

## 銅酸化物超伝導材料における実際のキャリアドープ状態制御

### Actual Control of Carrier Doping State of Cuprate Superconducting Materials

下山淳一, 元木貴則 (青学大)  
**SHIMOYAMA Jun-ichi, MOTOKI Takanori** (Aoyama Gakuin Univ.)  
E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

#### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>(RE123)では、この系の発見当初より大きな酸素不定比性の存在と、超伝導特性が酸素組成に大きく依存することが知られている。RE123 の相生成時の  $\delta$  は一般に 0.6 以上であり、90 K 級の超伝導の発現には必ず  $\delta \sim 0.07$  となるように酸素アニールが行われる。RE123 における酸素不定比性はブロック層の CuO<sub>1-δ</sub>面の酸素組成が 0~1 の範囲で変化することによるもので、この面内方向、すなわち *ab* 面方向の酸素拡散が速やかで、*c* 軸方向のそれは極めて遅い。 $\delta > 0.5$  である正方晶領域では CuO 面の酸素サイトの 3/4 以上が空孔でかつ高温領域であることから酸素拡散は極めて速く、一方、 $\delta < 0.5$  の CuO 鎮が形成される直方晶領域では酸素サイトが半減し空孔の割合も低下すること、さらに温度が比較的低いことから酸素拡散が遅くなる<sup>[1]</sup>。RE123 単結晶に関する酸素の拡散係数の報告は多いが、その値は極めて小さく RE123 溶融凝固バルクのような大型結晶材料や RE123 薄膜線材で行われている酸素アニール工程では十分に酸素導入できていないことになってしまう。この矛盾は実際の材料においては直方晶相における双晶など様々な構造的な欠陥が存在し、さらに RE123 結晶内に不純物相結晶が析出しているなど、実効的な酸素拡散距離が大きく異なることを意味している。例えば RE123 薄膜線材間の超伝導接合では IBAD 基板上の線材間では接合形成後の酸素導入が困難である<sup>[2]</sup>のに対し、RABiTS 基板上の線材間ではそれが比較的容易である<sup>[3]</sup>。これは RE123 薄膜内の粒界も製法によって酸素の高速拡散経路になり得ることを示唆するものである。

Bi 系超伝導材料を含めて、様々な形態、作製方法、微細組織を有する銅酸化物超伝導材料のキャリアドープ状態は酸素量調整だけでなく元素置換によっても行われるが、後者の場合、仕込組成と実際の材料の結晶中の組成が必ず一致するものでないことも明らかである。

以上の背景のもと、本研究では実際の銅酸化物超伝導材料におけるキャリアドープ状態制御方法について再考を行い、より優れた臨界電流特性をより有効な方法で実現する方法の提案を目指している。今回は RE123 溶融凝固バルクにおける後熱処理過程を見直した結果を中心に報告する。

#### 2. 実験

日本製鉄社製 Gd123 溶融凝固バルク(育成後の酸素アニール無し)の温度、雰囲気酸素分圧の変化に対する重量緩和挙動を高温微量熱天秤(CAHN-1000)を用いて評価した。試料の形状は 10×10×5 (// *c*) mm<sup>3</sup>、重量は 3.3 g ある。また、*ab* 面方向の 1 辺を 2.8 mm に薄くした試料 3 片(総重量 2.8 g)も同様な評価を行った。超伝導特性は同時にアニールした小片試料について SQUID 磁束計を用いて評価した。

#### 3. 結果と考察

一連の熱重量測定実験より明らかになったことを以下に列挙する。

- ・結晶成長後酸素アニールを行っていない Gd123 溶融凝固バルクの  $\delta$  は 0.6 より大きい正方晶である。
- ・結晶成長後の試料に酸素アニールを行った場合、正方晶領域、直方晶領域とも酸素拡散が遅い(通常のバルクにおける現象)。
- ・結晶成長後にバルクに対し酸素アニールの前に 800°C, 酸素分圧 1 kPa 中( $\delta \sim 0.7$ )で 12 時間以上アニールする過程を加えると、正方晶領域、直方晶領域とも酸素拡散が速やかになる。
- ・正方晶の試料を還元雰囲気下で冷却後、直方晶となる温度で酸素アニールを行い正方晶→直方晶転移を起こした場合、転移温度が低いほど、直方晶領域での酸素拡散が速やかになる。

3 点目の還元アニールによる酸素の高速拡散化は CuO 鎮面に残存する微量の C の除去と Ba サイトへの Gd 固溶を抑制によるものと考えられる。4 点目の正方晶→直方晶転移温度による重量緩和挙動の変化を Fig. 1 に示した。この違いは双晶を導入する温度が低いほどその密度が高まる事を示唆している。講演では小片試料の超伝導特性、バルクの捕捉磁場特性についても報告する。

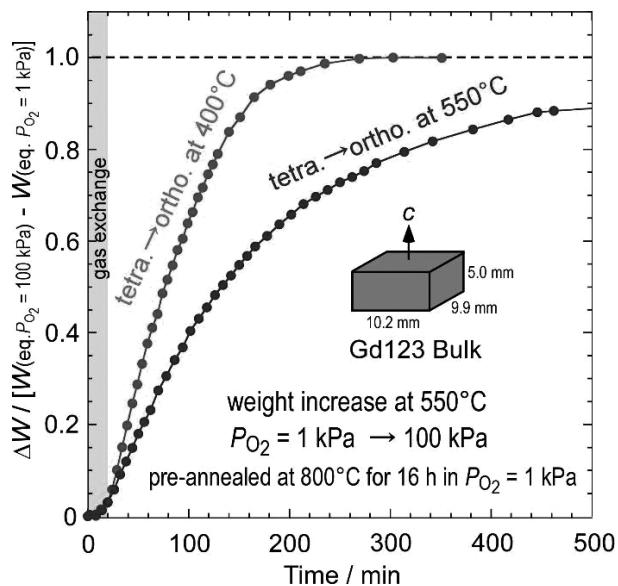


Fig. 1 Weight increase processes of a Gd123 bulk at 550°C from the equilibrium state under  $P_{O_2} = 1 \text{ kPa}$  to 100 kPa.

#### 参考文献

- [1] 下山ほか, 銅酸化物超伝導体の化学 (講談社、1988) p74.
- [2] Y. Park *et al.*, *NPG Asia Materials* **6** (2014) e98
- [3] K. Ohki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **30** (2017) 115017

## 人工ピンを添加した YBCO 超電導薄膜の臨界電流密度の膜厚依存性

### Film thickness dependence of critical current properties of YBCO superconducting film with artificial pin

木内 勝(九工大);土屋雄司, 伊東智寛, 吉田 隆(名大);尾崎壽紀(関西学院大);船木修平(島根大)

KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. Of Tech.); TSUCHIYA Yuji, ITO Tomohiro, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);

OZAKI Toshinori (Kwansei Gakuin Univ.); FUNAKI Shuhei (Shimane Univ.)

E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

#### 1.はじめに

高磁界中での高い臨界電流密度  $J_c$  を得るために、超伝導体内にナノ技術を用いた人工ピンの導入が試みられ、優れた特性が得られつつある。一方で、高温度及び高磁界での  $J_c$  は、超電導層厚さの影響を受けることが知られている。さらに、線材の接合技術の向上により長尺も開発され、この線材を用いた高磁界マグネットへの利用も期待される。このようは高磁界下では  $J_c$  や磁化の緩和も顕著になることから、超電導体の利用環境に適した材料開発が必要である。

本研究では、人工ピンを導入した YBCO 薄膜の超電導層の厚さを変化させた場合の  $J_c$  及び緩和特性の影響に注目し、 $J_c$  及び磁化の緩和特性を、SQUID 磁力計を用いて測定した。これらの結果に対して磁束クリープの影響を考慮した磁束クリープ・フローモデルを用いた理論解析を行い、超電導層の厚さが  $J_c$  及び磁化の緩和特性へ与える影響を調べた。

#### 2. 実験

超電導層厚が異なる人工ピン入り  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  薄膜は、IBAD-MgO 基板上に液相を介した PLD 法を用いて作製した [1]。超電導層の厚さ  $d$  は 500 nm と 1000 nm の 2 つを準備した。また、人工ピンは、 $\text{BaHfO}_3$  を 3 vol.% 混合したターゲットを用いることで導入した。直流磁化率から評価した 2 つの試料の臨界温度  $T_c$  はそれぞれ 88.1 K と 89.2 K と、1000 nm の方が若干高い特性になった。

$J_c$  及び磁化  $M$  の緩和は、SQUID 磁力計を用いて測定を行った。また、磁化  $M$  の時間対数緩和から見かけのピン・ポテンシャル  $U_0^*$  を

$$-\frac{d}{d \log t} \left( \frac{M}{M_0} \right) = \frac{k_B T}{U_0^*}$$

の関係式から求めた。ここで  $M_0$  は初期磁化である。

全ての測定において、磁界  $B$  は  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  薄膜の広い面に対して垂直、すなわち  $c$  軸方向に加えた。

#### 3. 結果及び検討

Fig. 1 に 20 ~ 77 K の  $J_c$  の磁界依存性を示す。低温度領域では、超電導層が薄い 500 nm の  $J_c$  が大きい。一方で、高温度領域では、比較的低磁界領域では 500 nm の方が大きいが、磁界の増加と共に 1000 nm の差が小さくなり、例えば 70 K の 4 T 以上では、1000 nm の  $J_c$  が大きくなる。

Fig. 2 に磁化の時間対数緩和から求めた見かけのピン・ポテンシャル  $U_0^*$  の温度依存性を示す。低温度領域では、超電導層の違いに関わらず  $U_0^*$  は同程度である。一方で、60 ~ 77 K の高温度領域において超電導層の厚い 1000 nm の方が  $U_0^*$  が大きくなる。一般に高温度及び高磁界領域で  $J_c$  が低下すると、超電導層の厚さ方向のピンニング相関距離  $L$  は、磁束クリープの影響を減らすために長くなる。しかし、超電導層の厚さ  $d$  が薄いと  $L$  が  $d$  で制限され、 $J_c$  を決定するピンニング・ポテンシャル  $U_0$  が小さくなる。すなわち、 $d$  が薄い 500 nm の方が  $U_0$  に比例する  $U_0^*$  も小さくなる。したがって、磁束クリ

ープ影響が顕著となる高温及び高磁界領域では  $d$  が厚い方が有利である。これらの実験結果と磁束クリープ・フローモデルの理論結果との比較及び詳細な議論は発表当日行う。

#### 謝辞

産総研 和泉輝郎氏から IBAD 基板の提供を受けた。

#### 参考文献

[1] T. Ito *et al.*, to be submitted to SuST.

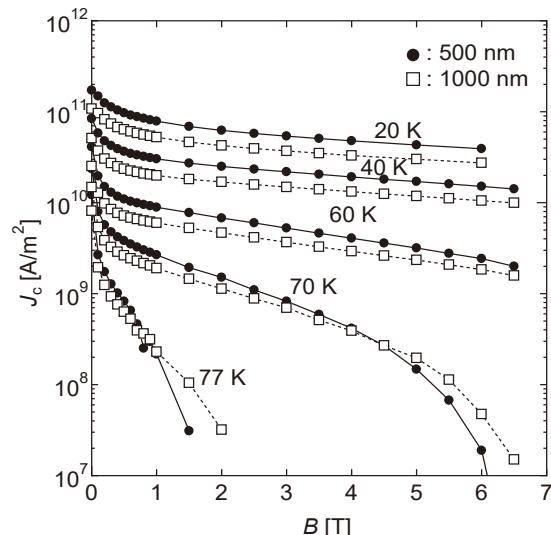


Fig.1 Magnetic field dependence of critical current density of two samples.

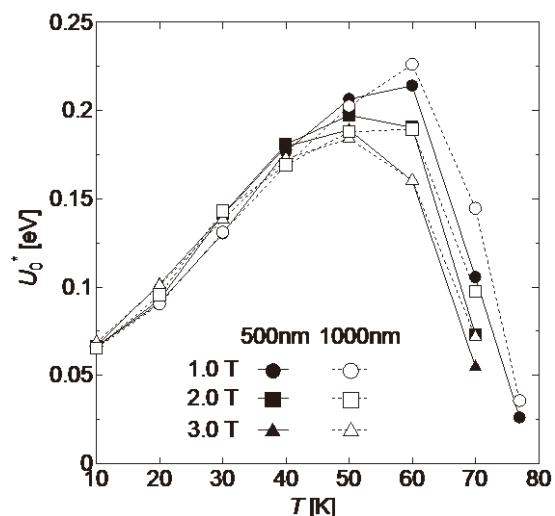


Fig.2 Temperature dependence of apparent pinning potential energy of two samples.

# 市販 REBCO 線材における磁化緩和法による永久電流減衰率及び 低電界発熱評価

## Evaluation of Permanent Current Decay and Low Electric Field Heat Dispersion by Magnetization Relaxation in Commercial REBCO Tapes

土屋雄司(名大) ; 舟木修平(島根大) ; 木内勝(九工大) ; 尾崎壽紀(関学) ; 吉田隆(名大)

TSUCHIYA Yuji (Nagoya Univ.); FUNAKI Shuhei (Shimane Univ.); OZAKI Toshinori (Kwansei Gakuin Univ.);

KIUCHI Masaru (Kyushu Institute of Technology); and YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: tsuchiya@nuee.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 高温超伝導線材は、高い転移温度と磁場中での高い臨界電流密度 $J_c$ を有するため、次世代電力機器への応用が期待されている。一方、そのマグネット応用において、形状に起因した不整磁場の減衰による磁場の時間不安定性、低負荷率・低電界での発熱、および永久電流の減衰が課題となる。これらの原因是、熱揺らぎによる磁束クリープであるため、REBCO マグネットの設計および数値計算には、低電界での電流-電圧特性の評価が重要である。電流-電圧特性を測定する一般的な手法は通電法であるが、得られる電界が高いため、低い電界の特性評価には磁化緩和法が用いられる。

これまで我々のグループでは、REBCO 薄膜への人工ビンディングセンター(APC)導入による磁場中 $J_c$ の増強および磁化緩和率への影響について、 $c$ 軸相関のある APC 添加した際の高磁場での磁化緩和の抑制について報告してきた[1]。今回、本研究では、各社の市販 REBCO 線材について広い温度・磁場領域において、磁化緩和測定を用いて永久電流の減衰率及び低電界発熱を評価した。

### 2. 実験方法

市販のフジクラ社、SuperPower 社、SuperOx 社製の APC 添加無し(pure)および APC 添加あり REBCO 線材(型番は FESC-SCH04、FYSC-S04、SF4050-AP、SCS2050-CFST-4-10、ST-4-50)を、約 2 mm 角に加工した。カンタムデザイン社製 MPMS を用いて、磁場を線材の広い面に対して垂直方向に印加しながら 0.1-5 T、4.2-77 K における磁化緩和率、磁化のヒステリシス、磁化の温度依存性を測定した。磁化ヒステリシスから $J_c$ を、磁化緩和特性から規格化磁化緩和率 $S = d \ln(M)/d \ln(t)$ を評価した。ここで  $t$  は経過時間を示し、磁場スイープを停止した時間を 0 s とした。

### 3. 実験結果及び考察

Fig.1 に、各種市販 REBCO 線材の(a)0.1 T および(b)2 T における $S$ の温度依存性を示す。比較のため、PLD 法にて作製した BaHfO を添加した SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における特性を下向三角にて示す[1]。一般的に、 $S$ が小さいほど低電界での発熱、および永久電流の減衰が小さいことを示す。

以下では、温度域ごとに結果の考察を行う。まず、40 K 以上の高温で $S$ は、磁場 0.1 T において APC 導入試料の方が大きかった。一方、磁場 2 T において $S$ の大小が逆転する結果が観測された。この結果は、高温高磁場では、APC の導入による $J_c$ の向上すると同時に、プラスチック磁束クリープが抑制されたことを示している[2]。次に、20-40 K の中温域では、低磁場において特徴なピーク構造が見られた。これは、ダブルキンク励起による磁束クリープの促進によると考えられる[3]。この現象は、相関した APC の導

入により出現するが、今回の結果からは、APC の有無とピーク構造との相関性は見られなかった。最後に、20 K 以下の低温では、 $S$ は APC の有無によらず温度に比例し、同程度の値を示した。これは、熱励起による集団磁束クリープ理論により説明される[4]。

当日は、超伝導マグネット応用に重要な磁場中 $J_c$ の向上と $S$ の抑制の両立、各社 REBCO 線材の特徴について詳細に報告する予定である。

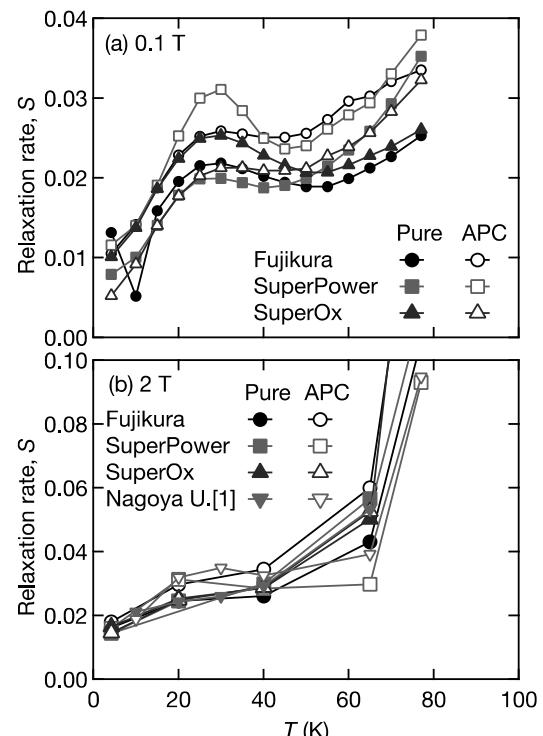


Fig. 1 Temperature dependence of normalized relaxation rate,  $S$  in commercial REBCO tapes at (a) 0.1 T, (b) 2 T.

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(20K15217)、JSTA-STEP、NEDO、及び名大産総研アライアンスからの助成を受けて実施しました。

### 参考文献

- [1] Y. Tsuchiya *et al.*, Abst. CSJ Conf., **95**, 8 (2018).
- [2] Feigel'Man *et al.*, Phys. Rev. Lett. **63**, 2303 (1989).
- [3] D. R. Nelson and V. M. Vinokur, Phys. Rev. Lett. **68**, 2398 (1992).
- [4] P. W. Anderson and Y. B. Kim, Rev. Mod. Phys. **36**, 39 (1964).

# レーザー加工 REBCO 細線のマトリクス複合化による多芯線実現可能性

## Feasibility study of multifilamentary REBCO wires through composite process with fine laser-cut REBCO filaments

伴野信哉(物材機構); 植本成美(上智大, 物材機構); 中村一也, 高尾智明(上智大); 町敬人, 衣斐顕, 和泉輝郎(産総研)  
BANNO Nobuya (NIMS); UEMOTO Marumi (Sophia Univ., NIMS); NAKAMURA Kazuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);  
MACHI Takato, IBI Akira, IZUMI Teruo (AIST)  
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

### 1. 緒言

RE アース系テープ線材は、そのアスペクト比の大きさから、垂直磁場中における磁化の増大や、磁化緩和、交流損失の増大などの問題が生じ、かつ大容量化にも不向きである。CORC 導体や単純積層導体などの導体化も進められているが、導体径は NbTi 線などと比べるとはるかに大きく取り扱いが困難なうえ、素線間の電気的結合性も低く、導体の電磁気的安定性は低い。仮にテープ線の一か所で劣化部分があっても、電流シェアリングが起きにくく、導体の性能劣化、安定性の低下が懸念される。

こうした背景から、産総研と共同で、レーザー切断した REBCO 細線を複合マトリクス化することで、細径 REBCO 多芯線材が実現可能か、検討している。それを実現するうえでどのような技術が必要となるのか、どのような問題が生じるのか、どのような効果があるのか等、これまでの簡単な試作を通じて得られた結果を報告する。

### 2. 実験方法

NbTi 合金と異なり、展延性のない REBCO 細線は、従来多芯線材のようにあらかじめ金属マトリクスに埋め込んで、引き抜き加工によって縮径線材化することはできない。従って、REBCO 多芯線材の場合には、従来とは全く異なる発想で多芯線材化する方法を考えることが必要である。最も容易に思いつく多芯化の方法は、まずレーザー加工により、REBCO テープ線を細線化し、それらを銅などの良導体金属管に挿入し、さらに低融点金属マトリクスに埋め込んで一体化する方法である。

経験的に、Ag 保護膜ははんだへの溶出速度が著しく大きく、容易にはんだへ溶解することが知られている。そこでまずは Ag 保護膜 REBCO テープ線と低融点金属との反応性を調べた。低融点金属には、Sn を主成分とする合金をベースとして、低融点の観点から Sn-Bi 合金を第一に考えた。試験テープ線には、フジクラ製 GdBCO 線材 (SCH04) を使用した。まず、希硝酸により Cu 層を化学腐食により除去し、Ag 保護膜を露出させた。次に 150°C で溶融した Sn-58wt%Bi にテープ線を浸漬させ、反応性や反応時間を調べた。

次に、複合する超伝導フィラメント用に、産総研にて、PLD 法により成膜し Ag 保護膜がスパッタされた 1cm 幅 GdBCO テープ線材を、UV パルスレーザーを用いて、幅 1mm のフィラメント状に細線化した。さらに外径 2mm のコの字型銅管を準備し、上記 8 本のフィラメントを挿入して、低融点金属とともに一体化し、短尺の多芯線材を試作した。この多芯線材において、各フィラメントに電圧タップを取り付け、低融点金属を充填する前後のフィラメント間抵抗を計測した。

### 3. 実験結果と考察

Sn-58%Bi にテープ線を浸漬する実験では、温度を 150°C に保持して浸漬する時間を 10 s～5 min と変化させた。その後断面研磨して FESEM にて組織を観察した。Fig.1 に、2 min 浸漬した後の SEM 像ならびに EDS マップを示す。この図を見ると、Ag 保護膜は極めて短い時間で溶出し、その後すぐさま REBCO 層の溶出が開始されることがわかる。特に Ba の溶出

が顕著である。こうした溶出は、僅か 10 秒後にも観察された。

この Ag の溶出を抑えるため、Cu メッキを施し、その反応性を観察した。Cu メッキは 3μm 厚程度付与した。その結果、150°C では、30 min に浸漬しても Cu は Sn-Bi とほとんど反応しないことがわかった。

この結果を踏まえ、細線化したフィラメントの表面に 3μm 厚程度の Cu メッキを施し、さらに Sn-Bi をメッキし、コの字銅管の中に挿入して、はんだごてによってフィラメント領域に低融点金属を充填させた。この際、最初に Sn-56Bi の充填を試みたが、濡れ性が悪く、フィラメント間に十分拡散させることができなかったため、市販の Pb-60Sn はんだを充填することにした。Fig.2 に試作した導体断面写真を示す。はんだはフィラメント間に十分浸透していることが確認された。はんだ充填前後の、フィラメント表面積当たりのフィラメント間抵抗率  $r$  ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) (=  $R$  (測定抵抗) ×  $S$  (表面積)) の測定結果を Fig.3 に示す。マトリクス複合化することにより、フィラメント間抵抗が全体的に 2 枝低減されている。

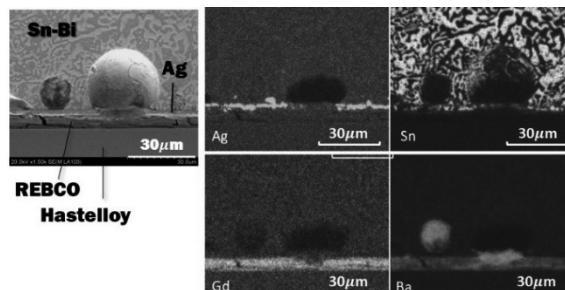


Fig.1. SEM and EDS maps near the boundary between REBCO layer and Sn-Bi alloy after 150 °C for 2 min.

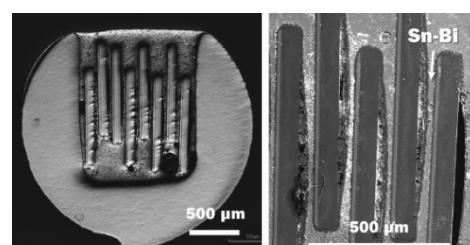


Fig.2. Cross-section of fabricated multifilamentary conductor and SEM image of the filamentary area.

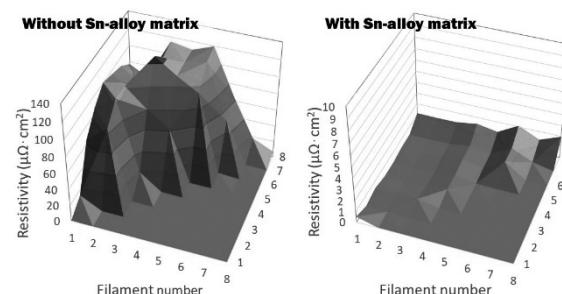


Fig.3. Resistivity between each filaments in cases without and with Sn-alloy matrix.

# MgB<sub>4</sub> を原料とした MgB<sub>2</sub> 多結晶体材料の微細組織と臨界電流特性

## Microstructure and critical current properties of MgB<sub>2</sub> bulks using MgB<sub>4</sub> as a starting material

須藤 将太朗, 小池 亘, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

SUDO Shotaro, KOIKE Wataru, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5619049@aoyama.jp

### 1. 緒言

MgB<sub>2</sub> は金属系超伝導体の中で最高の臨界温度~39 K を有し、化学的に安定、合成が比較的容易、さらに粒間の結合に本質的に優れているなどの長所を持つ。これらのため、MgB<sub>2</sub> 線材は冷凍機冷却による 20 K 付近で動作する医療用 MRI 磁石や液体水素冷却による送電などへの応用が期待されている。しかし、MgB<sub>2</sub> 線材の磁石としての応用に向けては、磁場中の臨界電流特性の改善が必須であり、それには MgB<sub>2</sub> コアの高密度化、高純度化と主要なピンニングセンターである結晶粒界の高密度化が重要な指針となる。高密度化に向けては B と MgB<sub>2</sub> の混合粉末の圧粉体に Mg を拡散させる Premix-PICT 拡散法[1]が適している。さらに高純度な MgB<sub>2</sub> 多結晶体の作製に向けては不純物 MgO の低減が必要である。以上の背景から我々はこれまで premix 比を MgB<sub>4</sub> : B = 1 : 0.5 とした Premix-PICT 拡散法において MgB<sub>2</sub> バルクを作製してきた。さらに~2 GPa の高圧 1 軸プレスとロール圧延の工程を組み合わせることで、反応性が向上し、 $J_c \sim 9.6 \times 10^5$  A cm<sup>-2</sup> (20 K, ~0 T) [焼成条件 700°C, 48 h]を示す試料の作製と、B 原料に依存しない高  $J_c$  低コスト MgB<sub>2</sub> 線材開発の可能性を報告してきた[2]。今回はこのロール圧延後の試料厚さ  $d$  (mm)を系統的に変化させて作製した MgB<sub>2</sub> バルクの物性を報告する。

### 2. 実験方法

高純度 MgB<sub>4</sub> 粉末は、Mg(粒径 1 mm) : B = 1 : 4 の比で PICT 拡散法[3]により SUS316 管内に充填し石英管中での熱処理により作製した。B 原料には Pavezym 社製の粉末(粒径~300 nm)と フルウチ化学社製の粉末(粒径~50 μm)を用いた。MgB<sub>4</sub> : B = 1 : 0.5 のモル比の混合粉末および Mg を SUS316 管に充填、プレス後に焼成する Premix-PICT 拡散法により高密度 MgB<sub>2</sub> バルクを作製した。~2 GPa の高圧 1 軸プレス後の SUS316 管を含めた試料の厚さ  $d$  は~1.05 mm であり、ロール圧延により、 $d$  を最も薄い試料で  $d \sim 0.8$  mm まで加工した。作製した試料の微細組織は SEM により観察し、超伝導特性は SQUID 磁束計による磁化測定により評価した。特に、B 原料の違いによる MgB<sub>2</sub> バルクの超伝導特性及び、微細組織の相違に注目した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した MgB<sub>2</sub> バルクの磁化率の温度依存性を示す。ロール圧延により厚さを薄くし、線材コアの組織に近付いた試料ほど、転移のプロードニングや二段転移が顕著に認められ加工歪みの影響していることが示唆された。Fig. 2 に作製した試料の 20 K における  $J_c - H$  特性を示す。ロール圧延により厚さを薄くした試料ほど臨界電流特性が劣化し、特に  $d$  が 0.85 mm 以下の試料では磁場中の臨界電流特性が大幅に劣化した。これは試料への歪みの導入と、熱処理前コア組織の緻密化による反応性の向上により粒成長が進行したためと考えている。一方、いずれの作製条件でも初期 B 原料の違いに

よる MgB<sub>2</sub> バルクの特性に有意な差異は無かった。

当日は作製した MgB<sub>2</sub> バルクの研磨面の微細組織から解析した粒界密度と臨界電流特性の関連についても報告する。

### 参考文献

- [1] I. Iwayama, et al., *Physica C* **460-462** (2007) 581-582.
- [2] S.Sudo et al., *abstract of 10<sup>th</sup> ACASC* (2020) 101.
- [3] S. Ueda et al., *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 222502

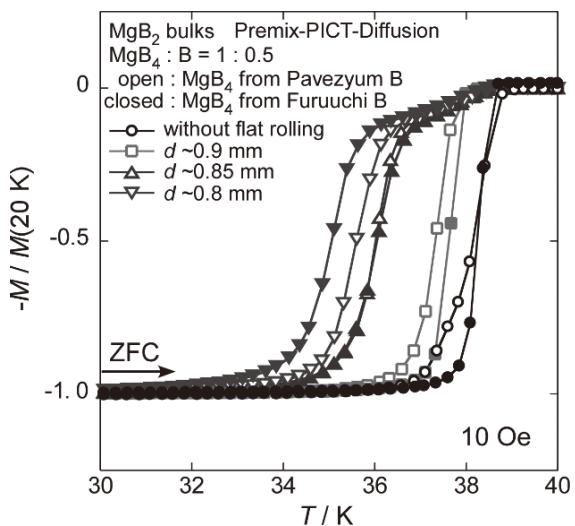


Fig. 1 Temperature dependence of ZFC magnetization of dense MgB<sub>2</sub> bulks synthesized from MgB<sub>4</sub>, Mg, and B with flat rolling process.

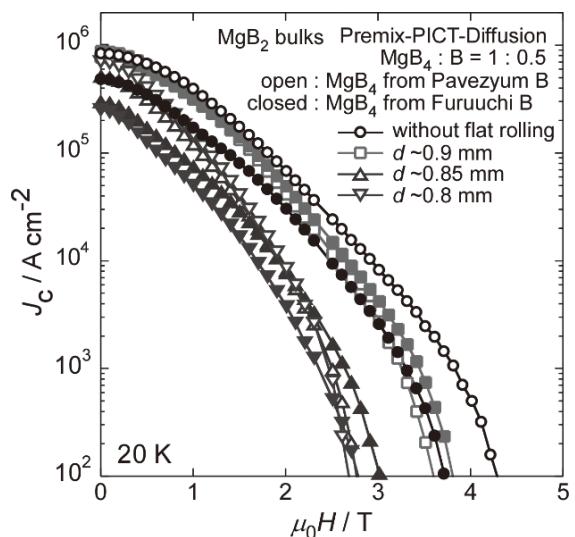


Fig. 2  $J_c - H$  curves at 20 K of dense MgB<sub>2</sub> bulks synthesized from MgB<sub>4</sub>, Mg, and B with flat rolling process.

# 改良 Nb バリアで構成された MgB<sub>2</sub> 線材における I<sub>c</sub> の凹みに対する依存性

## I<sub>c</sub> characteristic of MgB<sub>2</sub> superconducting strand against artificial dents with newly developed Nb barrier

高橋 雅史, 谷貝 剛, 平 萌人, 高尾 智明(上智大学);新富 孝和, 横田 康博(KEK);  
駒込 敏弘, 塚田 謙一, 濱島 高太郎(前川製作所);恩地 太紀(鉄道総研)平野 直樹(NIFS);  
Jun Hyuk Choi (Sam Dong); 前田 穂, Seyoung Choi (Kangwon Univ); Jung Ho Kim (Wollongong Univ.)  
TAKAHASHI Masafumi, YAGAI Tsuyoshi, HIRA Moeto, TAKAO Tomoaki (Sophia University);  
SHINTOMI Takakazu, MAKIDA Yasuhiro (KEK); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi,  
HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG); ONJI Taiki (RTRI); HIRANO Naoki (NIFS); Jun Hyuk Choi (Sam Dong);  
MAEDA Minoru, Seyoung Choi (Kangwon Univ); Jung Ho Kim (Wollongong Univ.)  
E-mail: m-takahashi-mag@eagle.sophia.ac.jp

### 1. はじめに

本研究グループでは、これまで先進超電導電力貯蔵システム(ASPCS)を提案してきた。これは、再生可能エネルギー由来の電力の変動を補償することによって安定的な供給を目指すものである。変動の長周期成分は水素エネルギーに変換して、短周期成分は超電導電力貯蔵装置(SMES)にて貯蔵・放出することで実現できる。[1] 現在、液体水素で冷却することでシナジー効果が得られ、ありふれた元素で構成される故に低コスト化が期待できる MgB<sub>2</sub> 線材(、臨界温度 39 K)を用いて定格 600 A の大容量ラザフォードケーブルを設計・製作してダブルパンケーキコイル(DPC)を構成、積層することで容量 30 kJ の SMES の製作を進めている。

このコイルに用いる MgB<sub>2</sub> 線材について、これまで長尺化に有利な Continuous Tube Forming and Filling (CTFF 法)による PIT 線材では、大容量導体への加工時にできる凹みによって I<sub>c</sub> の劣化が確認されていた。MgB<sub>2</sub> を覆う Nb バリアのクラックが原因であるとわかった[2]。今回、改良された Nb バリアの線材について様々な大きさ凹みを与え、その I<sub>c</sub> への影響を実験的に調査した。本講演ではその調査結果を報告する。

### 2. MgB<sub>2</sub> 素線とラザフォードケーブルの仕様

Sam Dong 社より提供された MgB<sub>2</sub> 線の諸元を Table 1 に示す(Sam Dong 社カタログ)。サンプルの直径は 0.83 mm である。フィラメント数 18 のマルチフィラメント線で、線中央部に安定化銅を配置している。バリアは Nb、シース材は Ni 合金の一種、Monel である。素線の MgB<sub>2</sub> 充填率は、15.97% の線を使用した。

Table 1 Specification of the standard MgB<sub>2</sub> wire of Sam Dong

Parameters	Specifications
Number of filaments	18 MgB <sub>2</sub> + '1' Cu
Length	~ 1 km
Diameter	0.83 ~ 1.4 mmφ
External sheath	Monel (Cu + Ni)
Inner sheath	Cu
Barrier	Nb

### 3. 実験系と結果

ストレートの改良 Nb バリア MgB<sub>2</sub> 線材に、荷重制御の圧縮装置にて荷重することにより、凹みを加えた。Fig. 1 に示すように、さまざまな大きさの凹みを付けた線材サンプルを、4 本ずつ、サンプルホルダーに設置した。それぞれのサンプルには、電圧タップを半田接続し、サンプル全体の電圧 V<sub>all</sub> および、交差圧縮部近傍の電圧 V<sub>local</sub> を印加電流と電圧の関係をモニターおよび記録する。V<sub>all</sub> を測定するタップ間隔は 60 mm, V<sub>local</sub> を測定するタップ間隔は 15 mm である。サンプルは側面部のスペーサおよび上部の支持棒により、通電時の電磁力によって引き起こされるサンプルの変形および損傷、ワイヤーモーションによる電圧揺動が発生しないよう配慮した。実験は液体ヘリウム浸漬冷却下で通電して行われた。その結果、CTFF 法で製作された同サイズの素線を凹み加工した場合に見られたような特性の劣化は確認できなかったその他試験結果は講演にて発表する。

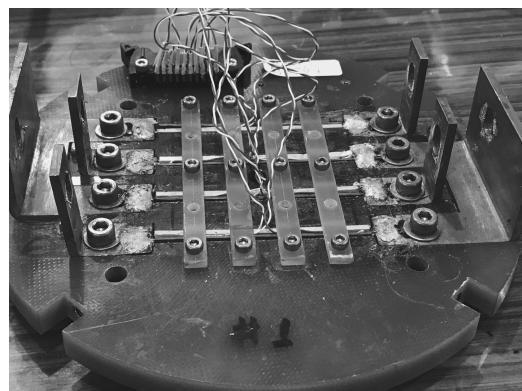


Fig. 1 Experimental setup of specimens.

### 参考文献

1. T. Hamajima, et. al : IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 22, no.3, June. 2012, Art.no. 5701704.
2. M. Jimbo, et al : IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 29, No. 5, August. 2019, Art.no. 8003305.

## 超伝導ケーブルの臨界電流測定に及ぼす電流分流の影響 Effect of current transfer on critical current measurement of superconducting cable

松下照男, 木内 勝(九州工業大学); 西島 元(物材機構); 増田孝人(住友電工); 向山晋一(古河電工);  
青木裕治(昭和ケーブル); 三村正直(電線工業会)

**MATSUSHITA T., KIUCHI M. (Kyushu Inst. Tech.); NISHIJIMA G. (N. I. M. S.); MASUDA T. (Sumitomo Electric);  
MUKOYAMA S. (Furukawa Electric); AOKI Y. (Showa Cable S.); MIMURA M. (J. Electric Wire A.)**  
E-mail: matsushita.teruo391@mail.kyutech.jp

### 1. はじめに

近年、超伝導電力ケーブルの開発が盛んに行われておる、国際電気会議(IEC)から超伝導ケーブルに関する国際規格が発行された。その中で超伝導ケーブルの臨界電流の試験法の規格化が必要事項とされていることから、この試験法の問題点を明らかにするため、とくに問題となる電流分流の影響を調べた。

### 2. モデルによる解析

試料は Bi-2223 テープで作製した 1 層のケーブルで、全長  $2L$  の両端の長さ  $a$  の部分においてチューブ状の銅層を介して内部の超伝導テープに電流を流し込む構造となっている。ここでは単純に超伝導層と金属層からなる二層の長い回路を取り扱い、 $0 \leq x \leq a$  の領域において図 1 の等価分布乗数回路を仮定する。ただし、 $R'_A$  および  $R'_B$  はそれぞれ金属層と超伝導層の単位長さ当たりの抵抗で、 $g'$  は両層間の単位長さあたりのコンダクタンスである。この領域に 5 つの電圧端子を配し、電流分流の状況を観測している。内側の  $a \leq x \leq L$  の区域では  $R'_A$  はテープの金属層のみの値  $R'_{A0}$  となる。電圧を測定する金属層の電位と電流を  $V_A$  および  $I_A$ 、超伝導層の電位と電流を  $V_B$  および  $I_B$  とすると、全電流  $I$  を流した場合の方程式は

$$\frac{d^2 I_A}{dx^2} = g' [(R'_A + R'_B) I_A - R'_B I]$$

となる。超伝導層が超伝導状態の場合 ( $R'_B = 0$ )、電圧は  $K$  を比例定数、 $x_p (< a)$  を電圧端子の位置として

$$V = 2 \left( \frac{R'_A}{g'} \right)^{1/2} I e^{-x_p/\alpha} + 2 \left[ \left( \frac{R'_{A0}}{g'} \right)^{1/2} - \left( \frac{R'_A}{g'} \right)^{1/2} \right] I e^{-a/\alpha}$$

のオームックな形となる。ただし、 $\alpha = (g' R'_A)^{1/2}$  である。したがって、これを電流値  $I$  で割ったものが電流分流による抵抗となる。

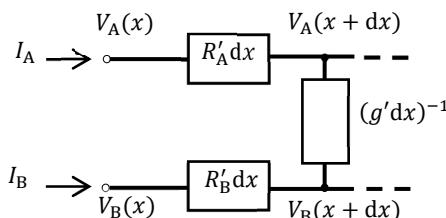


Fig. 1. Equivalent distributed constant circuit.

一方、臨界電流  $I_c$  を超えた磁束フロー状態の電圧を考える。全領域で磁束フローが生じ、通常の電圧端子 ( $x > a$ ) によって電界基準  $E_c$  に従って求まる値は

$$I'_c = I_c + \left( \frac{S}{\rho_f} + \frac{1}{R'_{A0}} \right) E_c$$

となる。ただし、 $S$  は常伝導金属の断面積、 $\rho_f$  はフロー抵抗率である。一方、実際の測定では上で求めた電流分流の抵抗成分を差し引き、電界基準で求めた臨界電流は

$$I_c'' = I_c + \left( \frac{S}{\rho_f} + \frac{1}{R'_{A0}} \right) E_c \left( \frac{L - x_p}{L - x_0} + \varepsilon \right)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{R'_{A0}}{g'} \right)^{1/2} \left( \frac{S}{\rho_f} + \frac{1}{R'_A} \right) \frac{1}{L - x_0}$$

となる。ただし、 $x_0$  は磁束フローが起る位置である。試料長  $2L$  が十分長ければ  $(L - x_p)/(L - x_0)$  はほぼ 1 に近く、以下に示すように  $\varepsilon$  は十分小さい量なので、補正して得られた臨界電流  $I_c''$  は理想的な結果  $I'_c$  にほぼ近いと言える。

### 3. 検討

図 2 は Bi-2223 テープの单層のケーブルについて、各電圧端子によって測定した電流・電圧特性である。両端子間の距離が小さいとき、抵抗成分が大きいが、距離を十分とるとその影響は小さくなることがわかる。上で理論的に求めた抵抗値は電圧端子の位置が電流端子から遠ざかると指数関数的に減少するが、一定値に收れんすることを示している。これは  $a \leq x \leq L$  の領域の抵抗値が大きいこと ( $R'_A > R'_{A0}$ ) によるもので、実験結果と一致する。ここで前節で示した  $\varepsilon$  を評価してみよう。 $(R'_{A0}/g')^{1/2}$  が  $0.70 \times 10^{-6} \Omega$ 、第 2 の項は  $1/R'_A = 0.27 \times 10^4 \Omega^{-1}m$  でほぼ代表でき、 $L = 1 m$  より、 $\varepsilon \approx 1.9 \times 10^{-3}$  と十分に小さく、上の仮定が支持される。観測した電圧から線形な抵抗成分を除き、通常の電界基準で求めた臨界電流の結果は全ての電圧端子でほとんど同じ値(3891 A)を示し、この補正法が有効であることを示している。

### 4. まとめ

一般に抵抗成分の除去により電流端子の位置にあまり依存せずに超伝導ケーブルの臨界電流を正しく測定できることが明らかとなった。しかしながら、できれば電圧端子の位置を電流端子から十分離すことが推奨される。

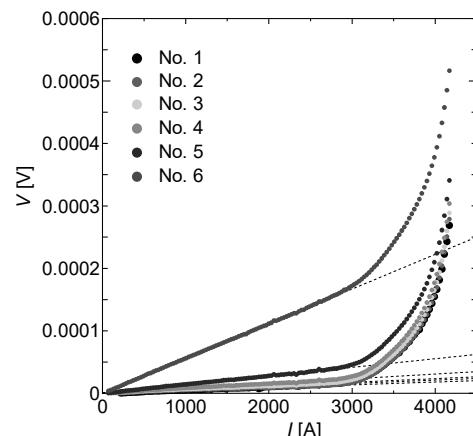


Fig. 2. Observed current-voltage characteristics.

## 航空機向け積層超伝導ケーブルの短絡電流試験

Short circuit current experiment of the stacked conductor cable for aviation application

山口 作太郎, 神田 昌江, イワノフ ユーリ(中部大)  
 YAMAGUCHI Sataro, KANDA Masae, IVANOV Yury (Chubu Univ.)  
 E-mail: [yamax@isc.chubu.ac.jp](mailto:yamax@isc.chubu.ac.jp)

### 1. はじめに

各層毎に電流を反転させる積層導体の超電導直流ケーブルを提案し、臨界電流測定や断熱二重管材料の検討を進めてきた。テープ線材に BSCCO を用いた場合では、線材単体の臨界電流を 10%以上超す性能を得ている。また、当面の目標値であった単位長さ当たりの重量を通電容量の商である  $1\text{kg}/(\text{A}\cdot\text{km})$  を下回る結果を得ている。

一方、一般にケーブルの仕様は短絡容量で決まることが多く、実際に使えるようにするために短絡電流試験を行う必要がある。これは機器の不具合や事故及び落雷などによって生じるため、必要不可欠な検討になる。

このため、今回短絡電流を模擬する電源を製作し、短絡電流を流す前後で臨界電流測定を行い、その変化を調べることによって超電導直流ケーブルの短絡電流に対する健全性を調べることにした。

### 2. 短絡電流試験電源

銅ケーブルに対する交流の短絡電流試験はその要領が決まっているが、直流ケーブルに付いては特に決まっていない。このため、電力変換器などの特性などを含めて取りあえず 500micro-sec から数 ms 程度のパルス電流を流す電源を作成した。Fig. 1 に今回作成した電源回路を示す。

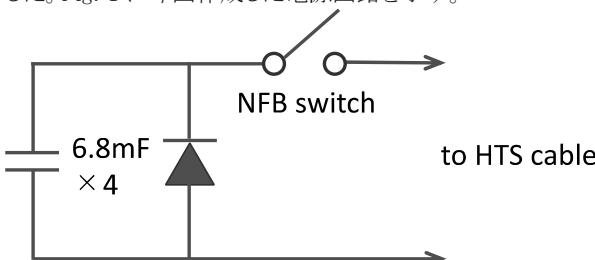


Fig. 1 Power Supply of short circuit experiment.

6.8mF のコンデンサを 4 個用意し、これにダイオードを接続し、スイッチは NFB(no fuse breaker)を用いて作成した。通電電流はコンデンサの充電電圧によって主にピーク電流を制御し、コンデンサ容量を変えることや回路のインダクタンスやケーブル抵抗などを変えることによって通電波形を制御することにした。

Fig. 2 に通電波形の一例をオシロスコープ画面のコピーで示す。電流はシャント抵抗を用いて測定し、ピーク近くで変動しているのは、ON スイッチに NFB を用いたため、投入時に金属接点が振動によって接触したり離れたりする理由に寄る。そして、ピーク電流は 2kA ほどになり、通電時間は 850 micro 秒ほどになっている。パルス波形の最後の部分では逆方向に電流が一部流れているが、これがダイオード特性による。また、コンデンサー電圧をモニターしていて、この場合の充電電圧は 40V である。尚、この波形は超電導ケーブルを除いたときの波形であり、ケーブルに実際に接続すると、波形が異なる。

### 3. 臨界電流特性

積層導体は複数の線材を並列接続することによって電流容量を上げているが、今回はこれらの線材を直列接続することによって、それぞれの線材に流れる電流を同じにし

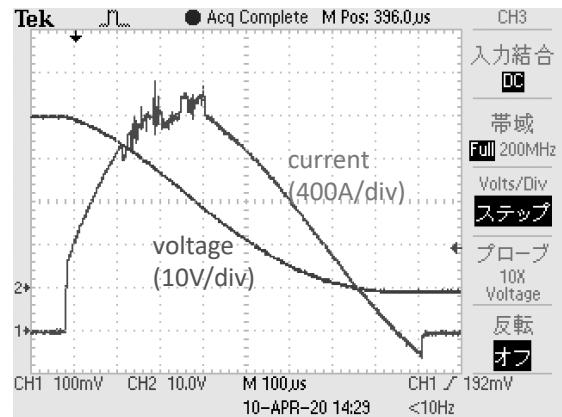


Fig. 2 Waveform of short circuit current and its capacitor voltage (from the display of oscilloscope).

て実施した。尚、工場出荷時の線材の臨界電流は 180A 以上の記載があり、50micro-meter 厚のステンレスステーを半田接合して線材の力学的強度を上げている。

Fig. 3 はピーク電流 1.2kA の短絡電流を 10 回通電後の臨界電流測定の結果の一部を示している。尚、直流ケーブルとして利用することを想定しているため、臨界電流測定はそれぞれの電流で一定時間の電圧測定を行うことを複数繰り返す方法で測定を行っている。

Fig. 3 は短絡電流通電前後の積層導体の端に位置する C 線材 (1+) の臨界電流試験結果である。前後で臨界電流はほとんど変化しないが、最小二乗法での fitting curve パラメータには測定精度内で違いが出てきた。それは電流のべき乗パラメータであり、通常は  $n$  値と言われ、短絡電流後は  $n$  値が低下した。これは残りの 5 つの線材も同様である。このため、臨界電流特性の波形も異なっている。

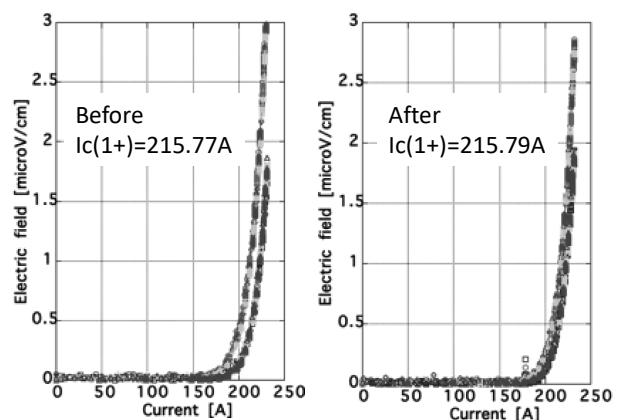


Fig. 3 Critical current measurements before and after short circuit current test.

### 4. 現状のまとめ

今回初めて短絡電流試験の前後で臨界電流測定を実施した。その結果、短絡電流を流すと  $n$  値が低下した。しかし、臨界電流値は誤差範囲で変化がない。現在、解析を進めている。

## コーテッドコンダクターにおける航空機用積層導体の開発

### Development of coated conductor for Stacked Conductor of Aircraft

神田 昌枝, 岩田 暢祐, 山口 作太郎 (中部大学)  
 KANDA Masae, IWATA Yousuke, YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)  
 E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

#### 1. 緒言

近年、航空機の電気・電動化 (MEA : More Electric Aircraft) が進み、銅ケーブルに代わる軽量で大电流に耐える新しいケーブルが求められている。航空機では大電力を使うために超伝導ケーブルの利用が検討されており、航空機用の超伝導ケーブルとして軽量で直流から 600Hzまでの交流を流す必要がある。また、アースが取れないため高電圧の利用には制限があり、400V 以下の利用が想定されている。このため、テープ線材をスタック状に積層したケーブル導体を提案する。

一方、超伝導バスバーに大電流を流すと自己磁場が大きくなり、臨界電流が下がる。更に、交流を流す場合には均流化のために現在 Roebel 導体を利用しているが、線材を細く切り出すため臨界電流は半分以下になることが報告されている [1]。大電流を流すためには自己磁場の影響を小さくすることが重要である。そこで各層に流す電流は逆方向にした。本研究グループでは、臨界電流 200A 級のコーテッドコンダクターとビスマス系 (Bi-2223) 超伝導テープ線材を組み合わせて 6 層のケーブル導体を開発した。

#### 2. 実験試料・方法

本研究で使用した試料は、コーテッドコンダクター (SuNAM 製) と Bi-2223 (住友電工製) の超伝導テープ線材を準備した。コーテッドコンダクターの試料形状は横幅 4.1mm、厚み 0.14mm で 77K 時の臨界電流は 200A のものを使用した。また Bi-2223 の試料形状は横幅 4.6mm、厚み 0.35mm で 77K 時の臨界電流は 189A のものを使用した。

まず、コーテッドコンダクターと Bi-2223 の線材特性を確認するために耐電圧試験を実施した。さらにコーテッドコンダクターにカプトンテープを巻いた状態と外した状態で臨界電流測定を行った。その後、コーテッドコンダクターと Bi-2223 の超伝導テープ線材を組み合わせて線材 6 層を重ねており、電流方向を反転させて積層させた。

#### 3. 実験結果・考察

カプトンテープで巻いたコーテッドコンダクター、不織布で巻いたコーテッドコンダクター、カプトンテープで巻いた Bi-2223 の耐電圧試験の結果を Table 1 に示す。各試料 10cm を 2 本準備して、重ね、電圧を徐々に上げて電流が流れる電圧を測定した。各試料、室温、液体窒素中で大きく変化はなかった。

Table 1 Each high temperature superconductor tape of withstand voltage test.

	SuNAM + polyimide film	SuNAM + bonded material	Bi-2223 + polyimide film
Room temperature	4.96 kV	618 V	5 kV
Liquid nitrogen temperature	4.89 kV	696 V	5 kV

次にコーテッドコンダクターに不織布を巻いた状態と外した状態で臨界電流測定を行った。なお、直流で測定を行ったので、臨界電流測定では一定のデータを取った。

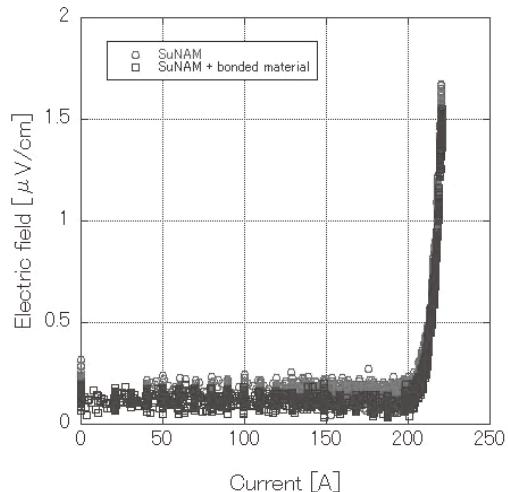


Fig.1 Critical current measurement I-V curve at 77 K of a 30 cm coated conductor with and without bonded material.

その結果、絶縁物である不織布をコーティドコンダクターに巻いても臨界電流値は 220A を保った。そこで、6 層の積層導体の外側をコーティドコンダクター、内側 4 本を Bi-2223 とした。過去の研究において Bi-2223 のみで 6 層の積層導体を作製した際、外側の線材はさらに外側に線材が無い、つまり他の線材に挟まれていないため、線材垂直面方向の磁場が打ち消すことができず、臨界電流が下がってしまったが、今回は外側にコーティドコンダクターを置く事で臨界電流が下がらないと考えている。

#### 4. 結言

本研究では、超伝導技術を超伝導送電システムや超伝導モータなど新しい技術として宇宙・航空機応用するため、本研究グループでは、コーティドコンダクターを利用して Bi-2223 と組合せ積層構造に加工し、各層毎に電流方向を反転させる方法を試みた。

Bi-2223 のみで 6 層の積層導体の場合、外側の 2 本は打ち消しあう磁場の強度が小さいため、その結果、内側 4 本の線材より臨界電流は小さかったが、今回は外側をコーティドコンダクターに置き換えることで臨界電流を下げない導体を作製した。以上のことから、今まで宇宙・航空機用として開発・製造されていた Roebel 導体に比べて、本研究グループの超伝導ケーブルは、単純な構造で臨界電流は高い構造である。

#### 参考文献

1. S. S. Fetisov et al, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, NO. 3, APRIL 201, 4803204.

# 磁気力制御法によるマイクロプラスチックの分離に関する研究

## Study on microplastic separation by magnetic force control method

西嶋茂宏, 三島史人, 野村直希 (福井工大)

NISHIJIMA Shigehiro, MISHIMA Fumihito, NOMURA Naoki(Fukui University of Technology)

E-mail: nishijima@fukuit.ac.jp

### 1. はじめに

近年プラスチック製の日常用品は量産されると同時に大量に廃棄されている。プラスチックは分解し難く、海洋環境に多大な負荷を与えていた。現在、これらの人への影響は見られていないが<sup>1)</sup>、潜在的危険性を考慮するとプラスチック類の早期回収が望まれる。

海洋に存在するプラスチック量は約1億5千万tと考えられ、年間約800万tのペースで増加しており、2050年には重量ベースで魚より多くなっていると推定されている<sup>2)</sup>。また、プラスチックの分布状態は東アジアが80%を占めており、海流によって運ばれるため日本の海岸にも多く存在している<sup>2)</sup>。

マイクロプラスチックとは5mm以下の大きさのものと定義されており、種類としてはポリプロピレンやポリエチレン、ポリスチレンが多くを占めている。これらは自然環境下では分解されにくく、長距離を海流に乗って運ばれるため世界規模の汚染となっている。

プラスチック自身は不溶性のため化学物質のような汚染を引き起こすことはないが、その大きさ故、海洋生物の誤飲が多く、消化されないため異物として海洋生物に影響を与える。一方で、それに付着する残留性有機汚染物質(POP)は疎水性であることが多く、食物連鎖により生物濃縮されやすい性質を持っている。POPはその毒性のため体内の重要器官に取り込まれた場合、食中毒や発疹、免疫低下等の症状を引き起こす可能性があると言われる。

このように悪影響を与える可能性の高いマイクロプラスチックであるがその除去法は、現在、プラスチック類の流出抑制が唯一の方法である。このため、現存のマイクロプラスチックや今後増加するマイクロプラスチックを海洋から分離・除去する方法の開発はSDGsの一つを実現するための有力な手法を提供することになる。そこで、本研究ではそれらを分離・除去する手法について検討したので、その結果について報告する。

### 2. 分離手法

本研究では海洋中のマイクロプラスチック分離・除去する手法として、ローレンツ力を用いた手法を適用することにした<sup>4-5)</sup>。海水に磁場を印加するとともに電流を流すことによりプラスチックの分離・除去する手法である。媒質に磁場下で電流が流れている状態を考える。媒質中に絶縁球が存在する場合、その絶縁球にはローレンツ力の反力がはたらくことになる。この結果、絶縁球はある条件の下で浮上あるいは沈降させることができることになる。この反力は、Leenov<sup>3)</sup>らにより求められており、次式で表されている。

$$\mathbf{F} = -3/4V(\mathbf{J} \times \mathbf{B})$$

この原理を利用し、マイクロプラスチックを浮上あるいは沈降させることを考えた(場合によっては濃縮する)。

### 3. 実験

実験の概略図を図1に示す。実験ではハルバッハ磁石を利用し、流路を電極が磁石の中心と対称となるように設置した(流路内平均磁場0.87T)。海水を模した濃度3.4%

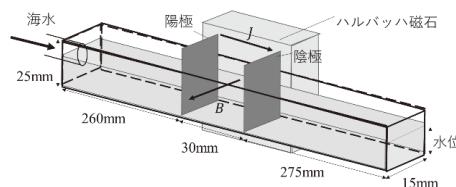


Fig. 1 Schematic illustration of experimental set up.

の食塩水(密度:  $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )をタンクから流して実験を行った。流路はアクリル製で  $25 \times 25 \times 565 \text{ mm}$  である。電極はメッシュ状のステンレスから成り、30mm離して流れに直交するように設置した。装置内磁場は平均0.87Tである。実験に用いたプラスチックは直径6mmのポリスチレンであり、その密度は  $1.07 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  であった。

### 4. 結果と考察

電流密度  $8.30 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 、流速  $6.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  の時のプラスチック粒子の浮上の様子を図2に示す。プラスチック粒子は流されつつ浮上していることが分かる。

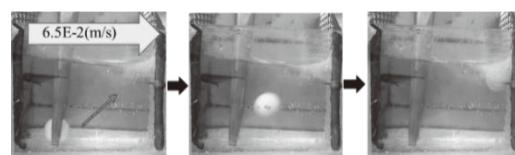


Fig. 2 Levitation of plastic ball.

装置設計のために粒子軌跡計算を開水路体系で実施した。実験結果およびLenovの計算を利用して、60t/hの装置の予備設計を行った(流速  $7.4 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ )。90%以上の分離率を考えた場合、ボア直径約20cm、長さ22cm、B=2Tの超電導磁石であれば実現できることが示された。

### 5. 結言

ローレンツ力を利用した海洋からのマイクロプラスチックの分離法を検討するとともに、その実用の可能性を調査した。また、この手法を用いた小規模の分離装置の予備の検討を行った。

### 参考文献

- 1) [https://www.who.int/news-room/detail/22-08-2019-who-calls-for-more-research-into-microplastics-and-a-crackdown-on-plastic-pollution : World Health Organization ホームページ](https://www.who.int/news-room/detail/22-08-2019-who-calls-for-more-research-into-microplastics-and-a-crackdown-on-plastic-pollution)
- 2) 磯辺篤彦ら:「環境研究総合推進費 終了研究成果報告書~沿岸から大洋を漂流するマイクロプラスチックの動態解明と環境リスク評価~(4-1502)」
- 3) D. Leenov and A. Koji: J. Chem. Phys. 22(1954)683
- 4) 寺田隆哉ら:「電磁力を利用した低融点金属内介在物分離に関する基礎的研究」低温工学 44(2008)32-37
- 5) 西垣和ら:「MHD方式による海洋流出油の分離回収技術の基礎研究」、低温工学 37(2002)343-349

# 常磁性体の磁気分離を可能とする流体制御に関する基礎的研究

## Fundamental study on the fluid control enabling magnetic separation of paramagnetic substance

三島史人, 野村直希, 西嶋茂宏(福井工業大学)  
MISHIMA Fumihito, NOMURA Naoki and NISHIJIMA Shigehiro (Fukui University of Technology)  
E-mail: f-mishim@fukui-ut.ac.jp

### 1. はじめに

現在開発されている常磁性物質の磁気分離法においては、7T 程の超電導磁石の強力な磁場と高勾配磁場を併用することが必要とされている。しかし、分離対象物となる常磁性物質は高勾配磁場形成用の強磁性細線表面に吸着されるため処理量が少なく、微量な有価物資源の回収などへの適用にとどまっている。本研究で提案する磁気分離法は、2T 程の開放勾配磁場と磁気分離装置底部からの上昇流の流体制御を行うことで、常磁性物質の磁気分離を可能としている。従来の超電導高勾配磁気分離法と比べ、適用する磁場が比較的低磁場のため、磁場発生源のボア径の拡大が可能であり、回収領域も広く設定できるため常磁性物質の高速大量処理も可能である。そこで本研究では淘汰管を用い、分離対象粒子を開放勾配磁場により磁気分離し、良好な分離結果を得たので報告する。

### 2. 淘汰管の原理

淘汰管とは、液中に懸濁した粒子が沈降する速度と装置下部から送液した作業媒体の上昇速度との関係により、粒子に作用する合力を利用して、微粒子を粒径によって選別する装置である。管内の粒子には、流体によるドラッグ力 $F_D$ 、浮力と重力が働く。この粒子に作用する合力を式(1)に示す。また、この式から流体(作業媒体)の速度 $v_f$ を0としたときに導かれる粒子の沈降終端速度 $v_s$ を式(2)に示す。粒子の沈降終端速度 $v_s$ が、流体の上昇速度 $v_f$ よりも大きいまたは一致する場合、粒子は流体の流れに逆らって、淘汰管で停留(浮遊)または沈降して、装置内に残留する。一方、 $v_s$ が $v_f$ よりも小さい場合、粒子は流体の流れに乗り淘汰管装置の系外に排出されることになる。ここで、 $r$ は粒子半径 [m],  $\rho_p$ は粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_f$ は粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $\eta$ は流体の粘度 [Pa·s],  $v_f$ は流体の速度 [m/s],  $v_p$ は粒子の速度 [m/s] である。

$$F_D = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f)g - 6\pi\eta r(v_f - v_p) \quad (1)$$

$$v_s = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_f)g}{9\eta} \quad (2)$$

### 3. 淘汰管を利用した色ガラスの磁気分離

分離対象粒子として、ふるい振とう機(Retsch AS200 basic)により平均粒子径 180 μm の色ガラス(比重 3.1)を選別した。色ガラスには、常磁性を示す黒色ガラス粒子、反磁性を示す黄色ガラス粒子をそれぞれ 0.5g 用いた。磁気天秤(Sherwood Scientific 社製, MSB-AUTO)を用いて測定した体積磁化率はそれぞれ、 $+1.00 \times 10^{-5}$  と  $-0.94 \times 10^{-7}$  である。ガラス粒子のゼータ電位測定を行い、中性域において分散状態となるため、淘汰管内の作業媒体には pH6.5 付近の蒸留水を用いた。ガラス粒子投入し沈降後、淘汰管下部から定量送液ポンプ(EYELA RP-1000)を用いて流速 3.5 cm/s[(2)式より導出]で

送液し、ガラス粒子が浮上し留まる位置(淘汰管の高さ 20cm の位置)の側面に、最大磁束密度 1.3 T の永久磁石回路を配置し、浮遊する黒色ガラス粒子のみの磁気分離を試みた。その実験の様子と磁石回路に捕捉されたガラス粒子の写真を Fig.1 に示す。

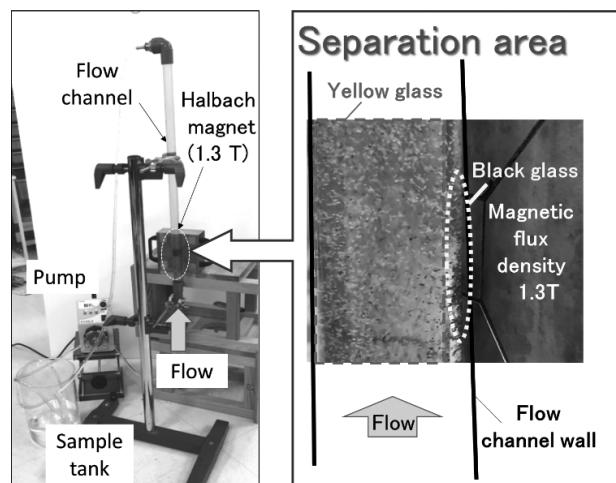


Fig.1 Photographs of the separated black glass particles by Halbach array magnet (1.3 T).

結果として黒色ガラスのみを捕捉できることが明らかになった。また、浮遊し開放勾配磁気分離によって捕捉された黒ガラスは淘汰管の磁石設置側の内壁まで誘導された後、壁面では流速がゼロとなり浮上力がなくなるため壁面では沈降することが観察された。その現象を利用し、磁気分離された黒ガラスについて、淘汰管を二重管構造として回収する方法を採用了。この手法により沈降した黒ガラスのみを取り出すことが可能となり、磁気分離後の黒ガラスの分離率を求め、最大 88% の分離率を示すことが確認された。

### 4. まとめ

本研究では小規模な淘汰管を作製し、磁気分離実験を行い良好な結果を得た。淘汰管に磁気分離を導入し、開放勾配磁場での常磁性物質の磁気分離法の可能性を示した。

しかし、本実験での分離率には改善の余地があり、使用した二重式淘汰管では内管と外管の流速に差があるため、今後は実験的改善として内・外管の流速の最適化を図るなどの精密な流体制御に合わせ、流体解析と粒子軌跡計算を用いたより詳細な装置化に向けた検討を行っていく予定である。

本研究は福井工業大学学内特別研究費の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

1. F. Mishima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.167

## 磁気分離法による火力発電所ボイラー給水中的酸化鉄スケール除去 - 酸素処理スケールの凝集特性 -

Removal of Iron Scale from Boiler Feed-water in Thermal Power Plant by Magnetic Separation  
- Aggregation States of Oxygenated Treatment Scale -

奥村 将雄, 秋山 庸子(大阪大学) ; 三島 史人, 西嶋 茂宏(福井工業大学) ; 岡田 秀彦,  
廣田 憲之(物質・材料研究機構) ; 山地 豪, 松浦 英樹, 難波 正徳(四国総合研究所) ; 関根 智一(荏原工業洗浄)  
OKUMURA Masao, AKIYAMA Yoko (Osaka University); MISHIMA Fumihiro,  
NISHIJIMA Shigehiro (Fukui University of Technology); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS);  
YAMAJI Tsuyoshi, MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Institute Inc.);  
SEKINE Tomokazu (Ebara Industrial Cleaning Co., Ltd.)

### 1. はじめに

火力発電所では、給水系配管が腐食することにより生じる酸化鉄スケール(腐食生成物)によって、経年的に発電効率が低下することが分かっている。本研究は、酸素処理(OT)採用の火力発電所給水系で生成する常/強磁性体の混合スケールを、高勾配磁気分離法(HGMS)を用いて高効率に除去することを最終目的とした。

分離対象粒子の磁化率や粒径は磁気分離率に影響を与えるため、HGMS の磁気分離条件の設定にあたって、スケール粒子の凝集状態を調べることが重要である。そこで、基礎的検討として、スケールの凝集状態に粒子の表面電位が影響することに着目し、表面電位と粒度分布、および磁気分離特性の関係を調査した。

### 2. 実験方法

まず、OT スケールの主成分であるヘマタイト、マグネタイト、ゲータイトのゼータ電位の pH 依存性を調べた。懸濁液の pH はそれぞれ 3~10 の範囲内で調整した。次に、実際の OT スケール中の各酸化鉄成分の分析値[1]の比率を参考にして、マグネタイト 0.4 g とヘマタイト 1.6 g の混合物の磁気分離実験を、印加磁場 6 T、流速 90 mm/s で行った。この際、粒子濃度 200 ppm の懸濁液を 10 L 投入し、pH = 4, 7, 9 と pH を変化させて磁気分離を行った。

### 3. 実験結果

ゼータ電位測定の結果を Fig.1 に示す。すべての粒子において、中性付近で粒子のゼータ電位の絶対値が最も小さくなっていることが分かる。そのため、中性付近では、粒子間の静電的斥力が、酸性・塩基性環境と比べて小さくなるため、粒子が凝集しやすいと考えられる。粒度分布測定の結果もそれを支持するものであり、見かけの粒径が大きいほど粒子に作用する磁気力が大きいことから、中性環境で分離率が高いと推察された。磁気分離実験の分離率の結果を Fig.2 に示す。中性環境における混合物の分離率が最も高いことから、粒子の表面電位が凝集状態を変化させ、それによって見かけの粒径が変化し、分離率に影響したことが確認できた。

### 4. 結論

スケール粒子の表面電位が凝集状態、磁気分離特性に影響していることが確認できた。今後は磁気分離によって磁気フィルターに捕捉された粒子、およびフィルターを通過した粒子のそれぞれの組成を詳しく調査することで、常/強磁性体の混合スケールの高効率な分離条件を検討する。

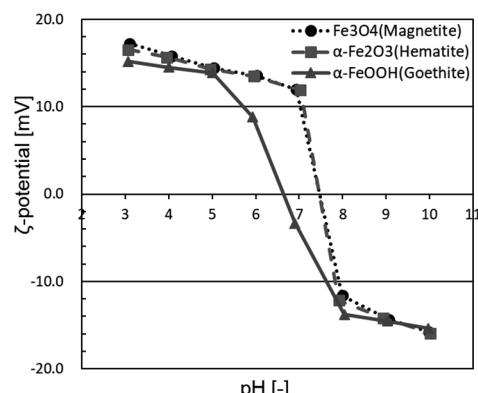


Fig.1 Zeta potential of main components of OT scale as a function of pH.

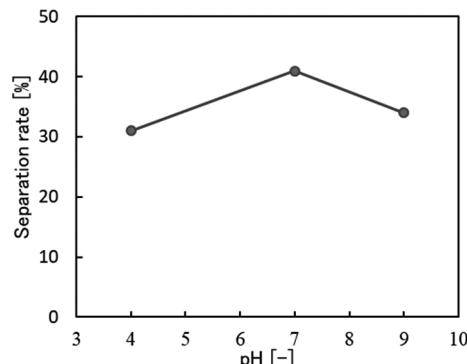


Fig.2 The separation rate of mixture of magnetite and hematite as a function of pH.

本研究の一部は日本科学技術振興機構(JST)の先端的炭素化技術推進開発(ALCA)「磁気分離法による発電所ボイラーグ水中的酸化鉄除去」(JPMJAL1304)の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- M. Hiramatsu, J. Yamamoto, Y. Akiyama, F. Mishima, S. Nishijima, H. Okada, N. Hirota, T. Yamaji, H. Matsuura, S. Namba, T. Sekine, Y. Kobayashi, M. Seto, Journal of Physics: Conference Series, Vol.1293, 012079 (2019).

## 電磁力型海水・油分離装置の流路断面形状と魚卵の分離性能

Cross-sectional shape of channel of electromagnetic force type separator and separation performance for fish eggs

赤澤 輝彦, 東 凌歩, 岩本 雄二, 梅田 民樹(神戸大)

AKAZAWA Teruhiko, AZUMA Shinobu, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki (Kobe Univ.)

E-mail: akazawa@maritime.kobe-u.ac.jp

空荷の船舶は出港地で海水を取水し、これをバラストとして利用することで姿勢安定を図る。取り込んだバラスト水は積荷港で船外に排出される。このバラスト水の移動により、世界各地で外来種による生態系の破壊などの環境問題が起きている。国際条約によりバラスト水に含まれる水生生物の完全な無害化が求められているが、現在普及している浄化装置では、劣悪環境に耐性のある不活卵や胞子、シストなどの除去ができておらず、これらに対応できる新たな浄化処理技術の登場が待たれている。これらの不活卵等の除去に、電磁力型海水・油分離装置が使えるのではないかと考え、これを用いたバラスト水浄化の研究を始めている。

Fig.1に分離装置の概略図を示し、油分離の原理を説明する。海水の流路方向に磁場を印加し、ダクトに取り付けた電極板により、海水に通電を行う。このとき海水はローレンツ体積力  $F_L$  を受ける。一方、油粒子は不導体であるため  $F_L$  が働くかない。このため、油は海水より反作用を受け、 $F_L$  と逆の方向に移動する。電極板より下流に分離板を設ければ、油が除去され油濃度が下がった海水の流れ(A)と、油が濃縮された海水の流れ(B)に分けられる。

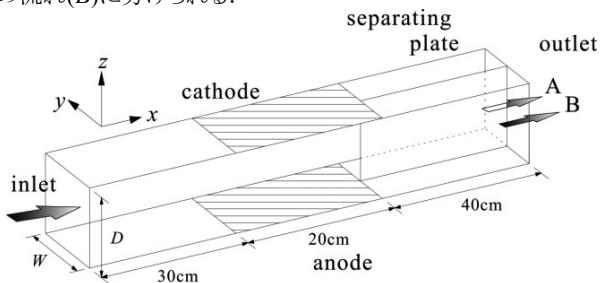


Fig.1 Schematic diagram of the oil-seawater separator.

本研究では、電極間距離  $D = 16\text{mm}$ 、電極幅  $W = 27\text{mm}$  の長方形型流路断面をもつ分離器(#1)と、 $D = 27\text{mm}$ 、 $W = 16\text{mm}$  の断面形状をもつ分離器(#2)の2種類を作製した。2つの分離器は共に海水流路( $x$ )方向の電極板長さ  $L$  が200mmである。電極板の最下流部 24mm 以降のダクトには、流路を2等分するように仕切り板を設けた。電極板表面での平均電流密度  $i$  が  $310\text{A/m}^2$  となるように海水に通電を行った。磁場は  $x$  軸方向を正の印加方向とし、分離空間中心と超伝導磁石の磁場中心を一致させた。また、分離器入口での平均海水流速  $u$  が  $0.1\text{m/s}$  となるように分離器に流入する海水量を調整した。

最初に海水だけを分離器に流し、出口 A, B から排出される海水量  $Q_A, Q_B$  をそれぞれ計測した。排出される海水の偏りを流量比  $R_w = Q_B/(Q_A+Q_B)$  を用いて評価した。Fig.2に  $R_w$  の磁場依存性を示す。2つの分離器とも印加磁場の増大に対し  $R_w$  は直線的に減少する。また、#1の分離器の方が#2のものより印加磁場に対する水の偏りの効果が大きいことが分かる。電流密度は2種類の分離器とも同じであるため、印加磁場が同じであれば分離空間を流れる海水に作用する  $F_L$  も同じとなる。 $W$  が大きな分離器の方が分離空間出口での  $y$  方向の圧力差が大きくなる。このため  $R_w$  の磁場依存性が#1の分離器の方が大きくなつたと考えられる。

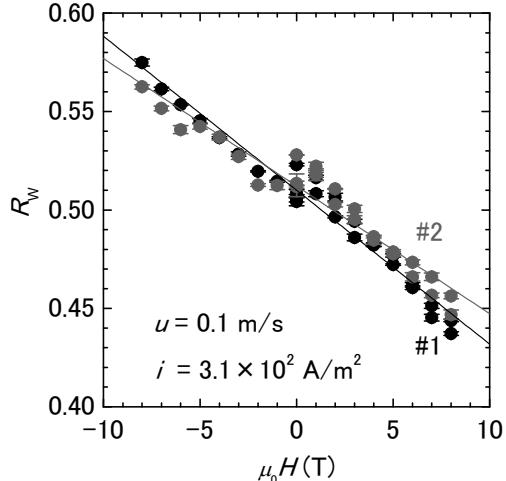


Fig.2  $\mu_0 H$  dependence of  $R_w$ .

次に、分離装置に送る海水に飛び魚の卵(粒径約 2.5mm)を混ぜ合わせ、分離実験を行った。出口 A, B から排出された卵の個数をそれぞれ  $N_A, N_B$  として計測することにより、分離能率  $S$  を  $S = N_B/(N_A+N_B)$  の式を用いて評価した。2つの分離器に対する  $S$  の磁場依存性を Fig.3 に示す。1Tまでの印加磁場に対し  $S$  は、#1, #2 共にほぼ直線的に増加する。ただし、#2の方が分離率の増加割合は大きいことが分かる。また、#1では3T付近で  $S$  が最大値 96%をとる。一方、#2では、7Tで約 98%の分離を示している。これは  $W$  が大きな分離器の方が分離に必要な卵の移動距離が短いことに起因していると考えている。

以上の結果から、 $W$  の小さな分離器の方が分離特性は高くなることが推測される。さらに細かな不活卵の回収には、#2より  $W$  の小さい分離器を用いる必要があると考えられる。

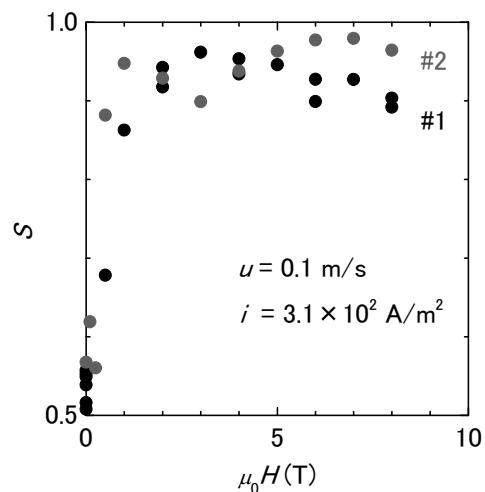


Fig.3  $\mu_0 H$  dependence of  $S$ .

## 磁化活性汚泥法の社会実装の試み ～食品排水処理パイロットプラント試験における課題と対策

*Attempt of social implementation of magnetic activated sludge process—issues and countermeasures in food wastewater treatment pilot plant*

酒井保藏, 直井裕哉, 小笠峻諒, 大島瑛美, 荷方稔之(宇都宮大); サハ ミヒル ラル~(ダッカ大)

SAKAI Yasuo, NAOI Yuya, KOSASA Toshiaki, OSHIMA Emi, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Univ. Dhaka)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

磁化活性汚泥法(MAS法)は余剰汚泥の大幅削減、維持管理の簡易化を磁気分離により実現する新たな生物学的水処理法である。現在、食品工場排水処理プラントのオンラインでのパイロットプラントが建設され、実証試験のスタンバイ状態にある。実証試験に当たり、フルスケール磁気分離装置の性能評価や実機試験に向けて取り組むべき課題をまとめた。

磁気分離で活性汚泥法を運転するMAS法は、生物学的水処理法で根本的に解決されていない固液分離トラブルが原理的に起こらず、維持管理の簡易化を実現した。また、余剰汚泥引抜きを原則として行なわないため、汚泥処理コストを削減できる利点を有する。

活性汚泥法は世界中で有機排水処理に多用されている。下水は活性汚泥法がほとんどであり、国内だけで7000万m<sup>3</sup>/dの処理がされている。全世界の需要も考えると、活性汚泥法に磁気分離が適用できれば、超電導磁石の大きな応用分野開拓が期待できる。現在、MAS法は本計画で進められているパイロットプラント試験の他、実機検証も計画されており、社会実装にチャレンジする段階となっている。今回は、食品工場でのパイロットプラントの準備状況と課題、実機計画に向けて磁気分離装置の性能評価の戦略などを報告する。

### 2. 実験方法

食品工場排水処理施設のオンラインに設置したMAS法のパイロットプラントをFig. 1に示す。感染症対策の外出制限が緩やかにならざる処理試験を開始する予定である。曝気槽は外径2 m、高さ3 m、有効容積約8 mである。曝気槽上部に磁気分離装置を設置した。磁気分離装置は実機に用いるものをそのまま設置した。予想される磁気分離能力は現地の実プラントの処理水量に1基で対応できる。ネオジム磁石をドラム内部に固定し外筒のみを回転させる方式の永久磁石磁気分離装置2台を直列に組み合わせたものである。磁石ドラムは直径16.5 cm、長さ1.5 m、表面の磁束密度は0.5 Tである。パイロットプラントへの排水流入は実プラントの容積負荷(100 m<sup>3</sup>/d)と同じ場合、2.4 m<sup>3</sup>/dであり、磁気分離装置の能力の1/100程度と予想されるため、水処理実験中は1本のドラムのみで磁気分離をおこなう。

### 3. 結果と考察

#### i) ベンチスケール実験からの課題

現地の排水と汚泥を用いたMAS法のベンチスケール実験は、パイロット試験の準備段階として1年以上、継続された。その中で、実機へのMAS法の適用に際して、以下のような、課題が見えてきた。1) 現地の排水の季節変動により、現地水処理施設と同期した処理水質の変動が起きることが示された。安定して排水基準以下の水質を維持するためには、沈殿池の活用や接触酸化法などの簡単な三次処理を追加することが望ましいことが示された。2) 製造工程で添加物として使用されるミョウバンが排水中に含まれており、汚泥中に水酸化アルミニウムとして1g/L程度蓄積することがわかった。汚泥を引き抜かない場合はこのアルミニウムの処理を考える必要がある。3) 容積負荷が高いため、汚泥の増殖と死滅が釣り合う余

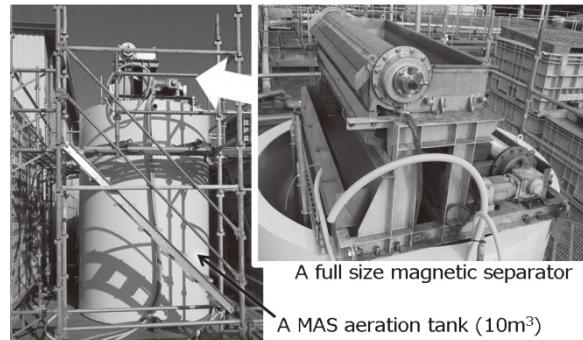


Fig. 1 Photographs of the MAS pilot-plant process (left side) and the full-scale magnetic MAS separator (right side).

剩汚泥引抜き不要の平衡濃度は微生物濃度30 g/L以上の条件である。この濃度では磁気分離でも固液分離が難しいことが示された。1%/dの余剰汚泥引抜きにより、20 g/L程度での平衡濃度で運転できることがわかった。マグネタイトの補充、引き抜いた余剰汚泥の処理コスト、処理の手間を現行の活性汚泥プロセスと比較して実用性を評価しなければならない。余剰汚泥引抜きを軽減できる高負荷対応の高速磁化活性汚泥法への新たな工夫が期待され、汚泥の減容化、可溶化処理、前処理法などの可能性を検討している。

これらの課題の1)や3)はMAS法の課題であるだけでなく、ベースとなっている活性汚泥法の普遍的な課題もあり、磁気分離を活用したこれらの課題の解決法の開拓は、MAS法の活性汚泥法に対する優位性を確立するカギとなる可能性がある。

#### ii) 実用磁気分離装置の性能評価

パイロットプラントによる水処理試験後、実プラント試験に移行する前に、磁気分離装置の性能試験を実施する。汚泥の磁気分離装置はほとんど例がなく、汚泥の様々な性状に応じて性能を予測することが困難なことが実用化の壁となっている。本パイロットプラントは実機用の磁気分離装置を設置しているため、パイロットプラント内のMASを用いてすぐに分離性能を評価可能である。現地の汚泥に磁性粉を加えてMASに調製し、長期間、現地排水で水処理に用いた汚泥を用いて分離実験をおこなうため、実プラントに適用した場合の磁気分離性能をより正確に反映した評価が可能になり、分離性能を予測する工学的な知見が不十分である不安を解消できる。分離性能は磁性粉濃度を増加させることで向上するため、磁性粉濃度の影響をパイロットプラントでシミュレーションできる。

### 4. まとめ

MAS法のパイロットプラントは、現在、実験開始の待機中である。いくつかの簡単ではない課題も見えているが、活性汚泥が磁気分離できる特性を活用した解決法を開拓したい。実機検証は他にも進められており、MAS法の社会実装を押し進め、SDGsに磁気分離で貢献したいと考えている。

## 微生物増殖制御操作による高速磁化活性汚泥法の検討

### Investigation of high rate magnetic activated sludge process by microbial growth control operation

直井 裕哉, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 小林 拓美(宇都宮大); SAHA Mihir Lal (Dhaka 大)  
 NAOI Yuya, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, KOBAYASHI Takumi (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)  
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

#### 1. はじめに

磁化活性汚泥法は処理する排水の負荷に応じて汚泥の平衡濃度が決まる。本研究では従来の活性汚泥法より高負荷で運転できる磁化活性汚泥法を実現することを目的とし、同じ負荷でも平衡汚泥濃度が下がる運転条件を検討した。その結果 10%の汚泥を 1 日 10 分加熱殺菌することで約 2 割平衡汚泥濃度が低下した。それにより磁気分離で運転可能な限界負荷が改善されたと考えられた。

磁化活性汚泥法は活性汚泥に磁性粉を吸着させた磁化活性汚泥を利用した生物学的水処理法である。磁気力によって処理水から分離した汚泥を曝気槽に返送することで、沈降分離が難しい高濃度の汚泥を保持することができる。細胞壁などの難分解性有機物は磁気分離されずに処理水とともに流出し曝気槽に蓄積しないため余剰汚泥を引き抜かない運転が可能である。微生物によって消費された有機物の半分程度が汚泥になるため高負荷ほど平衡汚泥濃度が上昇する。しかし、あまり高濃度になると磁気分離が難しくなるため、曝気槽の容積を変えずに高負荷排水に対応する水処理の高速化には平衡汚泥濃度を下げる必要がある。本研究では汚泥の一部を加熱処理することで死滅させ、死滅した汚泥を有機物として再び処理することで磁化活性汚泥法の高速化を検討した。

#### 2. 実験方法

5L の磁化活性汚泥法ベンチスケール実験装置を用いた。汚泥を磁気分離する磁石ドラムは直径 10 cm、幅 10 cm、最大磁場 0.08 T である。COD<sub>Cr</sub> 負荷 1200 mg/(L·d)、流量 5 L/d で運転した。汚泥の加熱処理は、一定割合の汚泥を引き抜いて 10 分間加熱した。実験開始時は 1 日 10% の汚泥を加熱処理した。53 日目以降は 1 日 30% の汚泥を加熱処理した。

#### 3. 結果・考察

Table 1 に汚泥を加熱処理した結果を示す。10%/日 の加熱処理の場合、MLVSS は約 18000 mg/L で安定し、加熱処理を行わない場合と比較して平衡汚泥濃度が約 2 割減少した。一般に、有機物は活性汚泥(微生物)により、約半分が汚泥に同化され、半分は CO<sub>2</sub> に無機化されるといわれる。単純に、加熱殺菌した汚泥が有機物として生分解されると仮定すると、加熱処理した汚泥の半分は CO<sub>2</sub> に分解されると予想できる。この考えに基づいて予想される汚泥平衡濃度の減少率は約 2.4 割である。実験結果は予想値より小さい減少率となった。

Table 1 Equilibrium MLVSS and effluent COD<sub>Cr</sub> by various conditions of thermal treatment

Thermal treatment [% / d]	0	10	30
MLVSS[mg/L]	22000	18000	17000
Total COD <sub>Cr</sub> [mg/L]	35	120	400
Dissolved COD <sub>Cr</sub> [mg/L]	24	80	330

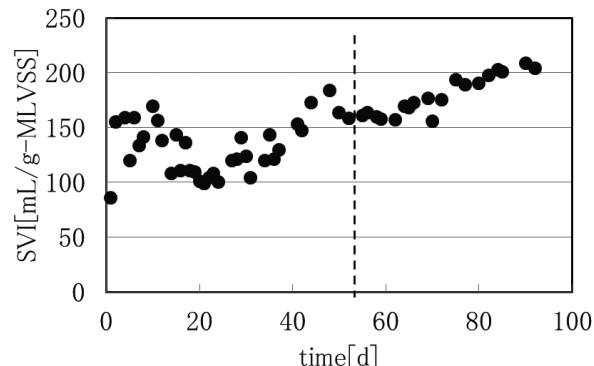


Fig.1 Change of SVI

また活性汚泥処理水の全 COD<sub>Cr</sub> は約 120 mg/L であった。一律排水基準は満たしたが、加熱処理を行わないときの全 COD<sub>Cr</sub> 35mg/L より大幅に悪化した。10%/日の加熱処理による有機物の負荷は 1440 mg/(L·d) に相当するため、模擬排水中に含まれる有機物と合わせて 2640 mg/(L·d) の負荷となる。大幅な負荷の増加が流出 COD<sub>Cr</sub> の増加の原因となったと考えられる。流出 COD<sub>Cr</sub> 中の溶解成分と懸濁成分の比率は加熱処理の有無でほとんど変化しなかった。必ずしも懸濁性有機物が選択的に流出していないことが分かった。

30%/日の加熱処理では、汚泥濃度は約 17000 mg/L になった。予想される平衡汚泥濃度 9100 mg/L よりかなり大きく、加熱処理率を上げても平衡汚泥濃度が期待されるほど下がらないことが示された。活性汚泥処理水の COD<sub>Cr</sub> は約 400 mg/L となり、一律排水基準を大幅に超過した。30%/日の加熱処理は 4320 mg/(L·d) の有機物負荷の増加に相当するため、過負荷状態となり、処理水質が悪化したと考えられた。

Fig.1 に SVI の経時変化を示す。10%/日の加熱処理では 30 日目あたりから SVI が上昇したが、この時は曝気槽内に糸状菌が見られた。溶解性の有機物が増加したことでの糸状菌が増殖しやすい条件になったと考えた。また、30%/日の加熱処理では SVI が増加した。曝気槽内の汚泥を顕微鏡観察した結果、糸状菌は見られなかった。しかし、ろ過後の流出水の顕微鏡観察を行った結果、細菌が多くみられた。これらのことから 30% の加熱処理は汚泥のフロック形成に悪影響を及ぼし、凝集性の低い分散汚泥に遷移する傾向が現れたと考えた。

#### 4. まとめ

曝気槽内の汚泥を10%/日で加熱処理し、戻すことで、平衡汚泥濃度が約2割減少し、さらなる高速化の余地が生じた。しかし、加熱処理率を30%/日に増やしても、効果は小さく、むしろ、処理水の悪化につながることが示された。さらに10%/以下の加熱処理条件で、磁化活性汚泥法の高速化の可能性を検討したい。

## 高濃度食品廃液への磁気分離を用いたエタノール発酵による水処理設備の省スペース化

Space saving of water treatment plant by ethanol fermentation using magnetic separation into high-concentration food waste liquid

野村 侑樹, 酒井 保藏, 荷方 稔之 (宇都宮大学)  
 NOMURA Yuki, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.)  
 E-mail: sakajy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

酵母菌にマグネタイトを吸着させ磁気分離するエタノール発酵法の高濃度食品廃液処理への適用を検討した。実排水を用いたベンチスケール実験より、活性汚泥法と比較すると  $30 \text{ m}^3$  から  $3 \text{ m}^3$  以下の反応槽に省スペース化でき、曝気動力も不要になった。約  $7 \text{ L/d}$  のエタノールが回収できることがわかつた。

エタノール発酵法は一般に排水処理に用いられることは少ない。しかし、エタノール発酵法は他処理法と比較すると、適用負荷範囲が広く、活性汚泥法の 100 倍以上の高負荷処理も可能である。糖分を主とする濃厚廃液が発生する工場では、濃厚排水をエタノール発酵させることで全体の排水処理を省略できる場合がある。また酵母菌はマグネタイトを混合するだけで磁気分離が可能となり、繰り返しの使用も可能であることがわかつた。

対象とする実際の食品工場の廃水システムを Fig. 1 に示す。この工場は排水を下水放流しており、少量の高濃度廃液を個別処理することで下水道受入基準を達成することが示唆された。そこで、排水の全体処理の省略を目指し、磁気分離を用いたエタノール発酵法を個別処理へ適用することを検討した[1]。

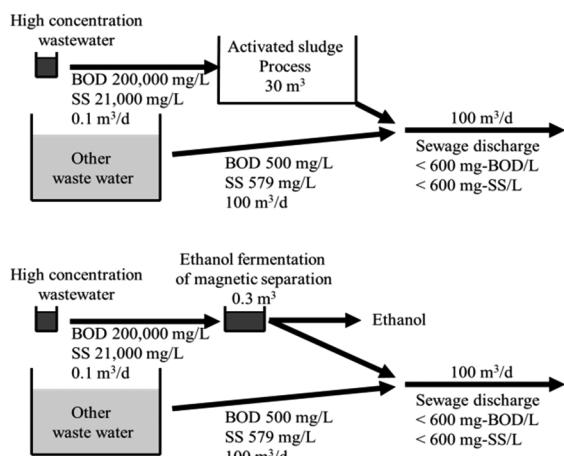


Fig. 1 Process wastewater of a food factory

### 2. 実験方法

実際の食品工場から排出される  $200,000 \text{ mg-BOD/L}$  の高濃度プロセス廃液に酵母菌と同濃度のマグネタイトを加え、室温(約  $20^\circ\text{C}$ )で糖分をエタノールに変換し、反応後、加熱・蒸散除去した。酵母菌は市販ドライイーストを用いた。反応後、磁気分離によって回収し、10回純水で洗浄と磁気分離を繰り返し、廃液に再添加した。エタノール濃度は  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TOC、糖度計によって測定した。

### 3. 結果と考察

実験結果を Table. 1 に示す。酵母菌  $2 \text{ g/L}$  で 120 時間発酵させたとき  $159,000 \text{ mg-COD}_{\text{Cr}}/\text{L}$  をエタノールとして除去で

き、酵母菌  $10 \text{ g/L}$  のとき、48 時間で  $139,000 \text{ mg-COD}_{\text{Cr}}/\text{L}$  が除去できた。反応速度は初期酵母濃度に支配されていることが推察された。

磁気分離により、酵母菌を繰り返し使用した場合の結果を Table. 2 に示す。酵母菌と反応液の固液分離は永久磁石で迅速・簡単に実行された。3 回の繰り返し使用で酵母菌の失活は認められなかった。エタノールにより、雑菌の増殖も押さえられ、開放式の反応槽でも腐敗などは認められなかった。 $113,000 \text{ mg-COD}_{\text{Cr}}/\text{L}$  のエタノールを蒸散除去した後の廃液の換算 BOD は  $84,500 \text{ mg/L}$  であり、他の排水(Fig. 1)と混合することによって  $585 \text{ mg-BOD/L}$  となり、下水道受入基準を達成できると推定された。Fig. 1 のシステムに適用する場合、発酵時間が 48 時間では、 $0.3 \text{ m}^3$ ( $0.1 \text{ m}^3 \times 3$ )の反応槽が必要であると考えられ、これは活性汚泥法と比較すると  $1/100$  である。また、 $0.1 \text{ m}^3/\text{d}$  の高濃度廃液からエタノールを回収する場合、約  $7 \text{ L/d}$  分のエタノールが回収できると予想された。

次に、市販の業務用低糖ドライイーストと耐糖ドライイーストを用いて、酵母菌の違いによる影響を検討した。それぞれの酵母菌を  $2 \text{ g/L}$  の濃度で発酵させた結果、約 5 日間で発酵が終了した。96 時間発酵後、TOC として、低糖ドライイーストでは  $45,000 \text{ mg/L}$ 、耐糖ドライイーストでは  $42,700 \text{ mg/L}$  の糖分をエタノールとして蒸散・除去でき、大きな違いはなかった。

引き続き、ベンチスケール連続磁気分離反応装置を用いて連続発酵による COD 成分の除去を検討する。

Yeast (g/L)	Fermentation time (h)	Ethanol removal (mg-COD <sub>Cr</sub> /L)
2	72	131,000
2	120	159,000
5	48	127,000
10	48	139,000

Table. 1 Experimental results of ethanol fermentation using high-concentration wastewater.

