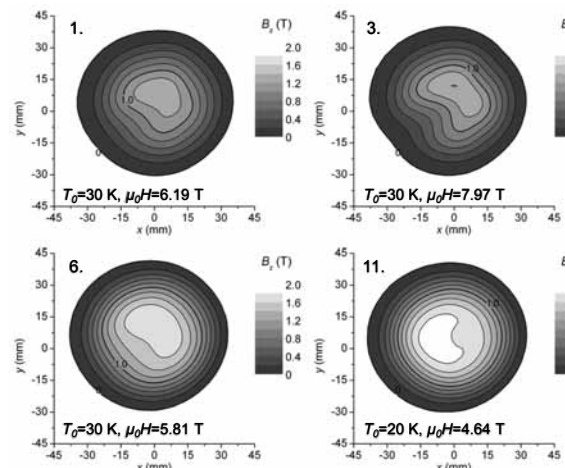


Fig. 3. Trapped field distributions on the magnetic pole surface after applying nos. 1, 3, 6 and 11 pulses.

# DC マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 薄膜の作製

## Fabrication of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ films by DC magnetron sputtering

吉村 卓哉、土井 俊哉、和泉 竹衛、白樂 善則(鹿児島大);  
松本 明善、北口 仁(NIMS)

YOSHIMURA Takuya, DOI Toshiya, IZUMI Takemori, HAKURAKU Yoshinori(Kagoshima University);  
MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi(NIMS)  
Email:k9565471@kadai.jp

### 1. はじめに

現在  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223)は Powder-in-tube 法を用いて作製した線材が実用化に向けて研究されているが、臨界電流密度( $J_c$ )は数万  $\text{A}/\text{cm}^2$ と低い値に留まっており、更なる特性向上が求められる。そこで我々は、DC マグネトロンスパッタリング法を用いて、 $\text{SrTiO}_3$ (STO)基板上に 2 軸配向した Bi2223 単相薄膜の作製を試みた。

### 2. 試料および実験方法

STO 基板上に DC マグネトロンスパッタリング装置を用いて Bi2223 薄膜を作製した。基板温度  $706^\circ\text{C}$ 、酸素分圧 0.33Torr に固定し、ターゲット組成を調整することで、薄膜の組成比を化学量論組成に近づけようと試みた。Bi2223 薄膜の配向性を確認するために  $\theta$ - $2\theta$  法による X 線回折(XRD)測定を行った。作製した薄膜試料の組成は硝酸水溶液に溶解した後、誘導結合プラズマ分光分析(ICP)装置により溶液組成を測定することで決定した。また、試料表面は走査電子顕微鏡(SEM)を用いて観察し、抵抗ゼロの臨界温度( $T_{c-zero}$ )は直流四端子法で測定した。

### 3. 結果と考察

Table1 に異なる組成のターゲットを用いて基板温度  $706^\circ\text{C}$ 、酸素分圧 0.33Torr の条件下で作製した薄膜の組成を示す。これより、ターゲット組成  $\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.0}\text{Cu}_{2.3}\text{O}_y$  において Bi:Sr:Ca:Cu=2.30:2.00:2.14:3.35 と Bi2223 の化学論組成に近い組成を持つ Bi2223 薄膜を作製できていることがわかる。Fig.1 に組成  $\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.0}\text{Cu}_{2.3}\text{O}_y$  のターゲットを用いて STO 基板上に作製した Bi2223 薄膜の XRD パターンを示す。観測されたピークはほぼ Bi2223 の(00 $l$ )のピークであり、Bi2223 が  $c$  軸配向していることがわかる。Fig.2 にこの Bi2223 薄膜の SEM による表面観察画像を示す。表面に析出物が確認できる。Fig.3 に同じ Bi2223 薄膜の抵抗率-温度依存性を示す。これより、今回作製した薄膜は超伝導転移はブロードではあるが、 $T_{c-zero}=72\text{K}$  であることがわかる。しかしながら、今回作製した Bi2223 薄膜の  $T_{c-zero}$  は Bi2223 が本来持つ  $T_{c-zero}=110\text{K}$  より大幅に低い値であった。

### 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 22246079 の助成を受けて実施されたものである。

Table1 Compositions of targets and Bi2223 films.

Composition of target	Bi	Sr	Ca	Cu
$\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.0}\text{Cu}_{2.3}\text{O}_y$	2.04	2.00	2.99	3.38
$\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{2.1}\text{O}_y$	1.68	2.00	3.34	3.18
$\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.0}\text{Cu}_{2.3}\text{O}_y$	2.30	2.00	2.14	3.35
$\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.0}\text{Cu}_{2.1}\text{O}_y$	2.15	2.00	2.06	2.71
$\text{Bi}_{2.1}\text{Pb}_{1.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{1.5}\text{Cu}_{2.1}\text{O}_y$	1.97	2.00	1.54	2.56

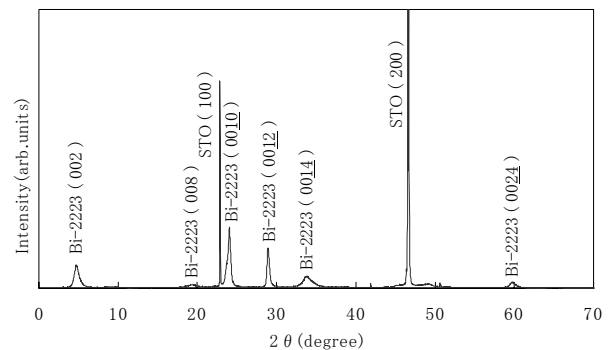


Fig.1 X-ray diffraction pattern of the Bi2223 film.

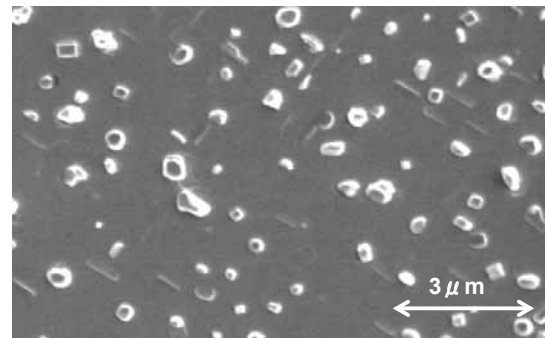


Fig.2 SEM micrograph of the surface of the Bi2223 film.

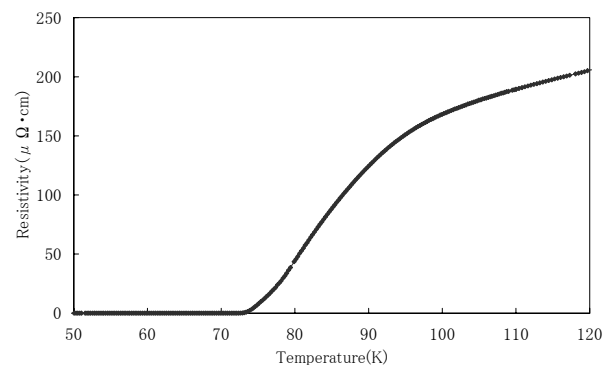


Fig.3 Temperature dependence of the resistivity of the Bi2223 film.

# 新低交流損失 Bi-2223 超電導線の開発(1) — 中央絶縁層による結合時定数の低減効果 —

Development of new Bi-2223 superconducting wires with low AC loss (1)  
— Reduction in coupling time constant by a central insulation layer —

川崎 基弘, 野上 広司, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九大);  
綾井 直樹, 小林 慎一, 菊地 昌志, 林 和彦(住友電工)

Motohiro Kawasaki, Koji Nogami, Masataka Iwakuma, Kazuo Funaki (Kyushu Univ. );  
Naoki Ayai, Shin-ich Kobayashi, Masashi Kikuchi, Kazuhiko Hayashi (Sumitomo Electric Industries)  
E-mail: kawasaki@sc.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々のグループでは、超電導線における交流損失の低減による超伝導設備の軽量化を巻線構造や冷却システムの最適化などを通して評価し、特に、鉄道車両用主変圧器や各種の電力機器の Bi-2223 系超電導線による超電導化の可能性について検討してきた。このような超伝導設備の実用化の前提となる交流損失の低減法を明らかにするために、これまでに、ツイストを施した銀シース Bi-2223 多芯テープ線に対して、ツイストによるヒステリシス損失や結合損失の低減効果について系統的な検討を行ってきた[1]。

今回は、従来の銀シース Bi-2223 多芯テープ線において、内層のフィラメント部に絶縁層を配置した新しい構造の線材を設計・製作し、この中央絶縁層を導入した線材の交流損失特性を測定したので、その結果を報告する。また、従来の試作線と比較することにより、この絶縁層による結合損失の低減効果を議論する。

## 2. 線材諸元と測定方法

結合損失低減のために中央絶縁層を導入した線材 (XM453A) を試作した。主な諸元を、前回の試作線材 (AC74-A, AC74-C, AC88-C)[1]と合わせて Table 1 に示す。

試作した低交流損失線材の垂直磁界損失を、鞍型ピックアップコイル法により液体窒素中で測定した。従来と同じく積層枚数を 6 とし、周波数は 0.1~60Hz の範囲、磁界振幅は 0.25T までの領域で損失測定を行っている。

## 3. 測定結果と考察

XM453A の垂直磁界損失特性を Fig. 1 に示す。大磁界振幅領域における交流損失の周波数依存性はフィラメント間の結合損失によるものと考えられる。

交流損失の周波数依存性からテープ状多芯線の結合時定数を算出した[1]。その結果を Table 1 に示す。各線材共に、アスペクト比はほぼ等しいので、通常が多芯構造の場合には、結合時定数  $\tau_{c,rec}$  はツイストピッチ  $L_p$  の 2 乗に比例すると考えられる。AC74-A を基準とした結合時定数比 A とツイストピッチの 2 乗比 B を比較すると、従来構造の線材では両者はほぼ一致しているが、XM453A については、 $A/B = 1/23$  となり、結合時定数が極端に小さく観測されている。これは、中央絶縁層によりフィラメント間の結合が抑制されたことによるものと思われる。

Table.1 Parameters of Bi-2223 multifilamentary tapes

パラメータ/線材名	AC74-A	AC74-C	AC88-C	XM453A
線材幅[mm]	2.39	2.32	2.2	2.03
線材厚さ[mm]	0.183	0.182	0.17	0.203
アスペクト比	13.06	12.75	12.94	10
超電導比	0.26	0.26	0.27	0.16
$L_p$ [mm]	8.5	5.2	3.2	14
$\tau_{c,rec}$ [s]	2.31E-03	8.11E-04	3.94E-04	2.68E-04
$\tau_{c,rec}$ 比	1.00	0.35	0.17	0.12
$L_p^2$ 比	1.00	0.37	0.14	2.71

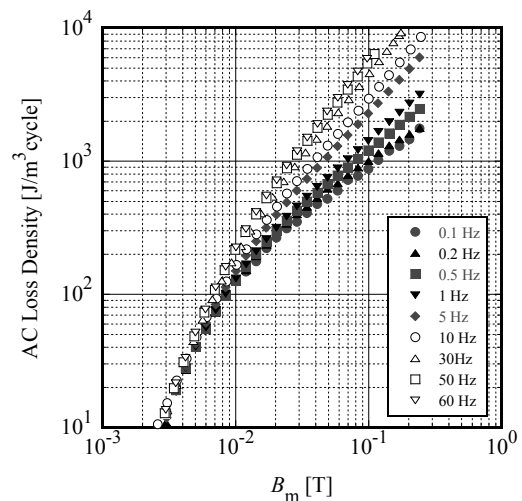


Fig.1 Field amplitude dependence of AC losses (XM453A)

## 参考文献

- [1] 野上他:「低損失型 Bi-2223 超伝導多芯テープ線材のツイスト効果の評価」平成 21 年度電気関係学会九州支部連合大会 06-1P-16

## メートル級 Bi2223 バリア線材の作製と均質性評価

## Fabrication and longitudinal uniformity of 1m-long Bi2223 tapes with resistive barriers

牧原 知秀, 稲田 亮史, 太田 昭男 (豊橋技科大); 李 成山, 張 平祥 (西北有色金属研究院)  
 MAKIHARA Tomohide, INADA Ryoji, OOTA Akio (TUT); LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)  
 E-mail: t-makihara@super.eee.tut.ac.jp

## 1. はじめに

我々は, Bi2223 高温超電導線材の交流損失低減に向けて, 超電導フィラメント間に高抵抗材を導入した低損失線材 (バリア線材) の開発を進めている<sup>[1,2]</sup>. バリア線材は構造が極めて複雑であるため, 良好かつ均質な通電特性を有する長尺線材を作製することは容易ではない. このため, 線材長に渡る均質性を高分解能で非破壊的に評価することが, バリア線材の通電特性および均一性向上に向けて強く望まれる. 本研究では, 1 m 程度の線材長を有するバリア線材を作製し, 臨界電流密度  $J_c$  の線材長手方向分布および走査ホール素子磁気顕微鏡 (Scanning Hall-probe Microscopy, SHM)<sup>[3]</sup>による通電自己磁界分布を測定し, バリア線材の均質性評価を行った.

## 2. 実験方法

Powder-in-tube 法により SrZrO<sub>3</sub> (Bi2212 を 15wt% 混合) をバリア材とする 19 芯線材を作製した. 最終的に得られた線材の断面寸法は幅 3.7 mm, 厚さ 0.23 mm であった. 最初に, 線材の臨界電流密度  $J_c$  (77 K, 自己磁界下) を線材長手方向において 10mm 間隔で行った. 測定結果に基づいて選択した特定区間において, SHM により通電自己磁界分布を測定した. SHM は試料面上で 2 次的にホール素子を走査させながら磁界測定を行い, 試料面上の磁界分布をマッピングする<sup>[3]</sup>. 使用したホール素子の感磁面積は 50 $\mu$ m $\times$ 50 $\mu$ m, リフトオフは約 0.5mm で, 試料面に対して法線方向の磁界成分を検出する. ゼロ磁界下で試料を 77K に冷却し, 0~ $I_c$  の直流電流を通電したときの自己磁界分布を, 線材長手方向・幅方向共に 0.2mm 間隔で測定した.

## 3. 結果・考察

Fig. 1 にバリア線材 (非ツイスト) の線材長手方向における 77 K, 自己磁界下での  $J_c$  分布を示す.  $J_c$  の平均値は 21.2 kA/cm<sup>2</sup> であり, 標準偏差が 7% 以下の均一性を有するメートル級のバリア線材を作製することができた.

SHM による自己磁界分布測定は, 高  $J_c$  区間として  $x = 240$ -280mm, 低  $J_c$  区間として  $x = 710$ -750mm の各 40mm 長の区間に対して実施した. 両区間でモニターした臨界電流  $I_c$  に対して 50% の直流電流  $I$  を通電したときの自己磁界  $B_z$  の分布を Fig. 2 に示す. 図において,  $x$  方向は線材長手方向,  $y$  方向は線材幅方向に各々対応し, 破線は線材位置である. 高  $I_c$  区間 (Fig. 2(a)) では長手方向にほぼ均一な磁界分布になっているが, 低  $I_c$  区間 (Fig. 2(b)) では  $x = 730$ -740mm において僅かに磁界分布が乱れている.

より詳細に考察するために, Fig. 2 の結果から算出した  $y$  方向差分  $dB_z/dy$  の 2 次元分布を Fig. 3 に示す.  $dB_z/dy$  は, 観測点において線材長手方向に流れるシート電流の大きさと強い相関がある. 高  $I_c$  区間 (Fig. 3(a)) では,  $dB_z/dy$  は線材長手方向にほぼ一様な分布を示しており, 測定範囲内に電流輸送を大きく阻害する箇所が存在しないことが分かる. また, 線材幅方向においては, 端部と比較して中心部の  $dB_z/dy$  は低く,  $0.5I_c$  では中心部にはほとんど電流は流れていないことが示唆される. この傾向はバリアを導入していない通常の多芯線材と同様である. 一方, 低  $I_c$  区間 (Fig. 3(b)) では, 測定区間内において  $I_c$  の最も低い  $x = 730$ -740mm において  $dB_z/dy$  の分布が乱れている箇所が断続的に確認された. この部位では, 圧延加工時に発生した線材内の構造の乱れ等により通電特性 ( $J_c$ ) が断続的に低下しており, これらの特性低下領域において電流輸送領域 (自己磁界侵入領域) がより内層のフィラメントに進展していることが示唆される.

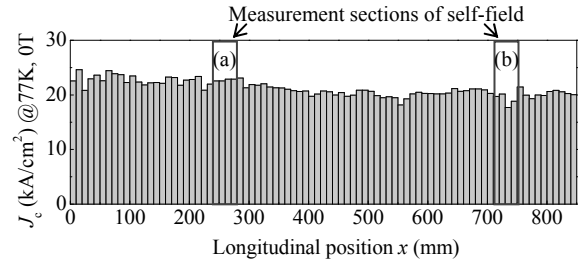


Fig. 1. Distribution of critical current density  $J_c$  at 77K and self-field for Bi2223 tape with interfilamentary barriers.

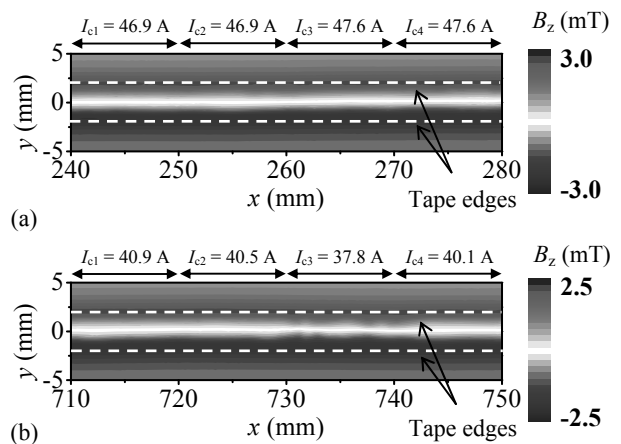


Fig. 2. Contour maps for self-field  $B_z$  on barrier tape at (a)  $x = 240$ -280 mm with high  $I_c$  ( $= 47$  A) and (b)  $x = 710$ -750 mm with low  $I_c$  ( $= 38$  A).

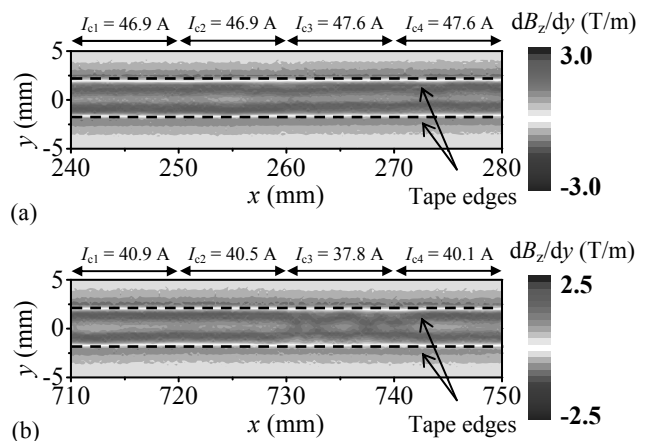


Fig. 3. Contour maps for differentials of self-field  $dB_z/dy$  on barrier tape at (a)  $x = 240$ -280 mm with high  $I_c$  ( $= 47$  A) and (b)  $x = 710$ -750 mm with low  $I_c$  ( $= 38$  A).

