

# RTAl(R=Gd,Dy,Ho,Er;T=Ni,Cu)の磁気熱量効果の研究

## Study of the magnetocaloric effect for RTAl (R=Gd,Dy,Ho,Er;T=Ni,Cu)

竹下 実里, 村山 大樹, 裏 雄太郎, 阿部 聡, 松本 宏一 (金沢大)

TAKESHITA Misato, MURAYAMA Daiki, URA Yutaro, ABE Satoshi, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa Univ)

E-mail: misatot@stu.kanazawa-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍に用いる磁性材料を研究している。磁気熱量効果は磁性体の転移点近傍で大きくなる。そのため、冷凍機の運転には、その温度領域に適した磁性体が必要となる。我々はこれまでに 20～110K の温度領域において  $RT_2$ (R=希土類;T=Al,Ni,Co)系金属化合物を磁気冷凍用磁性材料として研究を行ってきた[1]。また室温付近までの磁気冷凍用磁性材料として  $La(Fe_{0.88}Si_{0.12})_{13}$  系化合物のエントロピー評価も行い、異なる温度でいくつかの相転移を起こす物質によって、エントロピー変化を制御することを着想してきた[2]。本研究では新たに高温領域で強磁性転移し、さらに低温領域で反強磁性転移を伴う[3][4]RTAl (R=Gd,Dy,Ho,Er;T=Ni,Cu)の転移点や磁気熱量効果を磁化と比熱測定から研究した結果について報告する。

### 2. 実験方法

本研究では、アークメルト法で作製した GdNiAl, DyNiAl, GdCuAl, DyCuAl を粉砕したもの、メルトスパン法で作製した HoNiAl, ErNiAl を箔状にしたものをサンプル(2～7mg)として用いた。Fig.1 に箔状サンプル ErNiAl(左図)、粉砕したサンプル GdNiAl(右図)を示す。物性測定では Quantum Design 社の MPMS(磁気特性測定システム)を用いて 5T までの磁場中磁化測定を行った。その結果から、Maxwell の関係式を用いてエントロピー変化を導出し、磁性体としての性能を評価した。また、Quantum Design 社の PPMS(物理的特性測定システム)を用いて緩和法による 0～5T での磁場中比熱測定を行った。比熱から、磁性体の転移温度とエントロピーを求めた。



Fig.1 left:ErNiAl foil right:GdNiAl particles

### 3. 実験結果

RNiAl(R=Gd,Dy,Ho,Er)の 0.4T 磁場中での磁化の温度依存性を Fig.2 に示す。GdNiAl, DyNiAl, HoNiAl は高温領域で常磁性から強磁性に二次相転移している。転移温度はそれぞれ、GdNiAl:62K, DyNiAl:26K, HoNiAl:13K である。DyNiAl, HoNiAl, ErNiAl は低温領域で反強磁性に相転移すると報告されており[3][4]、我々の観測した転移温度はそれぞれ DyNiAl:18K, HoNiAl:4K, ErNiAl:6K であった。この値は先行研究とほぼ同等である。

これらの磁化から導出した 3T でのエントロピー変化  $\Delta S$  の温度依存性を Fig.3 に示す。どのサンプルも転移点付近でエントロピー変化は最大値をとる。また DyNiAl, DyCuAl は反強磁性転移の効果が大いため最低温度付近でエントロピー変化の符号が逆転し、正の値となった。DyNiAl と DyCuAl を比較すると、エントロピー変化の大きな温度域は類似していた。

常磁性-強磁性を二次相転移する物質の多くが、山型のエントロピー変化を示すが、GdNiAl はこれとは大きく異なっている。このテーブル状のエントロピー変化は Gd を含む物質で顕著であった。また GdNiAl, GdCuAl ではエントロピー変化の大きな温度範囲は類似していた。