Cycle	Fermentation time (h)	Ethanol removal (mg-COD <sub>Cr</sub> /L)
1	48	126,000
2	48	111,000
3	48	113,000

Table. 2 Experimental results of repeated use of yeast. Magnetite concentration of the same as  $10 \text{ g/L}$  yeast.

### 4. まとめ

糖分を主成分とするプロセス廃液を酵母を用いたエタノール発酵により  $1/100$  の反応槽で浄化処理できる可能性が示された。酵母は磁気分離して繰り返し使用できた。

### 参考文献

- Y. Nomura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.115

## 磁気分離を利用した磁化メタン発酵法による食品工場実汚泥の減容化 ～ベンチスケールでの検討～

Volume reduction of actual sludge in food factories by magnetic methane fermentation using magnetic separation ~Examination on bench scale~

五十嵐 創, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大)  
IGARAHSI Hajime, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.)  
E-mail: sakajy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

磁化メタン発酵法はメタン発酵法に磁性粉を添加して磁気分離を適用した嫌気性処理法である。微生物を高濃度に保持し、高い容積負荷での処理が可能となった。今回は磁化メタン発酵法を汚泥処理に適用した、食品工場実汚泥減容化プロセスを提案した。本実験により、食品工場から排出された余剰汚泥において約4割の汚泥減容化を達成した。

汚泥は水処理をする上で毎日大量に発生する。発生した汚泥を処分するにはコストがかかるため、汚泥量を減らすことはコスト削減につながる。今回協力している食品工場では400 m<sup>3</sup>の曝気槽から毎月15 t(30000 mg/L、含水率85%、乾燥重量で2.3 t)の余剰汚泥が発生している。余剰汚泥の発生を抑える方法として、活性汚泥に磁性粉を添加し磁気分離を導入した手法での食品工場排水のベンチスケール処理実験が行われたが、毎日曝気槽体積の1%を引き抜く必要があるという結果が出ている。汚泥処分費や追加で磁性粉の添加が必要になり、経済的負担が大きくなると予想される。そこで、汚泥処分費の負担軽減のために磁化メタン発酵法を用いた汚泥の減容化プロセスが提案された。本研究では栃木県内の食品工場から排出される余剰汚泥を使用し、磁化メタン発酵法の実汚泥減容能力を調査、その結果から実用化可能性について考察した。

### 2. 方法

ベンチスケール実験装置をFig.1に示す。流入する汚泥は食品工場の余剰汚泥を5,000 mg/Lに調製し用いた。反応槽は容積6 Lであり、消化汚泥にマグネタイトを加えたものを投入し、水浴37 °Cの中温磁化メタン発酵として実験を行った。汚泥は反応槽内で処理され、流出部から処理水のみが流出する。汚泥は流出部に設置された回転磁石ドラム(直径97 mm、長さ100 mm、磁束密度80 mT、6 mmピッチ多極プラスチック磁石)式の磁気分離装置により反応槽内に全量返送される。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 磁化メタン発酵法の汚泥減容化能力

汚泥濃度のMLVSS推移をFig.2に示す。反応槽に流入させた汚泥は65日程度で累計60000 mg/Lだが、反応槽の汚泥濃度は40000 mg/L程度に減少していた。この時の汚泥減少率は39%を示した。濃度が50000 mg/Lを超えたあたりで汚泥が漏れたため、汚泥の引き抜きが必要になった。

流出水濁度は40日目までは15~50NTUで変動していたが、40日以降は30~350NTUと変動が大きくなかった。汚泥の分解が進んで反応槽で分解できない物質に、磁性粉が付着せずに磁気分離を通り抜けて流出しているためと考えられる。

pHはメタン発酵法において重要な項目であり、酸性域になるとメタン生成菌の活性が低下する。このため、pHは中性域に保つのが良いとされている。全期間で平均8.06であり、pH調整剤を加える必要がなく安定していた。

メタン発酵法において、汚泥の分解が進むとバイオガスが発生する。ガス中にはメタンが含まれるため、エネルギーとし

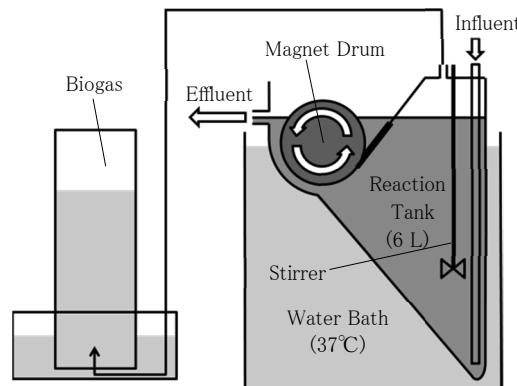


Fig.1 Apparatus for Bench Scale Experiment

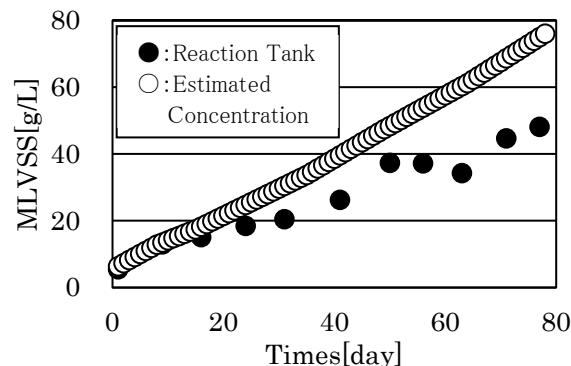


Fig.2 MLVSS

て回収が可能である。バイオガスは実験初期においては発生量が少なかったが、汚泥濃度が上昇するにつれて発生量が上昇、40日以降は発生量が比較的安定し平均で0.78 L/d、最大で1.2 L/d発生した。反応槽1 Lあたり、平均で0.13 L/dの発生が見込まれる。

#### (2) 実用化可能性の考察

今回の結果からスケールアップした食品工場の余剰汚泥減容処理を考える。工場では400 m<sup>3</sup>の曝気槽から一か月で乾燥重量2.3 t(乾燥前30000 mg/L、含水率85%で15 t)の汚泥が発生する。引き抜いた汚泥を今回の実験と同様に5000 mg/Lで流入させるとすると、必要な磁化メタン発酵法の反応槽は90 m<sup>3</sup>になり、減容処理によって一か月あたり乾燥重量1.4 tの汚泥になると見込まれる。また、バイオガスが一か月当たり490 m<sup>3</sup>回収できる見込みになる。

活性汚泥法の余剰汚泥を磁化メタン発酵法で処理する場合、利点として活性汚泥法に手を加える必要がなく、磁化メタン発酵法の導入のみで済む点がある。

### 4. おわりに

磁化メタン発酵法によって、食品工場の実汚泥が減容処理できることが示された。メタン発酵法で重要なpH調整の必要がなく、運転継続が容易であると示唆された。今後は汚泥可溶化処理による、汚泥減容化の促進などを検討していく。

## 磁気分離を導入したメタン発酵/接触酸化プロセスによる食品工場排水処理

### Food factory effluent treatment by methane fermentation / contact oxidation process with magnetic separation

和久井 結太, 酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大)  
 WAKUI Yuta, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.)  
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

#### 1.はじめに

磁化メタン発酵(MMF)法は従来のメタン発酵法に磁気分離を適用した水処理方法である。MMF法と接触酸化(CO)法を組み合わせて食品工場排水を処理し、河川放流可能な水質まで処理できるか検証した。ベンチスケール実験により容積負荷  $4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  で一律排水基準を下回るBOD濃度が得られた。本方法は水処理施設の省スペース化、余剰汚泥の削減が可能であると考えられる。

有機性排水処理の方法である活性汚泥法は、有機性工場排水において最も普及している好気性処理法である。95%以上の高い COD除去率を示す一方で、汚泥生成率が余剰汚泥処理の負担や施設占有面積の拡大などの問題がある。また酸素供給のための曝気が必要であり、その所用動力は水処理施設における消費電力の半分以上を占めるともいわれる。嫌気微生物を用いた水処理法であるメタン発酵法は曝気が不要であり、排水中の有機物の大部分をメタンガスとして回収できる。メタン発酵法に用いられる消化汚泥はマグネタイトを加えるだけで磁気分離が可能であり、反応槽内に濃縮されたため MMF 法は高負荷での処理に対応できる。また消化汚泥の増殖と死滅の均衡が保たれて余剰汚泥の減容化が可能であると考えられる。食品工場排水を処理するにあたり、MMF法と CO 法を組み合わせたプロセスでの処理を検証した。

#### 2.方法

ベンチスケール実験装置を Fig. 1 に示す。MMF槽は容積 6 L であり、内部には水再生センターで採取した消化汚泥と、同濃度のマグネタイトを加えた。また汚泥の増加に伴い同濃度になるようにマグネタイトを適宜添加した。反応槽は中温メタン発酵の最適温度である 37°C の水浴中に設置した。排水は反応槽内で処理され、汚泥は流出部に設置された回転磁石ドラム(直径 97 mm, 長さ 100 mm, 磁束密度 80 mT, 6 mm ピッチ多極プラスチック磁石を巻きつけたもの)式の磁気分離装置により反応槽内に全量返送されるため、流出部から処理水のみが流出する。MMF槽からの処理水は CO槽へと送られる。CO槽の容積は 2 L であり、MMF処理水の高度処理を目的とした。排水の濃度及び水理学的滞留時間(HRT)を変化させることで、容積負荷を段階的に変化させた。

#### 3.結果及び考察

従来のメタン発酵法の MLVSS は  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  程度とされている<sup>[1]</sup>のに対し、MMFでは磁気分離によって  $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  と 2.5 倍まで高濃度化できた。

Fig.2 に容積負荷  $4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 、HRT 0.6 d における MMF 後及び CO 後の処理水の CODCr 濃度変化を示す。MMFからの流出水は平均  $561 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  黒く懸濁し、悪臭もあるため、河川への放流が困難であり、CO 法と組み合わせる必要があった。CO 処理後は平均  $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  であり、BOD に換算すると  $51.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  と一律排水基準(日間平均  $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )を満たした。しかしながら 303 日目は  $133 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  と基準値を超過しており、高負荷運転による支持体の閉塞が原因と考えられた。安定した処理を行うためには MMF からの流出水をそのまま CO槽に流入するのではなく、高負荷運転での中級処理に採用される担体添加法を経て CO槽の負荷を低減する必要があると

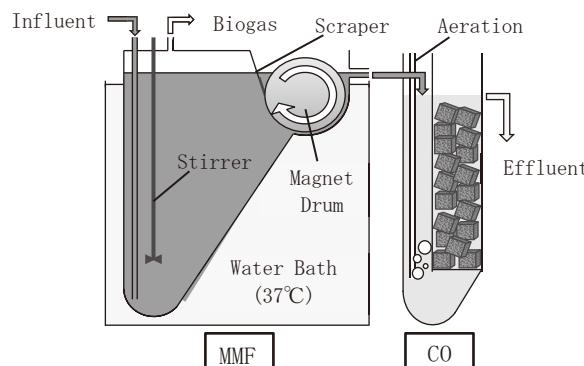


Fig.1 Apparatus for Bench Scale Experiment

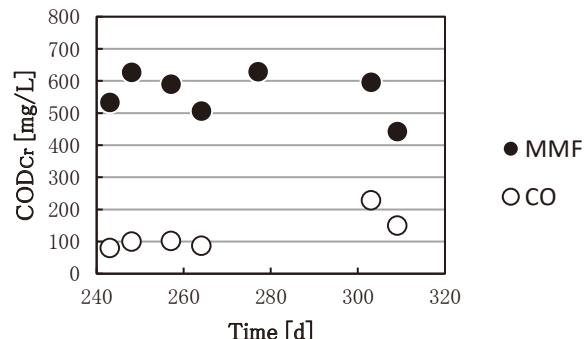


Fig.2 Change of CODCr concentration

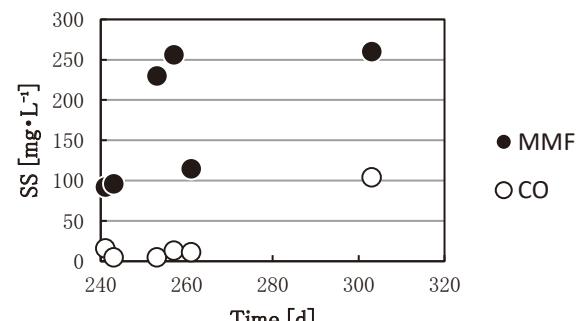


Fig.3 Change of SS concentration

考える。Fig.3 に MMF 後及び CO 後の処理水中の懸濁物質(SS)濃度変化を示す。MMF のみでは一律排水基準(日間平均  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )を超過するが、CO 処理後は基準値以下に処理できた。

#### 4.おわりに

MMF, CO 法を組み合わせた処理では、容積負荷  $4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  で 96.8%と高い CODCr 除去率が得られた。最終的な処理水は一律排水基準を十分に満たしうることがわかった。今後 MMF+担体添加法+CO プロセスでの処理を検証したい。

#### 参考文献

1. 公害防止の技術と法規編集委員会:新・公害防止の技術と法規 2016 水質編.(2016)p.078

# パイ遷移ジョセフソン接合を用いたゼロ静的電力単一磁束量子汎用論理ゲートの設計と評価

Evaluation of zero-static-power single-flux-quantum versatile logic gates designed by using pi-shifted Josephson junction

山梨 裕希, 小原 佑亮, 吉川 信行(横浜国大)

YAMANASHI Yuki, KOBARA Yusuke, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama National Univ.)

E-mail: yamanashi-yuki-kr@ynu.ac.jp

## 1. はじめに

超伝導ジョセフソン接合を能動素子とした集積回路技術は、高速性と低電力性を兼ね備え、信号処理回路をはじめとする様々な応用が検討されている。超伝導集積回路の性能をさらに向上させる手段として、ジョセフソン接合と相補的な電流-電圧特性を持つパイ遷移ジョセフソン接合を導入することが近年検討されている[1-3]。我々はこれまでに通常のジョセフソン接合とパイ遷移ジョセフソン接合を組み合わせて超伝導単一磁束量子論理回路における任意の論理ゲートが作れることと、相補出力を持つ論理ゲートの構成が容易に可能であることを実証してきた。

本研究ではジョセフソン接合とパイ遷移ジョセフソン接合を組み合わせた、2線式論理回路[4, 5]と、それに基づく汎用論理ゲートの構成を検討した。論理値の'0'と'1'を2つの信号線中のどちらかに磁束量子が存在するかに対応させた2線式単一磁束量子回路は、'0'と'1'入力のどちらでも1回のジョセフソン接合のスイッチング動作が起こることから、スイッチング頻度の回路部分による差が起こらず、ゼロ静的電力動作が可能である[5]。さらにこれまでに検討した相補出力を持つ論理ゲートとそのまま接続でき、非同期動作をはじめとした特色あるゼロ静的電力動作が可能な論理回路システムを構成できる可能性がある。

## 2. 汎用論理ゲートの設計と評価

図1にジョセフソン接合とパイ遷移ジョセフソン接合を組み合わせて構成した、2線式ANDゲート(PAND)の等価回路図を示す。図中のPで始まる名称で表された素子がパイ遷移ジョセフソン接合である。この回路はA, B端子からほぼ同時に入力があったときのみOUTから出力が得られ、それ以外はOUTの相補出力~OUTから出力が得られる。回路へのバイアス電流は抵抗を介さずに供給され、ゼロ静的電力動作が可能である。図2に回路過渡解析結果の例を示す。

ジョセフソン接合のみを用いて構成された2線式ANDとPANDのバイアスマージンの比較を図3に示す。ジョセフソン接合のみを用いて構成された2線式ANDに比べ、供給されるバイアス電流がPANDではおよそ半分になっていること、バイアス電流マージンが広くなっていることがわかる。このPAND回路は入力端子(A,  $\neg A$ , B,  $\neg B$ )の定義を変えることによってOR, NAND, NOR回路として動作することができる[4]。1つの回路で全ての基本論理ゲートを実現できる本回路は汎用論理ゲートとして使用でき、設計資産の再利用という観点からも大規模な2線式論理回路の構成に有用であると言える。

## 参考文献

- Y. Yamanashi, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 31 (2018) p.105003
- T. Kamiya, et al.: IEICE Trans. Electron., Vol. E101-C (2018) p.385
- K. Arai, et al.: J. Appl. Phys., Vol. 125 (2019) p.093901
- M. Maezawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7 (1997) p.2705

5. S. Polonski: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 9 (1999) p.3535

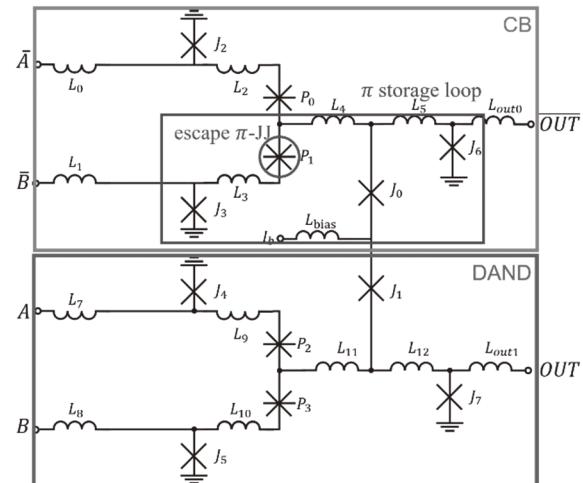


Fig.1 Equivalent circuit of dual-rail ANF gate composed of normal and pi-shifted Josephson junctions (PAND).

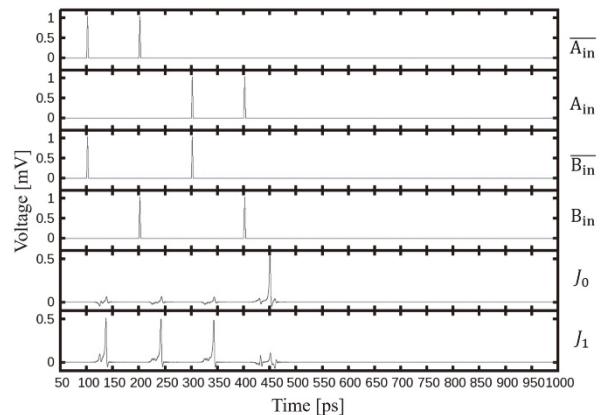


Fig.2 Transient simulation result of the PAND.

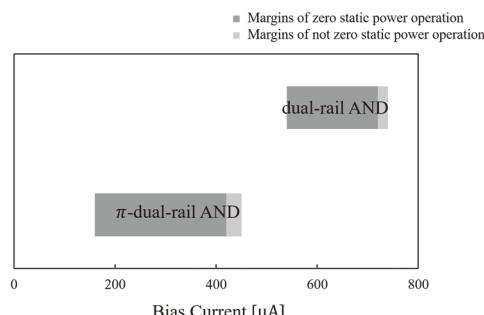


Fig.3 Comparison of bias margins of conventional dual-rail AND and PAND ( $\pi$ -dual rail AND).

# 断熱量子磁束パラメトロン回路を用いたアップダウンカウンタの設計と評価

## Design and evaluation of an up/down counter using adiabatic quantum-flux-parametron logic

山栄 大樹, 竹内 尚輝, 吉川 信行 (横浜国大)  
 YAMAE Taiki, TAKEUCHI Naoki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)  
 E-mail: yamae-taiki-yw@ynu.jp

### 1. はじめに

断熱量子磁束パラメトロン (Adiabatic Quantum-Flux-Parametron; AQFP) [1]回路は断熱スイッチにより、極めて低いスイッチングエネルギーで動作することが可能である。これまでに、AQFP を用いたアップカウンタが提案され、その動作実証が報告された[2]。本研究ではアップダウンカウンタの設計と動作実証を行った。

### 2. AQFP を用いたアップダウンカウンタ

Fig.1 に AQFP を用いたアップダウンカウンタに用いられる T-FF の回路図を示す。ここで、 $T$  はトグル入力、 $R$  はリセット入力、 $U, D$  はそれぞれアップ、ダウン動作の制御入力、 $Q_{n,i}$  は現在の内部状態、 $Q_{n+1,i}$  は次の内部状態、 $Out, Out_u, Out_d$  はそれぞれ次段のカウンタの入力  $T, U, D$  への出力である。このカウンタは T-FF をベースに設計されており、内部状態が論理 1 から 0 (0 から 1) になるときに次段のカウンタへ計数が増加 (減少) されるように論理 1 が出力される。リセットはリセット線と T-FF のフィードバックループを磁気的に結合させることで行う。各カウンタの内部状態は、カウンタとは独立した励起電流で駆動するバッファチェインによりシリアルに読み出される。

### 3. 測定結果

Fig.2, Fig.3 に 4-bit アップダウンカウンタに用いられる T-FF の顕微鏡写真と測定波形を示す。 $I_{x1,w}, I_{x2,w}$  はカウンタを駆動する励起電流、 $I_{r,u/d}$  はリセット入力電流、 $I_{in,u/d}$  は計数入力電流、 $I_{ctl,u}, I_{ctl,d}$  はそれぞれアップ、ダウン動作の制御入力電流、 $I_{x1,r}, I_{x2,r}$  は読み出し用バッファチェインを駆動する励起電流、 $V_{out,u/d}$  は出力電圧である。Fig.3 より、まずリセットを行い、その後計数入力と制御入力を入力し、各 T-FF の内部状態が変化する。計数入力から論理 0 を入力した後、 $I_{x2,w}$  を励起された状態で保持し続け、 $I_{x1,r}, I_{x2,r}$  によって読み出し用バッファチェインを励起する。各カウンタからバッファチェインにデータ伝搬が完了すると、 $I_{x2,w}$  は立ち下がり、各 T-FF の内部状態が MSB から LSB へと順にシリアルに読み出される。測定において 4-bit アップダウンカウンタの正常動作を確認した。

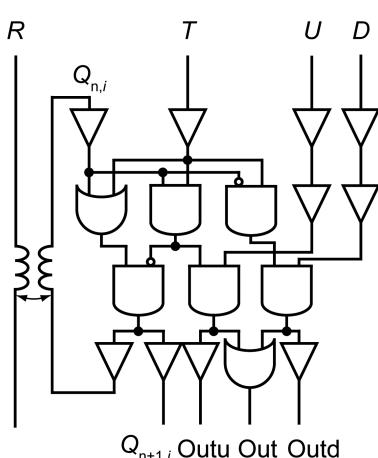


Fig.1 Schematic of a T-FF in an up/down counter.

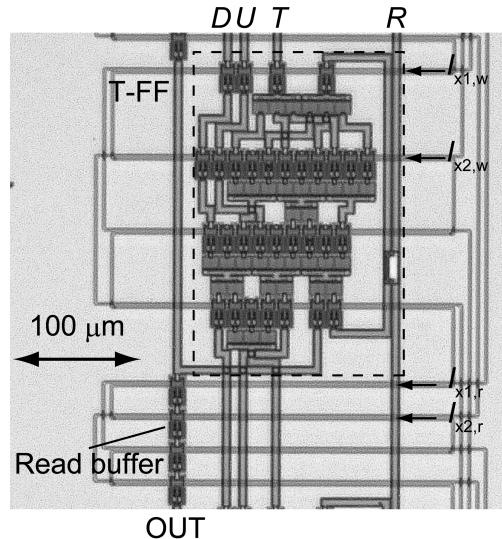


Fig.2 Micrograph of a T-FF in an up/down counter.

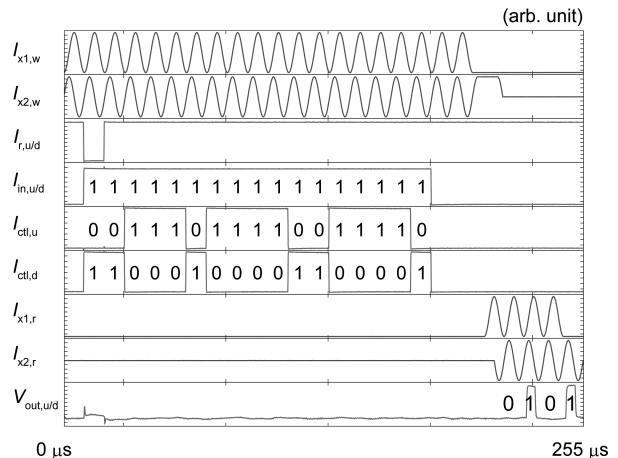


Fig.3 Measurement waveform of a 4-bit up/down counter.

### 謝辞

本研究に使用された回路は、産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム CRAVITY において作製された。本研究は JSPS 科研費 (18H01493, 19H05614) の助成を受けたものである。

### 参考文献

1. N. Takeuchi et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 26 (2013) p. 035010.
2. 山栄大樹他, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, (2020) 13a-B408-8.

# 機械学習による断熱量子磁束パラメトロン集積回路の配置順序最適化の改良検討

Improvement of placement order optimization model for adiabatic quantum-flux-parametron integrated circuits via machine learning

山田 剛久, Ayala Christopher, 斎藤 落生, 田中 智之, 吉川 信行(横浜国大)  
 YAMADA Takehisa, AYALA Christopher, SAITO Ro, TANAKA Tomoyuki, YOSIKAWA Nobuyuki (YNU)  
 E-mail: yamada-takehisa-bn@ynu.jp

## 1. はじめに

近年、情報化社会によりコンピュータの需要が高まっている。しかし、現在のコンピュータの多くは半導体CMOS集積回路で構成されおり、CMOS回路の集積力の向上から来る消費電力の問題や、微細加工化技術の限界による性能の限界が近づいている。そこで我々は、半導体CMOS論理回路に代わる超伝導集積論理回路の一つである断熱量子磁束パラメトロン(Adiabatic Quantum Flux Parametron : AQFP)について、研究を行っている。AQFP論理回路の特徴として、CMOSと比較して $10^5 \sim 10^6$ 倍もの低消費電力で動作が可能なことが、特徴である。<sup>[1]</sup>

しかし、AQFP論理回路には素子の向きや信号線の配線長の制限など配置制約が多い。さらには、現在では最適な論理素子配置を求めるプログラムが少ない。現在使われている遺伝的アルゴリズムを利用したプログラム<sup>[2]</sup>では、巨大集積回路の配置最適化では、多大な最適化時間を必要とする問題がある。

そこで本研究は、AQFP集積回路の配置設計を少ない時間での最適するために、強化学習とニューラルネットワークモデルに注目した。これらを用いる事で、少ない時間での最適な配置を提案するモデルの作成を目的としている。以前の研究では、回路データから機械学習が適用可能な系列データを作成する方法の提案を行った。本論文では、系列データを配置順番を考慮したデータに変換するモデルの改良検討を行う。そして、そのモデルの評価を行う。

## 2. 順番最適化モデル

以下の手順で順番最適化モデルが作成される。まず最初に論理回路の構造を表すネットリストから、グラフ化を行う。この際にフェーズ数を表すフェーズノードを入れることで、有効エッジのみのグラフを作成する。

次に機械学習で扱うために各論理素子のベクトルの作成を行う。ここではOne-hot encoding に注目して、基本特徴ベクトルの作成を行う。その際、論理素子毎にベクトルを作るのではなく、論理素子の入力数と出力数に注目してベクトルを作成する。

次に、作成したグラフと各ノード毎のベクトルに対して、Relational Graph Convolutional Network (RGCN)<sup>[3]</sup>によって畳み込む事で、各ノードベクトルがグラフ構造を考慮した特徴ベクトルの作成を行う。

それらの特徴ベクトルをAttentionモデル<sup>[4]</sup>を用いる事で、配置順番の決定するモデルを作成する。本モデルのハイパーパラメータは、基本は巡回セールス問題のハイパーパラメータ<sup>[4]</sup>を使用した。但し、入力埋め込みを先ほどのRGCNを用いる事と、選択フェーズ以外のノードにはマスクを行う。これによりフェーズ毎に素子の選択を行う。本モデルの詳細は図1に示す。

本モデルの訓練時には疑似回路データを作成し、そのデータを使うことで訓練を行った。更には、訓練時には実際に配置順番から得られる配置評価値が必要な為、レフトエッジ配置アルゴリズムを使った。配置評価値は、AQFPの制限長を考

慮した評価値<sup>[2]</sup>を使った。

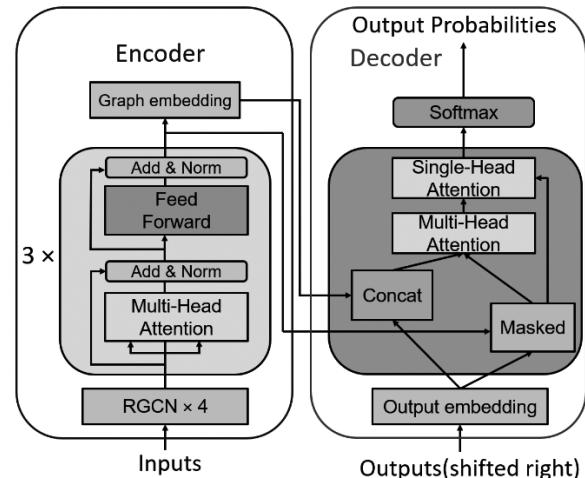


Fig.1 Configuring the placement order optimization model

## 3. 改良検討

今回は順番最適化モデルの最適精度の向上への検討をいくつか行った。まず活性化関数の改良である。以前まではReLU関数を使っていたが、Mish関数<sup>[5]</sup>で精度の差異を確かめた。その結果、2つの活性化関数を使って最適化される回路がともに等しいことが確認できた。そこで複数の最適化された回路の分析を行う。そこから最適化回路の特徴分析を行う予定である。更には、一番最初に選ばれるノードによって最適評価値が大きく変わる為、一番最初に選ばれるノードの分析を行い、その影響が確かめられた際には、最適なファーストノードを選択するモデルへの改良を行う。そしてそのモデルの評価を行い、精度の向上を確かめる。

## 参考文献

- N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa Superconductor Science and Technology, vol.26, number3, 035010, 2013.
- T. Tanaka, C. L. Ayala, Q. Xu, R. Saito, and N. Yoshikawa, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.29, pp. 1–6, 2019.
- M. Schlichtkrull, T. N. Kipf, P. Bloem, R. V. D. Berg, I. Titov, and M. W, The Semantic Web–15th International Conference, ESWC 2018, Proceedings, pp. 593–607, 2018.
- W. Kool, H. V. Hoof, and M. Welling, Attention, Learn to Solve Routing Problems!" International Conference on Learning Representations, 2019.
- Misra, Diganta, Mish: A Self Regularized Non-Monotonic Neural Activation Function, 2019.

# SQUID式ガイド波試験へのニューラルネットワークの導入 -その1-

## Introduction of Neural Networks to SQUID-based Ultrasonic Guided Wave Testing -No. 1-

廿日出好, 渡邊敬祐(近畿大学)

HATSUKADE Y., AZUMA Y., WATANABE K. (Kindai Univ.)

E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

### 1. 緒言

我々は、長大なパイプラインのリモート検査技術として、高温超伝導(HTS)SQUIDと磁歪式超音波ガイド波とを組み合わせたガイド波試験技術の開発を行ってきた[1, 2]。これまでに、配管全周にほぼ均一なガイド波を送受信する手法を開発し、アルミ配管の全周検査を行う技術を開発した。今回、スリット、斜めのスリット、円形欠陥などの人工貫通欠陥をアルミ管に設け、ガイド波を発生させて全周検査を行い、得られたガイド波分布画像から、欠陥形状推定を行うため、ニューラルネットワーク(NN)の導入を試みた。NNに欠陥情報を学習させるため、超音波伝搬解析シミュレータSWAN21を用いて、実験のサンプル配管を模擬した2次元モデルについて解析を行い、得られた欠陥信号データを学習させた。全周検査では2次元の磁場分布が得られるため、ここでは画像を用いたパターン認識やセグメンテーションで優れた成果を上げているConvolutional Neural Network(CNN)を用いた。

### 2. 配管全周検査装置

本研究で構築・使用した高温超伝導SQUID式非破壊検査システムでは、対象管に貼り付けたニッケルに、励振コイルを巻き付け送信器とし、正弦波バースト波電流を印加することで励振磁場を発生させる。この励振磁場により、送信器のニッケル薄板に磁歪効果により歪が生じる。この歪が超音波ガイド波として管を伝搬していく。この伝搬した超音波ガイド波を、管上の受信部にもニッケルを貼り付け、その逆磁歪効果(ビラリ効果)により振動を磁気信号に変換し、直上に設置したHTS-SQUIDグラジオメータで測定する[1, 2]。

### 3. 実験と解析

上記の検査システムを用いて、受信器から450 mmの位置にスリット、斜めスリット、円形欠陥をそれぞれ設けたサンプル配管3本に対して全周検査を行った。周波数60 kHz, 1サイクル, 0.3 A<sub>pp</sub>のバースト波電流を送信器のコイルに印加し、T(0, 1)モードガイド波を管に発生させた。管に設けた欠陥中心を0°として、HTS-SQUIDグラジオメータを0°の位置にリフトオフ9 mmで設置し、計測毎に45°間隔で管を回転させることで全周におけるガイド波由来の磁気信号を計測した。配管全周で計測した信号から縦軸を角度、横軸を時間とし、ガイド波

由来の磁気信号強度のコンターマップを作成した。これらを図1(a)～(c)に示す。送信器からの入射波と、入射波が管左端で反射した反射波が約100 μsと290 μsから測定されている。その後、スリット、斜めのスリット、円形欠陥からの反射信号である欠陥信号D1, D2, D3が約390 μsから測定された。これらの欠陥信号の強度や分布は、欠陥の形状により異なっていた。

次に、超音波伝搬解析シミュレータSWAN21を用いて、欠陥を設けて全周検査を行った3種の欠陥を持つサンプルを、180度の軸に沿って切り開いた2次元の板でモデル化し、管のT波に相当するSH(Shear Horizontal)波の伝搬解析を行なった。解析から得られたガイド波による変位分布を図1(d)～(f)に示す。実験による磁場分布と解析の変異分布における欠陥信号は空間的によく一致した。

### 4. NNを用いた欠陥形状推定

Pythonで記述するNNフレームワークKerasを用いて、CNNをベースに画像分類のためのプログラムを作成した。ここでは、図1の解析結果を学習データとするCNNを構築した。入射波などのガイド波信号に対してSNRが6～47%となるランダムノイズを解析画像のRGB値に加えるデータ水増しを行い、解析画像の数を各168枚まで増加し、これらをCNNで学習させ、実験画像判定に適用した。その結果、97～98%の精度で欠陥形状の判別を行うことができた。また、シミュレーション画像から200x400ピクセルずつ画像を切り出し、各データを欠陥無し、入射波、スリット信号、斜めスリット信号のようにラベリングして同じ構成のCNNに学習させ、実験データを同様のサイズに切り出した画像について、上記ラベルを推測するプログラムについても検討を行った。その結果、欠陥無、入射波や斜めスリットなど特徴的な信号を含む領域については一部正しく分類されたが、ノイズの多い実験データでは正しい分類は困難であった。学習データおよび測定データのさらなる精度向上が課題としてあげられる。

### 参考文献

- [1] 廿日出好, 他, 2016年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集, 1D-p03, p.55, 2016.
- [2] 廿日出好, 他, 2016年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集, 1D-p04, p.56, 2016.

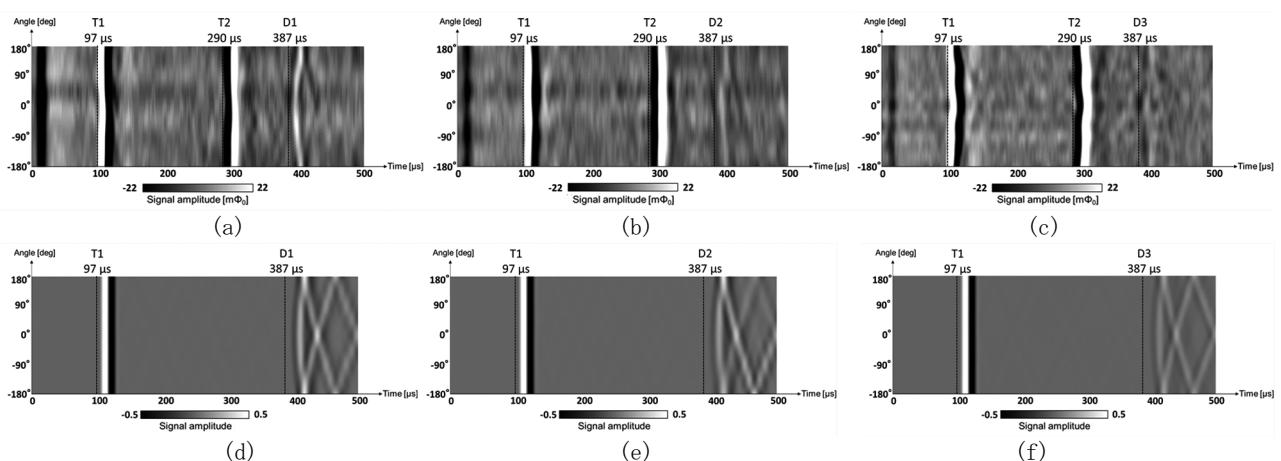


Fig. 1. All-round inspection results on Al pipes with various defects. (a) With slit (Exp.) (b) With inclined slit (Exp.) (c) With hole (Exp.), (d) With slit (Sim.) (e) With inclined slit (Sim.) (f) With hole

# 光子数検出器アレイ用 NbN 集中定数力イネティックインダクタンス検出器の作製

## Fabrication of NbN Lumped-Element Kinetic Inductance Device for Photon-Number Resolving Detector Array

寺井 誠, 成瀬 雅人, 田井野 徹, 明連 広昭(埼玉大院理工)  
TERAI Makoto, NARUSE Masato, TAINO Tohru, and MYOREN Hiroaki (Saitama Univ.)  
E-mail: m\_terai@super.ees.saitama-u.ac.jp

### 1.はじめに

生体試料に導入された蛍光物質からの蛍光を時間相関分光することにより、蛍光物質の周りの生体試料の情報を得ることができる。中赤外領域での測定が可能で光子数検出可能なイメージング検出器として、光学 LEKID アレイを検討している[1,2]。入力に光ファイバーアレイを用いることを前提に検出器の間隔を  $250\text{ }\mu\text{m}$  として LEKID を設計し、コプレーナ線路を用いたマイクロ波読み出しによる基礎的な応答を測定した。

講演ではさらに詳細な設計およびマイクロ波領域での共振特性などを詳しく報告する。

### 2. 光学 LEKID アレイの設計

光学 LEKID アレイの 1 素子分の設計レイアウトを図 1 に示す。入力をシングルモードの光ファイバーアレイとし  $250\text{ }\mu\text{m}$  間隔で配置することを仮定して、 $16\text{ }\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$  のミアンダ型のインダクタ L を光検出部、幅  $154\text{ }\mu\text{m}$ 、高さ  $30\text{ }\mu\text{m}$  のインターデジタル型のコンデンサ C と接続した集中定数形 LC 共振器を構成し、図の下部に配置されたコプレーナ線路と結合する。

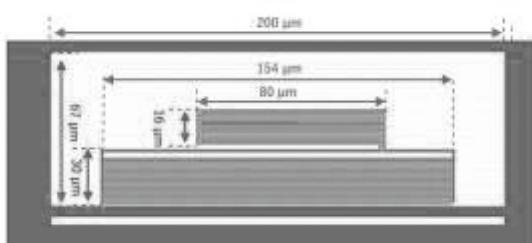


図 1 LEKID1 素子分の設計レイアウト

ミアンダ型のインダクタは、厚さ  $20\text{ nm}$ 、幅  $500\text{ nm}$  の NbN ナノワイヤで形成され、主に力学的インダクタンスによる  $1\text{ }\mu\text{m}^2$  当たり  $023\text{ pH}$  程度のインダクタンスを仮定して設計した。それぞれの LEKID の共振周波数を変えるために、インターデジタル型のコンデンサの容量を変化して設計した。これにより、 $3.0\text{ }~\sim 9.0\text{ GHz}$  の間で共振ピークを持つように 12 個の LEKID を設計し、コプレーナ線路の中心部に配置した。

### 3. 素子の作製

NbN 薄膜は、MgO(100)単結晶基板上に室温で Ar と  $\text{N}_2$  の混合ガス中で直流スパッタリング法にて堆積した。微細加工は、電子ビーム描画法とフォトリソグラフィ法を用いて行った。

### 4. 測定結果

作製したLEKIDのマイクロ波領域でのマイクロ波透過特性は、 $0.5\text{ K}$ に到達可能な無冷媒冷凍機を用いて測定した。図2は、 $0.8\text{ K}$ におけるマイクロ波透過特性S21を示している。 $1.66\text{ GHz}\sim 2.2\text{ GHz}$ の間で6つの共振ピークが観測された。Q値は約4400～24000となった。測定結果より、力学インダクタンスによるシートインダクタンスは想定した値よりかなり大きな値となった。

次に、測定温度を  $800\text{ mK}\sim 2500\text{ mK}$  の間で測定温度を変化させたときのピーク1の温度変化を図3に示す。温度上昇について、共振周波数とQ値の低下が観測された。

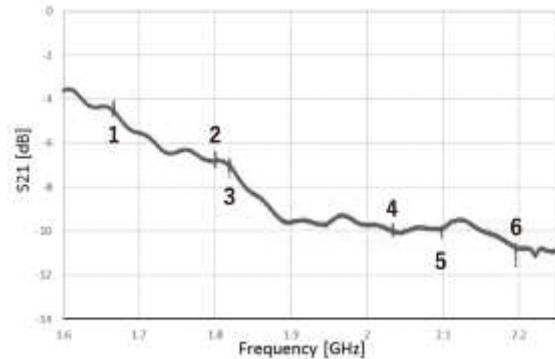


図2 作製した素子のマイクロ波透過特性

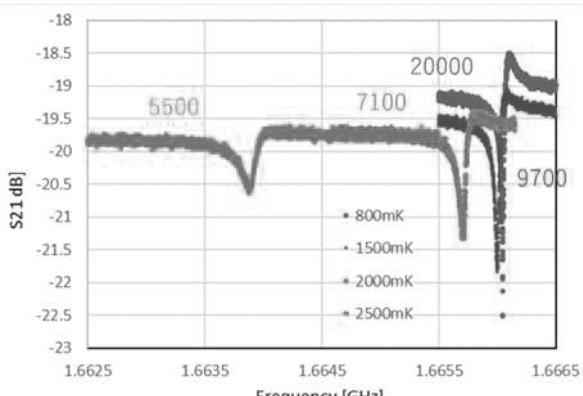


図3 温度変化による共振ピークの変化

Mattis-Bardeen理論による複素伝導率の虚部の温度依存性と共振周波数の温度依存性の比較[3]から、インダクタンスはほとんど力学インダクタンスで与えられることが示唆された。また、このLEKIDに中赤外光の单一光子入射したとき発生する準粒子の数は、 $1500\text{ mK}$ までの温度上昇による準粒子の増加量と同等であることがわかった。これは、図3の $800\text{ mK}$ と $1500\text{ mK}$ の共振周波数シフトに相当しており、中赤外光の单一光子検出が期待できることを示唆している。

### 5.まとめ

膜厚  $20\text{ nm}$  の NbN ナノワイヤを用いた LEKID を作製し、共振ピークの観測を行った。温度変化による共振の変化から、中赤外光の单一光子検出が期待できることが示唆された。

### 参考文献

- S. Doerner, A. Kuzmin, K. Graf, I. Charaev, S. Wuensch, and M. Siegel, Journal of Physics Communications, vol. 2, no. 2, p. 025016, 2018.
- B. A. Mazin et al., Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 125, no. 933, pp. 1348–1361, 2013.
- R. Barends et al., Appl. Phys. Lett., vol. 92, p. 223502, 2008.

# BCS 超伝導体の非線形表面抵抗のミクロな理論

## Microscopic theory of nonlinear surface resistance of the BCS superconductor

久保 毅幸(KEK); グレビッチ アレクサンダー(ODU)

KUBO Takayuki (KEK); Gurevich Alex (ODU)

E-mail: kubotaka@post.kek.jp

### 1. はじめに

マイクロ波下における超伝導体の RF 損失の低減は、高エネルギー実験用の粒子加速器や量子コンピュータ用共振器を含む様々な超伝導デバイスにおける主要な課題の一つである。これまでの数十年に亘る研究により、現在では、粒子加速器用の超伝導ニオブ共振空洞は、周波数  $\sim 1$  GHz、温度  $T < 2$  Kにおいて、表面抵抗は  $R_s \sim 1 - 10$  nΩ、クオリティ・ファクターにして  $Q \sim 10^{10} - 10^{11}$  に日常的に到達するようになっている。

表面抵抗或いは  $Q$  値は、空洞内面を流れるマイクロ波電流あるいは対応する表面磁場  $H$  に依存するため、 $R_s = R_s(H)$  あるいは  $Q = Q(H)$  と書けるが、その  $H$  依存性は未だ完全には理解されていない。更に、表面処理や熱処理の方法・条件を変えると、 $R_s(H)$  及び  $Q(H)$  の形状は大きく変わる。例えば、電解研磨を施しただけの空洞では、マイクロ波強度の増加とともに  $Q$  値が減少する。一方、アニール後に僅かに窒素を導入する窒素ドープと呼ばれる処理方法を施した場合には、マイクロ波電流が対破壊電流密度  $j_d$  の半分程度に達するまで  $Q$  値が改善し続ける。他にも様々な表面処理方法が見つかっており、それぞれ異なる非線形性を生む事が知られている。これら  $R_s(H)$  曲線・ $Q(H)$  曲線の形状、及び、これら曲線の表面処理依存性の背後にある物理は 50 年以上に亘る課題である。

超伝導空洞は Meissner 状態で運転されることに加え、冷却時にトラップされる磁束は無視できる程に少ないため、磁束の運動による損失は無視でき、温度 2K 付近での空洞の  $R_s$  は準粒子によるマイクロ波光子の吸収で決まる。これら熱的に励起された準粒子に起因する表面抵抗を記述する理論として、Mattis-Bardeen (MB) 理論がよく知られている。MB 理論は BCS 理論に基づく確立した理論であるが、その導出過程からも明らかのように、電磁場が弱い極限かつ理想的な BCS 準粒子状態密度 (DOS) を持つ超伝導体に対してのみ適用可能である。すなわち、考えられる限り最も簡単な場合にしか適用できない最も単純な理論である。一方、現実の超伝導体では、電流、磁性不純物、物質表面の薄い常伝導層など、様々なペア破壊機構が不随するため、MB 理論は(定性的にさえ)正しい結果を与えるとは限らない。

我々は、BCS 理論まで遡り、電流依存(磁場依存)を含む表面抵抗の理論、更には表面に磁性不純物や物質表面の薄い常伝導層など、様々なペア破壊機構が不随する場合の効果を含む表面抵抗の理論を構築した。

### 2. 理論

我々は BCS 理論の準古典 Green 関数による定式化(Usadel 方程式)を用いて計算する。まず、理想的な BCS 超伝導体のマイクロ波電流依存(マイクロ波磁場依存)を考えよう。言うまでもなく、これは MB 理論では記述できない。よく知られているように、準粒子 DOS は電流によって大きく変形し、BCS DOS とは全く異なる形状をとるからである。更に、この DOS は RF の周波数で振動している事に注意しなければならない [1]。Usadel 方程式を解き、遅延 Green 関数  $G^R$  を求め、 $G^R$  と分布関数の畳み込み積分から複素伝導率の実部  $\sigma_1$  が求まる。表面抵抗は、更に  $\sigma_1$  を深さ方向に積分したものである。もちろん、 $H \rightarrow 0$  の極限で MB 理論が再現される。 $H > 0$  での計算結果の定性的な説明は以下の通りである。マイクロ波

電流或いはマイクロ波磁場  $H$  の増大とともに DOS のピークが広がり、これにより  $R_s(H)$  は  $H$  の増加とともに減少する。更に  $H$  が増大するとスペクトル・ギャップの収縮の影響が支配的になり、今度は  $R_s(H)$  は  $H$  とともに増加する。 $R_s(H)$  の最小値、或いは、 $Q(H)$  の最大値は  $H \sim 0.4$  H<sub>c</sub> 付近に位置する。

次に、現実的な超伝導体として、有限のダイズ・パラメタ、磁性不純物、物質表面の薄い常伝導層との近接効果による結合など、様々なペア破壊機構を有する場合を考える[2,3]。これらの影響を入れ、Usadel 方程式を解くことで、遅延 Green 関数  $G^R$  を求める事ができる。これと分布関数(ここでは Fermi-Dirac 分布)との畳み込み積分が  $\sigma_1$ 、その深さ方向への積分で  $R_s$  が求まる[2]。更に、マイクロ波電流の効果も含めれば、同様の(より複雑な)計算を実行することで  $R_s(H)$  が求まる[3]。

これら物質表面のペア破壊機構により、DOS のピークは広げられ、適度なペア破壊効果がある場合には、理想的な BCS 超伝導体よりも  $R_s$  が低減されることが分かる。例えば、適度な密度の磁性不純物を添加する事で、理想的な BCS 超伝導体よりも  $R_s$  を 50% 程度小さくできる[2]。これらの系に強いマイクロ波電流(マイクロ波磁場)を印加する場合、電流ゼロにおいて既に DOS が広げられているため、 $R_s$  の最小値を与える  $H$  が小さい方にシフトする[3]。また、近接効果で結合した常伝導層の影響は複雑で、様々な非線形  $R_s(H)$  曲線・ $Q(H)$  曲線が生じる[3]。これらの結果は、現実の共振空洞の  $R_s(H)$  曲線・ $Q(H)$  曲線の最小値を与える  $H$  が表面処理方法に依存してずれる或いは消失する事実と符合する。これらの結果は全て BCS 理論の帰結として得られた事を強調しておく。

共振器材料をトンネル測定する事で DOS が得られる。上記の非理想性に対応するパラメタ(ダイズ・パラメタ、磁性不純物濃度や近接効果のパラメタ)を抜き出せば理論との比較が可能である。更に、トンネル測定と表面処理や製膜条件の微修正等と組み合わせる事でこれら非理想性に対応するパラメータのチューニングが可能となるだろう。理論が示す最適値になるよう選べば、 $R_s$  や  $Q$  の改善が可能だろう[2,3]。

なお、有限のダイズ・パラメタを持つ超伝導体に対破壊電流以下のバイアス電流が印加されている場合の  $\sigma_1$  は[4]で計算されている。ダイズ・パラメタとバイアス電流の最適な組み合わせで  $\sigma_1$  を最小化できる事が示されている。

### 参考文献

1. A. Gurevich: Reduction of Dissipative Nonlinear Conductivity of Superconductors by Static and Microwave Magnetic Fields, Phys. Rev. Lett. **113**, 087001 (2014).
2. A. Gurevich and T. Kubo: Surface impedance and optimum surface resistance of a superconductor with an imperfect surface, Physical Review B **96**, 184515 (2017).
3. T. Kubo and A. Gurevich: Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surface nanostructuring in superconductors, Physical Review B **100**, 064522 (2019).
4. T. Kubo: Weak-field dissipative conductivity of a dirty superconductor with Dynes subgap states under a dc bias current up to the depairing current density, Phys. Rev. Research **2**, 013302 (2020).

## 断熱量子磁束パラメトロン回路のゲート間配線の 伝送線路効果に対する反射特性の解析

Analysis of reflection characteristic considering transmission line effect  
in gate-to-gate wiring of adiabatic quantum-flux-parametron circuits

浅井 和人, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)

ASAII Kazuhito, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: asai-kazuhito-xd@ynu.jp

### 1. はじめに

近年の高度情報化社会を支えてきた計算機を構成している半導体集積回路(CMOS回路)は、微細加工技術の限界やリーク電流の増加による消費電力の増大といった問題により、性能に限界を迎える。そこで半導体集積回路に代わる高速動作性と低消費電力性に優れた超伝導集積回路が注目されている[1]。我々はその中の一つである断熱量子磁束パラメトロン(adiabatic quantum-flux-parametron; AQFP)回路の研究を行っている。AQFP回路は静的な消費電力がなく、スイッチングの際にエネルギー一ポテンシャルを断熱的に変化させることで動的な消費電力を劇的に減少させることができる。したがって、CMOS回路と比較すると5-6桁程度低い消費電力で5-10 GHzの高速動作が可能である[2]。

我々は、AQFP回路を用いてより大規模な回路の作製を目指している。そこでより正確なデジタルシミュレーションモデルを考えるためにあたり、AQFP回路の配線間遅延を考慮する必要性がある。そのため、AQFP回路の配線として伝送線路モデルを用いた場合の影響を検討している。

今回は、AQFP回路の配線として伝送線路を用いた場合の動作シミュレーションを行い、伝送線路効果による信号の反射特性の解析を行った。

### 2. 伝送線路を用いた反射波の解析

2段AQFP回路のゲート間配線に伝送線路モデルを用い、信号配線長を $l = 600 \mu\text{m}$ として回路シミュレーションを行った。シミュレーションに用いた回路図を図1に示す。伝送線路 $5 \mu\text{m}$ あたりの素子のパラメータ値、ならびに特性インピーダンス $Z_0$ 、伝搬遅延時間 $\tau_p$ は、 $L_n = 0.325 \text{ pH}$ ,  $C_n = 0.002518 \text{ pF}$ ,  $Z_0 = 8.03 \Omega$ ,  $\tau_p = 0.0405 \text{ ps}/5 \mu\text{m}$ ,  $f = 5 \text{ GHz}$ とした。図2は伝送線路の各地点での電流波形であり、入力信号“0101”に対して正しい出力が得られている。しかしながら、伝送線路の各点における電流、 $I_{5\mu\text{m}}$ ,  $I_{100\mu\text{m}}$ ,  $I_{200\mu\text{m}}$ ,  $I_{300\mu\text{m}}$ ,  $I_{400\mu\text{m}}$ ,  $I_{500\mu\text{m}}$ ,  $I_{600\mu\text{m}}$ ,  $I_{out1}$ ,  $I_{out2}$ の波形において振動が生じていることがわかる。100 ps-150 psの電流波形を拡大したものを図3に示す。図3よりゲートのスイッチに伴い電流パルスが伝搬し、反射波が生じていることが確認できる。波形の頂点から頂点(peak-to-peak)の時間を実測し、距離に対してプロットしたグラフを図4に示す。一方、直線は伝送線路における信号の伝搬速度に対応する伝搬時間と距離の関係を表している。図より反射端において約0.5 ps-1.9 psの範囲の遅延が生じていることがわかる。 $l = 600 \mu\text{m}$ の伝送線路を往復する信号の遅延時間を $\tau_p$ とし、反射端における遅延時間 $\tau_{delay}$ とすると、伝送線路において生じる共振の周期Tは

$$T = \tau_p + 2\tau_{delay} \quad (1)$$

と表される。理論値 $\tau_p = 9.72 \text{ ps}$ より共振周波数 $f_c$ の取り得る値の範囲は74.4 GHz-93.3 GHzとなる。以上よりシミュレーション回路において5 GHzのクロック周波数に対して極めて高次の周波数で反射が起きていると言える。また図3における振動周期Tのシミュレーション値は14.8 psより $f_c$ は67.6 GHzとなり、以上の考察の範囲と近い値となった。

### 参考文献

- D.S. Holmes *et al.*, “Energy-efficient superconducting computing—power budgets and requirements”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, 1701610, 2013.
- N. Takeuchi, *et al.*, “Energy efficiency of adiabatic superconductor logic,” *Supercond. Sci. Technol.* 28, 015003, 2015.

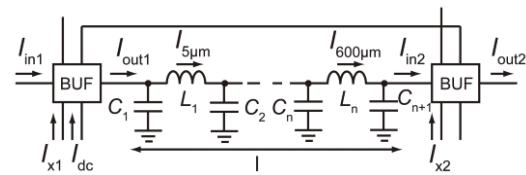


Fig.1 Equivalent circuit of the simulated circuit

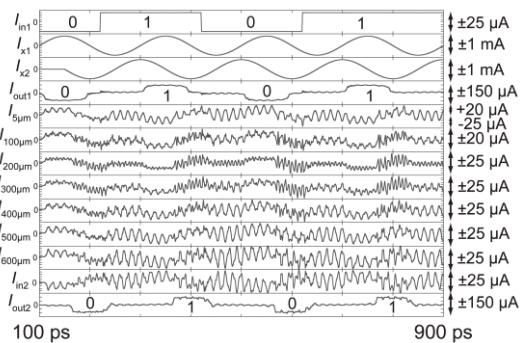


Fig.2 Current waveforms propagating on a stripline ( $l = 600 \mu\text{m}$ )

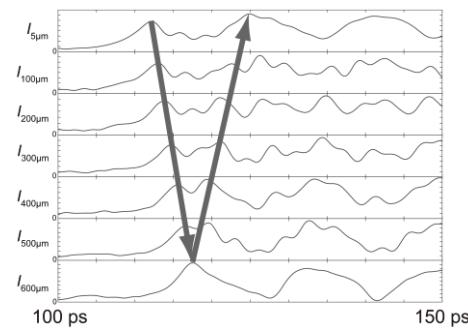


Fig.3 Enlarged current waveforms on a stripline ( $l = 600 \mu\text{m}$ )

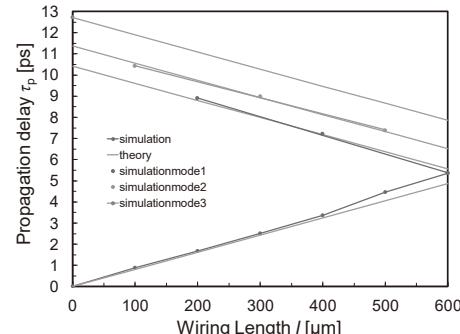


Fig.4 Arrival time versus arrival position of current a pulse

## 断熱量子磁束パラメトロン回路のグリッドレスチャネル配線による長距離配線

### Long distance channel routing for adiabatic quantum-flux-parametron circuit by gridless router

田中 智之, Christopher L. Ayala, 吉川 信行 (横浜国立大学)  
 TANAKA Tomoyuki, Christopher L. AYALA, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)  
 E-mail: tanaka-tomyouki-wy@ynu.jp

#### 1. はじめに

Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP) 回路は、極めて低消費な論理デバイスであり、最新の CMOS 回路と比較して同程度の駆動速度にて、5~6 枝少ない消費電力で駆動できる[1]。AQFP 回路が現状抱える問題点の一つに、伝搬可能な距離が短いというものがある。線路中の寄生インダクタンスによってその距離は制限されており、幅広い線路を使うことで寄生インダクタンスを小さくできる。今回チャネル配線法に線路幅を自由に選択できるグリッドレスルータを採用し、その効果を評価した。

#### 2. AQFP 回路の信号伝搬

Fig.1 に示すように、AQFP 回路は、トランジスタを含んだ、ストリップ線路によって結合している。後段の AQFP 回路が正しく論理を受け取るためには、熱雑音よりも大きな電流の入力が必要である。ビット誤り率によって異なるが、8  $\mu\text{A}$  程度の入力電流が必要で、その時のインダクタンスは約 50 pH である。現在の AQFP 回路設計では、5  $\mu\text{m}$  幅の配線を使用しており、この長さのとき、650  $\mu\text{m}$  の伝搬が可能である[2]。Left-Edge 法によりチャネル配線を行っており、配線の長さが 650  $\mu\text{m}$  を超えた場合は、リピータとしてバッファの挿入を行い、負荷インダクタンスが小さくなるようにしている。AQFP 回路ではすべてのゲートが同期して動作するため、信号伝搬のタイミングがずれないようにすべての信号線に対して、バッファを挟む必要がある。タイミング調整のために挿入したバッファの多さが問題となっており、その問題を解決するために、配線を太くすることで、長さあたりの寄生インダクタンスを減少させる事を検討した。Left-Edge 法はグリッド配線法のため、すべての配線の太さが等しくある必要があるが、グリッドレスな配線法である Glitter[3]を用いることで、必要な配線のみを太くする事ができ、実装面積への影響を最小化しつつ、配線を可能にした。

#### 3. Glitter による配線アルゴリズム

Glitter はグラフベースの配線アルゴリズムである。簡単にアルゴリズムを説明する。

1. Left-Edge 法で用いられる、水平制約グラフ (HCG) と、垂直制約グラフ (VCG) を作成する。
2. HCG と VCG に配線間に必要な距離を重さとして与え、重み付き HCG, VCG を作成する。
3. 重み付き HCG と VCG を組み合わせ、重み付き制約グラフ (WCG) を作成する。
4. WCG は一部分が、無向グラフとなっているため、枝刈りを行い、WCG を有向巡回グラフ (DAG) に変換する。(Fig.2 (a)の状態)
5. WCG のトポジカル順序が最大となるものから、順番にチャネルの下側から詰めて配線を行う。

このような処理を行うことで、線幅の異なる配線を Fig.2 (b) に示すように配線できる。

#### 参考文献

1. N. Takeuchi, et al., Supercond Sci. Technol., Vol. 26, no 3, 035010 (2013)
2. D. Ito, et al., SSV2020, Yokohama, Japan (2020)

3. H. H. Chen, et al., IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 5, no. 4, pp. 459–465, (1986)

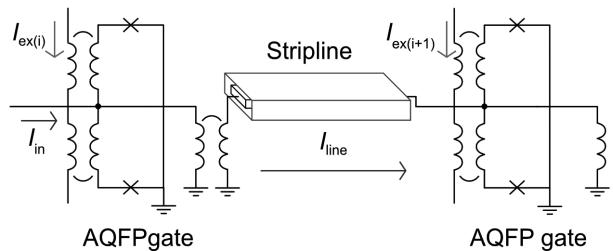


Fig.1 AQFP 回路の信号伝搬。ゲート同士はトランジスタと、ストリップラインにて接続される。ストリップラインの寄生インダクタンスによってループ電流  $I_{line}$  が減少する。線路の幅によって線路のインダクタンスと、伝搬距離が決まる。幅の広い線路を使うことでより長距離の伝搬ができる。

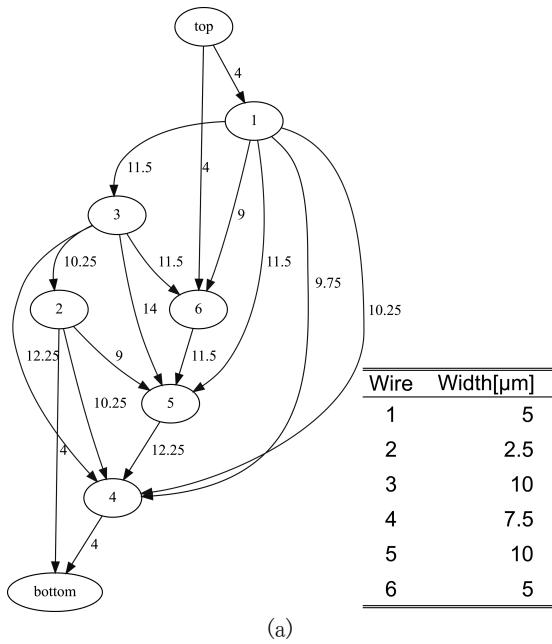


Fig.2 (a) 緑線は、Horizontal constrain graph、青は Vertical constrain graph である。葉となる部分から順番に配線する。各信号線の幅は表の通りであり、線間に必要な距離は 4  $\mu\text{m}$ 。(b) (a)のグラフに基づき、配線を行った結果。幅の異なる配線(青色)が行われている。

## AQFP 順序回路設計のための論理合成に関する研究

### Study of Logic Synthesis for Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Sequential Circuits

斎藤 蘭生<sup>1</sup> Christopher L. Ayala<sup>2</sup> Olivia Chen<sup>2</sup> 田中智之<sup>1</sup> 田村智大<sup>1</sup>  
 Ro Saito Christopher L. Ayala Olivia Chen Tomoyuki Tanaka Tomohiro Tamura  
 吉川信行<sup>1</sup>  
 Nobuyuki Yoshikawa

横浜国立大学 大学院 理工学府 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5<sup>1</sup>

Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University

79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501 JAPAN

横浜国立大学 先端科学高等研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5<sup>2</sup>

Instituted Advanced Sciences, Yokohama National University

Headquarters of the Institute of Advanced Sciences, Yokohama National University

### 1 背景

CMOS 論理回路は集積性に優れている一方、発熱や微細加工の観点からスケーラビリティの限界が指摘されており、近年では様々なポスト CMOS 低消費電力回路の研究が行われている。その中でも我々は、CMOS と比較して  $10^{-5}$  倍もの極低消費電力で動作可能 [1] なことが特徴の一つである断熱磁束量子パラメトロン (Adiabatic Quantum Flux Parametron, AQFP) 回路と呼ばれる超電導論理回路についての研究を行っている。

近年設計される AQFP 回路は接合数が数千 JJ 程度にものぼるなど大規模化が進んでおり、回路設計において機械的な支援が必要不可欠となっている。このような背景から我々は、論理合成ツールを用いて組み合わせ論理回路を合成し、それを AQFP 回路に変換するという流れで自動設計を行う Top down ツールを開発した。

一方、フィードバックを含むような順序回路の変換ツールは今まで実現されていなかった。そこで本研究では AQFP 順序回路の論理合成を行えるような機能を Top down ツールに新たに追加し、複数のテスト回路で結果を確認した。

### 2 フィードバック回路の論理合成

本研究では AQFP 回路を用いてフィードバック回路を実現するために QFP latch (QFPL) ゲート [2] を採用する。QFPL は DC 電流により 0・1 状態を保持する効果を実現したゲートで、いくつかの論理ゲートと組み合わせることで QFP NDRO (Non-Destructive Read-Out) を構成可能である。

AQFP 順序回路は QFP NDRO を用いて以下のように合成可能である [4]。

- Verilog 記述内の register を QFP NDRO によって置換する。QFP NDRO は回路全体の Depth と同じタイミングで Enable 信号を送ることにより、Verilog 言語の register と同等に振る舞う。
- QFP NDRO の出力から入力までの間を組み合わせ論理回路とみなす。

図 1 に示すようにループを一つしか持たない回路構造を仮定すると、QFP NDRO の出力から QFP

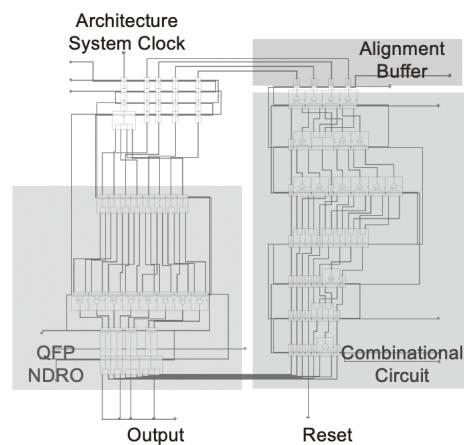


図 1 schematic of 4bit counter

NDRO の入力までの部分はフィードバックを含まない単純な組み合わせ論理回路であり、この部分には、通常の Retiming のルール [3] を適用することが可能である。

- Architecture clock period は、回路各部の Depth の和に等しい。

以上の仕様を実装し 4bit, 8bit, 16bit, 32bit のカウンタを合成した結果、いずれの回路も自動で生成可能であることを確認した。回路全体の phase 数はそれぞれ 12, 20, 36, 68 phase となり、組み合わせ論理回路部に Retiming を行うと全体の素子数ベースで最大約 29% が削減可能であった。

### 参考文献

- [1] Takeuchi, Naoki, et al. Superconductor Science and Technology 26, no. 3 (2013): 035010.
- [2] Tomohiro, Tamura, et al. P-21, SSV, 2020.
- [3] Cai, Ruizhe, et al. In 2019 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI), pp. 187-192. IEEE, 2019.
- [4] Ro, Saito, et al. P-29, SSV, 2020.

# 単一磁束量子回路における受動伝送線路微細化の検討

## Study on miniaturization in wire width of passive transmission lines in single-flux-quantum circuits

池戸 駿介, 山梨 裕希(横浜国立大学); 吉川 信行(横浜国立大学)  
IKEDO Shunsuke, YAMANASHI Yuki (YNU); YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)  
E-mail: ikedo-shunsuke-xc@ynu.jp

### 1. はじめに

近年の増加し続ける情報化社会に対処するためには、情報処理システムの高速化、高機能化が必要である。そこで消費電力が半導体集積回路に比べ2~3桁低く、高速性においても数十 GHz での高速動作が可能である単一磁束量子 (Single Flux Quantum : SFQ) 回路が注目されている[1]。

SFQ 回路の長距離配線には受動伝送線路 Passive Transmission Line (PTL) が用いられる。PTL は電磁波の伝搬現象を利用した配線技術であるため、光速付近での信号伝搬が可能であり、Josephson 接合を用いないため消費電力を抑えることも可能である。消費電力は長さに依存しないため、長距離配線に適しているといえる。回路面積を削減し、大規模回路設計の柔軟性を向上させるために、我々の研究では、PTL の配線幅の縮小化を目指している。そこで、配線幅を縮小したときのドライバ・レシーバのパラメータ最適化を行い、動作マージンの拡大を行った。

### 2. PTL の構成

Fig.1 に示すように PTL は前段・後段に整合回路としてドライバ・レシーバが接続される。ドライバ後段に直列にダンピング抵抗を挿入することで PTL を含む大きな超伝導ループの形成を防ぎ、PTL 上には磁束量子ではなく電磁波が伝送する。しかし、PTL の特性インピーダンスとドライバ・レシーバとのインピーダンス整合が取れないために反射、共振が発生し、動作マージンが悪化してしまうという問題がある。PTL の特性インピーダンスは配線幅によって決まるので、配線幅を縮小してしまうと、さらにインピーダンス整合が取れなくなり、動作マージンの悪化が激しくなってしまう[2]。

### 3. シミュレーション結果

PTL のインダクタンスおよびキャパシタンスは AIST-ADP2 プロセスをもとに Chang によって定式化された式を用いて計算した[3]。配線長を 750μm とし、一定の周波数間隔で 10 パルス入力した。また、ドライバおよびレシーバは adp619 セルライブラリのセルを用いた。従来の PTL の配線幅が 5.0μm であるのに対し、半分である 2.5μm としたときおよび 2.0μm の PTL を用いて動作マージンのシミュレーションを行った。配線幅 2.5μm の PTL に関して、ドライバとレシーバの PTL に最も近い Josephson 接合の  $\beta_c$  の値を変えながら動作マージンの上限と下限の差をとったグラフが Fig.2 である。図より、ドライバとレシーバの  $\beta_c$  の値をそれぞれ 10、194 に変更して同様のシミュレーションを行った結果を Fig.3 に示す。図より、 $\beta_c$  の値を変更することによって動作マージンを拡大することが可能である。

また、 $\beta_c$  の値を変更したことによるプラズマ振動の影響を PTL の配線長を短くすることによって調査した。

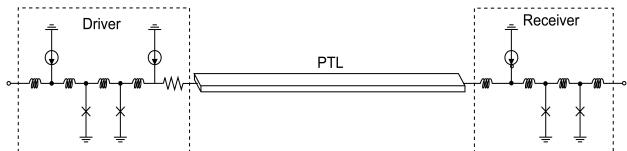


Fig.1 PTL with an SFQ driver and receiver

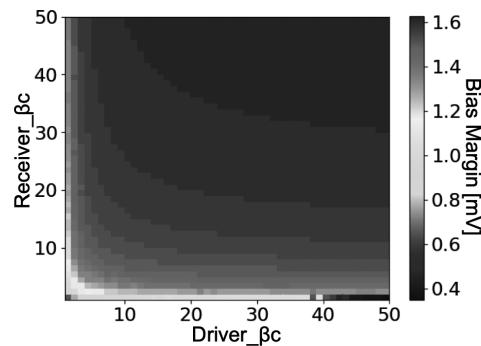


Fig.2 Relation between  $\beta_c$  and bias margins in a pulse transfer circuit shown in Fig.1 for PTL width of 2.5 μm.

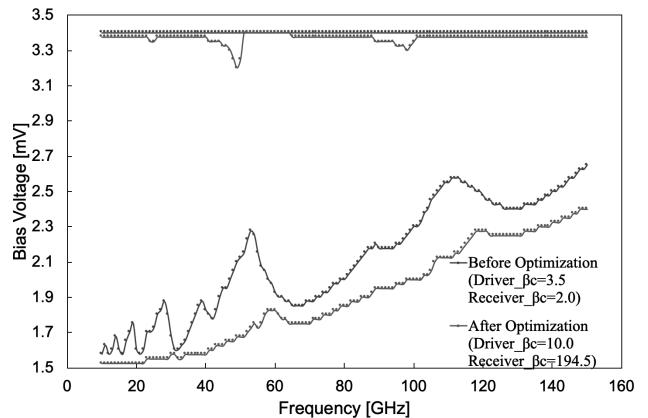


Fig.3 Frequency characteristic of bias margins in a pulse transfer circuit shown in Fig.1 for PTL width of 2.5 μm.

### 参考文献

- [1] K. K. Likharev *et al*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.1, 1991, pp.3-28.
- [2] T.Takinami *et al*, *IEICE Technical Report SCE2012-13(2012-07)*, 2012, pp25-27.
- [3] W.H.Chang, “The inductance of a superconducting strip transmission line”, *J.Appl. Phys.*, 50, 1979.

## 断熱的量子磁束パラメトロン回路における双方向データ伝搬の検討

Study of bidirectional data propagation in adiabatic quantum flux parametron circuits

高橋大地, 山梨裕希, 吉川信行 (横浜国大)  
 TAKAHASHI Daichi, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)

### 1. はじめに

現在広く使われているCMOSを用いた半導体集積回路は、微細化の限界や消費電力の増大、配線遅延などの問題に直面している。CMOSに代わる次世代デバイスとして研究されている超伝導集積回路の1つである断熱的量子磁束パラメトロン回路(Adiabatic Quantum Flux Parametron: AQFP)回路[1]は、特に低消費電力性に優れる。我々は、AQFP回路を用いたField Programable Gate Array (FPGA)の設計を行っている。AQFP回路ではデータは1方向にのみ伝搬するため、FPGAにおけるデータ伝搬経路が制限される。そこで、我々はAQFPの多相クロックの順序を反転させることによって逆方向にもデータが伝搬する双方向AQFP線路を提案する。また、双方向線路を用いたAQFP FPGA用スイッチ回路の動作をシミュレーションにより確認した。

### 2. AQFP FPGA

FPGAは、論理を決定するLogic Block (LB)と、配線要素であるRouting Channel (RC)、Switch Block (SB)及びConnection Block (CB)、外部との信号のやりとりを行うI/O Block、メモリから構成される。LBは4入力Look Up Table (LUT)とラッチ回路から構成され、メモリから読みだしたデータによって論理回路を実現する。SB及びCBはスイッチ回路により構成され、スイッチの選択によりFPGAの信号伝搬経路を決定する。我々はこれまでに、メモリ部分はCMOSを用いて構成するAQFP/CMOSハイブリッドシステムを用いたAQFP FPGAを実現した[2]。

### 3. AQFP回路における双方向データ伝搬

AQFP回路のデータ伝搬は前段と後段のAQFP回路を磁気結合することにより行われる。まず前段のAQFP回路を励起電流により励起させ、出力電流が流れている間に後段のAQFP回路を励起させることで、後段にも前段と同じデータが伝搬される。ここで、AQFP回路は回路構成が対称であるため、先に後段のAQFP回路を励起させ、次に前段のAQFP回路を励起させることで後段から前段にもデータを伝搬させることができる。このように、クロックの順序を反転させることで逆方向にもデータが伝搬するようになる。また、Majority (MAJ)ゲートや、MAJゲートの入力のうち1つを固定したANDゲート及びORゲートについては、クロック順序を反転させることによってSplitterゲートとして機能する。逆方向へのデータ伝搬及び、MAJゲート、ANDゲートの逆方向動作をシミュレーションにより確認した。

### 4. 双方向AQFP線路を用いたFPGA用スイッチ回路の設計

双方向線路を用いたAQFP FPGA用スイッチ回路の回路図をFig.1に示す。また、この回路の動作をFig.2に示す。双方向線路を用いない場合、スイッチ回路はFig.2の(a)～(d)までの4通りの動作を行うことができるが、双方向線路を用いることで(a)～(h)までの8通りの動作を行うことができるようになる。

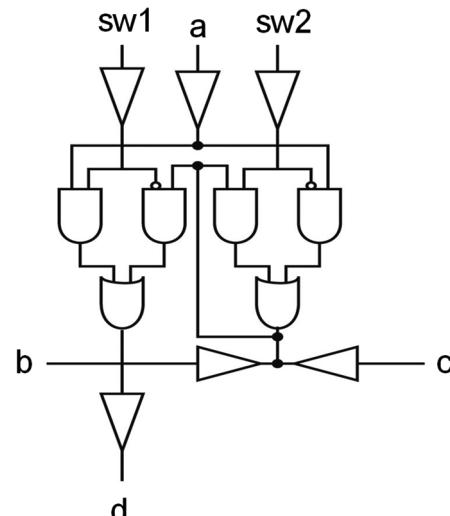


Fig.1 Switch circuit for FPGA

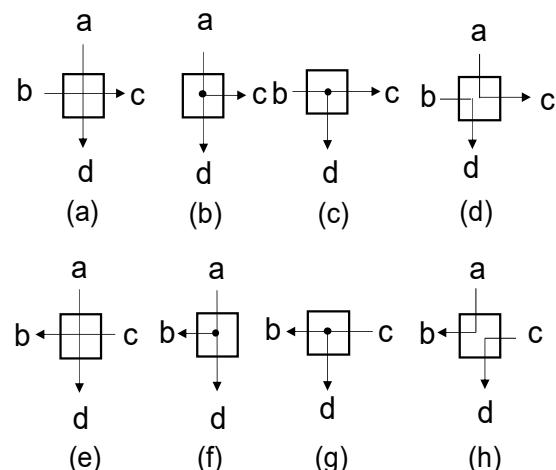


Fig.2 Operation patterns of the switch circuit for FPGA

### 参考文献

1. N. Takeuchi *et al*, "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device", *supercond. Sci. Technol.* vol.26 (2013), No.3, 035010
2. Y. Okuma, N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Design and Demonstration of an Adiabatic-Quantum-Flux-Parametron Field-Programmable Gate Array Using Josephson-CMOS Hybrid Memories," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 29, 2019, 1103606.

## 断熱量子磁束パラメトロン回路を用いた位相判別回路の感度評価

Sensitivity evaluation of a phase comparator using adiabatic quantum-flux-parametron logic

高川 佳大, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)  
 TAKAGAWA Yoshihiro, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)  
 E-mail: takagawa-yoshihiro-fz@ynu.jp

近年、従来の半導体コンピュータに代わる新たな計算機として量子コンピュータが注目されている。量子コンピュータの中には超伝導量子ビットを用いて超並列計算を行うものが存在し、ジョセフソン接合を用いた超伝導量子ビットの読み出しにはジョセフソンパラメトリック増幅器(Josephson parametric amplifier; JPA) [1] がよく用いられる。量子ビットの内部状態は JPA からの出力マイクロ波の位相( $0, \pi$ )で表現され、現在はこの信号を室温環境で測定することで量子ビットの状態を観測している。この位相判別を量子ビットが存在する極低温で行うことで量子計算システムの集積度を向上できる。我々が研究を行っている断熱量子磁束パラメトロン(Adiabatic quantum-flux-parametron; AQFP) [2] 回路は超伝導回路であり、励起電流と同期させることで入力マイクロ波の位相判別に用いることができる。

本研究では AQFP 回路を用いて極低温環境におけるマイクロ波の位相判別回路の感度評価をシミュレーションにより行った。Fig. 1 に AQFP を用いた位相判別回路の回路図を示す。この位相判別回路ではまずトランスで入力電流を増幅し、その後増幅された電流が AQFP バッファに入力されることで入力マイクロ波の位相判別を行う。このとき AQFP バッファを入力マイクロ波と同じ周波数で動作させることで、入力マイクロ波と AQFP バッファの励起電流が同位相の場合は AQFP バッファはから論理 1 が出力され、逆位相の場合は論理 0 が出力される。しかしこの論理出力は熱雑音などの影響で誤ることがある。そこで AQFP バッファからの論理出力をローパスフィルタ(LPF)で積算することで論理誤りの影響を緩和し、積算した信号を再び AQFP バッファで読み取ることで最終的な論理出力を得る。

前述のように AQFP バッファは熱雑音の影響により論理出力を誤ることがあり、その誤り率は入力電流が小さいほど大きくなる。出力確立が特に悪くなる入力電流の値の範囲をグレーゾンと呼び、位相判別回路の感度の指標とした。Fig. 2 にシミュレーションより求めたにグレーゾンの温度依存性を示す。実線は本研究で検討した位相判別回路によりマイクロ波の位相判別を行った際のグレーゾンであり、破線は通常の AQFP

回路で位相判別をおこなった際のグレーゾンである。この結果からトランスによる電流増幅と LPF を用いた積算により、位相判別感度を向上することができることを確認した。

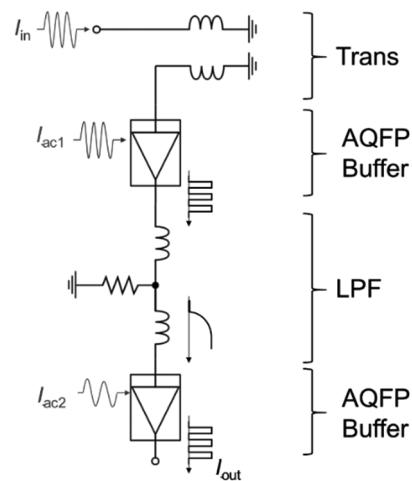


Fig. 1 Block diagram of a phase comparator using AQFP, where  $I_{in}$  is input microwave,  $I_{ac1}$ , and  $I_{ac2}$  are excitation currents of AQFP buffer and  $I_{out}$  is the output current.

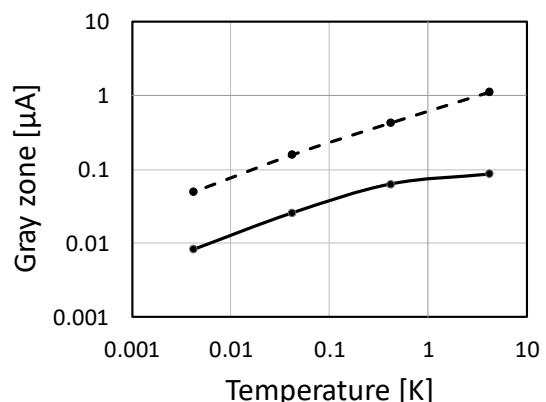


Fig. 2 Temperature dependence of gray zone. The dashed line shows the result of AQFP circuit, and the solid line shows the result of this study.

### 参考文献

- [1] T. Yamamoto *et al.*, Phys. Lett. 93, 042510(2008).
- [2] N. Takeuchi *et. al.*, Supercond. Sci. Technol. 26, 035010(2013).

## 非対称ダンピングを用いた断熱量子磁束パラメトロン/单一磁束量子回路間インターフェースの評価

Evaluation of the Interface between Adiabatic Quantum-Flux-Parametron and Rapid Single-Flux-Quantum Circuits by Using Asymmetrical Damping

山崎 祐一, 竹内 尚輝, 吉川 信行(横浜国大)

YAMAZAKI Yuichi, TAKEUCHI Naoki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: yamazaki-yuuiti-ps@ynu.jp

### 1. はじめに

近年、コンピュータを構成している半導体集積回路には、消費電力の増大や微細化技術の物理的な限界といった問題がある。そこで、半導体に代わる技術として注目されているのが超伝導回路である。超伝導回路には、断熱量子磁束パラメトロン (AQFP: Adiabatic Quantum Flux Parametron) 回路 [1] や高速单一磁束量子 (Rapid Single Flux Quantum: RSFQ) 回路 [2] が提案されている。AQFP 回路は CMOS 回路より 5, 6 衍低い消費電力で動作し、RSFQ 回路は数十 GHz の高速動作性を有する。これらの特性を活かした大規模システムの構築のため、我々は AQFP 回路と RSFQ 回路間のインターフェース回路の設計を行った。

本研究では、動作マージン改善のため、非対称ダンピングを用いたインターフェース回路を設計し、シミュレーションと実験による評価を行った。

### 2. AQFP/RSFQ インターフェース

AQFP 回路から RSFQ 回路へ信号伝達する AQFP/RSFQ インターフェース回路の回路図を Fig. 1、シミュレーション波形を Fig. 2 に示す。AQFP 回路では論理状態を電流の向きで決定する。一方、SFQ 回路では電圧パルスの有無によって論理状態を決定している。AQFP/RSFQ インターフェース回路では、QFP ゲートの状態を非断熱的に変化させることで、ジョセフソン接合にパルス状の電圧を発生させ、隣接する RSFQ ゲートを駆動する。入力が”1”的とき、QFP ゲート中の Josephson 接合( $J_2$ )がスイッチし、この際生じた電圧パルスが  $J_3$  をスイッチさせ、磁束量子を伝播する。一方、入力が”0”的ときは、 $J_1$  がスイッチするため、 $J_3$  はスイッチしない。

今回は動作マージン改善のため、 $J_1$  と  $J_2$  のダンピング条件を非対称にした AQFP/RSFQ インターフェース回路の設計を行った。

### 3. 測定結果

設計した AQFP/RSFQ インターフェース回路について、5GHz でのシミュレーション、及び 100kHz での実験による動作実証を行い、バイアスマージンを評価した。非対称設計を行う前 ( $\beta_{c1} = \beta_{c2} = 1.51$ ) と今回設計した AQFP/RSFQ インターフェース回路 ( $\beta_{c1} = 0.584$ ,  $\beta_{c2} = 182$ ) のバイアスマージンを Table I, II に示す。以上から、非対称ダンピングによるインターフェース回路のバイアスマージン向上を確認できた。これは、”1”への立ち上がりの際、 $J_2$  から生じ、 $J_3$  にかかる電圧は増大し、一方で誤動作の原因となる、”0”からのリセット時の  $J_1$  から生じ、 $J_3$  にかかる電圧は減少したためである。

また、本 AQFP/RSFQ インターフェース回路を用いて、AQFP ゲート間の長距離信号伝搬の実証も行った。発表当日は、実験結果の詳細について報告する。

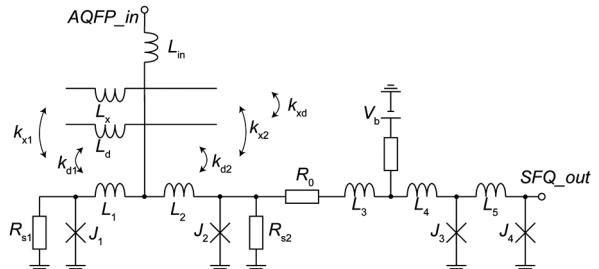


Fig. 1 Schematic of the AQFP/RSFQ interface.  $R_0 = 1 \Omega$ ,  $J_1 = 200 \mu\text{A}$ ,  $J_2 = 200 \mu\text{A}$ ,  $J_3 = 139 \mu\text{A}$ ,  $J_4 = 213 \mu\text{A}$ .