## 謝辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金 (No. 20686020, No. 22560270), (財)矢崎科学技術振興記念財団奨励研究助成および(財)大幸財団学術研究助成の支援により実施した.

## 参考文献

- [1] R. Inada, et al.: Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 085014.
- [2] R. Inada, et al.: Adv. Sci. Technol. **75** (2010) 181.
- [3] A. Oota, et al.: Rev. Sci. Instrum. **70** (1999) 184-186.

# Bi2223 バリア線材の交流垂直磁界下でのフィラメント間結合特性の評価 Interfilamentary coupling properties of Bi2223 tapes with interfilamentary resistive barriers in AC perpendicular magnetic field

稲田 亮史, 奥村 康裕, 太田 昭男 (豊橋技科大); 李 成山, 張 平祥 (西北有色金属研究院)  
INADA Ryoji, OKUMURA Yasuhiro, OOTA Akio (TUT); LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)  
E-mail: inada@ce.tut.ac.jp

## 1. はじめに

我々は、超電導フィラメント間に酸化物バリアを導入した低損失 Bi2223 線材の開発に関する研究を進めている<sup>[1],[2]</sup>。これまでに、SrZrO<sub>3</sub>バリアを導入し、バリアの導入厚、線幅およびツイスト長を制御することで、臨界電流密度  $J_c > 10^4$  A/cm<sup>2</sup> (77 K, 自己磁界下) を維持した上で、線材面に垂直な横磁界下での結合周波数  $f_c$  ( $= 1/2\pi\tau_c$ ,  $\tau_c$ : 結合時定数) を 250 Hz 以上に向上できることを示した<sup>[2]</sup>。これに伴い、同一寸法でフィラメント同士が完全に電磁結合した線材と比較して、商用周波数域で 40–50% 程度の垂直磁界損失の低減を確認した。一方で、本バリア線材の損失発生要因を把握することは、今後更なる低損失化を図る上で重要である。本研究では、 $f_c > 250$  Hz を有するバリア線材について、垂直磁界下での交流損失特性を系統的に評価した。実験結果に基づいて、フィラメント間結合特性および商用周波数域での損失低減の阻害因子を考察した。

## 2. 実験方法

Powder-in-tube 法で作製した Bi2223 バリア線材 (ツイスト長  $L_t = 4$  mm) を試料として用いた<sup>[1],[2]</sup>。バリア材には SrZrO<sub>3</sub> (加工性改善のため Bi2212 を少量混合) を使用した。本線材の横断面寸法は 2.7 mm × 0.23 mm, フィラメント占積率は 23% 程度, 直流四端子法にて評価した臨界電流密度  $J_c$  は  $1.25 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> (77 K, 自己磁界下) である。交流損失  $Q_m$  は 77 K, 線材面に垂直な交流磁界下にてピックアップコイル法により測定した。

## 3. 結果・考察

低磁界振幅下での損失の周波数依存性より、本線材の結合周波数  $f_c$  は 260 Hz (結合時定数  $\tau_c = 0.6$  ms) と見積もられた<sup>[2]</sup>。Fig. 1 に損失ファクタ  $q_m$  ( $= \mu_0 Q_m / 2B_0^2 S_{\text{tape}}$ ,  $S_{\text{tape}}$ : 線材横断面積) の磁界振幅 ( $B_0$ ) 依存性を示す。 $q_m$  が極大を示す磁界振幅  $B_{\text{max}}$  は、運転条件下における線材の中心到達磁界  $B_p$  にほぼ一致することが知られている。図より  $B_{\text{max}}$  は 105 Hz 以下では周波数  $f_{\text{op}}$  によらずほぼ一定であり、フィラメントが結合した場合 (実線) と比較して、70% 程度低磁界側にシフトしている。これより、測定損失中に含まれるヒステリシス損失  $Q_h$  は、少なくとも 105 Hz 以下では  $f_{\text{op}}$  に依存せずほぼ一定であることが示唆される。一方、 $q_m$  の絶対値は  $f_{\text{op}}$  と共に単調に増加している。測定条件下では、シース中で発生する渦電流損失  $Q_c$  は  $Q_m$  に対して極めて小さく、Fig. 1 に示す周波数増に伴う損失増加は、主に結合損失  $Q_c$  に起因すると推測される。

以上を考慮して、固定磁界振幅下において測定した損失の周波数依存性 (Fig. 2) に対して、以下の式をフィッティングし  $Q_h$  と  $Q_c$  の分離を試みた ( $\omega = 2\pi f_{\text{op}}$ ,  $q_c$ : 定数)。

$$Q_m = Q_h + Q_c = Q_h + q_c \frac{\omega\tau_c}{1 + (\omega\tau_c)^2} \quad (1)$$

Fig. 3 に 45 Hz における各損失成分の比較を示す。 $B_0 > 10$  mT において、 $Q_h$  は  $B_0^1$  に比例して増大し、結合時 (実線) と比較して 70–80% と大きく低減されている。一方、 $Q_c$  は  $B_0^2$  に比例して増大している。 $B_0 \sim 30$  mT において両者のクロスオーバーが生じ、結果として  $Q_m$  は  $Q_h$  の 2 倍以上に増加している。以上より、 $Q_c$  の寄与が本線材の 50 Hz 近傍での損失低減を制限していることが確認された。

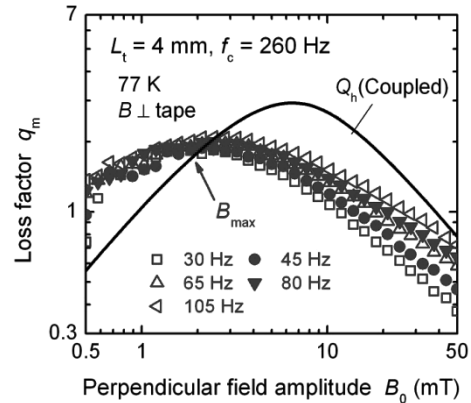


Fig. 1. Normalized loss factor  $q_m = \mu_0 Q_m / 2B_0^2 S_{\text{tape}}$  for twisted barrier tape at different operating frequencies  $f_{\text{op}}$ .

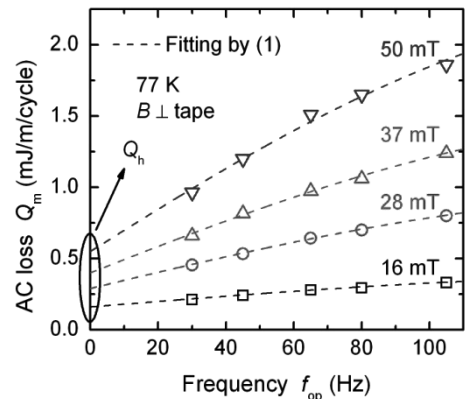


Fig. 2. Fitting results for frequency dependence of losses  $Q_m$  for twisted barrier tape by (1) at different field amplitudes  $B_0$ .

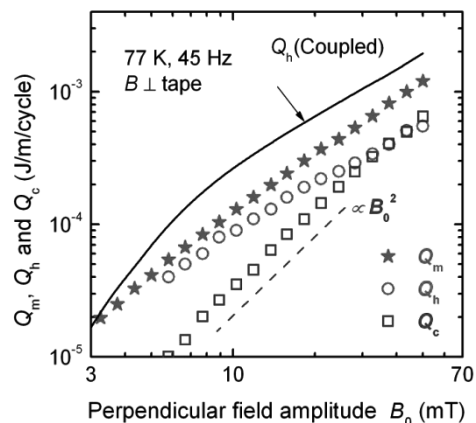


Fig. 3. Comparison between hysteresis loss  $Q_h$ , coupling loss  $Q_c$  and total loss  $Q_m$  at 77 K and 45 Hz for twisted barrier tape.

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (No. 20686020, No. 22560270) および(財)大幸財団学術研究助成の支援により実施された。

## 参考文献

- [1] R. Inada, et al.: *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 085014.
- [2] R. Inada, et al.: *Adv. Sci. Technol.* **75** (2010) 181.



# Bi-2223 の Sr と Ca の置換効果による $T_c$ の変化

## Changing of $T_c$ by substitutional effect of Ca for Sr of Bi-2223

森 友祐、池田 博(筑波大)

MORI Yusuke, IKEDA Hiroshi (University of Tsukuba)

E-Mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

### 1. はじめに

Bi-2223 は 110K[1]の超伝導転移温度(以下  $T_c$ )を持つ Bi 系銅酸化物高温超伝導体として知られている。一方 Bi-2223 と似た結晶構造を持ち  $T_c$  が 125K の Tl-2223 という物質がある。Bi-2223 は斜方晶、Tl-2223 は正方晶など結晶構造に違いがある。我々はこの結晶構造の違いから Bi-2223 を Tl-2223 に近づけることにより  $T_c$  が向上するのではと考えた。実際過去に我々の研究室で Ca サイトにおいて元素置換が行われた研究によるとイオン半径の大きさに依らず  $T_c$  が減少することがわかっている。一方 Sr サイトでは元素置換による  $T_c$  の影響については調べられていない。そこで今回 Sr の一部をイオン半径が異なり、同じアルカリ土類金属である Ca、Ba(Ca<Sr<Ba)にそれぞれ置きかえることで  $T_c$  にどのような変化が見られるか超伝導特性により調べた。

### 2. 実験方法

原粉量 99.99%以上の粉末  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{PbO}$ 、 $\text{SrCO}_3$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CuO}$ 、を  $\text{Bi}_{1.84}\text{Pb}_{0.34}\text{Sr}_{1.91-x}\text{Ca}_x\text{Ca}_{2.03}\text{Cu}_{3.06}\text{O}_y$ (以下 Sr→Ca)という Sr の一部を Ca に置き換えたモル比で秤量し、 $x$  を 0 から 0.06 まで変化させ計 5 つの組成で試料作製した。焼成は空气中で 780°C12 時間焼成を行った。その後アルゴン、酸素雰囲気中で 866°C60 時間の一次焼成、868°C60 時間の二次焼成を行った。得られた試料は X 線回折装置から試料の同定を行い、 $T_c$  を求めるため MPMS 装置を用いて、磁化特性を調べた。

### 3. 実験結果

Fig.1 は Sr→Ca の試料において粉末 X 線回折測定により得られたデータである。4.5° の点で(002)面にピークを持つことからどの組成においても Bi-2223 単相を持つことがわかる。Fig.2 は一次焼成、二次焼成後の磁化特性から磁化が-0.025(emu/g)となる点を基準とし、酸素量は一定であると仮定して求めた  $T_c$  の振る舞いを示したものである。二次焼成について着目すると、 $x=0.02$  の組成で最大の  $T_c$  を持ち 0.5K 程度  $T_c$  は上昇していることがわかった。さらに  $x$  を 0.02 より大きくすると徐々に減少する傾向にある。そしてこのような  $T_c$  の振る舞いが X 線において 25° から 30° の範囲において拡大した図の示すピークのずれが  $T_c$  の変化に対応していると思われる。これらの結果と過去に行われた Ca サイトの一部を La、Gd で置換

した実験結果と比較を行った。その結果 Ca サイトにおいてはイオン半径の大きさに依らず  $T_c$  が減少する[2]のに対し、Sr サイトにおいては Fig.2 のような振る舞いではあるが、 $T_c$  が上昇する傾向があることがわかった。この結果を踏まえ、Sr→Ca の置換を行ったことでなぜ X 線のピークのずれと  $T_c$  の振る舞いが一致する傾向が生じたか、また Sr サイトで他の元素を置換した場合についても明らかにする必要がある。当日は Sr の一部を Ba に置き換え実験したものについても合わせて報告する予定である。

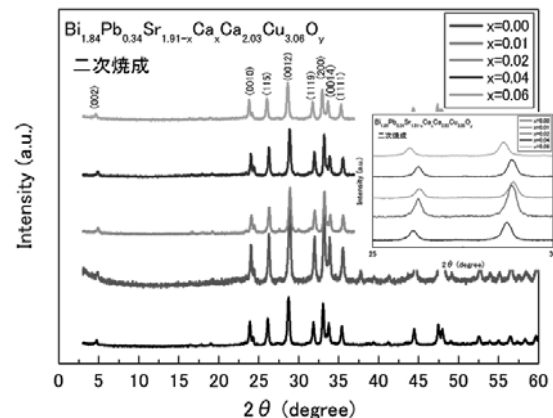


Fig.1 Powder X-ray diffraction patterns for samples with  $x$  in the present

$\text{Bi}_{1.84}\text{Pb}_{0.34}\text{Sr}_{1.91-x}\text{Ca}_x\text{Ca}_{2.03}\text{Cu}_{3.06}\text{O}_y$  system.

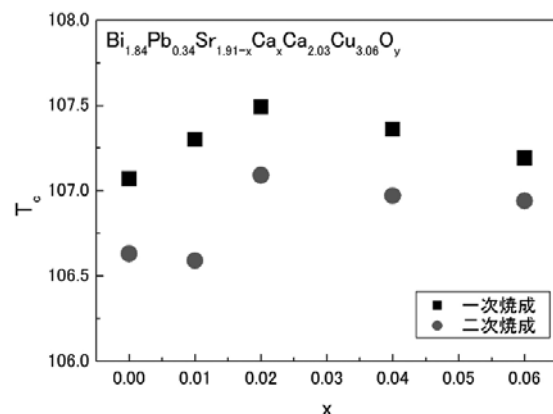


Fig.2  $x$  dependence of  $T_c$  obtained from magnetization characteristic.

### 参考文献

- [1]V. F. Shamray, et al.:Crystallography Reports Vol.54 No.4 (2009) p.584-590
- [2]R. Yoshizaki, et al.: Advances in Superconductivity vol.3, (1991) p.483-486

# 鉄心中における高温超伝導線材の交流損失特性

## AC loss characteristics of HTS tape in iron

二口 達壮, 前川 達也, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学);  
中村 武恒(京都大学);長村 光造(応用科学研究)

FUTAKUCHI Tatsumori, MAEKAWA Tatsuya, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo,  
SATO Takao(Niigata Univ.);NAKAMURA Taketsune(Kyoto Univ);OSAMURA Kozo(RIAS)  
E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

全超伝導モータを開発する上でモータの運転効率に直結する超伝導部分の交流損失を評価することは非常に重要である。この場合、超伝導線材は金属中に埋め込まれていることが想定されこのときの損失特性を評価する必要がある。このような背景から、本研究では変圧器用の鉄心中における超伝導線材の交流損失の特性について実験により評価を行った。一般的に超伝導の交流損失を評価する場合、四端子法と磁化法により測定されることがほとんどであるが、本研究では鉄心中における交流損失評価であるため電氣的測定法による測定は不可能である。このため、本研究では交流損失により生じる温度上昇から損失を導出する熱的測定法により損失評価を行った。

### 2. 実験内容

金属中における高温超伝導線材の交流損失を評価するため、図1に示すように口の字型の変圧器用の鉄心に直径10mmの穴を開け、この中で交流損失測定を行った。測定に用いた高温超伝導線材は幅2.8mm、臨界電流値が75.3AのBi2223/Ag線材を使用し、この線材表面に絶縁した熱伝対を配置し発泡スチロール内に埋め込んで断熱を施し温度上昇を測定した。磁界は通電電流と同位相の磁界を印加しており、マグネット電流が約3Aのときに磁気飽和するように設計している。

### 3. 測定結果

図2にマグネット電流を通电していない条件における通電損失の周波数特性を示す。縦軸に1サイクル・単位長さあたりの通電損失を示し、横軸に線材の交流電流の波高値を示している。●に鉄心の外で測定した損失値、実線に Norris の楕円モデルから導出した損失値を示す。鉄心中における通電損失は、鉄心がない条件に比べ非常に大きな値を示していることがわかる。また、周波数特性は一致していることから損失はヒステリシス的に生じていることがわかる。この結果より、周囲に金属があることにより自己磁界の侵入過程が変わりこれにより損失が著しく増大したものと見える。

図3にマグネット電流のみを通电したときの線材に生じる磁化損失を示す。この結果より、約3Aの以上で損失が生じ漏れ磁界により磁化損失が生じていることがわかる。図4に鉄心に1~8Aの交流電流を行い、超伝導線材に通电したときの損失を示す。あらかじめ測定した空洞中の漏れ磁界をマグネット電

流の横に記載している。図より磁界が生じた場合、非常に大きな損失が生じることが示されている。

鉄心中における高温超伝導線材の損失は鉄心の配置により非常に増大する可能性を秘めている。これは、磁束の侵入過程が鉄心により影響を受けるためであり、鉄心の配置、距離により大きく影響を受ける。磁化損失に関してはモータで使用する場合は漏れ磁界が生じる設計はなされないが、仮に超伝導線材に局所的な磁界が加わることで非常に大きな損失となることを留意する必要がある。

### 謝辞

本研究は、省エネルギー革新技術開発事業「冷凍機一体型高温超電導誘導同期駆動システムの研究開発」の一環として、NEDOの委託のもとで実施したものである。

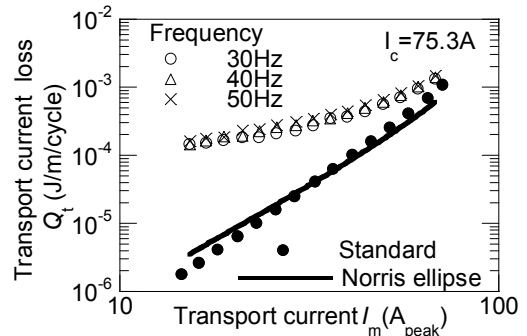


Fig.2 AC transport current loss in iron

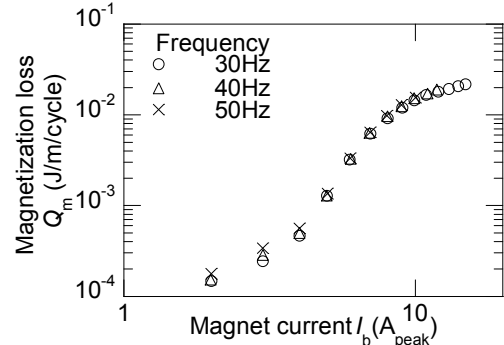


Fig.3 AC magnetization loss in iron core

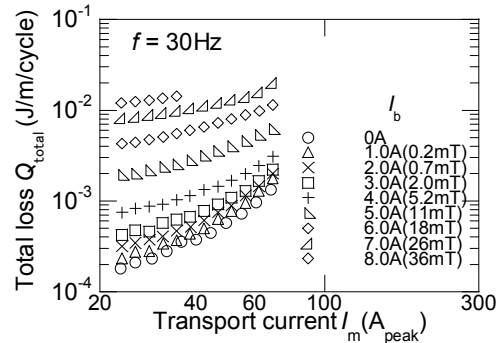


Fig.4 Total loss in iron core

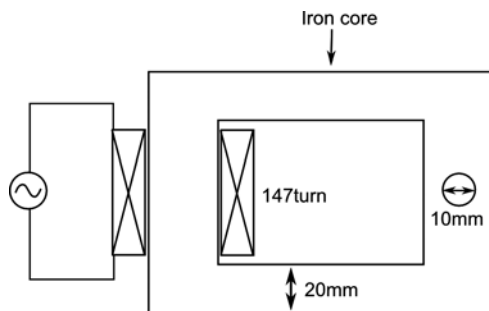


Fig.1 Arrangement of measurement system

# 交流通電・交流磁界の電磁条件における直流通電バイアスが高温超伝導の損失特性に及ぼす影響

Influence of DC offset transport current on AC loss characteristics in HTS tapes

小島 裕史, 柴山 誠, 江川 暢康, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学)

KOJIMA Hirofumi, SHIBAYAMA Makoto, EGAWA Masayasu,  
OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao(Niigata Univ.)