講演では、測定結果の詳細について報告する。

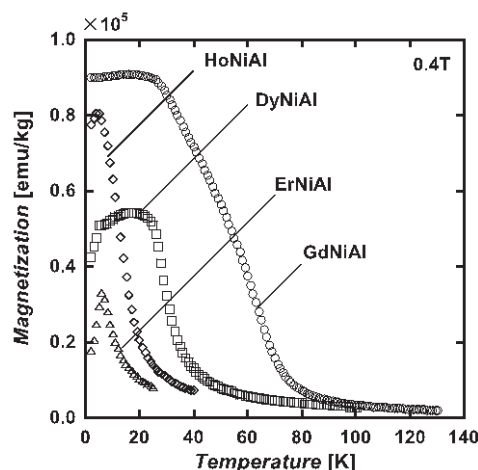


Fig.2 Magnetization of RNiAl(R=Gd,Dy,Ho,Er) at 0.4T

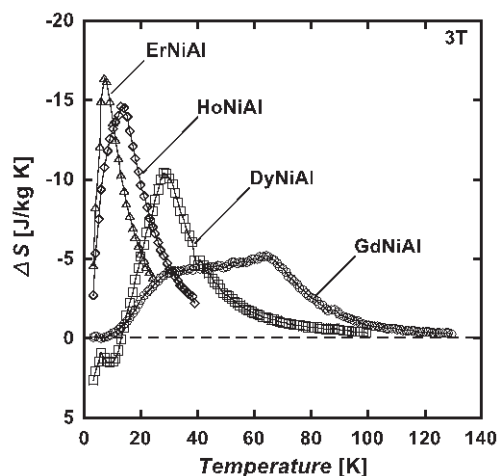


Fig.3 Entropy change of RNiAl(R=Gd,Dy,Ho,Er) at 3T

### 参考文献

1. Y.Nishimura, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) p.49
2. K.Yamada, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.85 (2011) p.213
3. Niraj K.singh, et al. :Journal of applied physics 99 (2006) 08K904
4. B.J.Korte, et al. :Journal of applied physics 84 (1998) 5677-5685

## センサー冷却用連続型断熱消磁冷凍機の駆動特性

### Drive characteristics of Continuous ADR system for sensor cooling

植田 隼治 (NIMS,千葉大); 沼澤 健則 (NIMS); 福田英史 (NIMS,千葉大); 新井 亮祐 (NIMS,千葉大);  
中込 秀樹 (千葉大); 李 晶 (三菱重工)

UEDA Shunji (NIMS, Chiba Univ.); NUMAZAWA Takenori (NIMS); FUKUDA Hidehito (NIMS, Chiba Univ.);  
ARAI Ryosuke (NIMS, Chiba Univ.); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); Jing Li (Chiba Univ.)

E-mail: s-ueda@chiba-u.jp

#### 1. はじめに

X線天文学の分野において、宇宙背景放射の偏光測定に使用する TES 型 X線マイクロカロリメータを 100mK まで冷却することが求められている。そこで我々は、連続冷凍が可能な連続作動型断熱消磁冷凍機 (Continuous ADR) [1] の開発を行っている (Fig.1)。これまでに、パワーリードに高温超伝導線材である REBCO 線材を使用する事による CADR クライオスタットへの熱侵入の影響を評価してきた。

本報告では、CADR の stage 4 及び stage 3 の駆動試験を行ったので、その結果について報告する。

#### 2. 試験方法

CADR の stage 4 及び stage 3 はそれぞれ 4.2K Baseplate 上に設置している。なお、stage 4, stage 3 の超伝導マグネットには、0.1mm の極細 NbTi 超伝導線を使用しており、発生させることができる磁場は stage 4 が 1.33[T/A]、stage 3 が 0.4[T/A] である。また、stage 4 の磁性体には GLF (=GdLiF<sub>4</sub>) を 66g、stage 3 には CPA を 98g 使用している。本装置では、4.2K Baseplate ~ stage 4, stage 4 ~ stage 3 に、熱スイッチを搭載している。熱スイッチには Passive 型 Gas-gap 熱スイッチ (PGGHS) を使用しており、一定の温度で ON/OFF が切り替わる。熱スイッチの仕様を Table.1 に示す。

今回の試験の手順を以下に示す。

- ① stage 4, stage 3 を同時に励磁
- ② stage 4 の励磁が終了した後、stage 4 のみ消磁
- ③ stage 4 の消磁が終了した後、stage 3 消磁

なお、励磁の過程での電流値は、stage 4 に 3A、stage 3 に 3.3A とした。

#### 3. 結果と考察

手順①の励磁過程では、磁性体の温度が 5.34K まで上昇し、手順②の stage 4 の消磁過程で 1.64K まで減少した。このとき 4.2K Baseplate ~ stage 4 間の熱スイッチが OFF となり、4.2K Baseplate への熱移動がなくなる。手順③では、stage 3 は消磁により 0.69K まで温度が減少し、その後すぐに 1.47K まで温度が上昇している。

この結果により明らかになったことは、stage 4 ~ stage 3 間の PGGHS が正常に作動していないということである。PGGHS は、容器内に封入した熱交換ガス (3He) の圧力を、磁性体の温度変化のみで制御して ON/OFF 状態を作り出している。PGGHS の圧力は、容器内に固定した吸着材によるガスの吸着・放出によって変化する。今回、吸着剤によるガスの吸着が正常に行えていないことが原因として考えられる。PGGHS が OFF にならなければ次のサイクルを行うことができないため、問題は深刻である。