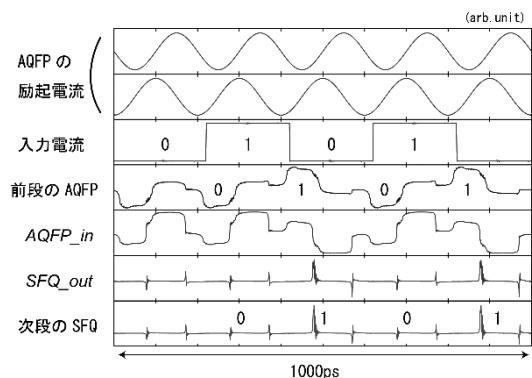


Fig. 2 Numerical simulation of the AQFP/RSFQ interface.

Table. I Bias margins of the AQFP/RSFQ interfaces for simulation at 5 GHz

	<b>AQFP</b>	<b>RSFQ</b>
<b>Previous</b>	- 46.9 ~ 60 %	- 12.4 ~ 18.4 %
<b>New</b>	- 43.5 ~ 80.2 %	- 33.2 ~ 23.2 %

Table. II Bias margins of the AQFP/RSFQ interfaces for measurement at 100 kHz

	<b>AQFP</b>	<b>RSFQ</b>
<b>Previous</b>	- 24.7 ~ 40.5 %	15.7 ~ 29.2 %
<b>New</b>	- 21.2 ~ 44.8 %	- 0.52 ~ 21.4 %

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (18H01493, 19H00760) の助成を受けたものである。本研究で使用された回路は CRAVITYにおいて AIST-HSTP プロセスを用いて作製された。

### 参考文献

- [1] N. Takeuchi *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, vol.26, no.3, p.035010, Jan. 2013.
- [2] K. K. Likharev *et. al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.1, no.1, pp.3~28, 1991.

# 断熱量子磁束パラメトロン回路を用いた物理乱数生成器の設計と評価

## Design and evaluation of a physical random number generator using adiabatic quantum-flux-parametron

羅文輝, 竹内尚輝(横国大IAS); 陳オリビア(横国大IAS); 吉川信行(横国大)  
 LUO Wenhui, TAKEUCHI Naoki (YNU IAS); CHEN Olivia (YNU IAS); YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)  
 E-mail: luo-wenhui-dv@ynu.jp

### 1. はじめに

論理“1”的出現確率を用いて数値を示すストカスティック演算(stochastic computing)システムでは、可能な限り正確な結果を得るため、自己相関係数が低く予測不能性を有した乱数生成器が必要である[1]。

これを踏まえて、我々は断熱量子磁束パラメトロン(Adiabatic Quantum-Flux-Parametron: AQFP)回路[2]を用いた乱数生成器(RNG)を提案する。AQFPの回路図をFig. 1に示す。従来の RNG はアルゴリズムを使用して擬似乱数を生成するのに対し、本研究で提案する RNG は熱雑音を利用して真性乱数を生成できる。また、AQFP ゲートの断熱的なスイッチングにより、優れたエネルギー効率を実現できる。AQFP 回路は高速な動作が可能であるため、本 RNG による乱数の生成速度は、数ギガヘルツに達すると予想される。

本研究では、1ビット RNG の設計と評価を行った。測定結果や、生成された乱数の質について報告する。

### 2. シミュレーション

同 RNG は、出力“1”または“0”的確率を制御するためにオフセット入力電流が印加された AQFP バッファを用いる。AQFP バッファでは、出力論理は入力電流の向きで決定される。振幅がゼロの場合は、出力は熱雑音で確率的に決定されるため、50%の確率で 1 (または 0) にスイッチする。このときの波形を Fig. 2 に示す。本設計では、乱数を生成するバッファと信号読み出し回路間の相互作用を低減するため、複数段のバッファにより構成されるバッファチェーンを用いる。さらに、チェーン内の相互作用による自己相関係数の劣化を防ぐため、隣接するバッファ間に大きなインダクタを挿入した。

### 3. 実験

AIST 10kA/cm<sup>2</sup> Nb 高速標準プロセス(HSTP)[3]を使用して RNG を設計および作製し、生成されたランダムビットストリームの質を評価した。設計した RNG のレイアウトを Fig. 3 に示す。低周波(100 kHz)で生成された 2<sup>17</sup>ビットのストリームより、0.005 の自己相関係数を実証した。当日の発表では、測定方法と実験結果について詳しく報告する。

### 謝辞

本研究に使用された回路は、産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム CRAVITY を用いて作成された。本研究は JSPS 科研費基盤研究(No.18H01493, No.19H05614)の助成を受けたものである。

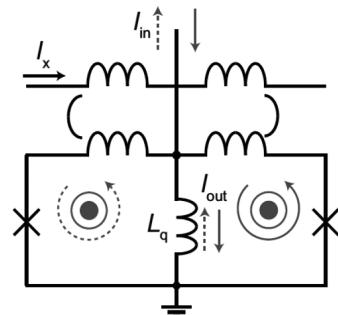


Fig. 1 断熱量子磁束パラメトロン (AQFP) の回路図。電流の向きで論理が決定される。

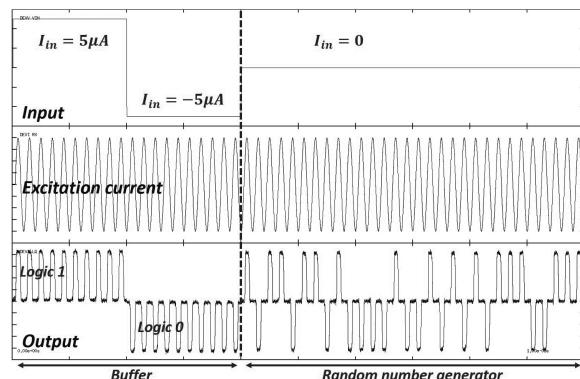


Fig. 2 AQFP バッファを用いた RNG

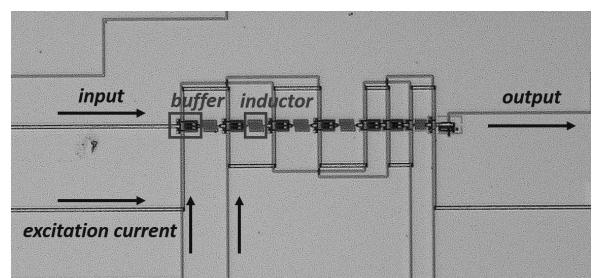


Fig. 3 RNG のレイアウト図

### 参考文献

- P. Hayes.: Design Automation Conference, no. 59, p. 1-3, 2015
- N. Takeuchi, et al.: Supercond. Sci. Tech., vol. 26, no. 3, p. 035010, 2013
- N. Takeuchi, et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 30, no. 3, p. 035002, 2017

## ゲート間配線長を考慮した断熱量子磁束パラメトロン回路の ビット誤り率の実験的評価

### Experimental Evaluation of Bit Error Rate of Adiabatic Quantum Flux Parametron Circuits Considering Gate-to-Gate Interconnection

伊東 大樹, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

ITO Daiki, TAKEUCHI Naoki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: ito-daiki-vs@ynu.jp

#### 1. はじめに

半導体に代わる技術として超伝導集積回路が注目されており、次世代のスーパーコンピュータに適用されると、大幅な消費電力削減が期待される。我々は、その超伝導集積回路の一つである断熱量子磁束パラメトロン (AQFP: Adiabatic Quantum Flux Parametron) 回路[1]の研究を行っている。AQFP 回路は数 GHz の高速動作が可能であることに加え、動的な消費電力も CMOS より 6 衍低いという特徴がある[2]。

AQFP 回路は、数十  $\mu$  A の微小信号電流によって動作しており、ゲートへの入力電流の向きが出力の論理を決定する。ゲート間の信号電流は、ゲート間配線長が長いほど小さくなるという特徴がある。ここで、回路の動作温度における熱雑音を考慮すると、入力電流の向きが反転する可能性がある。これにより、出力の論理が反転し、誤作動が生じる。本研究では、熱雑音を考慮した AQFP 回路のビット誤り率 (Bit Error Rate; BER) の評価を行った。回路シミュレーションならびに実験により BER 評価を行うことによって、AQFP 回路が誤作動を起こさないゲート間配線長の最大値、および入力電流の最小値を定量的に検討した。

#### 2. シミュレーションによる BER 評価

N 回の試行に対して、BER は(1)式で表される。

$$BER = M/N = (N-P)/N \cdots (1)$$

M はエラー回数、N は試行回数、P は正しい信号が得られた回数である。Fig.1 のシミュレーション回路において、ゲート間配線長  $L_0$  を含む回路において熱雑音を考慮した Monte Carlo 法により BER を求めた。また、BER は(2)式で表すことが出来ると仮定した。

$$BER = erfc(\alpha \times I_{in}/I_n) \times \beta \cdots (2)$$

$erfc(x)$  は相補誤差関数、 $I_{in}$  は  $L_0$  に流れる電流、 $I_n$  は熱雑音電流の平均振幅(温度に依存)、 $\alpha, \beta$  は正の実数である。 $I_{in}$  は  $L_0$  によって一意に決まる値である。Fig.3 の「simulation」が Monte Carlo 法によって得られた結果、「 $erfc(x)$ 」が、最小二乗法により (2)式をシミュレーション結果にフィッティングしたグラフである。励起電流の動作周波数は 1 GHz とした。

#### 3. チップ測定による BER 評価

Fig.2 に BER 測定回路のレイアウトを示す。Fig.1 と同様に回路は 9 段の Buffer Chain で構成され、出力に電圧增幅用の SQUID アンプが接続されている。また回路は部分的にゲート間配線長を長くした 4 種類の Buffer Chain からなる。本稿では 2 種類のチップ(HSTP025: 配線長 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm、HSTPA001: 配線長 1.74 mm, 1.98 mm, 2.26 mm, 2.67 mm)を測定した結果を Fig.3 に示す。HSTP025 からは 2 点(配線長 1 mm, 2 mm)が測定によって得られ(measurement(HSTP025))、HSTPA001 からは 4 点が測定によって得られた(measurement(HSTPA001))。この BER は、励起電流の大きさを調整して一番低い BER が得られたものを記載した。測定において励起電流の動作周波数は 700 MHz で行なった。実験結果は、いずれの場合もシミュレーションに比べて BER が高くなってしまっており、実験においてエラーを低減する必要がある。

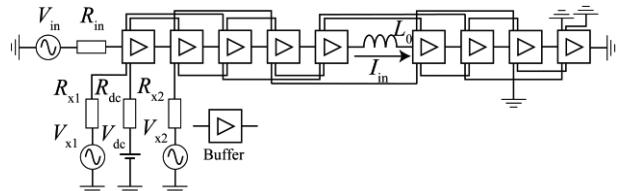


Fig.1 9-stage buffer chain

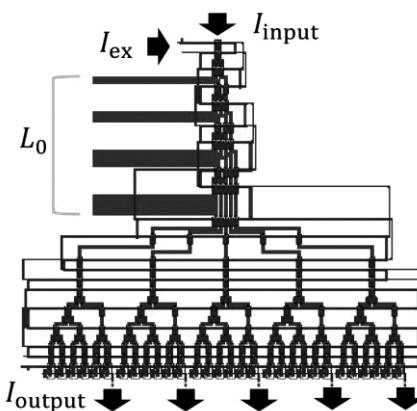


Fig.2 Layout of BER measurement circuits (HSTP025)

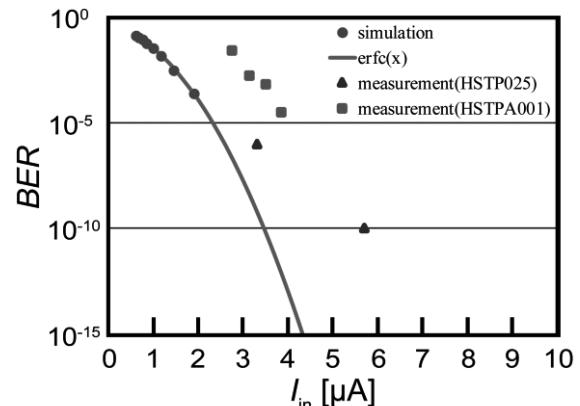


Fig.3 Comparison of BER obtained by measurements and simulations.

(measurement: 700 MHz, simulation: 1 GHz)

#### 謝辞

本研究はJPS科研費基盤研究 (S) (No. 19H05614) の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] N. Takeuchi, et al., "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device", Supercond. Sci. Technol. 26, 035010, 2013.
- [2] N. Takeuchi, et al., "Energy efficiency of adiabatic superconductor logic," Supercond. Sci. Technol. 28, 015003, 2015.

## 最適回路パラメータを用いた直結式量子磁束パラメトロン回路の動作実証

### Demonstration of directly coupled quantum-flux-parametron circuits with optimized parameters

石田 棚平, 竹内 尚輝, 山栄 大樹, 吉川 信行(横国大)  
 ISHIDA Ryohei, TAKEUCHI Naoki, YAMAE Taiki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Natl. Univ.)  
 E-mail: ishida-ryohei-zr@ynu.jp

#### 1. はじめに

現代の情報化社会は半導体集積回路の発展によって支えられてきた。半導体集積回路は微細加工技術の進歩とともに集積度を指数的に向上させてきた。しかし、近年半導体集積回路は微細加工技術の限界によって性能の限界が近づいている。また、集積度の向上に伴い、消費電力の増大や発熱なども問題視されている。そこで、半導体集積回路に代わる新たなデバイスとして、超伝導集積回路が注目を集めている。我々はその中でも低消費電力性に優れた断熱量子磁束パラメトロン(Adiabatic Quantum-Flux-Parametron: AQFP)回路の研究をしている。AQFP回路は5~10GHzの高速動作と半導体集積回路に比べ、5~6桁低い消費電力が特徴である[1][2]。

現在、AQFP回路を用いたレジスタファイルのような大規模な回路の動作実証が行われているが、より大きな回路を実現するにはAQFP回路をさらに小さくすることが望まれる。

この問題を解決するために、直結式量子磁束パラメトロン(Directly coupled Quantum-Flux-parametron: DQFP)回路が提案されている。DQFPは、AQFPでデータ伝搬のために使用していたトランジスタを取り除くことにより、小型化された回路である。先行研究では既にDQFPの動作実証が行われていたが、回路パラメータの最適化が行われていなかった[3]。そこで、本研究では回路パラメータを最適化したDQFPを用いてセルテスト回路を設計し、動作実証を行った。

#### 2. DQFP回路

Fig. 1にDQFP回路を示す。 $L_1$ と $L_2$ が $L_{x1}$ と $L_{x2}$ に磁気結合している。微小な入力電流 $I_{in}$ が入力されている間に、励起電流 $I_x$ によってジョセフソン接合を含んだ2つのループに磁束量子の半分の $0.5\Phi_0$ が印加されると、 $I_{in}$ の方向に応じて左右どちらかのジョセフソン接合がスイッチし、出力電流 $I_{out}$ が流れれる。動作方法はAQFPと同様であるが、AQFPの場合は出力部にトランジスタを用い、結合係数の正負を切り替えることによりbufferとinverterを構成していた。一方、Fig. 1に示すように、DQFPではトランジスタを用いず bufferとinverterを構成できるため、小型化が可能になっている。

#### 3. 測定結果

動作余裕度や消費電力等を考慮しながら、回路パラメータを最適化したDQFP回路のセルテスト回路を設計した。試作したセルテスト回路の顕微鏡写真をFig. 2に示す。左からBuffer chain, Inverter chain, Offset gate, Majority gateとなっている。また、Offset gateは2入力、Majority gateは3入力のゲートとなるため、入力論理の反転の有無の組み合わせを全通りテストできるように、テスト回路を用意した。この回路を液体ヘリウムにより4.2Kまで冷却し、測定を行った結果をFig. 3に示す。これにより、セルテストとして用意した全ての回路で、十分な動作余裕度を有していることを実証した。

#### 謝辞

本研究はJSPS科研費基盤研究(18H01493, 19H05614)の助成を受けたものである。本研究に使用された回路は、産業

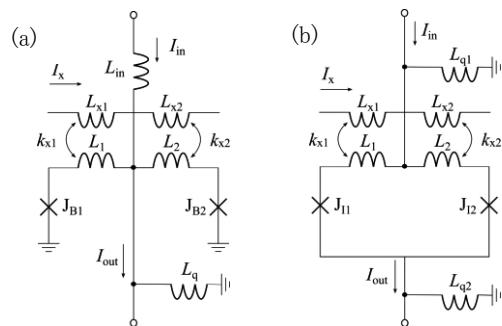


Fig. 1 Schematic of DQFP gates. (a) Buffer. (b) Inverter.  
 $J_{B1} = J_{B2} = 50 \mu\text{A}$ ,  $J_{I1} = J_{I2} = 80 \mu\text{A}$ ,  $L_{in} = 15.16 \text{ pH}$ ,  
 $L_q = 12.85 \text{ pH}$ ,  $L_{q1} = L_{q2} = 3.30 \text{ pH}$

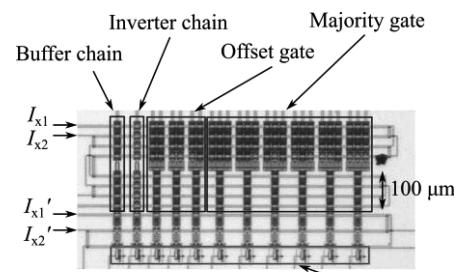


Fig. 2 Micrograph of DQFP cell test circuits.

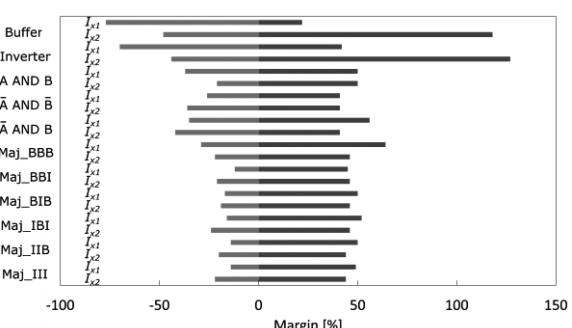


Fig. 3 Operation margin of cell test circuits.

技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において作成された。

#### 参考文献

- [1] N. Takeuchi et al., Supercond. Sci. Technol., vol.26, no.3, pp.035010, Mar, 2013.
- [2] N. Takeuchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.23, no.3, pp.1700304, Jun, 2013.
- [3] K. Arai et al., Applied Superconductivity Conference (ASC) 2018, Seattle, US, Oct, 2018.

# 10-kA/cm<sup>2</sup> Nb プロセスにおける Josephson-CMOS ハイブリッドメモリに用いる Josephson latching driver の評価

## Evaluation of a Josephson latching driver for Josephson-CMOS hybrid memory using 10-kA/cm<sup>2</sup> Nb process

弘中 祐樹, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)  
HIRONAKA Yuki, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Natl. Univ.)  
E-mail: hironaka-yuki-ds@ynu.jp

### 1. はじめに

単一磁束量子 (Single flux quantum: SFQ)回路をはじめとするJosephson接合を用いた論理回路は、その高速かつ低消費電力動作性の観点において、現行の半導体デバイスを用いた論理回路に勝る性能の回路を実現することが可能である[1]。一方で、Josephson回路はその低集積性や低駆動力性のため大規模なメモリを構築することが困難である。そのため、高集積度なCMOSメモリをJosephson回路と組み合わせて用いるJosephson-CMOSハイブリッドメモリが、Josephson回路に適合するメモリシステムの実現に向けて研究されている[2]。

我々が開発しているJosephson-CMOSハイブリッドメモリにおいては、Josephson latching driver (JLD)と呼ばれる信号変換回路がJosephson回路とCMOS回路間のインターフェース回路として用いられている[3]。今回、我々は産業技術総合研究所(AIST)の10-kA/cm<sup>2</sup> Nb advanced processにおいてJLDのパラメータ最適化を行い、回路を試作し動作試験を行った。

### 2. Josephson latching driver の構成及び最適化

JLDはSFQパルス入力を電圧レベル信号に変換する回路である。Fig. 1にJLDの等価回路図を示す。JLDは、Suzuki stack (SS)と呼ばれるアンダーダンプ型のJosephson接合スタックと、プリアンプである4JL gateにより構成される。SS及び4JL gateは交流電流によりバイアスされ、それぞれにバイアス電流が印加されている間に入力端inにSFQパルスが入力されると、4JL gate及びSSの全接合が有電圧状態にスイッチし、出力端outに40 mV程度の電圧レベル信号が得られる。

本研究室では、これまでにAISTの2.5-kA/cm<sup>2</sup> Nb standard processを用いてJLDを設計し、これを用いたJosephson-CMOSハイブリッドメモリの動作実証を行ってきた。今回、10-kA/cm<sup>2</sup>プロセスでJLDを設計するにあたり、2.5-kA/cm<sup>2</sup>プロセスとのJosephson接合のサブギャップ抵抗の差異を考慮し、JLDの回路パラメータの最適化を行った。回路シミュレーションの結果に基づき、SS及び4JL gateの双方のバイアスマージンが最大化されるよう、4JL gateの接合臨界電流値及び出力抵抗値をそれぞれ  $J_{101}=J_{102}=120 \mu\text{A}$ ,  $J_{103}=J_{104}=360 \mu\text{A}$ ,  $R_L=35 \Omega$ と定めた。

### 3. Josephson latching driver の評価

Fig. 2に試作したJLD回路の顕微鏡写真を示す。試作したJLD回路は、室温機器によるNRZL信号入力をSFQパルスに変換してJLDに入力するため、SFQ電流コンバータであるLevel driven DC-SFQ converterを用いてJLDに入力を与える構成とした。試作したJLDの測定において、動作周波数1 GHzでの正常動作が確認された。Fig. 3に動作周波数1 GHzにおけるJLD回路の出力信号のアイパターンを示す。Fig. 3より試作したJLD回路において広いアイが確認された。

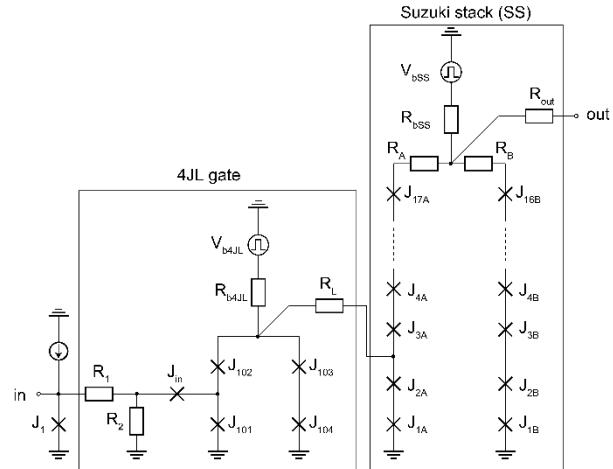


Fig. 1 Schematic of the Josephson latching driver

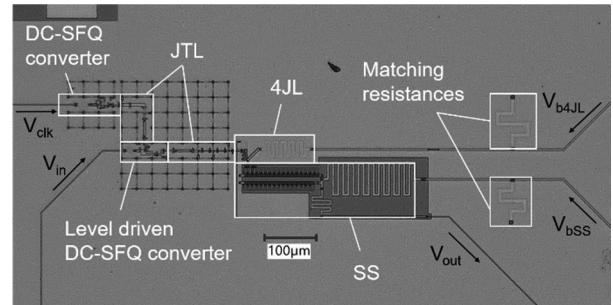


Fig. 2 Microphotograph of the Josephson latching driver

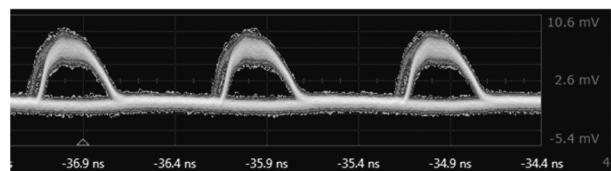


Fig. 3 Measured eye diagram of the Josephson latching driver at 1 GHz frequency operation

### 謝辞

本研究に使用された回路は、(独)産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において、AIST-ADP2プロセスを用いて作製された。

### 参考文献

1. K. K. Likharev et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 1 (1991), pp. 1-28.
2. U. Ghoshal et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3 (1993), pp. 2315-2318.
3. G. Konno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27(2017), p. 1300607

## 省電力単一磁束量子回路を用いたマイクロ波スイッチの評価

### Analysis of a Microwave Switch using Energy-Efficient Single Flux Quantum Circuits

道林 詩織, 竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行 (横浜国大)  
**SHIORI Michibayashi**, NAOKI Takeuchi, YUKI Yamanashi, NOBUYUKI Yoshikawa (Yokohama Natl. Univ.)  
E-mail: michibayashi-shiori-zp@ynu.jp

#### 1. はじめに

量子計算機は、状態の重ね合わせを表現可能な量子ビットを用いて超並列計算を行う次世代の情報処理システムである。量子計算機は 2 状態の重ね合わせを表現可能な量子ビットを用いて演算を行う。超電導ジョセフソン接合を用いた量子ビットは集積性、制御性において優れており、研究開発が進められている。

超電導ジョセフソン接合を用いた量子ビットは、各ビットに対応する電力と時間幅を持つマイクロ波パルスによって制御される。現在は主に室温環境で生成されたマイクロ波源が用いられているが、超電導量子ビットは極低温環境で動作するため拡張性に問題がある。そこで、我々は高速単一磁束量子(RSFQ)回路 [1] が量子ビットの動作温度に近い低温環境で動作することに着目し、これを用いて任意の電力、時間幅のマイクロ波パルスを出力するマイクロ波スイッチ [2] の設計を行った。

#### 2. マイクロ波スイッチ

マイクロ波スイッチのブロック図を Fig.1 に示す。マイクロ波スイッチは室温のマイクロ波源、DC/SFQ コンバータ、スイッチ、パルス対生成器、フィルタ、整合回路から成る。室温から入力されたマイクロ波は DC/SFQ コンバータで SFQ パルス列に変換され、パルス列はスイッチで任意の時間幅に区切られる。このスイッチは外部信号  $s_{in}$  と  $s_{reset}$  によって制御される。その後パルス対生成器を通る。パルス対生成器の構造を Fig.2 に示す。この機構はパルスを複製し、直流信号 (Fig.1 中の入力 B) によって、回路に外部から磁束を印加することでパルス間隔  $\Delta t$  を制御し、出力電力値を制御する。その後パルス列はフィルタを通して、高調波が除去されることによって任意の電力、時間幅のマイクロ波となる。さらに整合回路を通過することで室温の測定系に対応した信号となる。RSFQ 回路を用いて設計を行ったマイクロ波スイッチのチップ写真を Fig.3 に示す。

今回は超電導量子ビット制御用電力可変マイクロ波スイッチの省電力化のため、バイアス抵抗を削減し、インダクタンスとジョセフソン接合を用いたバイアス電流印加方法 [3] を採用し、それに伴った回路動作とマージンの評価を行った。

#### 3. シミュレーションによるマージンの検討

Fig. 4 に省電力マイクロ波スイッチのシミュレーション波形を示す。入力されたマイクロ波がパルス列となり、スイッチで時間幅に区切られ外部電流で制御されることにより間隔  $\Delta t$  が変化し、最終的に得られるマイクロ波の電力が変化しており、電力可変マイクロ波スイッチとして機能していることが確認できる。このとき、バイアス電圧のマージンは  $80 \mu V$ - $225 \mu V$  であった。マージン際に近づくにつれて立ち上がり、立ち下がり時に生じるノイズが大きくなるため、これを除くことによって更なる性能改善が見込まれる。今回、省電力 RSFQ 回路の利用により、マイクロ波スイッチの静的消費電力は 0 となった。

#### 4. 結論

省電力 RSFQ 回路を用いて量子ビット制御用電力可変マイクロ波スイッチの設計を行った。シミュレーションの結果、一定のマージン内での動作を確認した。

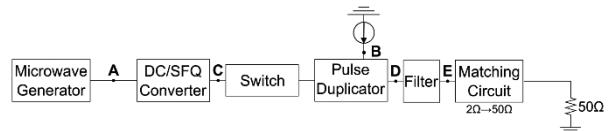


Fig.1 Structure of the SFQ microwave switch

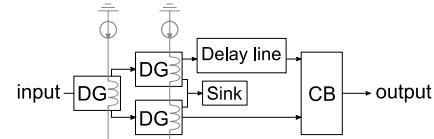


Fig.2 Structure of the SFQ pulse duplicator

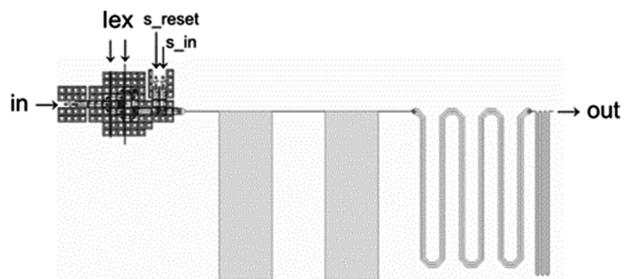


Fig.3 Microphotograph of the microwave switch

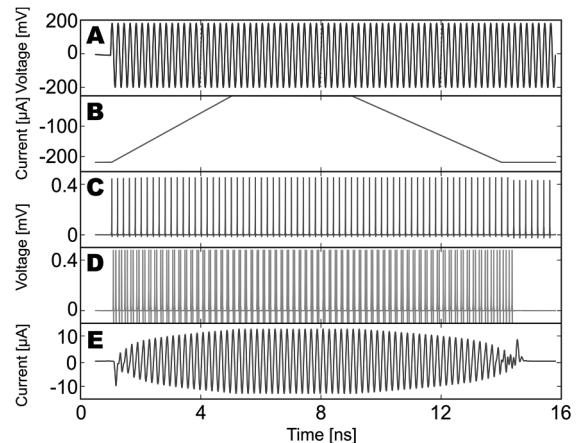


Fig.4 Waveforms of each signal in the SFQ microwave switch.

#### 謝辞

本研究に使用された回路は、産業技術総合研究所 (AIST) の超電導クリーンルーム CRAVITY を用いて作成された。本研究は JPS 科研費基盤研究 (S) (No. 19H05614) と 産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受けたものである。

#### 参考文献

1. K. K. Likharev, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 1, no. 1 (1991) pp. 3-28
2. N. Takeuchi, et al.: Phys. C Supercond. its Appl., vol. 470, no. 20 (2010) pp. 1550-1554
3. D. E. Kirichenko, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3 PART 1 (2011) pp. 776-779

# ピックアップコイル法による短尺直線状 HTS 線材の交流損失特性の高感度測定

## Highly sensitive measurement of AC loss characteristics of short and straight HTS tapes by a pick-up coil method

富嶠 恵, 平山 斎, 川畑 秋馬 (鹿児島大学)  
TOMISAKI Ren, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)  
E-mail: k8041568@kada.kagoshima-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導(HTS)線材の交流損失特性の高感度測定は、低損失 HTS 線材を開発する上で重要である。本研究では、ピックアップコイル法による交流横磁界印加時の短尺直線状 HTS 線材の交流損失測定システムの高感度化を図ることを目的としている。そのために、本研究では、測定サンプルがないときに発生する見かけの損失(キャンセル残り)の低減方法についての検討を行っている。これまでに、外部印加磁界用マグネットの巻線に用いる線材の細線化や、測定2次回路での位相誤差の低減のために、ピックアップコイルとキャンセルコイルをマグネット中心に対して対称配置にできる測定環境を構築してきた[1, 2]。

今回は、検出コイルの形状や配置を変化させて、これらがキャンセル残りへ及ぼす影響を詳細に調べた。さらに、短尺直線状 HTS 線材の交流損失を測定し、キャンセル残りの測定値との比較を行うことで、キャンセル残りの低減の程度について検討した。本発表では、これらの結果について報告する。

### 2. キャンセル残りの低減を狙った外部磁界印加用マグネット

本研究では交流損失測定法としてピックアップコイル法を採用している。Fig. 1 は外部磁界印加用マグネットの外観図である。このマグネットは中央のコイルとその両側の 3 対のコイルから成る。同図からわかるように、このマグネット内でピックアップコイルとキャンセルコイルをマグネット中心に対して対称な位置に配置することができる。両検出コイル位置での磁場一様度は 1.6% 以内であり、サンプルへの最大印加磁界は、液体窒素温度 77 K で 0.14 T である。また、測定可能なサンプルサイズは、幅 5 mm × 厚さ 3~5 mm × 長さ 90 mm である。

### 3. 測定 2 次回路の位相誤差低減によるキャンセル残りの低減

ピックアップコイルの信号電圧からサンプルの磁化の微小信号電圧のみを抽出するために、キャンセルコイルの信号電圧を使って余分な測定空間の信号を差し引く「キャンセリング」を行う。従前の測定システムでは、ピックアップコイルとキャンセルコイルの位置での磁場分布が異なるため、2 つの検出コイルの巻数は異なり、結果として測定2次回路での位相誤差に伴うキャンセル残りが僅かに発生する。

これに対し、2 つの検出コイルを対称な位置に配置できる新しい測定システムでは、2 つの検出コイルの形状を極力近づけられるので、測定2次回路での位相誤差を小さくでき、キャンセル残りの低減が図れる。ただし、2 つの検出コイルが配置される空間の磁場分布は完全には対称ではないため、形状の異なる種々の検出コイル対を作製してキャンセル残りを測定し、検出コイルの形状とキャンセル残りとの関係について調べた。また、2 つの検出コイルの配置位置が対称な場合と非対称な場合でのキャンセル残りの違いについても測定した。

### 4. 測定結果

測定の結果、キャンセル残りは、検出コイルのターン数が小さいほど、検出コイルの幅  $w$  が狭いほど小さくなるが、検出コイルの高さ  $h$  にはほとんど依存しないことがわかった。また従

前のマグネットの磁場分布を考慮して検出コイルを非対称配置した場合と、新しく作製したマグネット内で対称配置した場合とで測定したキャンセル残りを比較した結果、対称配置の方がキャンセル残りの値が約半分に低減する結果が得られた。

Fig. 2 は、銀シース Bi-2223 テープ線材を 6 枚積層したサンプルの 55.4 Hz での測定結果であり、外部磁界の印加方向は、テープ線材幅広面に対して平行な方向である。同図には、従前のマグネットと新しく作製したマグネットでの測定結果を重ねて示している。同図からわかるように、外部磁場振幅 100 mT において、検出コイルを対称配置した新しい測定システムでのキャンセル残りが、従前の測定システムのキャンセル残りに対し、3 分の 1 以下に低減されており、検出コイル対称配置がキャンセル残りの低減に有効であることを実験的に示すことができた。

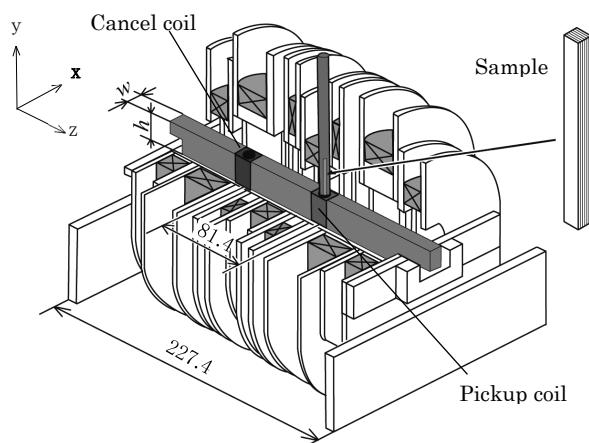


Fig. 1. Schematic view of new split-type magnet.

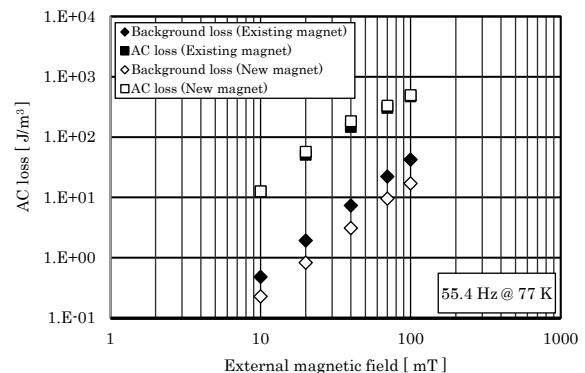


Fig. 2. Measurement results of AC losses.

### 参考文献

- Y. Haramoto *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.97(2018) p. 140.
- Y. Haramoto *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.98(2019) p. 54.

# 多芯化薄膜高温超伝導線材の短い結合時定数を測定するための磁化損失測定システムの改良

Improvement of magnetization loss measurement system to measure short coupling time constants of striated coated conductors

羅 熙捷, 雨宮 尚之(京大)

LUO Xijie, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: x-luo@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. 背景

薄膜高温超伝導線材で巻かれたマグネットの交流損失の低減や磁場精度の向上のひとつの方法として線材の多芯化がある。安定性や保護の観点からは、フィラメントが常伝導転移した場合のフィラメント間分流を可能とするよう、フィラメント間には適度な導電性が望まれる。しかし、フィラメント間に導電性があると、結合電流が流れ、これが減衰しない場合は多芯化の効果は発揮されない。そのため、結合電流の減衰時定数である結合時定数を実験的に求めることは重要な課題である。磁界変化一周期あたりの結合損失を周波数に対してプロットすると、プロットのピークに対応する周波数  $f_{\text{peak}}$  から結合時定数  $1/(2\pi f_{\text{peak}})$  を計算できる。多芯線材の短尺試料やスパイラル状に巻いた多芯線材などの結合時定数が短く、 $f_{\text{peak}}$  が高い周波数領域に存在する場合がある。我々は短い結合時定数を測定するために、高い周波数(kHz)領域での結合損失を測定できるように既存の磁化損失測定システムを改良した。

## 2. 磁化損失測定システム

磁化損失測定システムの概念図を Fig. 1 に示す。サンプルは液体窒素によって冷却される。マグネットを用いてサンプルに mT レベルの交流磁場を印加できる。このように磁場振幅が小さいときには、ヒステリシス損失は小さく、磁化損失は結合損失に支配されると考えられる。サンプルホルダは回転できるため、磁場をサンプルに印加する角度を変えることができる。サンプルの磁化損失を測定するためにピックアップコイルが使用される。

マグネットを励磁する電流の周波数が高くなると、マグネット構造上避けられない僅かなキャパシタンスの影響が大きくなり、磁場振幅と電流振幅の比が一定でなくなる。そのため、高い周波数(kHz)領域での磁化損失測定を実現するには、高い周波数領域において一定磁場振幅を出すために必要な電流振幅を明らかにする必要がある。

## 3. 磁場振幅計測方法

一定磁場を出すための必要な電流振幅を明らかにすることには、各周波数各電流振幅場合の磁場振幅を正確に計測しなければならない。

Table 1 に示すホール素子と小コイル(603 ターン)を利用して磁場振幅の測定を行った。高い周波数領域の磁場振幅をより精度よく測るために、小コイルを利用して誘導電圧から磁場振幅を換算した。

磁束密度  $B = B_0 \sin 2\pi ft$  と表すと、小コイルにおいての誘導電圧  $V = V_0 \cos 2\pi ft = \alpha f B_0 \cos 2\pi ft$  となる ( $\alpha$  は小コイルの形状に決められた定数)。磁場振幅の計測は以下通りである。

- 周波数が低い(例: 1 Hz)交流磁場を出し、その時の磁場振幅  $B_0$ 、誘導電圧振幅  $V_0$  を記録する。定数  $\alpha$  を  $\alpha = V_0/B_0$  で求める。
  - 周波数が高い交流磁場を出し、その時の誘導電圧振幅  $V_0'$  を記録する。上記測定した定数  $\alpha$  を使って、その時の磁場振幅  $B_0' = V_0' / (\alpha f)$  を計算する。
- 各周波数において実測した磁場振幅と電流振幅を用いて、磁場振幅を一定にするための電流振幅を計算できる。

## 4. 計測結果一例

計測結果の一例を Fig. 2 に示す。ここでは磁場振幅を一定(1 mT)にするための各周波数電流振幅を換算し、プロットした。低い周波数(1 kHz 以下)では必要な電流振幅はほぼ一定(10 数 A 程度)だが、高い周波数(1 kHz 以上)での必要な電流振幅が高くなる傾向がある。この結果についてもう少し検討する必要がある。

このように電流を制御することで各周波数磁場振幅を一定にし、多芯化薄膜高温超伝導線材の短い結合時定数を測定した結果を発表会で報告する予定である。

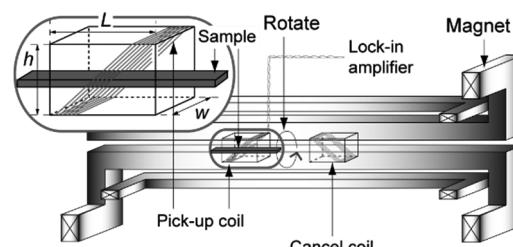


Fig. 1 Schematic view of the ac loss measurement system and enlarged view of pick up coil and sample [1].

Table 1. Information of Hall sensor and small coil

Hall sensor	Maker	LakeShore
Type		HGCT-3020
Small coil	Inner diameter	~ 10 mm
	Outer diameter	~ 17 mm
	Turns	603

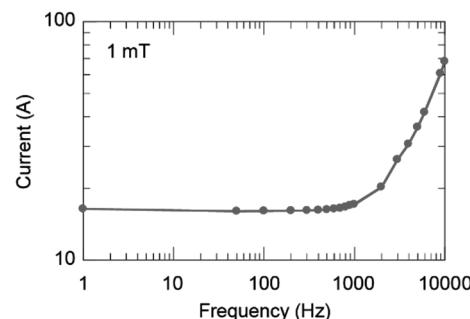


Fig. 2 Currents to produce 1 mT-amplitude magnetic field at various frequencies.

## 謝辞

本研究はJST 未来社会創造事業グラント番号 JPMJMI19E1 の支援を受けたものである。

## 参考文献

- Y. Li *et al.*, "Coupling time constant measurements of spirally-twisted striated coated conductors with finite transverse conductance between filaments," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, June 2020, Art. no. 4703005.

## 自作 MgB<sub>2</sub> 粉を使用した ex situ 法 MgB<sub>2</sub> 線材の超伝導特性

Superconducting properties of ex situ processed MgB<sub>2</sub> tapes using homemade powder

藤井 宏樹, 北口 仁 (NIMS)  
 FUJII Hiroki, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)  
 E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

### 1. 序

MgB<sub>2</sub> 超伝導体に於いて、高磁界下での臨界電流密度( $J_c$ )の特性改善には、硼素の炭素置換は最も有効な手法の一つである。炭素置換粉末 Mg(B,C)₂(MBC)は市販されておらず、ex situ 法でこの手法を適用するには、MBC 粉は自作する必要がある。一方で自作 MBC 粉には MgO 等の不純物が混入し易く、特性の劣化を引き起こすので、純度の高い粉末を作製することが重要となる。本研究では先ず、炭素置換しない自作 MgB<sub>2</sub> 粉で線材試料を作製し、評価を行った。

### 2. 実験

線材作製に用いた充填粉を Table 1 に示す。市販 MgB<sub>2</sub> 粉として、購入後グローブボックス(GB)内に保管されたもの(A)と、長期間大気中に放置されたもの(B)とを用いた。また、Mg(Alfa Aesar; 純度 99.8%)及び B 粉末(Sigma-Aldrich; ≥95%)とを Mg : B = 1.1: 2 のモル比で混合した後、加熱処理温度( $T_{heat}$ )800 – 950°C で 5 時間反応させたものを自作粉とした。放置市販粉 B と自作粉(C, D, E)については、有機酸での溶液処理により、含まれていた MgO を溶解除去した。これらの 6 種の粉末に所定の粉碎処理を施して充填粉とし、ex situ 法で Fe シース線材を作製した。線材試料には、Ar ガス気流中、種々の温度で 5 時間加熱処理を施し、組織や超伝導特性の評価を行った。

### 3. 結果と考察

市販粉末 A, B 及び自作未処理粉末 C – E の XRD 図を比較すると、含まれる MgO の多い順に B > C – E > A であった。これらの MgO は溶液処理によりほぼ除去されたが、粉末 C – E の処理後の収率は、最終的に濾過で得られた残渣が MgB<sub>2</sub> のみと仮定すると、それぞれ 84, 89, 90% であった。粉末 C で収率が低いのは、 $T_{heat}$  が低いために残っていた未反応の Mg が溶解除去されたためだと考えられる。Fig.1 に粉碎処理粉末の XRD 図を示す。粉碎前の溶液処理粉末の XRD 図に対応して、粉末 B にのみ MgO に起因するピーク 220 が明確に確認された。

Fig. 2 に、700°C 前後で焼結処理した線材の  $J_c$ -B 特性を示す。MgO が多量に存在する線材 B では、 $J_c$  特性は非常に劣っており、4.2K, 12T での  $J_c$  値は 20A/mm<sup>2</sup> 以下であった。一方、線材 B' では、存在していた MgO が溶液処理で除去されたことによって、 $J_c$  特性の格段の改善が得られ、GB 保管線材 A の  $J_c$  特性と同等以上となった。自作粉線材 C – E に関しては、D の  $J_c$  特性が最も優れていた。C 及び E では、それぞれ未反応の Mg による組成ずれや高温加熱処理によって、MgB<sub>4+x</sub> が多量に生成したために、 $J_c$  特性の劣化を招いたものと考えられる。また、線材 B', C, D の  $J_c$  の磁場依存性は、線材 A と比べて小さくなっているが、粉末の溶液処理の際の残留有機溶媒が微量の炭素置換を引き起こしたためだと考えられる。

XRD では、自作粉 C – E は A, B' 同様 MgB<sub>2</sub> ほぼ単相であるのにも拘らず、線材試料での  $J_c$  特性は、自作粉使用線材では明らかに劣っている。これは、市販粉と自作粉の作製方法の違いによるものと推察される。自作粉に於いては、硼素試薬に含まれる不純物が、未反応のまま、あるいは Mg と反応して MgB<sub>2</sub> 以外の不純物を生成し、これらの不純物が  $J_c$  特性の劣化を引き起こしているものと考えられる。

Table 1 Specifications of tapes and filling powders.

Tapes [Powders]	$T_{heat}$ (°C)	Acid-treated
A [commercial(clean)]	–	–
B [commercial(contaminated)]	–	–
B' [commercial(refined)]	–	○
C [homemade(refined)]	800	○
D [homemade(refined)]	900	○
E [homemade(refined)]	950	○

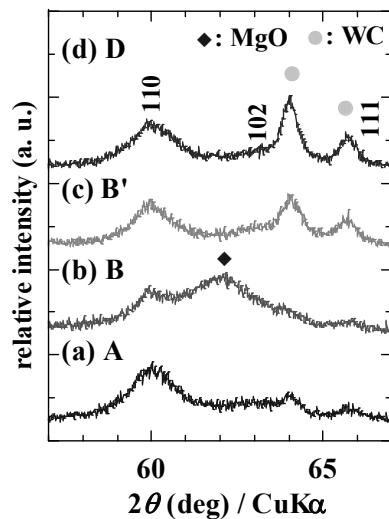


Fig. 1 XRD patterns of as-milled powders (a) A, (b) B, (c) B' and (d) D. XRD peaks assigned to MgB<sub>2</sub> are indexed and those to MgO and WC are denoted by a rhombus and circles, respectively.

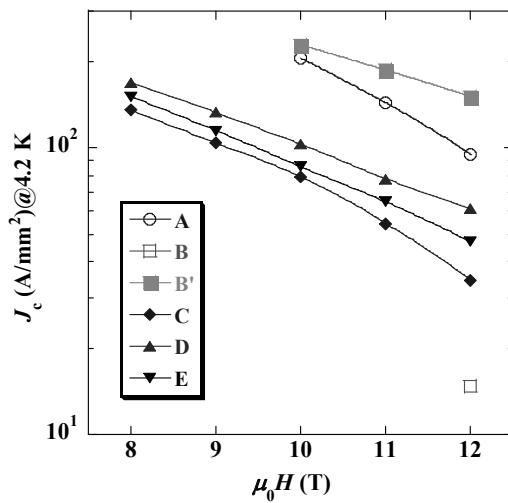


Fig. 2  $J_c$ -B curves for ex situ processed tapes using various milled powders. The measurements were performed at 4.2 K in a magnetic field applied parallel to the tape surface.

# 重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの電磁力解析

Analysis of electromagnetic force of a superconducting magnet with active shielding for a rotating gantry

尾花 哲造(NIFS)

OBANA Tetsuhiro (NIFS)

E-mail: obana.tetsuhiro@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

現在、放射線医学総合研究所にて稼動中の重粒子線用回転ガントリーには、鉄ヨークを用いた超伝導マグネットが使用されている[1]。マグネットの重量は鉄ヨークが支配的となり、1台のマグネットの重量は数トン程に達する。回転ガントリーは10台のマグネットを使用するため、数10トンの重量物が強固なフレームに搭載された状態で、非常に困難な回転制御が求められている。そこで、マグネットの軽量化により、回転ガントリーの制御系とフレーム構造を簡素化するため、鉄を使用しないアクティブシールド型超伝導マグネットの設計研究を進めている[2,3]。本講演では、アクティブシールド型超伝導マグネットの電磁力解析について発表する。

## 2. マグネットの詳細

アクティブシールド型超伝導ダイポールマグネットは、主コイル(ダイポールコイル)の外周にアクティブシールドコイルを配置した構造である。各コイルには、径1 mm 程のNbTi素線を使用する。主コイルの内半径と外半径は90 mmと210 mmであり、層数は60である。一方、アクティブシールドコイルの内半径と外半径は300 mmと350 mmであり、層数は25である。

## 3. 電磁力解析

マグネットの定格運転時(マグネット中心での磁場が2.37 T)に、コイル断面内で発生する単位長さあたりの電磁力を求めた[4]。Fig.1とFig.2に、主コイルとアクティブシールドコイルで生じる電磁力をベクトル図で示す。主コイルに関して、コイルの内周部では電磁力が外周方向に発生し、コイルの外周部では電磁力が内周方向に発生する。そのため、コイル巻線に圧縮応力が発生する。アクティブシールドコイルに関しては、電磁力は外周方向に発生する。従って、コイル巻線に引張応力が発生する。

主コイルとアクティブシールドコイルにおいて、各素線で生じた電磁力を積算して評価した。Table1に、コイルの第一象限における水平および垂直方向の電磁力を示す。電磁力は、水平(x)方向と垂直(y)方向に分割した。水平方向の電磁力に関して、主コイルはアクティブシールドコイルと同等である。一方、垂直方向の電磁力に関しては、主コイルがアクティブシールドコイルよりも5倍程大きくなり、更に、各コイルで電磁力の方向が異なる結果となった。

Table 1. EM forces generated in a quadrant of the coil cross-section when the dipole field is 2.37 T at the magnet center.

	EM force in horizontal direction	EM force in vertical direction
Dipole coil	196 kN/m	-538 kN/m
Shield coil	182 kN/m	98 kN/m

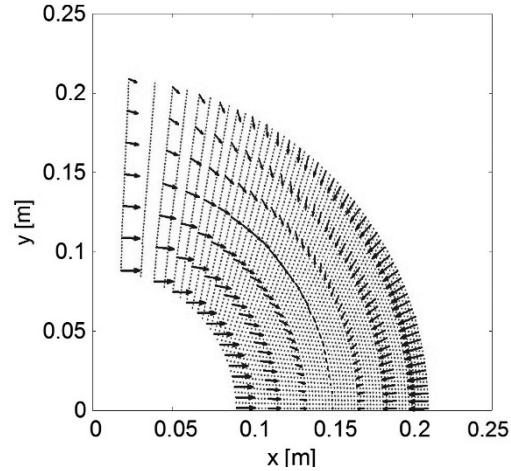


Fig. 1 EM forces in a quadrant of the dipole coil. Arrows show EM force at each wire position.

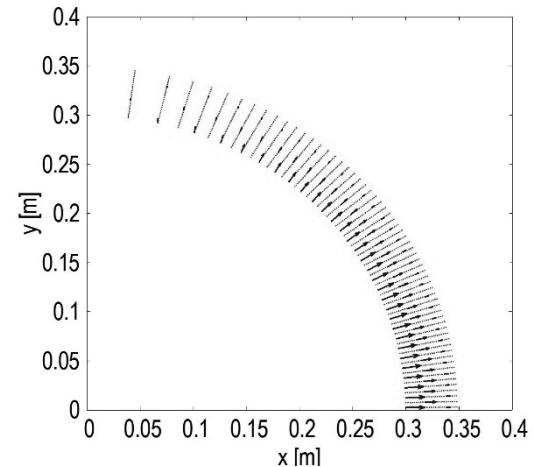


Fig. 2 EM forces in a quadrant of the active shield coil. Arrows show EM force at each wire position.

## 謝辞

本研究は、JSPS科研費19K04364の助成を受けたものです。

## 参考文献

1. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.104
2. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.80
3. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.116
4. T. Obana, et al.: IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 30 (2020) 4400305

# 天然高分子修飾マグнетイトを用いた重金属イオン除去手法の開発

## Development of Removal Method of Heavy Metal Ions by Using Magnetite Modified with Natural Polymer

神田 香穂子, 秋山 庸子, 真鍋 勇一郎, 佐藤 文信 (大阪大学)

KANDA Kahoko, AKIYAMA Yoko, MANABE Yuichiro, SATO Fuminobu (Osaka University)

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

### 1. はじめに

水質汚染は、発展途上国を中心に未だ深刻な問題であり、特に、水中の重金属イオンを除去することが必要不可欠である。本研究では添加剤を最小限に抑える水処理システムとして、強磁性体であるマグネットイトにイオンを吸着させて磁気分離する方法に着目した。さらに、加温により溶解する高分子でマグネットイトを表面修飾することにより、分離したイオンを容易に脱離でき、マグネットイトの再利用も可能になると考へた。そこで、環境への負荷が小さく、加温により溶解する性質を持つ天然高分子を強磁性体に表面修飾し、重金属イオンを吸着させて回収する手法を開発することを研究目的とした。重金属イオンとしては、人体への影響が大きい代表的な2価の陽イオンであるカドミウムを用いた。

### 2. 実験方法

まず、天然高分子の1つであるアラビアゴムを用いてアラビアゴム修飾マグネットイト(以下 GAM)を調製した。0.1 g/mL のアラビアゴム溶液 100 mL に 1.0 g のマグネットイト(一次粒径 100 nm)を添加し、10 分間超音波を照射した後、30 分間攪拌した。生成物を蒸留水で3回洗浄した後、130°Cで18時間乾燥させた。表面修飾については、表面電位(ゼータ電位)およびFT-IR(フーリエ変換赤外分光法)を用いて確認した。

次に、重金属イオンの吸着実験を行った。10 ppm の  $\text{Cd}^{2+}$  溶液 100 mL にアラビアゴム修飾マグネットイトとマグネットイトをそれぞれ 0.1 g, 0.2 g, 0.5 g 添加した後(pH 調製なし, pH=6.3), 超音波を 10 分間照射し、15 分間振とうした。その後、永久磁石で磁気分離を行い、減圧ろ過で得られたろ液の  $\text{Cd}^{2+}$  濃度を ICP-AES(高周波誘導結合プラズマ原子発光分析)で測定することで  $\text{Cd}^{2+}$  の分離率を計算した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3-1. ゼータ電位測定

GAM と未修飾のマグネットイトのゼータ電位の pH 依存性を Fig.1 に示す。

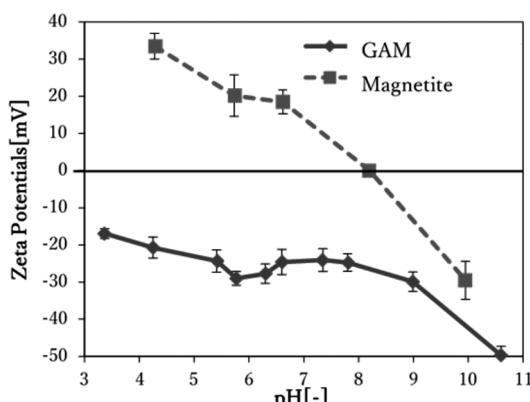


Fig.1 Zeta Potentials of Magnetite and GAM as a function of pH.

ゼータ電位が 0 となる pH は等電点と呼ばれ、粒子の表面水酸基が電気的に中性であることを示す。等電点より酸性の条件では、溶液中の  $\text{H}^+$  が増加するため、-OH 基が  $\text{H}^+$  を吸着して末端が  $-\text{OH}_2^+$  になり、粒子表面が正に帯電するため、ゼータ電位は正の値をとる。一方、等電点より塩基性の条件では、溶液中の  $\text{H}^+$  が減少するため、-OH 基から  $\text{H}^+$  が解離して末端が  $-\text{O}^-$  になり、粒子表面が負に帯電するため、ゼータ電位は負の値をとる。

Fig.1 より、マグネットイト粒子の等電点は pH=8.2 であり、それより低い pH で正に、高い pH で負に帯電することが分かる。一方 GAM は、実験を行った全ての pH で負に帯電していることが分かる。このことから、マグネットイトの表面が負帯電性の高分子であるアラビアゴムによって修飾され、陽イオンの吸着に適した負の表面電荷に変化したことが確認された。

#### 3-2. $\text{Cd}^{2+}$ 吸着実験

アラビアゴム修飾マグネットイト(GAM)とマグネットイトによる  $\text{Cd}^{2+}$  の分離率を Fig.2 に示す。マグネットイトより GAM のほうが、分離率が高いことが分かる。これは、Fig.1 に示すように、マグネットイトが pH<8.2 で表面電荷が正であるのに対し、GAM は今回実験を行った pH=6.3 でも表面電荷が負であり、陽イオンである  $\text{Cd}^{2+}$  を吸着できたためと考えられる。しかし 50%以上の分離率は得られなかった。この原因としてアラビアゴムの水中への脱離が考えられ、乾燥温度などの表面修飾条件の調整が必要である。

### 4. 結論

アラビアゴム修飾マグネットイトを調製し、 $\text{Cd}^{2+}$  を約 45% 除去することができた。今後は分離率を向上させるため、アラビアゴムの添加量、マグネットイトの粒径、攪拌時間や乾燥温度などの表面修飾条件や、他の天然高分子による修飾の検討を行う。またその後、加温によるアラビアゴムの脱離や、 $\text{Cd}^{2+}$  の回収の可能性を検討する。

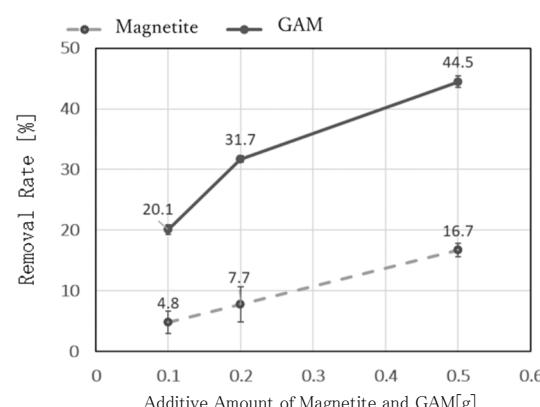


Fig.2 Removal Rate of  $\text{Cd}^{2+}$  by Magnetite and GAM as a function of the amount of additives.

### 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会(JSPS)の科研費 JP17K0059 の助成を受けて実施したものである。

## 常磁性粒子を対象とした高効率磁気分離法に関する基礎的研究

Fundamental study on high efficient magnetic separation method for paramagnetic particles

坂野 琢真, 三島 史人, 西嶋 茂宏 (福井工業大学)

SAKANO Takuma, MISHIMA Fumihito and NISHIJIMA Shigehiro (Fukui University of Technology)

E-mail: tkm.1106.aua@gmail.com

### 1. はじめに

磁気分離を用いた常磁性体の高速大量処理に向けた研究を行っている。高勾配磁気分離法では常磁性体も分離対象とすることができるのであるが、工業的応用にはその適用は難しい。なぜなら、高速大量処理あるいは高磁場大空間が要求されるからである。

この問題を解決するべく、捕獲対象である常磁性体が強磁性体との共存系であることを想定し、両者の凝集による分離能力の向上の手法が報告された。つまり、捕獲対象である常磁性粒子を強磁性粒子と凝集させることによって、等価的に粒子体積と粒子磁化率を向上させ、分離能力を向上させたのである。ここでは本手法の実用の可否について検討するため、本手法を再現し問題点を明らかにすることを目的とした。

### 2. 提案する手法の原理

高勾配磁気分離は、強磁性体の磁気フィルターを使い大きな磁気勾配を発生させ、粒子をフィルターに吸着させて分離する方法である。粒子に働く磁気力  $F_m$  は一次元表示では次のように表される。

$$F_m = VM \frac{dB}{dx} = V \frac{\chi}{\mu_0} B \frac{dB}{dx}$$

ここでは  $V$  は粒子体積、 $M$  は粒子の磁化の大きさ、 $\chi$  は磁化率、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $B$  は磁束密度、 $dB/dx$  は磁気勾配である。

本研究の捕獲対象であるヘマタイトと添加粒子であるマグネタイトは両者とも等電点(電位が 0 になる pH の値)が pH6~7 である。よって、両者の混合懸濁液を等電点付近に調整することで粒子間の電気的反発が僅少になり、凝集力が斥力に打ち勝つため粒子の凝集が起こる。

本手法では混合懸濁液の pH 調整により凝集を誘起させ等価的な粒子体積  $V$ (二次粒径)と粒子磁化率  $dB/dx$  の向上によって分離能力の向上を図った。

### 3. 実験概要

最大磁束密度 1.49T のハルバッハ配列磁石の磁場空間内に磁気フィルター細線(SUS430F 製、線径 0.35mm、20 メッシュ)2 枚を 45° ズラして配置した。このフィルターによる高勾配磁気分離実験をマグネタイトとヘマタイトの混合懸濁液に対して pH5、pH7、pH9 となるように調整した。その後、粒度分布を測定し凝集状態について検討した。

磁気分離の対象の懸濁液は 3 種類の pH のもとで、ヘマタイト(30mg)に対してマグネタイト(0mg、10mg、30mg、50mg、100mg、150mg)の混合懸濁液である。

この懸濁液 1L を定量送液ポンプ (EYELARP-1000) でフィルター上部から流し、磁気分離を実施した。pH5、pH7、pH9 に調整した懸濁液についてそれぞれ三回ずつ通水試験し、添加量を変えたマグネタイトの量に対するヘマタイトの吸着量を比較した。Fig.1 に実験時の様子と模式図を示す。

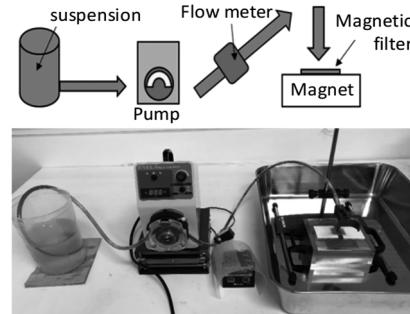


Fig.1 Setup and schematic diagram of the experiment

### 4. 結果

磁気分離の実験結果を Fig.2 に示す。Fig.2 から分かるように両粒子の等電点付近である pH7 における測定結果が最もヘマタイト吸着量が多かったことから両粒子が凝集していることが考えられる。また、光学顕微鏡を用いてフィルター細線に吸着している両粒子の様子を観察したところ凝集していることを目視で確認した。つまり、両粒子の凝集を促すことで分離能力が向上することが分かった。

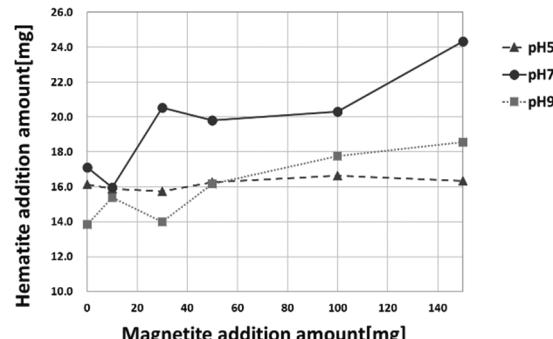


Fig.2 Hematite adsorption amount for each pH

### 5. 考察

本手法の実用化を視野に入れた場合、一定以上の分離率を得るために添加粒子である強磁性体を捕捉対象である常磁性体の数倍量添加する必要がある(Fig.2)。このため、大量処理には向かず、あまり現実的ではないと考えられる。

これらの結果から、常磁性体と強磁性体の共存系においては、pH 調整のみで分離能力の向上を図ることは可能であるが、常磁性体のみの懸濁液については困難が伴うことが明らかとなった。このため、常磁性体を対象とした磁気分離の工業的応用には高性能磁気フィルターの開発が必要と考えられる。

### 6. まとめ

本研究ではヘマタイトとマグネタイトの凝集による、磁気分離効率の向上を検討し、良好な結果を得た。しかし、添加粒子である強磁性体を捕捉対象である常磁性体の数倍量添加する必要があるため、あまり現実的ではない。磁気分離の工業的応用を視野に入れた場合、磁気フィルター高度化が必須条件であることが明らかになった。今後は、具体的な応用を念頭に、新たに高度化した磁気フィルターの検討、開発を行ってゆく予定である。

## 油分含有排水の磁化活性汚泥法を用いた処理の検討

Examination of treatment of oil-containing wastewater using magnetized activated sludge method

小笠 峻諒, 清水 理沙, 酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大)  
 KOSASA Toshiaki, SHIMIZU Risa, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.)  
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

油分の処理において水と微生物の分離に重力を用いる従来の活性汚泥法に比べ、磁気力で分離を行う磁化活性汚泥法では油分による沈降性への悪影響を無視できる。さらに余剰汚泥引き抜きなしで運転できることから排水への馴致が進み難分解性排水への対応性が高い。本研究では実際の食品工場の排水を想定した人工排水を用いたベンチスケール実験を行い、性能を評価した。約 100 日間汚泥引き抜きなしで運転でき、一律排水基準を下回った。

もし油分が河川や海へと流出してしまうと、水棲生物や生態系に悪影響を及ぼすため、適切な処理が不可欠である。しかしながら通常の活性汚泥法では油分の処理が難しい。現在は前処理として浮上分離を行うことで油分を除去していることが多いが、分離した油分汚泥は産業廃棄物として処理が必要であり、悪臭の原因となる。また、排水量が多いと油分を処理しきれなくなり、処理施設の機能低下を引き起こしてしまう。

一方本研究で用いた MAS 法では、活性汚泥に磁性粉を加えることで固液分離を磁気力で行うことができ、前処理や沈降槽が不要なため維持管理が容易でありながら、油分の処理に期待が持てる。従って本研究では、MAS 法による油分含有排水処理について検討した。

### 2. 実験方法

Fig.1 に示したように実験装置は容量 5 L の MAS 槽と容量 0.5 L の接触酸化(CO)槽の二つで構成した。模擬排水はまず MAS 槽で処理され、その処理水は汚泥と共に磁気分離部に流れ込む。そこで汚泥のみが磁気ドラムに付着しスクラーパーによって反応槽に戻される。その後処理水は CO 槽に流れ込み、さらに処理される。また、MAS 槽・CO 槽ともに連続曝気を行った。模擬排水は、有機成分として食用油 0.2 g/L、台所洗剤 0.02 g/L、ポリペプトン 0.3 g/L、グルコース 0.3 g/L を加え、そこに COD:N:P=100:5:1 となるように尿素と無機塩類を加え、乳化させたものを使用した。処理流量を 5 L/d とし、MAS 槽と CO 槽の両方の流出液を採取して pH、SS、BOD、COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、MLSS、MLVSSなどを測定した。

### 3. 結果と考察

有機成分の処理性能について、Fig.2 に COD<sub>Mn</sub> の推移を示した。MAS 槽流出は一律排水基準である許容限度 160 mg/L をほとんどの測定において満たしており、唯一満たしていない 36 日目に関しても、MAS 槽流出の濾過後や CO 槽流出においては許容限度を下回ってた。また、日間平均をとると約 83.1 mg/L であり、一律排水基準の日間平均 120 mg/L を満たしていた。さらに、濾過後の MAS 槽流出および CO 槽流出にいたっては日間平均 40 mg/L を下回る結果となった。

また BOD においては、海域の一規格基準である許容限度 160 mg/L および日間平均 120 mg/L に対して、最も高い MAS 槽流出が最大値約 103 mg/L、日間平均約 55.0 mg/L と

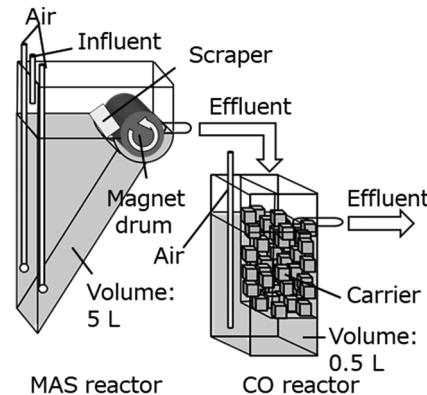


Fig. 1 Experimental apparatus

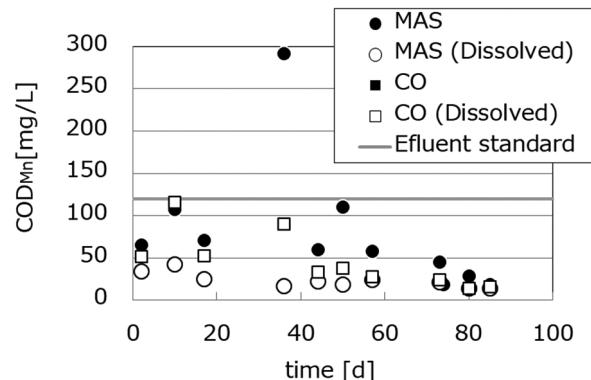


Fig. 2 Change of effluent COD<sub>Mn</sub>

一律排水基準を満たしていた。

これらのことから難分解性有機物である油分の処理が十分にできている判断できる。

次に SS について、MAS 槽流出は 36 日目を除き一律排水基準の許容限度 200 mg/L を満たしており、さらに日間平均 120 mg/L の基準も満たした。CO 槽も一律排水基準の許容限度および日間平均基準を下回った。このことより、SS の観点からも良好な処理が行われた。

最後に MLVSS について、汚泥引き抜きなしで約 100 日間運転したが約 4000 mg/L で安定した。また装置上部に若干のスカムが確認されたが、運転に影響を及ぼすことはなく、そのまま運転を継続できた。このスカムは界面活性剤に由来すると考えられるため、排水の組成が変化して界面活性剤の重量割合が増大した場合にはより多くのスカムが発生することが予想される。ベンチスケールであれば手動で取り除けるが、装置が大型化した際のスカムの除去方法については、今後の課題である。

### 4. まとめ

本研究の結果、磁化活性汚泥法によって前処理および汚泥引き抜きを行うことなく、難分解成分である油分を十分に処理することができるということが示された。

## 磁気分離を用いる磁化活性汚泥法を活用した畜産排水の高度処理

Advanced treatment of livestock wastewater using magnetic activated sludge process with magnetic separation

高娃, 酒井 保藏, 荷方 稔之 (宇都宮大)

Gaowa, Yasuzo SAKAI, Toshiyuki NIKATA, (Grad. of Eng., Utsunomiya Univ.)

E-mail: \*sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1.はじめに

難分解性である家畜抗生素を磁化活性汚泥法の利点を生かして生分解処理することを目的として、模擬排水にテトラサイクリンを添加して、水処理試験を行なった。十分な馴養の後、流出水中のテトラサイクリンの光学濃度はほぼ無視できるレベルまで分解した。余剰汚泥を引き抜かずに運転できる磁化活性汚泥法は微生物の馴養を促進し、抗生素の分解に有利であることが示唆された。

我々が実用化を目指す磁化活性汚泥法は、磁気分離により固液分離の煩わしさを根本的に改善し、畜産業における排水処理施設の管理の負担を解消できる可能性をもっている。酪農業において、初乳や、または乳房炎などの治療中の牛乳は廃棄されるが、含まれる抗生物質が河川など環境中に放出されると耐性菌発生の原因になることが指摘されている。廃棄乳は高濃度の有機物を含んでおり、その中に微量含まれる、難分解性の抗生素を生分解することは難しい。

本研究では、畜産排水の抗生素を除去する高度処理を磁化活性汚泥法により簡易化することを目指し、ベンチスケール実験で検討した。

### 2. 実験方法

模擬畜産排水は、市販の牛乳を蒸留水で50倍に希釈して調製した。COD<sub>Cr</sub>は約4500 mg/Lであった。抗生素の分解性能を調べるために、実験開始53日から代表的な家畜用抗生素であるテトラサイクリン(TC)を10 mg/Lで追加した。

水処理装置は磁化活性汚泥法(Magnetic Activated Sludge: MAS)と接触酸化法(Contact Oxidation: CO)の二段からなる。初段のMAS法では、種汚泥として市の水再生センターの活性汚泥を用いた。磁気分離するため、種汚泥にマグネットタイを微生物濃度とほぼ同濃度になるように添加した。添加直後から活性汚泥は完全に分離されるようになった。MAS法の曝気槽は5 Lであり、排水処理量は1 L/dとした。後段のCO法では約1 cm×1 cm×1 cmのスポンジを微生物の支持体として充填した。反応槽の容積は2.5 Lである。CO法では残留する有機物をさらに分解浄化した。

MLSS、MLVSS、COD<sub>Cr</sub>等はJIS法に従って測定した。テトラサイクリンの測定は紫外可視吸光検出を用い、紫外部の吸光度から簡易的に求めた。

### 3. 結果

Fig. 1にMASとCO装置の流出水のCOD<sub>Cr</sub>濃度の経日変化を示した。MAS法からの流出水のCOD<sub>Cr</sub>と接触酸化装置からの流出水のCOD<sub>Cr</sub>は水処理実験の経過とともに次第に低下し、最終的にそれぞれ約30 mg/Lと約20 mg/Lまで除去でき、除去率が99%以上に達成した。53日目にテトラサイクリンを加えた後、COD<sub>Cr</sub>の除去率が97%まで低下した。これは毒物である抗生素が、影響したと推察された。時間の経過とともに除去率の改善が認められ、MAS法からの流出水のCOD<sub>Cr</sub>除去率は99%まで回復した。

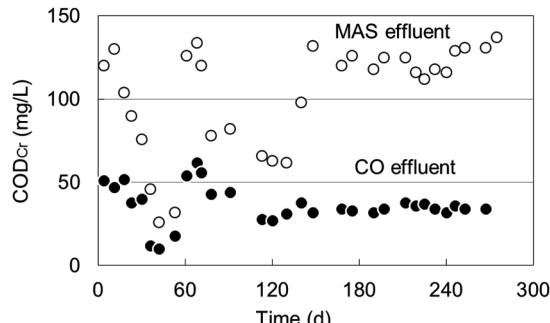


Fig.1 COD<sub>Cr</sub> changes of MAS and CO effluent.

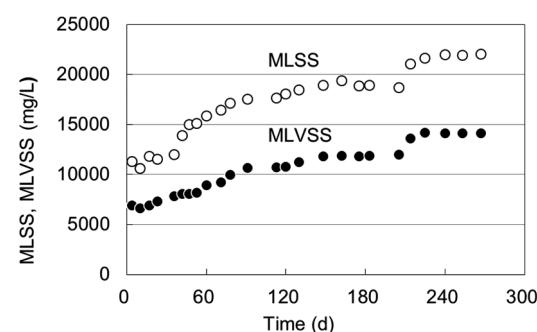


Fig.2 MLSS and MLVSS changes in MAS reactor.

MAS法からの流出水の濁度変化は78日目まで10 mg/L以下の良好な値を維持した。100日以後、徐々に濁度が上昇し30 mg/Lまで増加した。CO法からの流出水の濁度は10 mg/Lを維持しており、CO法が濁度成分の除去に効果的であることが示された。

Fig. 2にMAS装置のMLSS、MLVSS濃度の経日変化を示した。MLSS、MLVSS濃度がそれぞれ約10,600 mg/L、6,600 mg/Lで開始した。100日後MLVSSが約12,000 mg/Lで安定した。磁気分離はこのような高濃度の微生物を反応槽に保持できるため、余剰汚泥を引き抜かないで長期間連続処理ができる。通常の活性汚泥法と比べると、維持管理の手間は大幅に軽減されると考えられる。

53日目以後、テトラサイクリンを10 mg/L加えて処理した結果、テトラサイクリンの355 nm付近に吸収ピークがみられなかった。203日目までこのピークがほとんど観察されず、これは、磁化活性汚泥法は抗生素を生分解することによって低減できることが期待される。

### 4.まとめ

模擬畜産排水を排出基準以下までMAS法のみで浄化できた。CO法を追加することで良好な処理水を得ることができた。実験期間中、余剰汚泥の引き抜きは不要で、維持管理が簡単で安定した水処理ができることが示された。排水中の抗生素も分解できることが示唆された。

## 磁化活性汚泥法の負荷変動耐性への磁気分離の寄与

Contribution of magnetic separation to load fluctuation tolerance of magnetic activated sludge method

趙 張銘(宇都宮大院・地域創成);酒井保藏\*, 荷方稔之, 六本木美紀(宇都宮大・工)  
松尾夏奈(佐野高・附中);吉成美緒(矢板東高・附中);鷺足祐香(宇都宮短大・附中)

Zhangming JIA (Grad. Sch. of Regional Development and Creativity, Utsunomiya Univ.); Yasuzo SAKAI, Toshiyuki NIKATA, Miki ROPPONGI (Grad. of Eng., Utsunomiya Univ.); Kana MATSUO (Jr. High School attached to Sano High School); Mio YOSHINARI (Jr. High School attached to Yaita East High School); Yuka WASHIASHI (Jr. High School attached to Utsunomiya Jr. College)

E-mail: \*sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

磁化汚泥法とは、活性汚泥に強磁性粉を添加し、磁気力により固液分離を行う水処理法である。急激な負荷変動、低いPHが汚泥沈降性を悪化される問題に対して、磁化活性法とは、固液分離が安定し、処理の安定性も持ち。磁気分離による運転管理の安定性を検証するため、今回は、10日間の負荷ゼロを行った、元に戻したところ、バルキング状態となつたが、磁気分離によって清澄な処理水が得られた、良好な汚泥に復帰することが示された。

### 2. 実験方法

種汚泥は市内の水再生センターから採取した下水汚泥(2,000 mg/L)を使用された。汚泥の引抜きは行なわず、MLVSS(有機性物質)の濃度に対して(合計 16,000 mg/L)、マグネタイトがほぼ 1:1 になるように適宜追加した。模擬排水(酢酸: 400 mg/L、ポリペプトン: 400 mg/L、無機栄養塩、TOC 濃度約 400mg/L)を調整し、流量 5 L/d、COD 負荷 1.0g/(L·d)で 20 日間汚泥を馴養し、負荷変動として、21 日目から 10 日間流入を停止し、装置内で水を循環させた。31 日目以降、COD 負荷を 1.0g/(L·d)に戻し、水処理を再開した。58 日以降は間欠曝気を行なった。

### 3. 結果

Fig. 1 と Fig. 2 にVSS 基準の SVI(活性汚泥の沈降性の指標として、1gの活性汚泥が占める容積。)と容積負荷の経時変化と流出 TOC の経時変化を示す。実験開始後 20 日間で、SVI は 85 mL/g-VSS で安定していた。流出 TOC 濃度も、8 mg/L(TOC 除去率 98%)を達する。排水なし 10 日間で実験を続け、SVI も安定した。しかし、負荷が戻ると、流出 TOC がすぐに 36 mg/L まで上昇し、SVI も 260 mL/g-VSS に増加した。処理性状が一週間程度で復帰し、SVI も改善した。しかし、43 日目に pH が 5.3 まで低下した後、糸状菌が大量に増殖し、SVI:450 mL/g-VSS を超える汚泥の沈降性が極端な悪化。50 ~60 日目の高 SVI 状態(約 450mL/g-VSS)のとき、顕微鏡によって曝気槽で糸状菌が多数観察され、汚泥フロックがばらになるが、磁気分離により流出水濁度は 10 NTU 前後で安定しており、沈降性悪化により汚泥と流出が完全に分離できない現象は、今回の磁気分離実験ではほとんど観察されなかつた。

本実験で、磁性粉を捕捉できず糸状菌が磁気分離により選択的に流出され、部分糸状菌は凝集フロックとの付着しているのが顕微鏡による観測された。短い時間で糸状菌を完全に除去できなくなつた。約三ヶ月かけて、SVI:150 mL/g-VSS の元の値にはほぼ復帰した。169 目で MLVSS は最初の 7 倍になった、酸素が不足ため、SVI が 169 mL/g-VSS に増加した。SVI が酸素の補足で復帰した。今まで、汚泥の MLVSS は 30 g/L 以上となつたが、濁度は 15NTU 前後で安定した。

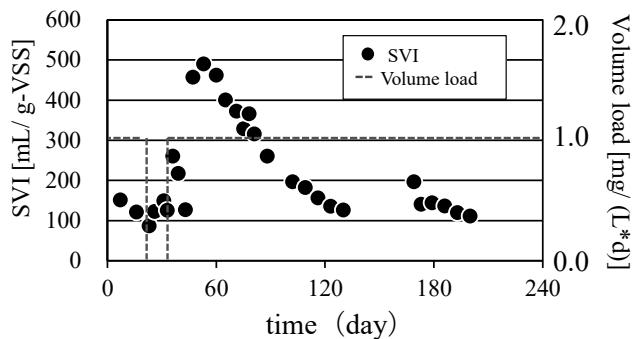


Fig. 1 SVI と容積負荷の経時変化

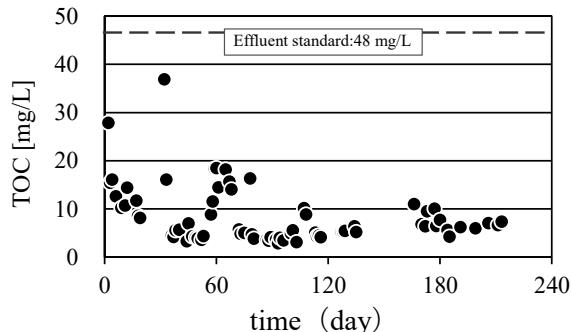


Fig. 2 流出の TOC と濁度の経時変化

### 4. まとめ

磁化活性汚泥法は急激な負荷変動などで発生する深刻なバルキングに対しても安定した水処理を維持できる。

### 参考文献

1. S. Sato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.154

# 磁気保持脱水乾燥(MSDD)法の実用装置への展開とフィジビリティの検討

## Development of magnetic supported dehydration-drying(MSDD) method for practical equipment and deasibility cosideration

齊藤 翼, 石井 将志, 酒井 保藏, 荷方 稔之  
 SAITO Tsubasa, ISHII Masashi, SAKAI Yasuzo, NIKATA Tohiyuki  
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1.はじめに

活性汚泥の脱水に磁気分離を応用した磁気保持脱水乾燥(MSDD)法では、濃縮槽の省スペース化や汚泥の大幅な減容化が可能である。本研究では、MSDD法の原理装置実験を基に実用装置を考察しフィジビリティを検討した。

汚泥の排出量は、年間約1億7千万tであり産業廃棄物排出量の43.2%も占めており種類別排出量は最も多い。排出された汚泥のほとんどは中間処理されるが、エネルギーを消費する。下水処理における余剰汚泥処理は全体の消費エネルギーのうち、約1/4を占めると言われている。また、汚泥が焼却処理される際、温室効果ガスであるN<sub>2</sub>Oを発生する。

磁気保持脱水乾燥(MSDD)法は、汚泥に磁性粉を添加し磁力を用いて排水と分離することで汚泥に直接、風や温風を当てるなどを可能とする。汚泥を遠心力や加圧により脱水する従来の方法よりも水分量をより減らせるようになった。本研究では22Lベンチスケール装置に磁石板を3枚並べ、その結果から実用装置について考察した。

### 2. 実験方法

ベンチスケール装置には22Lの容器(縦23.5cm、横37.5cm、高さ23.5cm)に3枚の磁石板を5cm間隔で並べた(Fig1)。磁石板はゴム磁石板(縦17cm、横20cm)を用いた。磁石板を上げた状態で活性汚泥で満たしマグネタイトを添加した(マグネタイト/MLSS=1/0.2)。そこへ磁石板を下ろし汚泥を3分間付着させた。付着しなかった汚泥は排出し、76℃の温風を装置に吹き込み汚泥を乾燥させた。乾燥中の質量変化を記録し、汚泥の質量が一定になるまで乾燥させた。乾燥後、磁石板を引き上げスクラーペーにより汚泥をはがした。はがした汚泥の水分を測定し、磁石板3枚の乾燥性能を算出した。その値から磁石板17枚の乾燥性能を予測した。

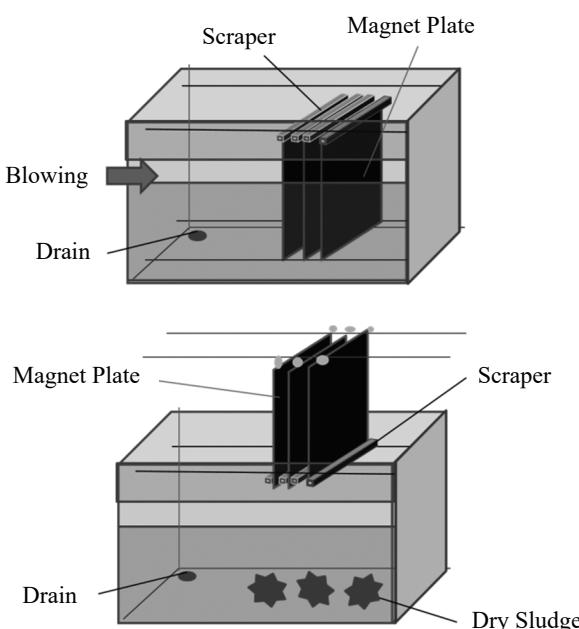


Fig. 1 Bench Scale Apparatus

### 3. 結果と考察

経過時間ごとののはがした汚泥質量と水分の推移をFig2に示した。磁石板3枚で188gの汚泥を付着することができた。乾燥性能としては、乾燥時間約2.7時間で、水分9.9%の14.6gまで脱水できた。よって、この値から磁石板17枚時の乾燥性能を予測すると、磁石板17枚で1065gの汚泥を付着し、82.7gの乾燥汚泥を得ることができる。排水の流入、流出時間を4.5分、浸漬時間を3分、磁石の引き上げ、引き下げ時間を1分として見積もると合計で14分であり、乾燥時間に足すと全行程時間は2.9時間となった。22L装置、2.9時間で1065gの汚泥を処理するので、1日、乾燥装置容積1m<sup>3</sup>当たりの汚泥処理量は400kg/d・m<sup>3</sup>と推察された。

上記の値から反応槽100m<sup>3</sup>、MLSS:2000mg/L、汚泥転換率:0.21/d、水分95%の汚泥を処理するのに必要な装置容積を算出した。この反応槽から一日に生じる汚泥は、800kg/dである。これを処理するには、装置容積は、2m<sup>3</sup>必要である。つまり、反応槽の1/50スケールのMSDD装置で処理が可能であることが示唆された。また、装置容積をさらに小さくする場合は乾燥時間を短くすることが効果的である。磁石板に十分に温風が当たることで乾燥時間は短縮できると考えられており、そのためには、装置内の空気の循環を良くするか、磁石板の数を増やす、磁石板一枚当たりの面積を縮小することで温風を当てやすくすることが必要だと考えた。

汚泥処理コストについて同様の条件(反応槽100m<sup>3</sup>、MLSS:2000mg/L、汚泥転換率:0.21/d)で従来法と比較する。従来法は一日に、汚泥量200kg(水分80%)、MSDD法では44.4kg(水分10%)の処理汚泥となる。汚泥処理コスト30円/kg、マグネタイト100円/kgより、従来法のコストは、6000円、MSDD法では、2132円となった。このことから、MSDD法は従来法と比べ汚泥量を約1/4に減容、汚泥処理コストの60%削減が期待できると考えられる。

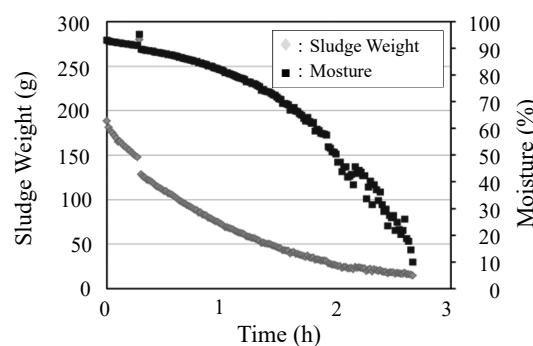


Fig. 2 Change of Sludge Weight Moisture

### 4.まとめ

磁気保持脱水乾燥(MSDD)法は、ベンチスケール実験結果からの考察で、実用装置でも反応槽の1/50スケールで汚泥処理が可能であることが推測された。また、装置の構造の工夫により、さらなる省スペース化が期待できる。

### 参考文献

- I MASASHI, et al. of CSSJ Conference, Vol.97 (2019) p.160

# 電力変換器を考慮した電動航空推進システム用全超電導発電機の最適設計

## Optimization of Fully Superconducting Generators Considering Source-Side Converters for DC Electrified Aircraft Propulsion Systems

ハイデマン ダニエル, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)  
 Daniel HEIDEMAN, Yutaka TERAO, Hiroyuki OHSAKI (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: heideman-daniel-asao420@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. Introduction

To improve the efficiency of future commercial aircraft, organizations including NASA and JAXA have proposed advanced aircraft concepts, many of which utilize new technologies to increase efficiency. One such design is the NASA N3-X concept, funded by NASA, which utilizes two turbine engines and sixteen propulsor fans in an electrified propulsion system [1]. In these systems, power is transferred from the turbine engines to the fans electrically through the use of generators, motors and electric transmission cables. The N3-X is designed to carry about 300 passengers and is expected to extensively use superconductors to reduce system mass and losses. To reduce transmission losses and increase system flexibility, DC buses are envisioned to be used to carry power from the generators to the motors, with converters required at both the source and load sides. As these converters are typically very heavy and contribute to overall losses, it is important to consider them when designing the other electrical components in the aircraft grid. In this study, the optimization of fully superconducting generators for low mass and loss for use in electrified aircraft propulsion systems is performed while considering the mass and losses of the associated source-side converters.