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

## 1. はじめに

超伝導 SMES や超伝導モーターの内部では直流条件に交流成分が重畳している直流・交流混合条件における損失特性の把握が必要となる。現在まで、様々な研究機関において交流外部磁界、交流通電による交流損失特性の研究が積極的に行われているが、直流・交流混合条件における損失評価は行われていない。そこで、本研究は直流・交流混合電磁条件として直流・交流通電電流と交流磁界を組み合わせた条件における損失評価を実験により評価を行った。直流磁界による損失の影響は臨界電流値の変化による影響から推測することが可能であるため、本研究では直流のオフセット電流が損失特性に及ぼす影響について評価を行った。損失特性評価を行うのにあたり、比較的簡便に測定可能な電気的測定法の検証を行うため、熱的測定法により同区間同時に測定を行い電気的測定法の妥当性を確認してから評価を行った。

## 2. 実験内容

直流・交流混合条件における通電電流と外部磁界の波形を図1に示す。通電電流と外部磁界の波高値をそれぞれ  $I_m, B_m$  とし、また通電電流と外部磁界の大きさをそれぞれ  $I_{offset}, B_{offset}$  とする。本実験では交流通電電流と交流磁界は周波数が 60.4Hz, 位相は同位相としている。図2に示すように、臨界電流値 56.7A の Bi2223/Ag 線材面に対して垂直に交流磁界を印加し、これと同時にバイポーラ電源により直流・交流通電を行った。直流・交流混合電磁条件における損失評価方法は、電気的測定法では、スパイラル電圧リードループを用いた四端子法とピックアップコイルを使用した磁化法により評価を行った。また、熱的測定法により評価を行うため、線材に断熱を施しこの中央部分の線材表面温度を熱伝対により測定を行った。

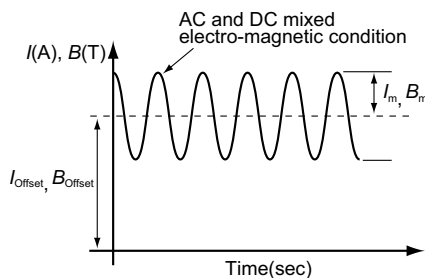


Fig.1 The waveform of the transport current and external magnetic field in an AC and DC mixed electro-magnetic condition.

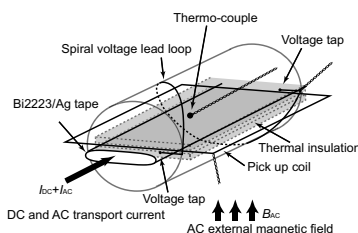


Fig.2 Schematic of the experimental set-up for loss measurements using the electric and calorimetric method

## 3. 測定結果

図3に直流通電電流  $I_{offset}$  を 30A, 交流通電電流の波高値  $I_m$  を 30A 通電している条件で、交流磁界を印加した時の超伝導線材内に生じる損失の内訳を示す。この図は横軸に交流外部磁界の波高値  $B_m$ , 縦軸に一サイクル単位長さあたりの損失  $Q$  を示す。直流通電電流による損失を動的抵抗損失  $Q_{dyn}$ , 交流通電電流による損失を通電損失  $Q_t$ , 交流外部磁界による損失を  $Q_m$ , これらの総和を  $Q_{total}$  としている。図より、それぞれの損失は交流磁界の増加に伴い損失が増加していることがわかる。特に  $Q_{dyn}$  は 0.005T 付近から急激に損失が増大している。これに対し、交流通電により生じる  $Q_t$  は低磁界領域では一定の値を示しており、磁界の増加に伴い増加する。

図4に交流磁界を印加している条件で通電電流の波高値  $I_m=20A$  と固定し、直流通電電流  $I_{offset}$  を変化させた時の損失  $Q_{total}$  特性を示す。図より、直流通電電流が 20A 以下の時には交流・直流通電電流の影響を受けず、ほぼ磁化損失により損失が決定される。これに対し、30A 以上では損失特性は磁化損失の特性から大きく乖離する。これは、直流・交流通電電流により超伝導内部の電流が飽和している状態で交流磁界を印加したためであると予想される。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22760205)により実施した。

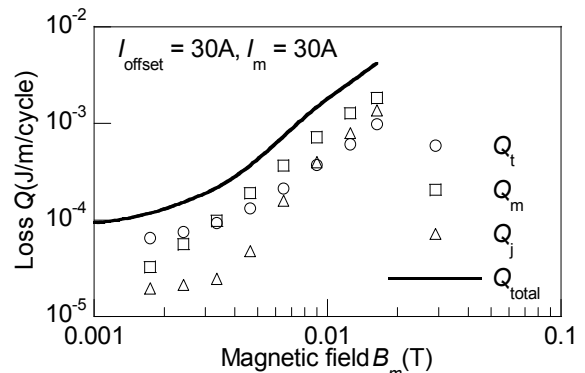


Fig.3 Loss component in AC and DC mixed electro-magnetic conditions ( $I_{offset} = 30A, I_m = 30A$ )

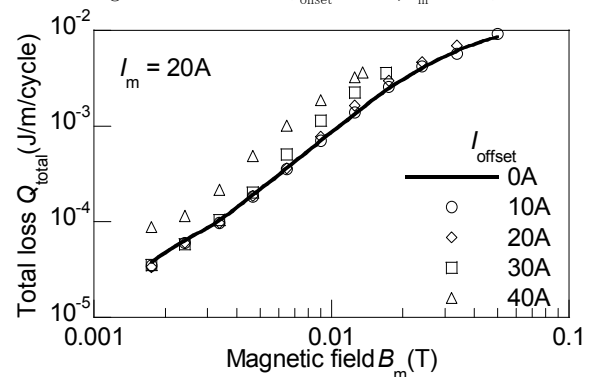


Fig.4 Loss characteristics with DC and AC transport current in AC magnetic field

# 積層した超電導 GdBCO コート線材における交流損失の評価 Evaluation of AC loss in stacked GdBCO coated conductors

谷川 潤弥, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大)

岡元 洋 (九州電力); 齊藤 隆 (フジクラ); 和泉 輝郎 (超電導工学研究所)

TANIGAWA Junya, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech)

OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power); SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); IZUMI Teruo (SRL)

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

## 1 はじめに

近年、高温超電導テープを用いた電力機器などの研究開発がすすめられている。この場合、交流条件下で生じる損失が大きな問題となる。超電導コート線材では超電導層の厚さに比べて幅が非常に広く、従来の円柱形線材等とは異なる損失特性を示す。これらの損失は交流機器の性能に大きく影響するため、正確に把握しておく必要がある。また、交流損失は複合するときのテープの配置等によって変化するため、ここでは3枚の種類の違う  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  コート線材において、SQUID 磁力計を用いてテープ面に垂直に磁界を印加したときの配置の違いによる磁化損失の違いを評価する。

## 2 実験

本研究で使用した試料はフジクラにより作製された GdBCO コート線材で、試料諸元を Table 1 に示す。線材から 5.0 mm × 2.3 mm 程度の試料を切り出しており、試料 #1 だけ超電導層が厚く、他の試料 #2a, #2b は同じ線材から切り出したものである。1枚の場合と3枚の場合について、SQUID 磁力計を用いてテープ面に垂直に磁界を印加したときの磁化のヒステリシスを測定した。また、線材の厚さ方向に3枚重ねて積層した時のテープの配置による影響を調べた。交流磁界振幅  $B_m$  を 1.5 mT - 7 T と変化させ、それぞれについてヒステリシスの面積から磁化損失密度  $W$  を評価した。

Table 1. Specification of specimens.

Specimen	Thickness $d$ ( $\mu\text{m}$ )	$J_c$ (0 T) [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]
#1	1.7	$1.240 \times 10^{10}$
#2a	0.9	$2.332 \times 10^{10}$
#2b	0.9	$1.712 \times 10^{10}$

## 3 結果および検討

Fig. 1 に1枚の場合と3枚の場合の交流損失の磁界振幅依存性を示す。低磁界において3枚に積層したときの損失の方が低いことが分かる。これは、全体の  $J_c$  が高いほど全領域で損失が高い結果になっている。

Fig. 2 に規格化したそれぞれの交流損失の磁界振幅依存性を示す。 $W/W_c$  は規格化した交流損失であり、線材の幅を  $l > w$  として  $W_c = \mu_0 J_c^2 / \pi w d$  である。また、 $h_0 = \pi B_m / \mu_0 J_c d$  は規格化した交流磁界振幅である。また交流損失の折れ曲がり点が中心到達磁界  $B_p$  である。実験値を見ると、低磁界において3枚に積層したときの損失の方が低いことと、配置の違いによる影響はほとんどないことが分かる。

理論値の single は1枚の場合で、stacks は無限枚の場合の損失である。theo. 1 は Bean モデルを仮定した理論値で、試料1枚の場合の損失は、Halse の式 [1] を使い、無限枚数重ねた場合の損失は Mawatari らの式 [2] を使い、パラメータである  $J_c$  は自己磁界中における値を用いた。 $B < B_p$  では、 $W$  は  $B$  の3乗に比例し、 $B > B_p$  では、 $B$  の1乗に比例する。しかし、実験結果を見ると、 $B > B_p$  では1乗より低い値となった。これは、高磁界領域では  $J_c$  が低下し、それに伴い磁化のヒ

ステリシス幅が小さくなったことに起因している。 $J_c$  の低下を考慮した理論値 [2] が theo. 2 であり、試料1枚の場合の理論値と実験値がよく一致していることが分かる。なお、理論式の詳細や FEM による理論解析については当日議論する。

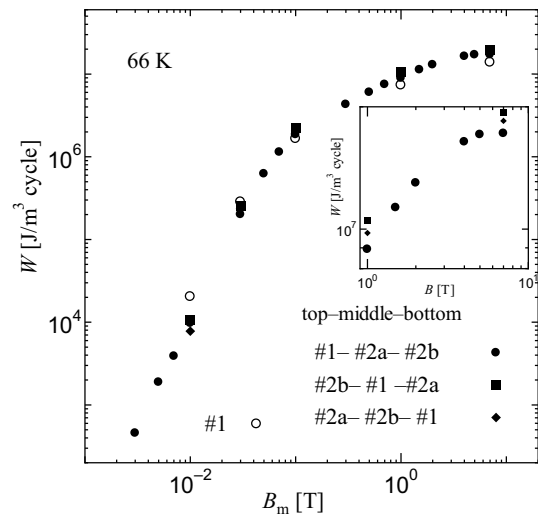


Fig. 1. Magnetic field dependence of  $J_c$ . Inset of figure is enlarged plot at high magnetic fields.

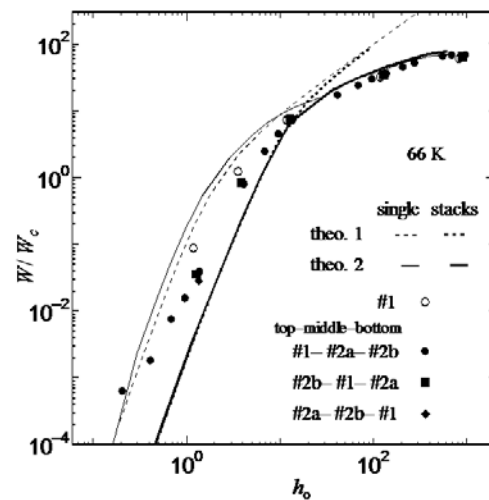


Fig. 2. Magnetic field amplitude dependence of magnetization loss density at 66 K.

## 謝辞

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

## 参考文献

- [1] M. R. Halse: J. Phys. D 3 (1970) 717.
- [2] Y. Mawatari: Phys. Rev. B 54 (1996) 13215.

**REBCO 超電導テープ線材の交流損失特性(5)**  
**－ TFA-MOD 法で製作された YBCO 超電導 5 分割テープ線材 －**  
 AC loss property of REBCO coated superconductor (5)  
 – 5-filamented YBCO coated conductor by TFA-MOD process –

林 卓矢, 中村 聡介, 川崎 基弘, 野上 広司, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九大);  
 揖斐 颯, 山田 穰, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL); 斎藤 隆, 飯島 康裕(フジクラ);

HAYASHI Takuya, NAKAMURA Sosuke, KAWASAKI Motohiro, NOGAMI Koji, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu-  
 Univ.); IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(ISTEC); SAITO Takashi, IJIMA Yasuhiro(Fujikura Ltd.)  
 E-mail: taku884@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

超電導線材を電力機器に応用する場合、超電導巻線部に発生する交流損失は機器の全熱負荷の大部分を占めるため様々な温度での損失の見積もりが重要になる。我々はこれまで、YBCO テープ線材の交流損失特性を評価し、温度スケールリング則が成立することを確認している。

最近では、レーザースクライビングによる細線加工で損失を低減する方法が提案されている。さらに、超電導層を非真空プロセスであるトリフルオロ酢酸塩を用いた有機酸塩塗布熱分解法 (TFA-MOD) で成膜し、PLD 法に代表される気相プロセスに対して低コスト化が期待されている。さらに MgO を中間層にすることで、非常に高い製造速度 (数十 m/h) が実現可能であることが報告されている。

そこで本研究では、これらの技術が応用された TFA-MOD 法で製作された YBCO 超電導 5 分割テープ線材に対して、鞍型ピックアップコイル法により交流損失を測定・評価、比較したので報告する。

### 2. 試料と測定法

試料は中間層に IBAD で成膜された MgO 基板に MOD 法によって YBCO 超電導層を成膜した線材を基板はそのままにして超電導層および中間層を 5 分割したものである。

各層の構成を Fig.1 に示す。この短尺線材を 3 枚積層して、鞍型ピックアップコイル法に用いて、磁化及び交流損失を測定した。磁界は試料幅広面に対して垂直に印加し、温度は冷凍機の伝導冷却により 35～64K の範囲で測定を行った。

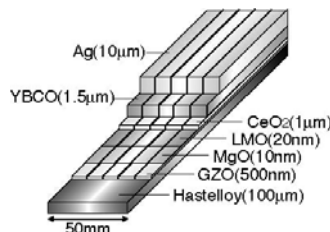


Fig.1 5-filamented MOD-YBCO tapes based on IBAD-MgO

### 3. 実験結果

今回測定した 35～64K における交流損失の結果を Fig.2 に示す。

これまでに測定してきた様々な種類の YBCO、GdBCO 線材の臨界電流特性 ( $I_c-B$ ) は、各温度における零磁場の臨界電流 (以下、 $I_{c0}(0,T)$ ) で規格化することにより温度に関してスケールリングされ、また交流損失も温度に関してスケールリングされることを確認している。

そこで、Fig.2 に示す交流損失に対しても同様に横軸を  $I_{c0}(0,T)$ 、縦軸を  $I_{c0}(0,T)$  の 2 乗値で規格化した。その結果、各

温度の曲線が一つのマスターカーブに一致し、同様に温度スケールリング則が成立することを確認した[Fig.3]。

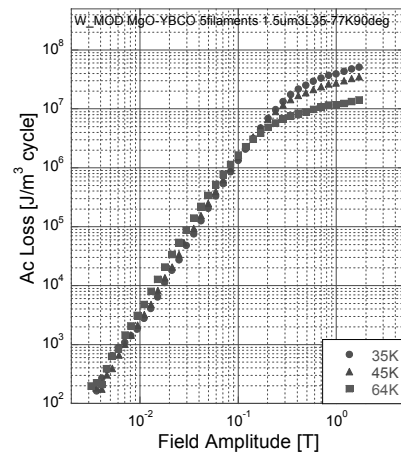


Fig.2 The AC loss property

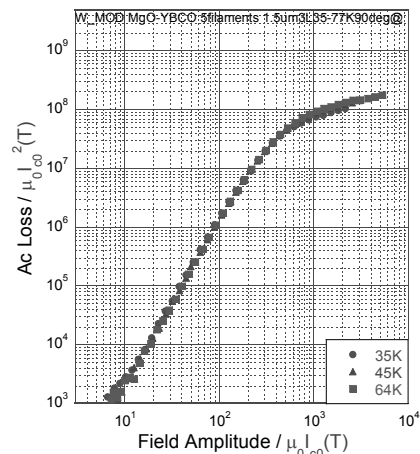


Fig.3 The normalized AC loss property by  $I_{c0}(0,T)$

### 4. 謝辞

本研究は、超電導応用基板技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託を受けて実施しているものである。

# HTS バルクの捕捉磁束減衰抑制のためのシールドコイルについての検討

## Study on shield coil for suppress decay of trapped magnetic fluxes in the HTS bulk

山岸 一人, 塚本 修巳(横浜国大); 小川 純(新潟大学); 宮城 大輔(岡山大学)

YAMAGISHI Kazuhito, TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); OGAWA Jun (Niigata University);

MIYAGI Daisuke (Okayama University)

E-mail: yamagisi@oyamalab.dnj.ynu.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、バルク超伝導体を用いた交流高温超伝導機器の実用化のために、バルクがさらされる様々な変動磁界による捕捉磁束への影響について調査研究を行ってきた。

本報告では、捕捉磁束減少の抑制に効果的であることが確認できている高温超伝導 (HTS) シールドコイルの付加について、磁界解析および捕捉磁束減少の原因と思われる交流損失の解析によりシールドコイル付加についての検討を行ったので報告する。

### 2. 方法と結果

図 1 に示すような HTS バルクの側面に HTS 線材で作成したコイルを付加することにより着磁されたバルクが外部交流磁界にさらされた時の捕捉磁束減衰の様子を実験により検証してきた[1],[2]. ここでは、付加した HTS シールドコイルの層数を増やしていくに従って捕捉磁束の減衰は抑制されていくことから、シールドコイルの付加によりバルクの交流損失がどのように変化するかを検討を数値解析により行った。

図 2 に解析を行ったモデルを示す。HTS 線材の形状を考慮した、いくつかのコイルの付加配置を考え、No ring: 付加しないものを基準とし、Ar.1: バルク側面全体に付加、Ar.2: バルク側面の中心部のみ付加、そして、Ar.3: 磁束侵入が集中すると考えられるバルクのエッジ部分に付加、の 3 つの配置について交流損失の検討を行った。図 3, 4 にシールドコイル付加層数による、交流損失の結果を示す。図 3 はバルクのみ損失であり、図 4 はバルクとシールドコイルを含めた損失の結果である。

解析結果よりシールドコイルの付加は、バルクの交流損失を減少させるために効果的であることがわかるが、シールドコイル自身の損失もバルクの損失の量とほぼ同じとなり、全体としての損失はあまり変わらない。また、シールドコイル配置はシールド性能と全体の交流損失減少の両方の観点から全面に付加する Ar.1 の配置が効果的であることを示すことができた。

### 3. まとめ

HTS シールドコイルの付加において、HTS バルクの交流損失を示すことができ、シールドコイルの捕捉磁束減衰抑制のための検討を行うことができた。

Table 1 Specification of HTS Bulk and HTS wire used in shielding ring

Bulk	GdBaCuO
Diameter	30mm
Height	10.0mm
Trapped Field	1.22T (at 77K) Field Cool
$J_c$	$7.37 \times 10^7$ A/m <sup>2</sup> (Estimated from experiment of trapped magnetic field of bulk.)
n value	20
Wire	GdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> / Hastelloy substrates
Thickness	220μm (with 100μm thick Cu layer)
Tape Wire Width	5.0mm
$I_c$	155A
$J_c$	$1.35 \times 10^{10}$ A/m <sup>2</sup>
$J_e$	$1.41 \times 10^8$ A/m <sup>2</sup>

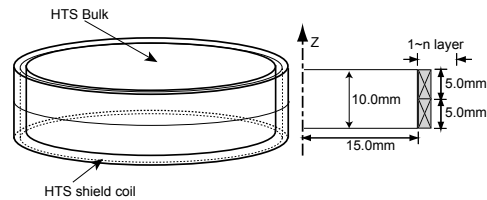


Fig. 1 Arrangement of bulk and shield ring.