#### 4. まとめ

今回、CADR の stage 4 と stage 3 の駆動試験を行った。駆動試験を行うことで明らかになったことは、stage 4 ~ stage 3

間の PGGHS が正常に作動しないということである。

今後は、PGGHS 内の吸着剤によるガスの吸着・放出に着目し、改善を図る予定である。

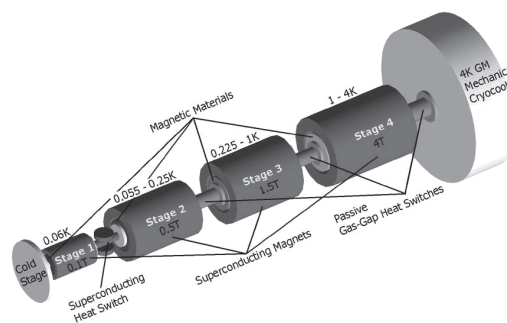


Fig.1 Conceptual design of the CADR

Table.1 Properties of the heat switch

Stage	Heat switch	Switching temperature	Mass
3-4	PGGHS	1.0K	280kg
4-BP	PGGHS	3.8K	N/A (integrated in stage4)

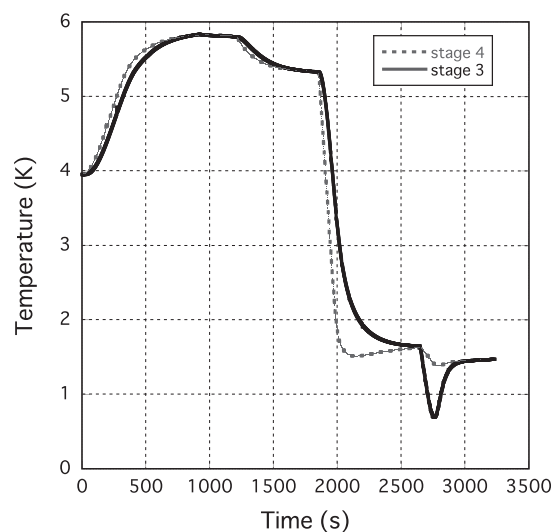


Fig.2 Temperature change of the 2-stage CADR system

#### 参考文献

- [1] P. Shirron et al., "A compact, high-performance continuous magnetic refrigerator for space missions", Cryogenics 41 (2002) 789-795

# J-PARC 低温水素システムにおける高耐圧性を有する分割型アキュムレータの開発

## Development of a splittable accumulator with pressure-tolerance for the cryogenic hydrogen system at J-PARC.

大都 起一, 達本 衡輝, 麻生 智一, 小守 慎司, 川上 善彦(原子力機構)  
 OHTSU Kiichi, TATSUMOTO Hideki, TOMOKAZU Aso, SHINJI Komori, YOSHIIHIKO Kawakami (JAEA)  
 E-mail: ohtsu.kiichi@jaea.go.jp

### 1. はじめに

J-PARC パルス中性子源用低温水素システムは、3 GeVに加速された陽子（繰り返し25Hz、定格出力1MW）が水銀ターゲットに入射した際に発生する高速中性子を超臨界圧の極低温水素（1.5 MPa, 20K 以下）により中性子散乱実験に適した熱・冷中性子に冷却（減速）するための強制冷却方式の冷凍システムである。1MWの陽子ビームの入射時には、3.8 kWの急峻な熱負荷が非圧縮性の超臨界水素の閉ループに与えられる。この過渡的な熱負荷変動に伴う圧力上昇を100 kPa以下に抑えるために、ヒータによる熱補償制御とベローズ構造を有するアキュムレータによる容積変動制御を併用した圧力制御機構を導入している。2010年に1号機アキュムレータで溶接ベローズの溶融不足によりリークが発生した。そのため、既存の確立した溶接技術を採用するため、ベローズプレート厚さを薄くし、ベローズ径を500mmから330mmに小さくして、暫定的に2号機アキュムレータを製作した。ベローズ部の耐圧性能（0.96MPa）は、設計圧力（2.0MPa）に比べて低くなり、さらに、伸縮時に大きなヒステリシスによる設計寿命の低下が懸念された。2014年10月以降の陽子ビームの高出力化に向けて、高耐圧・長寿命を有する3号機アキュムレータを開発した。

### 2. 3号機アキュムレータの開発

Fig.1に3号機アキュムレータの概要図を示す。アキュムレータとは、溶接ベローズ構造を利用した容積可変容器を非圧縮性の性質を有する超臨界水素ループに内包したものである。この溶接ベローズ内には、ヘリウムガスを封じ込め、水素ループの圧力が上昇するとヘリウムガスの圧縮性によりベローズが縮むため、水素ループの容積が膨張し、その結果、圧力上昇が自発的に抑えられる。この高圧・極低温環境下に設置した溶接ベローズ(φ330mm)の変位を間接的に計測するために、成型ベローズ(φ59 mm、ばね定数14.5 N/mm)を真空層内に設置し、溶接ベローズと成型ベローズを長さ約2200 mmの固定シャフトで連結している。成型ベローズの上端の変位をレーザ変位計で測定する。