### 2. Design

The generator design being considered is an air-core fully superconducting generator utilizing multifilament MgB<sub>2</sub> wires in the armature windings and REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) flat tape wires for the field coil windings, shown in Figure 1. The operating temperature is assumed to be 20 K, as it is expected that such machines would be cooled by the aircraft's liquid hydrogen fuel. The outside radius of the generator (R<sub>6</sub> in Figure 1) is set at half the radius of a turbine for which the blade tips would be moving at 500 m/s. As the generator is to operate at 5000 RPM, the outside radius of the generator is set at 477 mm.

The leakage magnetic field strength during operation is to be measured at twice the generator outside radius and is not to exceed 3.0 mT, the maximum peak safe magnetic field strength at the operating frequency assuming a sinusoidal distribution [2].

When optimizing the design, the radii of the inside and outside of the field coils (R<sub>1</sub> and R<sub>2</sub>), inside and outside of the armature windings (R<sub>3</sub> and R<sub>4</sub>), and the inside of the back yoke (R<sub>5</sub>) are varied, as are the inside and outside positions of the field coils ( $\alpha$  and  $\beta$ ) and the active length of the generator.

A unidirectional solid-state rectifier cooled to 100 K is to be used as the source-side converter to convert the 3-phase AC from the generator to  $\pm 1.5$  kW bipolar DC for transmission (Figure 2). The nominal electrical power rating of the generator/rectifier is to be 11.19 MW as per the

estimated requirements of the N3-X concept [1]. The sizing of the converter components will be determined analytically.

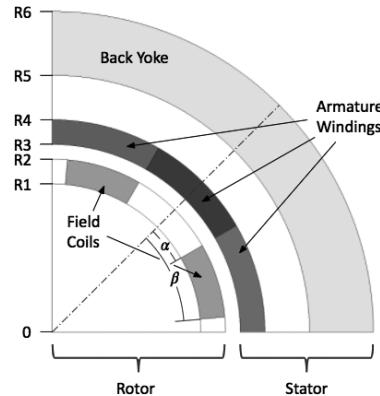


Fig. 1 Generator cross section.

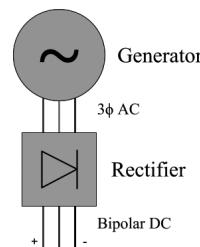


Fig. 2 Circuit layout.

### 3. Objective Functions

The design will be optimized with a genetic algorithm for minimized loss and mass. Losses will be totaled without regard to temperature, as cooling is assumed to be "free", provided by the cryogenic fuel. The forms of loss to be considered are: superconductor hysteresis and coupling loss, iron loss, and converter conduction and switching losses. The system mass will be evaluated as the following components: generator back yoke, armature windings, and field coils, and converter switches, diodes, inductors and capacitors.

### References

1. M. Armstrong, M. Blackwelder, A. Bollman, C. Ross, A. Campbell, C. Jones, P. Norman, "Architecture, Voltage, and Components for a Turboelectric Distributed Propulsion Electric Grid," NASA/CR--2015-218440, 2015
2. *Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0–3 kHz*, IEEE standard C95.6–2002, 2007.

# 潮流発電への超電導バルク材の強磁場応用に関する研究

## Application of Superconducting Bulk Material to Marine Current Turbine

武井 慎治, 和泉 充, 山口 康太, 井田 徹哉, SHAANIKA Erasmus (海洋大)  
 TAKEI Shinji, IZUMI Mitsu, YAMAGUCHI Kota, IDA Tetsuya, SHAANIKA Erasmus (TUMSAT)  
 E-mail: s.takei1010@gmail.com

### 1. はじめに

自然エネルギーを利用した発電において、太陽光や風力の利用は広範に世界各地で始まっている。発電量の予測が比較的容易で、風力発電に比較して密度の高い水流や海潮流を利用したタービンが期待されている。このタービンの発電機の界磁として超電導バルク材の適合性を検討している。発電システムとして前後の2基のタービンから構成され、タービンユニットの下流で旋回流を極力少なくするように設計された二重反転タービンに適した界磁-電機子構造を提案する。

### 2. システム構成

二重反転タービンは等速反転と異速反転の両方のケースを想定した[1]。設計例として定格流速は 2.5 m/s, 発電能力は 500 kw (発電機出口出力), ロータ直径は 14.5 m [1], 設計水深は 30 m 程度とする。

### 3. 発電機基本構成

今回の設計では、前方タービンは内側の電機子と一体となって回転し、後方タービンは、外側の電機子と一体となって回転する二重電機子構造とし、これらの2つの回転電機子の間に固定子として超電導バルク材を配置、着磁により、バルク磁石の両面を界磁磁束として利用する方式としている。発電機設計仕様を Table 1 に示す。設計は、バルク材を界磁とする場合と永久磁石を界磁とする場合について行い比較検討した。

設計は、3D-CAD と MagNet 7 により行った。Fig. 1 は発電機の断面界磁と電機子の配置を示す。

それぞれの入力トルクは、タービン翼の選択と回転数で決まるが、前方、後方それぞれ 251 kNm, 188 kNm となる。タービン出力は合計 518 kW と与えられている[1]。

Table 1 Specification of contra-rotating bulk HTS generator.

Speed [rpm]	12.2(Front), 9.1(Rear)
Generator diameter [m]	2
Rotor	Armature winding (copper)
Stator	HTS bulk ( $GdBa_2Cu_3O_7$ )
	Permanent Magnet (NdFeB)
Gap width of center [mm]	15
Number of poles	16
Teeth	M600 - 50A

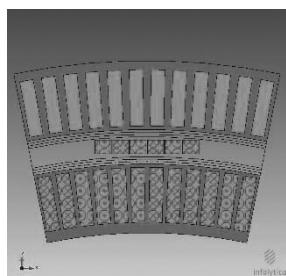


Fig. 1 Design of the generator structure with the contra-rotating armatures and field poles of bulk HTS.

Table 2 Calculated torque and power of contra-rotating bulk HTS generator and the reference values from the alternative model of the field poles composed of permanent magnets.

	Outer armature	Inner armature		
	HTS bulk	PM	HTS bulk	PM
Maximum torque [kNm]	178	32	232	52
Maximum power [kW]	171	30	297	66

バルク材は 50 mm x 50 mm x 20 mm の矩形材を平面配置して適切な着磁により捕捉磁束を内外両面に対向する電機子に対して構成する。Table 2 に解析結果を示す。

表から、発電機トルクは 232 kNm, 178 kNm となる。発電機出力は合計 468 kW を得た。

### 4. 結論

バルク材を界磁とした場合、特に Gd 系バルク材の捕捉磁束の同期運転下での安定性は、我々のこれまでの研究から実証されており[2]、同期機界磁としての着磁応用技術やパルス着磁と熱サイフォン冷却[3]についての研究成果をふまえ、今後において十分実現可能な発電機概念と考えている。

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業による科学研究費補助金 (16H04597) により実施したことと付記し、超電導界磁方式二重反転タービンの設計においてご共同とご協力をいただいた海上技術安全研究所の上入佐光、白石耕一郎、右近良孝、工藤達郎、九州大学の安東潤、金丸崇の各氏に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 右近良孝、白石耕一郎、工藤達郎、金丸崇、安東潤、日本船舶海洋工学会講演論文集 (令和2年日本船舶海洋工学会春季講演会)。
- E. Shaanika, M. Miki, C. Bocquel, K. Yamaguchi, B. Felder, K. Tsuzuki, T. Ida, M. Izumi, S. Englebretson, R. Chin, J. Kolehmainen, M. Morita and H. Teshima, "Core Loss of a Bulk HTS Synchronous Machine at 2 T and 3 T Rotor Magnetisation," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 30, no. 1, Jan. 2020, Art. no. 5200106. DOI: 10.1109/TASC.2019.2927587, およびE. Shaanika 博士学位論文 (March 2020, 東京海洋大学)。
- K. Yamaguchi, E. Shaanika, M. Miki, M. Izumi, Y. Murase, T. Oryu and T. Yanamoto, "Study of the heat transfer capacity of thermosyphon cooling system under the inclined condition", IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng. Vol. 502, 012142 2019 (5pp). DOI:10.1088/1757-899X/502/1/012142

# NSGA-IIに基づく15MW超伝導風力タービン発電機の設計研究

## Design Study of 15 MW Superconducting Wind Turbine Generators Based on NSGA-II

瞿 貝兒, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)  
 QU Beier, TERAO Yutaka and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: qubeier617@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. Introduction

The superconducting wind turbine generator of 10 MW and higher output class is one of the key solutions for larger size wind power systems for higher output density and efficiency. Researches on this topic generally include fully superconducting generators (FSCG) and partially superconducting generators. FSCG consists of field windings and armature windings both made by superconducting materials, however, a key issue for most applications of FSCG involves AC loss. Therefore, in this study AC loss will be discussed with the design of generator together.

### 2. Characteristics of FSCG and the NSGA-II algorithm

The design shows the conceptual model of a 15 MW class FSCG in Fig. 1. The armature windings are made of MgB<sub>2</sub> wires and its field windings are made of YBCO wires. Table 1 shows some specific parameters of this generator. It runs under a temperature of 22 K, the number of poles is 12, the rotation speed is 10 rpm. The ideal operational voltage is about 6900 V with the current of about 1255 A and electric loading of 290 kA/m. The air gap magnetic field strength  $B$ , the effective length of generator  $l$  and the diameter of stator  $D$  are variables in the optimization. The calculation of AC loss in the rotor is currently based on the hysteresis loss of the armature winding which is represented by mathematical formulas.

NSGA-II is a popular non-domination based genetic algorithm for multi-objective optimization, which can solve some complicated nonlinear optimization problems. In order to make this optimization work better, the parameters of NSGA-II are set as follows. The population of this genetic algorithm is 50, the number of the objective function is 2, the minimized bound and the maximized bound of  $D$ ,  $l$  and  $B$  is set as [0 0 0] and [6 4 4].

### 3. Simulation results

Through iterations 50 sets of Pareto optimal solutions are found. Fig. 2 is the result after two hundred iterations, it shows the relationship between output power of the FSCG and the hysteresis loss from the AC loss, indicating that the greater the output power of the generator is, the greater the AC loss is. If we hope to control the output power above 15 MW, the value of the hysteresis loss must be greater than 0.27 kW.

Fig. 3 shows if  $B$  increases, the AC loss represented by the hysteresis loss will increase, as will the output power of the generator. And the change of  $l$  has no special relationship with the AC loss and the output power. But as a whole, increasing  $l$  makes the AC loss smaller. From the 50 sets of Pareto optimal, the solution that makes the output power closest to 15 MW can be found as  $D = 6.0$  m,  $l = 4.0$  m,  $B = 3.3$  T. Under this circumstance, the output power is 15.0 MW, and the hysteresis loss is close to 0.3 kW.

### 4. Conclusion

This optimization finds the relationship between the parameters, the output power and AC loss, and gets a reasonable design model. The calculation result of AC loss needs to be verified by FEM.

Table 1. FSCG Specifications

Generator output: $P$	15 MW
Number of poles: $p$	12
Rotation speed: $N_{rot}$	10 rpm
Operational voltage: $U$	6900 V
Mean stator winding diameter: $D$	6 m
Effective length of generator: $l$	3–4 m
Magnetic field at the gap: $B$	2–4 T
Operating temperature: $T$	22 K

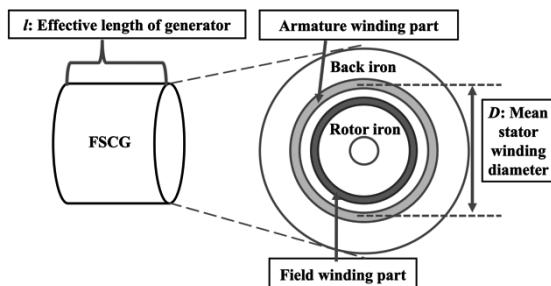


Fig.1 Conceptual diagram of the 15 MW FSCG

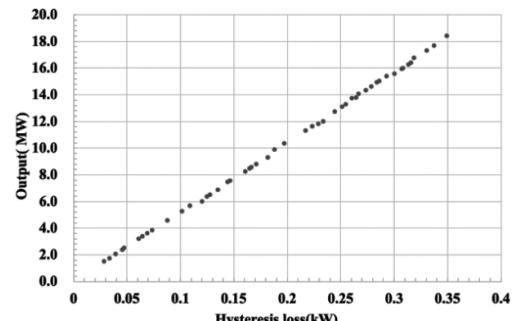


Fig.2 Pareto optimal of NSGA-II after 200th iteration of the 15 MW FSCG

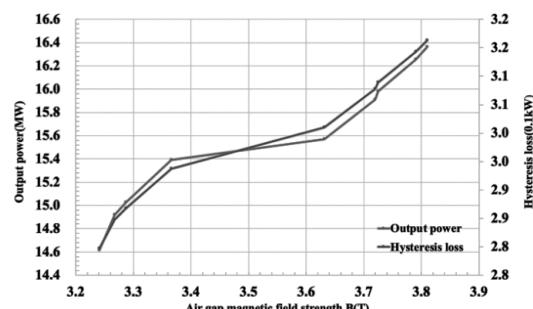


Fig.3 The relationship between output power, hysteresis loss and magnetic field at the gap

### References

1. M. Saruwatari, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.26, No.4 (2016), pp. 1–5.
2. F. Xu, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.20, No.3 (2010), pp. 1005–1008.

# 過電流下 REBCO コイルの三次元電磁界・熱伝導場連成解析

## Three-Dimensional Electromagnetic and Thermal Field Coupled Analysis of REBCO Coils Under Overcurrent Conditions

錢 可楨, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

QIAN Kezhen, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: qiankezhen@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

近年、REBCO 線材は優れた臨界電流特性、比較的に高い運転温度、また、設計と製造における高い柔軟性を持つことから、NMR(核磁気共鳴装置)や SFCL(超電導限流器)等のコイルへの応用が広く期待されている。しかし、実用化にあたって、REBCO 線材の臨界電流密度( $J_c$ )の不均一性などに起因するホットスポット問題が課題としてあげられる。本研究は、REBCO コイルを対象とし、有限要素法を用いた三次元電磁界・熱伝導場連成解析ツールを作成した。特に電磁界解析に関しては、 $\mathbf{T}$ (電流ベクトルポテンシャル) -  $\mathbf{Q}$ (磁気スカラポテンシャル)法と薄板近似に基づいた座標変換を利用し、三次元形状を持つ REBCO コイルの電磁界解析を実現した。さらに、熱伝導場解析において、冷媒の沸騰特性を考慮し、熱流束計算モデルの詳細化を行った。本解析ツールを用いて過電流が流れる際 REBCO コイルの過渡的な電流、温度分布を考察する。

### 2. 数値解析手法

超電導特性の強い温度依存性を考慮し、本研究では電磁界・熱伝導場連成解析を適用した。

電磁界解析においては、REBCO 線材の構造特性を考慮して薄板近似を利用し、電流ベクトルポテンシャル  $\mathbf{T}$  ( $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$ ,  $\mathbf{J}$  は電流密度)を変数として定式化した。さらに、計算量を減らすために座標変換を用い、REBCO 線材の表面に沿って直交曲線座標系( $\xi, \eta, \zeta$ )を設定し(Fig. 1)、支配方程式を作成した。そのために、(1)、(2)のようにスケール因子( $h_\xi, h_\eta, h_\zeta$ )を用いてデカルト座標系下( $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ )の支配方程式に座標変換を行った [1]–[2]。ここでは  $d\mathbf{r}$  は微小変位、 $\rho$  は抵抗率、 $\mathbf{B}$  は磁束密度である。

$$h_\xi = \left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \right| = \sqrt{\left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \xi} \right)^2} \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{1}{h_\xi^2} \frac{\partial^2 T_\zeta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{h_\eta^2} \frac{\partial^2 T_\zeta}{\partial \eta^2} \right) - \frac{\mu h}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \left( \frac{(\nabla \times \mathbf{T}) \times \mathbf{r}}{r^3} \right) h_\xi h_\eta d\xi d\eta - \frac{\partial \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{z}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

電磁界解析では、ガラーキン法で離散化を行い、また 1 次三角形要素でモデルの分割を行う。節点  $i$  に対する節点方程式は(3)のように得られる。ここでは、 $R_i$  は節点  $i$  を含む領域、 $S^{(e)}$  は計算点要素の領域、 $S_v$  はビオ・サバールの法則で計算する際の積分点の要素領域である。

$$G_i = \sum_{R_i} \left\{ \rho \iint_{S^{(e)}} \left[ \frac{1}{h_\xi^2} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \left( \frac{\partial T_\zeta}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{h_\eta^2} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \left( \frac{\partial T_\zeta}{\partial \eta} \right) \right] h_\xi h_\eta d\xi d\eta \right\} + \sum_{R_i} \left\{ \iint_{S^{(e)}} N_i \left[ \frac{\mu}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{S_v} \left( \frac{(\nabla \times \mathbf{T}) \times \mathbf{r}}{r^3} \right) h'_\xi h'_\eta d\xi d\eta \right] h_\xi h_\eta d\xi d\eta \right\} + \sum_{R_i} \left( \iint_{S^{(e)}} N_i \frac{\partial \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{z}}{\partial t} h_\xi h_\eta d\xi d\eta \right) = 0 \quad (3)$$

特に右辺第二項について考察する。ここでは、積分点の電流が計算点で発生する磁場を計算する。スケール因子は三角形要素ごとに数値的に算出されるため、ここではスケール因子の値を決めるのが難しい。したがって、この積分計算については二回の座標変換を行う。まず、 $\nabla \times \mathbf{T}$  の計算を直交曲線座標系において行い、得た結果のベクトルをデカルト座標系へ変換する(4)。

$$\nabla \times \mathbf{T} = \frac{1}{h_\eta h_\zeta} \left( \frac{\partial h_\zeta T_\zeta}{\partial \eta} \right) \mathbf{\xi} - \frac{1}{h_\zeta h_\xi} \left( \frac{\partial h_\xi T_\zeta}{\partial \zeta} \right) \mathbf{\eta} = J_\xi \mathbf{\xi} + J_\eta \mathbf{\eta} = J_x \mathbf{x} + J_y \mathbf{y} + J_z \mathbf{z} \quad (4)$$

次に、デカルト座標系において  $(\nabla \times \mathbf{T}) \times \mathbf{r}/r^3$  を計算した後、再度直交曲線座標系(ただし、ここでは計算点要素に基づくもの)に変換し積分計算を行う。

本解析では、超電導体の  $E$ - $J$  特性は  $n$  値モデルにより近似し、 $J_c$  の温度、磁界依存性は(5)式のように考慮する[2]。

$$J_c(T, B) = \alpha \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} / (1 + kB/B_c)^b \quad (5)$$

一方、熱伝導場解析においては、熱伝導率や比熱の温度依存性を考慮し、液体窒素冷却や REBCO 線材のジュール発熱は境界条件で表現した[2]。支配方程式は(6)に示す。

$$pc \frac{\partial T}{\partial t} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + Q \quad (6)$$

ここでは、 $\kappa$  は熱伝導率、 $T$  は温度、 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱、 $Q$  はジュール発熱とクーリング効果を含む熱流束である。

特に冷媒によるクーリング効果については、冷媒(ここでは液体窒素)の温度上昇時の物性変化を考慮し、モデルの詳細化を行った。文献[4]により、冷媒は熱を吸収して気化する際に沸騰ヒステリシス現象が見られた。それは気化潜熱によるものだと考えられる。したがって、冷媒と REBCO 線材間の熱流束計算は、冷媒の気化前と気化後にそれぞれ違うモデルを設定した(7)。冷媒気化前の熱流束は主に対流によるもの、気化直後は主に核沸騰によるものだと想定する。

$$q = \begin{cases} h_{conv}(T - T_b)^m (T - T_b) & (\text{Heat flux} \leq \text{latent heat of vaporization}) \\ h_b q^n (T - T_b) & (\text{Heat flux} > \text{latent heat of vaporization} \& T - T_b \leq \theta_1) \\ h_1 \theta_1 - h_2 (T - T_b - \theta_1) & (\theta_1 < T - T_b \leq \theta_2) \\ h_3 (T - T_b) + q_0 & (\theta_2 < T - T_b) \end{cases} \quad (7)$$

ここでは、 $h_{conv}$  は 800、 $m$  は 0.25、 $h_b$  は 12、 $q$  は熱流束、 $n$  は 0.64、 $T_b$  は 77.3 K、 $h_1$  は 10,000 W/m<sup>2</sup>K、 $h_2$  は 3930 W/m<sup>2</sup>K、 $h_3$  は 200 W/m<sup>2</sup>K、 $q_1$  は 12 K、 $q_2$  は 40 K、 $q_0$  は 2,000 W/m<sup>2</sup> である[4]。

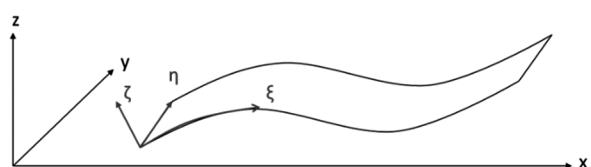


Fig. 1 Schematic diagram of orthogonal curvilinear coordinate system ( $\xi, \eta, \zeta$ ) and Cartesian coordinate system ( $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ ).

### 参考文献

1. 畑山明聖ら:工学・物理のための基礎ベクトル解析, コロナ社, 2009
2. 錢可楨ら:第 96 回 2018 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p15
3. Zermeño V M R and Grilli F, Supercond. Sci. Technol. 27 044025, 2014
4. V. Zubko, et al, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2019

## 熱処理済み MgB<sub>2</sub> 素線で製作した大容量導体で巻き線したパンケーキコイルの基礎特性

### Basic characteristics of MgB<sub>2</sub> pancake coil wound with Rutherford cable using reacted MgB<sub>2</sub> wires

谷貝 剛, 高橋 雅史, 平 萌人, 高尾 智明(上智大学);新富 孝和, 槙田 康博(KEK);平野 直樹(NIFS);

恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研);駒込 敏弘, 塚田 謙一, 濱島 高太郎(前川製作所)

YAGAI Tsuyoshi, Takahashi TAKAO Tomoaki (Sophia University); SHINTOMI Takakazu, MAKIDA Yasuhiro (KEK);

HIRANO Naoki (NIFS); ONJI Taiki, TOMITA Masaru (RTRI); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi,

HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG)

E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

#### 1. はじめに

筆者らは、超電導電力貯蔵装置(SMES)を用いた再生可能エネルギー発電電力の電圧変動を、燃料電池と水電解装置および SMES に補償させる先進超電導電力貯蔵システム(ASPCS)を提案してきた[1]。現在は液体水素との組み合わせでシナジー効果を得るため、臨界温度が 39 K、ありふれた元素で構成される MgB<sub>2</sub> 線材を用いて定格 600 A の大容量ラザフォードケーブルを設計・製作してダブルパンケーキコイル(DPC)を構成、積層することで容量 30 kJ の SMES の製作を進めている。MgB<sub>2</sub> 線材を用いた大容量コイルの製作は、多数本の素線を撚り合わせた導体を構成、さらにそれを巻き線する必要がある。熱処理前後で曲げ歪み感受性の比較的強い MgB<sub>2</sub> 素線を用いて製作するには、曲げ歪みをメーカーが指定する許容値以内に押された設計が必須である。これまで我々は DPC 製作と同時並行で小型の試験用シングルパンケーキ・コイル(SCP)を、最もボリューマーなワインド&リアクト法(W&R)および歪み設計がタイトだが、層間絶縁や電極取り付け等が容易なリアクト&ワインド法(R&W)で設計・製作し、比較することで、大型導体および大容量コイル設計手法の最適化に向けた研究開発を行ってきた。

本講演では、特に熱処理済み素線を用いた R&W 小型コイルの試験結果に焦点を当て、すでに行った W&R 小型コイルの結果と比較することによって、熱処理済み素線を用いた R&W 法 MgB<sub>2</sub> コイルの基礎特性について報告する。

#### 2. MgB<sub>2</sub> 素線とラザフォードケーブルの仕様

MgB<sub>2</sub> 線材は、Columbus 社 12 本フィラメントの熱処理済み F 素線を用いている。MgB<sub>2</sub>/ Cu 比は 10 % / 11 % であり、ラザフォードケーブルは 600 A 定格電流と熱的安定性、さらに導体の撚り易さを考慮して、平角銅マンドレル周囲に 9 本の素線を撚り線したラザフォードタイプの構成を採用した。熱処理済みで脆く、0.24% の許容曲げ歪み以下でコイル巻き線するため、撚りピッチを、450 mm ピッチとし、最大歪みは 0.19% と計算された(Fig. 1)。撚り線ハンドリングによる素線へのダメージを最小限にするため、導体の圧縮は行っておらず、導体絶縁はユーピーリックスをコイル巻き線と一緒に巻き付けた。仕様の詳細を Table 1 に示した[2]。

Table.1 Specifications of MgB<sub>2</sub> strand and Rutherford cable

Strand provided by Columbus Superconductors	
Diameter	1.13 mm
Num. of filament	12
Max. Strain	0.24 %
MgB <sub>2</sub> / Cu Ratio	10 % / 11 %
Rutherford Cable	
Twist pitch [mm]	450 mm
Number of strands	9
Dimension [mm × mm]	5.26 × 3.26 mm
Packing Factor [%]	~100 %

#### 3. 実験系と結果

Fig. 2 は、R&W 小型試験コイルの外観と、測定用素子の配置、さらに背景磁場 5 T まで印加可能なコイル伝導冷却試験装置の概略図である。コイルは電圧タップやヒータが取り付けられ、巻き線後にエポキシで含浸されている。実験は伝導冷却条件下で 19–30 K, 4–5 T の背景磁場中でコイル臨界電流の測定を行い、Ic-B-T 特性の評価を行った。素線数の本数倍を 100 % とした時のコイル Ic は、最小で 10 % 程度まで劣化していることが確認された。これは、W&R 小型コイルと比較すると極めて大きく、曲げ歪みよりもハンドリングの影響が大きいと考えられる。曲げ歪みの理論解析からコイル化工程および試験結果の詳細は講演にて報告する。

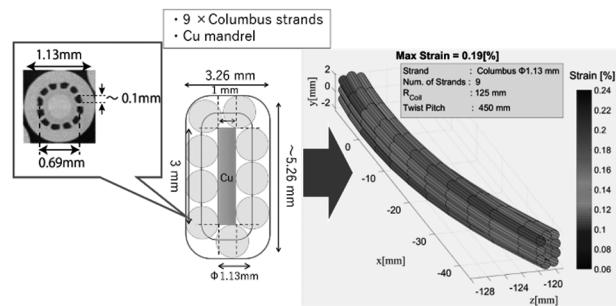


Fig.1 MgB<sub>2</sub> Rutherford type conductor and strain distribution in R&W test coil.

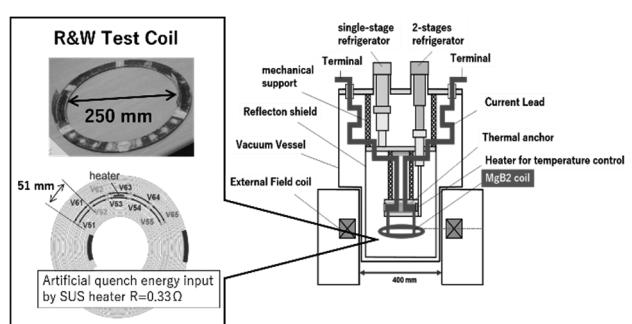


Fig.2 R&W test coil and experimental setup

#### 謝辞

この研究の一部は、JST-ALCA 課題番号 JPMJAL1002 の助成を受けて行われた。実験は鉄道総研の協力の下で行われた。

#### 参考文献

1. T. Hamajima, et al.: IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 22, no.3, June. 2012, Art.no. 5701704.
2. M. Hira, et al.: presented at ISS2019, Kyoto, Poster ID APP4-7

# 超伝導クエンチ検出器のクエンチ検出性能支配因子の検討

## Investigation on Controlling Factors of Quench Detectability of Superconducting Quench Detectors

泊瀬川 晋, 伊藤 悟(東北大); 西島 元(NIMS); 橋爪 秀利(東北大)

HASEGAWA Shin, ITO Satoshi (Tohoku Univ.); NISHIJIMA Gen (NIMS); HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

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

### 1. はじめに

発表者らは、希土類系銅酸化物超伝導(REBCO)コイルのクエンチ検出手法として、分流開始温度を低く設定した超伝導線材をクエンチ検出器として使用する方法を提案している[1, 2]。先行研究では、検出器の検出感度の諸要因(検出器の電気・熱的な物性、検出器-コイル間熱抵抗など)への依存性評価が進められており、その結果を踏まえ、検出感度最大化を目標とした検出器の構造(安定化材材料、安定化材比 $r_{stab}$ )や検査電流条件の最適化方針が検討されている[1, 2]。他方、仮に検出器の検出感度と諸因子の関係式を導出できれば、種々の依存性解析の結果の物理現象と照合した解釈、また検出器の最適な構造の推定が容易となると期待される。しかし、複雑な微分方程式系からの直接の関係式の導出は難しい。そこで本研究では、BuckinghamのΠ定理に基づく次元解析[3]を使い、クエンチ検出感度やその最大化問題の制約条件となる検査電流密度 $j_m$ の制限値と諸因子の関係式の導出を試みた。

### 2. クエンチ検出感度の評価指標

本手法のクエンチ検出感度の最大化問題は、次式で表されるクエンチ検出時刻 $t_d$ の最小化問題と等価とみなせる。

$$t_d = t_{d1} + t_{d2} + t_j \quad (1)$$

$t_{d1}$ はREBCOコイル内ホットスポット発生から検出器内分流開始までの時間、 $t_{d2}$ は検出器内分流開始から検出閾値電圧 $V_d$ の観測までの時間、 $t_j$ は一般に考慮されるクエンチ検出判定時間である。ここで、クエンチ検出後の検出器の焼損を防ぐため、制約条件として $j_m$ に上限値 $j_{mmax}$ を設ける必要がある[2]。本研究では、検出器がコイル内に埋め込まれること、一般に $t_j$ が0.1s以上とされるため、 $j_{mmax}$ を「断熱環境にて、時刻 $t_{d1}+t_{d2}$ から検出器内温度が上限温度 $T_{lim}$ に到達するまでの時間が1.0s以下となる(調整可能な)最大の $j_m$ 」と安全側に定義する。

### 3. 次元解析による考察: $j_{mmax}$ の検出器構造依存性

まずは制約条件となる $j_{mmax}$ と各因子の関係式の導出を目指す。以下、Fig. 1のように運転温度4.2K、自己磁場下で局所欠陥を持つ1ターンのREBCOコイルにNb-Tiクエンチ検出器を設置した体系を仮定する。 $j_{mmax}$ [A/m<sup>2</sup>]の変動因子として、検出器の長手方向の有効熱伝導率 $\kappa$ [W/mK]、有効熱容量 $C_V$ [Ws/m<sup>3</sup>K]、有効導電率 $S$ [A<sup>2</sup>m/W]、時刻 $t_{d1}+t_{d2}$ から検出器内温度が上限温度 $T_{lim}$ (=150K[2])に到達するまでの許容時間 $\Delta T_{lim}$ [s]、検出器超伝導材料の臨界温度 $T_c$ と $T_{lim}$ の差 $\Delta T_{lim}$ [K]、検出器断面積 $A$ [m<sup>2</sup>]を選んだ。以上を用いて、Π定理から次元的に独立な無次元数 $\Pi_1$ 、 $\Pi_2$ を導出すると、 $\Pi_1$ 、 $\Pi_2$ また $j_{mmax}$ を表す式は以下のようになる。

$$\Pi_1 = j_{mmax} (\Delta T_{lim} \Delta t_{lim}^{-1} < C_V S >) ^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\Pi_2 = < \kappa C_V^{-1} > \Delta t_{lim} A^{-1} \quad (3)$$

$$\Pi_1 = f(\Pi_2) \quad (4)$$

$$\therefore j_{mmax} = j_m^* f(\Pi_2) \quad (4)$$

<>は $T_c-T_{lim}$ 間の平均を表す。また、 $(\Delta T_{lim} \Delta t_{lim}^{-1} < C_V S >) ^{1/2}$ を $j_{mmax}$ の基準値と解釈し、 $j_m^*$ と表記した。次元解析の観点からは $\Pi_1$ は $\Pi_2$ の関数となるが、 $j_{mmax}$ に対し相似則が成立することは限らない。故に、今回は $A$ 、 $T_{lim}$ 、 $\Delta t_{lim}$ を固定し、数値解析による $j_{mmax}$ の安定化材材料(Cu<sub>0.9</sub>-Ni<sub>0.1</sub>、Cu)、 $r_{stab}$ 依存性評価の結果から $f(\Pi_2)$ を指数法[3]を元に次式の形で推定した。

$$f(\Pi_2) \doteq p_1 \Pi_2^{p_2} \quad (5)$$

$p_1$ 、 $p_2$ は $\Pi_1$ と $\Pi_2$ の関係から回帰分析によって求まる値である。

本検討では、 $V_d$ 、 $\Delta t_{lim}$ 、 $T_c$ を100mV、1.0s、9.5Kとした。また、安定化材材料はCu、Cu<sub>0.9</sub>-Ni<sub>0.1</sub>、 $r_{stab}$ は0-2とした。

Fig. 2(a)に $\log_{10}(\Pi_1)$ と $\log_{10}(\Pi_2)$ の関係と、 $f(\Pi_2)$ の近似式を示す。最小二乗法による回帰分析の結果、 $p_1=5.45$ 、 $p_2=-0.112$ となった。次に、Fig. 2(b)に $j_{mmax}$ の数値解析結果と $f(\Pi_2)$ の近似式を用いて式(4)から計算した結果の安定化材材料・ $r_{stab}$ 依存性示す。数値解析の結果では、 $j_{mmax}$ は $r_{stab}$ に対し単調に増加し、またCu安定化材の場合の方がCu<sub>0.9</sub>-Ni<sub>0.1</sub>安定化材の場合に比べ $j_{mmax}$ が大きいことがわかる。一方、式(4)から計算した $j_{mmax}$ の値はCu安定化材、Cu<sub>0.9</sub>-Ni<sub>0.1</sub>安定化材の場合で各々相対誤差にして-16.9%→+10.6%，-13.6%→+10.6%で一致している( $r_{stab}=0$ での相対誤差+10.6%)。ここで、式(2)、(3)より、 $j_{mmax}$ の $r_{stab}$ 依存性解析の結果は、高い $r_{stab}$ またはCu安定化材の選択により、検出器長手方向の拡散熱量が増加し、また熱容量と導電率の増加から $j_{mmax}$ の基準値が増加することを表していると考察できる。以上より、次元解析から $j_{mmax}$ の検出器構造依存性の傾向を示す関係式を導くことで、数値解析結果を予測し、考察できる可能性が示された。

### 4.まとめ

本研究では次元解析の手法を応用し、検出感度と諸因子の関係式の導出を試みた。まずは、検出感度の最大化での制約条件となる $j_{mmax}$ に対し関係式を導出し、式の値と数値解析結果を比較した。結果、誤差±17%以下の精度で関係式から $j_{mmax}$ の数値解析結果を予測でき、かつ関係式の形から、 $j_{mmax}$ の検出器構造依存性の傾向を考察できる可能性が示された。発表会当日では、 $j_{mmax}$ と各因子の関係のより詳細な考察、また $t_{d1}$ 、 $t_{d2}$ に関する諸関係式についても報告する。

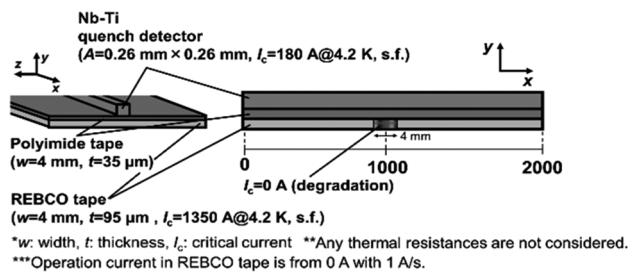


Fig. 1 Assumed model for the sensitivity analysis of  $j_{mmax}$

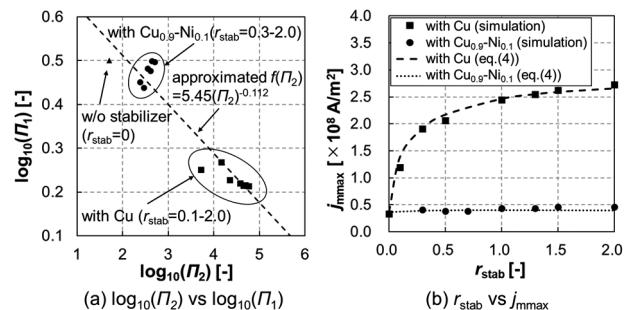


Fig. 2 Result of the calculations

### 参考文献

- [1] S. Hasegawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (2018) 4700605
- [2] S. Hasegawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) 9001305
- [3] E. Buckingham, Phys. Rev., Vol. 4 (1914) pp. 345-376

# 導電性樹脂を用いた MRI 向け高温超電導マグネット(1)

## —開発概要—

HTS MRI magnet equipped with electrically conductive epoxy resin for quench protection  
-Development overview-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 草野 貴史, 伊藤 智庸, 野村 俊自(東芝エネルギーシステムズ); 石井 宏尚(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi, ITO Toshinobu,

NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions); ISHII Hirotaka (Toshiba)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

高温超電導コイルの熱暴走による焼損を防止する方法として、パンケーキコイル側面に塗布した導電性樹脂を用いてターン間を短絡させ、異常時には、導電性樹脂を介して電流を迂回させる方法を開発している[1]。これまで本手法を適用した複数のパンケーキコイルで過電流試験を実施し、熱暴走による焼損を回避できることを段階的に確認してきたが、実機への適用に向けては、より蓄積エネルギーが高いコイルでの検証が重要となる。また、励磁時に電流が導電性樹脂に迂回することによる励磁遅れもインダクタンスが大きくなるほど顕著になってくるため、導電性樹脂を塗布したパンケーキコイルで構成された高温超電導 MRI マグネットを試作し、コイルの熱的安定性や磁場安定度の評価を行う。本講演では、マグネット開発状況について報告する。

### 2. MRI 向け高温超電導コイル設計

線材幅 4 mm、線材厚 0.15 mm の REBCO 高温超電導線材を使用したシングルパンケーキコイルを組み合わせて MRI 磁石に要求される均一磁場を発生可能なコイル配置を検討した。前提条件として、コイル内径  $\phi 500$  mm、コイル数 3 対(6 ユニット)、均一磁場空間 200 mm DSV、中心磁場 5 T、運転電流値 300 A 以下とした。シングルパンケーキのターン数、シングルパンケーキを積層した各コイル間距離をパラメータとして、空間磁場分布を計算し、不整磁場が極小となるコイル配置を導出した。コイル配置およびコイル諸元を Fig.1 および Table1 に示す。外径が異なる 3 種類のシングルパンケーキ 100 枚で構成され、均一度は 200 mm-DSV にて 1.8 ppm(VRMS)および 24 ppm(peak to peak)となった。使用線材長は 31 km であり、インダクタンスは 91 H である。実際にコイルを試作する前に、要素コイルによる検証や解析による評価を実施した。

### 3. 要素コイルの過電流通電試験(2A-p02)

要素コイルによる検証として、Table1 に示した高温超電導 MRI マグネットのパンケーキコイルのうち、外径が最も大きい内径 500 mm、外径 591 mm、217 ターンの 2 積層コイルを試作し、伝導冷却中にて過電流通電試験を実施した。コイル温度 40 K で電流密度 347 A/mm<sup>2</sup>において、熱暴走直前に中心磁場が約 0.2%低下し、電流が導電性樹脂に迂回する現象が確認され、コイル保護方式の有効性を確認した。

### 4. 積層コイルの保護解析(2A-p03)

開発中の高温超電導 MRI コイルはインダクタンスが 91 H 蓄積エネルギーも 2.6 MJ と、これまで試作、評価してきたコイルに比べて非常に大きくなる。そこで、事前に解析により導電性樹脂によるコイル保護が有効かどうかを検証した。回路解析、熱解析、磁場解析を組み合わせた解析コードを構築し、ユニットコイルの中で最も負荷率が高い#3 コイルを対象として解析を実施した。電源電流 238.6 A、初期温度 20 K の状態からコイル冷却端の温度が 100 K へ上昇した場合の、電流迂回

挙動を解析した。コイル温度が 44 K まで上昇する間に、コイル周方向電流は 11%まで減少する挙動がみられ、電源遮断によりコイル保護が可能であることを確認した。

### 5. パンケーキコイル試作、およびクライオスタット製作状況(2A-p04)

要素コイルおよび解析の検証結果を踏まえ、内径 500 mm でターン数、外径が異なるパンケーキコイルを、それぞれ 6 積層、16 積層、28 積層した 3 種類のユニット、各 2 対からなる MRI 向けの REBCO コイルを試作した。パンケーキコイルは、液体窒素中での通電試験で全 100 個に特性劣化が無いことを確認した。ユニットコイル完成後、マルチコイル化し、クライオスタットへの組み込み作業を実施中である。

### 6. まとめ

導電性樹脂によるコイル保護機能を備えた高温超電導 MRI 磁石の開発を進めている。最適コイル配置設計を実施し、不整磁場を極小とするコイル配置を決定した。また、要素コイルおよび解析によりコイル保護可能などを事前に確認した。100 枚のシングルパンケーキを完成し、良好な超電導特性を有していることを確認後、マルチコイル化した。クライオスタットへの組み込み完了後、試験を実施予定である。

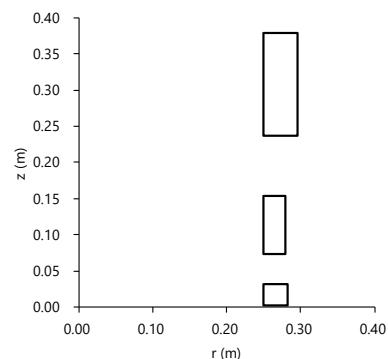


Fig.1 Two-dimensional axisymmetric drawing of coil positions

Table1 Specifications of coils

Coil	#1	#2	#3
Inner diameter	mm	500	500
Outer diameter	mm	565	559
Turns/pancake	turn	156	140
Number of pancakes		6	16
Operating current	A	238.6	238.6
Current density	A/mm <sup>2</sup>	277.1	277.1

### 参考文献

1. H. Miyazaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. No. 4602805.

## 導電性樹脂を用いた MRI 向け高温超電導マグネット(2) —要素コイルの過電流通電試験—

HTS MRI magnet equipped with electrically conductive epoxy resin for quench protection (2)  
—Over-current tests of stacked REBCO coils—

石井 宏尚(東芝)；宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 草野 貴史, 伊藤 智庸, 野村 俊自(東芝エネルギー・システムズ)  
ISHII Hirotaka (Toshiba); MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi,  
ITO Toshinobu, NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions)  
E-mail: hirotaka2.ishii@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

導電性樹脂によるコイル保護機能を備えた高温超電導MRIマグネットの開発を進めている。高温超電導コイルが熱暴走する前に、導電性樹脂を介してターン間に電流を迂回させる方式で、本保護方式の有効性を要素コイルで事前検証した。これまで小型のパンケーキコイルやより蓄積エネルギーが高い、内径 501 mm、外径 567 mm、156 ターンのシングルパンケーキコイル 6 枚を積層した 6 積層コイルにおいて本手法の有効性を検証してきた。製作中の高温超電導MRIマグネットのパンケーキコイルのうち、最大サイズは内径 501 mm、外径 593 mm、217 ターンで、これまで検証したパンケーキコイルより導電性樹脂の塗布面積が約 1.4 倍大きい。そのため導電性樹脂の塗り斑など作製上の課題および保護性能の検証を行った。本発表では、積層数を 2 とした要素 REBCO コイルを試作し、伝導冷却下で過電流通電試験を実施した結果について報告する。

### 2. 導電性樹脂を塗布した 2 積層コイル試作

2 積層コイルの諸元を Table 1 に示す。REBCO 超電導線材と離形処理したポリイミドテープを共巻し、シングルパンケーキコイルの片側に導電性樹脂を塗布した。シングルパンケーキの両面は FRP シートで絶縁した。液体窒素中で通電評価を行った結果、コイル#1、2 の n 値は共に 27 となり、超電導特性の健全性を確認した。電流遮断試験を実施し、コイル中心磁場の減衰定数から見積もったターン間抵抗値は 27、29  $\mu\Omega$  となった。上記 6 積層コイルの各パンケーキコイルのターン間抵抗値 12~37  $\mu\Omega$  と同程度で、コイル側面に塗布した導電性樹脂の良好な導電性が確認された。またコイル#1 については 5 回冷昇温を繰り返すヒートサイクル試験を行い、都度 VI 特性の評価を実施し、超電導特性に変化がないことを確認した。2 積層コイルは内周に取り付けた金属板でシングルパンケーキコイルを電気的に接続している。今回、電流密度が高い状態で導電性樹脂の有効性を検証するため、伝導冷却下で通電試験を実施した。

### 3. 伝導冷却試験

2 積層コイルを伝導冷却試験装置に組み込み、冷凍機 2 段ステージに取り付けたヒータにより、コイル温度を制御し、過電流通電試験を実施した。通電電流、コイル電圧、コイル中心磁場を測定して算出したコイル周方向に流れる電流 ( $I_\theta$ ) をモニタした。コイル電圧が急激に上昇し、クエンチ検出器が動作して、電源が遮断するまで通電した。クエンチ検出器の動作電圧は電流密度の低い 60 K では 0.5 V、電流密度の高い 40 K では 0.1 V、検出後遮断するまでの時間は 0.1 s に設定した。60、40 K の通電試験結果を Fig. 1、2 に示す。60 K では 148.3 A 通電時にコイル#1 の電圧が、40 K では 299.7 A 通電時にコイル#2 の電圧が徐々に上昇し、電源が遮断した。遮断動作前に、中心磁場が 60 K では約 1.0%、40 K では約 0.2% 低下し、電流の導電性樹脂への迂回が観測された。コイル#1、2 の温度は遮断動作から 30 s 後に 60 K では 66、65 K

まで、40 K では 77、50 K まで上昇した。40 K では遮断動作から 1.6 s 後に  $I_\theta$  が急激に低下し、消磁に至った。遮断動作後に大きな発熱が確認されたが、再度通電試験を実施し、コイル n 値の低下がないことを確認した。

### 4. まとめ

製作中の高温超電導MRIマグネットの中で最大サイズのパンケーキコイルを 2 枚積層した 2 積層コイルを作製し、これまでのコイルと同様に液体窒素試験にて超電導特性の健全性が確認できた。伝導冷却下で過電流試験を実施し、コイル温度 40 K で電流密度 347 A/mm<sup>2</sup> において、熱暴走直前に中心磁場が約 0.2% 低下し、電流が導電性樹脂に迂回する現象が確認された。また、過電流試験前後でコイル n 値の低下がないことが確認され、塗布面積が増大した場合でも導電性樹脂を用いたコイル保護方式が機能することを確認した。

Table 1 Specifications of a stacked REBCO pancake coil

Tape width	4.1 mm
Tape thickness	0.15 mm
Inner diameter	501 mm
Outer diameter	593 mm
Height	9.9 mm
Turns per single pancakes	217
Number of pancakes	2
Inductance	0.21 H

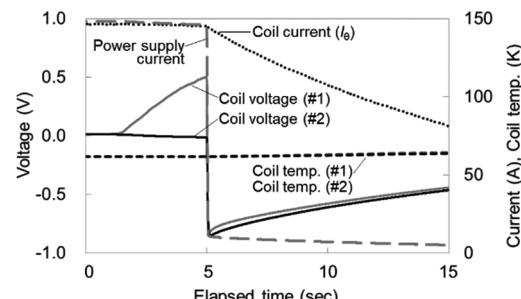


Fig. 1 Over-current test of a stacked REBCO pancake coil with electrically conductive epoxy resin at 60 K.

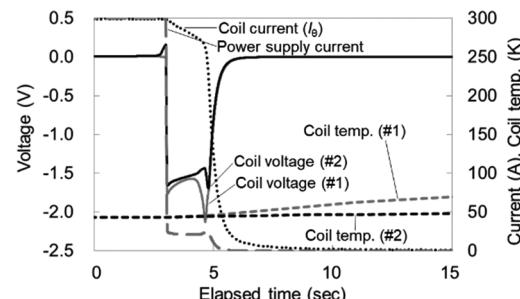


Fig. 2 Over-current test of a stacked REBCO pancake coil with electrically conductive epoxy resin at 40 K.

## 導電性樹脂を用いた MRI 向け高温超電導マグネット(3) —積層コイルの保護解析—

HTS MRI magnet equipped with electrically conductive epoxy resin for quench protection (3)

### —Simulation results of the over-current test of a stacked REBCO pancake coil—

宇都 達郎, 宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 草野 貴史, 伊藤 智庸, 野村 俊自(東芝エネルギーシステムズ); 石井 宏尚(東芝)

UTO Tatsuro, MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, KUSANO Takashi, ITO Toshinobu,

NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions); ISHII Hirotaka (Toshiba)

E-mail: tatsuro1.uto@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

開発中の MRI マグネットにおける、導電性樹脂への電流迂回挙動を確認するために、回路解析、熱解析、磁場解析を組み合わせた解析コードを構築した。本講演では、熱暴走する要因の一つとして冷凍機の停止を想定し、通電中にコイル冷却端の温度が上昇した場合の電流迂回挙動を解析した結果を報告する。

### 2. 簡略化モデルによる簡易解析

本解析コードのフローチャートは Fig.1 に示すように、回路解析、熱・磁場解析、 $I_c$  計算を順に繰り返すサイクルとした。計算時間短縮のため、解析モデルは軸対称とし、負荷率が最も高くなる軸方向端部のパンケーキ(coil1)はターンごとに、残りのパンケーキはコイルごとに、抵抗とインダクタンスからなる閉回路としてモデル化した(Fig.2)。

### 3. 電流迂回挙動解析結果

MRI マグネットを構成する 6 つのユニットコイルの内、最も負荷率が高くなる 28 積層ユニットコイル(Table1)について、電源電流 238.6 A、コイル温度 20 K の状態から、コイル冷却端のみが 100 K へ上昇した場合の coil1 における電流迂回挙動を解析した。導電性樹脂を塗布していない通常のコイルについては Fig.3、導電性樹脂を塗布したコイルについては Fig.4 に結果を示す。コイル温度は最内周における値であり、コイル周方向電流  $I_\theta$  は中心磁場から換算した値である。Fig.3 において、冷却端からの熱侵入によりコイル温度は 20K から上昇していき、コイル温度 32 K となる  $t=50$  sec にてコイル電圧の上昇がみられた。その後、コイル電圧の上昇と共にコイル温度が急上昇し、 $t=70$  sec 付近で熱暴走に至った。一方、Fig.4 では電圧の上昇に伴い周方向電流  $I_\theta$  が減少し、導電性樹脂への電流迂回が確認された。コイル温度の上昇は Fig.3 と比較して緩やかとなり、 $t=70$  sec にてコイル温度 36 K と熱暴走を回避した。その後、 $t=100$  sec にてコイル温度が 44 K まで上昇する間に周方向電流  $I_\theta$  は減少し続け、約 11 % が導電性樹脂へ迂回した。この間、コイル発生電圧は約 0.5 V まで緩やかに上昇しており、熱暴走する前に電源を遮断し、コイルを保護することが可能であると考えられる。

### 4.まとめ

試作中の高温超電導 MRI マグネットを対象に、電源電流 238.6 A 一定、初期温度 20 K の状態からコイル冷却端の温度が 100 K へ上昇した場合の、電流迂回挙動を解析した。導電性樹脂を塗布しない通常のコイルでは、コイル電圧の上昇と共にコイル温度が急上昇し熱暴走した。一方、導電性樹脂を塗布したコイルでは、周方向電流が導電性樹脂に迂回すると共にコイル温度上昇が抑制され、クエンチディテクタで十分検知できるレベルまでコイル電圧が緩やかに上昇する結果となった。以上より、導電性樹脂によるコイル保護の有効性を解析にて確認できた。

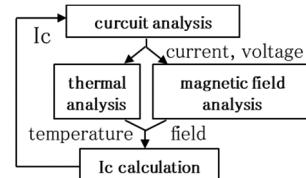


Fig.1 The flowchart of the simulation.

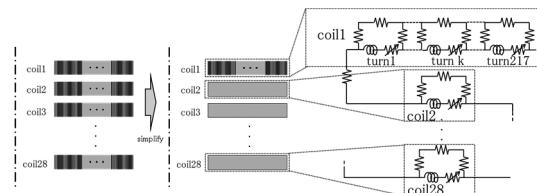


Fig.2 The schematic drawing and the equivalent circuit of the stacked pancake coil.

Table1 Specifications of a stacked REBCO pancake coil.

Tape width	4.1 mm
Tape thickness	0.15 mm
Inner diameter	500 mm
Outer diameter	591 mm
Turns per single pancake	217
Number of pancakes	28

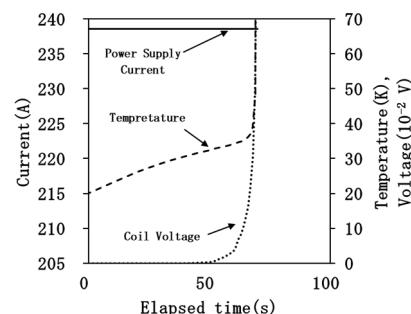


Fig.3 Simulation result of the heating test of the stacked REBCO pancake coil.

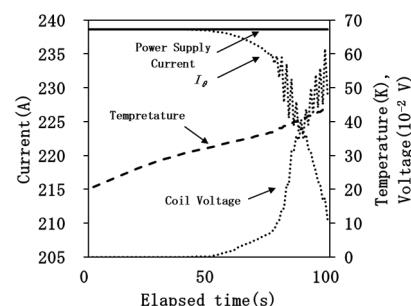


Fig.4 Simulation result of the heating test of the stacked REBCO pancake coil with electrically conductive epoxy resin.

## 導電性樹脂を用いた MRI 向け高温超電導マグネット(4) —パンケーキコイル試作、およびクライオスタット製作状況—

**HTS MRI magnet equipped with electrically conductive epoxy resin for quench protection (4)**  
**—Fabrication status of pancake coils and a cryostat—**

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 宇都 達郎, 草野 貴史, 伊藤 智庸, 野村 俊自(東芝エネルギーシステムズ); 石井 宏尚(東芝)

IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi, ITO Toshinobu,

NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions); ISHII Hirotaka (Toshiba)

E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

導電性樹脂によるコイル保護機能を備えた高温超電導MRI マグネットの開発を進めている。本発表では、要素コイルの検証結果を踏まえ、内径が約 500 mm でターン数、外径が異なるシングルパンケーキコイルを、それぞれ 6 積層、16 積層、28 積層した 3 種類のユニット、各 2 対からなる MRI 向けの REBCO マルチコイルを試作した。本発表では、合計 100 個のシングルパンケーキコイルについて液体窒素中での通電試験を実施し、コイル化による特性劣化の有無を評価した結果、また、各パンケーキにターン間の電流の迂回路として塗布した導電性樹脂が、巻線部の REBCO 線材に電気的に接続されているか調べるため、遮断試験により、ターン間抵抗を評価した結果について報告する。

### 2. コイル諸元、および試作

試作したシングルパンケーキコイルの諸元を Table. 1 に示す。4 mm 幅の REBCO 線材と、劣化対策としてテフロンコーティングによる離形処理を施したポリイミドテープを共巻した。また、シングルパンケーキコイルの片面には、フラックスフロー抵抗が発生した際の電流の迂回路として平均厚さ 0.14 mm の導電性樹脂を塗布した。センター、ミドル、エンドの 3 種類ユニット、各 2 対で構成され、各ユニットで内径は 501.5 mm で同一であるが、ターン数、外径が異なる。なお、REBCO 線材は、厚さが 0.01 mm 程度の寸法公差を持つため、不整磁場の低減を目的として、巻線時、外径を設計寸法に合わせるため、10 ターン毎にポリイミドテープの量を調整しており、外径の寸法誤差は 0.4 mm 以下であることを確認した。

### 3. シングルパンケーキコイル通電試験、遮断試験結果

試作した全 100 個のシングルパンケーキコイルについて液体窒素中で通電試験を実施した。高電界領域では導電性樹脂に電流が迂回するため、 $10^{-9}$  V/cm から  $10^{-8}$  V/cm の低電界領域の V-I 特性からコイル n 値を算出した。結果を Fig. 1 に示す。コイル n 値は 23~37 で、試作した全パンケーキの超電導特性に劣化が無いことを確認した。また、遮断試験により、コイル中心磁場の減衰時定数からターン間抵抗を見積もった結果、ユニット#A で 12~37  $\mu\Omega/\text{turn}$ 、ユニット#B で 12~33  $\mu\Omega/\text{turn}$ 、ユニット#C で 22~59  $\mu\Omega/\text{turn}$  を得ており、全パンケーキのターン間が電気的に接続されていることを確認した。

試験後、100 個のパンケーキをそれぞれ 6 積層、16 積層、28 積層して、3 種類のユニット、各 2 対を試作した。さらに、これらを、不整磁場を極小化するための最適コイル配置設計に基づき組み合わせ、Fig. 2 に示す MRI 向けの REBCO マルチコイルを完成させた。

### 4. まとめ

要素コイルの検証結果を踏まえ、合計 100 個のシングルパンケーキコイルを試作し、3 種類のユニット、各 2 対からなる MRI 向けの REBCO マルチコイルを試作した。全てのパンケーキに超電導特性に劣化が無いこと、また、ターン間が電気

的に接続されていることを確認した。現在、伝導冷却用のクライオスタットの製作を進めている。完了後、励磁試験を実施予定であり、はじめに均一磁場の発生を検証していく。

Table 1 Specifications of single pancake coils

Unit No.	#A(Center)	#B(Middle)	#C(End)
Tape width (mm)	4.1	4.1	4.1
Tape thickness (mm)	0.15	0.15	0.15
Tape length /pancake	261	233	372
I.D. (mm) at r.t.	501.5	501.5	501.5
O.D. (mm) at r.t.	567.0	560.3	592.6
Turns / pancake	156	140	217
Number of pancakes	6×2	16×2	28×2

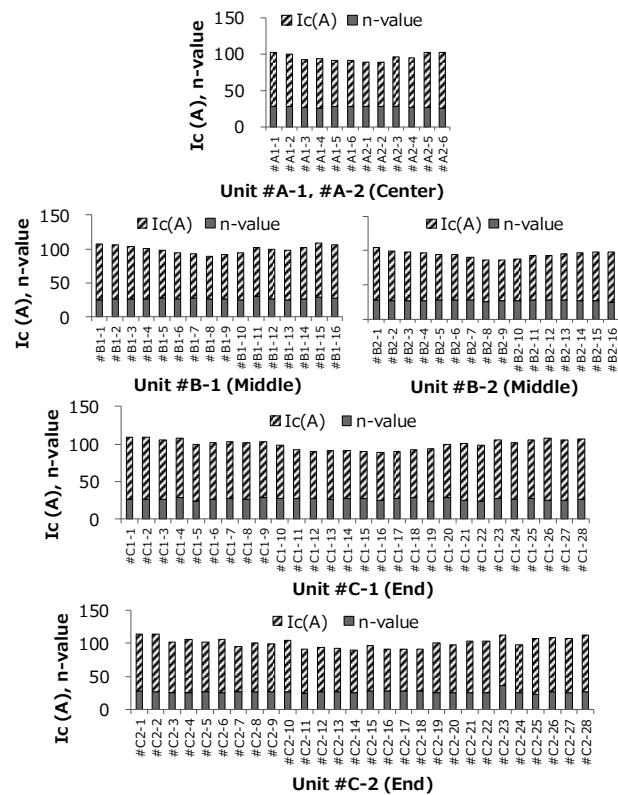


Fig. 1 Coil Ic(77K, s.f.) and n-value of single pancake coils for unit #A (Center), #B (Middle), #C (End).

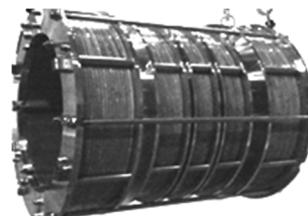


Fig. 2 Photograph of a REBCO multi coil for MRI magnet equipped with electrically conductive epoxy resin.

## 電源駆動による MRI の磁場安定性評価

### Magnetic field stability evaluation of power supply driven MRI

内田 勇斗, 北田 悟史, 白井 康之(京大); 横山 彰一, 三浦 英明(三菱電機)

UCHIDA Hayato, KITADA Satoshi, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.);

YOKOYAMA Shoichi, MIURA Hideaki (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: uchida@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

低温超電導(LTS)MRI マグネットに替わって、供給リスクの伴う液体 He を用いずに運用可能な高温超電導(HTS)MRI マグネットの開発が期待されている。

HTS-MRI マグネットを用いて時間的、空間的に安定した磁場を作るにはいくつかの問題がある。主な問題はコイルに誘導される遮蔽電流の減衰に伴う磁場変動である。遮蔽電流の影響は永久電流モードによる運用においても無視できないため、電源駆動による電流の補償が提案されている[1]。しかし、電源の安定度が磁場に直接影響を及ぼすため、高安定な電源が要求される。

本研究では、制御方式の異なる 3 種類の電源を用いて LTS-MRI を励磁し、磁場の安定性と電力損失を評価した。

#### 2. 実験装置

実験にはドロップ制御定電流電源、スイッチング制御定電流電源、それらの制御方式を組み合わせた高安定電源システムの 3 種類を使用した。高安定電源システムは励消磁用電源と電流保持用電源から成り、それらを切り替えて運用することにより、消費エネルギーの削減と出力電流の高安定化が可能である。

#### 3. 実験概要

各電源で LTS-MRI(114H)を 224.3A(1.5T)まで 0.07A/sec で励磁した後、3 時間保持し、中心磁場を NMR プローブで測定した。また、0A から 224.3A まで 10A ごとに 1 分間電流をホールドし、パワーアナライザーを用いて電力損失を測定した。消費電力は 200V 三相交流の入力電力と出力電力の差によって求めた。Fig.1 に実験回路図を示す。

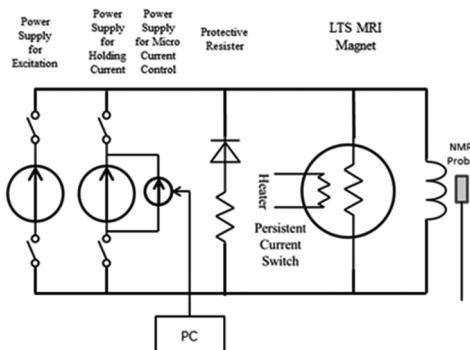


Fig.1: Circuit diagram of LTS-MRI

#### 4. 結果と考察

Fig.2 に各電源の電流変動を、Fig.3 に磁場変動を示す。

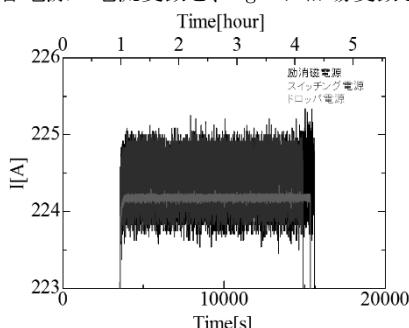


Fig.2: Current stability

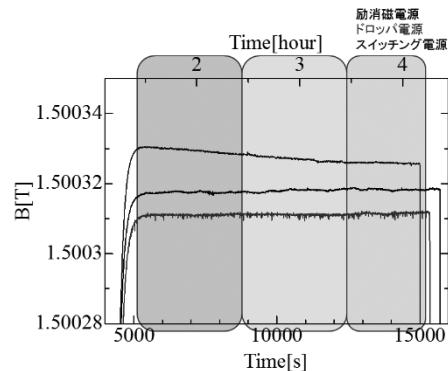


Fig.3: Magnetic field stability

励磁完了から 1 時間後までを領域 I 、1 時間後から 2 時間後までを領域 II 、2 時間後から 3 時間後までを領域 III とすると各電源の磁場安定度(ppm/hour)は、Table 1 のようになった。

Table 1: Magnetic field stability

	領域 I	領域 II	領域 III
ドロップ	1.53	1.66	1.59
スイッチング	1.60	2.07	0.733
励消磁電源	0.93	1.06	0.73

いずれの電源においても MRI の鮮明なイメージングに必要とされる 1ppm/hour 以下、あるいはそれに近い安定度を得ることができた。

次に、各電源の電力損失比較を Fig.4 に示す。224.3A における電力損失は、ドロップ電源、スイッチング電源、励消磁電源、保持電源の順にそれぞれ 5644W、900W、2846W、1884W となった。高安定電源システムにおいて励消磁用と電流保持用に電源をわけることで約 1000W の削減ができた。また、スイッチング電源の電力損失は保持電源の約半分、ドロップ電源の約 1/6 に抑えることができた。

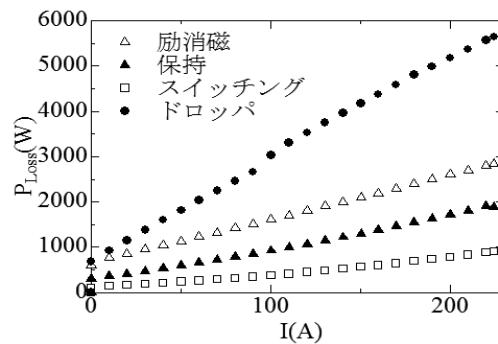


Fig.4: Power Loss

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

#### 参考文献

- [1] M.Yoshikawa et al: IEEE Transactions on Applied Superconductivity ( Volume: 26 , Issue: 3 , April 2016 )

## 三元系ブロンズ合金を用いた内部補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界電流特性における 圧縮応力依存性

Compressive stress dependence on the critical current property of the internal reinforced  
Nb<sub>3</sub>Sn multifilamentay wires using various ternary bronze alloys

菱沼 良光 (核融合研); 小黒 英俊 (東海大); 谷口 博康 ((株) 大阪合金工業所); 淡路 智 (東北大金研); 菊池 章弘 (物材機構)  
HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); TANIGUCHI Hiroyasu (OAW); AWAJI Satoshi (IMR, Tohoku Univ.);  
and KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

取扱が易く高強度特性を有する Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発を目的に、三元系ブロンズからの固溶強化による内部マトリックス強化を検討している。前報までに Zn 及び In を固溶した Cu-Sn-Zn 及び Cu-Sn-In 系について検討し、Zn 及び In は Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理後の母材中に均質に残存し、(Cu,Zn)及び(Cu,In)固溶体を形成することで母材硬度の増加及び引張強度の向上を示し、内部強化の可能性が明らかになった。

そこで、本研究では種々の三元系ブロンズ合金を用いた内部補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の大容量撚線導体を想定した場合に重要な因子である臨界電流特性における圧縮応力依存性を評価し、種々の三元系ブロンズ合金の効果について報告する。

### 2. 実験方法

本研究で評価した三元系ブロンズ合金を用いた内部補強線材は、Cu-10Sn-5In-0.3Ti (5.0In)、Cu-14Sn-2In-0.3Ti (2.0In) 及び Cu-10Sn-10Zn-0.3Ti (10Zn) の 3 組成を用意した。また、比較としての通常のブロンズ法線材 (16Sn) も用意した。これらの極細多芯線材について、550°C × 100h + 650°C × 100h の 2 段生成熱処理を行った。

熱処理後の臨界電流測定は東北大金研強磁場超伝導材料研究センターにある圧縮応力印加プローブを用いて、4.2K @ 15T の条件で直流四端子法にて測定した。Fig.1 に圧縮応力印加プローブにおける試料セットアップの様子を示す。試料は 45mm で切断し、両端の電流導入 Cu 電極及び電圧タップをそれぞれハンド付けした。その後、GFRP 製の突起部を有する圧縮応力印加治具を電圧端子間に接触するように取り付けた。GFRP 製の突起部が線材を押すように移動することで線材に圧縮応力が印加される機構になっている。線材に印加される圧縮荷重(N)を共和電業製の 1kN ロードセルにて測定し、印加される圧縮応力は圧縮荷重を線材と GFRP 製の突起部との接触面積(GFRP 製突起部の接触幅(3mm) × 線材直径)で除した値とした。また、臨界電流のクライテリオンを 1 μV/cm の電圧発生とした。

### 3. 実験結果

通常のブロンズ法線材において、約 30 MPa の圧縮応力の印加から、明確な臨界電流特性の劣化が確認され、100 MPa の応力では無負荷と比較して 80% の臨界電流特性となった。この傾向は、以前の報告と同様の傾向が観察された[1]。Fig.2 に 5.0In 試料における圧縮応力印加前後の I-V 曲線を示す。100 MPa の圧縮応力を印加しても、ほとんど臨界電流特性の劣化が観察されなかった。以前の報告では、CuNb 補強線材においては 100 MPa の圧縮応力で無負荷と比較して約 95% の臨界電流特性を示していた[1]。以上のことから、三元系ブ

ロンズ合金による内部補強は、圧縮応力印加に対して大きな耐性を示し、CuNb 補強よりも良好な結果となった。これは、硬度の高い固溶体が Nb<sub>3</sub>Sn 相の周囲に囲むように形成しているためと考えられる。本発表では、Cu-Sn-Zn 系と Cu-Sn-In 系との比較についても報告する予定である。

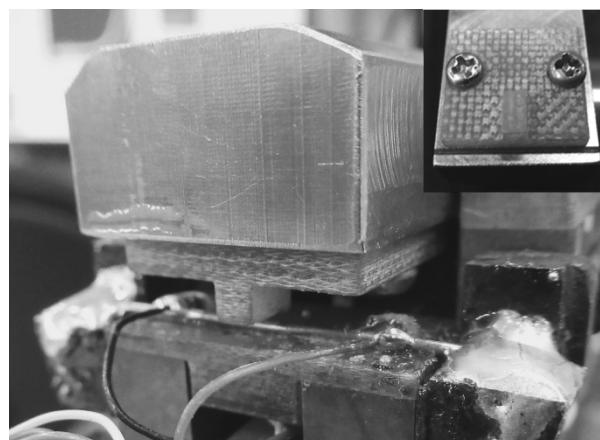


Fig. 1 The sample set-up on the critical current measurement with the transverse compressive stress.

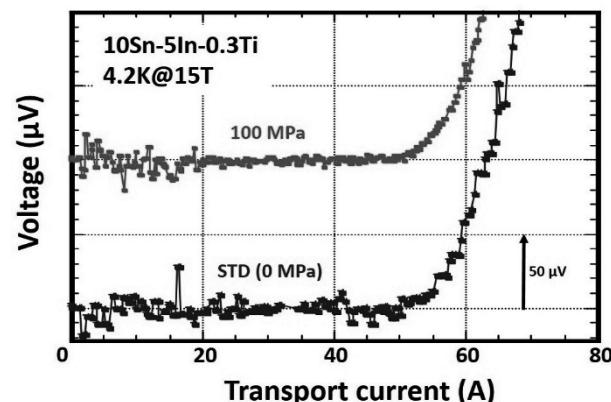


Fig. 2 I-V curves of the 5.0In sample at 4.2K and 15T with the compressive stress of 0 MPa (un-loading) and 100 MPa.

### 謝辞

本研究は、NIFS 核融合工学プロジェクト(UFFF036-1)、NIFS 一般共同研究(NIFS16KECF017)、及び科研費(基盤(B)16H04621)の支援を受けた。また、東北大金研強磁場センターとの共同研究にて実施された。

### 参考文献

- [1] K. Watanabe et al., AIP Conference Proc., 1574, p.186-p.191, (2014)

## Nb-Ta-Hf と Cu-Sn との拡散反応による Nb<sub>3</sub>Sn 層の生成

### Nb<sub>3</sub>Sn layer formation through the diffusion reaction between Nb-Ta-Hf and Cu-Sn

伴野信哉(物材機構); 森田太郎(上智大, 物材機構); 谷貝剛(上智大)

BANNO Nobuya (NIMS); MORITA Taro (Sophia Univ., NIMS); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

#### 1. 緒言

Nb-Ta に Hf を添加することで、高い  $B_{c2}$  を維持したまま、Nb<sub>3</sub>Sn 結晶粒を微細化し、Layer  $J_c$  が大きく改善されることが報告され、注目を集めている[1]。本研究では、Nb-4Ta-1Hf の硬度、焼鈍条件の影響、加工性等の伸線加工の上で必要な基礎特性を調査した。次いで、Nb-4Ta-1Hf/Cu/Sn で構成される単層の拡散対構造を持つ内部スズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 試料を試作し、Nb<sub>3</sub>Sn 結晶組織を SEM、EDX、EBSD 等の微細組織観察を通じて調べたので報告する。

#### 2. 実験方法

Nb-4at%Ta-1at%Hf 合金は、アーク溶解により作製した。特に Ta は融点が 3000°C を超える高融点金属であり、元素が完全に混ざり合うように十分電流値を上げる必要がある。溶解バルクを真空中 1200°C で溶体化処理した後、溝ロール、スエージング、圧延加工により組み込みロッド及び EBSD 試料を作製した。

この Nb-4Ta-1Hf ロッドを焼鈍し、ビックカース硬度の熱処理温度依存性を測定すると共に、電子線後方散乱回折 (EBSD) により結晶方位マップを観測した。比較のため、他に準備した Nb、ならびに Nb-1at%Hf のビックカース硬度も測定した。

これらのロッドを用いて、以下の通り、3 種類の単層拡散対構造 Nb<sub>3</sub>Sn 前駆体線材を試作した。加工前、Nb は 800°C、Nb-1Hf は 900°C、Nb-4Ta-1Hf は 1000°C で焼鈍した。

1. Nb / Cu / Sn-3.88Ti (at%)
2. Nb-4Ta-1Hf / Cu / Sn (at%)
3. Nb-1Hf / Cu / Sn-3.88Ti (at%)

これらの試料の伸線加工性、Nb<sub>3</sub>Sn 結晶粒径・層厚、Layer  $J_c$  について調べた。Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理は 460°C × 100h → 660°C × 100h → 715°C × 100h で行った。

#### 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に各合金のビックカース硬度の温度変化を示す。Fig. 2 には、圧延 Nb-4Ta-1Hf テープの 800°C、および 1000°C 热処理後 (3h) の EBSD 結晶方位マップを示す。EBSD 結果によれば、1000°Cあたりから再結晶が開始され、1100°C × 3h で結晶粒径は 2, 30 μm 程度に粒成長した。

Fig. 3 は、Nb-1Hf ならびに Nb-4Ta-1Hf 線材試料の断面写真である。Nb-1Hf 線材は良好な伸線加工性を示したが、Nb-4Ta-1Hf 線材は断面が非常に不均一であった。その原因として、Nb-Ta-Hf ロッドの結晶粒径のばらつき、組成の不均一、1000°Cの焼鈍温度が不十分であったことなどが考えられる。

Fig. 4 に Nb-4Ta-1Hf 線材試料の Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理後の結晶組織を示す。画像解析を通じて求めた結晶粒径は 160nm 程度であり、Nb 線材試料の 200nm に比して微細化されていることが確認された。さらに結晶組織には、粒界にナノ粒子が析出していることも確認された。結晶粒微細化には、こうした粒子によるツェナーピンニング効果も期待できる。

1. S. Balachandran et al., Supercond. Sci. Technol. **32** (2019) 044006

本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04249 の助成を受けたものです。

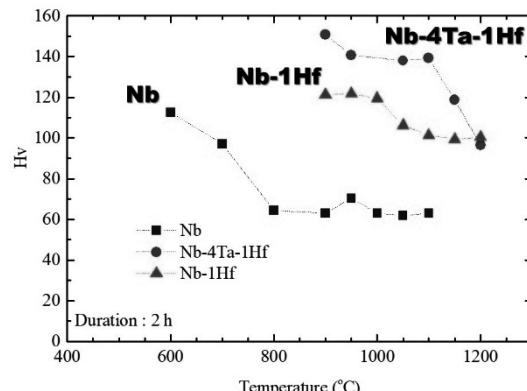


Fig.1. Vickers hardness of Nb, Nb-1Hf and Nb-4Ta-1Hf vs. heat-treatment temperature.

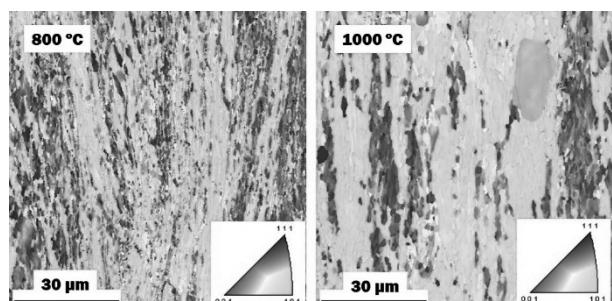


Fig.2. EBSD orientation maps for Nb-4Ta-1Hf heat-treated at 800 °C x 3 h and 1000 °C x 3 h.

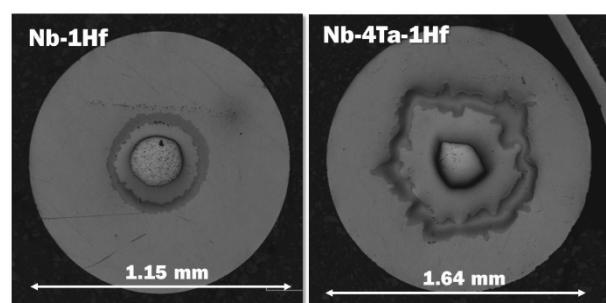


Fig.3. Cross-sections of Nb-1Hf and Nb-4Ta-1Hf composite wires.

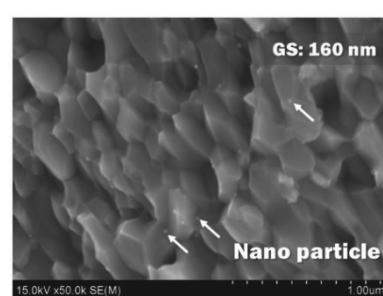


Fig.4. FESEM image of Nb<sub>3</sub>Sn layer formed in Nb-4Ta-1Hf composite sample after the final heat treatment at 715 °C x 100 h.

## Sn-Zn/Cu-Ti/Nb 拡散対構造を用いた内部スズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材における 微細組織と超伝導特性

Microstructure and superconducting characteristics of internal tin Nb<sub>3</sub>Sn wire  
with Sn-Zn/Cu-Ti/Nb diffusion pair structure

森田 太郎 (上智大学, NIMS), 谷貝 剛 (上智大学); 伴野 信哉 (NIMS)  
MORITA Taro (Sophia Univ., NIMS), YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); BANNO Nobuya (NIMS)  
E-mail: morita0079@eagle.sophia.ac.jp

### 1. はじめに

近年, Nb<sub>3</sub>Sn 線材における微細組織制御の研究が世界中で精力的に行われている。例えば Nb-Ta-Hf を Nb 芯として用いることによって Nb<sub>3</sub>Sn 結晶組織の微細化に成功したなどが報告されている [1]。本研究では、Cu 母材層の組織制御による Nb<sub>3</sub>Sn 成長促進の観点から、新しい微細組織制御の開拓を進めている。ここでは Zn 添加、Ti 添加の方法について議論する。

Ti 添加はブロンズ法において高磁界特性を向上させる添加元素として知られている。ある研究結果によれば、Cu 母材側に添加した場合に Nb<sub>3</sub>Sn 結晶組織が改善されることが報告されている [2]。しかし、内部スズ法線材において Ti を Sn ではなく Cu 母材に添加すると、断面構成材料間の硬さ・加工性のバランスをさらに低下させることが懸念され、また Cu-Zn を母材とした場合には Ti 固溶量が大きく制限されるなどの理由から Cu 母材への Ti 添加は困難であった。

そうした背景から、我々は線材加工性を改善するために Cu 母材に Ti を添加し、Sn 芯への Zn 添加を行う新しい構成の Nb<sub>3</sub>Sn 線材を提案してきた。これまでに Sn 芯への 20wt%Zn の添加、Cu 母材への 1wt%Ti の添加による  $J_c$  の大幅な向上を達成した。本研究では、Ti 添加方法による元素分布や結晶組織への影響を調べるために、Sn 芯、Nb 芯、Cu 母材のそれぞれに Ti 添加を行った Nb<sub>3</sub>Sn ブラス法線材を作製・評価した。

### 2. 試料作製・実験手順

本研究における Nb<sub>3</sub>Sn 多芯線試料は典型的なダブルスタッカ法によって作製した [3]。Sn 芯として Sn-20wt%Zn 合金を用い、Cu 母材として Cu-1.0wt%Ti を用いた (SZ-C1T 線材)。リファレンス線材として Sn-1.6wt%Ti, Cu-15wt%Zn をそれぞれ Sn 芯、母材として用いた ST16 線材と、Nb-0.8wt%Ti, Cu-15wt%Zn をそれぞれ Nb 芯、母材として用いた NT08 線材を用意した。試料作製後はまず 550°C/100 時間で前熱処理を行い、その後に最終熱処理として 685 ~ 715°C/100 時間の熱処理を行った。熱処理後に FE-SEM, EDX, EBSD 分析による観察・分析を行った。また、10 ~ 18 T の外部印可磁場下において 4 端子法による  $I_c$  測定を行った。 $I_c$  測定の電圧基準は 1 μV/cm とした。

### 3. 結果と考察

図 1 に各試料の  $J_c$ - $B$  特性を示す。ST 線材と比較して、SZ-C1T 線材、NT08 線材の特性は高かった。図 2 に SZ-C1T, NT08, ST16 線材のそれぞれの Sn, Ti の元素マッピングを示す。ST16 線材は以前から報告されているように Nb サブバンドル界面 Sn-Ti 相を形成し、Sn, Ti の拡散を阻害するため、それらの分布は不均一である。一方で、SZ-C1T, NT08 線材では Sn-Ti 相形成は確認できず、Sn, Ti の分布は均一である。これが  $J_c$  向上の大きな要因と考えられる。EBSD を用いてそれぞれの試料の Nb<sub>3</sub>Sn 結晶組織の平均結晶粒径、結晶粒のアスペクト比の評価も行った。EBSD 分析を含む Nb<sub>3</sub>Sn 微細組織と超伝導特性の相関については当日に発表する予定である。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04249 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] S. Balachandran, C. Tarantini, P. Lee et al., *SuST* (2019)
- [2] E. Popova, I. Deryagina, and E. G. Valova-Zaharevskaya, *Cryogenics* (2014)
- [3] N. Banno, Y. Miyamoto, and K. Tachikawa, *IEEE TAS* (2016)

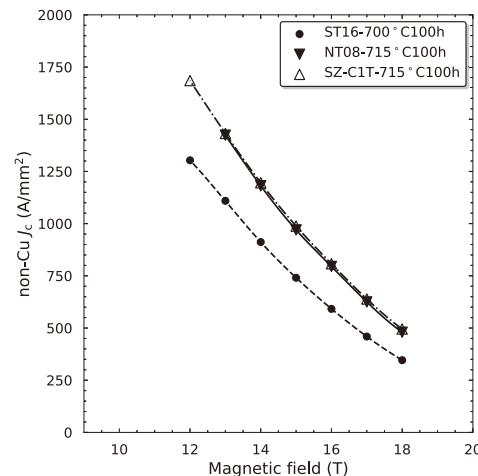


図 1 SZ-C1T, ST16, NT08 線材の  $J_c$ - $B$  特性

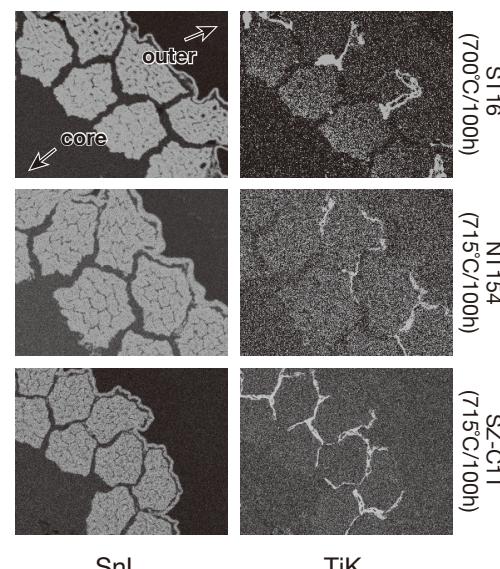


図 2 EDX mapping of SnL and TiK for each specimen

## Mo 添加 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材の作製と Mo 添加効果

### Fabrication and third element effect of Mo-added Nb<sub>3</sub>Sn superconducting wires

肥村 康治, 永澤 諒紀, 小黒 英俊 (東海大); 淡路智 (東北大)  
HIMURA Koji, NAGASAWA Masaki, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)  
E-mail: 9bajm038@mail.u-tokai.ac.jp

#### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材は、実用超伝導線材として 10 T 以上の超伝導マグネットに利用されている。この Nb<sub>3</sub>Sn は、わずかなひずみでも超伝導特性が劣化してしまう性質を持っている[1]。ところで、Nb<sub>3</sub>Sn への第 3 元素添加によって、その超伝導特性が大きく変わる事が知られている[2]。このことは、第 3 元素添加によって Nb<sub>3</sub>Sn 線材の超伝導特性に与えるひずみ効果を変える事ができる可能性を示唆している。

本研究では、Nb<sub>3</sub>Sn 線材への第 3 元素添加によるひずみ効果の緩和と、第 3 元素の添加効果のメカニズム解明を目的とし、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の作製と超伝導特性の評価、および、Nb<sub>3</sub>Sn 線材断面の組織観察を行った。本報告では、Mo を添加した Nb<sub>3</sub>Sn 線材を作製し、作製条件の異なる試料を比較した結果を報告する。

#### 2. 実験方法

Nb<sub>3</sub>Sn 線材は、Powder in tube 法を用いて作製した。一方に蓋をした外径 8 mm、内径 5 mm の銅管に、外径 5 mm、内径 4 mm の Nb 管を挿入した。Sn と Cu と Mo の混合粉末を Nb 管に詰めた。

670°C × 100 h の条件の場合は、Sn の量を Nb 管全体が Nb 原料と考えて作製したため、Nb 管の体積から求めた。Nb の mol 数に対し、Nb:Sn=3:1 とした。Mo は Sn の mol 数に対して 0.2、1.0mol%として加えた。管の残りの体積分は Cu で補った。粉末充填の後、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の断面の直径が 1.5 mm になるまで線引き加工をし、熱処理をした。

800°C × 100 h の条件の場合は、Sn の量を Cu の mol 数に対し、Sn:Cu=0.91:99.09 とした。これは、前述の方法では Sn 量が多く、熱処理後に Cu との化合物が多くみられ、これが線材の引張り試験時にすぐに破断してしまう問題が生じたため、Cu-Sn の化合物を作らないよう、Cu に対する Sn 固溶限度を超えないように作製する狙いがある。Mo は Sn の mol 数に対して 0.5、1.0mol%として加えた。粉末充填の後、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の断面の直径が 1.5 mm になるまで線引き加工をし、熱処理を行なった。

添加元素の状態を調べるため、作製した線材に対して電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて、線材断面の組成分析を行った。線材の断面は、Fig. 1 のように単芯線材としている。

#### 3. 結果と考察

Fig. 2 に、670°C × 100 h の条件で熱処理をした無添加の Nb<sub>3</sub>Sn 線材と、Mo を 0.2mol%、1.0mol% 添加した Nb<sub>3</sub>Sn 線材の、後方散乱電子像を示した。この画像から、Nb<sub>3</sub>Sn の生成量を評価すると、無添加と Mo 0.2mol% 添加は、Nb<sub>3</sub>Sn の肉厚の平均が約 3 μm、Mo 1.0mol% 添加は Nb<sub>3</sub>Sn の肉厚の平均が約 7 μm 観察できた。これより、Mo の添加量が少ない時は Nb<sub>3</sub>Sn の生成量に影響を与えない、もしくは生成が阻害されている可能性があり、多い時には Nb<sub>3</sub>Sn の生成が促進されているもしくは、Sn の拡散が促進されている可能性が考えられる。

Fig. 3 に、800°C × 100 h の条件で熱処理をした無添加の Nb<sub>3</sub>Sn 線材と、Mo を 0.5mol%、1.0mol% 添加した Nb<sub>3</sub>Sn 線材の、後方散乱電子像を示した。この画像から、Nb<sub>3</sub>Sn の生成量を評価すると、無添加は Nb<sub>3</sub>Sn の肉厚の平均が約 36 μm、Mo 0.5mol% 添加は Nb<sub>3</sub>Sn の肉厚の平均が約 30 μm、Mo 1.0mol% 添加は Nb<sub>3</sub>Sn の肉厚の平均が約 10 μm 程度観察できた。これより、Mo が添加されると、Nb<sub>3</sub>Sn の生成を阻害す

る可能性が考えられる。しかし、670°C × 100 h の条件では、Nb<sub>3</sub>Sn の生成が促進されているもしくは、Sn の拡散が促進されているという考察ができるところから、Mo の添加効果は熱処理温度か、Sn 濃度によって変化している可能性があると考えられる。今後は比較のために Sn:Cu:Mo 比を同じにして Mo の添加効果を評価する。

Fig. 4 に、Fig. 2 と Fig. 3 で示した Mo 1% 添加 Nb<sub>3</sub>Sn 線材中の Mo 分布を示した。共に Mo が局所的に析出しているように見える。Cu-Mo の状態図より、Cu と Mo は 800°C 以下では反応せず、Mo と Sn も反応が見られないことから、Mo 単体が局所的に析出し、Nb<sub>3</sub>Sn に取り込まれていない可能性があることがわかった。

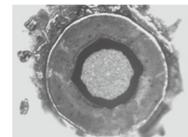


Fig. 1 Cross sectional view of Nb<sub>3</sub>Sn wires.

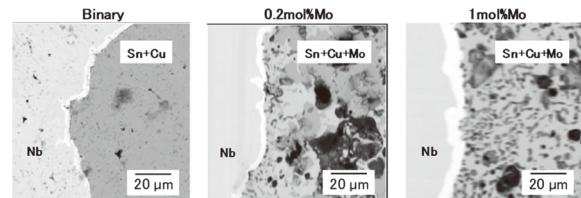


Fig. 2 Back-scattered electron image of the cross section of binary, 0.2mol%Mo doped and 1.0mol%Mo doped Nb<sub>3</sub>Sn wires.

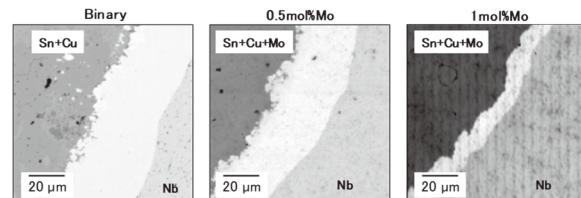


Fig. 3 Back-scattered electron image of the cross section of binary, 0.5mol%Mo doped and 1.0mol%Mo doped Nb<sub>3</sub>Sn wires.