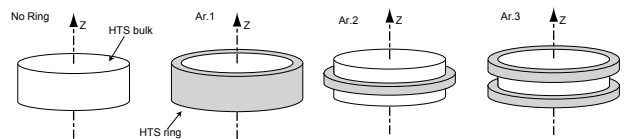


Fig. 2 Arrangements of HTS coils.

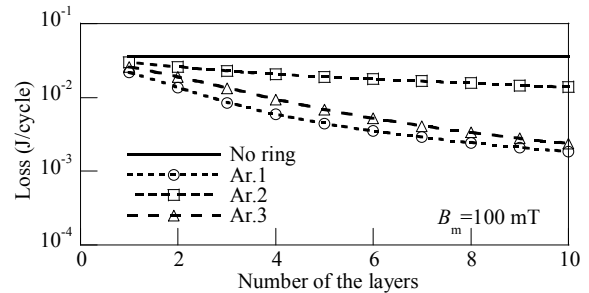


Fig. 3 AC losses in the bulk with and without shielding coil wound of HTS wire subjected to AC external magnetic field.

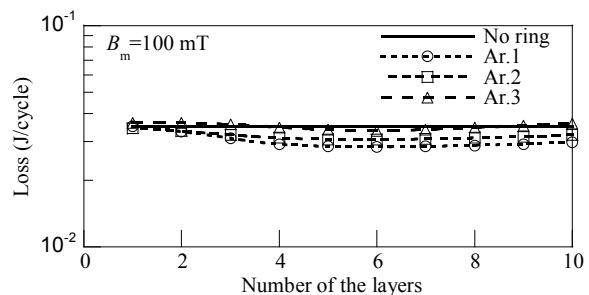


Fig. 4 Total losses and shielding coil are plotted against number of layers of the shielding ring.

また、シールド性能と交流損失低減の見地から、シールドコイルの配置を検討することができた。

### 謝辞

本研究は、科研費・基盤研究C(21560292)の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- O. Tsukamoto, et al.: Journal of Materials Processing Technology, 161, 1-2, (2005) pp52-57
- K. Yamagishi, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.19, No.3, (2009) pp.3561-3564

# ナノ粒子を導入した TFA-MOD 法 YGdBCO 線材の印加磁界角度による磁束ピンニング特性

## Flux pinning properties dependent on magnetic field angle in TFA-MOD-processed YGdBCO coated conductor with nanoparticles

鯉田 貴也, 木内 勝, 小田部 莊司, 松下 照男 (九工大);  
三浦 正志 (ロスアラモス研究所);  
和泉 輝郎, 塩原 融 (国際超電導産業技術研究センター);  
加藤 丈晴 (ファインセラミックスセンター);

KOIDA Takaya, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);  
MIURA Masashi (Los Alamos National Laboratory);  
IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL);  
KATO Takeharu (JFCC);  
E-mail : koida@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 線材 (RE:希土類) は、高温、高磁界で高い臨界電流密度が得られることから電力機器への利用が有望視されている。実用化に向けての臨界電流密度  $J_c$  の更なる特性改善が求められており、特に臨界電流密度が高く、印加磁界角度に対する異方性の小さな線材が要求される。これまでの研究で YGdBCO コート線材にナノ粒子を導入することにより臨界電流密度の値が向上し、さらに磁界角度異方性が改善されることがわかった。また、ナノ粒子ピンは自然ピンに比べて磁束ピンニング力が強く、人工ピンを導入した試料においてはナノ粒子ピンが支配的に効いていることが明らかとなった [1]。本研究では、ナノ粒子の導入によるコート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性の測定結果からナノ粒子の磁束ピンニング特性及び、臨界電流密度の磁界印加角度依存性について詳細に調べた。

### 2. 実験

測定した試料は、超電導膜厚  $0.65 \mu\text{m}$  の TFA-MOD 法によって作製された BZO ナノ粒子なし (#1) とあり (#2) の 2 つの YGdBCO (Y:Gd = 0.77:0.23) 線材である。Table 1 にそれらの諸元を示す。直流四端子法による  $J_c$  測定を行うために、線材を幅  $w = 50 \mu\text{m}$ 、長さ  $l = 0.8 \text{ mm}$  のマイクロブリッジ形状に加工した。磁界は電流に垂直に 0–3 T の範囲で印加し、 $c$  軸方向からの角度を  $\theta$  とした。 $J_c$  は  $E_c = 4.5 \times 10^{-3} \text{ V/m}$  の電界基準で決定した。尚、温度誤差は  $\pm 0.3 \text{ K}$  であった。

### 3. 結果及び検討

Fig. 1 に #1 と #2 の 77 K における  $J_c$ - $\theta$  特性を示す。1 T における  $J_c$  の異方性  $J_c(90^\circ)/J_c(0^\circ)$  は #1 で 6.48、#2 で 2.88 であり、ナノ粒子ピンの導入により異方性が改善されていることが分かった。

これらの実験結果について磁束クリープ・フローモデルを用いて解析を行う。はじめに #1 に注目する。#1 では小さな自然ピンのみが作用していると考えられる。このときピン力がコヒーレンス長  $\xi$  に反比例することが予想されることから、 $\xi$  の異方性の影響を考慮して解析を行った。

一方、#2 では、自然ピンとナノ粒子ピンが作用していると考えられる。自然ピンについては #1 と同等と仮定し、ナノ粒子ピンについては異方性のない等方的なピンを仮定して評価を行った。自然ピン、ナノ粒子ピンによる磁束クリープの影響がないと仮定した仮想的な臨界電流密度をそれぞれ  $J_{c01}$ 、 $J_{c02}$  とおき、それぞれにおけるピンニングポテンシャルを  $U_{01}$ 、 $U_{02}$  とすると、これら両方の寄与による全体のピンニングポテンシャルは  $U_0$  は、

$$U_0 = \sqrt{U_{01}^2 + U_{02}^2} \quad (1)$$

と定義する。このとき、自然ピンとナノ粒子ピンは関係を持たないと仮定している。一方で、磁束クリープ・フローモデルの解析で重要なパラメータである磁束バンドル中の磁束線数  $g^2$  は、低磁界領域において、自然ピンのような異方的なピンの場合、 $g^2$  は異方性を持たない。一方、ナノ粒子ピンのような等方的なピンニングの場合、上部臨界磁界  $B_{c2}$  と  $g^2 \propto B_{c2}^{1/3}$  の関係がある。したがって、一般的に知られた  $B_{c2}$  の角度依存性を考慮すると、異方性パラメータ  $\gamma_a$  を用いて  $g^2$  は

$$g^2(\theta) \propto g^2(0)(\cos^2 \theta + \gamma_a^{-2} \sin^2 \theta)^{-1/6} \quad (2)$$

となる。ここで、 $g^2(0)$  は  $B \parallel c$  での  $g^2$  の値である。この  $g^2$  の異方性と、 $U_0$  を考慮して解析を行った。これらの解析結果に対する詳細な議論は当日行う。

Table 1: Specification of specimens

specimen	thickness $d(\mu\text{m})$	$T_c$ (K)	process
#1	0.65	90.0	MOD
#2	0.65	90.2	MOD+BZO

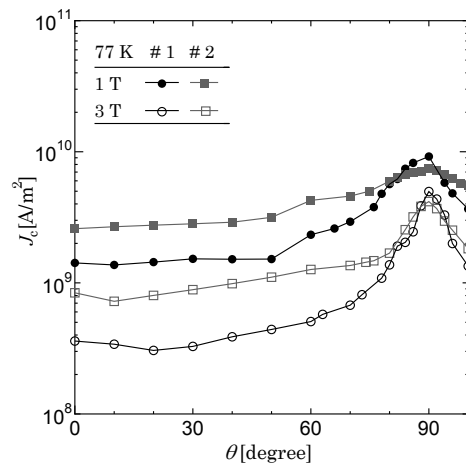


Fig. 1:  $J_c$ - $\theta$  properties at 77 K for specimens #1 and #2.

### 4. 参考文献

[1] 鯉田ら: 第 82 回 2010 年春季 低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a10(2010)

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

# 方向分散した柱状欠陥を含む $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の 臨界電流密度の磁場角度依存性

Angular dependences of critical current density in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  thin films  
with splayed columnar defects

末吉 哲郎, 西村 太宏, 米倉 健志, 藤吉 孝則, 光木 文秋, 池上 知顯 (熊本大)  
SUEYOSHI Tetsuro, NISHIMURA Takahiro, YONEKURA Kenji, FUJIYOSHI Takanori,  
MITSUGI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.)  
E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

希土類系高温超伝導体において, ナノロッドのような1次元ピンは磁場と方向が一致したとき最も有効なピン止め点となり, 顕著に磁場中の臨界電流密度  $J_c$  を改善できる[1]. さらに方向が分散した1次元ピンは, 1次元ピン固有に現れる磁束線の二重折れ(double kink)変形もしくは階段状(stair-case)変形から生じる顕著な熱活性化運動を妨げる(スプレイ効果)ために更なる高  $J_c$  化と[2], 様々な方向を有するために  $J_c$  の異方性の改善が期待される[3].

本研究では, 1次元ピンの方向を容易に制御できる重イオン照射により, YBCO 薄膜内に2または3方向で柱状欠陥を交差して導入し,  $J_c$  や  $n$  値に対する柱状欠陥の交差の影響について調べた.

## 2. 実験方法

PLD 法により  $\text{SrTiO}_3$  基板上に作製した YBCO 薄膜を, フォトリソグラフィにより幅約  $40\mu\text{m}$ , 長さ  $1\text{mm}$  のブリッジ状に加工した後, 照射や測定に用いた. 柱状欠陥を導入するための重イオン照射は, 原子力機構のタンデム加速器にて  $200\text{MeV}$  の Xe イオンを用いて行った.  $c$  軸に対して  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  の2方向から照射した試料をそれぞれ db10, db45, また  $0^\circ$  と  $\pm 45^\circ$  の3方向から照射した試料を tr45 とする. 参照試料として,  $c$  軸に対して  $-6^\circ$  の角度で平行な柱状欠陥を導入した試料 pa06 を用意した. 照射方向は試料のブリッジ方向に対して常に垂直にし, 柱状欠陥の面密度は全ての試料でマッチング磁場  $B_\phi=3\text{T}$  になるように照射を行った.  $J_c$  は通電法により電界基準  $E_c=1\mu\text{V}/\text{cm}$  で定義した.  $J_c$  の磁場角度依存性では, 電流と常に直交するように磁場を印加し, 磁場と  $c$  軸のなす角度  $\theta$  として測定を行った.

## 3. 結果および検討

Fig.1(a)に, 自己磁場の臨界電流密度  $J_{c0}$  で規格化した  $J_c$  の磁場依存性について示す ( $T=77.3\text{K}$ ,  $B \parallel c$ ). 方向分散の少ない db10 は, 平行照射の pa06 とほぼ同様な  $J_c$ - $B$  特性を示している. 磁場増加に対して顕著な  $J_c$  の減少が db45 において見られる. 一方, tr45 では, 低磁場, 高磁場ともに最も高い値を示している.  $c$  軸方向に  $B_\phi=5\text{T}$  の照射量にて平行照射した試料と比較しても (Fig.1(a)),  $B=2.5\text{T}$  付近まで tr45 が高い値を示している.

Fig.1(b)に,  $n$  値の磁場依存性について示す. 2方向に交差した試料と pa06 を比較すると, 低磁場では db10 における  $n$  値が高い値を示している. これは1次元ピンの方向がわずかに分散したときに生じるスプレイ効果によるものと考えられる[2]. 一方, tr45 においては  $B=2\text{T}$  以下の磁場で  $n$  値が顕著に高い. これは,  $B_\phi=5\text{T}$  の試料と比較しても低磁場で高い  $n$  値を示している.

Fig.2に,  $77.3\text{K}$ ,  $1\text{T}$  における  $J_c$  と  $n$  値の磁場角度依存性について示す.  $\theta=0^\circ$  付近の  $J_c(\theta)$  特性において, pa06 と db10 では鋭いピークを示すのに対し, db45, tr45 ではブロードなピークもしくはフラットな  $J_c(\theta)$  特性となっている.  $n(\theta)$  特性では, tr45 において  $J_c(\theta)$  特性と同様に  $\theta=0^\circ$  付近にブ

ロードなピークが見られるが, db45 では照射方向と同じ  $\pm 45^\circ$  付近で2つのピークが生じている. db45 の  $\theta=0^\circ$  においては, 磁束線に対して柱状欠陥が  $\pm 45^\circ$  で傾いていることで, 磁束線が階段状変形しスライド移動しやすいため [4],  $n$  値が小さくなると考えられる. 一方 tr45 では,  $0^\circ$  と  $\pm 45^\circ$  の3方向に柱状欠陥が存在するために, 任意の磁場方向においても互いに傾きの近い柱状欠陥によりスプレイ効果が生じ,  $J_c$  と  $n$  値が高くなっているものと考えられる.

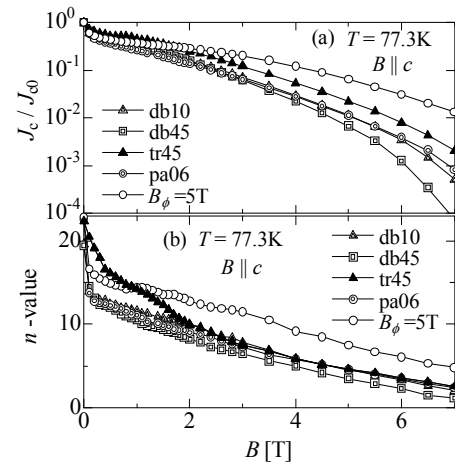


Fig.1 Magnetic field dependences of (a)  $J_c/J_{c0}$  and (b)  $n$ -value in YBCO films with various crossed columnar defects.

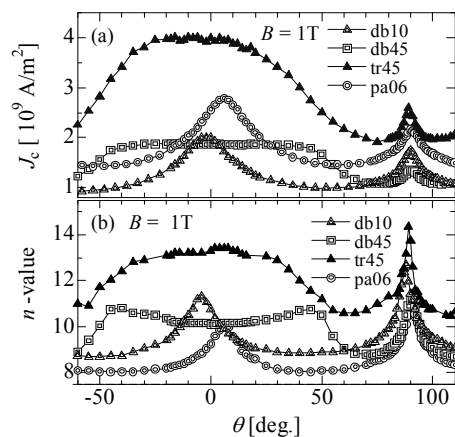


Fig.2 Angular dependences of (a)  $J_c$  and (b)  $n$ -value at  $77.3\text{K}$  for  $B = 1\text{T}$ .

## 参考文献

1. P. Mele, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 032002.
2. T. Hwa, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3545.
3. B. Maiorov, *et al.*: Nature Mater. **8** (2009) 398.
4. Th. Schuster *et al.*: Phys. Rev. B **50** (1994) 9499.



# PLD法 GdBCO線材の臨界電流特性に与える超電導層厚の厚膜化の影響

## Influence of superconducting layer thickness on critical current properties in PLD processed GdBCO coated conductors

中村 遼太, 高橋 祐治, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大);  
阿比留 健司, 大松 一也 (住友電工);

NAKAMURA Ryouta, TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,  
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

ABIRU Kenji, OHMATSU Kazuya (Sumitomo Electric Industries);

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

### 1. はじめに

PLD法で製作された希土類系超電導 (REBCO) 線材は優れた内面配向と高い臨界電流密度  $J_c$  を持つため、電力ケーブル、超電導コイル、モータ、変圧器など、様々な分野での応用が期待されている。しかしながら、厚膜生成に要する時間やコスト面に問題がある。これを解決するためには、超電導層だけでなく、中間層を含めた線材全体のコストを削減することが重要となり、中間層に特別な処理を行わず、超電導層の二軸配向を得られる配向 Ni 合金基板を用いた線材の作成が注目されている [1]。

また、更に高い臨界電流  $I_c$  を持つ線材作成のために、超電導層をさらに厚くする必要があり、その影響を解析する必要がある。

本研究では、超電導層厚  $d$  の異なる GdBCO 線材について臨界電流測定を行い、 $d$  を厚くした時の特性の変化について明らかにする。

### 2. 実験

今回測定した線材の基板は従来の配向 Ni 合金基板よりも高強度、低磁性な特性をもつ配向 Ni クラッド基板で、中間層を CeO<sub>2</sub>/イットリア安定化ジルコニウム (YSZ)/CeO<sub>2</sub> とした PLD 法 GdBCO 線材である。尚、安定化層は Ag で、線材全体を Cu でメッキしている。超電導層厚は、1.6  $\mu\text{m}$ 、2.1  $\mu\text{m}$  であり、臨界温度  $T_c$  はそれぞれ、92.4 K と 92.9 K であった。これらの試料を #1.6、#2.1 とする。

$c$  軸に対して、平行に磁界を印加し、二つの線材について SQUID 磁力計を用いた測定を行った。不可逆磁界  $B_i$  は  $J_c$  が  $1.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$  に減少した磁界により決定した。

### 3. 結果及び考察

Fig. 1 に 20–77 K での  $J_c$ - $B$  特性を示す。低磁界中では #2.1 のほうが  $J_c$  は低かった。これは、厚膜化に伴う超電導層の劣化が原因であると思われる。一方、2.5 T 以上での高磁界では、#2.1 のほうが  $J_c$  は高く、 $B_i$  は 77 K でそれぞれ、2.85 T と 3.03 T であった。

超電導体の構成物質の不均一さを考慮し、磁束クリープの影響がないと仮定した場合の理想的な臨界電流密度  $J_{c0}$  のピン力の強さを表すパラメータ  $A$  の分布を次式で表現する。

$$f(A) = K \exp \left[ -\frac{(\log A - \log A_m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 $K$  は規格化定数であり、 $\sigma^2$  はピン力の分布幅を表すパラメータである。また  $A_m$  は  $A$  の最頻値である。磁束クリープ・フローモデル [2] を用いて、Fig. 1 の  $J_c$  に一致するように  $A_m$ 、及び  $\sigma^2$  を決定した。結果、#2.1 は #1.6 に比べ  $A_m$  が小さくなり、 $\sigma^2$  は大き

くなった。これは厚膜化による超電導層の劣化を示していると思われる。

次に高磁界中でのピンニング状態を調べるために  $J_{c0}$  を用いて、長さ方向の磁束バンドルサイズ  $L$  を次式より求める。

$$L = \left( \frac{Ba_f}{2\pi\mu_0 J_{c0}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $a_f$  は磁束格子間距離を示している。

この  $L$  の値によってピンニング次元性が 2 次元ピンニングと 3 次元ピンニングに分けられる。 $L$  が  $d$  よりも大きくなると、2 次元ピンニング状態になり長さ方向の磁束バンドルサイズが  $d$  によって固定される。その結果ピンニングポテンシャル  $U_0$  が大きく減少し、磁束クリープの影響を受けやすくなる。3 次元ピンニングの場合は長さ方向の磁束バンドルサイズが  $d$  によって固定されないため、2 次元ピンニングよりも大きな  $U_0$  の値をとる。

$L$  の値は、#1.6 よりも #2.1 の方が大きい。これは超電導層の劣化による  $J_c$  の低下が原因と考えられる。一方で #2.1 の  $J_c$  が磁界の影響を受けにくくなっている。これは、超電導層を厚くしたことによる  $L$  の増加よりも  $d$  の増加の方が大きく、結果として 3 次元ピンニングを維持しているピンの割合が多いことが原因と考えられる。

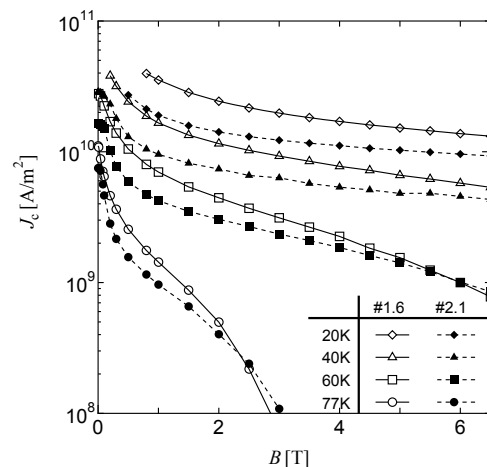


Fig. 1:  $J_c$ - $B$  properties at 20–77 K.