アキュムレータの構造と大きさは、基本的に2号機アキュムレータと同等とした。2.0 MPaの耐圧性能を得るために、溶接ベローズのプレート厚みを0.4mmから0.8mmに増加させた。しかし、プレートが厚くなると、ばね定数が増加するため、ベローズ変動時の駆動圧力差が大きくなる。1 MWの陽子ビーム入射時の超臨界水素の圧力変動を60 kPa以下に抑制するために、溶接ベローズのばね定数の設計値を80 N/mm以下と決めた。また、大口径の厚肉ベローズプレートの溶接で、均一な溶融面積を得るための溶接技術を確立した。溶接ベローズ(17山)単体を試作し、設計圧力2 MPaの繰り返し圧力を与えた場合の寿命試験を行った。設計値(1万回)以上の寿命(14,000 cycles)を有することを確認でき[1]、アキュ

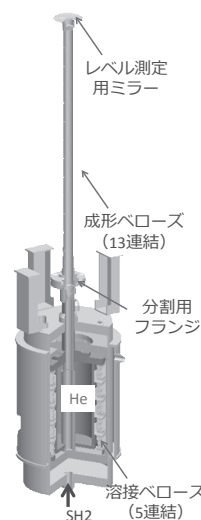


Fig.1 Schematic of third accumulator

ムレータ用溶接ベローズ製作の見通しを得ることができた。Fig.2に、5連結した溶接ベローズの伸縮動作試験結果を示す。設計許容値以下の61.6 N/mmであることを確認できた。

2号機の伸縮時の大きなヒステリシスは、ベローズの伸縮時に溶接ベローズ内側に設置した芯ずれ防止用ガイドパイプに接触することが原因であった。そこで、アキュムレータ組立時には、水平精度を1度以下に抑え込むことにより、Fig.2に示すように、伸縮時のヒステリシスがほとんど生じないように改良できた。

さらに、Fig.1に示すように、溶接ベローズと成形ベローズ部を分割できる構造を採用し、狭い真空断熱容器内での設置作業性を平易化し、交換に要する作業期間を従来（1号機から2号機に交換した場合）に比べて半分以下（2週間）に短縮できた。

Fig.3に300 kW以下の陽子ビーム入射時における超臨界水素ループの圧力変動特性試験結果を示す。各ビーム出力時における圧力変動は、ビーム出力と比例し、予測値と良く一致することを確認した。解析結果から1 MWビーム入射時の圧力変動は60 kPaと予測でき、設計どおりの性能を有することを確認できた。

### 参考文献

- [1] H. Tatsumoto, et al.: ICEC25 Tue-Af-P1.1-7 (2014)

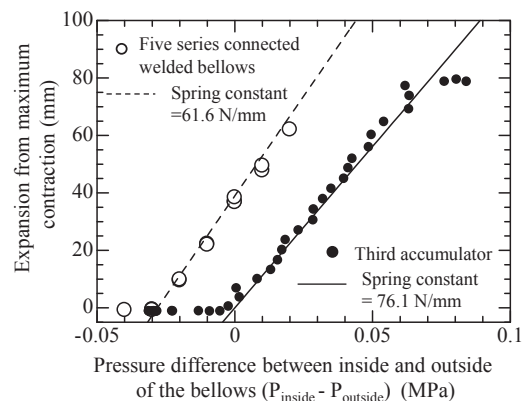


Fig. 2 Displacement for expansion and contraction of five series connected welded bellows and the assembled third accumulator.

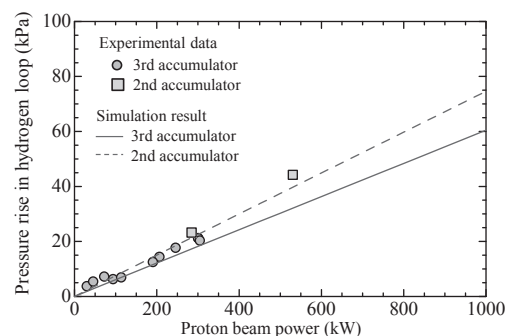


Fig.3 Effect of the proton beam power on the pressure rise.