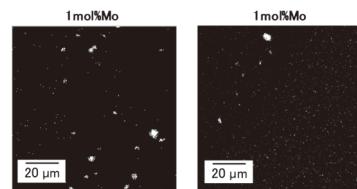


Fig. 4 Mo distribution in 1mol%Mo added Nb<sub>3</sub>Sn wires with heat-treatment of 670°C(left) and 800°C(right).

#### 謝辞

本研究は、東海大学総合研究機構「研究奨励補助計画」、高度物性評価施設、及びイメージング研究センターの支援を受け、実施したものである。また、核融合科学研究所一般共同研究(NIFS19KECF027)の支援を受けた。

#### 参考文献

1. E. W. Ekin, Cryogenics, Vol. 20 (1980) 611–624
2. M. Suenaga et al., J. Appl. Phys., Vol. 59 (1986) 840–853

## RHQT 法 Nb<sub>3</sub>Al テープ状導体と銅ストリップを複合化した大容量導体の開発

### Development of high-capacity superconductors composed of tape-shaped RHQT-processed Nb<sub>3</sub>Al conductors and copper strips

高畠 一也, 菱沼良光(NIFS); 菊池章弘, 飯嶋安男(NIMS); 土屋清澄, 王旭東, 大内徳人(KEK); 山田喬平(上智大); 濱口真司, 今川信作, 三戸利行(NIFS)

TAKAHATA Kazuya, HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); KIKUCHI Akihiro, IIJIMA Yasuo (NIMS); TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xu-Dong, OHUCHI Norihito (KEK); YAMADA Kyohei (Sophia Univ.); HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)  
E-mail: takahata@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

核融合炉用などの巨大なマグネットでは、ワインド&リアクト法を採用すると、同じく巨大な熱処理炉が必要となり現実的ではない。従ってリアクト&ワインド法が必須となる。その場合、Nb<sub>3</sub>Sn に比べてひずみ感受性が小さい Nb<sub>3</sub>Al 線材が有望である。過去には、拡散法 Nb<sub>3</sub>Al 線材を用いたケーブル・イン・コンジット導体をリアクト&ワインド法により巻線したコイルが製作・試験され、良好な結果を得ている[1]。本研究では、拡散法線材よりさらに性能が向上した急熱急冷・変態(RHQT)法 Nb<sub>3</sub>Al 線材の大容量導体への応用を目指し、新しい構造の導体開発に着手し、模擬導体の試験を実施した。

大容量導体では、クエンチ時のホットスポット温度を抑制するために、銅(またはアルミ)を線材とともに配置しなければならない。かつ、銅と線材間の電気的接続も確保する必要がある。本研究では、線材をテープ状にすることにより、銅ストリップと面接触させ、必要な界面接触コンダクタンスを確保するという概念を提案する。これにより、銅メッキや半田含浸といった手間を省くことができる。

#### 2. 試験導体と実験方法

図 1 に試験導体の断面を示す。幅 17 mm, 厚さ 1 mm の銅ストリップの両面に、幅 4.6 mm, 厚さ 0.2 mm の Nb<sub>3</sub>Al テープ状線材[2,3]を 6 枚(片面 3 枚)沿わせた。そして、ボルトで締め付けができる厚さ 1.5 mm のステンレス板 2 枚で挟み込んだ。図 2 は、最後のスレンレス板を置く直前の写真である。

長さ 625 mm(ジョイント部を除く)の導体を、8 T のスプリットコイルに挿入し、外部磁場 3 T から 8 T でのクエンチ電流を測定した。クエンチ電流は、長さ 20 mm の電圧タップにおいて 30  $\mu$ V(15  $\mu$ V/cm 相当)以上発生した点で定義した。

#### 3. 実験結果

図 3 にクエンチ電流の測定結果を示す。電流掃印速度を 25 A/s から 500 A/s まで変化させて測定した。破線は、線材 1 本の臨界電流(23 T から 14 T で測定)を低磁場へ外挿した臨界電流予測値を 6 倍した値である。低掃印速度では、予測される臨界電流近くまで通電できた。一方、高掃印速度では、1 kA 程度低い電流値でクエンチした。これは、6 本の線材が転位していないことによる端部迂回型の渦電流の発生が影響していると考えられる。

#### 4. 考察とまとめ

今回の導体構造を Nb<sub>3</sub>Al 導体に応用すれば、臨界電流の劣化を最小限に抑えながら大容量導体を構成できると期待される。ただし今回の試験導体は、線材の転位を行っておらず、さらなる改良が今後必要である。

試験後、室温において、線材とステンレス板および銅ストリップ間の界面接触コンダクタンスを測定した。その結果、片面当たり、 $5 \times 10^4$  S/m と見積もられた。この値を用いて回路モデル計算を行った結果、長尺であっても、クエンチ時に線材から銅ストリップへの電流分流が可能であることが分かった。

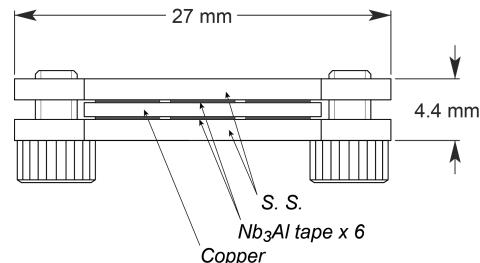


Fig. 1 Schematic diagram of the conductor structure.

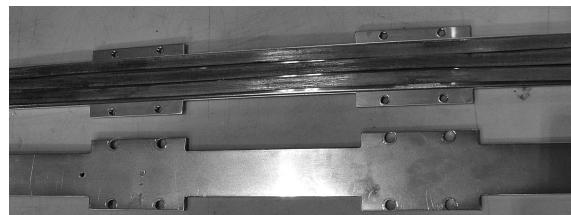


Fig. 2 Photograph of the test conductor before final assembly.

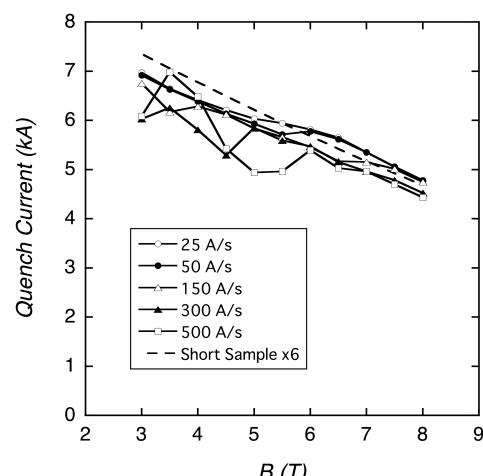


Fig. 3 Measured quench currents at different sweep rates.

#### 謝辞

本研究は、LHD 計画共同研究(No. NIFS18K0BF040)の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- N. Koizumi, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 38 (2003) pp. 391–398.
- K. Yamada, et al.: Abstracts of 10<sup>th</sup> ACASC/2<sup>nd</sup> Asian ICMC/CSSJ (2020) p. 23.
- K. Yamada, et al: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p. 17.

## ITER トロイダル磁場コイルの完成

### Progress of ITER TF coil manufacture

小泉 徳潔, 中平 昌隆, 中本 美緒, 梶谷 秀樹, 井口 将秀, 櫻井 武尊, 謙訪 友音, 松井 邦浩, 正木 圭(量研機構)  
KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka, NAKAMOTO Mio, KAJITANI Hideki, IGUCHI Masahide,  
SAKURAI Takeru, SUWA Tomone, MATSUI Kunihiro, MASAKI Kei (QST)  
E-mail: koizumi.norikiyo@qst.go.jp

#### 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構; QST)は、ITERにおける日本の国内機関として、ITER トロイダル磁場(TF)コイル[1,2](Fig.1:スペア 1 個を含み 19 個。以下、TF コイルと記す。)のうち 9 個の TF コイル、19 個分のコイル容器(CC)の調達を担当している。TF コイルは、ITER の超電導コイルの中でも最大級の超電導コイルであり、かつ、製作の難易度も最も高いコイルである。日本では、初号機と二号機が完成しており、本報では、日本が担当している TF コイル及びコイル容器の製作進捗を報告する。なお、TF コイルの製作手順の詳細等については、[1]を参照されたい。また、調達体制については、[2]を参照されたい。

#### 2. 調達進捗

日本では、ダブル・パンケーキ(DP)の製作については、全 63DP の巻線部(WP)については、5 機の製作を完了している。2019 年 3 月から、初号機の WP と CC の一体化作業に着手し、2020 年 1 月に世界に先駆けて、TF コイルを完成させた。本 TF コイルは、ITER の最重要機器の中で世界に先駆けて完成した機器であり、ITER 機構の B. Bigot 機構長も参加し、2020 年 1 月 30 日に完成式典が行われた(Fig. 2)。

本初号機は海上輸送を終えて、2020 年 4 月 10 日の時点で、ITER サイトへの陸送待ちとなっている。なお、欧州では、日本について、2020 年 2 月に初号機を完成させており、2020 年 3 月に海上輸送を約 1 週間で完了させて、日本の初号機より早く、陸送待ちになっている。Fig. 3 には、日本の初号機を陸送待ちの中継所に搬入したときの写真を示しており、欧州の初号機が奥に待機していることが分かる。両 TF コイルとも、2020 年 4 月中に ITER サイトに到着する予定である。

また、2 号機も 2020 年 3 月には完成しており、2020 年 4 月中に出荷される予定である。

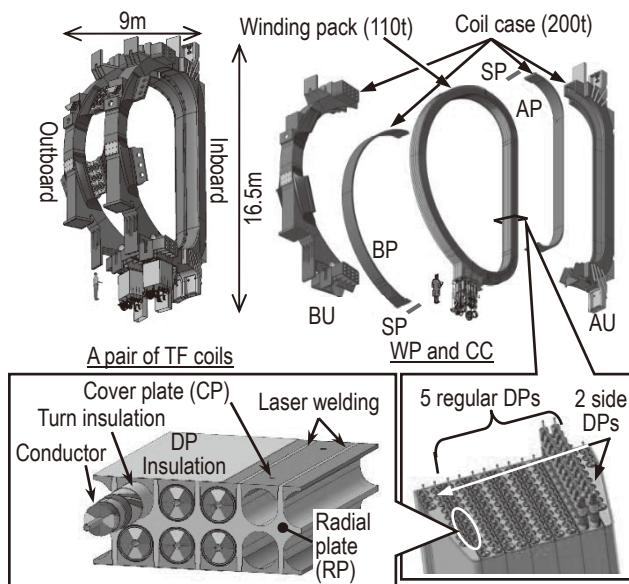


Fig. 1. ITER-TF coil.



Fig. 2 Completed 1<sup>st</sup> ITER TF coil.



Fig. 3 1<sup>st</sup> Japanese and EU ITER TF coils during transportation.



Fig. 4 Completed 2<sup>nd</sup> ITER TF coil.

コイル容器においては、欧州分 6 機、日本分 5 機の製作を完了している。

#### 3. まとめ

日本では、9 機の TF コイル、19 基のコイル容器の製作を進めている。2020 年 3 月時点で、2 機の TF コイルの製作を完了させている。

#### 謝辞

TF コイルの製作では、三菱重工、東芝、三菱電機、現代重工等多数のメーカーに協力を頂き、技術的課題を解決しながら進めています。これらのメーカーのご協力に感謝します。

#### 参考文献

- (1) ITER TF コイル特集号: 低温工学, 47(2012) 135-139
- (2) ITER TF コイル特集号: 低温工学, 55(2020)(投稿予定)

# ITER-TFジョイントサンプルの遮蔽電流の等価電気回路による解析

## Simulation results on shielding currents in ITER-TF joint samples

今川 信作, 尾花 哲浩, 高田 卓, 濱口 真司, 力石 浩孝, 小野寺 優太, 高畠 一也 (NIFS);  
 梶谷 秀樹, 松井 邦浩, 小泉 徳潔 (QST)  
 IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hirotaka,  
 ONODERA Yuta, TAKAHATA Kazuya (NIFS); KAJITANI Hideki, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo (QST)  
 E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

ITER-TF 接続部の交流損失評価のため、ジョイントサンプル [1,2] の表面にホール素子を取り付け、外部磁場コイル遮断時の磁場変化を測定した(図1参照)。磁場変化から求めた遮蔽電流は減衰が進むにつれて時定数が長くなる傾向にあることから、接続抵抗に電流値依存性があると考えられる。定量評価のため、接続部を跨いで往復導体に流れるループ(Loop1)と導体内の最終撲りピッチに流れる結合電流ループ(Loop2, 3)を考慮した電気回路モデルを用いて遮蔽電流の解析を行った。

### 2. 計算方法と計算結果

接続部中央のホール素子(B1)に影響の大きい遮蔽電流ループは接続面を介して往復導体を流れるループである。この電流ループは接続部の半分の面積を 2 回横切るため、まず、回路抵抗は接続抵抗  $R_j$  の 4 倍と考えて、この回路抵抗と遮蔽電流による磁場の初期減衰時定数から求めたインダクタンスを用いて遮蔽電流を計算した。ところが、実測よりも電流が高く、かつ、ピーク値が遅れることから、回路定数を見直した。ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体の接続抵抗は、断面内の電位分布のため低電流域での実測が難しいことから、900 本の超伝導素線各々の接続抵抗が  $m=2$  のワイブル分布と仮定し、さらに、1-5 本の素線を極端な低抵抗(平均値の 1/500-1/100)と仮定して様々なケースで計算を行った。その結果、全体の接続抵抗は、

$$R_j \propto 1-m/(I+m) \quad (m \text{ は固有の定数, } I \text{ は電流値}) \quad (1)$$

で近似できることが分かった(図 2 参照)。一方、外部磁場によって Loop1 の超伝導線に誘起される電圧は鎖交磁束に比例するので、接続部を横切る電流は外部磁場中心から離れるほど高くなる。この効果により Loop1 の抵抗  $R_1$  は  $4R_j$  の  $4/3$  倍となる。

Loop1 の実効長さとして接続長の  $1/2$  を用いて計算した結果の代表例を図 3 に示す。 $m$  を大きくすると減衰開始時の磁場減衰時定数が長くなるので、実測値と比較することにより  $m$  の範囲を決定することができる。Loop1 の抵抗値が高い Sample B の場合、Loop2 の抵抗  $R_2$  にも同様の電流依存式を用いることにより、全域に渡って実測を良好再現できる。

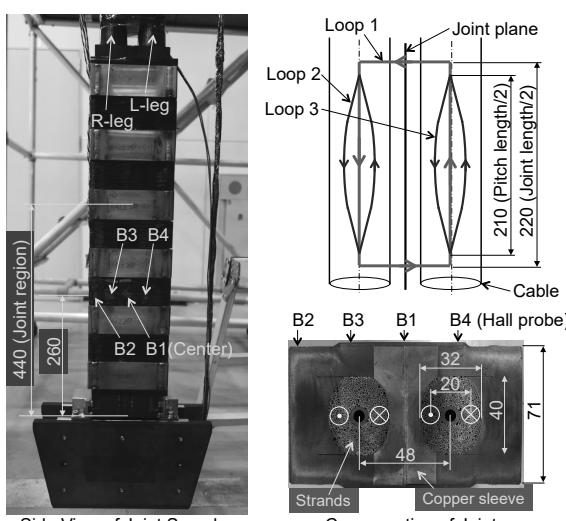


Fig. 1. Set up of Hall probes on an ITER-TF joint sample and schematic drawing of shielding currents.

### 3. まとめ

外部磁場コイル遮断時に ITER-TF ジョイントサンプルに流れる遮蔽電流は、接続部を跨いで往復導体に流れる Loop1 と導体内の最終撲りピッチに流れる結合電流 Loop2, 3 を考慮した電気回路モデルで良く再現することができる。解析と実測の比較により、次のことが分かった。(1) CIC 導体の接続抵抗には電流値依存性があり、低電流域では  $1/2$  から  $1/4$  まで低くなる。(2) 接続部の素線間接触抵抗は平均値が  $1-10\text{n}\Omega$  と推測され、文献の値と整合する。また、極端に小さい抵抗で接触している素線対が存在すると考えられる。(3) 接続抵抗の電流値依存性の影響により、遮蔽電流が作る磁場のみかけの減衰時定数は Loop1 の回路時定数よりも少し長くなっていると考えられる。

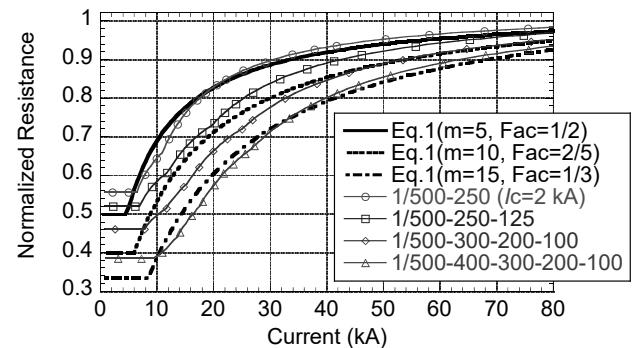


Fig. 2. Calculated current dependence of joint resistance.

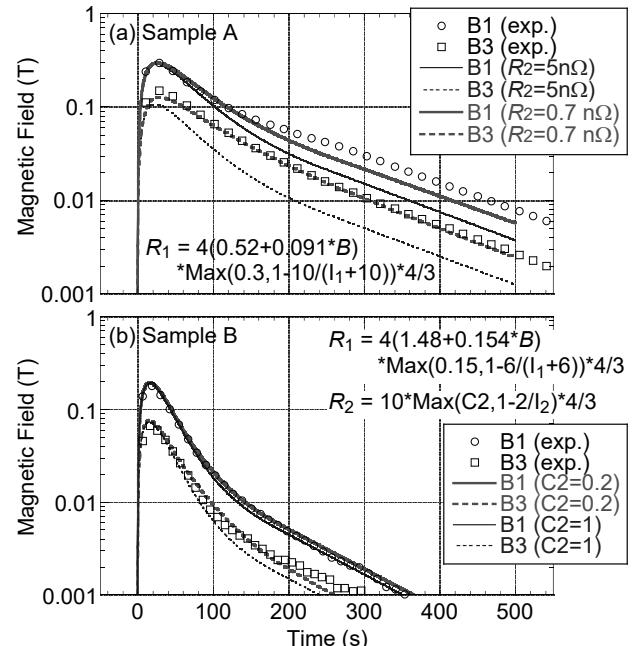


Fig. 3. Calculated magnetic field for samples A (a) and B (b) in comparison with the experimental data.

### 参考文献

- S. Imagawa et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28 (April 2018) Art. no. 4200405.
- 今川他: 2019年度春季低温工学・超電導学会, 3B-a06.

## JT-60SA 中心ソレノイドの組立・据え付け

### Installation of Central Solenoid for JT-60SA

村上 陽之、土屋 勝彦、河野 勝己、木津 要、濱田 一弥、板敷 祐太郎、岡野 文範、  
柳生 純一、松永 剛(量研); 渡部 優貴、野元 一宏(三菱電機)

MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, KAWANO Katsumi, KIZU Kaname, ITASHIKI Yutaro, OKANO Fuminori,  
YAGU Junichi, MATSUNAGA Go (QST); WATABE Yuki, NOMOTO Kazuhiro (Mitsubishi Electric)

#### 1. はじめに

欧州と日本が共同で建設を進めているトカマク型核融合実験装置 JT-60SA は、3 種類の超電導コイルが用いられ、18 個のトロイダル磁場(TF)コイルは欧州が製作を担当し、中心ソレノイド(CS)および 6 個の平衡磁場コイルは日本が製作を担当した[1]。完成したコイルの据え付け作業も日本が実施した。

本発表では、CS および TF コイルの寸法測定結果および CS の組立・据え付けについて報告する。

#### 2. CS と TF コイル間のクリアランス確認

CS は JT-60SA トカマクの中心に設置される機器で、18 個の TF コイルをドーナツ状に組み立てた後に形成される中心部の円筒空間(図 1)に、上部から挿入し組み立てられる。JT-60SA の運転中に、CS と TF コイルはフープ力によりお互いに近づきあう方向の変形が生じる。そのため、CS と TF コイル間は運転時の変形を考慮したクリアランスを確保し組み立てる必要がある。そこで、CS の挿入前に CS の外周および TF コイルの内周面の寸法を計測し、クリアランスの確認を行った。

有限要素法を用いた構造解析の結果、フープ力による変位は、CS で最大 1.5 mm TF コイル側に拡張し、TF コイルで最大 3.5 mm CS 側に変位を生じる。それに加えて、CS 据え付け時の設置誤差 2.0 mm、CS 外周と TF コイル内周面の計測誤差の合計 1.5 mm を考慮し、全体で 8.5 mm 以上のクリアランスを確保しておく必要がある。

CS はレーザートラッカーを用いて、9 本のタイプレート表面に対し高さ方向 7 か所、周方向 3 点の合計 189 点、および冷媒導入部の 104 点の測定を行った(図 2)。TF コイルはレーザースキャナを用いて内周面全体の測定を行った。タイプレート表面部の測定結果を図 3 に示す。CS は測定結果に加えて、CS 中心軸の設置誤差(2.0 mm)および測定誤差(1.5 mm)の 3.5 mm を足した点(タイプレートにはフープ力による変位は生じない)、TF コイルは測定結果に加えてフープ力による変位(最大 3.5 mm)を引いた線を示した。この結果より運転中を含め CS と TF コイルが接触しないために必要なクリアランスが確保できていることが確かめられた。同様に他のタイプレートおよび冷媒導入部についてもクリアランスの評価を行い、全ての点で必要なクリアランスが確保できていることを確認した。

#### 3. CS の組立、据え付け

CS の組立では計測誤差を除き、最小で両側 7.0 mm ずつ程度のクリアランスしかないと想定し、最初に CS を吊った状態での垂角度が 6.0 mm(片側 3.0 mm ずつ)以下、すなわち挿入時のクリアランスが 4.0 mm 以上となるように吊り治具の傾き調整を行った。続いて挿入時に CS と TF の接触がないことを確認するために、CS の周囲に合計 80 か所の接触センサーを設置した。加えて CS 下部からレーザートラッカーを用いて TF コイルの中心に CS が位置していることを常時確認しながら挿入を行い、CS と TF コイルが接触するような問題が生じることなく CS を設置することができた。設置後に実施した寸法測定の結果、CS の据え付け精度は、水平方向で 0.6mm(目標値:2.0 mm)、高さ方向で 1.2 mm(目標値:2.0 mm)、垂角度 1.6 mm(目標値:2.0 mm)を達成できたことを確認した。

今回実施した CS の据え付けをもって、JT-60SA に用いられる全ての超電導コイルの組み立てが完了した。超電導コイルに電流を供給する超電導電流フィーダやサーマルシールド、クライオスタットなど JT-60SA の組み立ては 2020 年 3 月までに全て完了した。今後、プラズマ運転に向けて、超電導コイルの冷却などを開始する予定である。

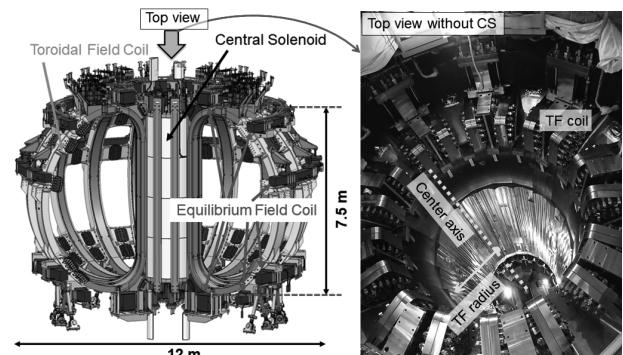


Fig. 1 JT-60SA magnet system and TF center bore

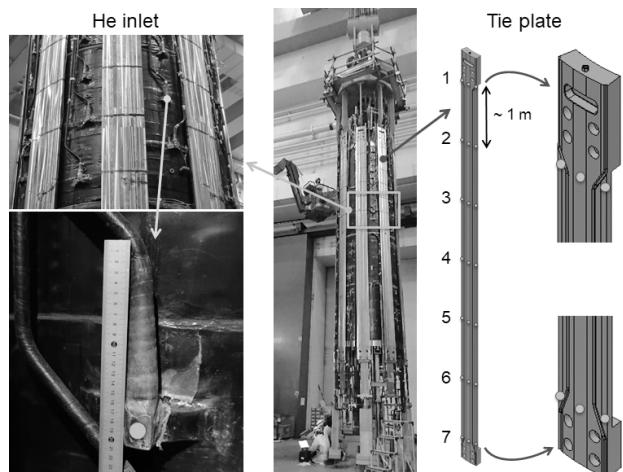


Fig. 2 Measurement points on CS tie plate and He inlet

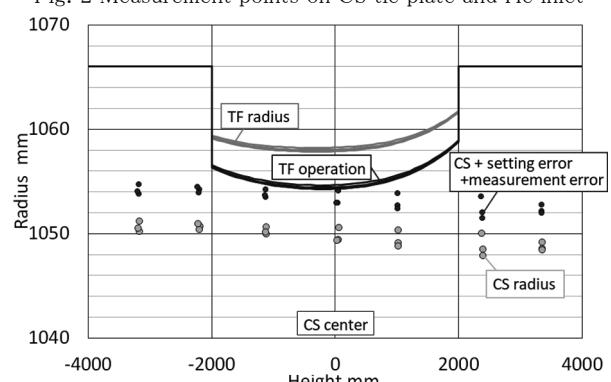


Fig. 3 Clearance between CS and TF coil  
(TF17 sector (tie plate sector))

#### 参考文献

1. Y. Koide, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55, (2015) 086001

# 大電流 HTS 導体(FAIR 導体)の $I_c$ 劣化原因の解明と改善

## Elucidation of the cause of $I_c$ degradation of high current HTS conductor (FAIR conductor) and its improvement

三戸利行, 小野寺優太, 平野直樹, 高畠一也, 柳長門, 岩本晃史, 濱口真司, 高田卓, 馬場智澄(NIFS); 大辻慎(東京大学); 筑本知子(中部大学); 川越明史(鹿児島大学); 川並良造(川並鉄工株式会社)

MITO Toshiyuki, ONODERA Yuta, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya, YANAGI Nagato, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji, TAKADA Suguru, BABA Tomosumi (NIFS); OTSUJI Maki (University of Tokyo); CHIKUMOTO Noriko (Chubu Univ.); KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.); KAWANAMI Ryozo (Kawanami Ironworks Inc.),

E-mail: mito@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所では、核融合実験装置に適用可能な大電流容量の高温超伝導(HTS)導体及びコイルの開発研究を進めている[1]。HTS の特徴を生かした高い安定性と高電流密度を両立でき、安全なコイル保護を可能とすることが目標である。その候補導体として、REBCO テープ線材と高純度アルミニウムシートを交互に積層し、円形断面のアルミニウム合金被覆の溝部に入れ、蓋部を摩擦攪拌接合で接合した後で、電流分布の均一化及び機械特性の一様化を図るために導体に捻りを加えて製作する導体を開発している。摩擦攪拌接合(Friction stir welding: FSW)、アルミニウム合金被覆(Aluminum alloy jacket)、間接冷却(Indirect cooling)、REBCO 積層テープ線の頭文字をとった FAIR 導体の開発状況について報告する。

### 2. FAIR 導体の試作開発状況

試作当初の FAIR 導体の断面構造を Fig. 1 左に示す。幅 4mm、厚み 0.1 mm の REBCO テープ線を横に 2 列並べ、導体に捻りを加えた際の機械的な緩衝材となる厚さ 0.5 mm 高純度アルミニウムシートを間に挟んで 10 層を積層する。試作では REBCO テープ線は溝部の上側、中間、下側の 6 枚のみとし、他の部分はステンレステープのダミー線を使用した。外径 12mm のアルミニウム合金被覆の蓋部の FSW 条件、導体捻りピッチ等を変化させた複数の長さ 1m の短尺導体サンプルを作成し、液体窒素中で通電試験を行った。実験では導体に捻りを加えた際に REBCO テープ線の臨界電流( $I_c$ )特性が劣化しない条件を明らかにすることを目的としたが、得られた  $I_c$  特性の劣化は捻りの影響よりもサンプル間の特性差が大きく現れており、捻りピッチの影響の定量的な評価はできなかった。

そこで導体の製作精度を向上させるため、Fig. 1 右に断面図を示すように高純度アルミニウムシートの厚みを本来の導体設計値の 0.1 mm まで薄くすると共に、厚み及び幅等の製作

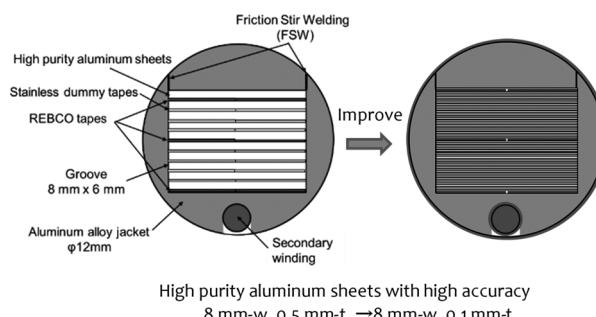


Fig. 1. Cross section of FAIR conductors  
(left: first trial, right: second trial)

精度を向上させた。前回と同様に REBCO テープ線は溝部の上側、中間、下側の 6 枚のみとした。ここで、REBCO テープ線全 60 枚を挿入すると、温度 20 K、磁場 12 T で 12.5 kA の大電流容量導体を構成することができる。

アルミニウム合金被覆部の FSW 条件が、導体の  $I_c$  劣化特性に大きく影響することが明らかになったため、FSW のツール形状、接合条件等の最適化を行った。1 回目の FSW ツール形状から 2 回目への変更では、FSW の影響する範囲の縮小を目的として、ショルダー部の直径を小さくした。2 回目形状での実験結果では、 $I_c$  の劣化は 2 割以下に抑えられており、特に FSW 条件を最適化した 1 回転/m の捻りサンプルでは、 $I_c$  劣化の全くない測定結果が得られた。しかし、同条件で 2 回転/m の捻りを加えたところ、FSW 部に割れが生じ、FSW 条件の更なる最適化が必要であることが明らかとなった。これらの実験結果に基づき、 $I_c$  劣化の原因について推定し、導体製作時に REBCO 線に加わる残留応力と、液体窒素温度までの冷却時の導体構成材料の熱収縮率差による局所的な応力集中の 2 段階の現象がその原因であることを見出し、その成果を J. Phys. Commun. 誌で発表した[2]。

2 回目から 3 回目のツール形状の変更では、先端のピン部の形状を太くし、より強固な FSW が行えるようにした。Fig. 2 に捻りピッチを導体長 1m 当たり 3 回転として試作した FAIR 導体の断面写真及び導体長手方向の捻りの写真を示す。導体

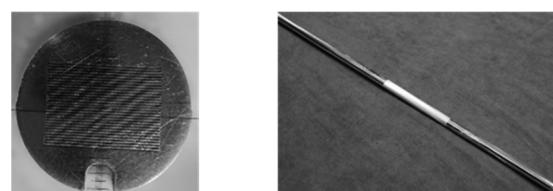


Fig. 2. Prototype FAIR conductor (twist pitch: 3 turns /m)

に捻りを加えてもアルミニウム合金被覆部に割れ等が発生しないことを確認した。3 回目形状での実験結果では、2 割程度の  $I_c$  の劣化は観測されたが、0~2 回転/m の導体捻りまでは臨界電流特性に変化はなく、3 回転/m の導体捻りで、 $I_c$  特性が 4 割以下に大きく低下した。これは 3 回転/m の捻りによって、REBCO 線に不可逆な歪みが生じたためと推定された。導体製作条件の更なる最適化について発表で報告する。

### 参考文献

1. T. Mito *et al.*; Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.149
2. T. Mito *et al.*; J. Phys. Commun., 4 035009 (2020)

## 高温超伝導テープ線を積層したモデル導体の交流損失特性

AC loss properties of the model conductors consisting of stacked HTS tapes

上野 邑真, 長元 尚大, 川越 明史 (鹿児島大学);

尾花 哲浩 (核融合科学研究所); 高安 真 (MIT)

UENO Yuma, NAGAMOTO Naohiro, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University);

OBANA Tetsuhiro (NIFS); TAKAYASU Makoto (MIT)

E-mail: k9485592@kada.kagoshima-u.ac.jp

### 1. はじめに

核融合実験装置用超伝導マグネットに用いる導体として、REBCO 線を複数枚積層してツイストを施した導体が検討されている[1]。線材間は電気的に接続されるため、マグネットの励減磁中には、ヒステリシス損失と結合損失が同時に発生する。REBCO 線材の超伝導層は数 $\mu\text{m}$ と非常に薄くアスペクト比が極めて大きいため、ヒステリシス損失は幅広面に垂直な磁界成分のみを考えればよいことが指摘されている。しかしながら、ヒステリシス損失と結合損失が同時に発生する場合の特性は十分に明らかにされていない。このような状況の交流損失特性を定量的に明らかにすることは、REBCO 線材を多数本束ねた大電流容量の積層導体を開発するために重要である。そこで本研究では、積層導体のモデル導体を作製し、ヒステリシス損失と結合損失が相互に影響するかどうかを実験的に調べた。

### 2. サンプルと交流損失測定方法

使用したサンプルは、液体窒素中、自己磁界中の臨界電流が 200A の YBCO 線材を 50 本積層したもので、長さ 96mm、ツイストはしていない。このサンプルは、幅 4mm の銅テープでラッピングをして固定した後、全体をはんだ含浸している。YBCO 線材幅広面に垂直な磁界が印加されると主としてヒステリシス損失が発生し、幅広面に平行な磁界中では結合損失が発生する。斜めの磁界が印加されると、ヒステリシス損失と結合損失が同時に発生すると考えられる。液体窒素中のサンプルに一様な交流横磁界を印加し、ピックアップコイル法で交流損失を測定した。結合電流はサンプル全長に渡って流れるので、ピックアップコイルはサンプル全体を覆う形状にした。線材幅広面に対する磁界の角度は、サンプルを軸周りに傾けてセットすることによって制御し、0, 10, 20, 70, 90 度とした。

### 3. 測定結果および考察

Fig. 1 に、交流損失の測定値をヒステリシス損失と結合損失に分離して示している。どちらの縦軸も印加磁界一周期当たりの損失エネルギー密度を示す。

Fig. 1(a)は、測定値の周波数依存性から、周波数 0Hz の値を外挿して求めたヒステリシス損失をプロットしている。横軸は、線材幅広面に垂直な印加磁界成分である。印加磁界の角度を変化させても、ヒステリシス損失はほぼ 1 本の特性に乗っている。またテープ面に垂直な磁界成分の 3 乗に比例している。90 度以外の実験では結合損失も同時に発生しているので、結合電流が流れていることは、ヒステリシス損失にほとんど影響を与えないことがわかる。また、波線は円断面の理論値を示している。実線は、矩形断面の超伝導導体のヒステリシス損失を数値解析で求めた論文から正方形断面の結果を読み取った値である[2]。正方形断面の数値解析値と実験値はよく一致している。このことから、積層導体のヒステリシス損失は、幅広面に垂直な磁界成分を考えて、断面が一様な超伝導体としてヒステリシス損失を求めればよいことが示された。

Fig. 1(b)は、測定値からヒステリシス損失を差し引いた結合損失をプロットしている。結合損失なので、周波数に比例している。幅広面に平行な磁界成分の二乗に比例しており、その大きさは印加磁界角度に依存していない。今回の印加磁界振幅は、中心到達磁界よりも小さいため、超伝導層は印加磁界を遮蔽し、磁界は大きく乱れていると考えられる。しかしながらその影響は観測されていない。また、結合損失の周波数依存性から結合時定数を見積もったところ 2.3msec で、印加磁界角度によらず一定であった。これらのことから、積層導体の結合損失は、幅広面に平行な磁界成分を考慮し、導体内部の比透磁率を 1 として考えてよいことが示された。

### 4. まとめ

積層モデル導体における交流損失を液体窒素中でピックアップコイル法により測定した。今回の条件では、ヒステリシス損失と結合損失は、相互に影響していなかった。このことから、実導体のヒステリシス損失と結合損失は、それぞれ独立に評価できると考えられる。

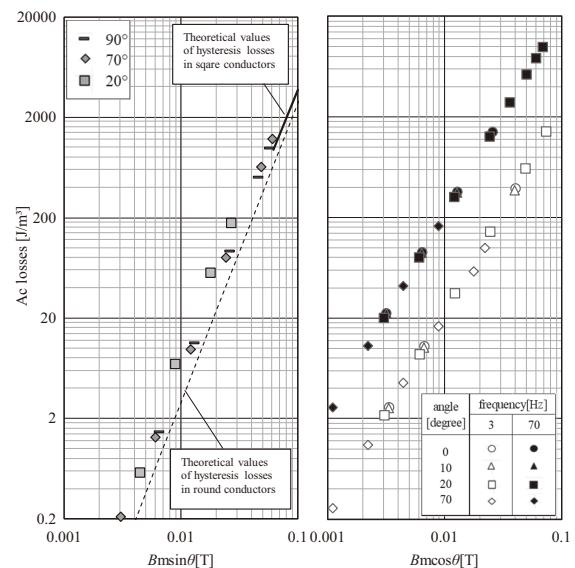


Fig. 1 Measured loss properties. (a) Hysteresis losses, (b) Coupling losses, where horizontal axes of (a) and (b) represent perpendicularly components and parallel ones of the applied magnetic fields to the tape face in the sample, respectively.

### 参考文献

1. M. Takayasu. et al, "HTS twisted stacked-tape cable conductor," Supercond. Sci. Technol., Vol. 25, 2012, 014011 (21pp).
2. K. Kajikawa et al, "Dependence of AC losses on aspect ratioin superconducting wires with rectangular cross section," Physica C, Vol. 412-414, 2004, pp. 1045-1049.

## 極低温下でのパルス強磁場印加による銅細線束発熱

### Heat generation of copper wire bundle under pulsed high magnetic field at 4.2 K

中川 豪, 松山 友樹, 土田 稔, 野口 悟(大阪府大理); 鳴海 康雄, 萩原 政幸(阪大先端強磁場)  
NAKAGAWA Takeshi, MATSUYAMA Tomoki, TSUCHIDA Ryo, NOGUCHI Satoru (Grad. Sch. Sci., Osaka Pref. Univ.);  
NARUMI Yasuo, HAGIWARA Masayuki (AHMF, Grad. Sch. Sci., Osaka Univ.)  
E-mail: s\_t.nakagawa@p.s.osakafu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々はパルス強磁場と断熱消磁を組み合わせた強磁場極低温の複合極限環境の実現を目指している。そのためにはパルスマグネットと断熱消磁部が磁気的に干渉しないように距離 ( $\sim 300$  mm) を取り、その間の熱伝導を十分大きく取る必要がある。この熱伝達物質として  $30\ \mu\text{m}$  の被覆銅細線束を約 2800 本束ねたものを検討した。被覆銅細線束はゼロ磁場中で 0.3 K まで速やかな熱伝達を確認したが、パルス強磁場印加に伴う渦電流発熱を評価しなければならない。銅線 1 本あたりの発熱量は次式で見積もられる。

$$Q = \frac{\pi^3 a^4 B_0^2 h}{16 T \rho} \quad (1)$$

( $Q$ : 渦電流発熱、 $B_0$ : 最大磁場、 $T$ : パルス磁場の周期、 $h$ : パルスマグネットの長さ、 $a$ : 銅線半径、 $\rho$ : 銅の抵抗率) この式より渦電流発熱は銅細線半径  $a$  の 4 乗に比例していることから、被覆銅細線束の径を小さくすることによって渦電流発熱を飛躍的に抑えることができ、今回の場合 2800 本の被覆銅細線束で 50 T の最大磁場を印加したとき  $17\text{ mJ}$  の発熱量と計算される。ただし、この発熱量は決して小さくなく、磁場発生時の温度上昇が無視できないと予想される。そこでこれを実験的に確かめるため、大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センターにて被覆銅細線束を実際のパルス強磁場中に挿入し、その渦電流発熱による温度上昇の評価を行った。

#### 2. パルス強磁場印加実験

パルス強磁場波形は Fig.1 に示すように正弦波的に  $12.5\text{ ms}$  で最高磁場に到達し、下りは緩やかに  $30\text{ ms}$  後にはほぼゼロになる。充電電圧に比例して最高磁場が変化するが、磁場波形は変わらない。マグネットの中心に液体ヘリウムガラスデュワーを挿入し、液体ヘリウム槽内にガラス断熱真空管を入れ、その中に  $30\ \mu\text{m}$  の被覆銅細線束 2800 本とセルノックスベアチップ抵抗温度計を入れ温度計の抵抗を測定した。また、比較実験として被覆銅細線束の替りに石英ガラス棒を入れて同様の実験をした。これらの実験を充電電圧  $1\text{ kV}, 3\text{ kV}, 5\text{ kV}$  の 3 通り行った。それぞれ最高磁場が  $5.2\text{ T}, 15.5\text{ T}, 25.5\text{ T}$  に相当する。

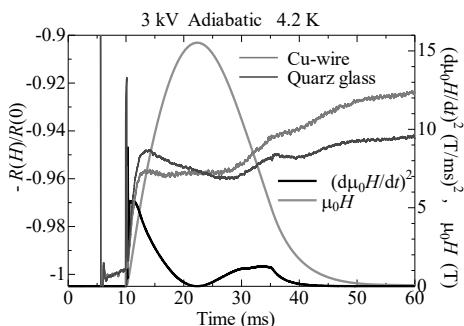


Fig.1 Waveform of pulsed magnetic field and relative resistance variation of Cernox thermometer

#### 3. 実験結果

Fig.1 に示す抵抗の変化はゼロ磁場での値で規格化し、マイナス値にしてプロットしたもので、温度上昇割合に相当する。誘導電流の流れない石英ガラス棒でも温度上昇があるが、これは温度計自身の回路に誘起する電流発熱があるためである。そこで、石英ガラスのデータを銅線束のデータから差し引きすることで銅線束のみの発熱を評価すると、Fig.2 に示すように温度上昇が充電電圧の 2 乗に比例する結果が得られた。この図から、最高磁場 50 T に相当する充電電圧  $10\text{ kV}$  に延長すると約 15 % の温度上昇となる。以上が  $4.2\text{ K}$  の結果であり、より低温において発熱量は変化しないので、温度上昇率はもっと大きくなると考えられる。

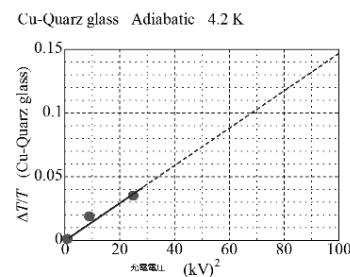


Fig.2 Temperature rise rate plotted against square of charging voltage

#### 4. 热モデル

実験結果より、銅線束の利用は厳しいと考えられるが、温度上昇の大きさと時間変化について Fig.3 に示す熱モデルを用いて温度計と銅の熱伝導率と熱容量を考慮した定量的な解析を行った。ここで、 $C$  は熱容量、 $T$  は温度、 $\kappa$  は熱伝導率、 $Q$  は流入熱量である。熱は渦電流によるため、Fig.1 に示す磁場波形の  $(d\mu_0 H/dt)^2$  を時間に対してプロットした曲線が熱流入パワーに比例する。解析結果については当日発表を予定する。

#### 5. まとめ

パルス強磁場と断熱消磁を組み合わせた強磁場極低温の複合極限環境の実現を目指し被覆銅細線束の熱伝導性と渦電流発熱を評価した。被覆銅細線束はゼロ磁場中で 0.3 K まで速やかな熱伝達を確認したが、渦電流発熱が無視できない実験結果となった。Fig.3 に示す熱モデルを用いて詳細な解析を行っているところである。

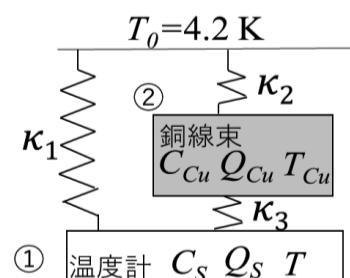


Fig.3 Thermal flow model:  $\kappa$  denotes thermal conductivity.  
 $C$  denotes heat capacity.  $Q$  denotes heat input.

## 減圧時における加圧液体水素の観測

### Observation of pressurized liquid hydrogen under depressurization

中山郁夢, 赤松慧亮, 松田竜之介, 永廣 衛, 岩佐太陽, 知念健太, 武田 実, 前川一真(神戸大); 熊倉浩明(NIMS)  
NAKAYAMA Ikumu, AKAMATSU Keisuke, MATSUDA Ryunosuke, NAGAHIRO Mamoru, IWASA Taiyo, CHINEN Kenta,  
TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)  
E-mail: 190w523w@stu.kobe-u.ac.jp

#### 1. はじめに

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化など、エネルギーに関する問題が注目されている。これらの問題を解決するために、地球上に広く分布し、環境にも優しい再生可能エネルギーへの期待が高まっている。の中でも、再生可能エネルギーから水素へ変換して利用することが考えられている。水素は、クリーンエネルギーのみならずエネルギーキャリアとして優れているからである。そこで、水素エネルギー利用の発展を目指し、大型船による液体水素(沸点 20.3 K)の海上輸送が計画されている[1]。極低温液体である液体水素は、船舶の揺動や入熱により少しずつ蒸発し、液量が減ってしまう。そのため、蒸発ガスを逃さず、タンク内に閉じ込めて蓄圧状態で輸送する手法が採られている。しかし、荷揚げ時は移送ポンプを使用するため、ある程度まで減圧しなければならない。蓄圧状態から減圧すると液体の状態によっては、過熱状態となり激しい沸騰が発生する。この沸騰により大量の液体水素が蒸発して損失となる。また、この沸騰挙動については、まだ十分に明らかになっていない。

そこで、本研究では液体水素の減圧時における減圧速度や減圧時間の最適値を見つけ、液体水素の沸騰挙動を明らかにすることを目的とする。加圧液体窒素の実験[2]を参考にして、加圧液体水素の減圧試験を行い、温度変化・圧力変化などを含めて蒸発特性を調べたので報告する。

#### 2. 実験装置

実験装置は光学クライオスタート、温度計、圧力計、液面計、流量計、データロガー、高速度カメラ等から構成され、蒸発ガスラインには流量調整用のニードル弁及び減圧用の開閉弁として電磁弁を取り付けている。

光学クライオスタートは、断熱真空槽、液体窒素槽(15.0 L)、液体水素槽(20.0 L)、光学観測窓等から構成されている。液体窒素槽より下に 77 K アルミシールドが取り付けられており、液体水素槽全体が 77 K で熱的にシールドされている。また、光学クライオスタート下部に光学観測窓が取り付けられており、内部の様子を観察することが可能である。

#### 3. 実験方法

液体水素槽に液体水素を一定量(液面位置 110 mm)充填し、電磁弁を閉めて液体水素槽を密封する。ヒーター等の加熱により液体水素を蒸発させ設定圧力まで上げる。電磁弁を開とし、液体水素槽の密閉を解くことで減圧を行う。同時に、

Table 1 Experimental conditions under depressurization.

Test #	Liquid conditions	Set press. [MPaG]	Depress. speed
run1	Stratification	0.2	High
run2	Stratification	0.2	Medium
run3	Stratification	0.2	Low
run4	Saturation	0.2	High
run5	Saturation	0.2	Medium
run6	Saturation	0.2	Low
run7	Saturation	0.4	High
run8	Saturation	0.4	Medium
run9	Saturation	0.4	Low
run10	Stratification	0.4	High
run11	Stratification	0.4	Medium

蒸発ガス流量・内部圧力・液体/気体温度の計測と高速度カメラによる撮影を開始する。以上の方法により、減圧試験を行った。

極低温液体の減圧時における沸騰挙動は、初期の液体状態、設定圧力、減圧速度に大きく依存すると考えられていることから、次のように実験条件を設定した。(1)液体状態は飽和状態(温度均一)と成層状態(温度分布が存在)の 2 種類、(2)設定圧力は 0.4 MPaG と 0.2 MPaG の 2 種類、(3)減圧速度はニードル弁の開度を変えることで複数の条件を設定した。Table 1 に実験条件をまとめた。なお蒸発量は、減圧開始から 0.01 MPaG に達するまでの蒸発ガス流量を近似的に積分して算出した。

#### 4. 実験結果と考察

Fig.1 に run1～run6 で得られた蒸発量を示す。蒸発量と減圧速度の関係に注目すると、加圧液体窒素の場合と同様に、減圧速度が速いものほど蒸発量が少ないという傾向がみられた。これは、減圧速度が遅い場合、緩やかな沸騰が長時間続いたため蒸発量が多くなったと考えられる。したがって、沸騰の激しさよりも沸騰している時間が蒸発量に与える影響は大きいと言える。

飽和状態と成層状態を比較すると、蒸発量が少なかったのは成層状態である。成層状態は、飽和温度に達していないサブクール状態を有しているためエンタルピーが小さく、飽和状態に比べて蒸発量が少なかったと考えられる。

#### 5. まとめ

様々な実験条件を設定し、加圧液体水素の温度、圧力、蒸発量の計測、高速度カメラによる液体水素槽内部の観測を行った。減圧速度による蒸発量の違いについては、過去の加圧液体窒素の場合と同様の傾向が見られた。今後の課題として、減圧速度をより細かく設定し、減圧速度が及ぼす沸騰挙動及び、蒸発損失への影響について詳細に調べること、減圧する液体水素量を変えることによる、蒸発損失率の違いについて明らかにすることなどが挙げられる。

#### 参考文献

1. S. Kamiya *et al.*: Physics Procedia, Vol. 67 (2015) PP. 11-19
2. T. Usui *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) P.36

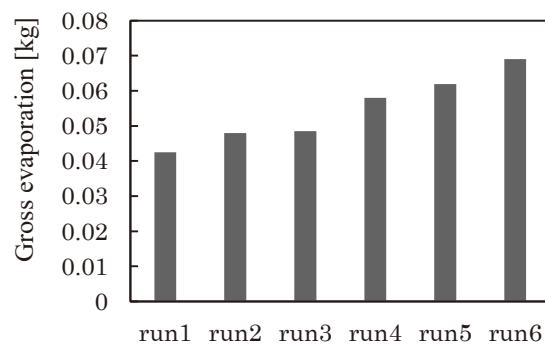


Fig.1 Experimental results of gross evaporation of pressurized LH<sub>2</sub> with set pressure of 0.2 MPaG.

# 横振動下における極低温液体の温度・圧力・蒸発量測定

## Measurements of temperature, pressure and evaporation rate of cryogen under horizontal vibration

北田 一輝, 武田 実, 前川 一真(神戸大)

KITADA Kazuki, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)

E-mail: takeda@maritime.kobe-u.ac.jp

### 1.はじめに

近年、原子力発電や化石燃料の枯渇、地球温暖化などエネルギーに関する問題がクローズアップされている。そのため、これらの問題を解決し得る水素エネルギーが注目されている。そこで、水素エネルギー利用の発展を目指し、大型船による液体水素(沸点 20.3 K)の海上輸送が計画されている[1]。

液体水素の沸点は極低温であり、粘性係数も小さいため、スロッシング(液面揺動)しやすい性質を持つ。よって、輸送時における振動などによって生じる蒸発損失などを明らかにすることは、液体水素の輸送・貯蔵時における安全性および経済性を検討する上で極めて重要である。

本研究では、取扱いが難しい液体水素の代わりに、その前段階として、極低温液体である液体ヘリウム(沸点 4.2 K)と液体窒素(沸点 77.3 K)を対象に横振動実験を行っている。これまでに液体ヘリウムの温度・圧力変化等の実験結果を報告した[2]。今回は、大気圧および蓄圧状態からの横振動実験を行い、液体窒素の温度・圧力・蒸発量を詳しく測定したので、蓄圧試験における温度・圧力変化を中心に解析した結果について報告する。

### 2. 実験装置

実験装置は光学クライオスタット、横振動試験装置、温度計インサート(白金抵抗温度計)、圧力計、真空計、流量計、データロガー等から構成されている。横振動試験装置は、PCの専用ソフトを用いることにより、制御ボックスを介して様々なパラメータを設定することができる。

光学クライオスタットは、断熱真空槽、液体窒素槽(10.0 L)、液体水素槽(13.6 L)、サンプル槽(3.8 L)、光学観測窓等から構成されており、主な素材は SUS304 である。サンプル槽に挿入した白金抵抗温度計(T1~T11)の配置図を Fig.1 に示す。なお、本実験では温度計に 1 mA の直流電流を流して四端子法にて抵抗値を測定し、温度に換算した。

### 3. 実験方法

大気圧と蓄圧の 2 つの状態からの蓄圧試験について述べる。振動数 1 Hz、振幅 10 mm~0 mm(静置状態)として、振動時間 60 分、その後の静置時間 60 分とした。なお、蓄圧下での振動開始圧力は 0.2 MPaG とした。

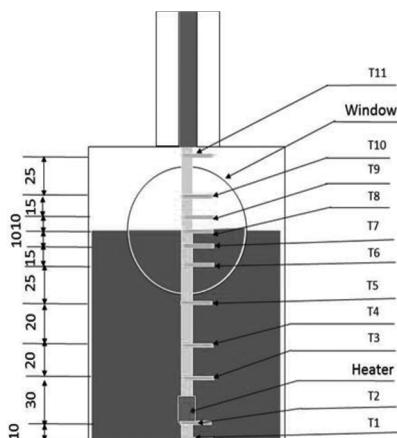


Fig.1 Layout of Pt thermometers inside the sample tank in unit of mm.

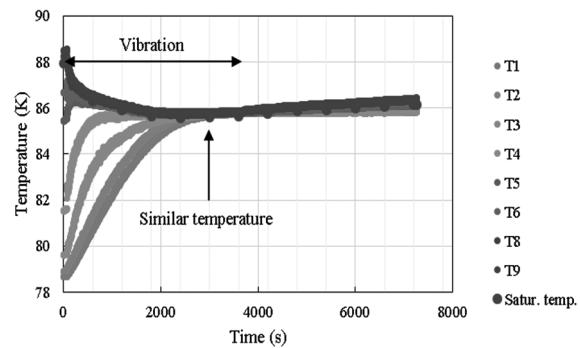


Fig.2 Time chart of temperature under horizontal vibration with amplitude of 10 mm.

はじめに、光学観測窓の中央(温度計 T8 の位置、約 1 L)に液面が来るようサンプル槽へ液体窒素を充填し、蒸発が収まるまで待った。大気圧状態からの試験ではその直後に、また蓄圧状態からの試験ではライトによる加熱で 0.2 MPaG になった直後に、データロガーで計測を開始し、1 分後に横振動を開始した。振動開始と同時にサンプル槽のバルブを閉め、温度・圧力を同時計測した。計測時のサンプリング周期は 1 s とした。

### 4. 実験結果と考察

Fig.2 に 0.2 MPaG、振幅 10 mm における温度変化の図を示す。図中の飽和温度は、圧力の実験値から計算したものである。Fig.2 に示すように、ライトによる加熱によって、振動開始前に液体中での温度分布、いわゆる温度成層が見られた。振幅が大きい場合(10 mm)、この温度成層は振動とともに崩壊を始め、約 3000 s で一様な飽和温度に達した。その後、振動を停止して静置すると、緩やかに再び温度成層を形成して行った。同時計測していた圧力変化を見ると、振動とともに圧力が低下した。この圧力低下は、振幅が大きいほど大きかった。これは、加振により液体窒素が上部の気体に触れることにより、全体の圧力が低下したものと考えられる。

一方、大気圧状態からの振動実験では、サンプル槽下部のヒーターによる加熱によって、振動開始前に液体全体がほぼ飽和温度であった。振幅 10 mm の場合、振動開始とともに蓄圧試験が始まると、圧力上昇に伴い飽和温度も高くなり、液体全体の温度がほぼ一様に増加した。その後、振動を停止して静置すると、温度成層を形成して行った。振幅が小さい場合、加振中にもかかわらず、温度成層が維持された。圧力変化を見ると、振幅が大きいほど加振終了後の圧力上昇が大きかった。振幅 10 mm の場合、液体窒素と液体ヘリウムを比較すると、液体窒素では加振により成層状態が崩壊し、その後の静置により再度成層状態が形成されたが、液体ヘリウムでは加振により成層状態が崩壊することなく維持されていた。

### 参考文献

1. S. Kamiya *et al.*: Physics Procedia, Vol. 67 (2015) PP. 11–19
2. S. So *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) P. 112

# 液体水素用流量計開発のための低温用箔ひずみゲージの温度特性

## Characteristics of foil strain gauge at low temperature for development of liquid hydrogen flowmeter

佐藤 更, 武田 実, 前川 一真(神戸大)  
 SATO Sara, TAKEDA Minoru, MAEKAWA Kazuma (Kobe Univ.)  
 E-mail: 187w603w@stu.kobe-u.ac.jp

### 1. はじめに

今日、地球温暖化をはじめとする環境問題や化石燃料の枯渇が懸念されている中、代替エネルギーとして水素エネルギーが注目されている。燃料となる水素を大量輸送する場合、気体の状態ではなく液体水素(沸点 20 K)の状態で、大型タンクを用いて海上輸送するのが効率的である。水素を媒体とするエネルギー社会に向けて、国際水素サプライチェーン<sup>(1)</sup>を構築するためには、液体水素の海上輸送技術のみならず、荷役技術を確立しなければならない。そのため、液体水素の温度でも使用可能な流量計の開発が必要である。そこで、新たな液体水素用流量計として、ひずみゲージを用いた流量計を考案した。原理としては、ヘリカル流の液体を通す配管の表面にひずみゲージを取り付け、液体を通した際の管内の圧力の変化により生じる配管のひずみ<sup>(2)</sup>を検知すれば、その大きさから管内の圧力を測定し、流量を算出することができるというものである。この仕組みを応用し、新たな液体水素用流量計を開発するためには、低温用ひずみゲージの温度特性について調べることが重要である。そこで、温度変化による低温用ひずみゲージの見かけひずみの把握を目的とし、銅板と液体ヘリウムを用いてひずみ測定を行った。

### 2. 実験装置

#### 2.1 低温用箔ひずみゲージ

Table. 1 は、本実験で使用する低温用箔ひずみゲージ(以下、ひずみゲージ)の性能を示す。ひずみゲージには、共和電業 KFL-5-120-C1-11F3M3<sup>(3)</sup>を使用した。これを銅板(17 mm×24 mm×0.2 mm)に貼り付けてサンプルを作った。

Table 1 Specifications of a foil strain gauge for low temperature<sup>(3)</sup>

Linear Expansion Coefficient	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	11
Gauge Resistance	$\Omega$	120
Gauge Factor	%	2.1
Temperature Compensated Range	$^{\circ}\text{C}$	-196~50

Table 1 に示した通り、ひずみゲージの自己温度補償範囲が-196°C以上 50°C以下のため、この温度よりも低温で使用する場合は、温度補正を行わなければならない。また、それとは別にリード線部分の温度補正も必要である。

#### 2.2 実験システム

実験システムは、液体ヘリウムデュワー、低温実験用プローブ、電流発生源、電圧計、コンピューターで構成されている。また、低温実験用プローブは、試験ホルダ一部、試験ホルダ一部懸架部、信号導線入口、連成計、真空ジャケットで構成されている。

試験ホルダ一部にサンプルを接着し、内部の雰囲気が極低温状態になった液体ヘリウムデュワーに、低温実験用プローブを挿入する。試験ホルダ一部には温度計が設置されているため、サンプルの温度特性を調べることができる。計測用ソフトウェアとして、温度計測には Lab VIEW、ひずみ計測には共和電業ダイナミックデータ集録ソフトウェア DCS-100A を使用した。

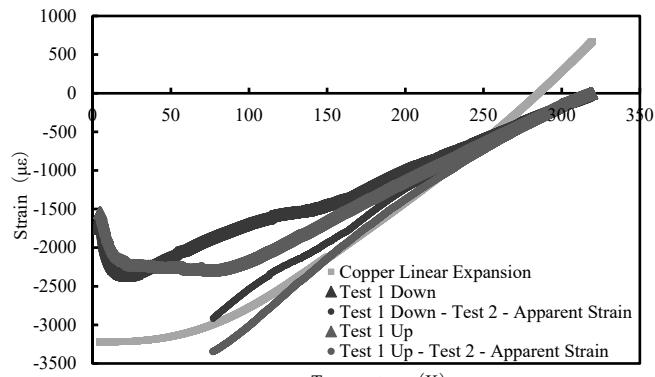


Fig. 1 Experimental result of foil strain gauge

### 3. 実験方法

ひずみゲージで測定される熱膨張は、被測定物の熱膨張とひずみゲージの見かけひずみの差である。本実験の場合、理論上は実験の測定値と銅の熱膨張から、ひずみゲージの見かけひずみを導くことができる。ひずみゲージの見かけひずみは、自己温度補償範囲内の液体窒素温度までは製品情報として製造会社から提示されているが、それ以下の温度はデータがない。したがって、以下の 2 つの実験からひずみゲージの見かけひずみを導くことにした。

#### 【実験 1】1 アクティブゲージ法 3 線式を用いた実験

ひずみゲージを貼り付けた状態で得られる銅の熱膨張の値を測定した。3 線式のプリッジ回路を組んだのは、リード線の温度補正をするためである。

#### 【実験 2】2 アクティブゲージ法(直交配置法)を用いた実験

ひずみゲージの長い方の辺を縦方向とし、銅板上の縦方向と横方向での出力差を調べた。

### 4. 実験結果と考察

Fig. 1 は、実験 1 の温度上昇・降下両方の値を示す。また、その値から実験 2 の平均値と見かけひずみを差引きした値も示す。なお、文献で得た銅の熱膨張も参考のために描く。

実験 2 で得られた測定値の平均を実験 1 のそれぞれの測定値から引くことにより、ひずみゲージの横方向の収縮による影響を消去することができる。そこに見かけひずみを補正すると、銅の熱膨張率が得られると考えられる。実際には、銅の熱膨張の変化よりも傾きが緩やかな曲線が描かれた。ひずみの基準とする温度の設定や、ゲージ率の温度変化なども考慮した更なる解析を行い、ひずみゲージの自己温度補償範囲外の温度特性の考察と補正式の導出結果の詳細については、学会当日に報告する。

### 参考文献

- (1) S. Kamiya, M. Nishimura and E. Harada: "Study on Introduction of CO<sub>2</sub> Free Energy to Japan with Liquid Hydrogen," Physics Procedia 67 (2015) 11-19
- (2) 前川晃 / 辻峰史 / 高橋常夫 / 加藤稔:配管表面ひずみを用いた管内圧力脈動の測定方法の考察, INSS JOURNAL Vol. 20 NT-3 (2013)
- (3) 株式会社共和電業 計測機器総合カタログ 2019 ひずみゲージ 1-41

## 飽和超流動ヘリウム中の急縮小流路で起こる間欠沸騰現象

The geysering phenomena with an abrupt contraction pipe in saturated superfluid helium

高田 順(核融合研);岡村 崇弘(KEK);濱口 真司(核融合研)  
 TAKADA Suguru (NIFS); OKAMURA Takahiro (KEK); HAMAGUCHI Shinji (NIFS)  
 E-mail: takada.suguru@nifs.ac.jp

### 1. 研究背景

飽和超流動ヘリウム(He II)は超伝導加速空洞の冷却等発熱源のある場所から蒸発界面をもつ場所の間をチャネルで繋ぐようなケースで使用される場合がある。He II の実効的熱伝導率計測においてしばしば用いられる加熱部に対してチャネルが縮小流路となっているチャネルが形成されている。こうした系に対して、飽和蒸気圧曲線を超えるような熱流束まで加熱した場合にどのような過程で沸騰状態に遷移するのかについて本研究では実験を行った。

### 2. 実験装置

Fig. 1 で示したような急縮小流路をGFRPで構成し、ガラスデュワー中に設置した。縮小路が内径 5 mm 長さ 50 mm、ヒータの備えられた内径 40 mm 長さ 20 mm となっている。壁厚さは 10 mm 以上を確保しており、He II における熱輸送量に比べて十分に小さいと言える。ガラスデュワーは大型ロータリーポンプに接続されており、バルブ制御によって飽和蒸気圧を制御することで He II 温度を制御している。温度計には未校正のセルノックスを使用し、飽和蒸気圧による校正を行ったうえで換算している。

熱流はチャネルの底部に設置したフィルムヒータを張り付けた無酸素銅の薄板(t2)を介して印加され 4 端子法により熱流量が測定される。ヒータには定電流を印加した。内部の温度計、ヒータ配線は GFRP にあけられた穴から引き出されエポキシ樹脂によって封止されている。配線や GFRP による熱侵入量は、依然として He II の熱輸送量に比べてわずかである。こうしたセットアップであるため、急縮小路における熱流束に比べ、最も温度の高いヒータ部においてはその熱流束は極めて小さい。そのため、He II バス温度とチャネル内の温度差のほとんどが急縮小部で形成される。

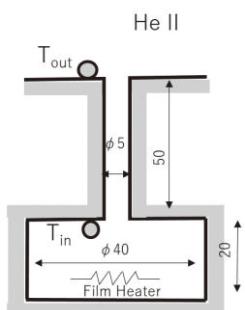


Fig.1 Schematic illustration of abrupt contraction channel  
 3. 実験結果

印加する定電流を増加させ、 $T_{in}$  が液頭圧を考慮した飽和蒸気圧曲線上に到達してもなお、沸騰を起こさないことが分かった。さらに電流を増加させると  $T_{in}$  がある温度に到達した後、特徴的な温度振動を見せる。ガラスデュワのスリットからの目視観測では気泡が振動している様子が見られ過熱状態を伴った間欠沸騰であると考えられる現象が起つた。Fig.2 に典型的な間欠沸騰が起きている際の温度履歴を示す。流路内部の温度計が規則的に振動し、出口直近の温度計については全く振動していない。また、この温度振動の最低温度がおおよそ液頭圧を考慮した飽和蒸気圧曲線上の温度にあるた。

そして、Fig.3 に示すように温度が上昇し下降に転じるまでの時間  $t^*$  には熱流量依存性がみられ、熱流量を増加させる

ほどその時間は短くなる。一方で温度振動の山から谷への下降時間は熱流量によらず一定である。この温度上昇過程の特徴的時間  $t^*$  には下記の関係が現れることが分かった。

$$(Q-Q') \cdot t^* = \text{const.} \quad (\text{Eq.1})$$

この関係における  $Q$  は与えた熱流量であり  $Q'$  及び定数項は He II 温度に依存している。 $Q'$  は、液頭圧を考慮した際に  $T_{in}$  が飽和蒸気圧曲線上に到達する熱流量とおおよそ一致している。また、この定数項となる熱量は、温度差と熱容量の積におおよそ一致している。つまり、飽和蒸気圧曲線上の温度差が生まれる臨界熱流束が細管の熱輸送限界であり、その臨界熱流束以上の熱流量が印加された場合には、相転移するまでの間温度は準安定状態のまま上昇し、ひとびと気泡が現れると流路内の液が押し出され準安定状態になった液体が沸騰によって入れ替えられる間欠沸騰が起きていると考えられる。

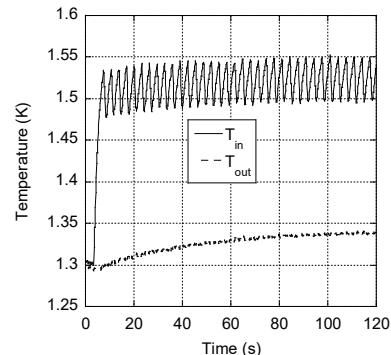


Fig.2 Typical time variation of temperature at  $T_b = 1.3$  K,  
 $Q = 487.8$  mW

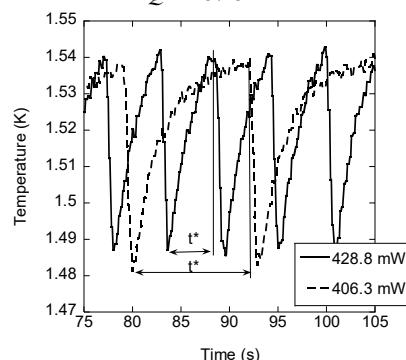


Fig.3 Temperature oscillation of  $T_{in}$  during boiling

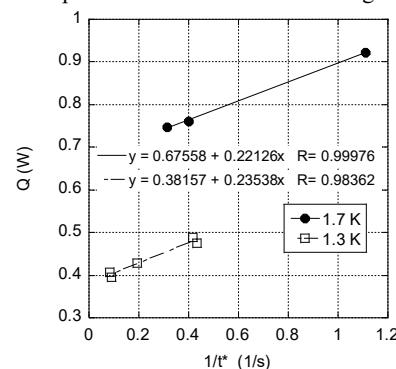


Fig.4 correlation between the applied heat flows and the characteristic periods  $t^*$

# 低熱伝導性被覆面を用いた銅球表面上の 自然対流飽和沸騰熱伝達の促進に関する研究

## Study on enhancement of natural convection saturated boiling heat transfer on copper sphere surface using low thermal conductive coating layer

廣谷 俊樹, 大久保 英敏(玉川大); 池内 正充, 大野 隆介(前川)  
 HIROTANI Toshiki, OHKUBO Hidetoshi(Tamagawa Univ.) ; IKEUCHI Masamitsu, ONO Ryusuke(MAYEKAWA)

### 1. はじめに

自然対流飽和沸騰における熱伝達の改善策として、金属のような高熱伝導面に樹脂のような低熱伝導の物質を被覆することで沸騰熱伝達を促進する、「断熱層のパラドクス」と呼ばれる現象[1]を沸騰冷却技術に応用することが効果的である。本研究では、超電導機器の冷却を想定し、銅球表面に低熱伝導の被覆層を設けた試験体を液体窒素に浸漬したときの冷却試験を実施した。

### 2. 実験装置および方法

本研究では、直径25mmの無酸素銅球を用いて沸騰冷却実験を行った。銅球表面は鏡面仕上げを行い、実験ごとにエタノール液槽内で超音波洗浄を行った。銅球の温度は、素線径0.1mmのK型熱電対を用いて、銅球中心の温度を測定した。Fig.1に沸騰冷却実験装置の概略を示した。銅球伝熱面を所定の初期温度から液体窒素中で浸漬冷却させ、液体窒素の飽和温度になるまでの温度履歴を測定した。伝熱面の温度履歴はデータロガーによって記録し、以下に示す集中熱定数系近似によって熱流束 $q$  [W/m<sup>2</sup>]を求めた。

$$q = \frac{1}{3} r \rho c_p \frac{dT}{d\tau} \quad (1)$$

ここで、 $c_p$ :銅の比熱 [kJ/(kgK)],  $r$ :銅球半径 [mm],  $\rho$ :銅球密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $T$ :伝熱面温度 [K],  $\tau$ :時間 [s]である。

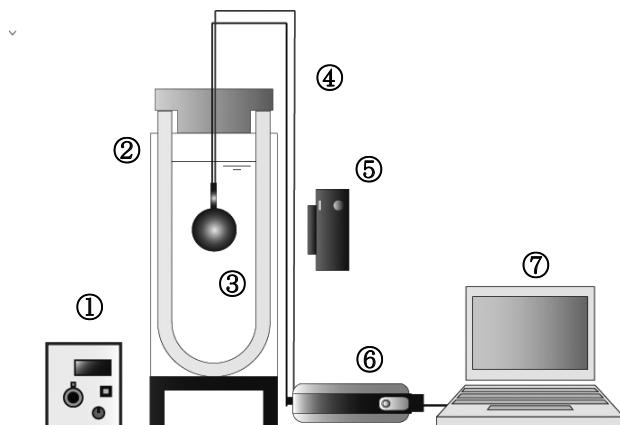


Fig.1 Experimental equipment schematic

### 3. 実験結果および考察

本研究では、沸騰冷却に及ぼす表面被覆層の影響を検討するため、銅球裸面表面に霜層および3Dプリンターを用いて作成した樹脂製のメッシュを被覆した。Fig.2に冷却曲線、Fig.3に沸騰曲線をそれぞれ示した。Fig.2から分かるように、銅球裸面を冷却した場合と比較して、霜層被覆層では約18倍、樹脂製のメッシュを用いた場合では1.5~2.2倍に冷却速度が向上した。Fig.3の沸騰曲線から明らかなように、本研究の実験条件範囲内では、霜層被覆面を用いた場合、膜沸騰域が無く、銅球裸面と比較して、遷移沸騰域、限界熱流束およ

び核沸騰域で伝熱が促進されている。一方、樹脂製のメッシュを被覆層として用いた場合、膜沸騰および核沸騰の低過熱度域で熱伝達が促進されることが分かった。

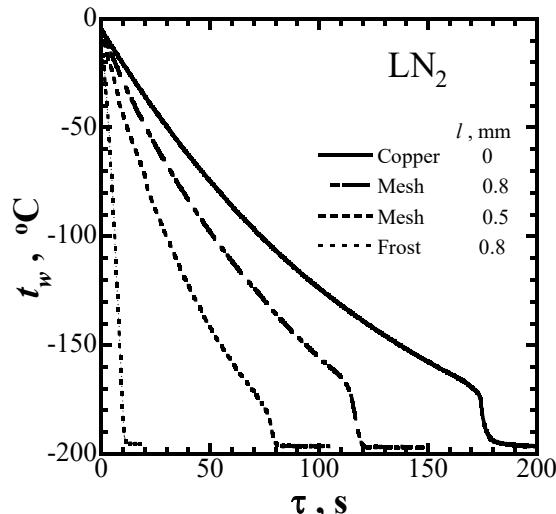


Fig.2 Effect of coating layer on cooling curve

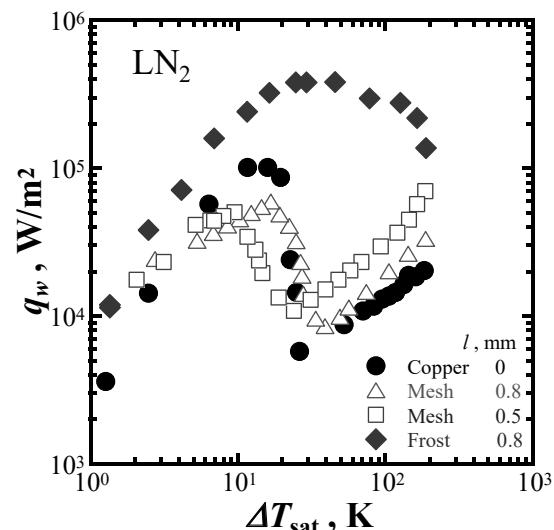


Fig.3 Effect of coating layer on boiling curve

### 4. おわりに

低熱伝導の被覆層とし、霜層および樹脂製のメッシュを用いて浸漬冷却実験を行った。結果として、銅球裸面を冷却した場合と比較して、霜層被覆層では約18倍、樹脂製のメッシュを用いた場合では1.5~2.2倍に冷却速度が向上した。さらに、断熱層のパラドクス現象の欠点である核沸騰域での熱伝達の低下が解消されることが確認できた。

### 参考文献

- Chandratilleke, Nishio: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol23 (1988) pp.128-133

# ガス循環システムによる SPICA 冷却系の冷却運転の持続性向上に関する研究

## Study for continuity of cooling operation of SPICA cryogenic system by adding refrigerant circulation system

檜崎 勝弘(住友重機械)  
NARASAKI Katsuhiro (SHI)  
E-mail: kth\_narasaki@shi.co.jp

### 1.はじめに

SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) は次世代赤外線天文衛星として、2020年代後半に打上げる計画で検討されているJAXAのプリプロジェクトである。SPICAの冷却系は2.5mクラスの赤外望遠鏡を8K以下に、検出器をサブケルビンに軌道上で冷却するために、多段の放射冷却と多数、多段の機械式冷凍機システムにより構成される。最新の機械式冷凍機システムの構成は、断熱消磁冷凍機と吸着冷凍機の組み合わせたサブK冷凍機と、予冷機として2段スターリング冷凍機を3台有する各2式の1K-JT (Joule-Thomson) 冷凍機、4K-JT冷凍機である。更に、望遠鏡の輻射シールドの冷却用に2台の2段スターリング冷凍機が搭載される。[1]

ここでは、予冷機やJT冷凍機の劣化や故障時にSPICA冷却系の冷却運転の持続性を向上させる目的で検討しているガス循環システムに関して報告する。ガス循環システムのSPICAの様な機械式冷凍機システムへの追加は信頼性向上ばかりでなく、伝導ロスや冷凍機の消費電力や台数の削減、更に冷却系の構造設計の自由度も増加させるメリットがある。

### 2.システムフロー図

Fig.1 に予冷機と JT 冷凍機で構成される1K 或いは4K 冷凍機が 2 式ある冷却システムに 2 系統のガス循環システムを追加したシステムフロー図を示す。ガス循環システムは循環ポンプと 2 式の熱交換器(C-HEX1&2)と JT 冷凍機と予冷機の熱交換のための熱交換部を連結するガス循環のための細いパイプ(例えば、ステンレス製)から構成される。

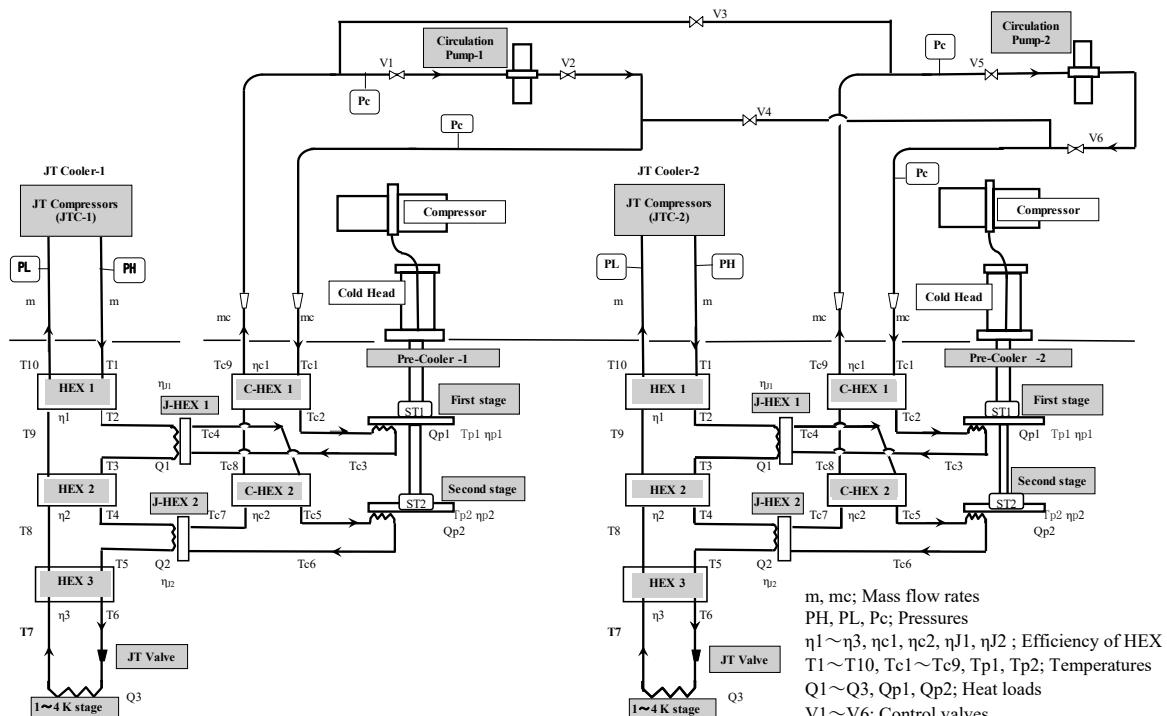


Figure 1 System flow diagram of JT coolers adding refrigerant circulation system

### 3.運転形態

通常運転時は電磁弁 V3 と V6 を閉にして、4K 冷凍機それぞれが独立運転する。予冷機や JT 冷凍機が故障した場合は故障した方の機器を停止させ、片方の 4K 冷凍機の運転パワーを増加させて運転する。この時、通常は停止した予冷機は大きな伝導による熱侵入源になるが、連結している細いステンレス製のパイプにより、大幅に低減される。循環ポンプが故障した場合は V3 と V6 を開にし、1 台の循環ポンプで 2 系統のガス循環システムを運用する。

### 4.関係式の導出

Fig.1 に示した記号を基に、JT 冷凍機の関係式は[2]を参照して頂き、ここではガス循環系の 2 段ステージでの熱負荷と流量、熱交換量効率の関係式は以下の様になる。

$$\begin{aligned} Q_{p2} - Q_{p1} = & (1 - \eta_{c2}) \{ m_c (h_3 - h_5) + (Q_1 - Q_2) (m_c / m + 1) \\ & + Q_2 / \eta_{J2} - Q_1 / \eta_{J1} \} \end{aligned}$$

ここで、 $h_3$  と  $h_5$  は圧力 PH で温度 T3, T5 のエンタルピーである。1 段ステージの  $Q_{p1} - Q_1$  の関係式も同様に算出できる。

### 参考文献

1. K. Shinozaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p.42
2. K. Narasaki: Cryogenics Vol.74 (2016) p.59-65

## 超電導発電機の回転子を対象とした液体水素給排気システム

Development of liquid hydrogen cooling system for a rotor of superconducting generator

原 真太郎, 白井 康之, 塩津 正博, 石見 佳紀, 川崎 理香子, 松本 太斗(京大);

小林 弘明, 成尾 芳博, 野中 聰, 稲谷 芳文(JAXA);

平井 寛一(大陽日酸); 吉永 誠一郎(IHI); 田中 穎一(熊本高専)

HARA Shintaro, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro, IWAMI Yoshiki, KAWASAKI Rikako, MATSUMOTO Taito (Kyoto-Univ);

KOBAYASHI Hiroaki, NARUO Yoshihiro, NONAKA Satoshi, INATANI Yoshifumi (JAXA);

HIRAI Hirokazu (TNSC); YOSHINAGA Seiichiro (IHI); TANAKA Teiichi (Kumamoto KOSEN)

E-mail: hara.shintaro.45m@st.kyoto-u.ac.jp

### 1. 序論

本研究グループでは液体水素冷却超電導発電機の実現に向けて研究を行っている。ヘリウム冷却による超電導発電機の研究については盛んに行われてきたが[1], 超電導発電機を対象とした回転子の中に液体水素を安定的に給排気させた実験例は世界的にもなく、ヘリウム冷却超電導発電機で使用した知識や技術が、水素の場合でも適用できるか分かっていない。そのため本研究では超電導発電機の回転子を模擬した試験装置を作成し、液体水素給排気試験を行った。

### 2. 試験装置

Fig. 1 に本試験で使用した液体水素冷却回転試験装置の概要図を、Table1 に諸元を示す。回転液体水素槽は、輻射シールド(100~150K)を持つ真空外槽中で 15 kW の誘導モータによって駆動される。液体水素は貯槽タンク(30m<sup>3</sup>)からバッファタンク(耐圧 2MPa), コントロールバルブ(CV)を介して断熱二重管で水素トランസفاーカプリング(HTC)に供給され、回転軸中心から回転槽へ導入される。バッファタンクの圧力と液面を監視し、CV で供給流量を制御する。

HTC が繋がっている反駆動側シャフトは、内周側が液体水素供給用流路、外周側が水素ガス排気用流路となる同軸多層型構造である。液体水素槽に供給された液体水素は、遠心力により円筒状の液面を形成する。槽内で蒸発した水素を水素槽中心付近の排気孔より半径方向外周へ導き、トルクチューブに設置したヒータによって常温近くまで温めた後、再び半径方向内周、軸方向の排気流路へ導く。軸の端部は磁性流体シールで回転系と外部静止系とを分離されており、水素

ガスは水素ベントラインへ安全に排出される。

水素槽駆動側の面に、Fig. 2 に示すFRP計測盤を設置し、軸対称に埋め込んだシリコンダイオード温度計(8点)と MgB<sub>2</sub> 超電導液面計(2本)により槽内の温度分布や、液面のモニタを行う。

### 3. 試験内容・結果

回転子を 1200 rpm で回転させながら、CV を開いて送液を行い常温からの冷却試験を行った。1 日目は 290 K から 123 K まで約 150 分で冷却し、夜間停止放置した。2 日目は、軸振動に注意しながら再び 1200 rpm で回転させながら 224 K から 21 K(貯液)まで約 460 分で冷却した。

Fig. 3 に 21 K 到達前後の槽内温度と回転速度を示す。図中の 608 分で、中心から 230 mm の T4 が急激に下がり、約 21 K に張り付いているのが分かり、T4 温度計の位置まで液面が形成されていることが確認できる。さらに 50 分後に半径 190 mm に位置する T3 が、その 44 分後に半径 150 mm に位置する T2 が液体水素温度へと到達した。T2 まで液面が確立しているため、液体水素は槽内の全容量の約 60%にあたる約 16.3 L が貯液されたことになる。その後、送液を絞った後に、回転数を 1800 rpm に上げ、定格運転での液体水素の液面の形成を確認した。3 日目では液面形成の後に、液体水素を供給しながら、回転数を変動させる試験やパルス入熱を与える試験も行ったが、給排気に問題は見られず、安定的に供給が行えていることが確認でき、加えて、流量を調整することによって、ある程度の液面位置制御も可能であることが実証できた。

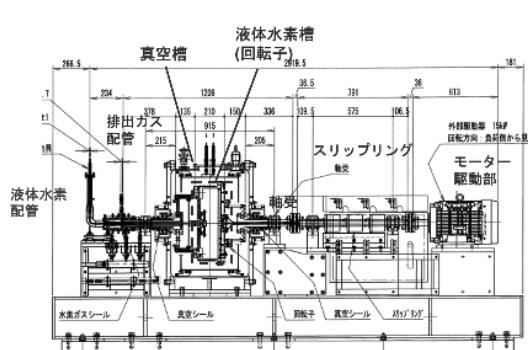


Fig 1. Overview of the system

Table 1. Specifications.

定格回転数	1800 rpm
回転子 外径	604 mm
回転子 軸間距離	915 mm
回転子 質量	255 kg
液体水素貯蔵槽 内径	504 mm
液体水素貯蔵槽 深さ	129 mm
試験装置 全長	3367 mm
試験装置 幅	1367 mm

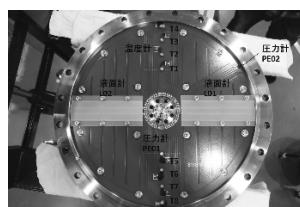


Fig. 2 Measuring equipment of rotating cryostat.

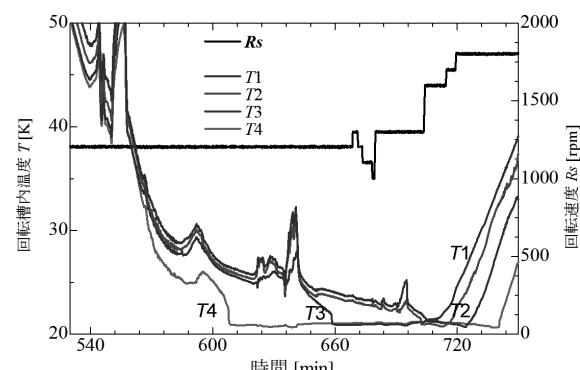


Fig 3. Tank temperature graph

### 謝辞

本研究の一部は、JST 先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の助成を受け実施したものである。

### 参考文献

- [1]. H. Yoshimura, et. al. : J. Cryo. Soc. Jpn, Vol.24 No.1 (1989) p50-54

## 磁気冷凍による高温超伝導コイルの高効率冷却に関する研究

### Study on HTS Coil Cooling Assist Technology by Magnetic Refrigeration

平野 直樹, 小野寺 優太, 三戸 利行(NIFS); 永井 せつら, 岡村 哲至(東工大)  
 HIRANO Naoki, ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki (NIFS); NAGAI Setsura, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)  
 E-mail: Hirano.Naoki@nifs.ac.jp

#### 1. はじめに

最近、ヘリウムを安定的に入手することが困難となり、極低温実験ができないなど、影響がでている。この状況は一時的なものではなく、今後も続くと考えられるため、ヘリウムに頼らない極低温システムの開発に着手した。その一方として、高温超伝導コイルの冷却に、発生する磁場と磁気冷凍技術を組合わせて冷却をアシストする技術の研究を開始した。原理検証試験を実施したのでその結果を中心に報告する。

#### 2. 磁気冷凍による冷却アシスト技術

磁気冷凍技術を使用した室温付近のヒートポンプの研究開発は、すでに多くの報告がある[1] [2]。磁気冷凍により温度変化を得るために、磁気作業物質に磁場の変化を与える必要があり、従来の磁気冷凍技術としては、磁場発生源と磁気作業物質との距離を変化させる方法や、電磁石などの電源を制御して磁場変化を得る方法が知られている。しかしながら、位置を変化させるためには大きな駆動力が必要であり、電源制御にはオン/オフに伴う損失があるため、全体的な効率が低下してしまう。この問題を解決する手法として、磁場発生源と磁気作業物質の隙間に磁気遮蔽体を繰り返し挿抜することで磁場変化を得る方式を検討している。磁気遮蔽体による磁気冷凍技術を利用した超伝導コイル冷却アシスト技術の概念をFig.1に示す。

#### 3. 原理検証試験

磁気遮蔽体により磁気熱量効果が制御できることを確認する原理検証試験を行った。試験では、磁気遮蔽体の有無による磁気熱量効果への影響を、室温にて永久磁石を用いた簡単な装置で実施した。試験装置の外観をFig.2に示す。

今回の試験では、磁気遮蔽体を駆動するのではなく、磁気作業物質を駆動する装置となっている。磁気作業物質はMnFe系を用いた。

磁気遮蔽体として、3種類の材料(純鉄、パーマロイ、電磁鋼板(ESS))を用いて試験を行った。3mm厚の純鉄の磁気遮蔽による磁気熱量効果への影響を、磁場分布解析結果とともにFig.3に示す。

Table 1 には、3種類の磁気遮蔽体による磁気遮蔽効果を解析結果と合わせて示す。

磁気作業物質が受けける磁場変化に応じて磁気熱量効果が表れることが確認された。一方、十分な遮蔽効果を得るためにには磁気遮蔽体の体積が必要であることも解析から確認されており、軽量・コンパクトな遮蔽体の実現が課題である。

Table 1 Magnetic field at the center of the simple test equipment

	No Shield	Pure Iron	Permalloy	ESS
Analysis	0.647 T	0.474 T	0.503 T	0.380 T
Experiment	0.65 T	0.45 T	0.53 T	0.35 T

#### 4.まとめ

磁気遮蔽により磁気熱量効果が影響を受ける原理検証を行い、磁気遮蔽体の駆動により磁気冷凍を実現できる可能性を確認した。今後は、超伝導コイルから発生する磁場を軽量・コンパクトに遮蔽できる材料や形状の検討を進め、超伝導コイル冷却をアシストできる磁気冷凍システムの実現を目指す。

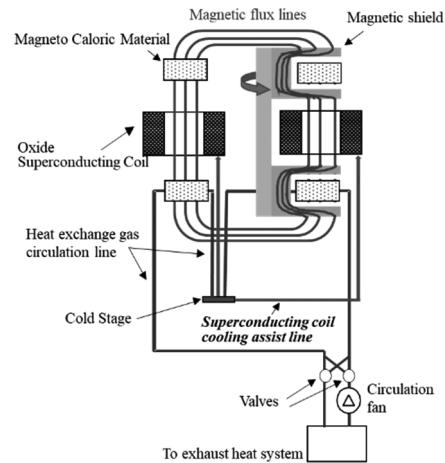


Fig.1 Concept of coil cooling assist using magnetic refrigeration technology by magnetic shielding.