### 参考文献

- [1] Y. Shingai, *et al.*: SEI Technical Review, **174**(2009) 105.  
[2] T. Matsushita, *et al.*: Physica C **259** (1996) 321.

### 謝辞

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

# CVD 法による YGdBCO コート線材の臨界電流特性評価

## Evaluation of critical current property in CVD processed YGdBCO coated conductors

高橋 祐治, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大);  
式町 浩二, 渡部 智則, 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力);

TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech); SHIKIMACHI Koji,  
WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power);  
E-mail: takahasi@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

YBCO コート線材は高磁界中で優れた臨界電流密度( $J_c$ )を有する事から、SMES など様々な応用が期待されている。優れた特性を示す線材の作製法として PLD 法があるが、実用化の観点から他の作製法が試みられている。その中でも CVD 法は製造コストが安価であり、最近の特性向上から有望視されている。一方で、Y の一部を Gd で置換することで臨界温度 ( $T_c$ ) が高くなることから、YBCO コート線材よりも高い  $J_c$  が期待され、開発が進められている[1]。以前の研究から、IBAD/CVD 法で作製された YBCO コート線材は、厚膜化による超電導層の劣化で  $J_c$  が減少するが、逆に超電導層が厚い試料ほど磁束クリープの影響を受けにくく、高温・高磁界における応用で有利なことが示唆されている[2]。前報では IBAD/CVD 法で作製された YGdBCO コート線材において、超電導層厚が増加することによる  $J_c$  劣化の小さな試料の作製が可能となったことを報告してきた[3]。

本研究では、新たに作製したさらに超電導層の厚い CVD 法による YGdBCO コート線材を用い、超電導層厚が臨界電流特性に与える影響について評価する。

### 2. 実験

試料は CVD 法により作製された超電導層厚が 0.45 - 1.65  $\mu\text{m}$  の YGdBCO 線材で、長尺線材から切り出したものである。試料の超電導層の厚さ ( $d$ )及び  $T_c$  を Table 1 に示す。測定は SQUID 磁力計を用いた直流磁化測定から  $J_c$  -  $B$  特性を、磁化緩和率測定から  $E$  -  $J$  特性、見かけのピン・ポテンシャル  $U_0^*$  を求めた。

Table 1 Specification of specimens.

specimen	#1	#2	#3	#4	#5
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	0.45	0.75	1.05	1.35	1.65
$T_c$ (K)	90.8	90.5	90.2	91.1	90.3

### 3. 結果及び検討

Fig. 1 に 20 と 60 K における  $J_c$  -  $B$  特性を示す。プロットは今回測定した結果であり、破線は前回報告した結果である[3]。20 K における  $J_c$  は、前回測定した試料と今回測定した試料共に超電導層厚に依存せず、ほぼ同程度の値を示している。一方で、60K における前回の結果では、超電導層が薄い試料の  $J_c$  は磁界の増加と共に大きく減少していたが、今回の結果ではその様な大きな  $J_c$  の劣化はなかった。したがって超電導体の厚さによる、臨界電流密度のばらつきが大きく改善されていることがわかる。

Fig. 2 に 20 K における、 $U_0^*$  -  $B$  の実験結果を示す。Fig.1 と同様、プロットは今回測定した試料の結果であり、破線は前回測定した試料を示している。前回測定した試料では、超電導層が薄い試料の  $U_0^*$  が高磁界で大きく減少していた。今回測定した試料では、超電導層厚によらず、大きな  $U_0^*$  を示していることがわかる。また、超電導層の厚い試料ほど、大きな  $U_0^*$  を示す傾向にある。この結果か

ら、磁束クリープの影響が大きくなる高温・高磁界領域の応用では超電導層の厚い試料が有利であるといえる。これらの結果について、磁束クリープ・フローモデルを用いた解析、及び詳細な議論は当日行う。

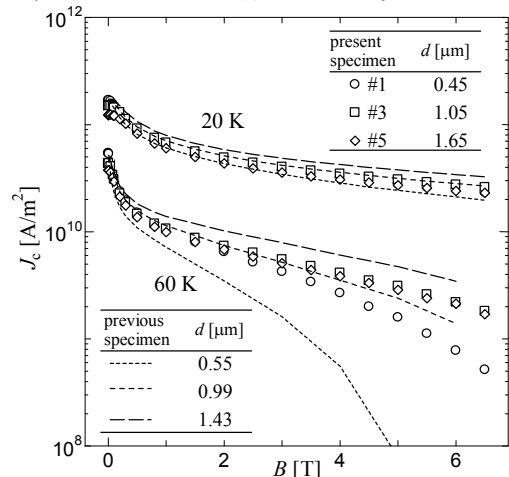


Fig. 1: Magnetic field dependence of magnetization critical current density at 20 and 60 K. The dotted lines show the results of previous CVD-processed YGdBCO tapes<sup>3)</sup>.

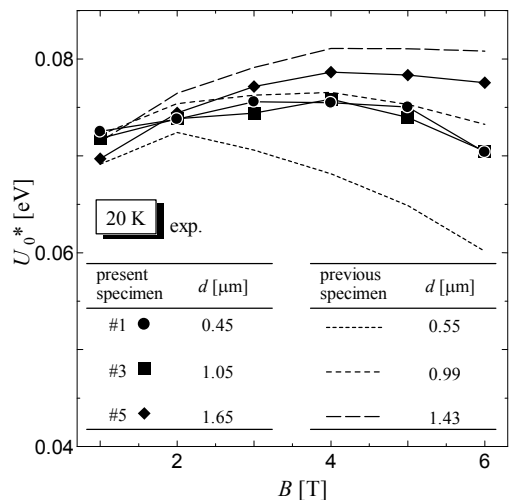


Fig. 2: Magnetic field dependence of apparent pinning potential at 20 K. The dotted lines show the results of previous CVD-processed YGdBCO tapes<sup>3)</sup>.

謝辞 本研究は、NEDOの委託事業「リットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

### 参考文献

1. A. Kaneko *et al.*, Physica C 426 - 431(2005)949.
2. K. Himeki, *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.9
3. Y. Takahashi, *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol.82 (2010) p.75

# 600A/cm-w 級厚膜化 GdBCO/IBAD コート線材の低温・強磁場中の臨界電流特性

## Critical current property of 600A/cm-w class GdBCO/IBAD coated conductors in low temperature and high field up to 31T

井上 昌睦, Fuger Rene, 東川 甲平, 木須 隆暢 (九大);  
Larbalestier David, Jaroszynski Jan, Braccini Valeri, Xu Aixia (米国 フロリダ州立大);  
飯島 康裕, 斎藤 隆 (フジクラ); 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大); 和泉 輝郎 (ISTEC-SRL);

INOUE Masayoshi, FUGER Rene, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);  
LARBALESTIER David, JAROSZYNSKI Jan, BRACCINI Valeri, XU Aixia (Florida State Univ., USA);  
IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); IZUMI Teruo (ISTEC-SRL)

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

### 1. はじめに

我々は前回、パルスレーザ蒸着システムの改善により得られた 600A/cm-w 級 GdBCO 線材が、(1)従来の線材に比べて均一な  $T_c$  及び  $I_c$  分布を有していること、(2)厚膜化により磁場中にて高  $I_c$  特性が得られるに至っていること、を報告した。今回、同線材の低温・強磁場中の臨界電流特性を実験により明らかとするとともに、我々が提出している電流輸送特性の定式化モデルを用いた、強磁場中の特性推定について検討を行ったので報告する。

### 2. 実験

実験に用いた線材は、イオンビーム・アシスト蒸着 (IBAD) 法にて作製された配向基板の上に、厚さ 2.5 $\mu$ m の GdBCO 超伝導層を形成したテープ線材で、77K、自己磁場で 600A/cm-w の  $I_c$  値を有している。強磁場中での  $E$ - $J$  測定を実施するため、同線材に細線化加工を施したものを実験用の試料とした。液体ヘリウム中の実験は、Resistive Magnet (米国フロリダ州立大学 国立強磁場研究所) を用いて、20K 以上の温度領域は、ガス雰囲気制御による温度調整機構を有するハイブリッドマグネットシステム及び超伝導マグネットシステム (東北大) を用いて実施した。磁場の印加角度は基板面に対して平行方向 ( $B//ab$ ) を 0°、垂直方向 ( $B//c$ ) を 90° と定義している。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に、600A/cm-w 級 GdBCO 線材の  $I_c$ - $B$ - $T$  特性を示す。磁場の印加方向は、膜面に対して垂直である。図中のシンボルで示した実験結果を見てみると、20K 以下の低温領域では、30T 程度の強磁場中においても高  $I_c$  特性を維持しており、例えば 20K、25T では 250A/cm-w の  $I_c$  値が、4K、30T では 420A/cm-w の  $I_c$  値が得られている。Fig. 2 に 4K、20K における  $I_c$  の角度依存性を示す。同線材には不純物等の人工的なピンニングセンターを導入していないため、 $I_c$  の角度依存性における顕著な  $c$  軸方向のピーク特性は得られておらず、垂直磁場付近で広い角度範囲に亘って平坦な特性を示している。4K、20K での最小  $I_c$  は、535A/cm-w であった。平行磁場付近では、12° で 1,000A/cm-w を超える  $I_c$  値を確認している。

実験により得られた  $E$ - $J$  特性から  $J_c$  の統計分布パラメータを抽出した後、巨視的ピン力密度のスケール則、ガラス-液体転位磁場の温度依存性等の解析を行い、電流輸送特性の解析解を求めた。その結果得られた  $I_c$ - $B$ - $T$  特性を Fig. 1 中に実線で示す。今回、17T 以下の磁場中で且つ 20K 以上の温度領域における  $E$ - $J$  特性を用いて各ピンニングパラメータを求め、強磁場中の特性推定を行った。解析に用いた温度、磁場領域においては実験値と解析解とが良く一致しているものの、

強磁場中の  $I_c$  の解析値はやや過小評価となった。このことはピンニング特性が低温側で急激に上昇していることを示唆している。実験結果の詳細ならびにピンニング特性の詳細については当日報告する。

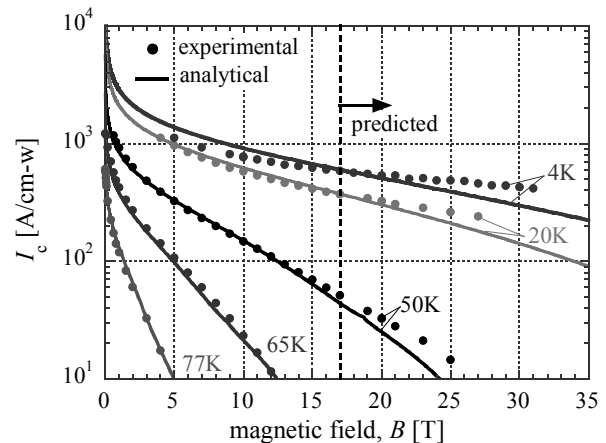


Fig.1  $I_c$ - $B$ - $T$  characteristics in 600A/cm-w class GdBCO coated conductors at  $B//c$ .

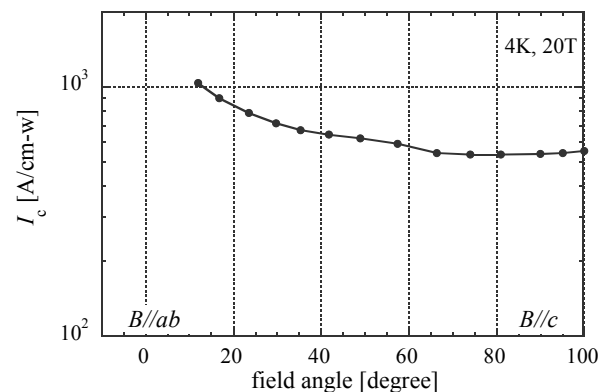


Fig.2 Angular dependence of  $I_c$  at 4K, 20T.

### 謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環としてISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」による支援を得て行ったものである。

# YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化:熱応力の影響

## Degradation of YBCO Tapes due to Over-current Pulse Drive : Influence of thermal stress

金光 雅也, 児島 健太郎, 新井 道生, 王 旭東, 石山 敦士(早大);  
八木 正史(古河電工); 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)

KANEMITSU Masaya, KOJIMA Kentaro, ARAI Michio, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);  
YAGI Masashi (Furukawa Electric); MARUYAMA Osamu, OKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)  
E-mail:atsushi @waseda.jp

### 1. はじめに

YBCO 線材の電力応用において、突発的な短絡電流の流入により温度が急上昇し、線材が特性劣化する可能性がある。そのため線材の劣化や焼損しない限界の温度を設計の指標・基準の1つとして考える必要がある。そこで我々は劣化開始時の最高到達温度に注目し、過電流パルス通電試験を行ってきた[1][2]。今回は、特性劣化試験に加え、超電導線材の劣化要因の一つと考えられる熱応力について、解析評価を実施したので報告する。

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

### 2. 実験と解析

実験は、線材両端から伝導冷却 77 K の条件下で行い、過電流の通電時間は 1 秒間通電とした。その際に超電導特性の劣化開始温度を測定した。過電流通電時の超電導線材の熱応力分布を評価するために、二次元有限要素法を用いた計算機シミュレータを開発した。解析は、YBCO 線材の両端が電流リードに機械的に固定されているとし、直状で変形しないと仮定している。また、YBCO 線材の幅が十分に薄いと見做し、平面応力状態を仮定し、以下の式 (1) を基礎方程式として用いた。

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon'\} dV \quad (1)$$

式 (1) では [B] はひずみ-変位マトリクス, [D] は応力-ひずみマトリクス, {d} は接点変位ベクトル, {\epsilon'} は熱ひずみベクトルをそれぞれ表している。

### 3. 解析結果

解析に用いた YBCO 線材の諸元を Table 1 に示す。過電流通電試験結果を Fig.2 に示す。横軸は電圧端子の位置を表し、第1縦軸と棒グラフが  $I_c$  を表し、2縦軸と折れ線が  $T_{max}$  を表している。206 A 通電時に特性劣化が生じた。そのときの V56 の最高到達温度は約 570 K であった。この温度分布を用いて応力分布と歪み分布を求め、その結果を Fig.3, 4 に示す。グラフは横軸に線材長手方向 (X 方向) を取り、縦軸はそれぞれ応力, 歪みを表している。Fig.3 より、長手方向応力には数百 MPa の圧縮応力が発生した。また Fig.4 より、劣化箇所付近で断面方向 (Y 方向) に最大約 0.4% の引張り歪みが発生した。

### 4. まとめ

今回は過電流通電試験の結果を用いて YBCO 線材にかかる熱応力・歪みについて二次元有限要素法により解析した。劣化開始時の温度上昇により、局所的な歪みが YBCO 線材に生じて、YBCO 層にダメージが与えられ、特性劣化につながった可能性があると考えられる。

### 参考文献

1. A. Ishiyama, H. Ueda et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.72
2. A. Ishiyama, X. WANG et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.73

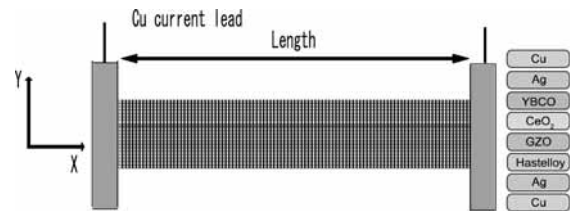


Fig.1 Model of Thermal Stress Analysis

Table.1 Specifications of YBCO tape

Manufacturing Method	IBAD/TFA-MOD
Length	70 mm
Width	5.0 mm
Cu Thickness	25 μm
Ag Thickness	15 μm
YBCO Thickness	1.5 μm
CeO <sub>2</sub> Thickness	1.0 μm
Gd <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Thickness	1.2 μm
Hastelloy Thickness	100 μm

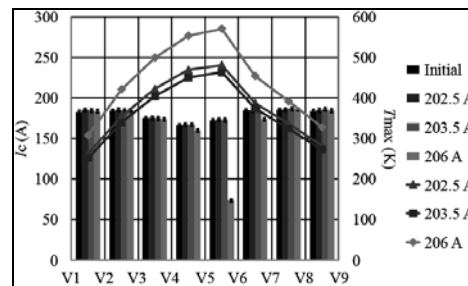


Fig.2 Distribution of  $I_c$  and  $T_{peak}$

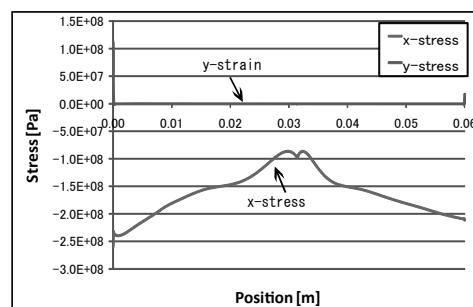


Fig.3 Distribution of Stress

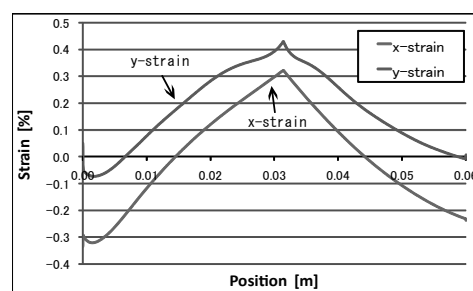


Fig.4 Distribution of Strain

## RE123 の線材の特性把握 (2) 各種環境ストレスに対する劣化限界の検討

### Understanding of deterioration phenomenon for RE123 coated conductors (2)

#### Study on deterioration limit against various environmental stresses

坂井 直道 (ISTEC-SRL), 王 旭東, 石山 敦士 (早大), 大松 一也 (住友電工), 八木 正史 (古河電工), 青木 裕治 (SWCC), 齊藤 隆 (フジクラ), 加藤 丈晴 (JFCC), 和泉 輝郎, 田辺 圭一 (ISTEC-SRL)