## 軸シールレス小型遠心ポンプの開発 Development of Shaft Sealless Compact Centrifugal Pump

高橋 貞充, 梅津 淳一, 城地 勇人, 河原 伸哉 (エア・ウォーター総合開発研究所)  
TAKAHASHI Sadamitsu, UMETSU Junichi, JOUCHI Taketo, KAWAHARA Shinya (AIR WATER R&D)  
E-mail: takahashi-sad@awi.co.jp

### 1. はじめに

低温液化ガス用ポンプは液体酸素、液体窒素、液体アルゴン等の空気分離液化ガスや液体水素、LNG等の燃料用ガスおよび液化炭酸ガスなどの移送・昇圧用として使用されており、工場における製造工程・出荷・移送、輸送用ローリー車・タンカーの積込・積下し、消費設備における移送や昇圧など様々な用途に使用されている。近年の開発傾向としてはシールレスポンプが主流となってきており、我々もこれまでに無漏洩でありながら寿命を大幅に延ばした、軸シールレスの堅型遠心式ポンプ VCP シリーズを開発してきている[1]。しかしこれらのポンプはかなり大型であり、小型のものは国内では殆ど製造されていない。そこで今回、本シリーズのポンプの小型化開発を行ない、液体窒素にて少流量で揚程 130m (差圧約 1MPa) の性能を達成したので、その結果について報告する。

### 2. 構造・仕様

Fig.1にポンプの概略図を、Table.1に仕様を示す。

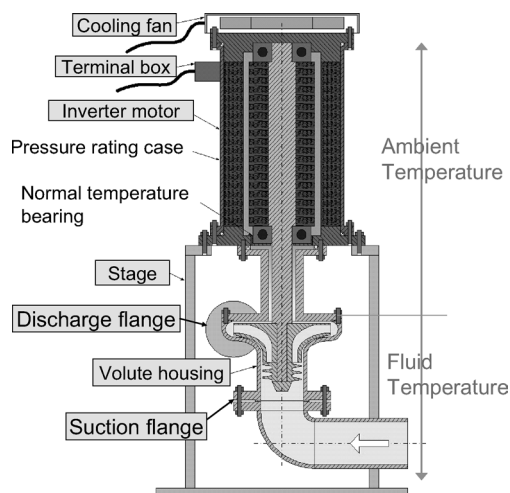


Fig.1 Structure of Shaft Sealless pump

Table.1 Specifications

ポンプ方式	軸シールレス堅型遠心式ポンプ
適用流体	LN <sub>2</sub> 、LAr、LNG 等低温液化ガス流体
吐出量	最大約 4,000L/Hr (約 67L/min)
揚程	最大約 130m (LN <sub>2</sub> にて約 1MPa)
モーター仕様	三相 200V 7.5kW インバータ駆動(最高回転数 8400rpm)
メンテナンスサイクル	約 20,000 時間

### 3. 試験システム

Fig.2 に試験システムの概略フローを示す。ポンプ前後に

それぞれ圧力計と、ポンプ吐出部に流量調整バルブと流量計を設置し、上部に設置した断熱タンクから液体窒素を供給し、予冷後運転を行った。試験はインバータにて回転数を変更し、各回転数でバルブ開度を調整し、流量とポンプ前後の差圧を変更しながら性能データを取得した。

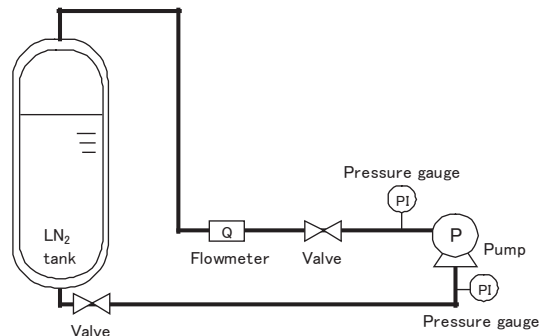


Fig.2 Schematic of experimental system

### 4. 試験結果

Fig.3 に液体窒素での流量・差圧性能曲線を示す。

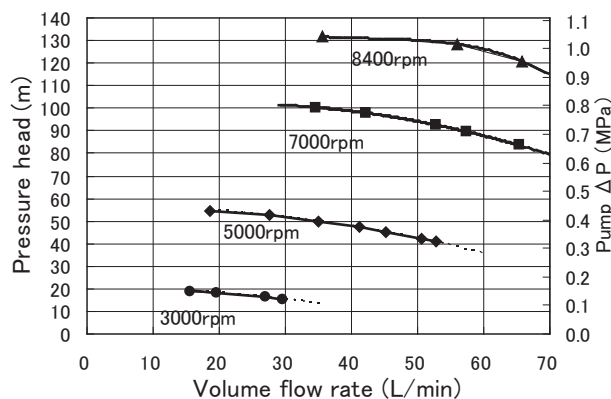


Fig.3 Pump performance curve (LN<sub>2</sub>)

インバータでの回転数制御により、例えば 8400rpm で  $\Delta P = 1\text{MPa}$ 、流量 60L/min、3000rpm で  $\Delta P = 0.15\text{MPa}$ 、15.5L/min の流量まで、幅広く変更が可能であるという結果が得られた。

### 5. まとめ

今回、軸シールレスの堅型遠心式ポンプの小型化開発により、液体窒素にて流量 60L/min・差圧 1MPa と、我々の知る限り国内に無いレベルの少流量高揚程を達成した。本開発により当社従来比 10~20 倍の長寿命化が可能となる。