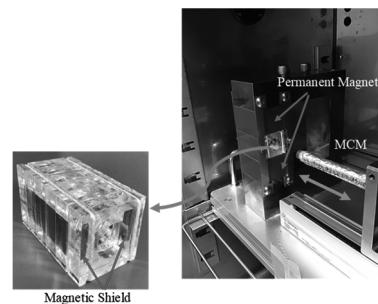


Fig.2 Simple test equipment on magneto caloric effect by magnetic shielding.

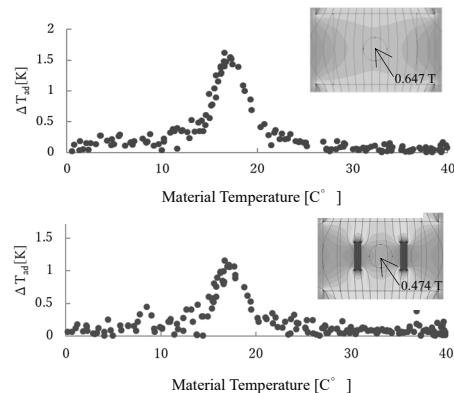


Fig.3 Measurement results of magnetocaloric effect.

#### 謝辞

本研究の一部は、JST-ALCA (JPMJAL1408) の支援を受けて行ったものである。

#### 参考文献

1. N. Hirano, et al.: Advances in Cryogenic Engineering 47 (2002) p.1027-1034
2. Paulo V. Trevizoli, et al.: Science and Technology for the Built Environment 22 (2016) p. 507-519

## ステップピストンパルス管冷凍機のリニアコンプレッサーマッチコールドヘッド

Linear compressor matching cold head in a step piston pulse tube refrigerator

朱 紹偉(同濟大学)

ZHU Shaowei (Tongji University)

E-mail: swzhu2008@yahoo.com

### 1. INTRODUCTION

A step piston pulse tube refrigerator can be considered as a modification of an inertance tube pulse tube refrigerator with a step piston compressor, whose step piston generates additional expansion space connecting to the buffer to recover the expansion power. Its theoretical efficiency is the same as Carnot efficiency. It could be effective for deep freezer due to its high theoretical efficiency. The matching of the step piston linear compressor and cold head is important for the linear compressor fully power output in a pulse tube refrigerator<sup>1</sup>. A numerical model with step piston type linear compress is made to simulate a step piston pulse tube refrigerator, in which how the linear compressor matches the cold head is shown. It could be a design guide for the refrigerator.

### 2. STRUCTURE

Figure 1 is the schematic of the step piston pulse tube refrigerator. The linear compressor has 1 kilowatt standard input power with piston diameter 100mm and spring stiffness 150N/mm, and piston step ratio 0.5, which is the expansion space cross area over the total piston cross area. The coaxial regenerator is  $\Phi 70 \times 50$ mm, the pulse tube is  $\Phi 40 \times 110$ mm with wall thickness 0.5mm, inertance tube is  $\Phi 18 \times 1450$ mm, buffer volume is 1 liter. Room temperature is 300K, refrigeration temperature is 180K, charging pressure is 2.5MPa with helium gas. Operation frequency is 100Hz.

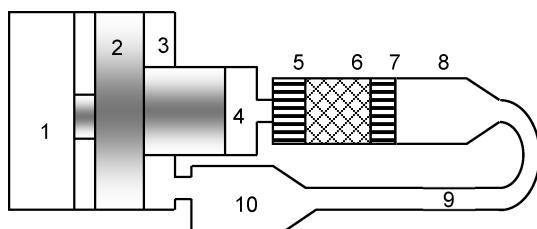


Figure 1 Schematic of step piston pulse tube refrigerator

- 1.linear motor
- 2.step piston
- 3.expansion space
- 4.compression space
- 5.after cooler
- 6.regenerator
- 7.cold heat exchanger
- 8.pulse tube
- 9.inertance tube
- 10.buffer

### 3. DEAD VOLUME EFFECT

In general case, a linear compressor should work at resonant point with rated current and displacement for fully power output with high efficiency. When the piston diameter and spring stiffness are fixed, dead volume between piston head and after cooler can be changed to adjust the current and displacement. For each dead volume, there is a piston weight to let the compressor work at resonant point.

Figure 2a shows the refrigeration efficiency versus inertance tube length and dead volume which represented by the static distance between after cooler and piston head. The optimum length of the inertance tube decreases with the increase of the dead volume. In ordinary inertance tube pulse tube refrigerator, the optimum length of the inertance tube is almost not influenced by the dead volume. So, with the increasing of the step ratio, the dead volume becomes a stronger parameter influencing the optimum inertance tube length. The cooling power is shown in figure 2b. The optimum length of the inertance tube is a little shorter than that for the optimum efficiency. With the dead volume increases, the piston mass, current and output power decrease, the displacement increases.

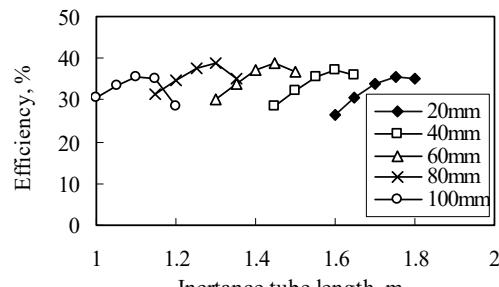


Figure 2a Refrigeration efficiency

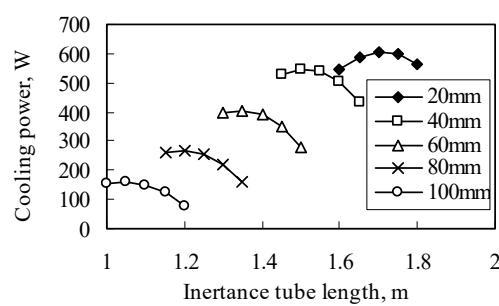


Figure 2b Cooling power

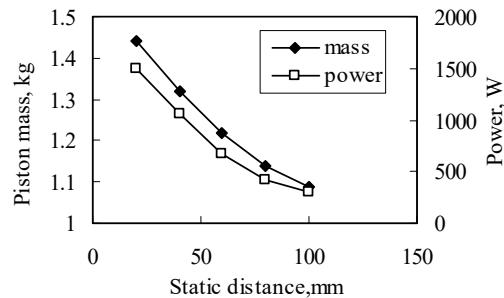


Figure 3a Current and displacement

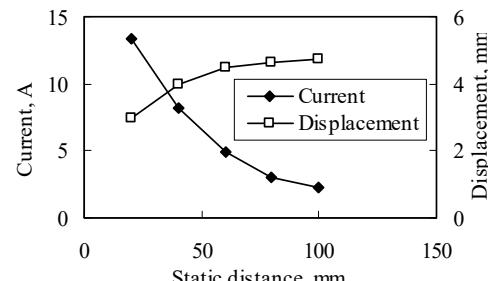


Figure 3b Mass and output power

### 4. CONCLUSION

Optimum inertance tube length was influenced by the dead volume. With the increase of the dead volume, current, mass and output power decreases, while displacement increases when the piston diameter and spring stiffness are fixed.

### REFERENCES

1. S. Zhu: Cryogenics, Volume 97, 2019, Pages 70-76

## 過熱液体の突沸現象を応用した高温超伝導機器の局所温度上昇検出 ～液体窒素を用いた基礎的実験

Applying a vapor explosion in superheated liquids to detection of local temperature rise for high-temperature superconducting applications

高畠 一也 (NIFS)  
TAKAHATA Kazuya (NIFS)  
E-mail: takahata@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

細管に液体を封入し外部から加熱すると、液体が沸点に達しても沸騰せず液相を保ち、準安定な過熱状態になることが知られている。さらに温度を上げるとある決まった温度(過熱限界温度)で急激な沸騰(突沸)を起こす。液体窒素の場合は約 110K である[1]。この細管内の突沸現象を応用することにより、超伝導機器における局所温度上昇を圧力計 1 個で検出できると考えた。本研究では、サブクール窒素を封入した長さ約 16 m の細管に対し、異なる二箇所のいずれかを局所的に加熱する実験を行い、細管内で発生する突沸現象を端部の圧力計で検出できることを実証する。

### 2. 実験方法

図 1 に実験装置の模式図を示した。外径 1/16 インチ(1.59 mm)、内径 0.99 mm、長さ 16 m のステンレス配管をコイル状に巻き、中央部にニクロムヒーター線を巻き付けた長さ 200 mm の配管をどちらか一端に接続した。ヒーターの位置は図中の I または II となる。ヒーターを取り付けた配管の材料は、ステンレスまたは銅である。配管の一端を閉止し、もう一端を 2 m 延長し、室温空間にあるデジタル圧力計に接続した。

配管内を真空にした後、圧力調整器で 0.15 MPa の窒素ガスを導入した。コイル部をデュワーに挿入し、飽和液体窒素で浸漬冷却した。配管内の窒素ガスが液化し、圧力が一定となった後、ガス導入バルブを閉め、配管内部を封止した。

ヒーターによりステップ状に加熱し、ヒーターと配管の間に挿入した銅コンスタンタン熱電対で温度を測定するとともに、圧力計により圧力変化を観測した。

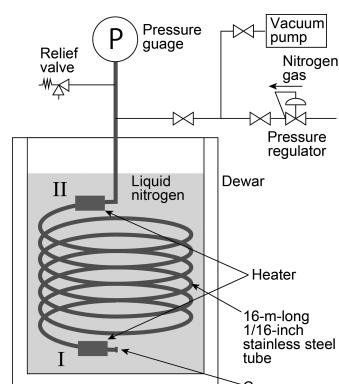


Fig. 1 Schematic experimental set-up.

### 3. 実験結果

図 2 に測定結果の一例を示す。ヒーター加熱を開始してから約 25 秒後に 110 K に達し、圧力計の指示が 0.16 MPa から 0.29 MPa までステップ状に変化した。0.15 MPa における沸点は 81 K であり、110 K で起るこの現象は過熱液体の突沸によるものと考えられる。

図 3 には、これまでに圧力変化によって観測した突沸温度を、ヒーターの位置、配管の材質を変えた 3 条件についてまとめた。横軸は突沸直前の温度増加率を示す。温度増加率が

小さい場合は、液体窒素の突沸限界温度である 110 K とほぼ一致し、3 K/s より大きな場合は、突沸温度の減少が見られた。温度変化率が大きな場合は、液体に径方向温度分布ができることが影響していると考えられる。ヒーター位置、配管材質の影響は小さかった。

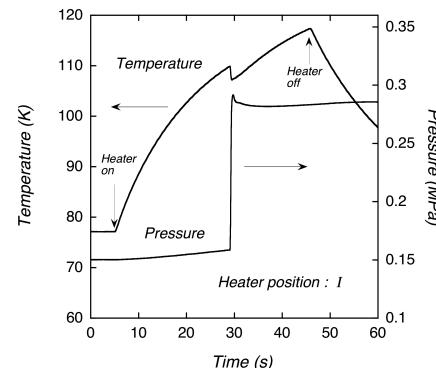


Fig. 2 Temperature and pressure evolution during the heat input at the position I.

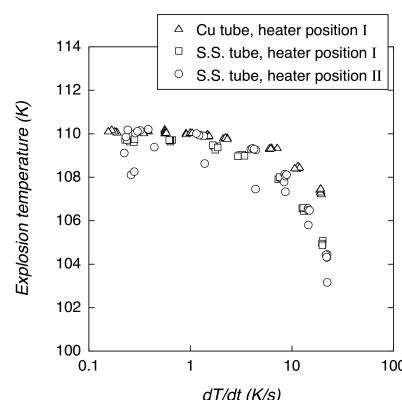


Fig. 3 Explosion temperature vs. temperature increase rate

### 4. 考察とまとめ

今回は 16 m 長の配管で実験したが、配管の材質、加熱位置に関係なく、圧力計によって局所温度上昇を検出できた。圧力が音速で伝播することを考慮すると、キロメートルオーダーの細管でも局所温度上昇を検出できると考えられる。また、液体の種類と圧力によって過熱限界温度が変化するため、検出する設定温度の自由度もある。この手法が超伝導・低温機器のクエンチや温度異常検出に応用できる可能性は高い。

### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(19K04340)の助成を受けたものである。

### 参考文献

- K. Nishigaki, Y. Saji, Jpn J. Appl. Phys. 20 (1981) 849.

## 室温磁気冷凍システムにおける熱交換器の最適形状化に関する研究

Research on optimization of heat exchanger for magnetic refrigeration system

安部 勇太, 岡村 哲至(東京工業大学); 裴 相哲(サンデン AT)

ABE Yuta, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); BAE Sangchul (Sanden AT)

E-mail: abe.y.aq@m.titech.ac.jp

冷凍空調機器のノンフロン化を実現するため、磁性材料の持つ磁気熱量効果を利用した室温磁気冷凍機の研究が行われている。先行研究より、磁気再生機(Active Magnetic Regenerator; AMR)内にキュリー温度の異なる複数の磁性材料を階層状に充填することによって、磁気冷凍機の最大温度スパンが拡大することが明らかとされている[1, 2]。本研究は、磁気冷凍システムを構成する要素機器のうち、冷却側の熱交換器に注目した。Fig.1 のように冷却室内の空気と AMR から流出する低温の水が熱交換する熱交換器を設計し、その性能について考察する。室温磁気冷凍機を運転するとき、1T の磁場変化で AMR 内の磁性材料の断熱温度変化量は約 2K である。もし、AMR から流出した水が冷却側の熱交換器内を流れ再び AMR に入ると、その温度が AMR を出たときより 2K より高くなりすぎると、AMR 内の温度分布が定常に保てなくなる可能性がある。すなわち、AMR と熱交換器内を出入りする水の温度差が 2K 以下となるような熱交換器が必要となる。また、実際に磁気冷凍システムに熱交換器を用いる場合は、水を循環させるためのポンプと熱交換器に送風するためのファンと永久磁石を駆動させるためのモーターの動力を熱交換器の冷凍能力から引いて得られる正味の冷凍能力を考える必要がある。

まず、フィン・チューブ型の熱交換器について考察する。拘束条件としては、清涼飲料水などの冷蔵保存庫をイメージし、熱交換器の寸法を幅×奥行×高さが 1.1m×0.2m×0.05m、水配管長さ 1.1m、配管径 8mm、配管厚み 1mm、フィン厚み 1mm、磁気冷凍機の運転条件などを考慮して、水の体積流量 4.5L/min、空気の流速 2.8m/s を用いる。これらの拘束条件を下にパイプ数、チューブピッチ、フィン数、フィンの種類(プレーン矩形フィン、プレーン三角形フィン、ルーバーフィン等)をパラメーターにとったときの正味冷凍能力を比較するとともに、形状の変化が磁気冷凍システムの特性に与える影響を考察する。計算方法として、 $\varepsilon$ -NTU 法を用いる。Fig.2 は、チューブ数が 36、高さ方向チューブピッチが 14mm、水平方向チューブピッチが 17mm でプレーン矩形フィンを用いたフィン・チュ

ーブ型の熱交換器を単体で作動させたときの正味冷凍能力とフィン数の関係のグラフである。ただし、熱交換器単体で動作させているため、モーターの動力は考慮していない。Fig.2 から分かるようにフィン数の増加に伴い、冷凍能力は増加するが、正味冷凍能力は、ファンの動力が増加するため、一定のフィン数で最大値を示したのちに減少する。

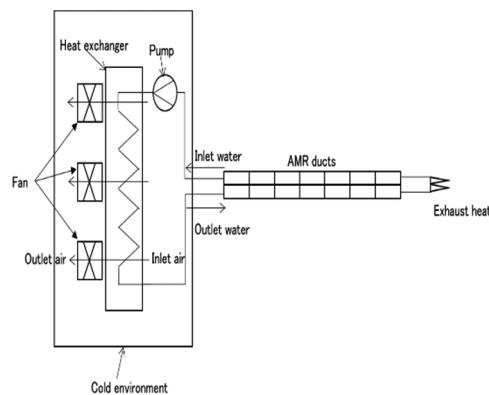


Fig.1 Schematic diagram of magnetic refrigeration system

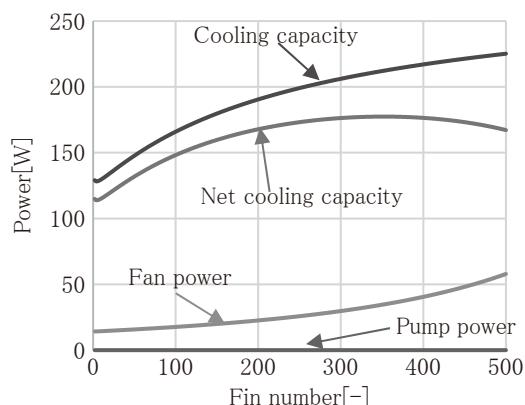


Fig.2 Each power and fin number

### 参考文献

1. M. A. Richard, et al.: Journal of Applied Physics, Vol. 95 (2004) p.2146–2150
2. C. Zimm, et al.: International Journal of Refrigeration, Vol.29 (2006) p.1302–1306

## 高電流密度 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材の熱処理条件による Sn の拡散挙動

Sn diffusion behavior for high critical current density Nb<sub>3</sub>Sn wires by heat-treatment condition

村河 広樹, 小黒 英俊(東海大); 川嶋 慎也(神戸製鋼); 菅野 未知央, 萩津 透(KEK); 淡路 智(東北大):

BALLARINO Amalia, HOPKINS Simon(CERN)

MURAKAWA Hiroki, OGURO Hidetoshi(TOKAI UNIVERSITY); KAWASHIMA Shinya(KOBELCO); SUGANO Michinaka,

OGITSU Toru(KEK); AWAJI Satoshi(TOHOKU UNIVERSITY); BALLARINO Amalia, HOPKINS Simon(CERN)

E-mail: 0CAJM052@mail.u-tokai.ac.jp

### 1. 緒言 Introduction

欧州原子核研究機構(CERN)では新たな加速器を開発する上で、Nb<sub>3</sub>Sn 線材を使用することを考えている。このとき Nb<sub>3</sub>Sn 線材に求められる臨界電流密度は 4.2 K、16 Tにおいて 1500 A/mm<sup>2</sup>と目標が掲げられている。これを達成するため、世界中で、第 3 元素 2 種類添加や人工ピンの導入[1]など様々な試みがなされている。我々のグループでは、分散法線材を用いて電流密度向上の試みを行なっており、1100 A/mm<sup>2</sup>の臨界電流密度を達成している[2]。

しかし、まだ目標まで到達していないことから、Sn の拡散に着目し、広い範囲で Sn 濃度の高い微細結晶を成長させることのできる熱処理を探索している。本研究では、Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理の前の段階で効率よく Sn を拡散させる熱処理条件を調べた。

### 2. 実験方法 Experimental

分散法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材を試料として用いた[2]。この線材に対し最終熱処理 650°C × 200 h をおこなう前段階の熱処理として 500°C における熱処理を行なった。これは、Nb<sub>3</sub>Sn が生成されてしまうとこれが拡散速度を下げてしまうためである。前段熱処理条件として、500°C × 50 h, 200 h, 400 h を行なった試料と、比較のため 580°C × 200 h の熱処理を行った試料を作製した。さらに、200 h の熱処理をした試料はその後、650°C × 200 h の熱処理を行った。

これらの試料に対し、エネルギー分散型 X 線分光器(EDS)および電子戦マイクロアナライザ(EPMA)を用いて、Nb<sub>3</sub>Sn フィラメント近傍の組成分析を行なった。

### 3. 結果 Results

Fig. 1 に(a)線材の断面の全体像、(b) 热処理前、(c)500°C × 200 h 热処理および (b)580°C × 200 h 热処理試料をそれぞれ 650°C × 200h で热処理した後の線材断面の元素マッピングの結果を示した。Fig.1(c), (d)の元素マッピングの結果からどちらの前段熱処理でも Sn の拡散状態はほぼ変わらないことが分かった。この結果をさらに詳しく分析するために、EDS を用いてある点における簡易定量分析を行った。簡易定量分析の結果を Fig. 2, 3 に示した。この結果をから、Sn の拡散の様子が似ている事が分かった。ただし、Sn 濃度が明らかに低く見積もられているため、EPMA を用いた詳細な分析が必要である。

### 参考文献

- [1] S. Balachandran et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 32 (2019) 044006
- [2] S. Kawashima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 30 (2020) 600105

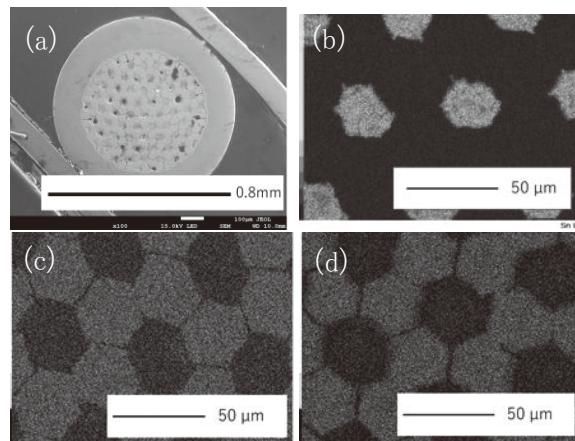


Fig. 1 Sn distribution mappings on the cross section of the Nb<sub>3</sub>Sn wires with some heat-treatment conditions. (a) cross sectional view of the wire. (b) before heat treatment. (c) after heat treatment at 500°C × 200h and 650°C × 200h, (d) after heat treatment at 580°C × 200h and 650°C × 200h

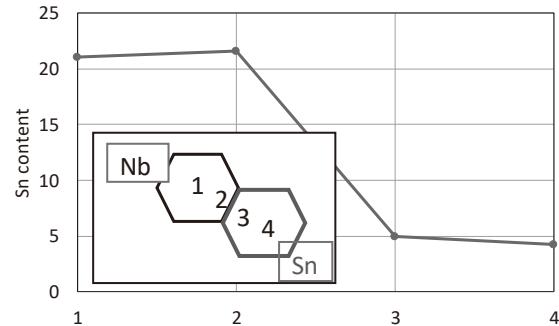


Fig. 2 Sn content at various positions in the Nb<sub>3</sub>Sn wire with heat-treated at 500 °C × 200h and 650 °C × 200h

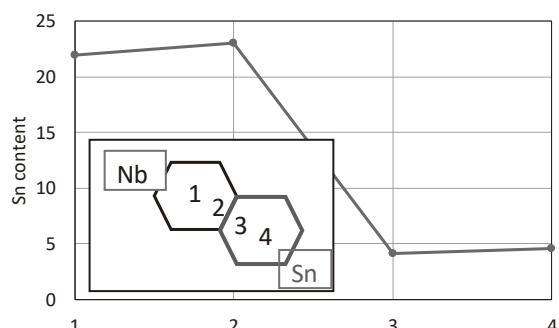


Fig. 3 Sn content at various positions in the Nb<sub>3</sub>Sn wire with heat-treated at 580 °C × 200h and 650 °C × 200h

## Nb<sub>3</sub>Al 線材の低温条件下での機械特性の評価

Evaluation of mechanical properties of Nb<sub>3</sub>Al superconducting wires at low temperature

涌谷 佑太郎, 野呂 将太, 小黒 英俊(東海大); 菊池 章弘(NIMS); 淡路 智(東北大)  
 WAKUTANI Yutaro, NORO Shota, OGURO Hidetoshi(Tokai Univ.); KIKUCHI Akihiro(NIMS);  
 AWAJI Satoshi(Tohoku Univ.)  
 E-mail: 0cajm061@mail.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Al は、同じ A15 型金属間化合物の中でも、現在広く使われている Nb<sub>3</sub>Sn に比べて、臨界温度、臨界磁場そして臨界電流が高く、さらに、ひずみにより超伝導特性が劣化しにくい [1]。しかし、Nb<sub>3</sub>Al が超伝導特性の高い化学量論組成で安定に存在するのは 1940°C のみであり、このことが線材作製を困難にしていた。これに対し、近年、化学量論組成の Nb<sub>3</sub>Al 超伝導線材を作製する技術として、急熱急冷法が確立された [2]。この方法で作製された Nb<sub>3</sub>Al 線材はその臨界電流が高いため、現存するどの Nb<sub>3</sub>Sn 線材よりも高い臨界電流密度を持っている。このため、強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されているが、そのためには機械特性を測定しておく必要がある。

本研究では、急熱急冷法で作製した Nb<sub>3</sub>Al 線材の、低温強磁場下における機械特性と超伝導特性を評価し、ひずみと超伝導特性との関係を調べることを目的とした。

### 2. 実験方法

#### 2-1. Nb<sub>3</sub>Al 線材

測定には、物質・材料研究機構で急熱急冷処理された、Nb<sub>3</sub>Al 線材を使用した。試料として 4 種類の Nb<sub>3</sub>Al 線材(K1, K3, F3, F4)を用意した[3, 4]。試料の詳細を表 1 に示す。

#### 2-2. 低温強磁場中引張り応力下臨界電流測定試験

Nb<sub>3</sub>Al 線材の低温における臨界電流と機械特性は、東北大学金属材料研究所強磁場センターの 18 T 超伝導マグネットに、低温強磁場引張り通電試験装置を設置して測定を行った。試料は、通電用電極兼引張り試験用つかみ具に、はんだで線材両端を固定した。実験は、温度 4.2 K、磁場 18 T、電流 200 A 以下、荷重 1 kN 以下の条件で行った。ひずみはひずみゲージで測定した。ひずみゲージは表裏に貼ることで、たわみ成分を除去して測定を行った。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に、Nb<sub>3</sub>Al 線材の応力-ひずみ線図、Fig. 2 に臨界電流のひずみ依存性をそれぞれ示した。Fig. 1 より、F4, K3, K1, F3 それぞれのヤング率が 137.7 GPa, 94.7 GPa, 88.1 GPa, 89.3 GPa である事がわかった。F4 のヤング率が高いのは、他の線材に比べて銅が少ないためであると考えられる。Fig. 2 より、F4 は 0.25%、K1 は 0.37%、F3 は 0.36%までは臨界電流の低下が少なかった。一方 K3 は 0.15%で破断した。これはフライメントが多く脆くなつたためであると考えられる。これら

の結果より、線材の機械特性には、母材の種類などより、各材料の断面積が大きく影響を与えることがわかった。

### 4. まとめ

4 種類のNb<sub>3</sub>Al線材に対して、機械特性と臨界電流の測定を行った。その結果、線材のマトリックスなどの違いではなく、線材断面における超伝導部分の断面積の大小が、機械特性に大きく影響を与えていることがわかった。

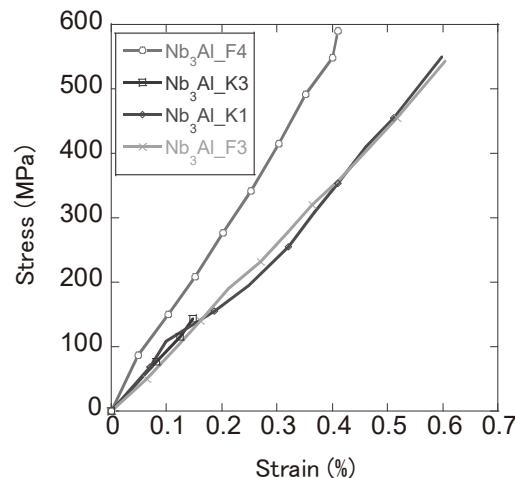


Fig. 1 Stress-Strain curves at 4.2 K for various Nb<sub>3</sub>Al wires.

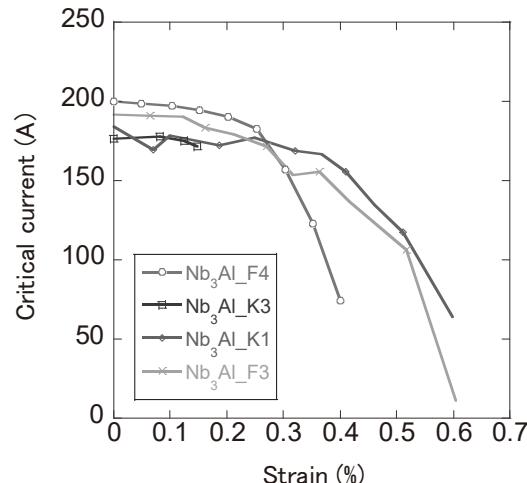


Fig. 2 Critical current as a function of tensile strain for Nb<sub>3</sub>Al wires at 4.2 K and 18 T.

### 参考文献

- [1] N. Banno et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 18 (2005) 284
- [2] Y. Iijima et al., Adv. Cryo. Eng., Vol. 40 (1994) 899
- [3] K. Tsuchiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22 (2012) 6000504
- [4] A. Kikuchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) 6001404

Table 1 Parameters of four kinds of Nb<sub>3</sub>Al Strands.

	K1	K3	F3	F4
Wire Diameter (mm)	0.99	1.00	1.00	0.99
Filament Diameter (μm)	36	31	38	35.8
Number of Filaments	222	294	222	276
Cu/non-Cu Ratio	0.94	0.98	1.0	0.61
Interfilament Matrix	Ta	Ta	Ta	Ta
Central Dummy Material	Nb	Nb	Ta	Ta
Outermost Skin Material	Nb	Nb	Nb	Nb

# フッ素フリーMOD法による様々な希土類を用いたREBCO配向膜の作製と物性 Preparation and physical properties of fluorine-free MOD processed REBCO textured films using various rare earth elements

元木 貴則, 小塙 剛史, 濱川 雄大, 金泉 莉大, 下山 淳一 (青学大)

MOTOKI Takanori, KOSHIO Takeshi, SEGAWA Yuta, KANAIZUMI Rio, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

## 1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (REBCO, RE: 希土類元素) 薄膜の作製法の中で、フッ素フリー(FF) MOD 法は単純な固相反応により、欠陥の少ない REBCO 相が短時間で生成するという特徴を有する。TFA-MOD 法や PLD 法では RE として  $T_c$  の高い Gd や Sm を用いた REBCO 長尺線材の研究開発が進められている一方で、FF-MOD 法においては、YBCO, GdBCO 以外の REBCO 配向膜の作製例はごくわずかである<sup>[1]</sup>。これまで我々は原料溶液への Cl 添加により  $c$  軸配向した  $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$  (Ba2342) 酸塩化物が膜中に析出し、YBCO の  $2$  軸配向を促進するとともに、磁場中の  $J_c$  特性が改善することを報告してきた<sup>[2]</sup>。本研究では、FF-MOD 法を用いて様々な希土類元素を用いた REBCO 配向膜を作製することを目指し、SrTiO<sub>3</sub>(100) 単結晶基板上に REBCO 薄膜を作製し、結晶性および超伝導特性を評価した。

## 2. 実験方法

RE として Nd, Pr, Sm, Gd, Dy, Y, Ho, Er を用い、仕込組成が  $\text{RE}:\text{Ba}:\text{Cu}:\text{Cl} = 0.95:2:3:x$  ( $x = 0, 0.1$ ) となるように有機金属酸塩原料を混合した溶液を作製した。ただし、RE = Pr のみ、 $\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_y$  (Pr247) の生成を目的に  $\text{Pr}:\text{Ba}:\text{Cu} = 2:4:7$  の仕込組成で作製している。基板への塗布および仮焼による有機物の分解を複数回繰り返したのち、 $\text{O}_2/\text{Ar}$  ( $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$ ) フロー中、 $800^\circ\text{C}$ , 1 h の条件で結晶化を行い、最後に酸素気流中、 $450^\circ\text{C}$  のアニールを行った。試料の設計膜厚は~0.5  $\mu\text{m}$  である。得られた薄膜に対して XRD による構成相同定と結晶性評価、SEM による組織観察、直流 4 端子法による電気抵抗率の評価を行った。

## 3. 結果と考察

Cl 添加および Cl 無添加とした原料溶液を用い、前述の 8 種の希土類元素を用いた REBCO 薄膜をそれぞれ作製した。得られた Cl 添加 REBCO 薄膜の XRD パターンを Fig. 1 に示す。すべての試料でほとんど無配向粒由来のピークの見られない  $c$  軸配向膜作製に成功した。RE = Prにおいても、仕込組成が 247 仕込みであるにもかかわらず 123 相が生成していることが分かる。また、RE のイオン半径が小さくなるほどピークが高角側にシフトし、 $c$  軸の単調な短縮も確認された。

電気抵抗率測定から、非超伝導の PrBCO を除き、いずれの薄膜も 90 K 級の  $T_c$  を有していることを確認した。また、Cl 添加試料では Cl 無添加試料に比べて顕著に磁場中の  $T_c$  の低下が抑制されていることが明らかとなった。当時は、中軽希土類の REBCO 薄膜に対してより低温の酸素アニールを施し、最適キャリアドープに近づけた結果についても合わせて報告する。

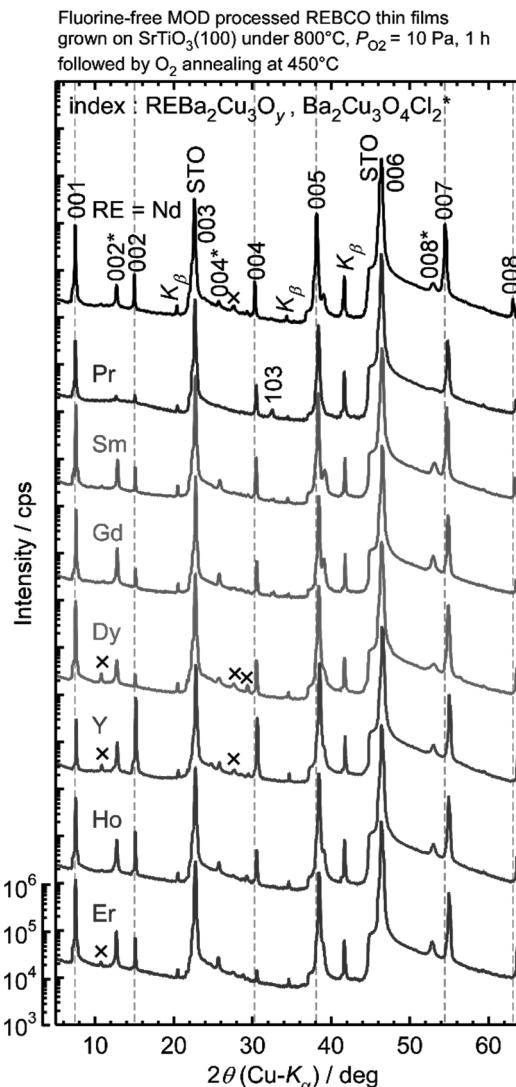


Fig. 1 XRD patterns obtained from  $\theta/2\theta$  measurements of FF-MOD processed REBCO thin films with RE = Nd, Pr, Sm, Gd, Dy, Y, Ho and Er. Dashed lines represent  $00l$  peak positions of NdBCO, which clearly exhibits gradual changes in  $c$ -axis lengths with ionic radii of RE.

## 謝辞

本研究は、JST-ALCA(JPMJAL1109) および科研費(19K05006)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] K. Yokoyama *et al.*, *Mod. Phys. Lett. B* **20** (2006) 705–13.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 015006.

## 臨界電流密度分布を考慮した3シードYBCOバルク超電導体の着磁磁場のモデリング

Modeling the Trapped Magnetic Field Distribution in the Three-seeded YBCO Bulk Superconductor from the Numerical Estimation of Inhomogeneous Critical Current Density Distribution

石田 裕亮, 榎田 壽史, アフマド ドア, 寺尾 悠, 大崎 博之, 桜井 雄基, 菅井 肇, 松村 知岳, 片山 伸彦 (東大)  
ISHIDA Yusuke, ENOKIDA Hisashi, AHMAD Doa, TERAO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki, SAKURAI Yuki, SUGAI Hajime, MATSUMURA Tomotake, KATAYAMA Nobuhiko (Univ. of Tokyo)  
E-mail: Ishida-yusuke537@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

希土類(RE)系高温超電導体は高い臨界温度と優れた臨界電流密度特性を有するため、超電導線材やバルク超電導体として応用研究が活発に行われている。バルク超電導体の大型化にはマルチシード法が有効である[1]。しかしながら、マルチシードバルクはドメイン間に存在する結晶粒界によって境界部の電流密度特性が悪化することが知られており、結果として着磁磁場は複数のピークを持つ。超電導磁気ベアリング等の機器設計においてマルチシードバルクの臨界電流密度特性を考慮することは非常に重要である。筆者らは実験により得られたマルチシードバルクの着磁特性を、FEM ソフトウェア上で仮想コイルによって再現し超電導磁気ベアリングの解析を行ってきた[2]。しかしながら、この手法では特定の磁場分布のみしか再現できず汎用性に乏しかった。臨界電流密度特性を考慮したモデルを作成できれば、永久磁石と超電導体間の浮上力解析など汎用性の高い解析が可能になると考えられる。そこで、本発表ではマルチドメイン構造による臨界電流密度分布を考慮した着磁特性に関する電磁界解析を行い、実験結果との比較を行った。

### 2. 数値解析

本研究では H 法による三次元有限要素法解析により着磁特性の解析を行った。H 法の基礎方程式は Maxwell 方程式より導かれる以下の方程式である。

$$\nabla \times \rho \nabla \times H = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

ここで、 $H$ は磁場、 $J$ は電流密度、 $\mu_0$ は真空の透磁率である。 $\rho$ は導電率であり、本研究ではこの導電率を式(3)で与えられる n 値モデルによる導電率  $\rho_{sc}$  として定義する。

$$\rho_{sc}(J, B) = \frac{E_c}{|J|} \left| \frac{J}{J_c(B)} \right|^n \quad (3)$$

$B$ は磁束密度、 $E_c$ は電界基準、 $J_c(B)$ は Kim モデルによって定義される臨界電流密度である。

Fig. 1 に解析に用いた YBCO バルクの FEM モデルを示す。今回解析に用いたバルクは 64 mm × 32 mm × 13 mm の 3 シードバルクである。マルチシードバルクではドメイン間の結晶粒界により臨界電流密度が低下する。そこで、マルチシード構造を考慮するために、ドメイン間に幅 1 mm の臨界電流密度が低い領域を設定した(以下接合部)。最大外部磁場 1.1 T、着磁温度 77 Kにおいて磁場中冷却法により行った実験環境を再現するように解析を行った。

### 3. 結果と考察

図 2 に有限要素法解析によって得られた、バルク上部 0.5 mm、y=0 mm での磁束密度分布と、実験結果との比較を示す。解析条件は、ドメイン内の臨界電流密度  $J_{c0,sc}$ 、接合部の臨界電流密度  $J_{c0,Junc}$ 、Kim モデルパラメータ  $B_0$  をフリーパラメータ

として磁束密度分布と合うようにフィットを行った。ただし、実験結果から接合部 1 については 1 S/m の導電率を設定した。表 1 に解析条件を示す。図 2 より空間的な磁束密度分布は有限要素法解析と実験結果でよく一致している。よって、ドメイン間に低臨界電流密度の領域を設定する手法はマルチシードバルクの着磁特性の解析に有効であると考える。

Table 1. Analytical conditions

Critical current density at the domains $J_{c0,sc}$	$3.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$
Conductivity at the junction 1 $\rho$	1 S/m
Critical current density at the junction 2 $J_{c0,Junc}$	$9.0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$
Kim model parameter $B_0$	0.5 T

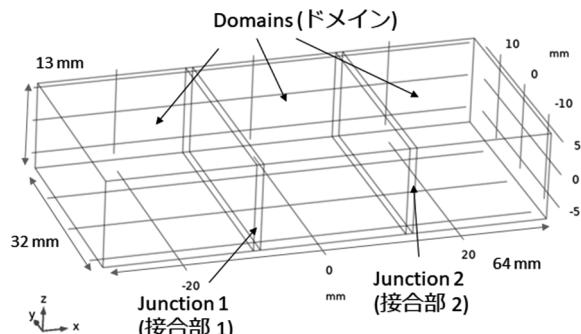


Fig.1 A schematic view of three-seeded YBCO bulk superconductor

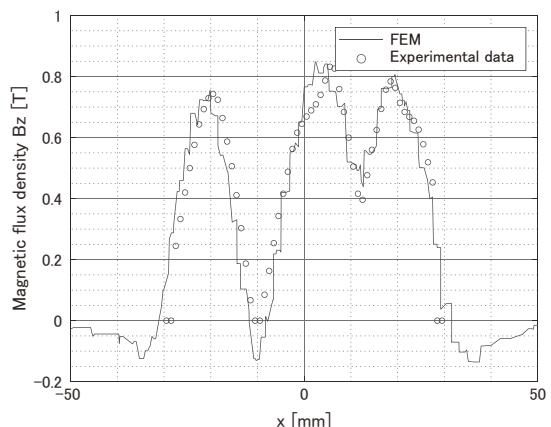


Fig.2 Trapped magnetic flux density distribution on the surface of the bulk superconductor along the x-axis

### 参考文献

- Frank N Werfel, et al.: Physica C, 484, 2013
- Y. Ishida, et al.: Abstracts of 10th ACASC, 9P-55, 2020

## 塗布熱分解法により作製された REBCO 膜の臨界電流密度分布評価 $J_c$ distribution measurement in TFA-MOD processed REBCO thin films

井上 昌睦, 川島 直暉, 鶴田 純平, 柳 知志(福岡工大); 寺西 亮, 山田 眞(九大)  
INOUE Masayoshi, KAWASHIMA Naoki, TSURUTA Junpei, YANAGI Satoshi (Fukuoka Inst. Tech.);  
TERANISHI Ryo, YAMADA Shin (Kyushu Univ.)  
E-mail: ms-inoue@fit.ac.jp

### 1.はじめに

希土類系高温超電導(REBCO)線材の磁場中の臨界電流特性を向上させるために人工ピンニングセンターの導入が図られているが、成膜条件との対応を明らかとするには、試料面内の臨界電流密度分布を把握する必要がある。例えば、設定した成膜条件が線材面内で均一に得られていないことが考えられる。本研究では、塗布熱分解法で作製されたREBCO膜の臨界電流密度分布を走査型ホール素子顕微鏡(SHPM)で調べるとともに、SEM-EDSによる組織観察を行った。

### 2. 実験

$\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3/\text{MgO}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Gd}_2\text{Zr}_3\text{O}_7/\text{Hastelloy}$ 基板上に塗布熱分解法で  $\text{YBaCuOy}$ 膜を形成した。塗布溶液には、人工ピンとして  $\text{BaHfO}_3$ を導入すること目的とした  $\text{Hf}$ を1mol%添加している。仮焼は温度430°C、酸素濃度100%，本焼は温度780°C、酸素濃度1,000ppmの条件で行った。最終膜厚は600nm程度であった。

約1cm角の試料を液体窒素に浸漬冷却した後、永久磁石により着磁を行い、その補足磁場をSHPMにて計測した。磁場分布から臨界電流密度( $J_c$ )分布を求めるとともに、低  $J_c$ 部位と高  $J_c$ 部位の組織観察・組成分析を電界放出形走査電子顕微鏡(SEM)及びエネルギー分散型X線分光(EDS)により行った。

### 3. 結果及び考察

SHPMにより得られた補足磁場分布および電流密度分布をFig.1に示す。同図の右半面には電流が流れているものの、左半面には電流が流れていないことが分かる。臨界状態モデルによれば面内に流れる電流は臨界電流に相当することから、左半面は  $J_c$ が得られていないこととなる。通電法により臨界電流値を調べたところ、23.7Aと、予想された値の半分程度であった。これは、試料の半面しか電流が流れていなかったためと考えられ、SHPMによる  $J_c$ 分布と対応している。

SHPMで位置が特定された高  $J_c$ 部位と、低  $J_c$ 部位のEDSマップをFig.2に示す。同図より、 $J_c$ の大小に関わらずBa濃度に分布があることが分かる。そこで、Ba濃度が高い結晶粒と、低い結晶粒の組成分析を行った。その結果、Y, Ba, Cu, のモル比は、高Ba濃度領域で、1.00:2.44:1.91なのに対して、低Ba濃度領域では、1.00:0.325:1.58であった。すなわち、低Ba濃度領域の方が非超電導相から成っていることが明らかとなつた。この結果を基に、SHPMにより遮蔽電流磁場が得られた領域と、そうでない領域の違いについて考察すると以下の知見が得られる。すなわち、SHPMで  $J_c$ が観察された領域では、局所的には非超電導相が存在するものの、大局的な電流パスを形成することができるので、 $J_c$ が観察されなかつた領域では、非超電導相が超電導相を分断するかたちで存在するため遮へい磁場は小さく観察されず、電流パスも形成することができなかつたものと考えられる。このような組成の分布は、成膜環境の不均一性に起因していると考えられることから、これらの結果を環境の改善へとつなげたい。

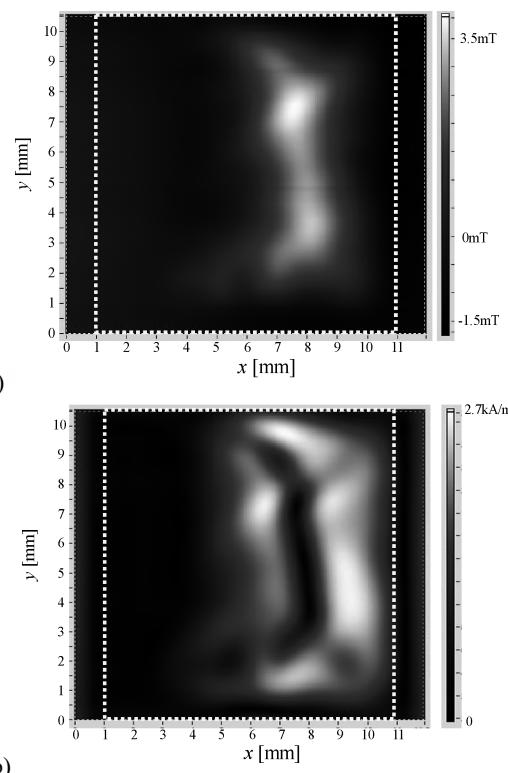


Fig.1 (a) Magnetic field distribution and (b) critical current distribution measured by SHPM.

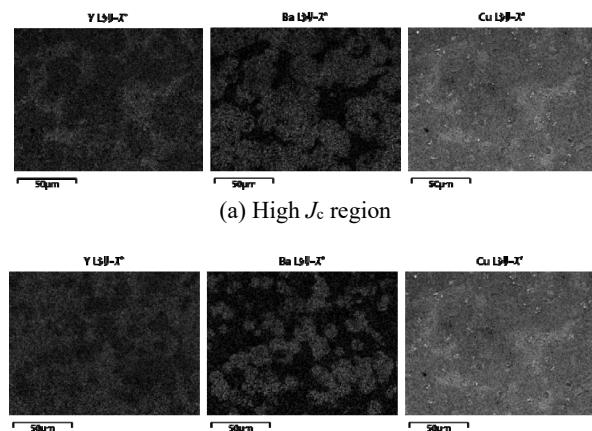


Fig.2 ESD map of element distribution in REBCO thin films.

### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務並びにJSPS科研費JP18H01928, JP19H05617の結果得られたものである。

# 磁気像を用いた臨界電流導出における逆問題解析と TapeStar 方式の比較検討

## Comparison between TapeStar method and inversion analysis of Biot-Savart law for the derivation of local critical currents from magnetic image

鬼塚 雄大, 吳 澤宇, 東川 甲平, 木須 隆暢(九州大学)

ONITSUKA Yudai, WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu University)

E-mail: y.onitsuka@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO テープ線材の実用的な応用に際し、空間不均一性の発生する要因の特定のため、空間分布を把握することが重要であり、磁化した線材の表面磁界の分布より非接触で臨界電流分布を評価する磁気的手法は有効なアプローチである。この磁気的手法として広く採用されている TapeStar 方式では、幅方向の磁場勾配が電流密度に比例することを用いて簡便に局所  $I_c$  分布を見積もっている。本近似は電流の長手成分が支配的な場合はよく成り立つと考えられるが、テープ線材直上では、欠陥形状などにより非線形効果の影響を大きく受けることが予想される。本研究では、欠陥を有する局所  $I_c$  分布を 1 次元的な TapeStar 方式の解析とビオ・サバール則の逆問題を解いてテープ面内の 2 次元的な磁化電流分布を求めた場合とで比較し、両者の解析法による局所  $I_c$  分布の変化の定量性に及ぼす影響について検討した。

### 2. 実験・解析方法

本研究では、長さ 5 cm、幅 12 mm の線材を対象とした。欠陥を有する線材の局所  $I_c$  分布を検討するため Fig. 1 のように長さ 5 mm、幅 1 mm の切れ込みをレーザーカッターで入れることで模擬欠陥を作製し、77K でホール素子磁気顕微鏡を用いて長手方向分解能 200  $\mu\text{m}$ 、幅方向分解能 100  $\mu\text{m}$  の残留磁界分布を取得した。局所  $I_c$  分布の導出に際し、TapeStar 方式においては、取得した残留磁界分布  $B_z$  (Fig. 2 (a)) を用い、磁界の幅 ( $y$  軸) 方向の勾配の二乗平均のルートを計算し長手位置 ( $x$ ) の関数として  $I_c$  の長手位置での変化を求めた。これに対し、ビオ・サバール則の逆問題の解析では、取得した 2 次元残留磁界分布に対し磁化電流のシート電流密度のベクトル成分 ( $J_x, J_y$ ) を導出し、そのベクトル和によって磁化電流密度 ( $J$ ) を決定し、さらに幅方向に積分することによって  $I_c$  を導出した。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 は残留磁界捕捉時の評価結果を示しており、測定磁界分布を Fig. 2(a) に、同分布から評価したシート電流密度分布を Fig. 2(b)(c)(d) に示す。この結果から、欠陥を回り込むような磁化電流分布が確認できる。Fig. 3 にそれぞれの解析方法によって導出した長手方向の局所  $I_c$  分布を示す。TapeStar 方式では絶対値が導出できないため、空間分布の導出結果を比較するために特性の良好部である 8~22, 34~48 mm 区間の平均値で規格化した。特性良好部では、両者の結果は良く一致する事が分かる。しかし、切れ込みを導入した 28 mm 付近においては、ビオ・サバールの逆問題で求めた  $I_c$  の値に対し、TapeStar 方式による導出結果は 2 倍ほど高い値を示していると同時に、 $I_c$  低下部位の長手方向の距離も広がっている事が分かる。これは、上述した切れ込み位置を迂回する幅方向成分の電流が作る磁場が欠陥部位の磁場強度に影響を与えており、これが起因である。以上の結果から、1 次元的な TapeStar 方式の解析では、 $I_c$  低下率の大きな部位においては、導出結果の補正が必要となると考えられる。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H05617 の助成を受けたものである。



Fig. 1 Experimental sample (length 50mm, width 12mm)

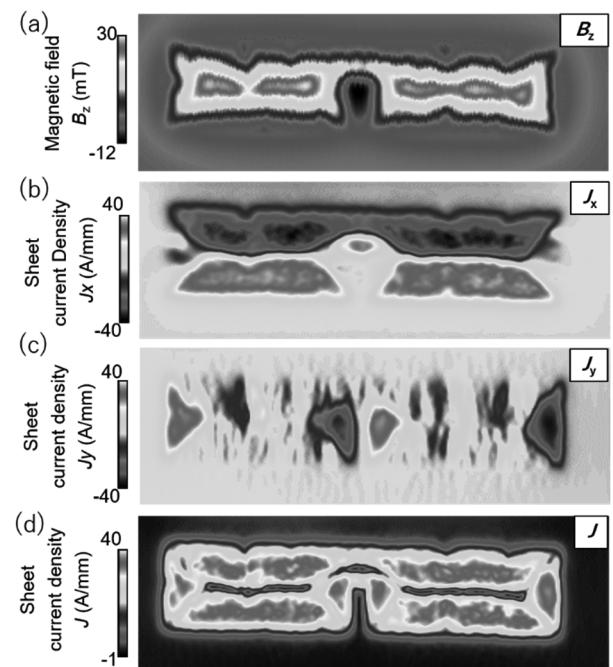


Fig. 2 Scanning Hall probe microscopy, (a) measured remanent magnetic field, (b) longitudinal component of sheet current density, (c) transverse component of sheet current density, (d) absolute value sheet current density

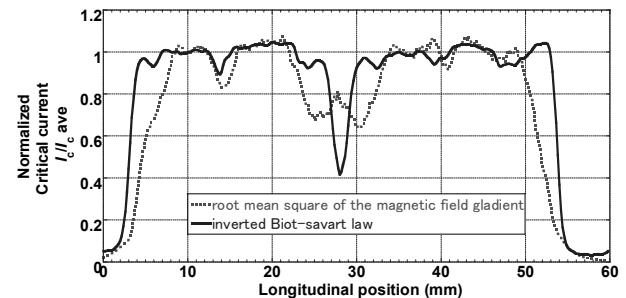


Fig. 3 Longitudinal distributions of local critical currents normalized by the average  $I_c$  value

# 引張り環境下における臨界電流の磁場角度依存性測定装置の開発

## Development of Measurement Apparatus for Angular dependence of Critical Current under the Tensile Load

石塚 仁人, 小黒 英俊(東海大)

ISHIZUKA Kimito, OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.)

E-mail: 0cajm004@mail.u-tokai.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO coated conductor の臨界電流は、ひずみを与えること変化すること[1]、また、磁場角度によって変化することがよく知られている[2]。そのため、我々のグループでは、曲げひずみを与えた状態で磁場角度を変え、臨界電流密度を測定するシステムを開発してきた[3]。ただし、この測定装置のコンセプトは、小さい電流値で精密な測定を行うことであり、coated conductor に細いブリッジを作ることで、ブリッジ部分の臨界電流密度を求めることができた。しかし、実際には線材全体に大電流を流して利用することが coated conductor の利用法となるため、実際に利用する環境と近い条件で測定を行なっていく必要性が出てくると思われる。

また、REBCO coated conductor は高温弱磁場中で、ピーク効果という、ひずみを発生させることによって臨界電流が向上する効果が知られている[1]。この効果は、未だ正確なメカニズムの理解には至っていない。これに対し、これまでの測定結果[3]により、磁場角度を変えることでひずみによる臨界電流変化の割合が変化することがわかつてきており、REBCO のひずみ効果は REBCO の結晶構造による異方性や、ピンニングが影響する可能性が分かってきた。

そのため、本研究では引張り環境下における、REBCO 線材の臨界電流の磁場角度依存性を測定することを目的とした。そのために、磁場角度を変えられる回転型電磁石と組み合わせるための、低温引張り装置の開発を行った。具体的には、電磁石の磁場発生部の幅 50 mm の空間に設置できる、クライオスタートと小型引張試験機の装置開発を行ったので報告する。

### 2. 小型引張試験機の開発

開発した小型引張試験機を Fig.1 に示した。強度と熱伝導を考えし、装置の柱および荷重を加えるシャフトはステンレスで作製した。中央部のクライオスタートと接する部品は、強度的な問題がなく、電流リードが横切る部分であるため絶縁が必要であったことから、GFRP で作製した。試験機は、片方のつかみ具を装置右部に固定し、反対側のつかみ具を全ネジ棒のシャフトに固定し、装置左部にネジ棒を固定している。装置左部のネジ棒に付けたナットを回すことによりつかみ具が左に動き、固定した試験片に対し引張り荷重を加えることができる。つかみ具は液体窒素下で使用可能であり、引張試験に耐えられる強度を持つ、絶縁体であるベークライトで作製した。

引張り荷重は 2 kN まで加えることができ、シャフトに取り付けた小型ロードセルでこれを測定する。ひずみは、試料に直接貼り付けたひずみゲージで測定する。電流リードをつかみ具に挟み込むことで、最大で 200 A 以上の電流を流せる設計としている。これによって、電流容量の大きな高温超伝導線材の測定が可能となる。

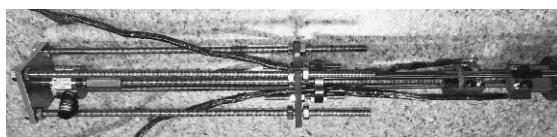


Fig. 1 Picture of small measurement apparatus for mechanical and superconducting properties at 77 K in magnetic fields.

Fig. 2 に装置のシステムの概略図を示した。引張り試験を液体窒素中で行いつつ、電磁石を用いて磁場を印加する。この状態で電磁石を回転させることで磁場角度を変え、臨界電流の測定が可能である。

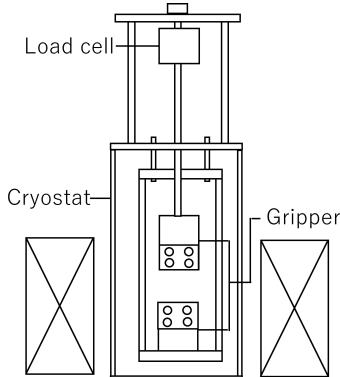


Fig. 2 Measurement system for tensile stress dependences of critical currents at various magnetic fields and magnetic angles.

この装置に対して、低温下における大電流通電試験、室温下、低温下での引張試験を行い、装置の性能評価を行った。電流 200 A 以下、荷重 2 kN 以下、磁場 0.4 T 以下、磁場角度 0° から 180°、温度 77.3 K の条件下で測定が可能なことが確認できた。Fig. 3 にフジクラ製 GdBCO 線材の低温での引張り試験結果を示す。図より、ヤング率が 250 GPa 程度であり、これまでの測定結果と一致し、正確に測定ができることが示された。

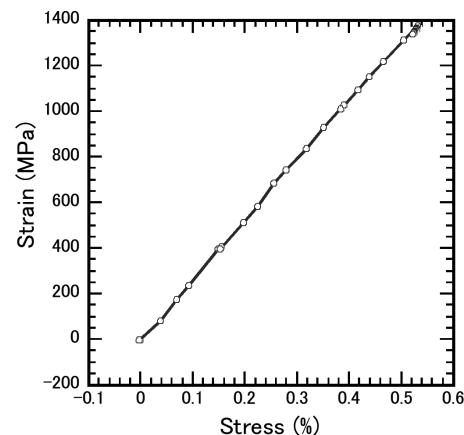


Fig. 3 Stress-strain curve for GdBCO coated conductor at 77.3 K.

### 参考文献

1. M. Sugano et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 085013
2. Y. Shiohara et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 21 (2008) 034002
3. K. Hatano et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) p. 56

## 超伝導はんだ(Pb-Sn-Bi)を用いた NbTi-Bi2223 線材の接合

### Joint between NbTi-Bi2223 Wires using Superconducting Solder (Pb-Sn-Bi)

渋谷直哉, 小林 賢介, 井上和朗, 松本凌, 内田公, 西島元, 竹屋浩幸, 高野義彦, 北口仁 (NIMS)  
SHIBUYA Masachika, KOBAYASHI Kensuke, INOUE Kazuo, MATSUMOTO Ryo, UCHIDA Akira, NISHIJIMA Gen,  
 TAKEYA Hiroyuki, TAKANO Yoshihiko, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)  
 E-mail: SHIBUYA.Masachika@nims.go.jp

#### 1. はじめに

1020 MHz (24 T)で動作する核磁気共鳴装置(NMR)が開発されたが、NbTi(LTS)-Bi2223 超伝導接合技術が確立しておらず、永久電流運転ではなかった[1]。さらに、1.3 GHz (30.5 T)で動作する次世代 NMR も計画されており、永久電流モード動作を実現するための一つの解決策として、Bi2223-LTS の超伝導接合が必要である。そこで、本研究では、超伝導はんだ(Pb-Sn-Bi)を用いた in-situ シース溶融法[2]による NbTi-Bi2223 線の接合をおこなっている。今回は、Pn-Sb-Bi の各組成を用いて接続した NbTi-Bi2223 線に対して、精度を上げた四端子法を用いた 4.2K での I-V 特性評価や、接合断面の微細組織の観察・分析をおこなった。さらに、NbTi 線と Bi2223 線の接合試料の精密な接合抵抗評価を、改良した装置を用いた減衰法[3]によっておこなった。

#### 2. 実験方法

超伝導はんだは、所定の比の Pb, Sn, Bi 金属材料を、真空下の石英管中での加熱溶融によって合成した。接合は、Pb-Sn-Bi はんだと Bi2223 線材(type HT-NX, (株)住友電工)と NbTi 線材((株)Jastec)をガラス坩堝に充填し、電気炉中で 250-400°C, 1-4h 加熱溶融しておこなった。接合試料の I-V 測定は、液体ヘリウム中で、4 端子法による自己電場下でおこなった。接合試料のはんだ接合部は、SEM/EDS による断面観察/分析をおこなった。さらに、減衰法による抵抗評価をおこなうため、Bi2223 線材と NbTi 線材の両端 2 箇所を Pb-Sn-Bi はんだで接合し、NbTi 線材をループ状にした 2 回巻き試料を作製した。接合抵抗評価は、4.2 K で誘導コイル電流を変えることで初期誘導電流を変化させておこなった。

#### 3. 結果と考察

Fig. 1 に Pb/Sn/Bi=50/20/30 の超伝導はんだを用いて 400°C-4h で接続した NbTi-Bi2223 接合試料の I-V 曲線を示した。NbTi-Bi2223 間の電気抵抗は、100A まで 0 抵抗であることがわかる(本測定感度内)。はんだと NbTi-はんだ間は 200A まで 0 抵抗であるのに対して、Bi2223-はんだ間は 100A 以上で抵抗が明らかに見られた。以上の結果、接合トータルとしての NbTi-Bi2223 間の電気抵抗は、若干大きめに測定されたようである。Fig.2 に、Fig.1 に示した NbTi-Bi2223 接合線材の接合断面の SEM 写真を示した。左の写真は NbTi 線の断面であり、Cu のシース材は完全に Pb-Sn-Bi はんだ内に溶融していることがわかる。右の写真は Bi2223 線の断面であり、Ag のシース材は完全に Pb-Sn-Bi はんだ内に溶融していることがわかった。Fig.3 に、4.2 K 自己電場での誘導電流 0.1A における減衰測定の結果を示した。図に示した以外にも、0.02-0.1A の誘導電流で減衰がみられ、自己インダクタンス  $L = 1.0 \mu\text{H}$  を用いて  $V_{\text{Hall}}(t) = A + B \exp\{-t/(L/R)\}$  のフィッティングから得られた抵抗は、平均  $2.26 \text{ n}\Omega$  だった。以上の結果、接合 1 個あたりの接合抵抗は約  $1.13 \text{ n}\Omega$  と見積もられた。

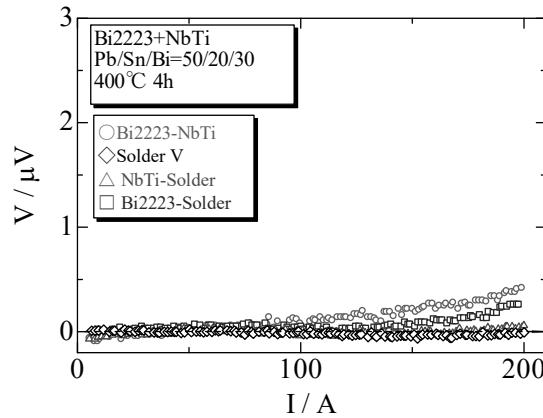


Fig. 1 I-V curves of NbTi-Bi2223 wires jointed by Pb/Sn/Bi=50/20/30 solder.

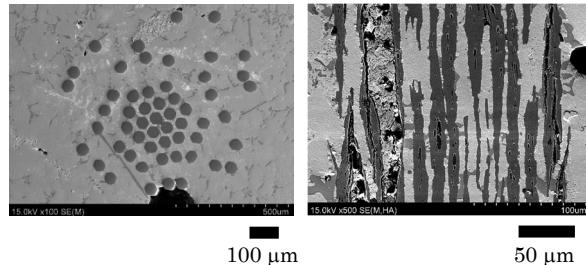


Fig. 2 SEM photographs of NbTi and Bi2223 wire jointed by Pb/Sn/Bi=50/20/30 solder.

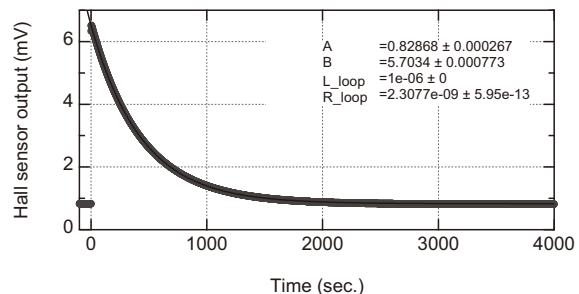


Fig. 3 Decay curves of induction current of 0.1A at 4.2 K.

#### 謝辞

本成果は、JST 未来社会創造事業[JPMJMI17A2]によって得られたものです。

#### 参考文献

- [1] K. Hashi *et al.*, *J. Magn. Reson.*, **256**, (2017) p.30.
- [2] R. Matsumoto *et al.*, *APEX* **10**, (2017) p.093102.
- [3] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30**, (2020) p.9000204.

## V ノッチせん断試験アプローチを用いたREBCO線材の In 接合のせん断強度解析

### Shear strength analysis of indium lap joints of REBCO coated conductors using the v-notched shear test approach

アパリシオ ルイス, 伊藤 悟 (東北大学); 橋爪 秀利 (東北大学)  
APARICIO Luis, ITO Satoshi (Tohoku University); HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku University)  
E-mail: aparicio.finol.luis.ernesto.b6@tohoku.ac.jp

#### 1.はじめに

Segmented fabrication of superconducting magnets for the manufacturing of large and complex coils has been proposed for the FFHR-d1 helical fusion reactor designed by the National Institute for Fusion Science (NIFS) [1]. As a primary option, the joint-winding method which consists in joining segments of Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure (STARS) conductors by way of lap joints of REBCO tapes in a staircase-like structure called the bridge-type lap joint [2, 3]. These lap joints feature an indium thin layer that acts as a bonding agent and allows for a simple fabrication process where only pressure and heating (90–120 °C) are required. Furthermore, shear strength of the lap joints is an important requirement for validating their applicability. In previous studies [4], the authors evaluated the shear strength and failure mechanism using the single lap joint method. However, it has been noticed that this kind of test induces a non-uniform shear stress in addition to peeling stresses concentrated at the edges of the overlap. Therefore, in this study the shear strength and failure mechanism under uniform shear stress of a single In lap joint using the v-notched test is reported.

#### 2. 実験方法

The REBCO tapes used in this study are the SCS4050 by SuperPower Inc. and the 2G HTS tapes by SuperOx Japan LLC. First, the REBCO tapes are attached to two SUS anvils using Cemedine® ep138 epoxy. Next, the Cu stabilizer surfaces of each REBCO tape are brushed with sandpaper and then cleaned with water followed by ethanol. Then, a cotton swab impregnated with Hakko's Sussol-F® flux in order to etch the remaining oxide layer on the surface of the tapes. Finally, the flux is removed with ethanol. The same cleaning procedure is done for the indium foil of 100  $\mu\text{m}$  thickness. Then, a compressive load of 100 MPa is applied to the sample assembly using a stepping motor equipment and the jigs shown in Fig.1 (left side). While the pressure is kept constant, the sample is heated up to 90–95 °C for 30 mins.

The cross-section of the assembled sample setup is shown in Fig.1 (right side) illustrating the v-notch where the lap joint is located. A load in the downward direction is applied using a stepping motor, and a clip-on gauge (not shown) is used to measure the displacement.

#### 3. 結果と考察

A single preliminary result showed a maximum shear stress of 5.66 MPa as shown in Fig.2 (left). This is much lower than the results obtained for the single lap joints, and the failure mode was cohesive, i.e. the indium failed in shear. On the other hand, the results from a second test shown in Fig.2 (right) yielded a failure load higher than the first experiment, and the failure mode was different, corresponding to delamination of the SCS4050 REBCO tape. These results correspond to preliminary tests using only one type of REBCO

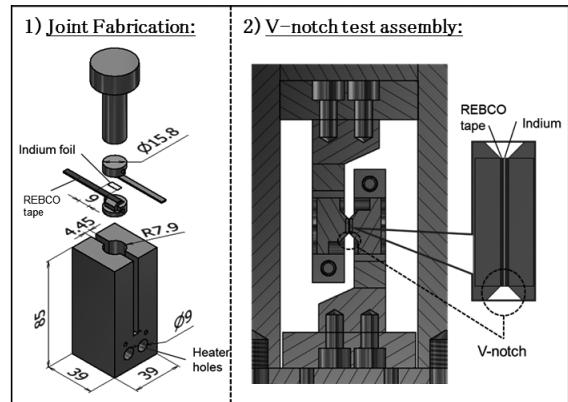


Fig.1 (left) Joint fabrication assembly, and (right) cross-sectional view of the experimental setup.

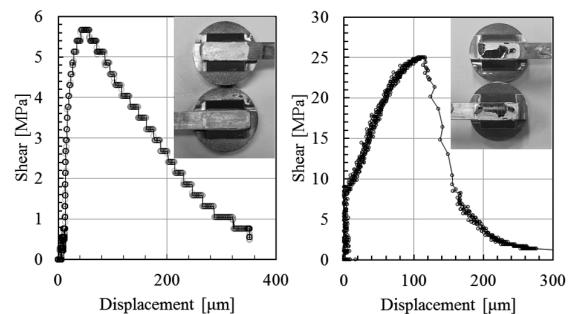


Fig.2 Preliminary results of shear test using SCS4050 REBCO tapes.

tape, and since REBCO tapes are slightly different depending on their manufacturing process, results might vary with it. Moreover, the change in joint resistance with shear has yet to be measured. Therefore, more tests have to be done in order to clarify the tendency of the results as well as the parameters governing the failure mechanisms.

#### 4.まとめ

Shear strength of In lap joints under uniform shear stress can be evaluated using the v-notch test. However, different strength values and failure modes were obtained. Therefore, in order to clarify this variation, further test results and analyses are necessary.

#### 参考文献

1. A. Sagara et al., Fusion Eng. and Des., Vol. 89 (2014), pp. 2114–2120
2. N. Yanagi et al., Nuclear Fusion, Vol. 55, 053021, (2015)
3. S. Ito et al., Plasma Fusion Res. Vol. 9, article ID. 3405086, (2014)
4. L. Aparicio et al., Fusion Eng. and Des., Volume 136 B, (2018), pp 1196–1201

# 核融合炉用超電導磁石絶縁材料の照射効果に関する研究 -極低温照射の影響-

## Study on Irradiation Effect of Insulating Materials for Superconducting Magnets for Nuclear Fusion Reactor - Effect of cryogenic irradiation -

國德 祐太, 秋山 康子, 真鍋 勇一郎, 佐藤 文信(大阪大学)  
KUNITOKU Yuta, AKIYAMA Yoko, MANABE Yuichiro, SATO Fuminobu (Osaka Univ)  
E-mail: kunitoku@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

世界のエネルギー需要の増加とエネルギー資源の枯渇が課題となっている現在、新たなエネルギー源として、核融合エネルギーを利用するための研究が進められている。ITER(国際熱核融合実験炉)では、プラズマ化した重水素とトリチウムを超電導磁石で制御して核融合反応を起こし、エネルギーを得る。ITERで使用される超電導磁石は、電磁力や極低温だけでなく、核融合反応によって発生する中性子線や $\gamma$ 線などの放射線にさらされる。超電導磁石の構成材料の中で、絶縁材料に用いられる高分子材料は放射線感受性が最も高く、照射によって機械的強度や絶縁性能が劣化する可能性がある。

本研究では、エポキシ樹脂とガラスクロスの複合材料であるガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を作製し、室温と液体窒素温度で $\gamma$ 線を照射後、絶縁破壊試験を行った。

### 2. 実験方法

まず、S-ガラスクロス(有沢製作所)を65 mm × 105 mmの大きさで45枚切り出し、積層させた。次に、主剤のビスフェノールA型エポキシ樹脂(JER-828、三菱ケミカル)を100 g、硬化剤のポリエーテルアミン(Baxxodur EC 301、三井化学ファイン)を32.2 gを混合し、真空攪拌を行うことでエポキシ樹脂を調製した。積層させたS-ガラスクロスにエポキシ樹脂を真空中で含浸させ、70 °Cで2時間、110 °Cで3時間熱処理を行い含浸・硬化させてGFRPを作製した。

次に、Fig.1の下側に示す絶縁破壊試験用の形状に加工した。絶縁破壊試験を行う際、沿面距離が短いと絶縁破壊が起こる前に沿面放電が起こる。そのため、十分な沿面距離がとれるような形状に加工した。この試験片に、 $^{60}\text{Co}$ 線源を用いて線量率84 kGy/h、吸収線量0, 5, 10 MGyになるように室温(RT)と液体窒素温度(LNT)でそれぞれ照射を行い、Fig.1の上側に示す装置を用いて室温で絶縁破壊試験を行った(電圧印加速度:0.5 kV/s、最大電流:1 mA)。試験片に1 mA以上の電流が流れた時点の電圧をその試験片の破壊電圧とし、試験片厚さで除することで絶縁耐力を算出した。

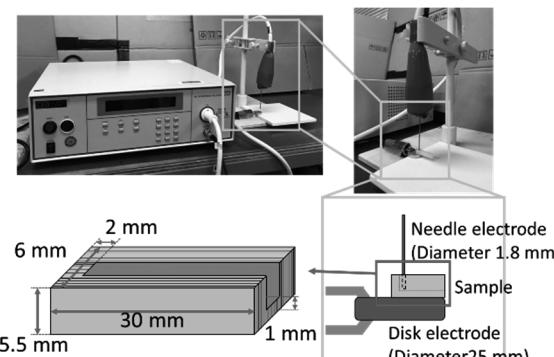


Fig.1 The system of dielectric breakdown test.

### 3. 実験結果と考察

実験結果をFig.2に示す。室温照射においては、吸収線量の増加に伴って絶縁耐力がわずかに増加した。一方、液体窒素温度照射においては、吸収線量10 MGyにおいて絶縁耐力が顕著に低下した。

絶縁破壊は、電場からエネルギーを受け取って加速された電子が材料中の分子に衝突し、その分子を電離させることができ返され、電子の数が指数関数的に増加することで起こる。この時、分子密度が高いと、電子が分子を電離させるだけのエネルギーを持たないまま分子に衝突することになり、絶縁破壊は起こりにくくなる。

のことから、室温照射においては、照射による架橋反応によって分子密度が増加したことが絶縁耐力の増加の原因の一つと考えられる。一方、液体窒素温度照射においては、分子運動がほとんど凍結されているため、照射によって発生したラジカルが移動できず、架橋反応に対して切断反応が優先的に起こり、分子密度が低下したと考えられる。また液体窒素中に凝縮した酸素が $\gamma$ 線照射によってオゾンに変化し、樹脂の酸化分解を引き起したことも、絶縁耐力の低下に影響したと考えられる。

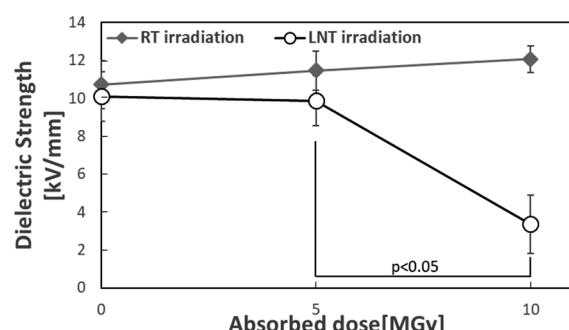


Fig.2 Dielectric strength of GFRP irradiated at RT and LNT as a function of absorbed dose.

### 4. 結論

室温照射では照射により絶縁耐力が増加し、液体窒素温度照射では低下することが示された。ただし液体窒素温度照射においては、液体窒素中に凝縮した酸素がオゾンに変化したことによる酸化分解の可能性が示されたため、今後は酸素の影響を排除した低温気相中で照射・絶縁破壊試験を行うことができる実験体系を構築する予定である。

### 謝辞

本研究の一部は自然科学研究機構核融合科学研究所の「NIFS 一般共同研究プログラム(NIFS19KERA014)」により実施いたしました。

# 核融合装置用 HTS 導体開発に向けた REBCO テープの $I_c$ 劣化の原因の研究

## Investigation of the cause of $I_c$ degradation of REBCO tapes for HTS conductor of fusion device

大辻 様(東大);三戸 利行, 小野寺 優太, 平野 直樹(NIFS)  
OTSUJI Maki (Tokyo univ.); MITO Toshiyuki, ONODERA Yuta, HIRANO Naoki (NIFS)  
E-mail: 9271062139@edu.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)の次期装置への適用を目指した HTS 導体の開発研究を開始している。HTS 導体の候補の1つとして、REBCO テープと純アルミニウムシートを円形断面のアルミニウム(AI)合金ジャケットの溝に積層して配置した FAIR 導体を開発している[1]。導体の開発段階において、導体の臨界電流( $I_c$ )測定中に室温と液体窒素温度の間の熱サイクルによって導体の  $I_c$  が劣化することがわかった。 $I_c$  劣化の原因は、REBCO テープと AI 合金ジャケットの熱収縮率の違いにより、導体内の REBCO テープに局所的な応力集中が生じて座屈が起きることが原因と推測された。本研究では、REBCO テープの座屈と  $I_c$  劣化の関係を定量的に明らかにすることを目的とする。

### 2. REBCO 線における座屈の理論式の検討

室温において、圧縮試験機を用いて REBCO テープの座屈試験を行った。また座屈荷重を理論的に推定するため、Euler と Johnson の座屈荷重の式と実験での座屈荷重の比較を行った。ここで、実験で用いた REBCO テープは、おおよその機械的特性が基板によって決まることから、用いられている基板である幅4 mm, 厚さ50  $\mu\text{m}$  の Hastelloy® C-276 とみなし、機械的性質は参考論文[2]の値を使用した。座屈させる空間の長さに対する、これらの座屈荷重を Fig. 1 に示す。ここから、2 つの式の接点を境に、空間が長い場合は Euler の座屈荷重の式、短い場合は Johnson の座屈荷重の式で REBCO テープの座屈荷重が推定できる。

### 3. 热収縮による座屈試験

上記の理論をもとに、異なる材料の熱収縮差によって生じる座屈を模擬する実験を行った。まず、室温において AI 合金の板と REBCO テープを重ね、両端を固定した。次に液体窒素温度77 K に下げることで、2 つの物質はそれぞれの熱収縮から異なる長さになろうとする。しかし、両端を固定していることから同じ長さとなり、この時に弾性体としてみなすことによる力のつり合いから、REBCO テープにかかる力を求めた。REBCO テープに加わる力  $F_{RE}$  は以下の式で表される。

$$F_{RE} = \left| \frac{\frac{S_{AI}E_{AI}}{1-\alpha_{AI}\Delta T} \times \frac{S_{RE}E_{RE}}{1-\alpha_{RE}\Delta T}}{\frac{S_{AI}E_{AI}}{1-\alpha_{AI}\Delta T} - \frac{S_{RE}E_{RE}}{1-\alpha_{RE}\Delta T}} (\alpha_{AI} - \alpha_{RE})\Delta T \right| \cdots (1)$$

ここで添え字 RE, AI は、REBCO テープ、AI 合金を表しており、 $S$ ,  $E$ ,  $\alpha$  はそれぞれの断面積・ヤング率・熱膨張係数である。また  $\Delta T$  は室温から低温への温度変化を表す。室温から 77 K の範囲では、AI 合金と Hastelloy® C-276 のヤング率及び熱膨張係数はおおよそ一定とみなせる[2][3]。(1)式および、Fig. 2 に示す 77 K での解析的に求めた座屈荷重の値の比較によって、熱収縮による座屈条件が検証できる。

最初に、室温で座屈させる治具のみを REBCO テープにつけ、液体窒素中に浸す実験を行った。十分時間がたち、液体窒素中から取り出した直後には、テープが座屈している様子が見られた。Fig. 3 は、REBCO テープに座屈による折り目がついた様子である。この時は、(1)式より 103 N の力がテープ長

さ 3 mm にかかる条件としており、Fig. 2 での長さ 3 mm で必要な座屈荷重 37 N を上回る。

今後、座屈試験と同時に REBCO テープに通電し、 $I_c$  測定を行う予定である。詳細と実験結果については発表にて報告する。

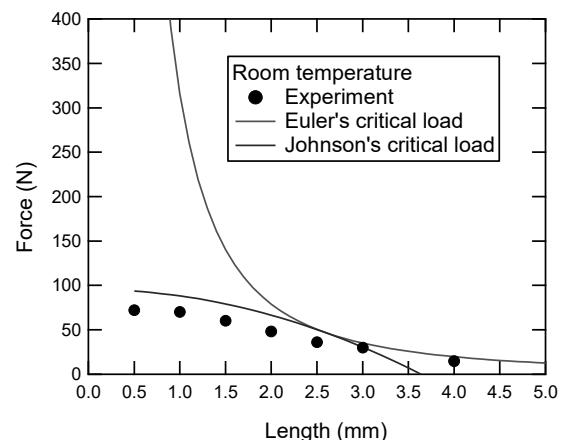


Fig. 1 Critical load for the length of the buckling space in room temperature

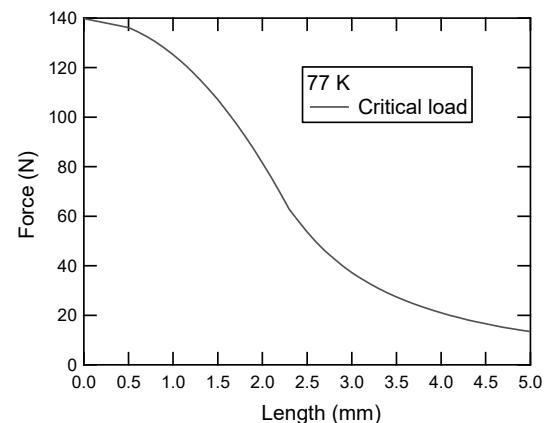


Fig. 2 Analysis of the critical load of the length of the buckling space at 77 K

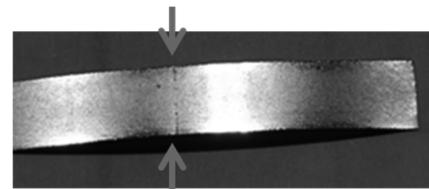


Fig. 3 Crease of REBCO tape after buckling experiment

### 参考文献

1. T. Mito *et al.*; J. Phys. Commun., 4 035009 (2020)
2. C. C. Clickner *et al.*; Cryogenics 46, 432 (2006)
3. J. Lu, E. S *et al.*; J. Appl. Phys., 103 (6) (2008)

## REBCO 線材を積層させた導体中における欠陥検出手法の検討 Investigation of defect detection method in REBCO stacked conductor

小野寺 優太, 三戸 利行, 平野 直樹 (NIFS)  
ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki, HIRANO Naoki (NIFS)  
E-mail: onodera.yuta@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所では、次世代の核融合実験装置に高温超伝導を適用するために、大電流容量の高温超伝導導体およびコイル技術の研究開発を進めている。素線となる REBCO 線材を集合させ機械的な補強材を被覆した導体を巻線して用いることを想定しており、候補となる導体の試作開発を進めているが、導体の製作過程で臨界電流特性の局所的な劣化が観測され、克服すべき課題となっている。しかしながら、REBCO 線材自体の品質保証技術は研究され、線材の生産技術として確立してきているのに対し、線材を積層・集合化した導体の品質を検査する方法については、導体そのものが研究開発段階であることから、技術的に確立していない。そこで、本研究では回転させつつ着磁させる磁化法を用いて、積層導体に対する劣化位置を検出する手法を検討した。

### 2. 実験方法

実験には REBCO 線材( $I_c = 250 \text{ A/cm-w at } 77 \text{ K s.f.}$ )を用いた。長さ 5 cm に切断した同線材を 0.5 mm の隙間を空けて治具に固定し、引っ張り圧縮機にて圧縮応力を印加することで意図的に欠陥を導入した。Fig. 1 に積層させる前の REBCO 線材に欠陥を導入した箇所の写真を示す。矢印で示す 5 箇所の部分に圧縮応力を印加し座屈させた後、上から順に 1 mm 厚のアルミニウムのスペーサーを交互に積層させて測定試料とした。

Fig. 2 に試作した実験装置の磁化計測部分の模式図を示す。積層させた測定試料をシャフトの先端に取り付け、液体窒素中にて、設置した永久磁石の間を回転させつつ搬送することで着磁させ、長手方向に亘る磁化信号をホール素子にて計測した。

### 3. 実験結果

Fig. 3 (a) に長手方向に亘って計測を行ったホール電圧の強度分布を示す。また、Fig. 3 (b) に Fig. 3 (a) の各場所における磁化信号の波形を示す。同図より静磁場中で試料を 1 回転させることによって着磁し、積層させた測定試料の表側および裏側より 2 つのピーク値を持つホール電圧信号が観測されることが確認できる。そして、0.1 mm ずつ長手方向に搬送させ、回転させつつホール電圧を計測することによって試料全長に亘るホール電圧信号の分布を取得した。

本測定手法による計測の結果、欠陥を導入した位置にてホール電圧の信号強度が変化していることが確認できる。中央 3 枚に欠陥を導入した箇所（青線）では 2 つのピーク値が同程度減衰しているのに対し、片側 2 箇所に欠陥を導入した部分（緑線）では片側のピーク値がより減衰していることが確認できる。このことから、2 つのピーク値の信号の強弱によって劣化箇所を判定することが可能であることをわかった。したがって、本手法が積層導体の欠陥位置を検出する上で有効であることが明らかとなつた。

### 謝辞

本研究は、NIFS-UFZG-002 および、日本学術振興会の科研費 (19K14691) の助成を得て行ったものである。

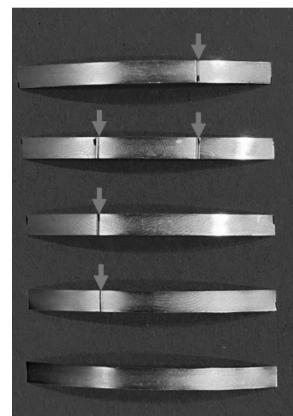


Fig. 1 Picture of REBCO tapes before stacked. The buckling defects have been intentionally introduced by compression testing machine.

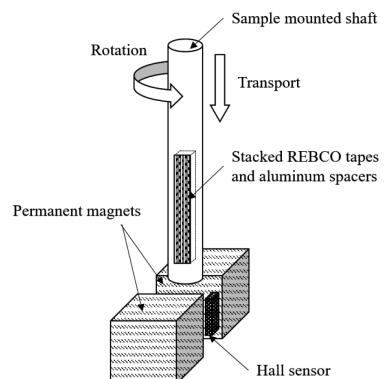


Fig. 2 Schematic diagram of the magnetization measurement part.

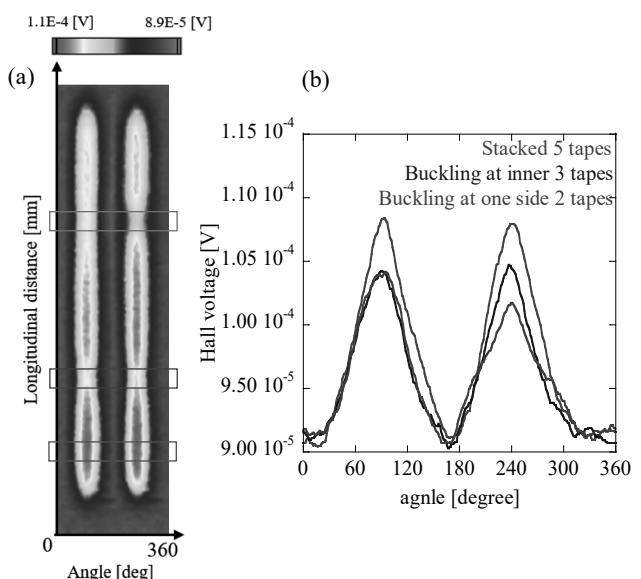


Fig. 3 (a) Experimental results of magnetization signals over the longitudinal direction. (b) Magnetization signal waveform at each position indicated in (a).

# クエンチ時の無絶縁 REBCO パンケーキ・コイル内の誘導電流低減に関する検討

## An investigation on induced current reduction in NI REBCO pancake coils after quench

間藤 昂允, 野口 聰(北大); HAHN Seungyong(ソウル大)

MATO Takanobu, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); HAHN Seungyong (Seoul National Univ.)

E-mail: mato@em.ist.hokudai.ac.jp

### 1. はじめに

超高磁場発生に無絶縁 REBCO パンケーキ・コイルは適していると考えられる。しかし、超高磁場無絶縁 REBCO コイルでもクエンチした際に、非常に大きな磁気エネルギーを放出する必要がある。そして、条件によっては全てのエネルギーを放出しきれずにコイルの焼損、機械的破損をもたらすことが報告されている。これを防ぐもしくは軽減する方法として、無絶縁 REBCO コイルの外側に銅管を配置する「マグネット・ダム」という手法が提案された[1]。本稿では、銅管の代わりに通電しない無絶縁 REBCO 卷線を配置することで、ある無絶縁 REBCO コイルがクエンチした際に、クエンチしていない REBCO コイルへの誘導電流を抑制することを数値解析で検証した。

### 2. 解析モデル・解析結果

Fig. 1 に、本稿で検討するマグネット外観図を示す。導通するメイン・コイルの内側と外側に導通しないターン間無絶縁巻線を配置し、クエンチなどのイベントが生じた際の誘導電流を抑制させる。内側と外側の非導通巻線はメイン・コイルとは電気的に絶縁されている。TABLE I に REBCO テープ線や無絶縁 REBCO パンケーキ・コイルの諸元、運転条件を示す。本解析では文献[2]で使用されている解析手法を採用した。解析では、 $t = 0$  s 時に SP 2 がクエンチした時を想定し、SP 3 の誘導電流をまず調査した。

Fig. 2 に(a)従来の無絶縁 REBCO コイルの場合、(b)に外側に非導通巻線を配置した場合、(c)に内外両側に非導通巻線を配置した場合のクエンチ後の SP 3 (メイン・コイル) の電流推移を示す。(a)から、メイン・コイルの最内および最外ターンから、非常に大きな誘導電流が中央部へ、時間と共に侵入している様子が分かる。この大誘導電流が極めて大きなフープ力を生じさせ、コイルの機械的破損につながると考えられる。一方、(b)に示すように、外側に非導通巻線を配置した際には、最外周ターンに流れる誘導電流を低減できていることがわかる。そして、(c)に示すように内外両側に非導通巻線を配置することで、誘導電流を劇的に抑制できることが確認できる。

今後は、励磁時などにおける非導通巻線の影響や遮蔽電流の影響など、マグネット性能を検証していく必要がある。

### 参考文献

1. S. An, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 30 (2020) 4701705
2. S. Noguchi: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29 (2019) 4602607

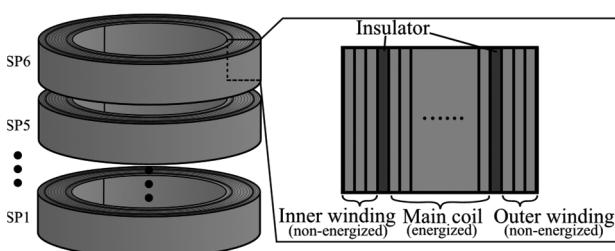


Fig. 1. REBCO pancake coil with non-energized inner and outer windings.