SAKAI Naomichi (ISTEC-SRL), WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.), AOKI Yuji (SWCC Showa Holdings), SAITOH Takashi (Fujikura), OOMATSU Kazuya (SUMITOMO), KATO Takeharu (JFCC), IZUMI Teruo, TANABE Keiichi (ISTEC-SRL)  
E-mail: nsakai@istec.or.jp

#### 1. はじめに

近年、RE123 系線材を用いた各種機器開発が盛んに行われている。ここで、これら機器用の線材が、その使用環境において、特性変化するのかどうかを予め確認しておくことも重要である。我々は、機器用線材開発の一環として、各種環境ストレス（過電流、機械歪、熱歪、加熱、湿度）による線材の特性変化を調査してきた。そして前回、過電流試験と線材剥離の検討の一部を報告した [1, 2]。本報告では、ケーブル応用を想定した際に想定される各種ストレスと線材特性低下の関係、特に、ストレスの強さや印加時間・回数に対する  $I_c$  の劣化特性を評価し、劣化限界がどの程度なのか、また限界を決めている因子は何なのかに関して、調査を行った結果を報告する。

#### 2. 実験方法及び結果

ケーブル応用を例として考えた際に、機器製作から運転時に RE123 系線材が受ける劣化の可能性のあるストレスとしては、運転時の電流、事故時の過電流、保守時の熱サイクル、製作・保管時の応力・歪み、過熱、湿度が挙げられる。これらストレスによる劣化を調査するため、下記に挙げた調査を実施した。評価条件は、ケーブル応用を考えた際に想定されるストレス強度を元に設定した。評価は、PLD\_Gd123 および MOD\_Y123 線材を中心に行った。

「実施した試験項目」

- 1-1 長期連続過電流試験
- 1-2 事故電流を想定した過電流試験
- 1-3 繰返し過電流試験 (1-2 における劣化限界以内)
- 2-1 曲げ[引張]試験
- 2-2 繰返し曲げ試験 (2-1 における劣化限界以内)
- 2-3 圧縮試験 (20MPa まで)
- 3 熱サイクル試験 (液体窒素-100℃間)
- 4 ハンダ温度加熱試験 (230℃)
- 5 湿度劣化試験 (40℃-RH100%条件)

ここで、限界値が得られた試験は、1-2, 2-1 および 5 であり、それ以外の項目は、ケーブル応用で想定できる条件では顕著な劣化は確認できなかった。ただし、線材種類や構成により例外もあった。全ての試験項目に対応した結果を示すことはできないので、一例として、図 1(a) および(b)に、湿度による劣化の調査結果の例を示す。

図 1(a) に Cuめっき PLD\_Gd123 線材 (2mm幅) を 67mbar の一定湿度下 (40℃で 100%湿度に相当) において、加熱温度を変化 (85℃, 115℃, 150℃, 180℃) させて、 $I_c$  の経時劣化評価を行った結果を示す。図より、温度を上昇させるとともに、劣化速度は速くなり、温度依存を示すことが判明した。そこで、図 1(a) より、初期  $I_c$  から 5%劣化する速度を調べてレニウスプロットした結果を図 1(b) に示す。これより、この温度範囲において、データはよく直線に乗っていることが確かめられた。そこで、より低温でも同じ反応により劣化が進むことを仮定し、40℃における劣化速度を算出したところ、本線材は、5%劣化するのに 9 年以上かかることが見積もられた。このことより、本線

材は、高温高湿下で比較的長期間保管しても何ら問題がないということが示された。

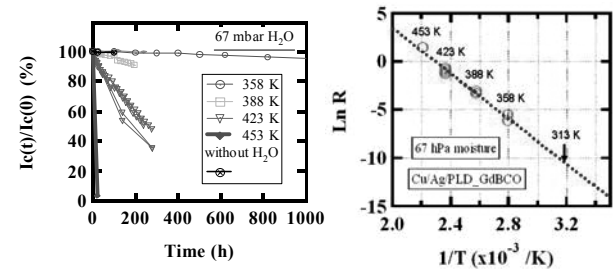


Fig. 1 (a) Temperature dependences of  $I_c$  degradation with time by humidity for Cu plated PLD\_GdBCO CC (b) Arrhenius's plot of humidity degradation

#### 3. まとめ

以下に、本調査により得られた結果の概要を示す。長期連続過電流試験より、RE123 層に電流が流れる条件においては、劣化は生じないことを示唆する結果が得られた。また、過電流試験より、過電流による劣化は安定化層を流れる電流による発熱に起因することが推定された。機械的歪みによる劣化は、基板材料とその処理履歴に依存し、引張試験あるいは曲げ試験による可逆領域の評価は必須であること。可逆領域内においては、数数百回程度の繰返し歪みを印加しても劣化は生じないであろうこと。Ag で薄く被覆されている線材では液体窒素-室温間の熱サイクルにより劣化が生じないこと。加熱により、200℃以上で長時間加熱することにより酸素量変化が生じて特性低下することがあるが、ハンダ付けを想定した 230℃において 20 分以内であれば、大きな変化は見られないこと。Cu めっきした PLD\_Gd123 線は梅雨時など高温高湿条件においても、比較的長期間保管しても問題ないことが判明した。ただし、線材に剥離などの大きな欠陥が入っている場合や Cu を貼り合わせるなど線材の構成が変わった場合は劣化するケースがあるので注意が必要である。この様に、ケーブルの製作・運転条件においては、一部例外もあるものの、基本的には RE123 系線材が劣化しないことを確かめることができた。さらに、新しい線材が得られた場合に、評価しておくことを推奨する試験条件を設定した。

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」として NEDO の委託により実施したものである。

#### 参考文献

1. N. Sakai et al., Abstracts of CSJ Conference, (2010) spring, No. 1A-p05
2. X. Wang et al., : Abstracts of CSJ Conference, (2010) spring, No. 1P-p02

# バイクリスタル SrTiO<sub>3</sub> 基板に作成した YBCO 薄膜の 第三高調波電圧誘導法による J<sub>c</sub> 測定

## The inductive measurement of J<sub>c</sub> for YBCO thin film on SrTiO<sub>3</sub> bicrystal substrate using the third harmonic voltage method

沖田 健佑, 畠中 裕宅, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎(熊本大学); 土井 俊哉(鹿児島大学)

OKITA Kensuke, HATANAKA Yuta, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro (Kumamoto Univ.);

DOI Toshiya (Kagoshima Univ.)

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

### 1. はじめに

結晶粒界などの弱結合は、高温超伝導体の臨界電流密度 J<sub>c</sub> を減少させる最大の要因になっている。本研究では、超伝導薄膜の J<sub>c</sub> を非破壊・非接触でさらに局所的に測定できる第三高調波電圧誘導法[1,2]を用いて、バイクリスタル基板に作製した YBCO 薄膜の J<sub>c</sub> の位置依存性と磁場依存性を測定した。

### 2. 実験

傾斜角 10° の SrTiO<sub>3</sub> バイクリスタル基板に PLD 法を用いて、YBCO 薄膜を作製した。結晶粒界は基板の中心部分に存在する。

結晶粒界に対して垂直と平行方向にコイルをそれぞれ動かし、J<sub>c</sub> の位置依存性を測定した。コイルはドライブコイルとピックアップコイルを分離した 2 コイルを用いた。1 つのボビンの内側にピックアップコイルを 200 回巻き、外側にドライブコイルを 300 回巻いた。各コイルには線径 50μm のエナメル銅線を用い、ピックアップコイルは内径 1mm, 外径 2mm, 高さ 1mm, ドライブコイルは内径 2mm, 外径 4.75mm, 高さ 1mm であり、コイル定数は 73.1mm<sup>-1</sup> である。J<sub>c</sub> は電界基準 E<sub>c</sub> = 5.0μV/m より算出した。

磁場依存性の測定は、YBCO 薄膜の中心にコイルを置き、ネオジウムマグネットにより磁場を印加した。磁場は薄膜とマグネットの距離を変えることにより、0~0.25T まで変化させた。

### 3. 結果と考察

Fig.1 に結晶粒界の直上にコイルを置いたときの自己磁場における I<sub>0</sub>-V<sub>3</sub> 特性を示す。Fig.1 から V<sub>3</sub> が 2 段階で立ち上がっていることが分かる。1 回目の立ち上がりは粒間に流れる遮蔽電流の臨界値によるものであり、2 回目の立ち上がりは粒内に流れる遮蔽電流の臨界値によるものである。よって粒間と粒内の遮蔽電流をそれぞれ反映した 2 つの J<sub>c</sub> が評価できる。

Fig.2 に J<sub>c</sub> の位置依存性を示す。(a) が結晶粒界を横切るようにコイルを動かしたときの特性、(b) が結晶粒界に沿ってコイルを動かしたときの特性である。○ は J<sub>c</sub> を V<sub>3</sub> の 1 回目の立ち上がりから求めた値で粒間電流の臨界値を反映している。● は J<sub>c</sub> を V<sub>3</sub> の 2 回目の立ち上がりから求めた値で粒内電流の臨界値を反映している。しかし Fig.2 (a) の両端では V<sub>3</sub> が単調に立ち上がるため 1 つの J<sub>c</sub> のみ評価出来た。Fig.2 (a) から結晶粒界の直上である中心の J<sub>c</sub> が最も低くなっていることが分かる。一方、Fig.2 (b) から J<sub>c</sub> の値は中心より離れるにつれ減少している。これは遮蔽電流の流れる領域が制限させるためである。

Fig.3 に J<sub>c</sub>-B 特性を示す。測定位置は結晶粒界がある薄膜の中心である。0.05T 以下では V<sub>3</sub> は 2 段階で立ち上がるため、粒間電流と粒内電流による 2 つの J<sub>c</sub> が評価できる。0.05T 以上では V<sub>3</sub> の立ち上がりは単調になり磁場の増加と共に J<sub>c</sub> は減少している。

### 4. まとめ

本研究では、第三高調波電圧誘導法を用いて STO バイク

リスタル基板に作製した YBCO 薄膜の J<sub>c</sub> の位置依存性と磁場依存性を評価した。その結果 I<sub>0</sub>-V<sub>3</sub> 特性が 2 段階で立ち上がり、粒間と粒内のそれぞれの J<sub>c</sub> を評価できた。また 0.05T 以上の磁場では V<sub>3</sub> は単調に立ち上がり、粒間に遮蔽電流が流れなくなっていることが確認できた。

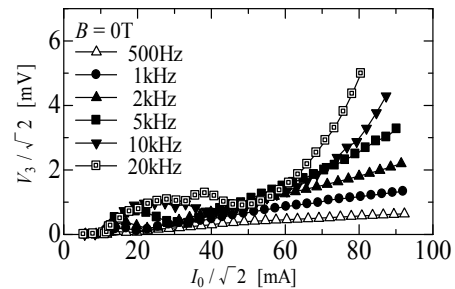


Fig.1 Coil current I<sub>0</sub> vs. the third harmonic voltage V<sub>3</sub> B = 0 T.

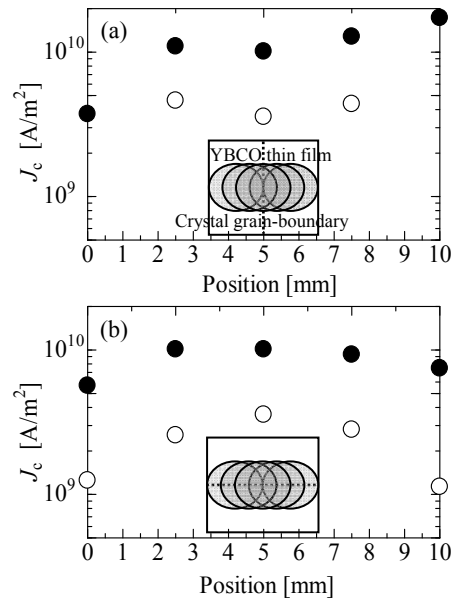


Fig.2 Spatial distribution of the YBCO thin film.

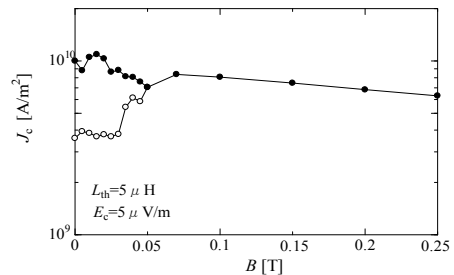


Fig.3 Magnetic field dependence of J<sub>c</sub>.

### 参考文献

1. H. Yamasaki, et al.: Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 3275.
2. H. Yamada, et al.: Physica C 451 (2007) 107.

## 超伝導直流送電ケーブルのための臨界電流の測定

## Critical current measurements for design of superconducting DC transmission power cables

孫 建, 山内 駿, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大学)

SUN Jian, YAMAUCHI Shun, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)

E-mail: j\_sun@isc.chubu.ac.jp

## 1. Introduction

The high temperature superconducting (HTS) cable for DC power transmission has been studied at Chubu University. A new 200 m HTS DC cable was installed into a test facility since 2009. This coaxial cable has two layers with different number of BSSCO wires, i.e., the inner layer has 23 wires and the outer layer has 16 wires for the different radius of these two conductor layers [1]. The rating current of the cable is 2 kA, which is determined by the maximum current of the outer conductor layer. In order to make the magnetic field line circular around the cable, the HTS wires should be wound as close as possible. In fact, the gap can not disappear in making a cable for the polygonal shape of the HTS wires. The gap effect will affect the critical current of HTS wire in the cable and finally determine the rating current of the cable. In order to observe how much gap effect on the critical current of the HTS wire in the cable, we have been studying the effect caused to the maximum current of the cables by the way of the HTS wire winding [2].

## 2. Experiment

Three multifilamentary DI-BSSCO wires by Sumitomo Electric Industries were set parallel to each other on a FRP (Fibre-reinforced plastic) plate as shown in Fig.1. The transport current was fed into three wires in series mode. Each wire is surrounded with one Kapton-tape layer ( $\sim 69 \mu\text{m}$ ) to be insulated with each other. Three voltage taps were attached on each wire. The critical currents of the wires which were set between two wires were measured with respect to the gap between the wires on the criterion of  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  at 77K.

## 3. Results and discussions

Fig.2 shows a comparison of E-I characteristics curve of a HTS wire for single and triple arrangement with gap of  $d = -2.25 \text{ mm}$  in Fig.1(b). The  $I_c$  of the wire in the self field is  $\sim 166 \text{ A}$ . The critical current of the middle wire for  $d = -2.25 \text{ mm}$  becomes larger than that of the single one. The  $I_c$  for two layer configuration becomes larger than the single one because the self magnetic field distribution is affected by the magnetic field from the current in the adjacent wires. With decreasing the gap, the distortion of the magnetic field becomes stronger by the adjacent wires, which would lead to reduction of the magnetic vertical component to the wide wire surface. Fig.3 presents the  $I_c$  of the middle wire with respect to the gap between the wires. The  $I_c$  of three layer is decreased drastically by 17% to 137 A. The  $I_c$  of the HTS wire becomes maximum for two layer arrangement. Through the systematic observation of the dependence of the critical current on the gap will give some hint on the design of a HTS DC cable. We simulate the magnetic flux lines by the commercial finite element code (ANSYS) [3]. In our work, we will present the experimental and calculated results and discuss the design of a HTS power cable especially for DC transmission.

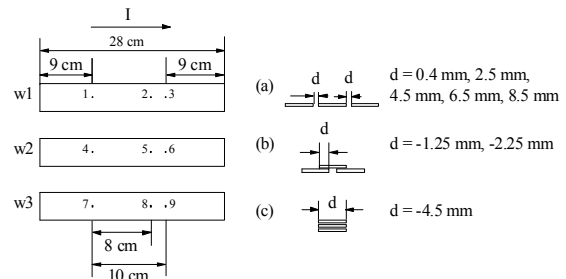


Fig.1 A scheme of the triple HTS wires arrangement

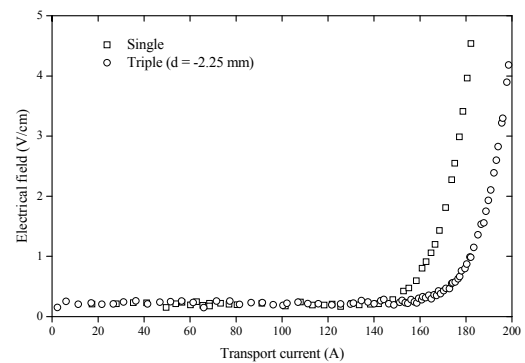


Fig.2 A comparison of E-I characteristics curve of a HTS wire for single and triple arrangement (Fig 1(b)).

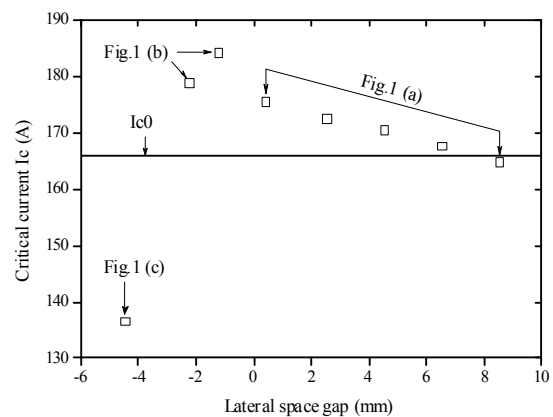


Fig.3 The critical current of a middle HTS w2 with respect to the lateral space gap.