### 参考文献

- 城地 勇人, 「低温工学・超電導の新展開」関西支部発足 40 周年記念特集(2013) p.153

# 大型クライオプラントのための極低温プロセス実時間シミュレータの開発 - SHe テストループのモデル化とシミュレーション - Development of cryogenic real-time simulator for large scale cryoplants - Modeling and simulation of a SHe test loop -

鷹見 重幸, 大場 恒揮, 岩本 晃史 (NIFS); 前川 龍司 (ITER 機構); 信時 実 (大陽日酸)

TAKAMI Shigeyuki, OBA Koki, IWAMOTO Akifumi (NIFS); MAEKAWA Ryuji (ITER Organization); NOBUTOKI Minoru (TNSC)

E-mail: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

## 1. はじめに

NIFS では大型クライオプラントのプロセス研究やシミュレータによる運転訓練を目的として極低温プロセス実時間シミュレータ (C-PREST) の開発を行っている。これまでに LHD 液化冷凍機のモデル化・シミュレーションを実施し、実機の冷却曲線をほぼ再現できることを示した[1]。その後、被冷却体を含めたクライオプラント全体のモデル化に必要なユニットモデルの開発を続けてきた。今回は、SHe テストループをモデル化し、シミュレーションと実験の比較によって、その開発したユニットの妥当性を評価した結果を報告する。

## 2. SHe テストループ

評価に使用した SHe テストループを Fig.1 に示す。これは ITER に使用される SHe ループと同様の構成である。この実験結果を利用して、開発したユニットモデルの検証を行った。

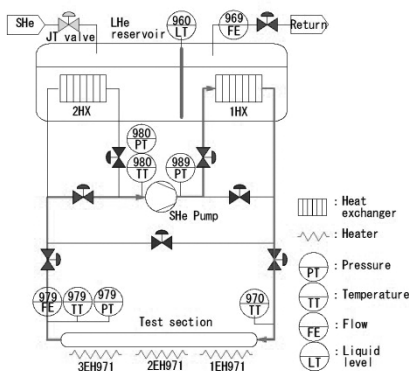


Fig.1 SHe test loop

- SHe ループ  
全長: 180 m  
容積: 0.13 m<sup>3</sup>
- SHe 循環ポンプ  
能力: 1 bar, 50 g/s
- LHe 貯槽: 0.34 m<sup>3</sup>
- テストセクション  
全長: 130 m  
内径: 30 mm  
(SUS 配管)  
約 30 m 長尺ヒータ  
(500W x 3 カ所)

## 3. C-PREST の開発

基本ソフトに Visual Modeler (VM) ver.2.5 (株式会社オメガシミュレーション製) を使用している。このソフトは石油化学プラントのシミュレータ用として開発されたモジュラー型のソフトウェアで、ユニットごとに独立した計算を行うと同時に系内の圧流バランスを計算することで破綻のないシミュレーションを可能にしている。ユーザ側に必要なユニットモデルの開発が可能なのも特徴である。2000 年以降、大陽日酸 (株) との共同研究により、ヘリウムの物性計算に HEPAK を使用できるよう機能追加、クライオプラント特有なユニットモデルの開発を行ってきた。さらに、ITER 機構との業務外部委託事業契約 (Dynamic Simulation of ITER Tokamak System) により、ITER のクライオプラントを対象としたシミュレーションを行っている。

被冷却体を含めた SHe ループ全体をモデル化するために必要なユニットモデル: 浸漬冷却式熱交換器・SHe 循環ポンプ・長尺配管、の開発の詳細を述べる。

### 3-1. 浸漬冷却式熱交換器

VM 標準ユニットの汎用熱交換器とフラッシュドラムを組合せることによりモデル化した (Fig.2)。

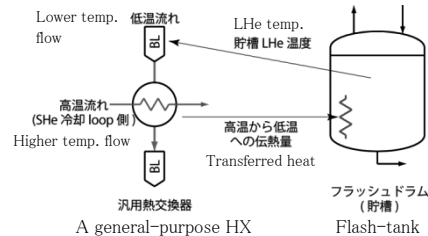


Fig.2 Model of heat exchanger immersed in LHe reservoir

### 3-2. SHe 循環ポンプ

回転数毎に評価されているポンプの性能を無次元化することにより、流量とヘッド圧の関係をポンプの回転数によらない一つの曲線として表すことができる (Fig.3)。一方、効率曲線はポンプの仕様や計測結果から導いている。これらの曲線を使用してポンプの性能を連続的に表現し、SHe ポンプをユニットモジュール化することに成功した。