TABLE I SPECIFICATIONS OF REBCO TAPE AND COILS, AND OPERATING CONDITIONS

Parameters	Value
REBCO Tape	
Tape width [mm]	4.0
Tape thickness [mm]	0.096
Copper matrix thickness [ $\mu\text{m}$ ] (each side)	20.0
REBCO thickness [ $\mu\text{m}$ ]	2.0
$I_c$ @ 77K, self-field [A]	120.0
Coil	
Number of double pancakes	3
Main coil inner diameter [mm]	70.0
Main coil outer diameter [mm]	79.6
Insulator thickness between main coil and inner or outer coil [ $\mu\text{m}$ ]	10
Number of main coil turns [turn]	50
Number of outer coil turns [turn]	5
Number of inner coil turns [turn]	5
Turn-to-turn contact resistivity [ $\mu\Omega\text{cm}^2$ ]	70
Operating Conditions	
Operating temperature [K]	10
Initial operating current [A]	500.0

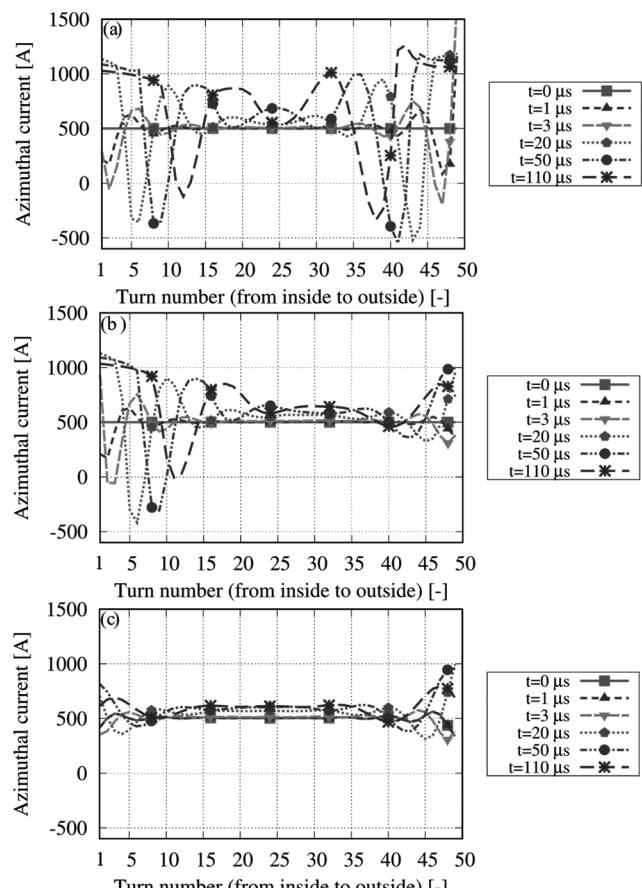


Fig. 2. Azimuthal current distribution of no-insulation REBCO pancake coil after one pancake coil quenched (a)without outer and inner coils, (b)with only outer coil and (c)with both inner and outer coil.

# 導電性樹脂による保護技術を施した REBCO コイル内の電流現象の数値解析

Numerical simulation on current behaviors of REBCO coil with conductive epoxy resin

間藤 昂允, 野口 聰(北大); 石山 敦士(早大)

MATO Takanobu, NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: mato@em.ist.hokudai.ac.jp

## 1. はじめに

高温超電導コイルを安定に運転するために多くの保護技術が開発されてきた。その一つとして導電性樹脂によるREBCOコイル(以下、導電性樹脂コイル)の安定化技術があげられる[1]。これはREBCOパンケーキ・コイルのターン間は絶縁するが、導電性を有する樹脂でコイル上面をコーティングするものである。REBCOパンケーキ・コイル内部で局所常電導転移が発生しても、電流は導電性樹脂を迂回して流れることができ、従来の無絶縁REBCOパンケーキ・コイルと同様の熱的安定性を実験的に示した[1]。しかし内部の詳細な電流の振る舞いはわかつていない。そこで本報では、電流遮断テスト時の電流変化を数値解析によって明らかにした。また、従来の無絶縁REBCOパンケーキ・コイルの解析と比較した。

## 2. 解析モデル・解析結果

導電性樹脂コイルをFig. 1に示した回路でモデル化し、シミュレーションを行った。REBCOテープ線やコイルの諸元、運転条件をTABLE Iに示す。導電性樹脂コイルおよび従来の無絶縁REBCOパンケーキ・コイルに対し、電源電流を50 Aから0 A( $t = 0$  s)にする遮断テストのシミュレーションを行い、その結果を比較した。

Fig. 2に遮断試験を行った際の、正規化したコイル中心磁場の様子を示す。なお、従来の無絶縁REBCOパンケーキ・コイルの接触抵抗( $220 \mu\Omega\text{cm}^2$ )は、時定数が同じになるように設定した。

Fig. 3に、電源電流遮断後の各ターンにおける周方向電流の分布を示す。従来の無絶縁コイルの場合、電流は運転電流を超えることなくコイル最内周から徐々に減衰していく様子が確認できる。しかし、導電性樹脂コイルの場合はコイル最内周および最外周から同時に減衰していくものの、コイル中央部では運転電流を一時的に超えていている。導電性樹脂と

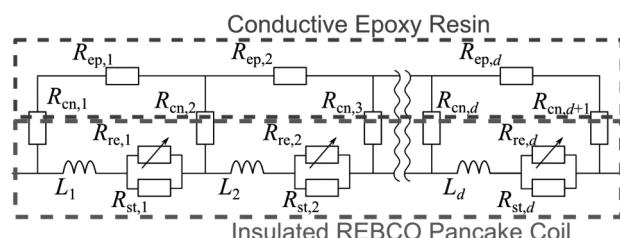


Fig. 1. New equivalent circuit model for conductive epoxy resin coil.

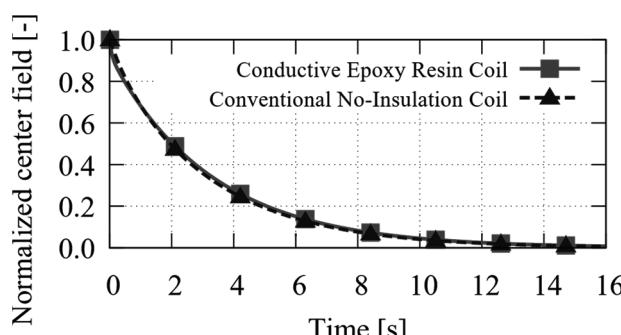


Fig. 2. Sudden-discharging test simulation results of conductive epoxy resin and conventional no-insulation coils.

REBCOパンケーキ・コイル間で還流電流が発生しているために、このような結果になった。詳細および過電流試験の結果については、発表当日に報告する予定である。

TABLE I SPECIFICATIONS OF REBCO TAPE AND COILS, AND OPERATING CONDITIONS

Parameters	Value
REBCO Tape	
Tape width [mm]	4.1
Tape thickness [mm]	0.167
Copper matrix thickness [ $\mu\text{m}$ ] (each side)	45.0
REBCO thickness [ $\mu\text{m}$ ]	2.0
$I_c @ 77\text{K, self-field}$ [A]	115.0
Coil	
Coil inner diameter [mm]	100.0
Coil outer diameter [mm]	193.0
Number of turns [turn]	200
Contact resistivity between conductive epoxy resin and REBCO tape edge [ $\mu\Omega\text{m}^2$ ]	3.0
Turn-to-turn contact resistivity of conventional no-insulation coil [ $\mu\Omega\text{cm}^2$ ]	220
Resistivity of conductive epoxy resin [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	3.5 <sup>[1]</sup>
Operating Conditions	
Operating temperature [K]	77.0
Initial operating current [A]	50.0

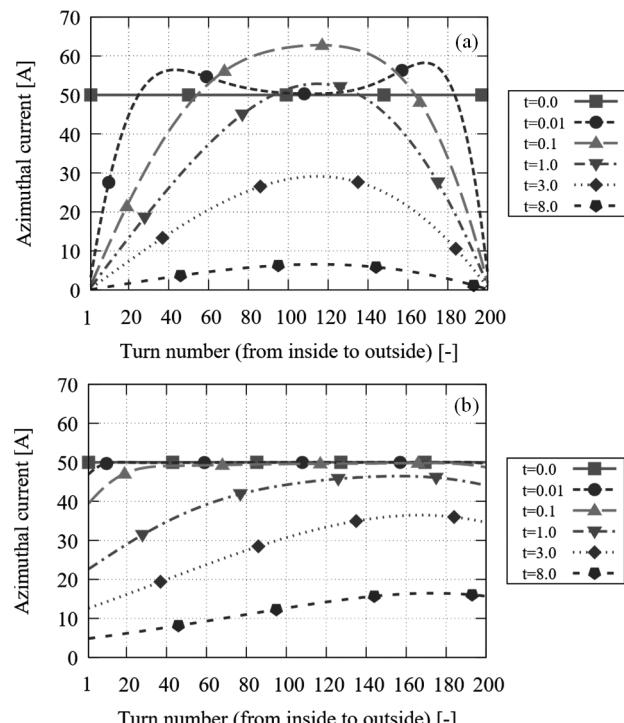


Fig. 3. Azimuthal current distribution of (a) conductive epoxy resin coil and (b) conventional no-insulation coil.

## 参考文献

1. H. Miyazaki, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29 (2019) 4602805

## 市販人工ピン入り RE 系コート線材を用いた单層縦磁界超伝導導体の通電特性

Current-carrying properties of single-layer longitudinal magnetic field superconducting conductors using commercial RE-based coated tape with artificial pin

木内 勝(九工大);吉田 隆(名大)

KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. Of Tech.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

周波数変換の問題がなく高効率、高密度の電力輸送が可能な直流超電導送電ケーブル、電力超電導導体が注目されている。我々のグループでは、電流の通電方向に磁界を加える縦磁界下で臨界電流  $I_c$  が増加する、縦磁界現象を利用した直流超電導送電ケーブルや電力超電導導体の開発を行ってきた[1]。ただし、この電力導体の電流容量は、線材の縦磁界での臨界電流  $I_c$  の増加率で決定されるために、その線材の開発も重要である。

近年、横磁界の  $I_c$  特性向上に有効である人工ピン入り線材が市販されるようになった。そこで、本研究では、現在市販されている人工ピン線材に注目し、その有効性を確認するために、この人工ピン線材を用いた单層の縦磁界超電導導体を設計及び作製し、通電特性を評価した。

### 2. 実験

单層の縦磁界超電導導体の作製には市販されているフジクラ社製の人工ピン入りコート線材を用いた。線材幅は 4 mm で超電導層の厚さは  $2.5 \mu\text{m}$  である。線材を 40 mm 切り出し、液体窒素温度下での縦磁界及び横磁界の臨界電流密度  $J_c$  特性を直流四端子法で測定行った。Fig. 1 に一枚のコート線材の  $J_c$  の磁界依存性を示す。縦磁界 ( $B//J$ ) の  $J_c$  は 0.1 T までは磁界に依存せず、さらに横磁界 ( $B \perp J$ ) に比べて大きな値を示した。

この  $J_c$  の磁界依存性を考量して、单層の縦磁界超伝導導体の総電流量  $I_{ct}$  求めた[2]。今回の超電導導体は、全長が 120 mm、フォーマの直径は 15 mm で、線材の巻き角度を軸に対して  $\theta = 10^\circ$  とした。また、使用線材枚数は 12 枚である。Fig. 2 に設計で得られた超電導導体の縦磁界依存性を点線で示す。

以上の設計に基づき超電導導体を作製し、液体窒素中で通電測定を行った。なお、今回の超電導導体は内側導体のみの作製のみあるため、シールド層が作る縦磁界は Bi-2223 超電導コイルを用いて加えた。

### 3. 結果及び検討

Fig. 2 に通電結果を示す。実験値と設計値とで定量的に良い一致が得られた。また、一枚の  $J_c$  の低磁界領域での特性を反映して、单層においても 0.1 T までは磁界の影響を受けない  $I_{ct}$  が得られ、人工ピン導入の影響が表れていることが確認できた。

上記の設計手法を用いて、線材の巻き角度を  $\theta = 10^\circ$  に固定し、3 層構造の場合の特性を解析した。その結果を Fig. 3 に示す。单層の結果と異なり、3 層では 0.1 T 近傍で  $I_{ct}$  に明確なピークが表れ、多層化により高効率な電流容量が得られることが分かった。ピンなし線材を用いた超電導導体との比較は発表当日行う。

### 謝辞

本研究(一部)は国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「A-STEP 機能検証フェーズプログラム」の支援によって行われた。

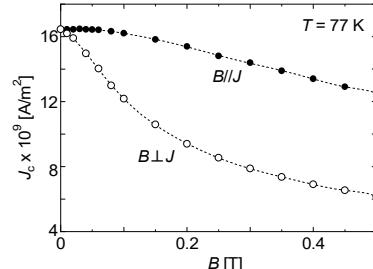


Fig. 1 Critical current density  $J_c$  vs. longitudinal magnetic field  $B$  for longitudinal magnetic field. Symbol is experimental result and dotted line is fitting result.

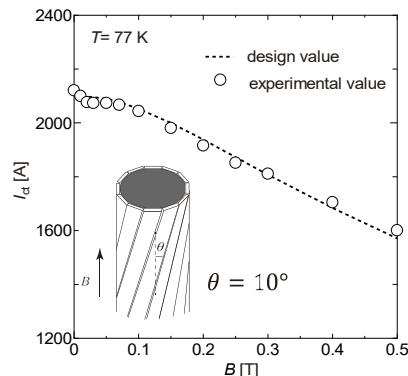


Fig. 2 Current-carrying capacity  $I_{ct}$  vs. longitudinal magnetic field for one-layer conductor. Dotted line is design result and symbol is experimental result.

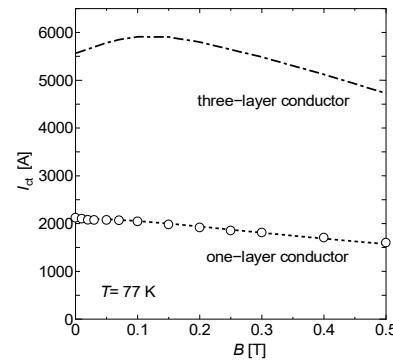


Fig. 3 Theoretically expected current-carrying capacity vs. longitudinal magnetic field for three-layer conductor of the same size made of coated conductors shown in Fig. 2.

### 参考文献

- [1] T. Matsushita *et.al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 125009.
- [2] Matsushita T., Kiuchi, M., Progress in Superconductivity and Cryogenics Vol. **19**, No.3, (2017) p.1.

## HTS テープ線材の短絡電流試験

### Short-current experiment of single HTS tape

イワノフ ユーリ, 岩田 暢祐, 木原 健志, 山口 作太郎 (中部大)  
 IVANOV Yury, IWATA Yosuke, KIHARA Takeshi, YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)  
 E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

#### 1. Introduction

Specification of the cable for power transmission line is determined by the pulse width and magnitude of the short-circuit current in the accident scenario. Therefore, it is necessary to develop the similar standards for testing HTS DC cables. The degradation of the performance parameters of the HTS tape specimens after passing a pulse of large current should be initially studied. Until now, we have conducted experiments to pass 900 A, 5 ms pulses through Bi-based HTS tapes with a critical current of 200 A. The new high-current pulse source was created in order to systematically conduct this kind of experiments. The test results will be announced as the first report.

#### 2. Short-circuit current test method and equipment

The electric circuit for the pulse experiment is presented in Fig. 1. The capacitor C (consists of 4 items x 6.8 mF) is charged by an external power supply with an output voltage that can be set in the range from 0 to 200 V. For the safety reasons, the capacitor can be discharged through a shunt resistor (not shown for simplicity). When the switch NFB (no-fuse breaker) is closed, the capacitor discharges through a specimen of the HTS tape, causing the current pulse. Diode D basically shunts the negative half-waves of the decaying oscillations that appear in the circuit due to the presence of parasitic inductance, however a small surge of negative polarity remains.

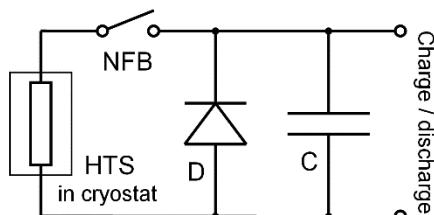


Fig. 1. Conceptual electric circuit for pulse experiment.

During the experiments we used BSCOO HTS tape ( $I_c=180$  A) manufactured by Sumitomo Electric Industries, Ltd. 7 cm long specimen of the tape was cooled by liquid nitrogen in an open cryostat. The peak current and pulse duration can be changed by varying the capacitance C and the voltage of the charging power supply. The load can be also increased by increasing the number of current pulses. Taking into account that the study was carried out in the framework of modeling HTS DC cable, the critical current was measured several times with slowly increasing and slowly decreasing current before and after applying the series of pulses.

#### 3. Experimental results

Fig. 2 shows the characteristic shape of the current pulse that occurs when the switch NFB closes. In the described experiment, pulses with the peak current of about 1900 A and duration of about 0.6 ms were applied. Noise oscillations at

the maximum current are obviously caused by the bounce of the switch contacts. It should be suppressed after upgrading the test bench.

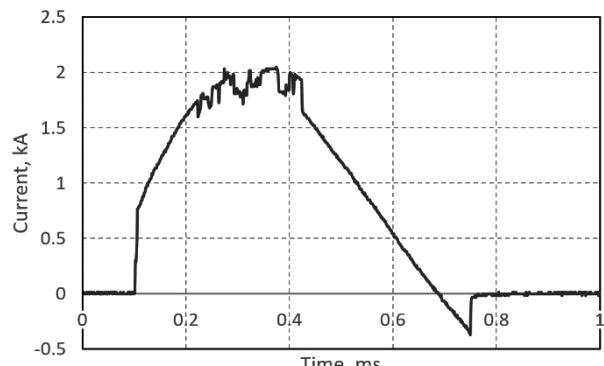


Fig. 2. Current pulse shape.

The result of observations of the HTS tape behavior before and after 10-fold transmission of the pulse current with the abovementioned parameters are shown in Fig. 3. The  $n$  value demonstrates a slight degradation of about 2%, while the critical current  $I_c$  remains practically unchanged. Obviously, the current load on the HTS tape should be increased to obtain statistically significant results.

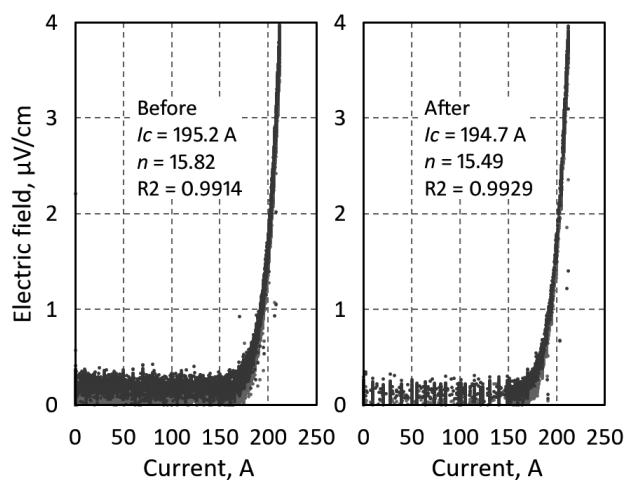


Fig. 3. Critical current measurements before and after short-circuit current experiment.

#### 4. Conclusion

Transmission of ten 1.9 kA, 0.6 ms current pulses does not cause a noticeable degradation of the performance of Bi-based HTS tape with  $I_c$  of 180 A, although a slight decrease in  $n$  value was found. In the next step, the measurements for a wide range of currents and pulse durations will be carried out.

#### Reference

- M. Tallouli et al.: J. Phys. Conf. Ser. **871** (2017) 012035

## 縦磁界効果を用いた 10 kA 級超伝導直流ケーブルの設計

### Design of 10 kA class superconducting DC cable using longitudinal magnetic field effect

米中 友浩, 小田部 荘司, 一木 悠人, 松下 照男, 木内 勝(九工大); 倪 宝榮(福工大);  
胡 南南(昆明理工大, 中国南方電網)

YONENAKA Tomohiro, OTABE Edmund Soji, ICHIKI Yuto, MATSUSHITA Teruo, KIUCHI Masaru (Kyutech);  
NI Baorong (Fukuoka Ins. Tech.); Hu Nannan (Kunming Univ, China Southen Power Grid)

#### 1. はじめに

超伝導体は直流電気抵抗が無く、大容量の電流を流せることから直流電力ケーブルへの応用が期待される。一般に超伝導体に電流を流すと、自身の電流により磁界が生じ、臨界電流密度が減少する。そこで現在の超伝導ケーブルの多くが磁界の影響を抑えるような構造となっている。一方で我々は縦磁界効果を利用した超伝導ケーブルを提唱している。Fig. 1 のように内側の層と外側の層で構成し、ケーブルの巻き線角度を数度ずつ変えることで、全体で考えたときに電流と平行に磁界が生じるように設計する。これにより磁界が発生した際に臨界電流密度の減少を抑えられると期待できる。本研究では 10 kA 級の超伝導ケーブルを想定し、従来の磁界の影響を抑える巻き方と、縦磁界を発生させる巻き方とでケーブルを設計した際の電流値を比較し、縦磁界ケーブルの優位性を調査した。

#### 2. 計算方法

本研究では REBCO コート線材の  $J_c$ - $B$  特性をもとに 10 kA を超える直流ケーブルを設計し、従来の構造と縦磁界を発生させる構造でケーブル全体に流せる電流値を計算した。

内側から  $i$  番目の超伝導層の中心からの距離を  $a_i$ 、巻き角度を  $\theta_i$ 、臨界電流密度を  $J_{ci}$  として臨界電流は  $I_i = 2\pi a_i J_{ci} t$  で与えられる。このとき、縦磁界は  $B_{i\parallel} = \sum_{k=1}^n \frac{\mu_0 I_k \sin^2 \theta_k}{2\pi a_k \cos \theta_k} + B_e$ 、横磁界は  $B_{i\perp} = \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\mu_0 I_k \cos \theta_k}{2\pi a_i}$  となり、磁界の強さは  $B_i = (B_{i\parallel}^2 + B_{i\perp}^2)^{1/2}$ 、線材方向からの角度は  $\varphi_i = \theta_i - \tan^{-1} \frac{B_{i\perp}}{B_{i\parallel}}$  で与えられる。  $B_e$  は外側のシールド層が作る縦磁界であり、シールド層の半径を  $a_s$ 、角度を  $\theta_s$ 、輸送電流を  $I'_c$  とすると、 $B_e = \frac{\mu_0 I'_c \sin^2 \theta_s}{2\pi a_s \cos \theta_s} = \frac{\mu_0 I'_c}{2\pi a_s} \tan^2 \theta_s$  となる。これらの式を用いてケーブル全体の電流値を求めた。

#### 3. 結果と考察

内径 30mm、往復各 3 層のときのケーブルに流せる全電流の巻き角度依存性を Fig. 2 に示す。前提として角度が増加すると線材の本数が減少するため電流値は減少する。巻き角度 30° での使用を想定すると従来の構造に比べて縦磁界ケーブルの電流値は 15%程度高くなっている。しかししながら 30° では 10 kA に満たなかったため、電流容量を増加するために往復各 4 層で計算した結果を Fig. 3 に示す。こちらは縦磁界ケーブルが 20%程度高くなっている。シールド層に流れる電流値が増えたことで縦磁界が強くなり、臨界電流密度が増加したと考えられる。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H00771 の助成を受けたものです。上海超伝導の山田穰博士との有意義な議論に感謝いたします。

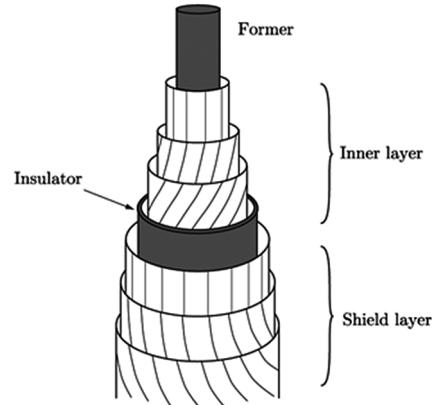


Fig. 1 Structure of superconducting DC cable using longitudinal magnetic field effect.

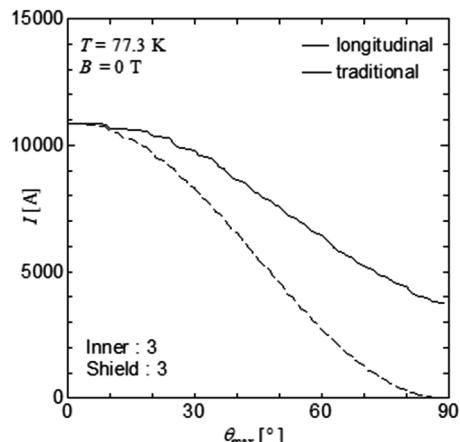


Fig. 2 Comparison of current value for 6 round-trip layers.

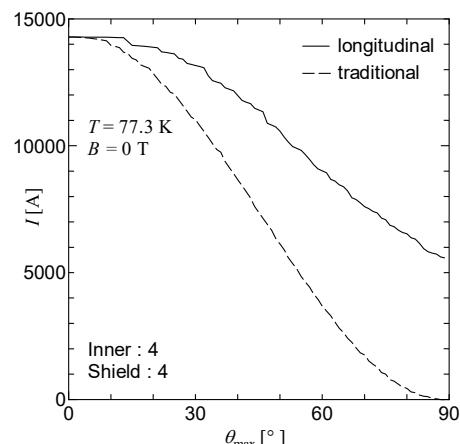


Fig. 3 Comparison of current value for 8 round-trip layers.

## 低酸素分圧下で焼成した Bi2223 線材の不可逆磁場

### Irreversibility field of Bi2223 tapes sintered under low partial oxygen pressure

佐藤 海斗, 元木 貴則 下山 淳一(青学大); 中島 隆芳, 山出 哲(住友電工)

SATO Kaito, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);

NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: c5619047@aoyama.jp

#### 1. はじめに

Bi2223 は高い臨界温度を有し、 $c$  軸配向組織の形成が容易な劈開性を有していることから長尺多芯線材としての開発が比較的早期に進行し既に多くの用途で実用されている。最も普及している住友電工社製 DI-BSCCO® は 2 回の圧延と 2 回の焼成によって作製されている。2 次圧延後の 2 次焼成は熱間静水圧(HIP)法を用いて作製されているが、その焼成条件は 1 次焼成の時と同様に酸素分圧~8 kPa 程度で行われているのが現状である[1]。我々はこれまで酸素分圧 2~3 kPa の焼成で Bi2223 相の生成が促進されること、不純物相の粒成長が抑えられることを報告してきた[2]。さらに、低酸素分圧下での焼成では Pb の固溶限界が高濃度側にシフトすることから磁場中臨界電流特性の改善が期待でき、加えて焼成温度の低下による不純物相の生成や不純物粒子の成長抑制や Pb の飛散量が低減する効果もある。

以上の背景のもと、本研究では 2 次圧延線材に対して大気圧下 2 次焼成を低酸素雰囲気下で行い、磁場中の臨界電流特性の改善を試みた。特に不可逆磁場と焼成条件、酸素アニール条件に着目し、不可逆磁場の改善指針について考察した。

#### 2. 実験方法

DI-BSCCO の 2 次圧延線材に対して大気圧下、790~840°C,  $P_{O_2} = 2\text{--}8\text{ kPa}$  の条件で 2 次焼成を行った後、740°C,  $P_{O_2} = 1\text{ kPa}$ , 24 h のポストアニールを施し炉冷した。また一部の試料に対しては酸素アニールにより酸素量の制御を行った。得られた試料について XRD による相同定、SEM による微細組織観察を行った。磁化特性は SQUID 磁束計により評価した。

#### 3. 結果と考察

$P_{O_2} = 2\text{ kPa}$  の雰囲気で焼成温度、徐冷過程を変化させて作製した試料の  $\Delta M - H$  特性を Fig.1 に示す。白抜きシンボルで示した炉冷試料を比べるとゼロ磁場における特性に大きな差がないものの、低磁場下での特性が若干改善していることが分かる。これらに酸素アニールを追加したところ、3 T 付近まで臨界電流特性が大きく改善し、これは標準的な DI-BSCCO 線材よりも優れている。講演では他の温度での臨界電流特性や  $T_c$ 、格子定数など含めて、低酸素分圧下 2 次焼成が高磁場下の臨界電流特性に及ぼす効果も議論する。

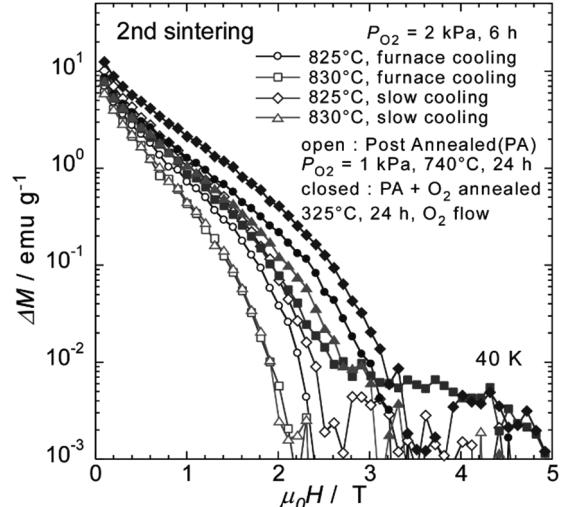


Fig.1  $\Delta M - H$  curves at 40 K of Bi2223 tapes sintered under  $P_{O_2} = 2\text{ kPa}$  for 6 h at various temperatures.

#### 参考文献

- [1] K. Sato, S. Kobayashi, T. Nakashima, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 010006
- [2] R.Tajima, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, T. Nakashima, S. Kobayashi, K. Hayashi, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013)

# BSCCO-2223 テープの臨界電流の歪依存性と機械特性の相関

## Correlation between strain dependence of critical current and mechanical properties of BSCCO-2223 tapes

長村 光造 (応用科学研); 町屋 修太郎 (大同大); 加藤 武志(住友電工); 南野 忠彦(住友電工);  
 長部 吾郎(住友電工); 山出 哲(住友電工)  
OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ); KATO Takeshi(SEI); MINAMINO Tadahiko(SEI);  
 OSABE Goro(SEI); YAMADE Satoru(SEI)  
 E-mail: kozo\_osamura@rias.or.jp

### 1. はじめに

BSCCO-2223 テープは複合材料であり、臨界電流の歪特性は金属構成材の種類、状態に大きく影響される。そこで実測した臨界電流の歪依存性と応力-歪から得られた弾塑性特性の相関を調べて、金属成分がどのように超電導フィラメントに影響するかを考察した。

### 2. 試験方法

供試料には住友電工で作製された2種類のBSCCO テープ線材(Bare, NX30)を用いた。島津製作所製引張試験機を用い試料部分を液体窒素に浸漬し、試料に電圧端子を取り付け、チャック部分から電流を流して  $I-V$  測定を行い臨界電流及び  $\nu$  値を決定した。また引張試験を行った。歪測定には Nyilas の歪計を用いた。

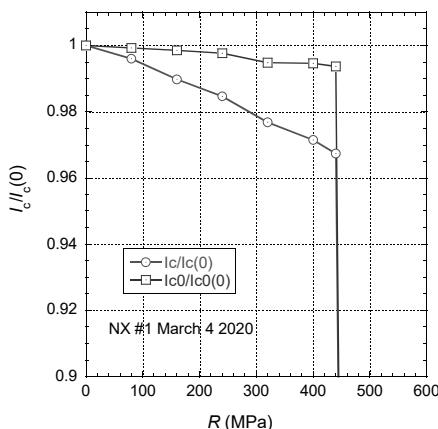


Fig. 1 Normalized critical currents,  $I_c/I_{c0}$  versus applied stress for NX BSCCO tape

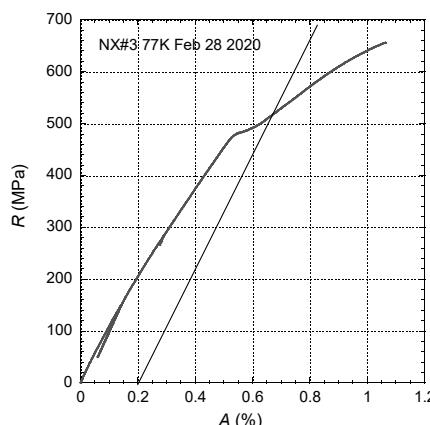


Fig. 2 Stress-strain curve for NX BSCCO tape

### 3. 実験結果

Fig. 1 に臨界電流の引張応力依存性を示す。ここで赤曲線は応力  $R$  を印加した状態で測定した値であり、青曲線は一旦応力を  $R$  まで印加した後除荷して応力ゼロの状態で測定した値である。赤曲線、青曲線共に 440 MPa 辺りで値が急激に低下するのは超電導フィラメントが破断することによるものである。ここで  $I_c/I_{c0}(0)=0.95$  になる応力を  $R(95\%I_{c0})$  で示す。それより低い応力で臨界電流が徐々に低下するのは超電導一常伝導転移によるものである<sup>1)</sup>。

一方 Fig. 2 において低応力側における弾塑性変形の後、一旦肩が見られるがこれはある金属成分の塑性変形が顕著に起こるためである。それより高応力側では塑性変形が生じている。この応力-歪曲線に対して 0.2%耐力 ( $R_{0.2}$ ) を求めるために図に示すように直線を引く。

Table 1 Summary of experimental results

	$R(95\%I_{c0})$ (MPa)	$R_{0.2}$ (MPa)	$R(95\%I_{c0})/R_{0.2}$
Bare	135	-	-
NX30 #1	440	508	0.87

### 4. 考察

実験結果に示したように引張荷重を過大に加えると、BSCCO フィラメントの破断に起因して臨界電流が急激に減少する。この指標として  $R(95\%I_{c0})$  を用いる。BSCCO 複合テープでは応力-歪曲線が典型的な弾性域、弾塑性域、塑性域と変化することはその構造上から認められない。試料全体が塑性域にあるとき、その指標に 0.2%耐力 ( $R_{0.2}$ ) を定義した。本節では  $R(95\%I_{c0})$  と  $R_{0.2}$  の関係性について検討した。Table 1 に示すように NX テープではその比は 0.87 となった。一方 Bare テープでは強度が低いため 0.2%耐力に至るまでに破断した。

一方文献 2) で報告したように REBCO テープではこの比は 0.6~0.68 であった。

### 5. まとめ

$R(95\%I_{c0})$  と  $R_{0.2}$  の関係性について多くの研究者が調査を行っているが、本研究の結果からは、比例関係を持つというような直接的な相関を見出すことはできなかった。

### 参考文献

- 1) K Osamura, S Machiya, T Kawasaki, S Harjo, T Kato, S Kobayashi and G Osabe, "Mechanical-electromagnetic property of stainless sheet laminated BSCCO-2223 wires", Materials Research Express, Volume 6, Number 2 (2019)
- 2) K Osamura et al, "Inverted-parabolic and weak strain dependencies on the critical current in practical <110> and <100> oriented REBCO tapes", AIP Advances 9, 075216 (2019)

## Bi-2223 線材の局所 $J_c$ 均一性に対する半田接合補強材の効果

The effect of soldered reinforcement tape on local critical current homogeneity in Bi-2223 tapes

木須 隆暢, 呂 琳, 鈴木 匠, 東川 甲平(九州大学)

KISS Takanobu, LYU Lin, SUZUKI Takumi, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu University)

E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

Bi-2223 線材は、高い臨界温度にともなう冷却に対する尤度に加え、量産性にも優れることから国内外の超伝導ケーブルプロジェクトにおいて最も豊富な実績を有する材料である。また、低温域においては、臨界電流特性が大きく向上することから、強磁場マグネット用材料としても優れた実績を有する。近年、高強度テープを半田接合によって複合化する線材構造が開発され、素線の引っ張り応力や曲げ特性が著しく向上することが報告されている[1]。一般に超伝導線材の臨界電流特性や機械特性は短尺試料を用いた測定が行われるが、実用機器の信頼性向上においては、長尺線材の局所均一性の向上が重要な因子となる。Bi-2223 線材の均一性は、四端子法によるリール式測定によって優れた特性を有することが報告されている[2]が、四端子法による測定では、電圧端子間距離は典型的にはメートルオーダーであり、局所的な欠陥を検出する事は困難である。そこで、本研究では、局所  $I_c$  分布を磁気顕微法を用いて 1 mm の解像度で計測し、Bare 線材と補強線材の特性について比較検討を行った。

### 2. 実験・解析方法

測定試料には、Bare の Bi-2223 素線である Type H 線材と銅合金を複合化して補強した Type HT-CA 線材[3]を用いた。局所  $I_c$  の評価にはリール式走査型 Hall 素子顕微鏡(RTR-SHPM)を用い、さらに、得られた  $I_c$  分布より筆者等の提案するマルチスケールモデル[4]によって、局所電界を導出した。

### 3. 実験結果および考察

磁気顕微法によって Type H 線材の測定を行ったところ、Fig. 2(a)に示す様に、局所的な  $I_c$  低下部位が離散的に存在する事を明らかとした。これは、Bi-2223 線材では、酸化物セラミクス特有の超伝導フィラメントの脆性に起因する不安定性が内包されていることを示唆している。その結果、平均電界 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  を誘起する電流印加時の局所電界において同図(b)に示すとおり局所的には平均電界の数 10 倍の電界が生じることが分かる。ここで検知された  $I_c$  低下の大きさとその頻度は、Bi-2223 線材のなだらかな電圧転移特性を考慮すると、ほとんどの応用において充分許容できるレベルにあるが、マグネット応用においてはクエンチの起点となる可能性を有する。一方、Type HT-CA 線材の局所  $I_c$  分布は Fig. 2(c)に示すとおり、高解像度な計測においても  $I_c$  低下部位は観測されず、局所均一性が飛躍的に向上していることが明らかとなった。その結果、局所電界も一定値を保持しており局所的な集中は生じていない。すなわち、補強線材の付与は、素線のマクロな機械特性の改善に止まらず、局所フィラメント構造の安定性と信頼性向上においても非常に上手く機能していると考えられる。その結果、局所欠陥に伴う電界集中の問題を大幅に改善する事に成功している。すなわち、この線材は、電力ケーブルは勿論、マグネット用線材としても特に信頼性向上の点で非常に適していると言える。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP19H05617 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] G. Osabe et al., *SEI Technical Review*, 2017, 84, p. 15-21.
- [2] T. Kagiyama et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2011, 18, 152001.
- [3] [https://sei.co.jp/super/hts/type\\_ht.html](https://sei.co.jp/super/hts/type_ht.html)
- [4] T. Kiss et al., *Cryogenics*, 2016, 80, p. 221-228.

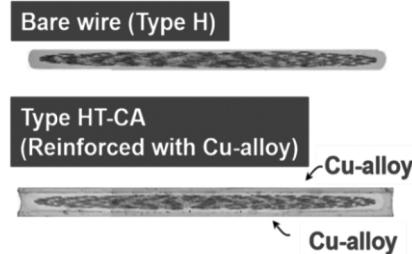


Fig. 1 Cross-sectional view of bare (Type H) Bi-2223 wire and that of reinforced with Cu-alloy (Type HT-CA) [3]

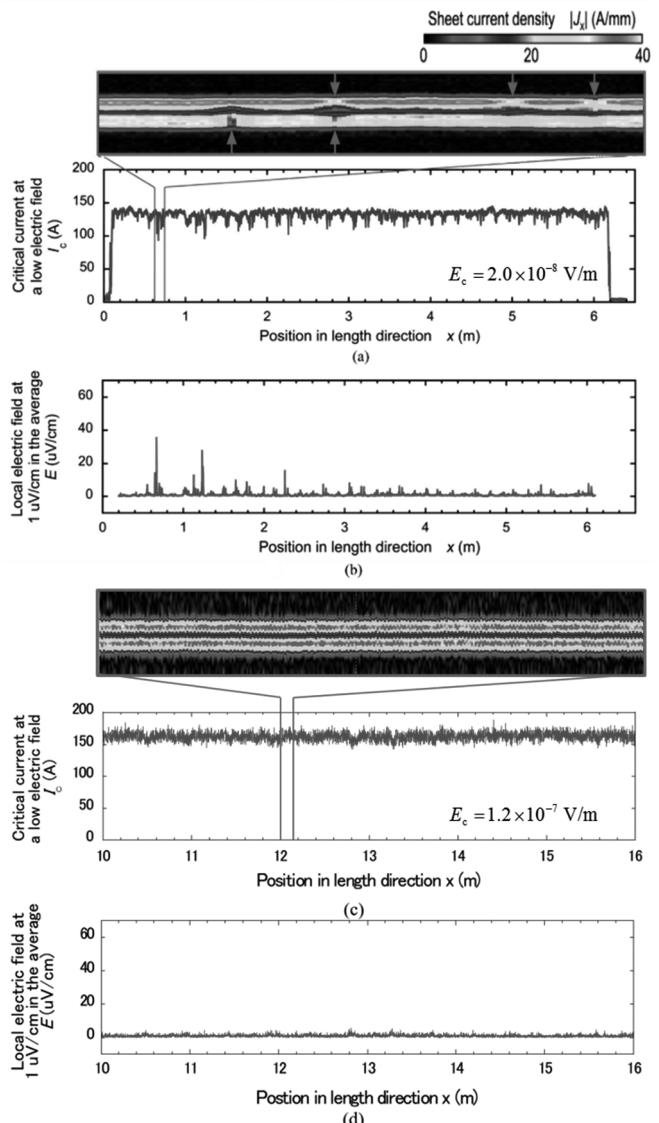


Fig. 2 Local homogeneity in Type H: (a), (b) and that of Type HT-CA: (c), (d). (a) and (c) are local  $I_c$  distribution measured by the RTR-SHPM. Inset shows in-plane magnetization current. (b) and (d) are local electric field distribution with a bias current which generated average electric field of 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  in global scale.

## パウダー・イン・チューブ(PIT)法による7芯MgB<sub>2</sub>線材の超電導接続 Superconducting joints of power-in-tube processed 7-filamentary MgB<sub>2</sub> wires

熊倉浩明, 瀧川博之, 松本明善, 北口 仁 (物材機構)

KUMAKURA Hiroaki, TAKIGAWA Hiroyuki, MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-Mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub> 超電導材料は線材化が容易で冷凍機冷却や液体水素冷却での応用が期待されている。主としてパウダー・イン・チューブ (PIT) 法や内部 Mg 拡散 (IMD) 法で線材化が進められており、いくつかの企業においては、すでに km を越える線材が試作されている。超電導線材を用いた永久電流モードでの運転のためには、線材の超電導接続が必要不可欠であり、MgB<sub>2</sub> 線材に対しても超電導接続の研究が進められている。前回我々は PIT 法による単芯 MgB<sub>2</sub> 線材の超電導接続について報告した。今回は、7 芯の PIT MgB<sub>2</sub> 線材に対して、前回と同様な簡便な方法で超電導接続の作製を試みたので報告する。

### 2. 実験方法

今回試みた PIT 法 7 芯線材の超電導接続の作製法を Fig.1(a) に示す。未熟処理の 7 芯 MgB<sub>2</sub>/Cu 素線材 (径 1.2mm) 2 本の端部を同じ角度で斜めに切断した。その際、2 本の線材をつき合せた時に、Mg-B コアの位置 (位相) が一致するように切断した。これらの線材を切断面が重なるように銅管あるいはステンレス管の両端から挿入し、接続部を一軸プレスで加圧して密着性を向上させた後、今回の 7 芯線材の最適熟処理条件である 600°C × 1hr の熟処理を施した。得られた超電導接続の例を Fig. 1(b) に示す。

接続部に流れる臨界電流  $I_c$  を 4.2K において四端子抵抗法で評価した。電圧リードは接続部に近い線材部分にハンダ付けした。磁界は、測定の都合上、接続の長手方向に印加した。初期の測定においては単芯線材の接続と同様に一部の電流が安定化銅に流れるために  $I-V$  特性にフロー抵抗が現れた。そこで Fig.1(b) に示したように、電流端子と電圧端子との間の一部分の安定化銅をマイクログラインダーで取り除いて超電導コアに電流が流れるようにした。このようにした接続では、ある電流値までは電圧は認められなかった。 $I_c$  を 1μV の電圧が発生する電流で定義した。臨界電流を評価した後、接続部分の構造・組織を光学顕微鏡で観察した。

### 3. 結果及び考察

ステンレス管を用いて作製した接続部の断面の光顕写真の例を Fig.2 に示す。右上で鉄バリア材内部の二つの MgB<sub>2</sub> コアが繋がっているのがわかるが、接続部において一部の MgB<sub>2</sub> フィラメントに若干のズレが認められ、このズレた部分においては Fe バリア材が存在しないために Mg-B 充填コアと Cu 安定化材とが接触して Mg と Cu とが反応しているのが認められたが、これらの領域は接続部においては限定的であり、 $I_c$  に及ぼす影響は小さいと考えられる。Fig.3 に銅管ならびにステンレス管を用いて作製した超電導接続の 4.2K における  $I_c$ -B 特性を示す。比較のために今回の接続作製に用いた PIT 線材のデータも示した。接続にステンレス管を使用した場合、バラツキはあるものの、接続の  $I_c$  は線材の  $I_c$  の 50-100% で比較的良好な値が得られた。なお、今回の 7 芯線材の  $I_c$  はこれまでの PIT 法 MgB<sub>2</sub> 単芯線材と同様に磁界の向きに大きく依存しないことが判る。

謝辞: 本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2 の支援を受けたものである。

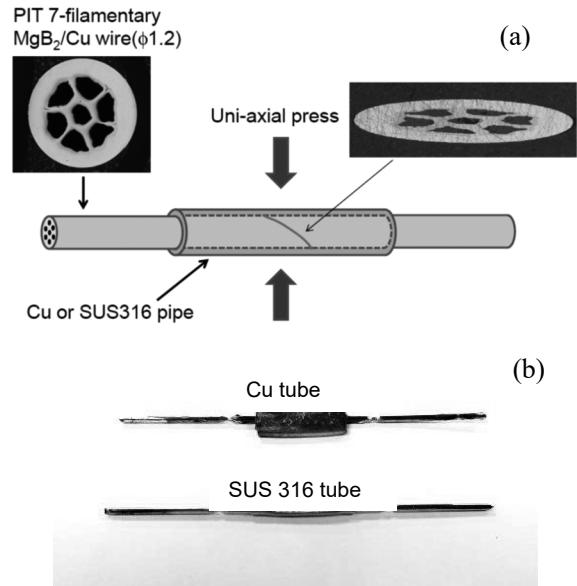


Fig.1 (a)Fabrication method of a PIT 7-filamentary MgB<sub>2</sub> superconducting joint. (b)Joints with Cu and SUS 316 tubes.

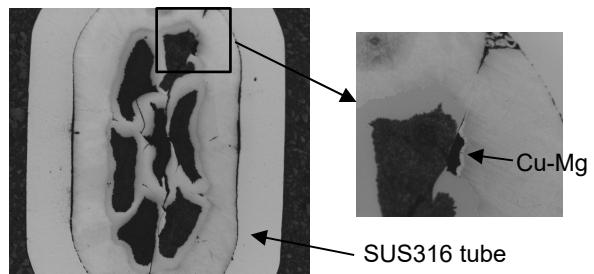


Fig.2 Transverse cross section of PIT 7-filamentary MgB<sub>2</sub> superconducting joint after a heat treatment at 600°C, 1hr.

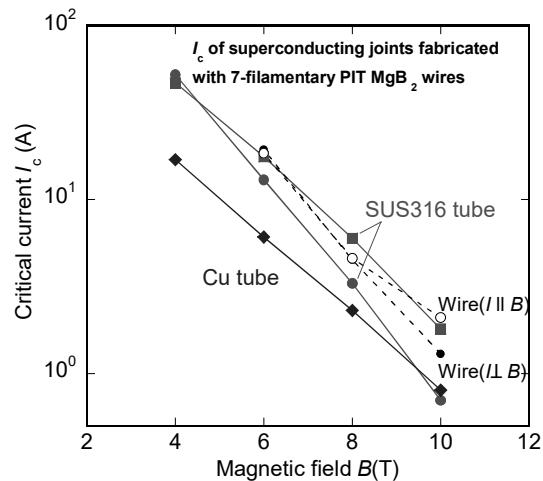


Fig.3  $I_c$ -B curves at 4.2K of superconducting joints of PIT 7-filamentary MgB<sub>2</sub>/Cu wire.  $I_c$ -B curves ( $I \perp B$  and  $I \parallel B$ ) of the wire are also shown in the figure.

# KOH 蒸気による Ag 添加 RE-Ba-Cu-O 圧粉体を介した REBCO-CC の超電導接合

## Superconducting-joint for REBCO-CCs via Ag added RE-Ba-Cu-O raw material by supplying KOH vapor

船木 修平, 國重 太一, 堀内 慎之介, 山田 容士(島根大)

FUNKAI Shuhei, KUNISHIGE Taichi, HORIUCHI Shin-nosuke, YAMADA Yasuji (Shimane Univ.)

E-mail: s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO 超電導線材(REBCO-CC)は一度の製造長に限界があることから、REBCO-CC 同士、または異種の超電導線材と、簡易的な工程で低抵抗接合もしくは超電導接合させる技術が必要不可欠である。しかしながらこれまで提案された手法は、高温の接合熱処理時に生じる  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (RE123)相の酸素欠損を補うためのアニールが必要であった。これまで我々は、水酸化物による REBCO の低温合成反応[1, 2]を利用し、接合熱処理温度を低下させることで、後アニール処理を不要とする超電導接合技術の開発を進めてきた。そして、REBCO-CC 間に EuBCO 原料の圧粉体を挟み、マッフル炉内において 525°C の水酸化カリウム(KOH)蒸気中で 12 h の熱処理を行うことで、一回の低温合成反応によって  $T_c = 58$  K の超電導接合に成功した[3]。

本研究では、接着性及び超電導特性の向上を目的とし、CC 間に挟む圧粉原料に Ag を添加し、その効果を検証した。

### 2. 実験方法

REBCO-CC 間に Eu-Ba-Cu-O 原料の圧粉体を挟み、金属製の治具で機械的に加圧した状態で、Eu-Ba-Cu-O 原料に KOH 蒸気を供給し EuBCO へ低温合成する反応を利用して、2 つの REBCO-CC の接合を試みた。

REBCO-CC には SuperOX 社製の 4 mm-w の GdBCO-CC を用い、まず 3 cm-ℓ の短尺線を 2 枚用意し、それぞれ 2 cm-ℓ ずつ Ag 安定化層を化学エッチングにより除去した。Eu : Ba : Cu = 1 : 2 : 4 となるように秤量した  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}_2$ ,  $\text{CuO}$  の原料粉にたいし、10, 30 wt.% の Ag を添加・混合し、厚さ～200 μm-t の圧粉体に加圧・成形し、Ag 除去によって剥き出しにした Gd123 層間に挟んだ。Gd123 / Eu-Ba-Cu-O 原料圧粉体 / Gd123 の接合部分に、治具のネジ軸力によって約 20 MPa の機械的力を印加した。接合試料を挟んだ治具ごと KOH を入れたるつぼ内に吊るし、マッフル炉で大気中において 470～525°C で 12 h 加熱し、KOH 蒸気を接合界面の圧粉体に供給した。なお、KOH 蒸気により接合部外の GdBCO-CC が劣化することがないよう、接合部外は Al フォイルで覆った。得られた試料の結晶相を XRD により、超伝導特性を直流 4 端子法及び SQUID により評価した。

### 3. 結果及び考察

いずれの条件で熱処理した試料も、2 枚の GdBCO-CC が圧粉体を介して接着された状態で得られた。その中でも、特に Ag を 10 wt.% 添加し 470～490°C で接合した試料は接着性が良好で、接合界面を剥離させようとしても、圧粉体と Gd123 層が接着し、Gd123 層は中間層から剥がれた。これは、Ag 添加による触媒効果によって、反応が促進されたためだと考えられる。しかしながら、Ag を 30 wt.% 添加した試料は接着性が低く、接合部を剥離して得られた圧粉体の XRD 測定からは、EuBCO 相の他に Ag 相も検出された。

また、500°C で熱処理した試料の接合界面の圧粉体は、Ag 無添加では Eu124 が主相であったのに対し、Ag 添加により主相が Eu123 へと変化した。これは、Ag 添加によって、Eu124-Eu123 相境界が低温化したためだと推察できる。しかしながら、Eu : Ba : Cu = 1 : 2 : 4 の原料から Eu123 が生成さ

れたため、余剰となつた Cu が CuO として残存していた。前述した余剰な Ag や、高温における CuO が界面に存在していたために、Ag: 30 wt.% 試料や、500°C 以上の試料では接着性が低かったと考えられる。

SQUID により評価した、熱処理後の圧粉体のみの  $T_c^{\text{onset}}$  を図 1 に示す。なお、Ag: 10 wt.% の 470～490°C については、接着性が良好で圧粉体と Gd123 層の剥離が不可能であったため、参考までに圧粉体 + Gd123 層の反磁性から評価した結果を示している。図より、全ての Ag 添加量において 500°C を境に低温側、高温側で  $T_c^{\text{onset}}$  が高かった。これまでの我々の研究で、KOH フラックスを用いて作製した Nd123 膜の成膜温度に対する組成比、及び  $T_c$  の関係から、成膜温度の低温化に従って、Nd/Ba 置換が増加し  $T_c$  が低下することが分かっている[4]。これより、本研究においては、470°C で Eu124 相が生成されたが、500°C で Eu/Ba 置換の多い Eu123 相となり、525°C に向けて Eu/Ba 置換の少ない Eu123 へと推移したと考えられる。また、いずれの温度においても、Ag 添加により  $T_c^{\text{onset}}$  が 5 K 程度上昇したことから、反応促進による完全性の改善、もしくは  $\text{Cu}^{2+}$  サイトに Ag<sup>+</sup> が置換したホールドープ量の改善が生じたと考えられる。

以上のことから、REBCO-CC 間に挟む原料圧粉体に Ag を添加することで、反応促進による接着性の向上、さらに超電導特性の向上が確認された。また、一連の結果から、接着性の向上には異相の析出・残存を抑制することが重要であることも示唆された。

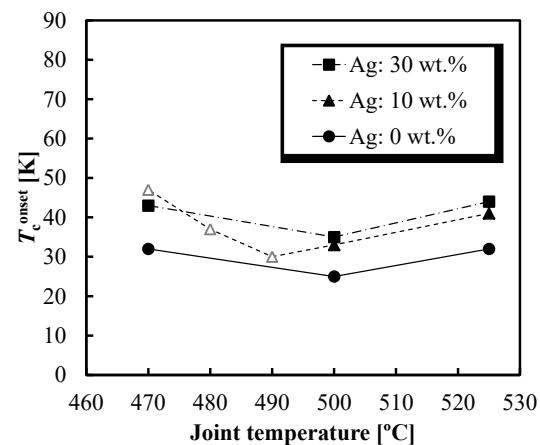


Fig.1  $T_c^{\text{onset}}$  of pressed EuBCO materials as a function of joint temperature

### 謝辞

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

### 参考文献

- Y. Miyachi, et al.: Physics Procedia, Vol. 65 (2015) p. 129
- L. N. Marquez, et al.: Chem. Mater., Vol. 5 (1993) p. 761
- S. Funaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 97 (2018) p. 143
- S. Funaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No. 3 (2016) 7201404

## 追加堆積膜を利用した $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材接合体作製時の機械的圧力の効果

Mechanical pressure dependence of joint property for  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  coated conductors prepared via crystallization of additionally deposited precursor layers

寺西 亮, 土井裕太郎, 佐藤幸生, 金子賢治(九州大); Valery Petrykin, Sergey Lee(SuperOx Japan); 松本明善 (NIMS); 岡田達典, 淡路 智 (東北大)

TERANISHI Ryo, DOI Yurato, SATO Yukio, KANEKO Kenji (Kyushu Univ.); PETRYKIN Valery, LEE Sergey (SuperOx Japan); MATSUMOTO Akiyoshi (MINS); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: teranishi@zaiko.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (REBCO) 線材の電力機器応用を実現していく上で、線材の極低抵抗接続による長尺化が求められている。接続時の要求項目としては、接合界面での低い抵抗、高い通電性能、線材接続部の高い曲げ性能および機械強度、接続手法の簡易化、などが挙げられる。REBCO 層同士の超伝導接合に関して、これまでにいくつかの手法が報告されており[1-4]、接続体を作製する際の機械的圧力が重要な制御因子であることが報告されている。

我々は、REBCO 線材上に前駆体を追加堆積して、それらを対向させて熱処理することで、薄膜成長をベースとして結晶化と接合とを同時にを行う手法を提案してきている[5-7]。本研究では、通電特性や接合面積、生成相に接合熱処理時の機械的圧力が及ぼす影響を系統的に調査して考察した。

### 2. 実験方法

GdBCO 線材の GdBCO 層上にパルスレーザー蒸着法にて Gd、Ba、Cu の酸化物微結晶から成る前駆体を追加堆積し、それら 2 つの線材を幅 6 mm・長さ 5 mm の領域で対向させ、機械的圧力を約 1~40 MPa で印加しながら 1093 K で結晶化し、その後、773 K にて酸素アニールを施して接続体を得た。得られた試料を 4 端子法にて超伝導転移温度( $T_c$ )および 65 K における臨界電流( $I_c$ )を測定し、 $I_c$ の値から接合部の c 軸方向の臨界電流密度( $J_c$ )を評価した。また、X 線回折法(XRD)により接合部の生成相を評価した。

本研究では、接合部の印加圧力を正確に見積るために接合後の試料を剥がして光学顕微鏡にて接合面積を算出し、その値で圧力を除して接合部の局所的圧力( $P_L$ )を求めた。

### 3. 結果と考察

Fig.1 は、接続体の接合部における  $T_c$  の圧力依存性を示す。 $T_c$  onset に圧力の依存性は見られず、いずれの圧力においても約 93.5 K でほぼ一定であった。それに対し、 $T_c$  zero は圧力に依存性を示し、 $P_L$  が 2.5 MPa および 65 MPa ではそれぞれ 92.2 K および 87.9 K であった。これらは  $\Delta T_c$  が圧力に依存性を示すことを表しており、印加圧力の増加に伴って接合部に低  $T_c$  相が増加することが示された。Fig. 2 は、 $J_c$  の圧力依存性の結果である。 $P_L$  が 2.5 MPa での  $J_c$  は約 88 A/cm<sup>2</sup> であるのに対して  $P_L$  が 65 MPa では約 10 A/cm<sup>2</sup> となり、圧力の増加に伴って  $J_c$  は直線的に低下することが示された。

圧力増加に伴う  $J_c$  低下は、Fig.1 の結果を考慮すると、圧力増加に伴う  $T_c$  の低下が原因であると考えられる。しかし、 $T_c$  の圧力依存性のみで  $J_c$  の直線的な低下を説明することは難しい。そこで、各圧力下で作製した接続体の接合部における生成相を XRD で評価した。Fig.3 の測定結果から、印加圧力が 2.5 MPa と 30 MPa では下地の GdBCO 相と同等であったが、高圧下では異相 ( $\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$  もしくは  $\text{BaCuO}_2$ ) の生成が認められ、65 MPa では異相のピーク強度が相対的に大きくなり、異相が増加していることが分かった。

以上より、接合熱処理時の機械的圧力は通電特性や接合面積、生成相に大きく影響を及ぼすことが明らかとなり、圧力

増加に伴い  $J_c$  が低下すること、 $J_c$  低下は  $T_c$  の低下に加えて接合部での異相の増加が原因であること、が分かった。

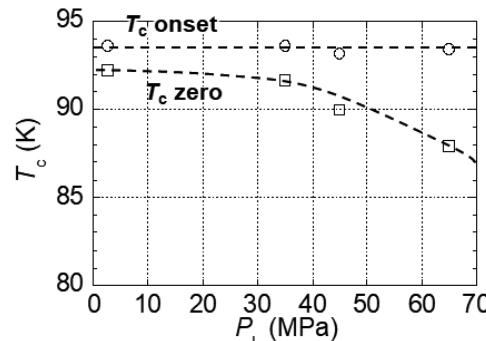


Fig. 1 Mechanical pressure dependence of  $T_c$ .

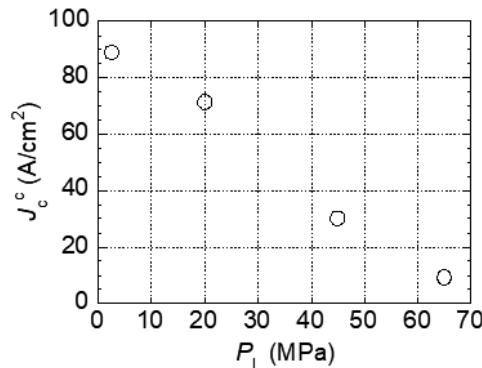


Fig. 2 Mechanical pressure dependence of  $J_c$ .

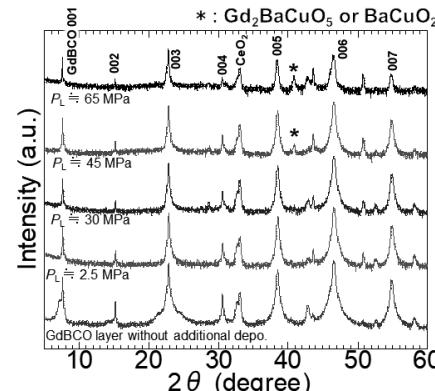


Fig. 3 Mechanical pressure dependence of crystalline phases.

### 参考文献

- [1] Y.J.Park et al., Supercond. Sci. Technol., 27 (2014) 85008.
- [2] X.Jin et al., Supercond. Sci. Technol., 28 (2015) 75010.
- [3] [https://furukawa.co.jp/release/2016/kenkai\\_160427.html](https://furukawa.co.jp/release/2016/kenkai_160427.html)
- [4] K.Ohki et al., Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 11501.
- [5] R.Teranishi et al., IEEE TAS, 29, 5 (2019) 6602904.
- [6] T.Miyajima, R.Teranishi et al., JJAP 58 (2019) 050907.
- [7] T.Miyajima, R.Teranishi et al., JJAP 58 (2019) 050913.

# 高強度 Bi2223 線材間の超伝導接合技術開発

## Development of superconducting joint technology between high-strength Bi2223 tapes

武田 泰明 (理研 SPDR, 東大院工); 松竹 優一 (上智大, 理研); 谷貝 剛 (上智大);  
 末富 佑 (千葉大, 理研); 朴 任中, 柳澤 吉紀 (理研); 小林 賢介, 内田 公, 北口 仁 (NIMS);  
 中島 隆芳, 山出 哲, 小林 慎一, 加藤 武志 (住友電工); 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)  
TAKEDA Yasuaki (RIKEN SPDR, The Univ. of Tokyo); MATSUTAKE Yuichi (Sophia Univ., RIKEN);  
 YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); SUETOMI Yu (Chiba Univ., RIKEN); PIAO Renzhong, YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);  
 KOBAYASHI Shin-ichi, UCHIDA Akira, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);  
 NAKASHIMA Takayoshi, YAMADE Satoru, KOBAYASHI Shin-ichi, KATO Takeshi (Sumitomo Electric Industries);  
 MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)  
 E-mail: yasuaki.takeda@riken.jp

### 1. はじめに

Ag シース(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> [Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO) [1]は高い臨界電流特性を有し、最長 2 km の優れた量産技術が確立している[2]。最近、pre-tension 技術を活用して補強 Ni 合金テープを半田接着した高強度線材 (DI-BSCCO Type HT-NX) [3, 4]が開発され、高磁場中での  $> 400$  MPa のフープ応力下でも高  $I_c$  の維持が可能となった[5]。これらの特性から高強度 Bi2223 線材は  $> 20$  T の高磁場発生を含めた様々な超伝導磁石への応用が進んでいる[6–8]。特に 2017 年 11 月から開始した未来社会創造事業では、LTS, Type HT-NX, REBCO の各線材を超伝導接合した 1.3 GHz (30.5 T) 永久電流 NMR 磁石の開発が進められている[9]。

一方、Bi2223 線材間の超伝導接合技術は未確立であり、Bi2223 線材による永久電流回路を備えた超伝導磁石の設計・製作は困難であると考えられてきた。しかし我々は最近、高  $J_c$  特性 Bi2223 多結晶厚膜の作製指針[10]を活用した、補強材料がない DI-BSCCO Type H 線材間の超伝導接合技術の開発に成功した[11–13]。この技術は、 $\sim 0.5^\circ$  の浅い角度の傾斜面での研磨により線材端部の超伝導フィラメントを多数露出させ、その間に Bi2223 多結晶接合中間層を形成することで超伝導接合を達成するものである。これまでに 2 本の短尺線材を挿み合わせ形状 (termination joint [14]) で接合した試料で、 $10^{-9} \Omega$  基準で  $I_c > 300$  A (4.2 K, 1 T) を記録しており、また 1 本の $\sim 2$  m の線材の両端を接合したループ形状の小型コイル試料で、運転電流が接合  $I_c$  より低ければ $\sim 1$  T の磁場中でも $< 10^{-12} \Omega$  (4.2 K) の低い接合抵抗を実証している[13]。この接合技術は Type H 線材間のものであるが、永久電流の超伝導磁石への実装に向けては、この技術を補強材料付きの高強度 Bi2223 線材 (Type HT-NX) 間にも適用する必要がある。そこで今回は、高強度 Bi2223 線材間の超伝導接合技術の開発について報告する。

### 2. 実験方法

挿み合わせ接合試料は、DI-BSCCO Type HT-NX 線材 [121 芯,  $\sim 4.5$  mm<sup>w</sup>  $\times$  0.25 mm<sup>t</sup>,  $I_c$  (77 K, self-field)  $> 170$  A] から作製した。短尺接合試料では、 $\sim 15$  cm 長の 2 本の線材の補強材料除去後、Type H 間の接合[11]と同様に、研磨によるフィラメントの露出、スラリーを用いた接合中間層の Bi2223 厚膜 ( $\sim 50$  μm<sup>t</sup>) の形成、一軸プレス・熱処理を行った。また  $\sim 2$  m の 1 本の線材の両端を同様に接合し、ループ形状の小型コイル試料も作製した。短尺試料では接合  $I_c$  を様々な温度・磁場条件の下で直流四端子法により調べた。小型コイル試料では無磁場下の 77 K および 4.2 K で接合  $I_c$  を直流四端子法で調べ、 $I_c$  以下の電流値で永久電流試験を行って接合抵抗を評価した。磁場はテープ面に平行に印加した。

### 3. 結果と考察

Type HT-NX 線材において、補強 Ni 合金テープは我々が報告した適切な一軸加圧下での加熱[15]により、Ag 上の半田は物理的な研磨や半田除去試薬の使用などにより、それぞれ除去が可能であった。上記の方法で補強材料を除去した 2 本の短尺 Type HT-NX を接合した試料の 77 K 自己磁場下での通電特性を Fig. 1 に示す。比較のために同条件で作製した短尺 Type H 間接合[12, 13]のものも併せて示した。Type HT-NX 間でも超伝導接合が達成できた一方、その接合  $I_c$  は Type H 間に比べ低く、補強材料の除去過程を含めた接合条件に改善の余地が残されていることがわかった。当日は、この低い接合  $I_c$  の要因の考察に加え、短尺接合試料の様々な温度・磁場条件下での  $I_c$  や、小型コイル試料での永久電流試験の結果と接合抵抗についても報告する予定である。

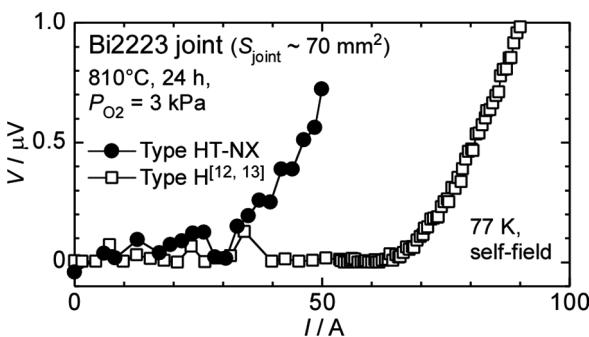


Fig. 1  $V$ - $I$  curves for joint samples at 77 K in self-field.

### 謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2、JSPS 科研費19J12011、および基礎科学特別研究員制度の支援を受けたものである。

### 参考文献

- N. Ayai *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112.
- T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713–718.
- K. Yamazaki *et al.*, *SuST* **25** (2012) 054015.
- T. Nakashima *et al.*, *IEEE TAS* **25** (2015) 6400705.
- Y. Miyoshi *et al.*, *SuST* **28** (2015) 075013.
- K. Sato *et al.*, *JJAP* **51** (2012) 010006.
- G. Nishijima *et al.*, *IEEE TAS* **26** (2016) 4303007.
- S. Awaji *et al.*, *SuST* **30** (2017) 065001.
- H. Maeda *et al.*, *IEEE TAS* **29** (2019) 4602409.
- Y. Takeda *et al.*, *SuST* **31** (2018) 074002.
- Y. Takeda *et al.*, *APEX* **12** (2019) 023003.
- Y. Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **98** (2019) 137.
- Y. Takeda *et al.*, *MT26* (2019) Tue-Mo-Or8-07.
- G. D. Brittles *et al.*, *SuST* **28** (2015) 093001.
- M. Nawa *et al.*, *IEEE TAS* **27** (2017) 8400404.

## NbTi と BSCCO はんだ接合試料の接合抵抗評価

### Joint resistance evaluation of a solder joint of NbTi and BSCCO

小林 賢介, 渋谷直哉, 内田 公, 高野 義彦, 北口 仁(NIMS)  
KOBAYASHI Kensuke, SHIBUYA Masachika, UCHIDA Akira, TAKANO Yoshihiko, KITAGUCHI Hitoshi(NIMS)  
E-mail: kobayashi.kensuke@nims.go.jp

#### 1. はじめに

超伝導線材の応用展開にとって、超伝導接合技術は必要不可欠な技術であり、近年、特に HTS 線材において精力的な研究・開発が行われている。その中で、2017年より開始された JST 未来社会創造事業における永久電流運転可能な 1.3 GHz (30.5 T) 級 NMR 磁石の開発では、LTS, HTS 線材の超伝導接合もしくは超低抵抗接合を想定しており、同種線材のみならず、LTS-HTS 異種線材間の超伝導接合技術開発も重要な課題となっている[1]。

我々は、超伝導接合試料の接合抵抗を効率よく評価するための接合抵抗評価装置の開発を行っており、この装置を用いることで、 $10^{-15} \sim 10^{-8} \Omega$  の接合抵抗を、3-100 K の温度範囲、3 T 以下の磁場中で評価可能である[2]。これまで測定してきた試料は、NbTi 超伝導接合試料や BSCCO 超伝導接合試料などの同種線材接合試料に限られていた。一方で、LTS-HTS 異種線材の超伝導接合は、4 端子法による評価が主であり、精密な接合抵抗の評価報告はなかった[3]。今回初めて、減衰法を用いた LTS-HTS 線材の精密な接合抵抗評価を行ったので報告する。

#### 2. 実験方法

異種線材接合試料は、Jastec 製 NbTi 線材と住友電工製 DI-BSCCO type HT-NX を Pb-Sn-Bi はんだで接合して作製した。減衰法による抵抗評価を行うために閉ループである必要があるため、両端 2箇所を接合し、NbTi 線材をループ状にした 2 回巻き試料を作製した。接合抵抗評価は、4.2 K で誘導コイル電流(Injection Coil Current, ICC)を変えることで初期誘導電流を変化させて行った。また、装置の最低到達温度である 3.0 K から 4.2 K までの温度変化も測定した。2 種類の形状の異なる線材に流れる電流を検出するため、これまでの試料直近に配置する形から、方向性電磁鋼板製カットコアで線材を囲う形にホールセンサー設置部の形状を変更した。この改良によって、8 倍程度の大幅な電流検出感度の向上と試料誘導電流の定量的な校正が可能となった。

#### 3. 結果と考察

Figure 1 に 4.2 K 自己磁場での各誘導電流における減衰測定結果を示す。接合部の温度は、セルノックス温度センサーを直接貼り付けることで測定しており、線材に貼り付けた温度センサーも含めて、温度差は 0.1 K 程度だった。同種線材試料測定時と同様に、ICC に比例した電流が試料に誘導され、ホールセンサーの電流感度を校正した結果、誘導された電流は最大で 25 A 程度だった。全ての誘導電流で減衰がみられ、別の同形状の 2 回巻き試料を用いて測定した自己インダクタンス  $L = 1.0 \mu\text{H}$  を用いて  $V_{\text{Hall}}(t) = A + B \exp\{-t/(L/R)\}$  のフィッティングから得られた抵抗は、 $2.21 \sim 2.31 \text{ n}\Omega$  だった。この値は試料の回路抵抗であるため、単純には接合 1 個あたりの接合抵抗は  $1.11 \sim 1.15 \text{ n}\Omega$  と見積もられる。12 K では、Pb-Sn-Bi はんだの  $T_c$  を超えているため、常伝導抵抗により瞬間に減衰した。4 端子法では 100 A 程度まで明確な電圧の上昇は見られなかったため、減衰法の結果と相違があるように見える。1  $\text{n}\Omega$  程度の抵抗の場合、4 端子法で測定できる電圧は 100 A で  $0.1 \mu\text{V}$  であるので、ノイズに埋もれてしまっていると思われる。

3.0~4.2 K で ICC:0.1 A 測定を行った結果、3.5 K では 12 A 程度で減衰せず横ばいになり、3.0 K では初期電流 25 A からほぼ減衰が見られず、永久電流が観測された。永久電流が存在する温度は Sn の  $T_c$  とよく一致することから、DI-BSCCO type HT-NX の補強材の Sn と Pb-Sn-Bi はんだを介した超伝導ループであると考えられる。永久電流が存在する状態で昇温測定を行ったが、3.7 K で明確な変化は見られず、徐々に減少して行き、はんだの  $T_c \sim 8 \text{ K}$  で電流は消失した。

これらの結果から、本装置を用いることで、異種線材間接合試料においても同種線材接合の場合と同様に、任意の温度における接合抵抗および接合部の  $T_c$ 、 $I_c$  などの評価が可能であることがわかった。

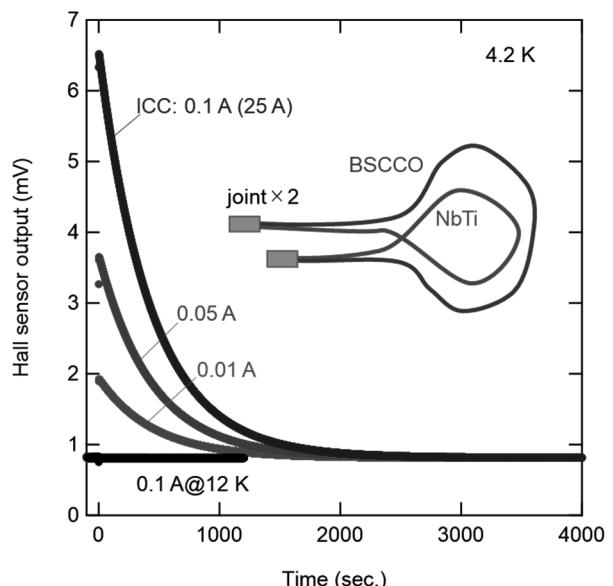


Fig. 1 Decay curves of various induction currents at 4.2 K. The inset shows a schematic drawing of the sample.

#### 謝辞

本成果は、JST 未来社会創造事業[JPMJMI17A2]によって得られたものです。

#### 参考文献

- [1] H. Maeda *et al.*, IEEE TAS **29**, 4602409 (2019).
- [2] K. Kobayashi *et al.*, IEEE TAS **30**, 9000204 (2020).
- [3] R. Matsumoto *et al.*, APEX **10**, 093102 (2017).

# 抵抗型超伝導限流器の高速復帰に向けたポーラス安定化材付 REBCO 線材の電磁・熱特性に関する検討

Investigation of electrical and thermal characteristics of porous-stabilized REBCO tape for quick recovery of resistive type superconducting fault current limiters

結城 光平, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)

YUKI Kohei, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: kohei.yuki.t2@dc.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

抵抗型超伝導限流器の実現には、限流素子である希土類系銅酸化物超伝導体 (REBCO) 線材が事故後 0.3 s 以内に超伝導復帰することが要求される[1]。そこで、著者らは REBCO 線材の安定化材として金属多孔質体(ポーラス体)を接合したポーラス安定化材付 REBCO 線材を提案している[2]。ポーラス体は多くの細孔を有するため、その毛細管作用により、除熱面に冷却液が積極的に供給されることで、熱伝達性能の低い膜沸騰を抑制可能である[3]。

これまでに、ポーラス安定化材無接合時の超伝導復帰時間が 2.6 s であるのに対し、インジウム箔を介してポーラス安定化材を接合することで 0.6 s という高速復帰に成功しているが、目標の 0.3 s 以下の復帰には至っていない[2]。一方、先行研究[4, 5]において、熱伝導率が非常に低い断熱材料を除熱面に薄く塗布することで、急速冷却時の除熱性能が向上することが報告されている。そこで、本研究では、絶縁性エポキシまたは導電性エポキシを介しポーラス安定化材を接合した際の沸騰挙動の観察および超伝導復帰時間の計測から、ポーラス安定化材付 REBCO 線材の熱特性が超伝導復帰過程に与える影響を評価した。

## 2. 実験方法

本実験では幅 4 mm の REBCO 線材 (SuperOx Japan 製, ST-4-20) を使用した。本 REBCO 線材は超伝導層上に厚さ 2  $\mu\text{m}$  の保護銀層のみを有する。ポーラス安定化材には気孔率 86%，厚さ 0.6 mm の NiCr 金属発泡体 (Nilaco 製) を使用し、REBCO 線材保護銀層上に絶縁性エポキシ (セメダイン社製, EP138) または導電性エポキシ (Epoxy Technology 社製, H20E) を介して接合した。Fig. 1 に試験体概念図を示す。絶縁性エポキシの熱伝導率は 0.27 W/mK, 導電性エポキシの電気抵抗率と熱伝導率はそれぞれ  $4 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ , 29 W/mK である。製作した試験体の臨界電流値は 30 – 35 A,  $n$  値は 35 度であった。液体窒素で浸漬冷却した試験体に、 $I = I_0 \exp(t/\tau)$  で表される電流を 0.5 s 間通電し、その後の超伝導復帰時間を測定した。ここで、 $I$  は電流、 $I_0$  は初期電流、 $t$  は時間、 $\tau$  は時定数(0.13 s)である。抵抗値から各試験体温度を計算し、超伝導復帰開始時の超伝導層最大温度が 230 K となるよう  $I_0$  を決定した。

## 3. 実験結果および考察

Fig. 2 に絶縁性または導電性エポキシの厚さと復帰時間の関係を示す。また、比較のためポーラス安定化材無接合時の結果も併せて示している。まず、絶縁性エポキシと導電性エポキシの結果を比較すると、絶縁性エポキシを塗布した方が復帰時間が短い傾向が見られる。これは、先行研究[4]で報告されている、膜沸騰における液体窒素と試験体表面の局所的固液接触が原因であると考えられる。導電性エポキシを塗布した際には、保護銀層からの熱流入により、固液接触時においても導電性エポキシ上面の温度降下が小さく抑えられ、固液接触後に再び膜沸騰状態となる。一方、低熱伝導率である絶縁性エポキシでは、保護銀層からの熱流入が妨げられ、固液接触時に絶縁性エポキシ上面の温度が急激に低下する。数値解析では固液接触後 10 ms 程度で核沸騰温度へと瞬間に遷移し、この固液接触

部を起点に膜沸騰が伝播的崩壊[6]を起こしたと考えられる。可視化実験からも局所領域での膜沸騰崩壊が全体へと伝播する様子が確認された。また、固液接触は伝熱面温度が低いほど起こりやすい[4]が、ポーラス安定化材接合時には、固液接触が促進され、より高い伝熱面温度での膜沸騰崩壊を可能にしたと考えられる。しかし、絶縁性エポキシ厚さの増加に伴い、核沸騰領域での熱伝達性能が低下し[7]、逆に非常に薄い絶縁性エポキシでは、固液接触の際に表面温度が十分に下がらず再び膜沸騰に遷移するため、超伝導復帰性能が低下する。したがって、超伝導復帰に対して最適な絶縁性エポキシ厚さが存在すると考えられる。

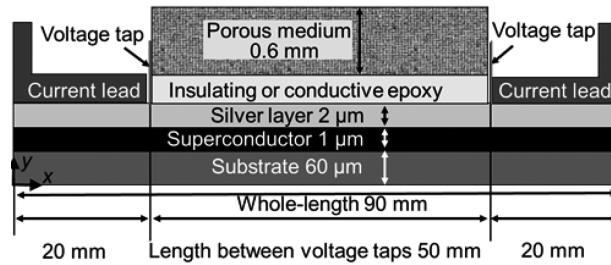
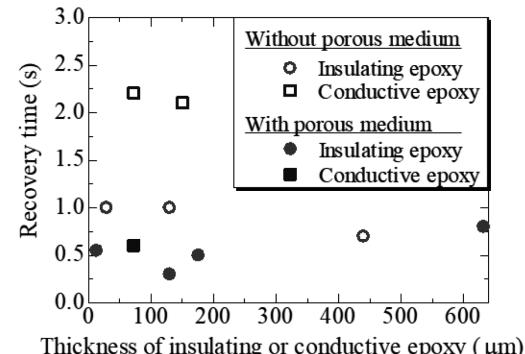


Fig. 1 Schematic of experimental sample



Thickness of insulating or conductive epoxy ( $\mu\text{m}$ )

Fig. 2 Relationship between thickness of insulating or conductive epoxy and recovery time

## 4.まとめ

本研究ではポーラス安定化材付 REBCO 線材の熱特性が超伝導復帰特性に与える影響を評価した。その結果、低熱伝導率の絶縁性エポキシを介しポーラス安定化材を接合することで、固液接触時の核沸騰遷移が促進され、超伝導復帰性能が大幅に向上去ることを示した。限流性能と超伝導復帰性能の相互関係に関しては発表当日に報告する。

## 参考文献

- P. Tixador et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (1992) pp. 446 – 449
- K. Yuki et al., Supercond. Sci. Technol., Vol. 33 (2020) 034002
- H. Hashizume et al., Nucl. Fusion, Vol. 58 (2014) 026014
- Y. Kikuchi et al., Trans. Iron. Steel Inst. Jpn, Vol. 26 (1986) pp. 576 – 581
- M. Tamashima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) 5601805
- S. Nishio et al., Trans. JSME B Vol. 53 (1987) pp. 1781 – 1787
- G. Chandratilleke et al., J. Cryo. Soc. Jpn. Vol. 23 (1988) pp. 128 – 133

## REBCO パンケーキコイルを用いた 変圧器磁気遮へい型超電導限流器の限流特性

Current limiting characteristics of a magnetic shielding type Superconducting Fault Current Limiter of REBCO pancake coils

田井 宏, 白井 康之, 坂本 大輝 (京都大学)  
TAI Hiroshi, SHIRAI Yasuyuki, SAKAMOTO Daiki (Kyoto University)  
E-mail: tai.hiroshi.78c@st.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

故障電流の増大問題への対策として、超電導限流器 (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) が注目されている。SFCL は通常時には低インピーダンスで損失なく電流を流し、事故時には高インピーダンスが発生し、故障電流を抑制する。先行研究では、REBCO 線材を用いたパンケーキコイル型 SFCL の試作モデルが設計され、限流特性について調べられた [1]。今回、模擬電力系統での実験を想定し、新たなパンケーキコイル型 SFCL を設計製作し、基礎特性実験を行って限流動作を調べた。

### 2. パンケーキコイル型変圧器磁気遮へい型 SFCL

パンケーキコイル型変圧器磁気遮へい型 SFCL の構造と概観を Fig.1 に示す。4 つのパンケーキ型 REBCO 超電導コイルを同軸上に配置し、内側の 2 つをダブルパンケーキとして一次側コイルとし系統に接続する。外側の 2 つを短絡して二次側コイルとする。模擬系統 (18.2kVA, 200V) での限流実験を想定して動作開始電流を約 30A、限流リアクタンスを  $0.49\Omega$  ( $1.3mH$ ) を設計目標とした。REBCO 線材の臨界電流は 80A で、二次側コイルの巻数を調整して、一次電流が 29.1A (動作開始電流) で二次電流が臨界電流となるようにした。通常時は一次側で発生する磁束を打ち消す誘導電流が二次側に流れ低インピーダンスである。故障電流が流れると、まず二次側が先に常電導転移し、磁束が打ち消せずリアクタンス成分が発生し、L 型限流が行われる。さらに大きな電流が流れると一次側も常電導転移し、抵抗成分も加わった R+L 型限流が行われる。

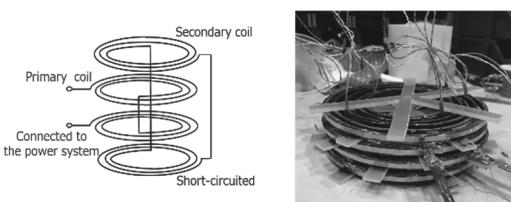


Fig.1 Schematic diagram and photo of SFCL

### 3. 実験・結果

基礎特性実験回路を Fig.2 に示す。電磁スイッチをオンにして、0.1 秒間 SFCL に電流を流した。この時ボルトスライダーの電圧を周波数 60Hz、電圧 5~200V の間で変化させ、様々な故障電流を発生させた時の限流器端子電圧、一次側コイル電流、二次側コイル電流を測定した。二次側電流はロゴスキーコイルで測定した。

実験結果の一例としてボルトスライダー電圧 200V の時の一次側コイル電流、限流器端子電圧を Fig.3 に示す。一次側電流が臨界電流 80A を超え、一次側、二次側共に常電導転移している。SFCL がない場合の電流は、電力系統瞬時値解析プログラム (XTAP) を用いて求めた。限流器に

よって故障電流は 71% 程度まで限流されていることが分かる。電流が 80A を越えた範囲に電圧の歪みが見られることから、一次側コイル抵抗が発生していることが分かる。

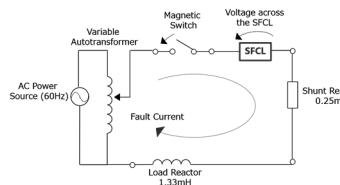


Fig.2 Schematic diagram of the experimental circuit

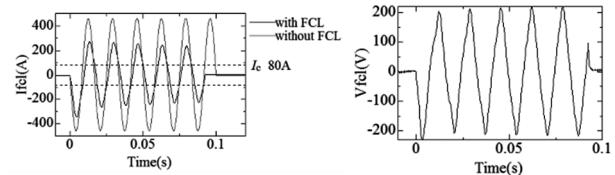


Fig.3 Fault current and SFCL voltage

電圧を 5~200V の間で変化させて行った実験結果をそれぞれフーリエ解析し、限流器電圧、一次側電流の基本波を求め、一次側電流のピーク値に対するインピーダンスと位相差を算出し、Fig.4 に示す。今回 SFCL の結合係数  $k$  が 0.8 と小さく、漏れ磁束によるリアクタンス  $0.17\Omega$  が、動作開始電流より小さい領域で発生している。動作開始電流 29.1A を超えたあたりからリアクタンス、抵抗成分が徐々に増え、リアクタンス成分が支配的な L 型限流が行われている。一次側コイルの臨界電流 80A を超えると抵抗成分が増加し、R+L 型限流が行われている。80A 以上になると抵抗成分が急激に増加しているのは、線材の発熱によるものと考えられる。リアクタンス成分は  $0.49\Omega$  に収束しており、設計時に想定した値と概ね一致した。

限流器の電圧・電流の位相差は、動作開始電流を超える 80A 程度までは  $66^\circ$  程度であり主に L 型限流であることが分かる。一次側電流がさらに大きくなると位相差が小さくなっていき、R+L 型限流に移行している。

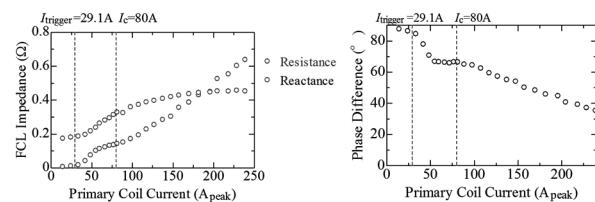


Fig.4 Impedance and phase difference

### 参考文献

- [1] D.Sakamoto, et.al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.98 (2019) p.92

# 抵抗型超電導限流器を目的とした加圧液体窒素冷却下における GdBCO 無誘導巻コイルの復帰特性向上に関する検討

Recovery Characteristics of GdBCO Series-connected Non-inductive Coil in Pressurized Liquid Nitrogen for a Resistive SFCL

松下 直也, 柳井 創太, 白井 康之, 塩津 正博 (京大)

MATSUSHITA Naoya, YANAI Sota, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro (Kyoto University)

E-mail: matsushita@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

抵抗型超電導限流器の実用化にあたり、故障電流の遮断の後、素早く超電導状態に復帰することが求められる。超電導線材表面に PTFE (PolytetraFluoroEthylene) コーティングを施したり、液体窒素に圧力をかけたりすることで、復帰特性が向上することがすでに確認されている[1]が、実用化に向けて、2枚の GdBCO 無誘導巻コイルを直列に接続した試験体を用いて、複数枚積み重ねることによる復帰特性への影響を検証した。

## 2. 試験体

本実験に使用した試験体(住友電工製)を Fig.1 に示す。使用した超電導線材は幅 4 mm、厚さ 0.2 mm、長さ 2560 mm で単位長さ当たりの常温抵抗値が  $276.8 \text{ m}\Omega/\text{m}$  の GdBCO 線材であり、先行研究[1]と同じ無誘導巻パンケーキ巻枠を三枚重ね、その内の下側二枚に超伝導線材を巻き付けて作成した試験体を二枚重ね無誘導巻パンケーキコイル試験体と呼称する。

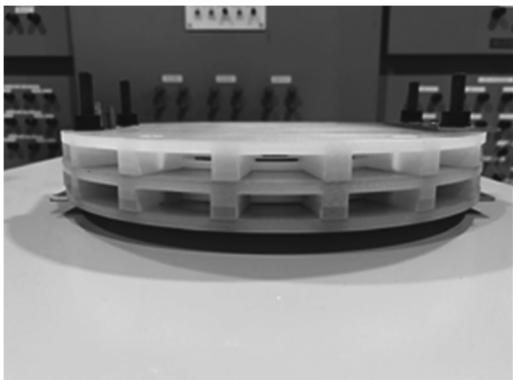


Fig.1 GdBCO series-connected Non-inductive coil

## 3. 試験方法

Fig.2 のように実験回路を組んだ。スイッチ1を開じ、100 ms 間交流電圧を試験体にかけてクエンチさせた。電圧値はクエンチ後の抵抗値が  $1200 \text{ m}\Omega$  に達するように調整した。復帰特性を観察するため、GdBCO 線材が超電導状態に戻るまで、一定電流(100 mA)を通電し、抵抗を計測した。また、試験体の側面から超電導線材の表面の一部をハイスピードカメラで撮影し、復帰中の沸騰現象を観察した。液体窒素にかける圧力は 0.10 MPa(大気圧)から 0.50 MPa まで 0.05 MPa 刻みで変化させて実験を行った。

## 4. 実験結果と考察

Fig.3 に 0.20 MPa でのクエンチ後の試験体の抵抗値の時間変化を示す。液体窒素加圧下において、復帰開始直後にみられる抵抗値の減少の傾きが緩やかな領域と復帰開始後しばらくして見られる傾きの急な領域を確認した。これは、加圧下においてクエンチ後は線材表面が膜沸騰状態となり冷却が遅くなるが、ある時点(1400ms)を境に線材表面が核沸騰状態

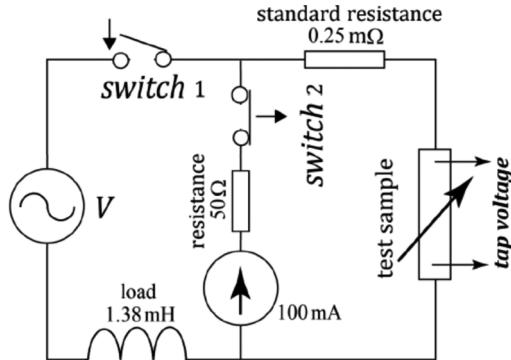


Fig.2 Test circuit

に遷移し復帰が早くなるという先行研究[1]と同じ復帰の特性を示している。また、二枚積み重ねることで二枚重ね無誘導巻パンケーキコイルの上部の復帰特性が悪化し復帰時間が長くなる現象が確認された。

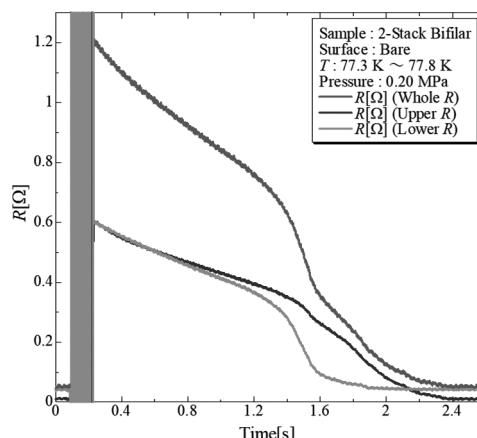


Fig.3 Temporal change of resistance of GdBCO Series-connected Non-inductive Coil (0.20 MPa)

## 5. まとめ

先行研究[1]と同様に二枚重ね無誘導巻パンケーキコイル試験体においても液体窒素の加圧により復帰特性が向上した。二枚積み重ねることで、二枚重ね無誘導巻パンケーキコイルの上部の復帰特性が悪化し復帰時間が長くなる現象が確認された。この現象は 0.10 MPa～0.50 MPa 全ての圧力下で確認された。特に 0.10 MPa の時、復帰時間が最も長くなり、加圧するに従い復帰時間は短縮した。

## 参考文献

- [1] S.Yanai,et al (2019) : "Study on Improvement of Recovery Characteristics of GdBCO Non-Inductive Coil for Resistive SFCL" 2019 年度春季低温工学・超電導学会

## アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(1)－全体計画

### Development of induction heating device for aluminum extrusion molding using HTS magnets

#### (1) – overview

伊東 徹也, 河島 裕, 緒方 康博(テラル); 福井 聰(新潟大); 古瀬 充穂(産総研); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

ITO Tetsuya, KAWASHIMA Hiroshi, OGATA Yasuhiro (TERAL Inc.); FUKUI Satoshi (Niigata University);

FURUSE Mitsuho (AIST); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)

E-mail: ito00@teral.co.jp

#### 1. はじめに

アルミ押出加工製品は、建材、電気製品、事務用品、輸送機器の構造材などに多く使用されている。その加工工程では、材料のアルミビレット(円柱状のアルミ塊)を450°C付近に加熱する必要があるが、現在主に用いられている高周波誘導加熱式(IH式)では、非磁性・低抵抗であるアルミを効率よく加熱することができず、投入エネルギーの約1/2が損失になる。また、IH式では表皮効果によりアルミビレット表面のみに電流が流れるため、加熱エネルギー投入量に限界があり、加熱に時間を要す。このため、アルミビレットを高効率かつ高速に加熱できる加熱装置の開発が期待されている。

誘導加熱での投入エネルギーは磁束密度と周波数の関数で表される。高速加熱のため投入エネルギーを増やすには、磁束密度もしくは周波数のいずれかを高くしなければならない。しかし、周波数を高くすると表皮深さがさらに浅くなり被加熱物表面温度の過度な上昇を招く。つまり、高速加熱実現の鍵は、高磁束密度と低周波数の両立である。磁束密度を高めるためにには励磁電流を大きくする必要があるが、銅コイル(=常電導コイル)では通電電流増加に伴い銅損が2次関数的に増加するため、コイルを冷却しながら通電できる電流値には限界があるほか、加熱効率の大幅な悪化につながる。

これらの問題点の解決方法として、高温超電導コイルにより直流強磁場を生成し、その中でアルミビレットを低速回転させる加熱方法(この方式を磁気加熱式と呼ぶことにする、Fig.1参照)を用いたアルミビレット加熱装置の開発を進めている。

この装置の実用化には、従来装置に対し競争力のある装置価格を実現することはもとより、産業機械として求められる安全性、長期信頼性、メンテナンス性、ランニングコストについても、課題解決が必要である。本発表では、装置開発の全体計画及び状況について報告する。

#### 2. 装置概要

開発中の装置仕様をTable.1に示した。

本装置では、6インチのアルミビレットを対象とし、加熱所要時間は押出加工サイクルに合わせビレット長500mmにおいて60秒以下とすることを目標とした。これを実現するための所要加熱量をシミュレーションにより検討し、加熱能力は最大400kWとした。

装置の構成をFig.2に示した。磁場発生部は、2組のHTSコイルを加熱空間を挟んで対向させ、背部を継鉄で接続している。HTSコイルは、断熱容器に収容し、2段式GM冷凍機で伝導冷却する。アルミビレットは両端を把持する形で保持し、電動機により加熱空間の磁場中で強制回転させる。回転により、アルミビレット内に発生する渦電流の損失により、アルミビレットの加熱を行う。

#### 3. 開発スケジュール

本研究開発は、令和元年度(2019年度)戦略的基盤技術高度化支援事業の採択を受け、実施している。2019年度は1組目の磁場発生部の設計、試作を終え(Fig.3, Table.2参照)、冷却及び通電の評価を実施中である。

開発装置完成後は実際のアルミニウム押出加工事業者の協力の下、工場での実証試験を実施予定である。

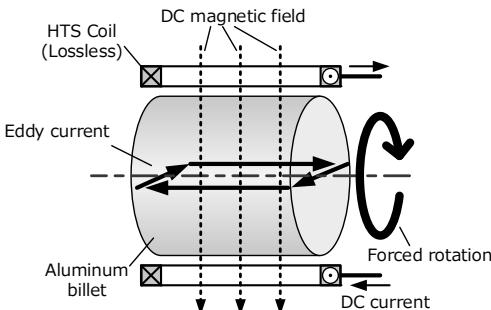


Fig.1 Principle diagram of new heating method

Table.1 Machine Specifications

Billet diameter	155 mm (6")
Billet length	200 – 650 mm
Heating time (@ Billet Length = 500mm)	< 60 s
Heating capacity	400kW
Magnetic field generator	HTS Coil
Magnetic flux density in heating area	> 1 Tesla

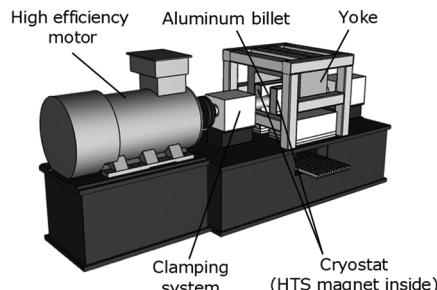


Fig.2 Schematic diagram of new aluminum billet heater

Table.2 Specifications of HTS coil

HTS Wire	REBCO 12mm 110 μm *1
Rated current	200A
Number of turns	350 turns/coil
Number of coils	2 (series)
Total length of wire	around 1.1 km

\*1 SuperOx Japan 社製

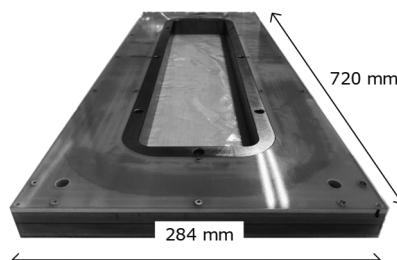


Fig.3 HTS coil for aluminum billet heater

#### 謝辞

本研究開発の一部は、令和元年度戦略的基盤技術高度化支援事業の助成を受けて実施した。

# LHC 高輝度アップグレード超伝導双極磁石のための クエンチ保護ヒーターの開発

## Development of the quench protection heater for superconducting dipole magnet for High-Luminosity LHC upgrade

鈴木 研人、飯田 真久、池田 博、池本 由希子、大畠 洋克、岡田 尚起、岡田 竜太郎、荻津 透、川又 弘史、木村 誠宏、  
佐々木 売一、菅野 未知央、高橋 直人、田中 賢一、中本 建志、東 憲男 (高エネ研);

MUSSO Andrea, TODESCO Ezio (CERN)

SUZUKI Kento, IIDA Masahisa, IKEDA Hiroshi, IKEMOTO Yukiko, OHATA Hirokatsu, OKADA Naoki,  
OKADA Ryutaro, OGITSU Toru, KAWAMATA Hiroshi, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Kenichi, SUGANO Michinaka,  
TAKAHASHI Naoto, TANAKA Kenichi, NAKAMOTO Tatsumi, HIGASHI Norio (KEK);

MUSSO Andrea and TODESCO Ezio (CERN)

E-mail: kentsuzu@post.kek.jp

### 1 Introduction

High energy accelerator research organization, KEK, has developed new separation dipole magnets, D1, for the High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC). The existing LHC Nb-Ti technology is utilized for the D1 in order to generate a field integral of 35 T·m at the nominal operating current and temperature of 12 kA and 1.9 K, respectively. The corresponding central field is equivalent to 5.6 T. Prior to fabrication of the first full-scale prototype, which has begun in 2020, three magnets of 2 m-long short-scale models have been developed since 2015. The stored energies of the full-scale and short-scale magnets are estimated to be 2.13 MJ and 0.568 MJ, respectively. One of the challenges in beam operation is protecting coils from quench: the stored energy has to be dissipated only by quench protection heaters (QHs) and without energy extraction despite the high engineering current density of 600 A/mm<sup>2</sup>.