## References

1. M. Hamabe, et al.; Abstracts of CSJ Conference, Vol.82 (2010) p.89
2. H. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.91
3. <http://www.ansys.com/>

# 66kV 系統超電導電力ケーブルの短絡事故を想定した REBCO 超電導線材の交流過電流通電特性評価 AC Over-Current Characteristics of REBCO Coated Conductors

児島 健太郎, 百足 弘史, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早稲田大学);  
大屋 正義, 大松 一也(住友電工); 大熊 武, 丸山 修(ISTEC-SRL)

KOJIMA Kentaro, MOMOTARI Hiroshi, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);  
OHYA Masayoshi, OMATSU Kazuya (Sumitomo Electric); OHKUMA TAKESHI, MARUYAMA OSAMU (ISTEC-SRL)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

## 1. はじめに

66 kV 系統超電導ケーブルの開発において、最大で 31.5 kA<sub>rms</sub>, 2 s の短絡事故電流が想定されている。そのため各素線に流れる短絡事故電流による線材の特性劣化や焼損しない電流の限界値を調査し、想定した事故電流に対する裕度を評価しておく必要がある。今回は、開発した計算機シミュレータ[1]を用いてケーブル内部の各超電導線材に流れる短絡事故電流を求めた。そして、このシミュレーションと同じ波形の電流を超電導線材に実際に通電し、電流のピーク値 ( $I_{peak}$ ) をパラメータに特性劣化までの裕度について調べた。またピーク値を変化させずに 30 回通電し、経年劣化に関する調査も行ったので報告する。なお、本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

## 2. シミュレーション

本解析に用いたシミュレーションモデル及びプログラムは参考文献[1]にて報告したものである。

解析条件として、ケーブルの仕様を以下のように想定した。フォーマの銅撚り線の断面積を 140 mm<sup>2</sup>、HTS 導体層は 4 mm 幅 Clad 基板線材を用いた 4 層 (総数 51 本) で外径 22 mm、絶縁層は PPLP 厚さ 6 mm で外径 34 mm、HTS シールド層は 4 mm 幅 Clad 基板線材を用いた 2 層 (総数 45 本) で外径は 37 mm、銅シールド保護層は 4 層で外径が 41 mm である。長さは 1 m とする。このケーブルに 31.5 kA<sub>rms</sub>、60 Hz、2 s の交流過電流が流れた時に導体層の各層に流れる電流波形を解析した。そして最も電流が流れる層の各素線が経験する電流波形を求めた。解析結果を Fig.1 に示す。

## 3. 実験方法

実験に用いた線材の諸元を Table.1 に示す。用意した 6 本の線材はすべて同じ諸元であり、安定化層として銀層と銅層がメッキ加工されたものである。

実験は GM 冷凍機による伝導冷却方式を採用し、線材両端から冷却し、初期温度は 77 K で行った。実験では線材両端に電圧端子を設置した。実験手順は以下の通りである。

- (1)初期  $I_{c0}$  (1  $\mu$ V/cm 基準) を測定
- (2)過電流のピーク値  $I_{peak}$  (Fig.1 参照) を  $I_c$  以上として通電
- (3) $I_c$  を測定し、 $I_c$  劣化の有無を確認

今回の実験では、 $I_c$  測定時に  $\pm 2$ A 程度の誤差が含まれるため、2 A 以上の  $I_c$  低下が観測されるまで交流過電流の  $I_{peak}$  を上げながら(2)、(3)の手順を繰り返した。経年劣化の調査では  $I_{peak}$  を固定して(2)、(3)の手順を 30 回繰り返した。

## 4. 実験結果とまとめ

$I_{peak}$  と  $I_c$  の関係を Fig.2 に、通電回数と  $I_c$  の関係を Fig.3 に示す。Fig.2 より  $I_{peak}$  が 235 A 以上で  $I_c$  の劣化が観測された。Fig.3 より  $I_{peak} = 210$  A で 30 回通電しても劣化は観測されなかった。今後は、模擬ケーブルを用いた浸漬冷却による調査をしていく予定である。

Table.1 Specifications of YBCO sample tapes

Length,	mm	150		
Width,	mm	2		
Cu (plating thickness)	$\mu$ m	20		
Ag (plating thickness)	$\mu$ m	5		
GdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub> Thickness	$\mu$ m	2.0		
Hastelloy Thickness	$\mu$ m	120		
$I_{c0}$	A	97.0	91.8	94.6

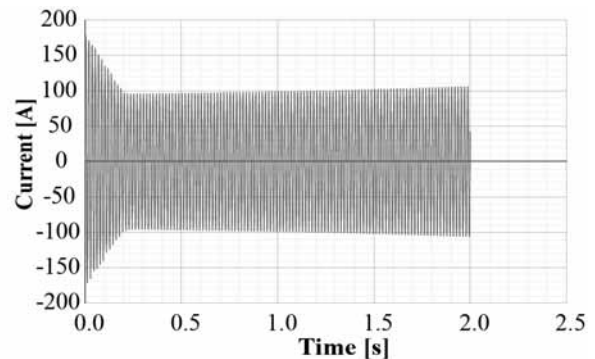


Fig.1 Simulation result of current trace in each REBCO

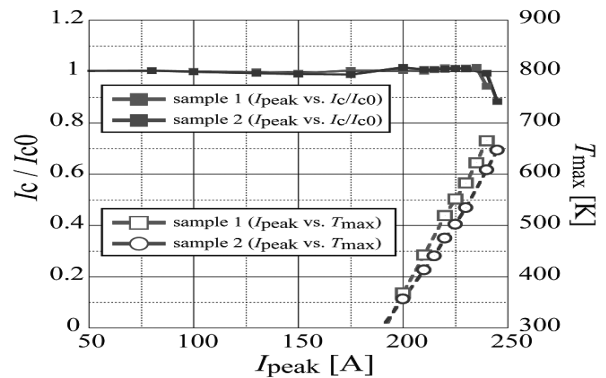


Fig.2 Experimental result of  $I_c/I_{c0}$  with AC over-current

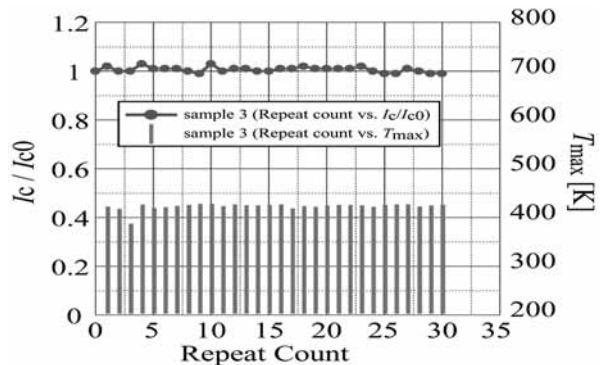


Fig.3 Experimental result

## 参考文献

1. WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi, et al: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.90



鉄道き電線用超電導ケーブルの線材特性評価

Characterization of superconducting wire for DC Cable used in the Railway

福本 祐介, 鈴木 賢次, 石原 篤, ミリアラ ムラリダ, 富田 優(鉄道総研)

FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji, ISHIHARA Atsushi, Miryala Muralidhar, TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: yfuku@rtri.or.jp

1. はじめに

一般的な在来線の直流電化区間の電圧は 1500V であり、現状のき電システムでは、変電所間隔が 2~3km 程度を超えると送電ロスが顕在化する。一方、超電導材料は直流で高い定格電流値が得られるため、鉄道用の送電ケーブルに適用した場合、電圧降下を防ぎ、変電所数の削減が期待できる。

鉄道総研では、直流電気鉄道のき電システムの送電損失低減を目的として、超電導ケーブルを直流き電線に適用する鉄道用超電導き電ケーブルの開発を行っている<sup>1)2)</sup>。

2. 設計

き電用変電所には短絡電流が流れた場合の保護として、直流高速度遮断器が接続されている。直流遮断の限度は遮断器の性能上、推定短絡電流 50kA、突進率  $3 \times 10^6$  A/sec、実遮断電流 25kA と定められており、これらの電流が超電導ケーブルに流れても損傷があってはならない。よって今回は、短絡電流対策のために、現在市販されている超電導線材について、短絡電流を模擬したパルス電流を印加し、特性変化について評価した。

3. 試験方法

試料線材は、現在市販されている 180A 級 Bi 系線材 (Type H, Type HT(CA50)、Type HT(SS20)) とした。試験方法は、短絡電流を模擬した 100msec のパルス幅をもつパルス電流を超電導線材に印加し、その前後で I-V 特性を比較し、臨界電流特性の劣化が見られるまで繰り返した。

4. 試験結果

はじめに、超電導線材が破断する電流値を把握するために、パルス電流値を  $I_c$  の 0.5 倍ずつ上げて測定を行った。結果を表 1 に示す。Type H と Type HT(SS20) においては、約 3.5 倍の電流値で破断したが、Type HT(CA50) においては約 5 倍の電流値で破断を確認した。

次に、破断直前での劣化を評価するために、破断する直前の電流値から段階的にパルス電流を上げていった。Type H の I-V 特性の変化を図 1 に、パルス電流値と  $I_c$  を図 2 に示す。Type H および Type HT(SS20) においては、 $I_c$  の 3 倍以上のパルス電流で劣化が見られた。また、Type HT(CA50) については、 $I_c$  特性の劣化はみられなかったものの、ラミネート材の剥離がみられた。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の戦略的イノベーション創出推進事業(S-イノベ)における研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の支援を受けて行った。

Table.1 Burnout current value (0.1sec pulse)

Sample No.	$I_c$ [A]	Burnout current value [A]
Type H-01	181	626
Type H-02	174	603
Type HT(SS20)-01	190	661
Type HT(SS20)-02	190	661
Type HT(CA50)-01	194	966
Type HT(CA50)-02	196	977

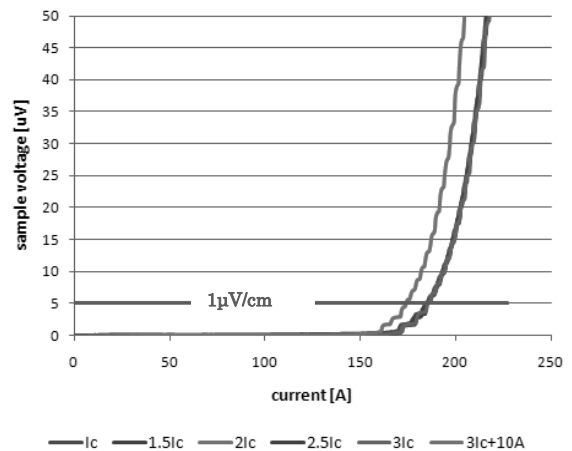


Fig.1 Current-voltage characteristics (100msec pulse, Type H)

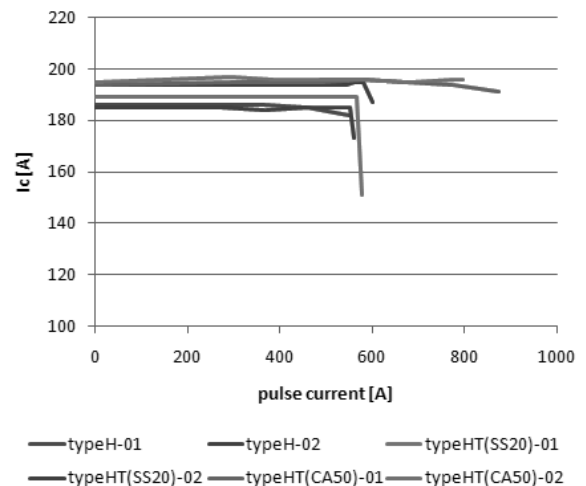


Fig.2 Change of  $I_c$  by pulse current

参考文献

1. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki: Abstracts of CSJ Conference, Vol81 (2009) p.95
2. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, A. Ishihara, M. Miryala: Abstracts of CSJ Conference, Vol82 (2009) p.21

## 200 m 超伝導直流送電ケーブル実験装置の通電試験

### Current-feeding test of a 200 m DC superconducting power cable test facility

浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 孫 建, IVANOV Yury, 芳村 幸治,  
福田 真治, 杉野 慎, 山田 秀貴, 山口 作太郎 (中部大)

HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, SUN Jian, IVANOV Yury, YOSHIMURA Kouji,  
FUKUDA Shinji, SUGINO Makoto, YAMADA Hideki, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

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

#### 1. はじめに

中部大学では 20 m 級超伝導直流送電ケーブルでの実験結果[1]に基づいて、200 m の超伝導直流送電ケーブルの実験装置を製作し、2010 年 1 月より実験を開始した[2]。これまで、同年 3 月までの一回目の冷却試験に引き続き、8 月より二回目の冷却試験を行なった。ここでは、大電流での直流通電試験の結果、および直流通電時に交流電流を重畳して得られたケーブルのインダクタンス測定の結果について報告する。

#### 2. 通電試験

Table 1 に 200m 超伝導直流送電ケーブル実験装置の様態を示す。本実験装置の特徴の一つに全部で 39 本使用している DI-BSCCO<sup>®</sup>線材(住友電工製)1 本ずつに電流リードを接続している点がある。そして、この電流リードからの熱侵入を低減させるために、ペルチェ電流リード(PCL)を使用しているが、比較のために一部に銅のみの電流リードを用いている[3]。このため、銅電流リードの部分は PCL よりも抵抗が低く、より電流が流れる偏流状態になる。そのため、一度目の通電試験では銅電流リードに接続された一本の線材の超伝導状態が破れ、このことに起因するクエンチが発生した。そこで、各電流リードの配線に数 mΩ の外部抵抗を接続することで電流バランスを取った後に、通電試験を行なった。このとき、クエンチは抑えられ、ケーブル配管各部で測定した液体窒素温度が 77.2~78.9 K のときに、1.5 kA まで、超伝導状態のまま通電できた。

#### 3. ケーブル・インダクタンス測定

直流超伝導ケーブルの利点の一つに、磁気エネルギーによる電力貯蔵効果がある。特に本実験装置の場合は、真空断熱二重配管の外管に磁性体である鋼管(厚さ 6 mm)を使用しているため、この効果が大きいことが期待できる。そこで、直流通電時に交流電流を重畳させた場合のケーブルインダクタンスを測定した。仕様通りに同軸二層の線材に向きの異なる電流を流す「両極性(bipolar)」の通電ではインダクタンスは小さくなるため、線材の一層のみに通電する「単極性(monopolar)」の通電も行なった。その結果を Fig. 3 に示す。Bipolar の場合は周波数によらず 0.016 mH 程度であるが、monopolar の場合は 10Hz 以下の周波数に対して 0.37 mH 程度になった。従って、線材一層のみに通電した場合、この 200 m 超伝導ケーブルに蓄えられる磁気エネルギー  $Q$  は

$$Q = LI^2/2 = 28.8 \text{ kJ}$$

となった。 $Q$  は電流の二乗に比例するが、大電流では鋼管の飽和磁束に達する可能性があるため、今後、さらに大電流でのインダクタンス測定を行なう予定である。

#### 参考文献

1. M. Hamabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19 (2009) p.1778

2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.89
3. T. Kawahara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) 1C-a09 (this conference)

Table 1 Specification of 200 m DC superconducting power cable test stand in Chubu University.

Current	DC 2 kA at 78 K
Voltage	DC ±10 kV
Cable structure	Coaxial, bipolar current feed
SC tape	39 DI-BSCCO <sup>®</sup> (SEI) HTS tapes (23 tapes in inside SC layer, 16 tapes in outside SC layer)
Current leads	72 Peltier current leads and 6 copper leads

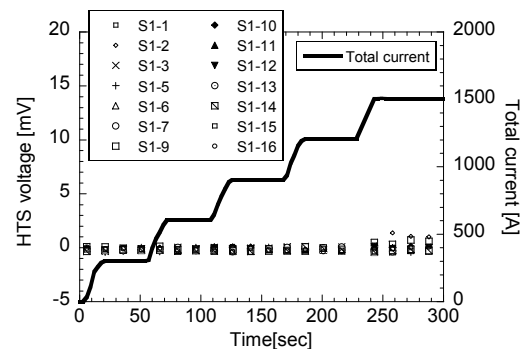


Fig. 1 Current feed test up to 1500 A. Here, LN2 temperatures in the cryopipe ranged from 77.2 to 78.9 K.

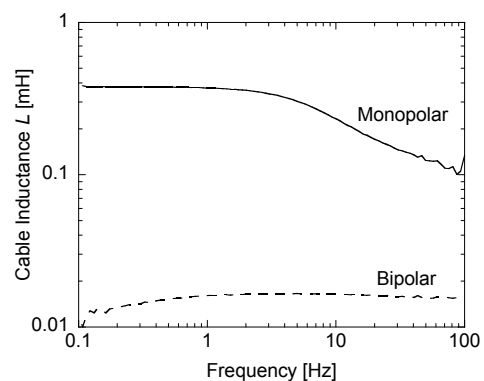


Fig. 2 Frequency dependence of 200 m superconducting DC cable under DC 400 A current-feed.

# 三角形または多角形断面の導体のインダクタンス

## Inductance for conductors with triangular or polygonal cross-section

富中利治 (文科省,理研)

TOMINAKA Toshiharu (MEXT, RIKEN)

E-mail: tominaka@mext.go.jp

### 1. はじめに

低周波の電流について、常伝導並列回路の電流分布は抵抗で決まるが、抵抗ゼロの超伝導並列回路の電流分布は、回路のインダクタンスで決まると考えられる。それで、超伝導の導体を要素に分割して各要素の自己インダクタンス、要素間の相互インダクタンスから導体内の電流分布を計算できる。したがって、インダクタンス計算は古くさいと思われるかも知れないが、超伝導工学の分野では、重要である。任意断面の2次元導体の自己、相互インダクタンス計算において、Fig.1 に示すような三角形または多角形断面の長い導体についてのインダクタンスの公式(厳密解)は応用上有用である[1,2]。既に、自己及び相互インダクタンスまたはその幾何学的平均距離について複素形式の公式を報告した[1]。この公式を用いた数値計算に問題があることがわかり、現在、計算の整合性の検討を進めている。

### 2. 多角形での幾何学的平均距離の解析的な表式

三角形または多角形断面の長さ  $l (> R_{pq})$  の長い導体間の相互インダクタンス  $L_{pq}$  は次式のように表せる。

$$L_{pq} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{R_{pq}} - 1 \right) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\ln 2l - 1) - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln R_{pq} \quad (1)$$

ここで、 $R_{pq}$  は幾何学的平均距離で、Fig.1 に示すような  $N$  角形、 $M$  角形の角の複素平面の座標を、 $\zeta_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ )、 $z_j$  ( $j=1,2,\dots,M$ ) で表すと、次のように求められる。

$$\ln R_{pq} = \frac{1}{8} \frac{1}{S_p S_q} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N A(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1}) - \frac{25}{12} \quad (2)$$

ここで、 $S_p, S_q$  は各導体の断面積を表す。 $A(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1})$  は次のように表せる。ここで、 $\Delta z_j = z_{j+1} - z_j$ 、 $\Delta \zeta_k = \zeta_{k+1} - \zeta_k$ 、

$$A(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1}) = \frac{\Delta z_j}{\Delta z_j} \left[ \frac{(z^* - \zeta^*)(z - \zeta)^3}{6} \ln(z - \zeta) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} - \left( \frac{\Delta z_j}{\Delta z_j} \right)^2 \left[ \frac{(z - \zeta)^4}{24} \ln(z - \zeta) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} - \frac{\Delta \zeta_k}{\Delta \zeta_k} \frac{\Delta z_j}{\Delta z_j} \left[ \frac{(z - \zeta)^4}{24} \ln(z - \zeta) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} + \frac{\Delta \zeta_k}{\Delta \zeta_k} \left[ \frac{(z - \zeta)(z^* - \zeta^*)^3}{6} \ln(z^* - \zeta^*) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} - \left( \frac{\Delta \zeta_k}{\Delta \zeta_k} \right)^2 \left[ \frac{(z^* - \zeta^*)^4}{24} \ln(z^* - \zeta^*) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} - \frac{\Delta \zeta_k}{\Delta \zeta_k} \frac{\Delta z_j}{\Delta z_j} \left[ \frac{(z^* - \zeta^*)^4}{24} \ln(z^* - \zeta^*) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} \quad (3)$$