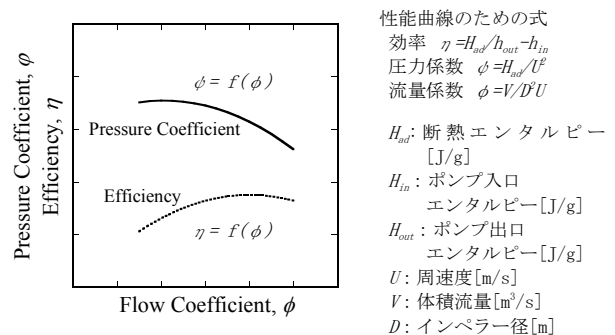


Fig.3 Characteristic curve of a SHe pump

### 3-3. 長尺配管

VM の主たる利用分野である石油化学プラントでは各工程において圧力がほぼ一定に保たれていること等により、VM は、圧力変化を厳密に考慮した配管ユニットを用意していなかった。SHe テストループのような閉鎖した系では熱負荷により圧力が大きく変動するため、等容過程の内部エネルギー変化、 $dH = dU + VdP$  ( $H$ : エンタルピー,  $U$ : 内部エネルギー,  $V$ : 配管容積,  $P$ : 圧力) を考慮できるユニットモデルを開発した。

## 4. シミュレーションの結果

開発したユニットモジュールを用いてシミュレーションを実行した結果、SHe テストループの実験結果をほぼ再現できると同時にシミュレータの実時間性も維持できることが分かった。詳細についてはセッションで報告予定であり、また参考文献 [2] において報告されている。

### 参考文献

1. R. Maekawa, et al.: Cryogenics, Vol. 45 (2005) p.199
2. R. Maekawa, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn, Vol. 49 (2014) p.311

# ASPCS 研究用サーモサイフォン循環液体水素冷却による SMES モデル装置の開発

Development of a small SMES model cooled by liquid hydrogen thermo-siphon flow  
for ASPCS study

太田 成美 (上智大); 榎田 康博, 新富 孝和 (KEK); 濱島 高太郎, 駒込 敏弘(前川); 葛 雅志, 安藤 憲之介, 高尾 智明, 谷貝 剛 (上智大); 津田 理 (東北大); 辻上 博司, 岩城 勝也, 藤川 静一, 仙波 利晃, 広瀬 順之 (岩谷産業); OTA Narumi, MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); HAMAJIMA Takataro, KOMAGOME Toshihiro (MAYEKAWA); KATSURA Masashi, ANDO Kennosuke, TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.), TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); TSUSJIGAMI Hiroshi, IWAKI Katsuya, FUJIKAWA Shizuichi, SENBA Toshiaki, HIROSE Junji (IWATANI Co.)  
E-mail: narumi.ohta@gmail.com

## 1. はじめに

我々の研究チームでは、今後大量導入が予想される自然エネルギー発電の変動補償システムとして、SMES、燃料電池、電気分解装置、液体水素ステーションで構成する先進超電導電力変換システム(ASPCS)を提案してきた[1]。JST の先端的低炭素化技術開発(ALCA)より支援をいただき、小型モデルを製作してその基礎技術の確認とシステムの有効性の実証を行おうとしている。現在基礎技術の1つである「液体水素による超電導磁石の冷却」を行う試験用クライオスタットの製作を進めている。

## 2. 液体水素冷却試験装置(クライオスタット)の設計と製作

可燃性の液体水素を寒剤に使用するため、

- ① 超電導コイルとその電流リードは伝導冷却とした。
- ② センサー類も  $MgB_2$  液体水素液面計[2]を除き、断熱真空側に配置する。
- ③ 電流リードの常温端(大気側)や信号線の大気側は酸素のない窒素雰囲気となるよう気密ジャケットで囲まれる。クライオスタットが設置される防爆室内に敷設される励磁ケーブルや信号配線も同様の構造としている。
- ④ 断熱真空排気は防爆室外で行うか、防爆室外まで排気配管を敷設して一般区域に真空ポンプを設置する。

Fig.1 にクライオスタットの内部構造を示す。その特徴は、

- ① 超電導コイルを冷却する液体水素は貯液槽の底部より上部気相部に至る配管内をサーモサイフォン循環する。
- ② このサーモサイフォン配管より展開した伝導板にコイルからの純アルミ伝導板を接続して伝導冷却路とする。
- ③ 超電導コイルの仕様は BSCCO テープ線材のダブルパンケーキ 8 個より構成され、Fig. 1 の写真に示すように、純アルミ板を各パンケーキ巻表面に貼付けている。SMES 運転による渦電流損を低減するため、純アルミ板にはスリット加工が施されている。