### 2 QH design

The QH for the 1st model magnet, which is based on a single-strip heater made of stainless steel (SS), showed unsatisfactory results as the hotspot temperature ( $\equiv T_{\max}$ ) exceeds the specification of 300 K before reaching the nominal operating current [1]. To optimize the heater design, we have developed our calculation code in which time evolution of the heat propagation through the coils is computed based on the three-dimensional finite difference method. Exact coil geometry can be implemented into the program and position of the SS heating station can be adjusted so as to find out the best configuration. Finally, the zig-zag heater pattern with two strips was adopted as shown in Fig. 1. Here, the heating stations are positioned so that they cover the entire coil region including higher field position and thus quickly evolve heat propagation thanks to the lower  $T_c$  and faster quench velocity ( $\sim 30$  m/s for  $I = 12$  kA and  $B = 5$  T).

### 3 Results from the tests of the 2nd and 3rd models

Power tests of the 2nd and 3rd models were performed in the 9 m-deep vertical cryostat at the KEK test facility. During the tests, performance of the new heaters was also evaluated. Figure 2 shows the measured and simulated magnet current dumps for  $I=8$ , 10, and 12.047 kA, obtained with the 2nd model. In the experiment, QHs were fired at  $t=0$  and at the same time the transport current was shut off. No external dump resistor was used, and thus all the stored energy was dissipated by the QHs. As shown in Fig. 2, the measured current profile is in good agreement with the simulated one.  $T_{\max}$ , which was counted from the start of quench, was estimated with the measured current decays and found to be well below 300 K even at the nominal operating current. The test results from the 3rd model also shows a good reproducibility of the heater performance. Therefore, we concluded performance of the

new heater, which was designed based on our developed calculation code, was verified and could be extended for the full-scale magnet.

### 4 Prospects for the full-scale magnet

Performance of QH for the full-scale magnet, which is based on the zigzag pattern with two strips, was evaluated using the simulation. The stored energy was assumed to be dissipated only by the full-scale QH.  $T_{\max}$  was then evaluated by assuming magnet quench occurred at the high field location (HF quench: 5 T) or low field location (LF quench: 1 T). Here we also evaluated  $T_{\max}$  for each of the failure scenarios: some of the heater circuits are lost. Among them the highest temperature obtained was listed in Table 1 as well as the nominal scenario, showing the  $T_{\max}$ s are below the specification of 300 K even for the worst case and feasibility of the new full-scale heater.

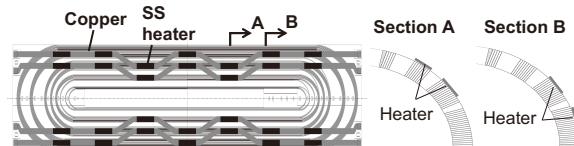


Fig. 1: Schematics of the new QH pattern.

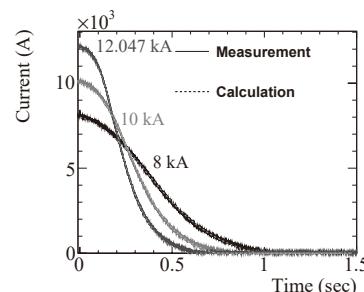


Fig. 2: Measured (solid) and simulated (dashed) current dumps for  $I=8$ , 10, and 12 kA [2].

Table 1: Expected  $T_{\max}$  for the full-scale QH.

	Expected $T_{\max}$	
	HF quench (5 T)	LF quench (1 T)
Nominal scenario	235 K	229 K
Worst scenario	297 K	289 K

### 参考文献

- K. Suzuki, et al.: IEEE Trans. Appl. Super, Vol. 28 (2018) 8119554
- K. Suzuki, et al.: IEEE Trans. Appl. Super, Vol. 30 (2020) 4701206

# 伝導冷却された小型高温超伝導二極マグネットの変動励磁下での発生磁界測定

## Magnetic field measurements on a small dipole magnet wound with coated conductors under time-varying field generation operation

曽我部 友輔, 若林 洗希, 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke, WAKABAYASHI Koki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は重粒子線がん治療装置に用いられる回転ガントリーに高温超伝導マグネットを使用するための研究を進めている。回転ガントリー用マグネットには、励消磁を繰り返しかつ消磁中に存在する電流が一定の時間において、安定かつ良好な再現性をもつ磁界を発生することが求められる[1]。しかし、薄膜高温超伝導線で巻かれたマグネットにおいては、遮蔽電流磁界が磁界精度に悪影響を及ぼすことが懸念される。今回は、小型高温超伝導二極マグネットを、回転ガントリーを意識した運転パターンで変動励磁し磁界精度を調査した。

### 2. 測定対象のマグネット・測定方法

測定対象のマグネットはシングルレーストラックコイルを片極に二個重ねた四個組レーストラックコイルである。このマグネットの定格運転温度は30 Kであり、150 A 通電した場合の設計二極磁界は約 360 mT である。

磁界測定は回転ピックアップコイル法によって行った。磁界が発生している領域でピックアップコイルを回転させることにより発生する誘導電圧を測定し、この電圧を Fourier 級数展開することによって発生磁界の多極成分を測定する。回転ピックアップコイル法では高速な測定は原理的に困難であるため、2 秒間隔の測定とした。

### 3. マグネット運転パターン

回転ガントリー用マグネットを模擬した運転パターンとして、Fig. 1 に示す一サイクル分の通電パターンを標準として採用した。ここで、 $t_{0,n}$  は  $n$  回目のサイクルの開始時刻、 $t_{FT}$  及び  $t_s$  はそれぞれフラットトップ、及び電流ランプダウン中に設定されている電流が一定となる時間(ステップ)の持続時間である。なお、ここではそれぞれ 60 秒、10 秒として測定を行った。125 A、100 A、75 A、50 A にステップを設けた。また、励消磁時のランプレートは 5 A/s とした。標準となる磁界測定ではこのサイクルを約 6 時間にわたり繰り返し、フラットトップ及び各ステップにおける短時間の磁界の変動、並びにサイクルを繰り返すことによる長時間の磁界の変動を測定した。

### 4. 磁界測定結果

Fig. 2 に 100 A のステップにおける 2 極磁界成分及び 6 極磁界係数の平均値の、サイクルを繰り返すことによる変化を示す。ここで、100 A のステップは各サイクルに存在し、それぞれのステップ開始時刻  $t_{0,n}$  に対してプロットされている離散的データであることに注意を要する。2 極磁界成分として電流値で規格化した結果を示している。また、6 極磁界係数とは、6 極磁界成分を 2 極磁界成分で規格化し、 $10^4$  を乗じたものである。サイクルを繰り返すことにより 2 極磁界成分が大きく変化しており、磁界の再現性に遮蔽電流磁界が悪影響を及ぼしていることが確認された。初めのサイクルと最後のサイクルの差は約 1.6  $\mu$ T/A であり、発生 2 極磁界成分に対する相対値として約  $6 \times 10^{-4}$  の時間的変動が確認された。

一方、6 極磁界係数の時間的変化は 0.2 unit 以下と十分小さく、回転ガントリー用マグネットにおける磁界精度の観点から問題ない程度であることが確認された。

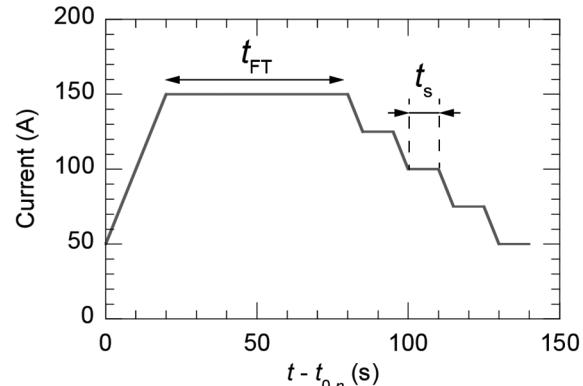


Fig. 1 Typical one-cycle current profile for magnetic field measurements.

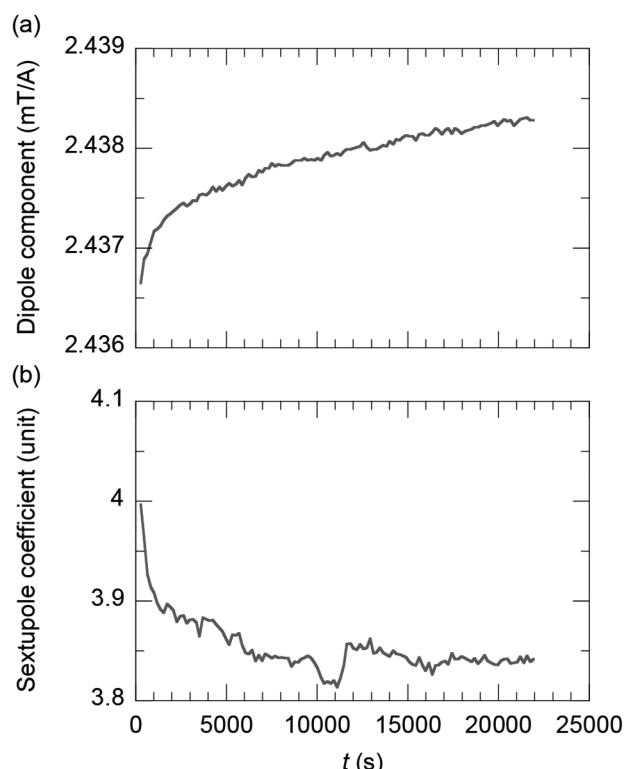


Fig. 2 Time evolution of averaged multipole components in 100-A steps; (a) dipole magnetic field component normalized by current and (b) sextupole magnetic field coefficient in 100-A steps (normalized sextupole magnetic field component by dipole magnetic field component)

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16H02326、JP19K23513 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- Y. Iwata, et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, Vol. 317 (2012) p. 793-797.

## QMG®リングバルクマグネットの捕捉磁場分布の均一化 Homogenization of trapped field of QMG® ring bulk magnet

森田 充, 手嶋 英一, 澤村 充(日本製鉄)  
MORITA Mitsuru, TESHIMA Hidekazu, SAWAMURA Mitsuru(NSC)  
E-mail:morita.d98.mitsuru@jp.nipponsteel.com

### 1. はじめに

優れた特性を有するQMG®(単結晶状の123相中に211相が微細分散したバルク状酸化物超電導材料)は、1988年に初めて開発された[1-4]。その後、希土類元素(RE)を置換した種結晶を使用する単結晶育成技術により大型のQMGが製造可能となり種々の応用開発が進められた[5]。バルクマグネット応用は、1989年に提案されRE置換種結晶技術によりその基本形が完成した[6]。最近では、特に低温・強磁場での着磁により数Tの磁場が捕捉可能となり、各種のバルクマグネット応用例が報告されている。

その中で、QMGリングを用いた卓上NMR応用が進展している。NMR応用では、高強度かつ高均一の磁場が必要であり、均一な捕捉磁場を得るために種々の方法が提案されている[7]。今回、直径60mmの内径が異なるQMGリングを積層し、着磁後、昇温することで捕捉磁場の均一化を試みたので報告する。

### 2. 実験方法

**2-1 試料準備:** Fig.1に着磁実験に使用した内径が異なる外径60mmのGd系QMGリングを積層したバルクマグネットユニットの構造を示す。中央部に肉厚が8mmの薄肉試料を配置した。各QMGリングには、肉厚7mmのアルミ合金リングをはめ込み補強を行った。上記マグネットは、冷凍機のコールドヘッド上に固定され、試料室にはヘリウムガスが充填された。試料カバーは、バルクマグネットの軸上の捕捉磁場分布を測定するためのφ20mm室温ボアを有する。

**2-2 着磁磁場分布測定方法:** 室温ボア径が150mmの着磁用10Tマグネット中に磁場中心と試料中心とが一致するように試料を配置した。100Kで約5Tの外部磁場を印加した後、40Kに冷却、外部磁場を減磁し着磁を行った。着磁後、10Tマグネットから冷凍機を引き抜き、試料の中心軸上の捕捉磁場分布を測定した。その後、徐々に試料温度を上げながら、試料中心軸上の捕捉磁場分布の変化を測定した。

### 3. 実験結果・考察

Fig.2に40Kで着磁した後、試料温度を60K, 61K, 62K, 62.5Kに昇温した時の試料中央部中心軸上の捕捉磁場分布の変化を示す。40Kから60Kへは、ほとんど変化が見られないが62K以上では、捕捉磁場分布が急に低下し始めている。これは、約60Kより低温では、すべてのQMGリングが部分着磁状態であり、試料の昇温に対し、各リング内の電流分布は変化するものの、トータルの電流は変化しない状況にあるのに対し、約62K以上では、昇温により中央部の薄肉リングのみが部分着磁状態からフル着磁状態に変化したため、中心軸中央部の超電導電流が低下し始めたためと考えられる。

Fig.3にFig.2の62.5Kでの捕捉磁場分布の拡大図を示す。中央部の試料中心軸上約15mmの領域で100ppm以内の分布が得られており、着磁に使用した10Tマグネットの磁場分布と比較して大幅に捕捉磁場分布の均一性を向上させることができた。今後、着磁用10Tマグネットの磁場中心と試料中心の位置決め精度の向上やQMGリング構造の最適化により更なる均一化が可能になるものと思われる。

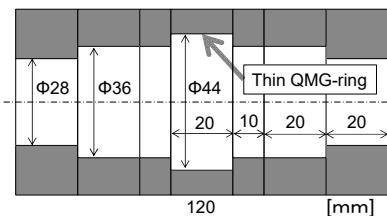


Fig. 1 Cross-sectional structure of sample.

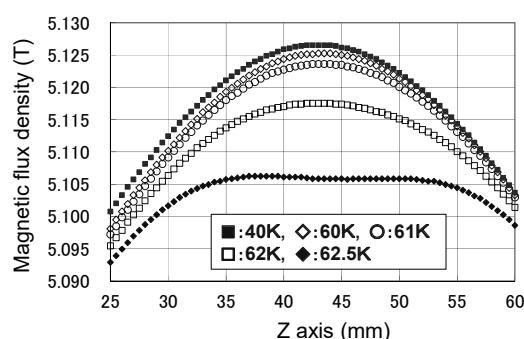


Fig. 2 Temperature dependence of trapped field distribution

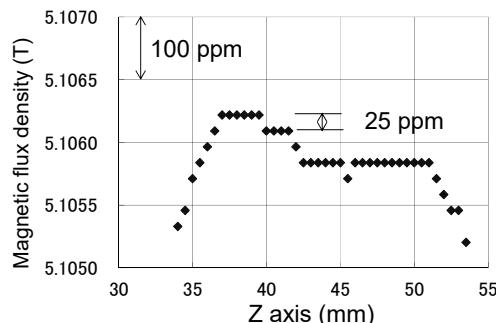


Fig. 3 Enlarged field distribution at 62.5K

### 参考文献

- 森田充, 松田昭一:New Superconducting Materials Forum News, No.10 (1988) 15
- M. Morita, et al.: Patent No. US-5508253, Priority date: 06.06.1988.
- M. Morita, et al.: Physica C 172(1990)383-387  
[参考文献 1の英訳]
- 森田 充:博士論文「溶融成長法による大型酸化物超伝導体の作製と高臨界電流密度化に関する研究」北海道大学学術成果コレクション(HUSACP)  
<http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/statistics/statslist.php?staturl=fma3serq5o2379t>
- M. Morita et al.: Advances in Superconductivity III (1991)733
- M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 41 (1989) p.14
- 低温工学 特集「小型NMR用円筒超伝導バルク磁石の開発と信号検出」 第52巻第1号2017年

## Mg–B バルク磁石のパルス着磁過程における磁束跳躍とそのふるまい

### Flux Jump and Its Behavior in Pulsed-Field Magnetizing Process for Mg–B Bulk Magnet

岡 徹雄(芝浦工大); 沖 隼光(新潟大); 山中 健悟, 須藤 正照, ロンジ ダディエル(芝浦工大); ドルジ レミ(ローヌ大); ウォルフガング ハスラー, ユリアナ シャイター(IFW ドレスデン); 小川 純, 福井 聰(新潟大); ベルガー ケビン(ローヌ大); バディカ ペーター, ノーデム ジャック(カーン大); 坂井 直道, ムラリダ ミアラ, 村上 雅人(芝浦工大); 横山 和哉(足利大)

OKA Tetsuo (SIT); OKI Hayami (Niigata Univ.); YAMANAKA Kengo, SUDO Kimiaki, DADIEL Longji (SIT); DORGE Remi (Lorraine Univ.); HAESSLER Wolfgang, SCHEITER Juliane (IFW Dresden); OGAWA Jun, FUKUI Satoshi (Niigata Univ.); BERGER Kevin (Lorraine Univ.); BADICA Peter, NOUDEM Jacques (Univ. Caen); SAKAI Naomichi, MILYALA Muralidhar, MURAKAMI Masato (SIT); YOKOYAMA Kazuya (ASHITEC)

E-mail: okat@sic.shibaura-it.ac.jp

#### 1. はじめに

均一な金属間化合物である Mg–B 系高温超電導体に磁場を捕捉することによって実現する擬似永久磁石はその材料の均一な組織によって均質な磁場分布が期待できる。しかし、動作温度に近く低い  $T_c$  と小さい比熱のために、パルス着磁中に起こる発熱が頻繁な磁束跳躍(ブラックスジャンプ)を起こすため、磁場捕捉性能は他の希土類 123 系などに遙かに劣る。本研究では、着磁過程における磁束跳躍の振る舞いを詳細に追跡することで、一見偶発的におこる現象を抑制するための条件を探っていく。

#### 2. 実験方法

$\text{MgB}_2$  試料の作成はホットプレス(HP)法とスパークプラズマ焼結(SPS)法による。Table 1 に SPS で製作した試料の緒元を示す。これに HP によって製作した試料を比較に示す。SPS で作成した試料のうち低温焼結したものはその密度が  $1.6 \text{ g/cm}^3$  であったが、これらは今回の実験からは除き、HP とともに  $2.0 \text{ g/cm}^3$  以上の試料を用いた。パルス着磁は  $0.6 \text{ T}$  から  $2.2 \text{ T}$  までの、立ち上がり時間  $10 \text{ ms}$  の磁場を  $60 \text{ mF}$  の電源によって印加した。磁場印加はコールドヘッド  $15 \text{ K}$  で、磁場は FW ベルの BHT921 を用いて、試料上面中央で測定した。

#### 3. 実験結果

(1) 磁場侵入とブラックスフロー； 磁場侵入による着磁挙動をその捕捉率  $B_T/B_p$  について Fig. 1 に示す。磁場侵入の際の遮蔽効果は従来のとおり厚肉の試料で顕著だが、その捕捉率は試料によって大きく異なり、 $1.0 \text{ T}$  以上の磁場印加によって急峻に低下した。この挙動はブラックスフローの見られない NFF 域、ブラックスフローの著しい FFF 域、ならびに磁束跳躍の起きる FJ 域に明確に分かれた。

(2) 着磁挙動； Fig. 2 と Fig. 3 にこれらの SPS 試料(I690)と HP 試料(MH104b)の磁化挙動を比較して示す。なお HP 試料では Ti がドープされている。ともに NFF 域では  $0.6\text{--}0.8 \text{ T}$  の印加で発熱は少ないと見られ、その捕捉率はそれぞれ 86% と 92% であった。一方、 $1.8\text{--}2.0 \text{ T}$  で起こる FJ 域では、SPS で  $285 \text{ ms}$  で、HP では  $71 \text{ ms}$  と  $237 \text{ ms}$  の 2 回にわたって磁束跳躍が起り、第1段で 33%、第2段で 13% となった。SPS では  $1.8 \text{ T}$  以上で FJ が起り、これ以前は FFF である。FJ 後には捕捉率が 16% に下がるがその直前の FFF では 27% であり、発熱が捕捉磁場を下げてはいても、FJ の出現によって大幅に下がって安定する。 $\text{Mg}-\text{B}$  の金属的性質は低い比熱と高い熱伝導を暗示して、いずれの変化後も RE123 に比べ安定している。

磁束跳躍の出現は、1回ではなく、複数起ること、またその出現時期がパルス印加後の  $200 \text{ ms}$  以上の大間に遅れて見られる。これらの特徴的な振る舞いは、磁束運動による発熱が不均一に発生していること、また、不均一な熱伝播によるものと暗示され、さらに系統的なデータ収集が必要である。

Table. 1 Occurrence of flux jump in bulk $\text{MgB}_2$						
Sample	Diameter [mm]	Thickness [mm]	Pressure [MPa]	Temp. [°C]	Time [x60s]	Density [g/cm³]
E116	19.95	12.90	90	1200	—	2.05
F526	19.90	9.60	50	1150	15	2.62
I690	19.83	9.26	100	1100	20	2.62
MH104b	20.10	3.30				2.31

MH104b: Hot-press: Ti 2.5wt%

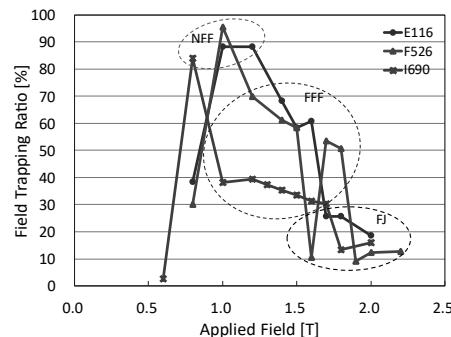


Fig.1 Trapped field Ratios for SPS samples

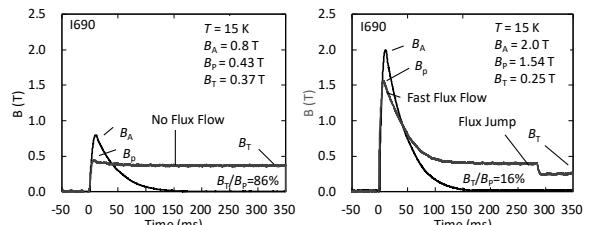


Fig. 2 Time evolution profiles of flux motion (SPS)

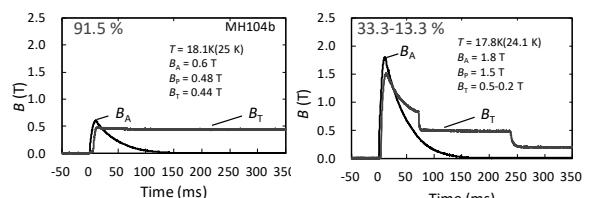


Fig. 3 Time evolution profiles of flux motion (HP)

#### 4. 結論

SPS あるいは HP で作成した  $\text{Mg}-\text{B}$  試料の低温でのパルス磁場印加時の磁場侵入は、ほぼ類似の挙動を示し、低磁場印加時の NFF 域、高磁場印加時の FFF と FJ 域に明確に分かれた振る舞いが見られた。この点で、磁束跳躍の領域が FFF の後に現れる兆候、FJ 後の捕捉磁場の安定した振る舞い、磁束跳躍の出現への振る舞いに仮説が得られた。

## クロス型軟鉄ヨークを用いた REBCO バルク体のパルス着磁特性の評価

Magnetizing performance evaluation of REBCO bulk excited by pulsed-field magnetization using a cross-shaped soft-iron yoke

横山 和哉(足利大);岡 徹雄(芝浦工大)

YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

### 1. はじめに

REBCO バルク体の材料製作及び補強技術の向上により、捕捉磁場が増大し、様々な応用が検討されている。バルク磁石の実用化を促進するためには、強磁場化と共に着磁の簡便化が必要である。著者らはパルス磁化法により捕捉磁場を向上する手法について検討しており、現在は着磁の際に用いる軟鉄ヨークに注目して形状や大きさ等が捕捉磁場に及ぼす影響を調査している。これまでに、円柱型、リング型、クロス型ヨークについて捕捉磁場特性を評価した結果、クロス型ヨークで捕捉磁場の向上が確認された。本文はクロス型ヨークにおいて、それを結晶成長境界(Growth Sector Boundary, GSB), または結晶成長領域(Growth Sector Region, GSR)に配置した場合の捕捉磁場特性に及ぼす影響を評価した。

### 2. 実験方法

Fig. 1 に、本実験で行った軟鉄ヨークの配置を示す。(a)はバルク体のGSR部にヨークの凸部を配置した場合、(b)はGSB部に凸部を配置した場合で、それぞれ「GSR配置」、「GSB配置」と呼ぶ。

2mm厚のSUS316Lリングで補強した $\phi 60 \times 20$  mm のGdBCOバルク体(日本製鉄製)を、2段GM冷凍機(RM20, アルバック製)のコールドヘッドの先端に接続したサンプルステージに配置し、20~50 Kに冷却する。各温度において3.9~6.2 Tのパルス磁場(立上時間:10 ms, 全パルス幅:100 ms)を1回印加し、試料表面の中央のホールセンサ(BHT-921, F.W.BELL製)、及びセルロックス抵抗温度計(CX-1030-SD-HT-1.4L/J, Lakeshore 製)により、着磁中の磁束密度及びの時間変化を測定した。磁場印加後、着磁コイルを取り外し、3Dホールセンサ(BH-703, F.W.BELL 製)を用いて磁極表面(試料表面から約 4 mm)の磁束密度分布を測定した。また、実測データから総磁束量を算出した。

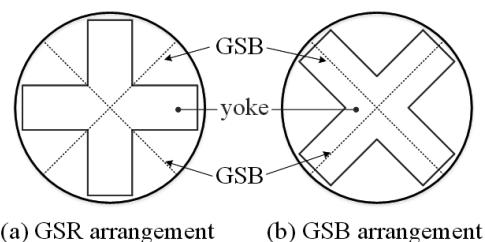
### 3. 結果及び考察

Fig. 2 に磁極表面の最大磁束密度  $B_{zmax}$  の印加磁場依存性を、Fig. 3 に総磁束量の印加磁場依存性をそれぞれ示す。いずれの結果においても GSR 配置の値が大きくなっている、軟鉄ヨークを GSR 部に配置した方が有利であることが分かった。

バルク体の特性は、試料の作製過程でピン止め点である 211 相が GSB に集まるため、GSR よりも GSB の方が高い。パルス着磁の場合、磁束は GSR から侵入して GSB に捕捉されると考えられている。そのため、GSB 配置は磁場を捕捉した後を重視しており、GSR は磁場侵入を重視した配置である。実験の結果、GSR にヨークを配置して、磁束の侵入を促進することが効果的であると考えられる。

### 4. まとめ

本文はパルス着磁の際に用いる軟鉄ヨークにおいて、クロス型ヨークが効果的であるという結果を踏まえ、それをバルク体の GSR に配置した場合と GSB に配置した場合で、捕捉磁場特性を評価した。その結果、GSR に配置した方が、捕捉磁場が大きくなり、磁束の侵入を促進することが効果的であることが示唆された。



(a) GSR arrangement      (b) GSB arrangement

Fig. 1. Arrangement of cross-shaped soft-iron yoke

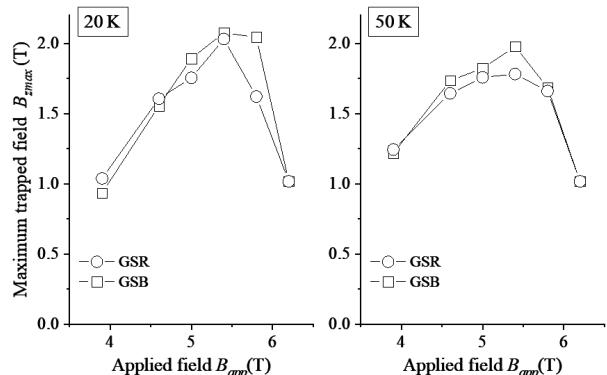


Fig. 2. Comparison of maximum flux density between GSR and GSB arrangements

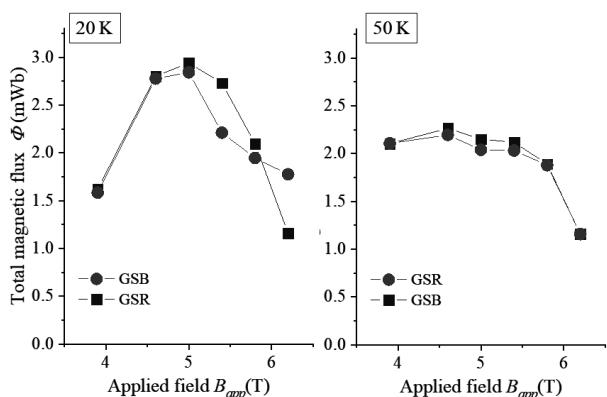


Fig. 3. Comparison of total magnetic flux between GSR and GSB arrangements

## パルス着磁におけるソレノイドコイルとスプリットコイルによる 磁束の振る舞いの違い

Magnetic flux behavior using solenoid coil and split coil during pulsed field magnetization

鎌田 大空, 平野 達也, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)

KAMADA Taku, HIRANO Tatsuya, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Uni.)

E-mail: g0319042@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

パルス着磁 (PFM) は、静磁場を印加する磁場中冷却着磁法 (FCM) と比較して、磁場を印加した際に磁束運動に伴う発熱が生じるために捕捉磁場は低下する。捕捉磁場向上にはロングパルス化、ヨークの挿入など様々な方法がある。さらに Mark らはスプリットコイルによる PFM 着磁はソレノイドコイルに比べ実験的に捕捉磁場が向上すると報告している[1]。しかしその向上の原因は磁束運動の違いであると考えられるが、実験的に明らかにされていない。本研究では、GdBaCuO バルクに対して両コイルを用いた PFM 実験を行い、磁束の振る舞いの違いを明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験方法

Fig. 1 に各コイルにおける実験装置の概略図を示す。円柱 GdBaCuO バルク (直径 54 mm、高さ 15 mm) を伝導冷却により、それぞれ初期温度  $T_s = 77$  K, 65 K に冷却し、ソレノイドコイル (内径 99 mm、外径 121 mm、高さ 50 mm) 及びスプリットコイル (内径 72 mm、外径 124 mm、高さ 37 mm) によりパルス磁場を印加した。立ち上がり時間はそれぞれ 18 ms, 13 ms である。また、ソレノイドコイルによる着磁ではバルクに SUS リングを取り付け、バルク下方に軟磁性ヨーク (直径 60 mm、高さ 20 mm) を配置し、スプリットコイルではバルクを Brass 製のジグにマウントし、着磁コイルの空芯部に磁性ヨークとして permendur (直径 60 mm、高さ 65 mm) を挿入した。捕捉磁場はそれぞれバルク表面中心 ( $B_{T1}$ )、右部 ( $B_{T2}$ )、下部 ( $B_{T3}$ ) においてホールセンサを貼り付けて測定し(図 3(a)挿入図参照)、温度はバルク側面において cernox 抵抗温度計を用いて測定した。

### 3. 実験結果

Fig. 2 に 65 K, 77 K における各着磁コイルを用いた PFM の捕捉磁場  $B_{T1}$  の印加磁場依存性を示す。これらはいずれも磁場印加後 300 ms の結果である。いずれの場合も印加磁場の増大に伴い捕捉磁場が増加した。77 K における  $B_{T1}$  は、ある印加磁場でピークを持ち、その後減少した。これは、バルクが発熱したことにより磁束流出が増大したためと考えられる。また、いずれのコイルにおいても 65 K における捕捉磁場が高い。これは低温におけるバルクの  $J_c$  が高いためと考えられる。さらに、最大捕捉磁場はソレノイドコイルよりスプリットコイルのほうが多い値となった。これらの結果は先行研究と一致している[1]。

Fig. 3 に各コイルの  $T_s = 77$  K,  $B_{ex} = 2.5$  T における捕捉磁場の時間依存性を示す。ここでバルク表面中心、右部、下部における最大侵入磁場をそれぞれ  $B_{T1,in}$ ,  $B_{T2,in}$ ,  $B_{T3,in}$  とすると、ソレノイドコイルにおいては  $B_{T1,in} > B_{T2,in}, B_{T3,in}$  となった。一方、スプリットコイルにおいては  $B_{T1,in} < B_{T2,in}, B_{T3,in}$  となった。これは本実験で初めて確認することができた。以上より、ソレノイドコイルにおいては磁束がバルク外側から徐々に侵入するのに対し、スプリットコイルにおいてはある時間においてバルク中に急激に磁束が侵入し捕捉磁場が増大し、コイルの形状により磁束運動が異なることがわかった。

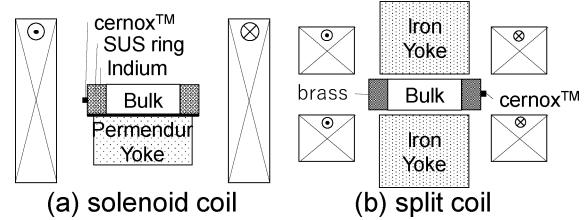


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup using (a) solenoid coil and (b) split coil.

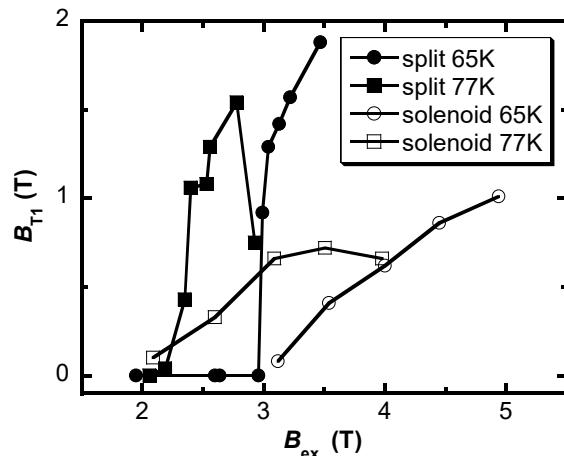


Fig. 2. Applied field ( $B_{ex}$ ) dependence of trapped magnetic field,  $B_{T1}$ , at 65 K and 77 K for each magnetizing coil.

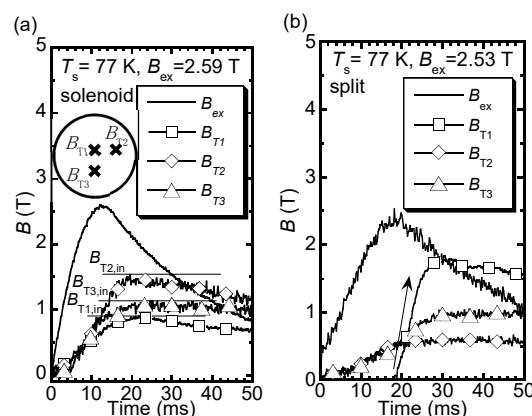


Fig. 3. Time dependence of trapped magnetic field at  $T_s = 77$  K for  $B_{ex} = 2.5$  T using (a) solenoid coil and (b) split coil.

### 参考文献

- [1] M.D.Ainslie *et al.* : Supercond. Sci. Technol., vol. 29, (2016) 074003.

## REBCO 溶融凝固バルクにおける酸素拡散機構についての再考

### Reconsideration on the oxygen-diffusion mechanism of REBCO melt-textured bulks

元木 貴則, 布川 航太, 笹田 廉陛, 富久 琢磨(青学大); 中村 新一(TEP); 下山 淳一 (青学大)  
MOTOKI Takanori, NUNOKAWA Kota, SASADA Rempei, TOMIHISA Takuma (Aoyama Gakuin Univ.);  
NAKAMURA Shin-ichi (TEP); SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)  
E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

#### 1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは、強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。しかし、大型擬似単結晶とみなせる溶融凝固バルクでは酸素拡散が遅く、通常数百時間という長い酸素アニールが必要となる。

我々はREBCO溶融凝固バルクに対する水蒸気含有酸素雰囲気中アニールによって、REBCO 結晶内部に多数の積層欠陥が生成し、酸素拡散が大きく促進されることを報告してきた<sup>[1]</sup>。しかしながら、見積もられる酸素拡散係数の値はバルクサイズに大きく依存することが分かってきた。これは則ち、溶融凝固バルクにおける実効的な拡散距離がバルクサイズだけでは決まらないことを示唆している。

#### 2. 実験方法

RE として Y を選択し、10 wt% の  $\text{Ag}_2\text{O}$  を添加もしくは無添加の YBCO 溶融凝固バルクを複数作製した。作製した円柱状のバルクの一部は短冊状に切り出し、乾燥酸素もしくは水蒸気含有酸素雰囲気下、400°C で酸素アニールを行い、アニール時間と質量変化の関係を調べた。

#### 3. 結果と考察

REBCO 単結晶においては、 $c$  軸方向の酸素拡散係数は  $ab$  面内に比べて極めて小さいことが知られている<sup>[2]</sup>。酸素拡散は  $ab$  面内のみで等方的に進行するとし、無限に長い円柱内への拡散もしくは短冊状バルクの短辺のみを考慮した拡散を仮定すると、その質量変化は下式で求められる<sup>[3]</sup>。ここで、 $M(t)$  は時刻  $t$  におけるバルクの質量、 $\alpha_n$  は  $n$  次の第一種ベッセル関数が 0 となる点を与える  $n$  番目の根、 $\theta = Dt / R^2, Dt / L^2$  ( $D$ :拡散係数、 $R$ :バルク半径(円柱バルク)、 $L$ : 短辺長(短冊バルク))である。

$$\frac{M(t) - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \exp(-\alpha_n^2 \theta)}{\alpha_n^2} \quad \text{円柱バルク}$$

$$\frac{M(t) - M_0}{M_\infty - M_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 \theta}{4}\right) \quad \text{短冊バルク}$$

Fig.1 (a) に 2 つの Ag 添加円柱状バルク( $\sim 13 \text{ mm}\phi$ )の酸素アニール時の水蒸気含有の有無による質量の時間変化を示す。拡散係数は  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーであり、水蒸気を導入することで 2 倍程度拡散が促進されていることがわかる。Fig.1 (b)には短冊状に切り出したバルクの質量変化を示している。短辺の長さは~1.3 mm 程度と短いものの、見積もられた拡散係数は  $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーとなった。これは、バルク内部を均一に拡散するのではなく、欠陥の少ない微小ドメインへの拡散が律速過程となつており、バルクサイズが小さくなるほど見かけの拡散が遅くなるためと考えられる。

Fig.1 (c)には、同じ形状の Ag 無添加シングルドメインバルクとマルチドメインバルクの質量変化を比較して示す。バルクの配向状態が異なるにもかかわらず、同様な質量変化の挙動を示し、これは微小領域への拡散が律速となっていることを強く示唆する結果である。当日は、律速となっている微小領域の拡散距離についても議論する。

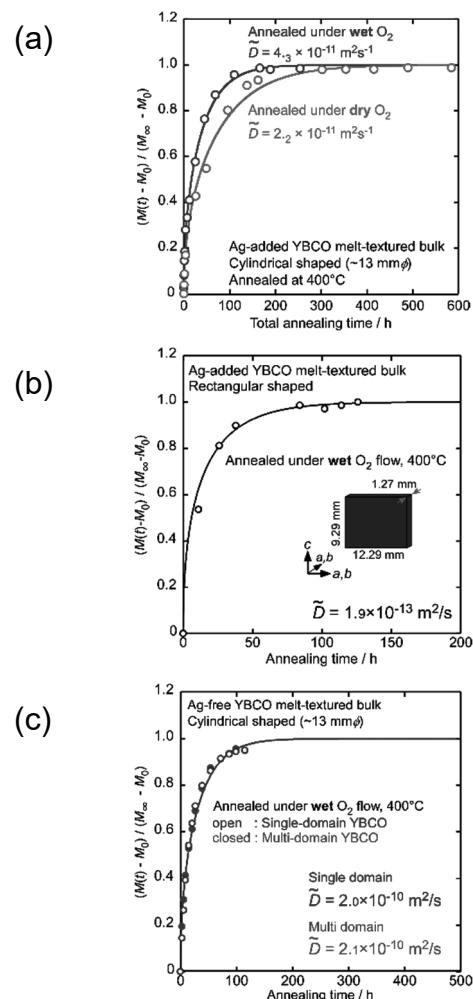


Fig. 1 Relationship between oxygen annealing time and changes in mass rate for YBCO melt-textured bulks for cylindrical bulks under dry  $\text{O}_2$  or wet  $\text{O}_2$  (a), rectangular bulk under wet  $\text{O}_2$  (b), and comparison of single-domain and multi-domain bulks (c).

#### 参考文献

- [1] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **33** (2020) 034008.
- [2] S. Tsukui *et al.*, *Physica C* **351** (2001) 357-62.
- [3] H. S. Carslaw *et al.*, “Conduction of heat in solids,” Oxford Univ. Press (1959).

# ポアを低減した RE123 溶融凝固バルクの作製と物性

## Preparation and physical properties of RE123 melt-solidified bulks with reduced pores

布川 航太, 富久 琢磨, 笹田 廉陛, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大)

NUNOKAWA Kota, TOMIHISA Takuma, SASADA Rempei, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5619058@aoyama.jp

### 1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (RE123)溶融凝固バルクは液体窒素温度 77 K を超える高い臨界温度  $T_c$  を有し、高磁場下においても高い  $J_c$  特性を示すことから強力超伝導磁石としての応用が期待されている。小型の RE123 溶融凝固バルク材料の捕捉磁場向上には高  $J_c$  化が有効で、ピンニング力の改善やバルク体内部のポア低減がその指針となるが、本研究では特に後者に着目した。バルク体内部のポア低減手法として、低压純酸素雰囲気下における溶融凝固<sup>[1]</sup>、冷間等方圧加压法(CIP)を用いた前駆体ペレットの高密度化<sup>[2]</sup>などが知られている。低压純酸素雰囲気下における溶融凝固では、バルクサイズを変えた際の酸素分圧の精密調整が困難という課題があるため、本研究では、溶融凝固前に前焼結過程を導入し、この工程のみを低压純酸素雰囲気下で行った。Top-seed 法で作製したバルク内部のポア分布を評価するとともに、ポアの低減が超伝導特性におよぼす影響を系統的に調べた。また、ポア低減によって通常の酸素アニールでは酸素拡散が極めて遅くなるため、水蒸気導入による酸素アニールプロセスの高速化も試みた。

### 2. 実験方法

原料粉末となる Y123 と Y211 の混合粉は低温固相反応により同時合成法を用いて作製した。原料粉末の仕込組成は最終的な組成がモル比で Y123:Y211 = 7:3 となるよう調整した。得られた粉末に機械的強度向上のために Ag<sub>2</sub>O 10 wt%, Y211 の微細化のために Pt 0.1 wt%を添加し、混合した粉末を一軸プレス(100 MPa, 200 MPa, 300 MPa)により 16 mmφ のペレットに成型した。成型後、底面加熱方式の管状炉を用いて、室温で管状炉内の空気を真空ポンプによって排気した後、O<sub>2</sub> ガスで置換する作業を繰り返し行った後、940°C, 24 h で低压純酸素雰囲気下溶融前焼結を行った。Nd123 単結晶を種結晶としてペレットの上面中央に置き、底面加熱方式のボックス炉を用いて、空气中で溶融凝固を行い、シングルドメインの Y123 溶融凝固バルクを得た。作製したバルクを板状に切り出し、400°C で酸素気流中アニールまたは含水蒸気アニールを十分に行った。種結晶下方とバルク動径方向に 2 mm (*a*-2, *c*-2) の場所から 1.5 mm × 1.5 mm × 1 mm<sup>3/c</sup> の小片試料を切り出し、SEMによる微細組織観察および SQUID 磁束計を用いた磁化測定より超伝導特性を評価した。

### 3. 結果と考察

4 回対称のファセットラインを持つシングルドメインの Y123 溶融凝固バルクが全ての一軸プレス圧において得られた。前駆体ペレットを高圧でプレスするほど、溶融成長後に残存するポアが少ない傾向が見られた。Fig. 1(a), (b)に作製した試料にそれぞれ乾燥酸素アニール、含水蒸気酸素アニールを施してから切り出した小片試料の  $J_c$  の外部磁場依存性を示す。アニール手法に関わらずポアの低減によって、主に低磁場領域

において  $J_c$  が向上した。また、酸素アニール条件による  $J_c$ - $H$  特性の大きな違いは見られなかった。現在、作製したバルクの密度、微細組織観察によるポアの体積分率などの評価を通じて低压純酸素雰囲気下における溶融前焼結効果を調べている。

講演では、含水蒸気酸素アニール過程における酸素拡散の高速化についても報告し、捕捉磁場改善に向けた溶融前焼結条件の最適化と最適な酸素アニール手法の確立について議論する。

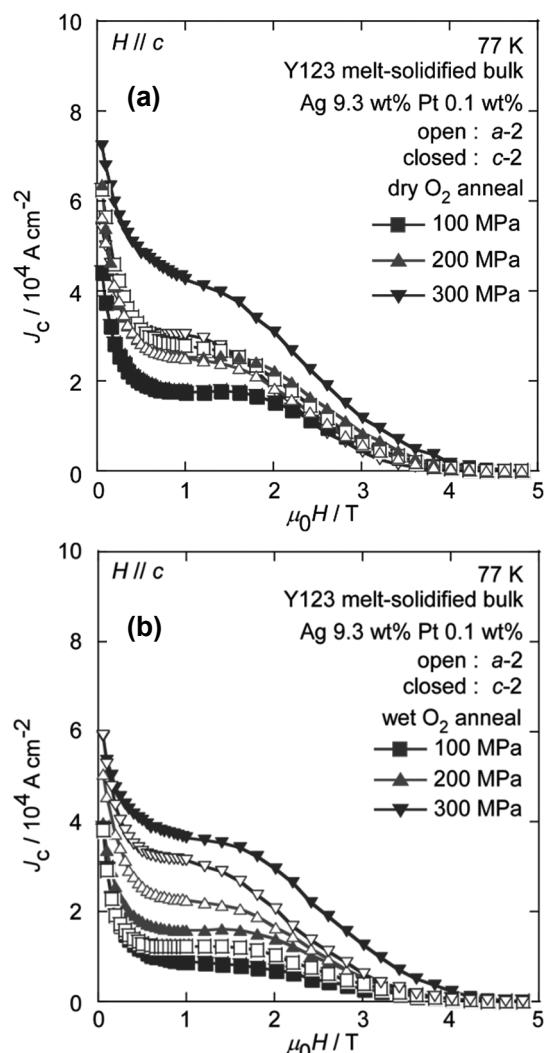


Fig. 1. Magnetic field dependences of  $J_c$  at 77 K of Y123 melt-solidified bulks pre-sintered at 940°C for 24 h followed by annealing under (a) dry O<sub>2</sub> flow (b) wet O<sub>2</sub> flow.

### 参考文献

- [1] Y. Kinemura *et al.*, Physics Procedia **36** (2012) 568-571.
- [2] Y. Setoyama *et al.*, Physica C **531** (2016) 79-84.

# Mg 気相輸送(MVT)法による MgB<sub>2</sub> バルクの作製と捕捉磁場特性の評価

## Fabrication and evaluation of trapped field properties of MgB<sub>2</sub> bulks by Mg Vapor Transportation (MVT) method

田中 里佳, 山本 明保(東京農工大学)

TANAKA Rika, YAMAMOTO Akiyasu (Tokyo University of Agriculture and Technology)

E-mail: s166141z@st.go.tuat.ac.jp

### 1. はじめに

MgB<sub>2</sub> 超伝導体は高い  $T_c$  を有することから、液体ヘリウムを必須としない 20 K 近傍での応用が期待されており、線材やバルク磁石等への材料化が進められている。我々は MgB<sub>2</sub> バルク磁石の捕捉磁場特性の向上を目指し、ホウ素源ペレットにマグネシウムの蒸気を輸送し、高純度かつ高充填率な MgB<sub>2</sub> バルクを得るマグネシウム気相輸送(MVT)法の開発に成功している[1]。一方で、MVT 法により円盤状バルクを作製する場合、マグネシウムの拡散は径方向と比較して厚み方向が支配的となるため、マグネシウム拡散過程の解明と制御により、厚みを増大させることが課題の一つである。そこで本研究では、クラック発生の抑制に有効なことが報告されている Premix 法[2]を導入した MVT 法により、5 mm 超の比較的厚い円盤状 MgB<sub>2</sub> バルクの作製を試みた。

### 2. 実験方法

MgB<sub>2</sub> と B をモル比 1:2 で混合した前駆体粉末を錠剤成型器により直径 20 mm, 厚み 2–5 mm に成型したものをおウソ源ペレットとして用いた。厚みの異なるホウソソ源ペレットを Mg 蒸気中で 850°C, 72 h 热処理することで、厚み 2.3 mm と 5.7 mm の 2 種類の円盤状 MgB<sub>2</sub> バルクを得た。作製した試料は、X 線回折により構成相を、SEM・EDX により微細組織、化学組成を、磁気特性評価システムにより捕捉磁場  $B_T$  を評価した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した 2 種の MgB<sub>2</sub> バルクの外観を示す。質量変化から見積った反応率はともに 100% に達していることが分かった。バルク中心部の XRD 解析より、ほぼ単相の MgB<sub>2</sub> 相が得られたことが確認された。これらのことから、厚みを増やしてもバルク中心部まで Mg の拡散が進んでいることが示唆された。また熱処理後の充填率は 70% 前後であり、*in-situ* バルクと比較して約 1.4 倍高かった。したがって、高純度かつ高充填率な比較的厚いバルク作製に成功したといえる。

Fig. 2 にバルク表面中心において測定した捕捉磁場の温度依存性を示す。10 K において厚み 2.3 mm バルクで 1.78 T、5.7 mm バルクで 2.41 T であった。また 20 K においては、それぞれ 1.41 T、1.84 T であり、厚みの増加とともに捕捉磁場はおよそ 1.3 倍向上した。

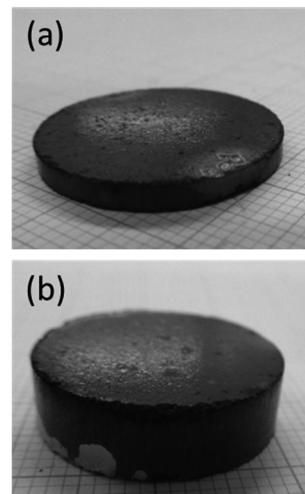


Fig. 1 The appearance of the MgB<sub>2</sub> bulks with 2.3 mm in thickness (a) and 5.7 mm in thickness (b) prepared by the MVT method.

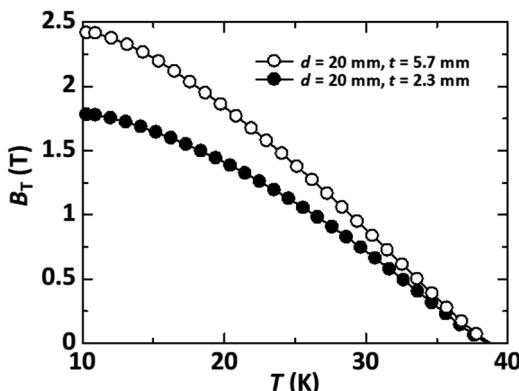


Fig. 2 Temperature dependence of trapped field at the center of surface for MVT-MgB<sub>2</sub> bulks with different thickness.

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費、及び文部科学省元素戦略プロジェクトの支援を一部受けて行ったものである。

### 参考文献

- Y. Sanogawa *et al.*, *J. Japan Inst. Met. Mater.*, **83**, 9, 341–345 (2019).
- I. Iwayama *et al.*, *Physica C*, **460–462**, 581–582 (2007).

## 浸透法で作製した大型 MgB<sub>2</sub> リングバルクの捕捉磁場特性: ボア内磁場均一度の評価

Trapped field property of large-size MgB<sub>2</sub> ring bulk fabricated by infiltration method: evaluation of the trapped filed homogeneity inside the bore

高橋 裕平, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)  
TAKAHASHI Yuhei, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)  
E-mail: t5518001@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

現在、(RE)BaCuO 系超電導バルク磁石 (RE は希土類元素) を用いた NMR 装置の開発が行われており、リング形状の超電導バルク磁石のボア内で NMR 信号を得ることに成功している[1]。しかし、(RE)BaCuO 系バルクは不均一な臨界電流密度 ( $J_c$ ) 分布を持つため均一磁場を発生させるために様々な工夫がなされてきた[2]。一方、MgB<sub>2</sub> バルクは多結晶体であることに由来する高い均一性を持ち、また(RE)BaCuO 系バルクに比べて作製コストが低いため NMR 装置において MgB<sub>2</sub> バルク磁石を(RE)BaCuO 系バルク磁石の代替として利用することには大きなメリットがある。MgB<sub>2</sub> バルク作製に際して、浸透法は加圧炉を用いる必要がなく低コストでありながら 15.9 K においてバルク表面の捕捉磁場が 2.4 T[3]と高圧合成法バルク並みの捕捉磁場が報告されていることと、バルク作製後に穴あけ加工等をすることなく直接リング形状のバルクが作製可能したことから MgB<sub>2</sub> リングバルクの作製に適する。そこで本研究では MgB<sub>2</sub> バルク磁石の NMR 応用を目指して浸透法で MgB<sub>2</sub> リングバルクを作製し、ボア内の捕捉磁場均一度を評価した。

### 2. 実験方法

原料粉末は結晶 B 粉末 (純度 99%、粒径 45  $\mu\text{m}$  以下) と Mg 粉末 (純度 99.5%、粒径 180  $\mu\text{m}$  以下) を用いた。まず、反応の促進と MgB<sub>2</sub> 粒の微細化のために B 粉末を遊星ボールミルによって回転速度 600 rpm で 1 h 粉碎した。カプセルに粉碎した B 粉末を外径 60 mm、内径 40 mm、厚さ 15 mm のリング状に充填した後、その上に Mg 粉末を充填し、アルゴン雰囲気で密閉した。なおリングの内側にはステンレス製のスペーサーを配置した。熱処理は 900°C で 24 h 行った。上述のバルクを 2 個作製し (それぞれのバルクをバルク A、バルク B と呼ぶ)、それぞれ単体および二枚重ねにした状態でボア内の捕捉磁場分布を測定した。Fig. 1 に捕捉磁場分布測定装置の概略図を示す。バルクの厚さ方向に平行でバルクボア中心を原点とする z 軸を定義した。捕捉磁場分布は 25 K で磁場中冷却着磁 (FCM) の後磁束クリープを抑制するため冷凍機の最低到達温度である 20 K 付近まで冷却し、z 軸上においてホール素子を走査することで測定した。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 に 2 個の MgB<sub>2</sub> リングバルク (外径 60 mm、内径 40 mm、厚さ 15 mm) を単体でフル着にした場合と積層させてフル着にした場合の捕捉磁場分布を示す。単体バルクの捕捉磁場分布は両バルクともにきれいな山型を示しておりバルクが厚さ方向に対して均一であることを示唆している。ここでバルク B において分布の中心が  $z=-1$  mm の位置にあるのは測定の誤差またはバルク内の温度勾配によるものと考えられる。また 2 つのバルクの最大捕捉磁場値は同一条件で作製したにもかかわらず 20% 近い差があった。NMR 装置の磁極にバルク磁石を応用する際複数のバルクを積層することが想定されるため、今回のように捕捉磁場特性の異なるバルクを積層させた場合の捕捉磁場分布を測定した。2 つのバルクの境界を  $z=0$  mm とし、z 軸の負の領域にバルク A、正の領域にバルク

B を配置した。バルク厚さの増大に伴い捕捉磁場値は向上したが、 $z=0$  を中心とした対称な山型の分布にはならず捕捉磁場特性の高いバルク B の側でより高い捕捉磁場を示した。したがって、均一磁場を得るために一体バルクを作製することが望ましいと示唆される。講演ではより厚さの大きいバルクの磁場分布や面内の磁場分布と併せて報告する。

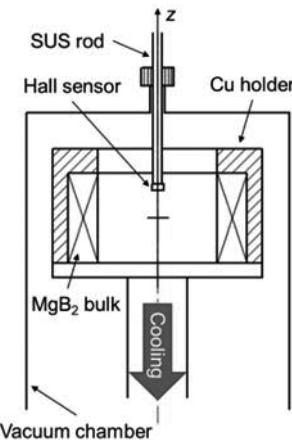


Fig. 1 Schematic image of the trapped field distribution measurement system.

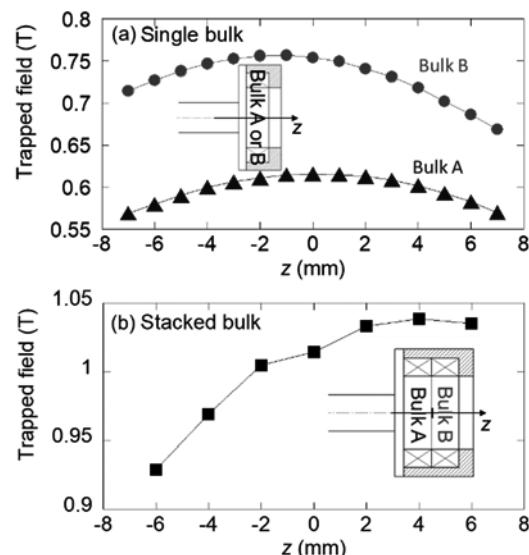


Fig. 2 Trapped field distribution of the (a) single and (b) stacked MgB<sub>2</sub> ring bulk.

### 参考文献

1. T. Nakamura *et al.*: Concepts Magn. Reson. Part B (Magn. Reson. Eng.), **31B** (2007) 65–70
2. Y. Itoh *et al.*: TEION KOGAKU **52** (2017) 25–32 (in Japanese)
3. T. Naito *et al.*: Supercond. Sci. Technol., **29** (2016) 11500

## Spark plasma sintering 法により作製した $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ 多結晶バルク体における捕捉磁場特性

Trapped magnetic field properties of  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  polycrystalline bulks fabricated by a spark plasma sintering method

仲川 晃平, 内藤 智之(岩手大学)

NAKAGAWA Kohei, NAITO Tomoyuki (Iwate University)

E-mail: kohei@jwate-u.ac.jp

### 1. 序論

2008 年に新たに発見された鉄系超伝導体は、高い臨界磁場  $H_{c2}$  を示すために高磁場応用が期待されている。なかでも  $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$  (Ba122) は、高い超伝導転移温度  $T_c \sim 38 \text{ K}$  を示し、電磁的異方性が小さいことから、多結晶体での活用が検討されている物質である。Ex-situ powder-in-tube (PIT) 法により作製される Ba122 線材は、当初低い臨界電流密度  $J_c$  しか得られなかったが、hot isostatic pressing (HIP) 法により高密度化することで、現在では 4.2 K, 10 Tにおいて実用化レベルである  $J_c \sim 10^5 \text{ A/cm}^2$  が得られている [1]。また、最近 Weiss らが HIP 法にて作製した多結晶 Ba122 バルクは、5 Kにおいて 1 T の捕捉磁場を達成するなど、強力磁石応用に向けた研究も行われている [2]。この時の  $J_c$  は 4.2 K, 10 Tにおいて  $10^4 \text{ A/cm}^2$  であり、線材の  $J_c$  に近づけることで、捕捉磁場のさらなる向上が期待できる。その一方、高  $J_c$  が得られる多結晶  $\text{MgB}_2$  バルクは、HIP 法に並び spark plasma sintering (SPS) 法での作製が多く報告されている [3]。しかしながら、Ba122 バルク作製への適用例はほとんど知られていない。

そこで、本研究では固相反応法により作製した前駆体  $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$  粉末試料を用いて、SPS 焼結による高密度多結晶バルク体を作製し、超伝導特性並びに捕捉磁場の測定を行った。

### 2. 実験方法

前駆体である  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  粉末は 2 段階の固相反応法によって作製した。原料として、Ba(99.9 %, Flekes)、K(99.5 %, Ingot)、Fe(99.9 %, Powder)、As(99.999%, Powder)を組成比に合わせ混合し、Ar ガスで満たしたグローブボックス内でステンレス管に封入した。K と As は熱処理中の蒸発により不足する恐れがあるため、10%多く仕込んだ。このステンレス管をまず 800°C、12 h で焼成し、取り出した試料を再度粉碎してステンレス管に封入して、900°C、24 h で焼成した。得られた前駆体 Ba122 粉末は、40 MPa の圧力下で 800°C、10 min の SPS 焼結を行い、直径 10 mm の焼結バルク体を作製した。

相の同定と構造解析のため、Cu K $\alpha$  線源を用いた粉末 X 線回折を行った。また、磁化率測定には SQUID 磁束計を用いた。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に、SPS 前後の Ba122 試料の XRD 結果を示す。いずれの場合も単相を得られた。そのため、SPS 焼結による試料の分解は起きていないと考えられる。また、SPS 焼結後のバルクにおける充填率は 93.4%と高い値が得られた。

Fig. 2 に SPS 前後の Ba122 試料における磁化率の温度依存性を示す。前駆体である Ba122 粉末の  $T_c$  は 35.4 K であった。単結晶などの最大  $T_c \sim 38 \text{ K}$  と比べ低い結果となったのは、K の置換量が仕込み組成からはずれたためだと考察できる。一方、SPS 焼結後の Ba122 バルクにおける  $T_c$  は前駆体から変わらなかった。Ba122 の  $T_c$  は K 置換量によって変化するため、K は蒸発していないと考えられる。また、前駆体と比べ、反磁性シグナルの大幅な向上がみられた。これは、試料の高密度

化による超伝導体積分率の向上が原因だと推察できる。これらの結果から、HIP 法ではなく SPS 法を用いることでも、高密度な多結晶 Ba122 バルクを作製できることが明らかとなった。

講演では直径 10 mm の場合と同様の SPS 条件で作製した直径 20 mm の多結晶 Ba122 バルク体について、超伝導特性と捕捉磁場について議論する。

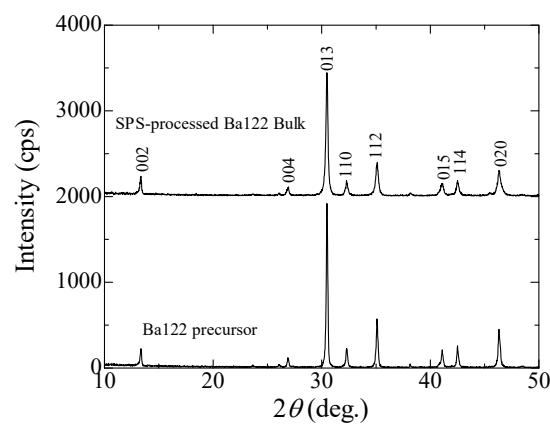


Fig. 1. The powder x-ray diffraction patterns of the  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  precursor and the SPS-processed  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  bulk.

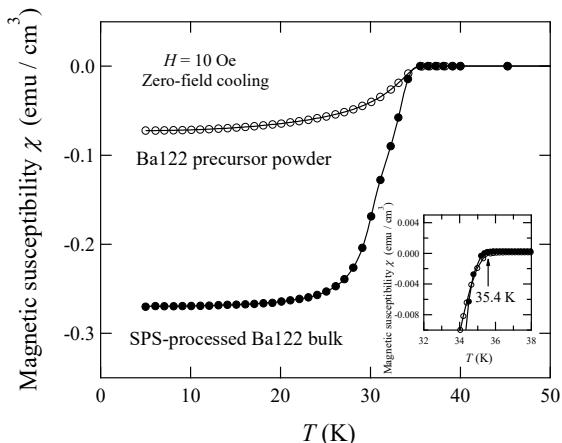


Fig. 2. Temperature dependence of the magnetic susceptibility  $\chi$  of the  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  precursor and the SPS-processed  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  bulk.

### 参考文献

- Z. Gao, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 30 (2017) p.095012
- J. D. Weiss, et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 28 (2015) p.112001
- S. Y. Lee, et al.: J. Am. Ceram. Soc. Vol. 86 (2003) p.1800

## 放電プラズマ焼結法による K ドープ Ba122 多結晶バルクの合成

Synthesis of K-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  polycrystalline bulks by spark plasma sintering

徳田 進之介, 藤井 陸太(東京農工大); 嶋田 雄介(東北大); 波多 聰(九大); 山本 明保(東京農工大)  
TOKUTA Shinnosuke, FUJII Rikuta (TUAT); SHIMADA Yusuke (Tohoku Univ.); HATA Satoshi (Kyushu Univ.);  
YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)  
E-mail: s195941r@st.go.tuat.ac.jp

### 1. はじめに

鉄系超伝導体[1]の一種である  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ (Ba122)は、 $T_c$  と  $H_{c2}$  が高く、強力磁石等への応用が期待される。Ba122 多結晶試料全体を流れる臨界電流は組織欠陥や粒界等により制限されることが知られており[2]、応用に向けては相純度と焼結密度の向上が重要である。放電プラズマ焼結法(SPS: Spark Plasma Sintering)は、パルス電流を利用した加圧焼結法の一種であり、短時間・低温焼結が可能という特徴を持つ。本研究では、放電プラズマ焼結法により、直径 10 mm、厚み約 1.3 mm の円盤型 K ドープ Ba122 多結晶バルクを合成した。焼結温度と焼結時間を制御し、焼結密度、相純度、微細組織、超伝導特性を評価した。

### 2. 実験方法

不活性雰囲気のグローブボックス内で、 $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  の割合で単体金属を秤量し、ボールミル混合[3]することで K ドープ Ba122 前駆体粉末を作製した。前駆体粉末を径 10 mm のグラファイトダイ・パンチに詰め、50 MPa の一軸圧力下において、+50°C/min の速度で 500-900°Cまで昇温し、5 min または 30 min 保持した後、室温まで冷却した。密度測定、XRDによる構成相および構造特性評価、SEM による微細組織観察、SQUID VSM による磁化測定、PPMS による電気抵抗率測定を行った。

### 3. 結果・考察

XRD より、作製した全ての試料が Ba122 を主相としていることがわかった。また、5 min 保持した場合は 600°C以上、30 min 保持した場合は 550°C以上の焼結温度でほぼ単相の Ba122 が得られた。焼結密度は焼結温度の増加とともに向上し、550°C以上で理論密度の 90%以上の高密度バルクが得られた。また、700°C以上では焼結密度は約 98%まで增加了。Fig. 1 に電気抵抗率の温度依存性を示す。全ての試料が超伝導転移を示し、ゼロ抵抗に達した。 $T_c$  は焼結温度の増加とともに増加し、700°C以上で最適ドープされた単結晶とほぼ同じ値が得られた。Fig. 2 に  $J_c$  の磁場依存性を示す。self-field  $J_c$  は、5 min 保持した場合は 600°C、30 min 保持した場合は 550°Cで最大となり、 $1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  を上回った。

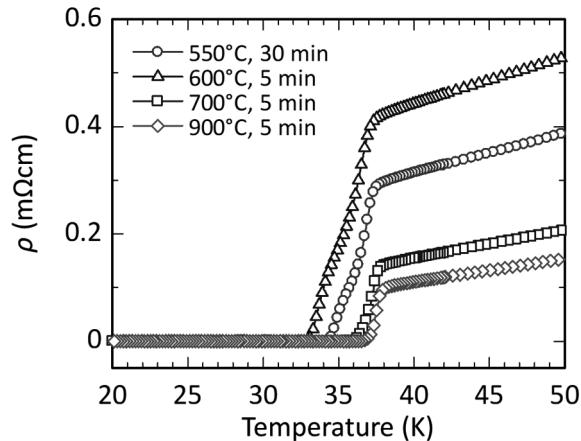


Fig. 1 Temperature dependence of the electrical resistivity

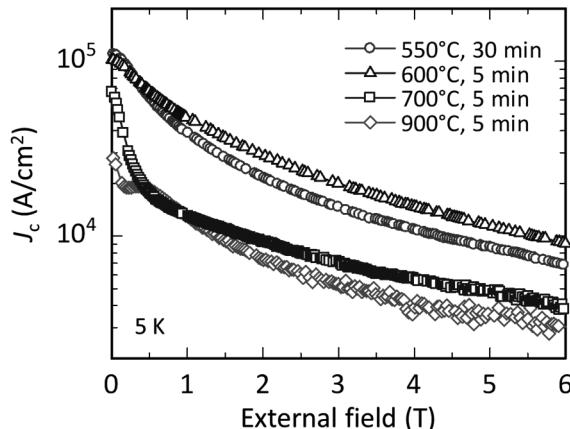


Fig. 2 Magnetic field dependence of the critical current density at 5 K calculated from the magnetization hysteresis loop using the Bean model

### 謝辞

本研究はJST-CREST、JSPS科研費、文部科学省元素戦略プロジェクトの支援を受けて行ったものである。

### 参考文献

1. H. Hosono, et al.: Mat. Today, Vol. 21 (2013) 278
2. A. Yamamoto, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21 (2008) 095008
3. S. Tokuta and A. Yamamoto: APL Mater., Vol. 7 (2019) 111107

## Nb 及び Nb-Sn 化合物を前駆体とした Nb<sub>3</sub>Sn バルク超伝導体の作製と 磁束ピン止め特性

Fabrication and vortex pinning properties of Nb<sub>3</sub>Sn superconducting bulks using the precursors consisting of Nb and Nb-Sn compound

天瀬 洋太, 内藤 智之 (岩手大); 菊池 章弘 (NIMS)  
AMASE Kota, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.); KIKUCHI Akihiro (NIMS)  
E-mail: g0319010@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材は 10 T を超える超伝導マグネットに応用されている。一方、Nb<sub>3</sub>Sn テープ線材を螺旋状シリンダー形状としたもので 4.2 Kにおいて 2.24 T の捕捉磁場が報告されている[1]。Nb<sub>3</sub>Sn は 10 Kにおいて約 15 T の比較的高い上部臨界磁場を持つため、10 Kでのバルク磁石としての高いポテンシャルを持っているといえる。我々はホットプレス法により作製したバルク体を用いて 11 Kにおいて 1.15 T の捕捉磁場を得た[2]。しかしながら、小片試料を用いて測定した臨界電流密度  $J_c$  は線材と比較して 1 衍低いため  $J_c$  の向上により捕捉磁場の向上が期待される。Nb<sub>3</sub>Sn の主なピン止め点は結晶粒界であるため、低温焼結によって結晶粒を微細化することによって  $J_c$  向上する可能性がある。本研究では Nb 及び Nb-Sn 化合物を前駆体としたバルク体を作製し超伝導特性を評価した。

### 2. 実験方法

原料粉末には Nb 粉末（純度 99.9%、粒径 43  $\mu\text{m}$  以下）、Sn 粉末（純度 99.9%、粒径 38  $\mu\text{m}$  以下）を用いた。本研究では 2 つの方法で Nb<sub>3</sub>Sn バルク体を作製した。1 つは Nb と Sn を 3 : 1 の化学量論比に基づき秤量、混合した後、一軸プレスでペレット状とした前駆体に対して真空中で 800°C × 100 時間の熱処理を行った。以降これを one-step と呼ぶ。2 つはまず始めに前駆体として Nb<sub>2</sub>Sn を Nb と Sn を 1 : 2 で秤量、混合した後真空中で 800°C × 50 時間の熱処理をして作製した。その後、前駆体 Nb<sub>2</sub>Sn と Nb を 1 : 5 で秤量、混合した後に上記と同じ一軸プレスを行い、ペレット状とした後、真空中で 800°C × 100 時間の熱処理を行った。以降この方法を two-step と呼ぶ。作製した Nb<sub>3</sub>Sn バルク体は X 線回折(XRD)によって結晶相を同定し、SQUID 磁束計による磁化測定から超伝導特性を評価した。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に one-step と two-step で作製した Nb<sub>3</sub>Sn バルク体の XRD パターンを示す。どちらの XRD パターンからも目的の Nb<sub>3</sub>Sn 以外に未反応の Nb と中間化合物の Nb<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> が確認された。生成温度(~930°C)以下においても Nb<sub>3</sub>Sn 相の生成することが分かった。しかし、未反応の Nb と多量の中間化合物 Nb<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> の存在は、100 時間の保持時間では単一の Nb<sub>3</sub>Sn 相の生成には不十分であったと言える。

Fig. 2 に one-step と two-step の磁化の温度依存性を示す。それぞれ超伝導転移温度は one-step が 17.8 K、two-step が 17.7 K であった。これは一般的に得られている Nb<sub>3</sub>Sn の  $T_c$  が 18 K であるのに対して同等の値であった。磁化率の大きさは two-step が one-step よりも大きいため Nb<sub>3</sub>Sn の分率が多いことが言える。これは、Nb と Sn の拡散反応が前駆体を使用したことにより短縮したため Nb<sub>3</sub>Sn 相の生成が早いことが言える。

講演では臨界電流密度  $J_c$  と捕捉磁場特性、微細組織について報告し、バルク磁石としての可能性について議論する予定である。

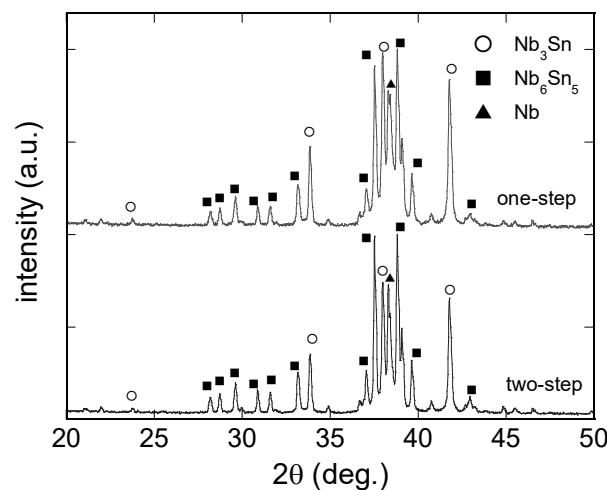


Fig. 1 XRD patterns of the one-step and two-step Nb<sub>3</sub>Sn bulks

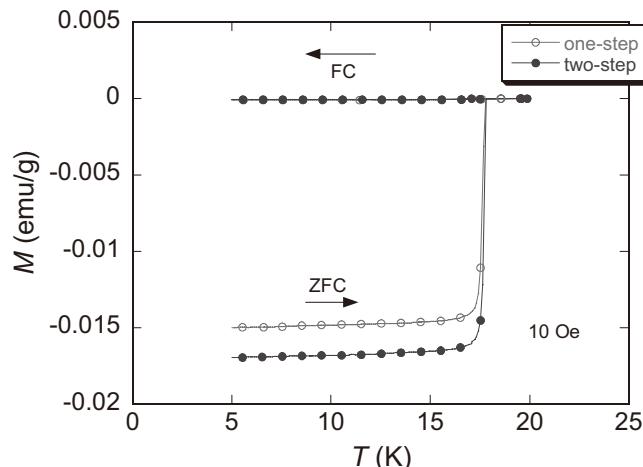


Fig. 2 Temperature dependence of the magnetization after ZFC and FC for the one-step and two-step Nb<sub>3</sub>Sn bulks

### 参考文献

1. M. Rabinowitz *et al.*: Appl. Phys. Lett. 30, 607 (1977)
2. K. Amase *et al.*: Abstract of ACASC/ICMC/CSSJ Joint Conference, 8P-07 (2020)

# 磁場配向による高度 *c* 軸配向 Bi2223 多結晶材料の開発

## Development of highly *c*-axis oriented Bi2223 polycrystalline materials through magnetic grain alignment process

岩見 壮徒（青学大）；武田 泰明（東大）；元木 貴則，下山 淳一（青学大）  
IWAMI Taketo (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (The Univ. of Tokyo);  
MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)  
E-mail: c5619040@aoyama.jp

### 1. はじめに

これまで我々は(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>[Bi2223]多結晶材料における臨界電流特性の改善に向けた粒間結合強化手法を提案してきた[1]。最近では理想的な高密度かつ高度 *c* 軸配向組織の形成が可能な厚膜材料に注目しており、~1 GPa の中間一軸プレスを加えることで Bi2223 厚膜試料が 20 K において~40 kAcm<sup>-2</sup> という高い *J<sub>c</sub>* を記録したことを報告した[2]。最近は永久磁石を用いた簡便な磁場配向法に注目しており、試料全体にわたり高度 *c* 軸配向組織を形成することで、より厚みのあるバルク試料において高い *J<sub>c</sub>* の実現を期待している。前回は新手法として開発した低温磁場配向を中心に、0.22 T の弱磁場で作製した試料においても試料内部まで高度 *c* 軸配向組織の形成に成功したことを報告したが[3]、高压プレス、熱処理後の *J<sub>c</sub>* は 20 K において~13 kAcm<sup>-2</sup> とやや低い値にとどまっていた。

以上の背景のもと、本研究では高密度高度 *c* 軸配向 Bi2223 多結晶材料の開発を目的とし、低温磁場配向法により作製した *c* 軸配向試料に対して、熱処理条件を中心に作製条件の最適化を試みた。

### 2. 実験方法

原料にはティーアイーピー社製の仮焼 Bi2223 粉末(Bi:Pb = 1.7:0.45, 1.6:0.45)を用い、所定量のエタノールとボールミルにより 40 時間混合することによりスラリーを調製した。磁場配向は液体窒素で凍らせたスラリーを、表面磁場 0.22 T のネオジム磁石上に置き徐々に温度を上げることにより行った。乾燥後の試料を 3%O<sub>2</sub>/Ar 気流中で焼成し、Ag 箔で包み一軸プレス・焼成を繰り返した。プレス圧力は 100-200 Pa、さらに~2 GPa までの高压プレスを段階的に行なった。P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 500 Pa 下での金属組成制御を目的とした還元ポストアニールを施した後に、酸素気流中 300°C でのアニールによりキャリアの弱いオーバードープ状態になるように酸素量を制御した。試料の微細組織は SEM により観察し、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いプレス面に垂直に印加した磁場下での磁化測定により評価した。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に作製した Bi2223 試料の磁化率の温度依存性を示す。いずれの試料も合計 4 回の一軸プレスを加えており、緻密化と良好な粒間結合を反映したシャープな超伝導転移を示した。Fig. 2 に作製した試料の残留磁化法により測定した *J<sub>c</sub>* の温度依存性を示す。Pb 濃度の高い組成で作製した試料は、Pb 濃度の低い組成の試料に比べて高い *J<sub>c</sub>* を示し、20 K で~33 kAcm<sup>-2</sup> に達した。当時は焼成条件を変えて作製した試料の物性についても報告する。

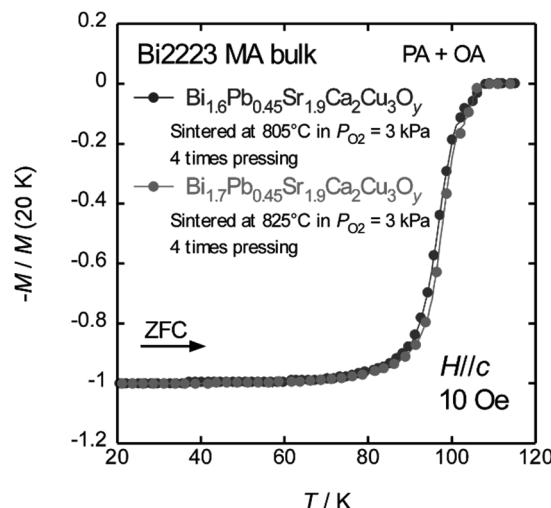


Fig. 1 Temperature dependence of normalized ZFC magnetization for Bi2223 bulks synthesized from different nominal compositions.

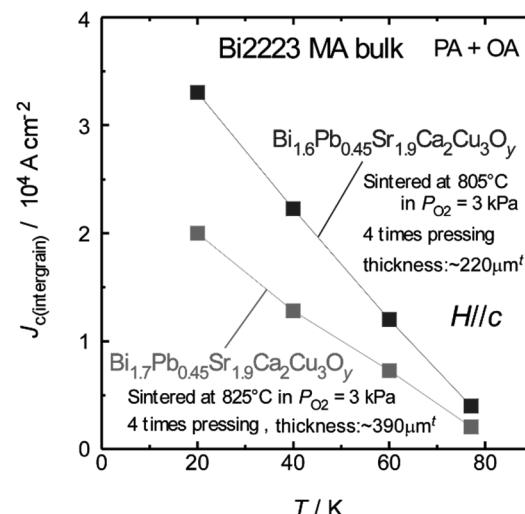


Fig. 2 Temperature dependence of *J<sub>c</sub>(intergrain)* for Bi2223 bulks with different nominal compositions.

### 参考文献

- [1] Y. Takeda, et al., *Physica C* **534** (2017) 9-12.
- [2] Y. Takeda et al., *Supercond. Sci. Technol.* **31** (2018) 074002.
- [3] T. Iwami et al., *abstract of 10<sup>th</sup> ACASC-2<sup>nd</sup> Asian ICMC-CSSJ* (2020) 11.