更に、 $A(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1})$  は実数なので、上式は、次のように変形、簡単化できる。

$$\ln R_{pq} = \frac{1}{8} \frac{1}{S_p S_q} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \left\{ \frac{A + A^*}{2} \right\} - \frac{25}{12} = \frac{1}{8} \frac{1}{S_p S_q} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N B(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1}) - \frac{25}{12} \quad (4)$$

$$B(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1})$$

$$= \text{Re} \left\{ \left[ \frac{(z_{j+1} - z_j)^*}{(z_{j+1} - z_j)} + \frac{(\zeta_{k+1} - \zeta_k)^*}{(\zeta_{k+1} - \zeta_k)} \right] \left[ \frac{(z^* - \zeta^*)(z - \zeta)^3}{6} \ln(z - \zeta) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} - \left[ \frac{(z_{j+1} - z_j)^*}{(z_{j+1} - z_j)} + \frac{(\zeta_{k+1} - \zeta_k)^*}{(\zeta_{k+1} - \zeta_k)} \right]^2 \left[ \frac{(z - \zeta)^4}{24} \ln(z - \zeta) \right]_{\zeta=\zeta_k}^{\zeta=\zeta_{k+1}} \Big|_{z=z_j}^{z=z_{j+1}} \right\} \quad (5)$$

### 3. 幾何学的平均距離の複素形式の公式の評価

Fig.2 に示すような正方形、長方形、円環の従来から知られた自己インダクタンスと、それらを分割した三角形または四角形要素の自己、相互インダクタンスから求めた値と比較して、公式の整合性を調べた。Fig.2(a)においては、分割無しでの理論値と分割した要素の集合導体の数値計算の値は一致し、また、Fig.2(c)の内半径 9mm、外半径 11mm の円環において、幾何学的平均距離  $R_{pp} = 10.356\text{mm}$  (分割無しでの理論値)  $R_{pp} = 10.349\text{mm}$  (72 分割での数値計算の値) となることを確認した。ただし、現状、任意の三角形または多角形断面の長い導体から構成された集合導体についての計算の整合性について問題が残っている。

$\ln R_{pq}$  について、 $A(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1})$  または  $B(\zeta_k, \zeta_{k+1}, z_j, z_{j+1})$  の式は共に数学的には同等なはずであるが、 $A$  を用いた(2)式に比べ、 $B$  を用いた(4)式の方が簡単で、Mathematica での数値計算の問題と思われることも少ない。複素形式の式が複雑なことなどにより、問題の解明には至っていない。

### 4. まとめ

汎用性の高い三角形または多角形断面の長い導体についてのインダクタンスの公式は、超伝導工学の分野などで有用で、今後、問題の解明、その後の活用を期待したい。

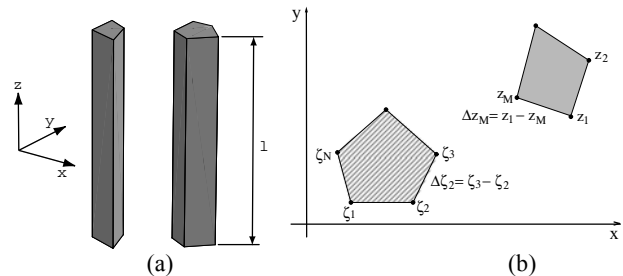


Fig.1. Schematic view of two parallel conductors with triangular or polygonal cross-section, (a). Cross section of two parallel  $N$ -sided polygonal conductor of the vertices,  $\zeta_1, \zeta_2, \dots$ , and  $\zeta_N$  with  $\zeta_{N+1} = \zeta_1$ , and  $M$ -sided polygonal conductor of the vertices,  $z_1, z_2, \dots$ , and  $z_M$  with  $z_{M+1} = z_1$ , in the counterclockwise order (b).

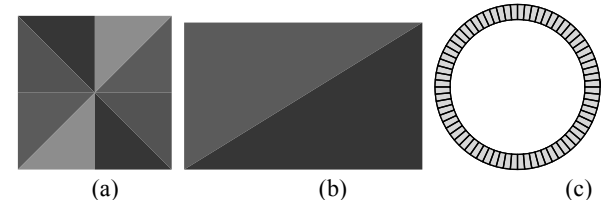


Fig.2. Divided cross-section for the confirmation of inductance calculation by Eq.(2) or (4). It results that the numerical calculation by Eq.(4) is simple and better than Eq.(2).

### 参考文献

- [1] T. Tominaka, Abstracts of CSJ Conference, vol.82, p.31 (2010).
- [2] T. Tominaka, J. Phys. A:Math. Gen. vol.39, p.6045-6055 (2006).

# イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発 (4)

## - 均電流化と耐短絡電流 -

### Winding technology development of Y-based HTS power transformers (4)

#### - Shunt current uniformity and short-circuit current withstand -

岡元 洋, 林 秀美(九州電力); 岩熊成卓, 富岡 章(九州大学); 齊藤 隆(フジクラ);  
五所嘉宏, 町敬人, 田辺圭一, 塩原 融(SRL)

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IWAKUMA Masataka, TOMIOKA Akira (Kyushu Univ.);  
SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); GOSHO Yoshihiro, MACHI Takato, TANABE Keiichi, SHIOHARA Yuh (SRL)  
E-mail: hiroshi\_a\_okamoto@kyuden.co.jp

#### 1. はじめに

経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の超電導変圧器技術開発では、大電流化と耐短絡電流の巻線技術にも取り組んでいる。本プロジェクトが開発を目指す超電導変圧器 3 相 20MVA (66/6.9kV、175/1,674A) では、二次巻線の定格電流は 2kA 級で系統事故時の過電流は定格の約 7 倍程度となる。大電流通電のための多層並列巻線の素線電流を均一にするには、転位手法の最適化が重要である。変圧器巻線が一定時間の事故電流(短絡電流)に耐えるには、超電導線材の安定化銀層を含めた銅などの保護構造の最適化が必要である。

今回、12 層 2 並び転位巻線の交流通電試験および 400kVA 変圧器の短絡試験について報告する。

#### 2. 実験方法

12層2並列転位巻線の仕様は、巻線内径  $\phi$  350mm、48 ターン、転位数 24 である。Fig.1 に転位巻線(外径  $\phi$  0.4m、高さ 1.0m)の外観を示す。液体窒素温度で、直流  $I-V$  特性および交流通電による分流特性を評価した。24 素線の電流測定はログスキーコイルで実施した。

400kVA 変圧器の仕様は、単相、電圧 6.9/2.3kV、電流 58/174A、%インピーダンス 15%である。変圧器巻線はサブクール液体窒素温度(66K)に冷却した。Fig.2 には 400kVA 変圧器(外径  $\phi$  1.0m、高さ 2.3m)の外観を示す。短絡発電機を使用した短絡試験では、最大電流となるために変圧器二次側を電圧位相 0 度で短絡した。短絡電流による健全性を確認するために、試験の前後で、変圧器巻線の%インピーダンスおよび直流  $I-V$  特性を評価した。

#### 3. 実験結果

転位巻線は、直流通電(最大 1,120A)により超電導性能を確認後に交流通電は最大 800A<sub>rms</sub> まで通電し、電流分流を確認した。Fig.3 は 800A<sub>rms</sub> 通電時の 24 素線ごとの電流分流率を示す。電流分流率のバラツキは 88%~114%であった。電流分流率  $\pm 15\%$  以下を達成し、大電流通電時の巻線電流を均一化する転位手法が確立できた。

400kVA 変圧器の短絡試験時(0.2 秒間)における一次巻線電圧と二次巻線電流を Fig.4 に示す。短絡直後に一次電圧は 10%程度低下し、二次電流は定格の 6 倍程度となった。0.2 秒経過後も電流が減衰しないのは、現有の変圧器(銅線等の巻線)と抵抗成分比率が異なる影響である。短絡試験後、巻線の%インピーダンスおよび直流  $I-V$  特性が試験前と比較し変化がなかったことから巻線の健全性および耐短絡電流構造が検証できた。

今後、巻線の大電流化特性は、長尺線材による実器サイズのモデルによって検証する。

#### 謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」を NEDO 委託事業により実施した。富士電機システムズ(株)関係者の支援に謝意を表します。



Fig.1 Transposed coil.



Fig.2 400kVA transformer.

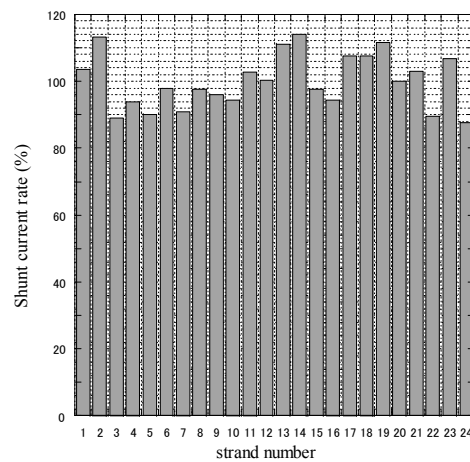


Fig.3 Shunt current rate of strands at 800A<sub>rms</sub> and 77K.

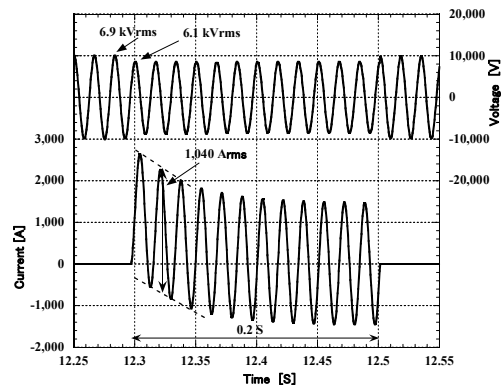


Fig.4 Voltage and current during the short-circuit test.

## REBCO 超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の検討

## Study on the response of a REBCO superconducting transformer to fault excess current

堤 智章, 乙成 貴明, 富岡 章, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓(九州大学); 岡元 洋, 林 秀美(九州電力); 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ); 大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

TSUTSUMI Tomoaki, OTONARI Takaaki, TOMIOKA Akira, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.); OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); OKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: tsutsumi@sc.kyusyu-u.ac.jp

## 1. はじめに

超電導を電力機器に応用することで、小型・軽量化、高効率化といった効果が得られることが期待されている。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」では、66kV/6.9kV-20MVA級の超電導変圧器の設計・製作技術の確立を目指している。配電用変圧器として実用化する為には、電力系統での短絡事故による過大電流に耐える短絡性能が必要となる。そこで、本研究では、20MVA級の超電導変圧器の技術が検証できる最小容量の6.9kV/2.3kV-400kVA級の超電導変圧器を試作し、二次側の短絡事故を模擬した突発短絡試験により、過大電流に対する応答特性の評価を行った。さらに、数値解析コードを用いて、応答特性の詳細を検討した。

## 2. 設計・試作・試験

今回、試験に使用した超電導変圧器の仕様を Table.1 に示す。超電導変圧器に用いた超電導導体は、銅線をハンダ付けした REBCO 線である。この短絡モデルでは、短絡過大電流が流れた際に、銅線に電流を転流させることで発熱を抑えること、さらに REBCO 線材特性劣化を防ぐ事を目的としている。この構成では限流効果は期待できないが、発熱量を抑制するという観点からは限流効果を有する場合と同等の効果をえられる。試作した変圧器は、耐電圧試験や通電試験などを行い、設計通りであることを確認した後、突発短絡試験を行った。短絡試験前後において、I-V 特性、変圧器巻線のインピーダンスに変化が無かったことから、短絡電流に耐えることが出来たといえる。

Table.1 parameters of superconducting transformer

	一次	二次
相数	単相	
定格容量	400kVA	
定格電圧	6.9kV	2.3kV
定格電流	58A	174A
定格周波数	60Hz	
%インピーダンス	15%(400kVA 基準)	
超電導線並列本数	1本	3本
ターン数	576	192
運転温度	66K(過冷却液体窒素)	
外寸	幅 1175mm×奥行 1020mm ×高さ 2284mm	
重量	2800kg(冷媒含)	

## 3. 数値解析

二次側を一次側に換算した回路方程式を用いた数値解析コードにより数値解析を行い、通電電流、巻線温度、常電導抵抗割合の時間変化を算出した。

突発短絡試験における通電電流の時間変化を Fig.1 に示す。図から読み取れるように、実験結果と数値解析結果はよく一致しており、解析コードは概ね妥当であると考えられる。

次に、巻線の温度変化を Fig.2 に示す。T1、T2 はそれぞれ一次、二次巻線で垂直磁場が印加され、温度上昇が顕著な上端部である。短絡電流が銅線に転流することで温度上昇が抑えられていると考えられる。

当日、常電導抵抗割合、限流モデルの検討等も報告する。

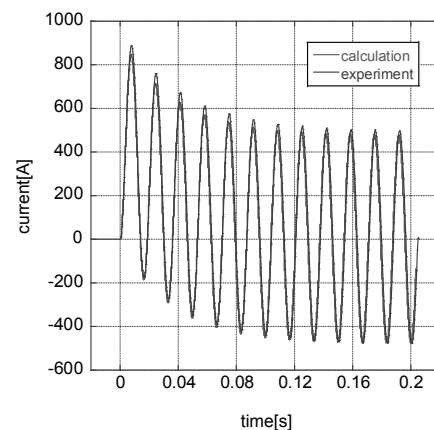


Fig.1 calculation and experiment current

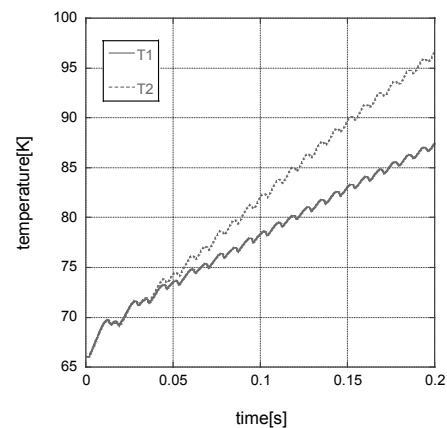


Fig.2 temperature of winding

## 謝辞

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

## 500kW REBCO 超電導同期モータの設計検討

## Design study of a 500kW REBCO superconducting synchronous motor

友田 慎一郎, 緒方 俊之, 岩熊 成卓(九州大学); 長谷 吉二, 佐藤 寿洋, 富岡 章, 今野 雅行(富士電機);  
山田 穰, 植田 浩史, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

TOMODA Shinichiro, OGATA Toshiyuki, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);  
HASE Yoshiji, SATO Toshihiro, TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric);  
YAMADA Yutaka, UEDA Hiroshi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)  
E-mail: tomoda@sc.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

REBCO 超電導線材は良好な磁場中臨界電流密度特性を有し、それをモータに応用することで小型化、高効率化が期待できる。我々は、REBCO 超電導線材を用いた産業用、大型自動車用の 500kW-1800rpm 超電導同期モータの設計検討を行っており、これまで REBCO 超電導線材の臨界電流の温度、磁場依存性を考慮した上で、界磁巻線が電機子とのギャップにおいて最も効率よく磁場を発生できる形状について検討してきた。今回はその形状を用いて、ギャップに最大磁束密度 2T を発生できる空芯のモータの構造を明らかにし、定格速度時に回転子に印加される変動磁場について数値解析を行い、界磁超電導コイルに発生する交流損失について見積もったので報告する。

## 2. 500kW REBCO 超電導同期モータの仕様

Table 1 に超電導同期モータの仕様を示す。使用する REBCO 超電導線材としては、厚さ  $100\mu\text{m}$  のハステロイテープを基板とする幅 5mm、超電導層厚  $1\mu\text{m}$ 、銀層厚  $10\mu\text{m}$  で銅安定化層を加えた全体が  $200\mu\text{m}$  厚のものを想定した。この臨界電流  $I_c$ 、交流損失の温度、磁場特性としては、現在開発されている線材を参考にしており、臨界電流 128A @77K、0T である人工ピン入りの IBAD(GZO)-PLD(GdBCO+BZO)線材を想定した。

## 3. 解析方法

Fig.1 にモータ断面を示す。回転子内の超電導界磁巻線は巻数の異なるダブルバンケーキコイルを 5 個積層した菱形断面構造とし、界磁電流は臨界電流の 0.8 倍に設定した。電機子巻線の素線は銅線とした。解析は市販の電磁場解析ソフト Ansys を用いた 2 次元磁場解析である。まず、電機子巻線に三相交流を流し、回転子を定格速度で回転させながら回転子に印加される磁場変動について数値解析を行った。次に、その磁場振幅から超電導界磁巻線に発生する交流損失を見積もった。ここで、臨界電流および交流損失については線材の垂直磁界成分より算出した。

## 4. 解析結果と考察

数値解析の結果、固定子変動磁場により回転子に印加される磁場変動の振幅は  $10^{-4}$  から  $10^{-5}$  T オーダーであり、そこから見積もられる交流損失は 1W 以下で無視できることが分かった。また、トルクの変動も 0.1% 程度と小さいため、ダンパーシールドが無くても振動・騒音が問題にならず、小型化にもつながる。今後、さらに小型化、高効率化を目指して設計検討を進めていく。詳細は当日報告する。

## 謝辞

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

Table 1 Design parameters of the Superconducting motor

Rating/speed	500kW/1800rpm
Rating voltage	440V
Rating current	700A
Frequency	60Hz
Number of pole	4
Inside diameter of stator	360mm
Outside diameter of stator	700mm
Direct axial length	210mm
Field coil	Diamond-shaped coil
Minimum critical current	292A
Rated current	230A
Tape length per a pole	1510m
Operating temperature	40K
Maximum magnetic field in the gap	2.06T
Armature winding	Copper winding
Number of turn per slot	6

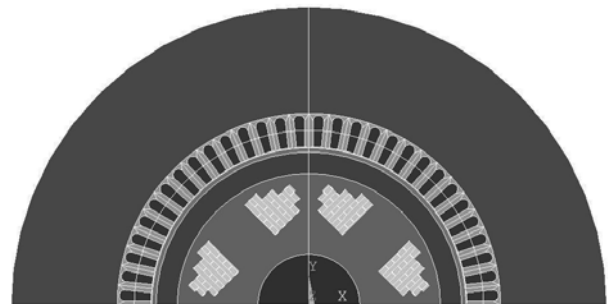


Fig.1 Cross section of REBCO Superconducting motor

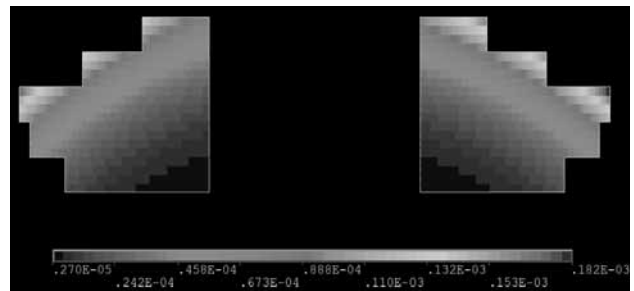


Fig.2 2D FE calculation results of magnetic field distribution for field coil cross section