## 3. 超電導コイルの冷却解析(渦電流損失の見積)

BSCCO コイル(諸元 TABLE 1)の各パンケーキに挟まれた伝熱アルミ板に生じる渦電流損失を、有限要素法を用いて見積もった。解析により、コイルに振幅 200 A、周波数 1 Hz の正弦波電流を与えた場合には、アルミ板全体で 70 W の渦電流損失が生じることが分かった。Fig. 2 はその際のコイル中央に位置する Al 板での渦電流損失の分布を示したものである。なお、自然エネルギー源の変動補償周波数は 0.1 Hz 以下であるため、実際の渦電流損失は非常に小さくなる。

## 参考文献

1. T. Hamajima, et al., Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control, IEEE Trans. Appl. Supercond., **22** (2012) 5701704
2. 特願 2008-014998「液体水素用液面センサー及び液体水素用液面計」

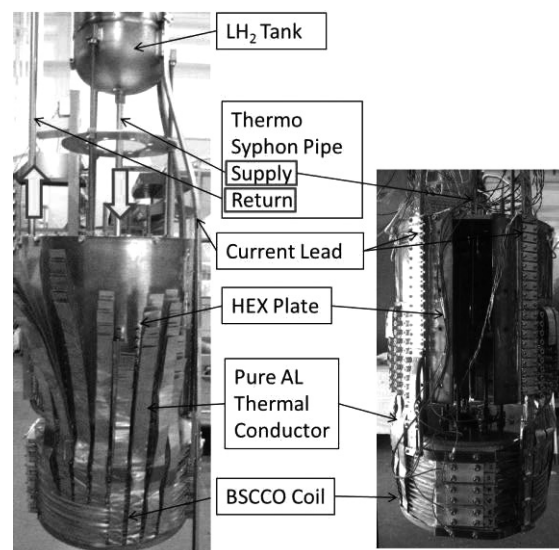


Fig. 1 Layout of the test bench of the  $LH_2$  cooled BSCCO

TABLE 1 Parameters of 10 kJ SMES coil

Coil	Stored energy	10 kJ
	Conductor	Bi
	Max. magnetic flux density	4 T
	Maximum operating current	200 A
	Coil inner diameter	100 mm
	Coil outer diameter	193.8 mm
	Coil height	75.4 mm
	Coil structure	Double pancake
	Number of double pancake	8
	Al plates	Thickness of Al plates
Number of partitions		16/semicircle

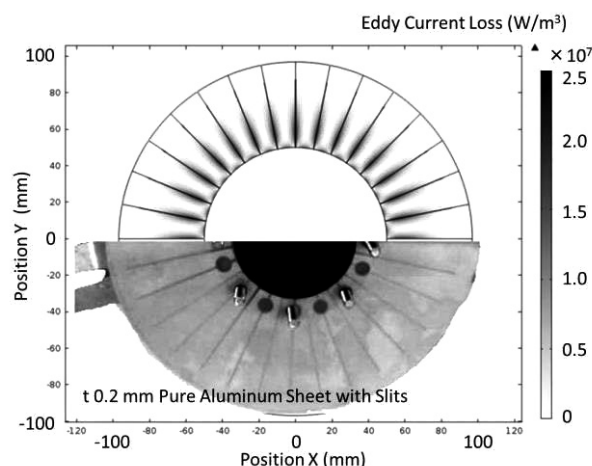


Fig. 2 Top view photograph of the BSCCO pancake with pure aluminum thermal conductor (lower) and a distribution of the eddy current loss at maximum 1Hz operation (upper).

## 200m DC HTS ケーブル装置の冷却試験中に熱サイホンの観測 Thermosiphon effect during cooling test of 200m DC HTS cable facility

イワノフ ユーリ、渡邊 裕文、筑本 知子、浜辺 誠、高野 廣久、孫 建、山口 作太郎 (中部大)  
 IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, HAMABE Makoto, TAKANO Hirohisa, SUN Jian,  
 YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)  
 E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

### 1. Introduction

One of the important components of the ecological stress is the energy mining activities and energy transportation. Transition to renewable energy sources, energy loss reduction, and optimization of delivery systems can improve considerably the ecological situation on the Earth. It is considered that technologies on the basis of effect of superconductivity are the optimal approach to solve this problem. The centenary period of research of superconductivity has come to the end with creation of experimental high temperature superconducting power transmission (HTS PT) lines of several hundred meter class. Projects of HTS PT lines of kilometer class, which will be established in really operating urban networks, are under consideration now. Unfortunately, high cost and complexity of HTS cable cooling systems restrain rapid progress in the field of large-scale application of HTS. Several years ago it was made a proposal to use a thermosiphon effect to keep HTS cable at low temperature. Because a cryogen naturally heats up while flows through the cryogenic channel accumulating heat load, its density changes from point to point. Therefore, if it will be possible to achieve low hydraulic resistance and provide sufficient cryogen level difference a natural circulation will arise. Ideally, HTS PT line may not contain the cryogenic pump. The feasibility of the given approach was confirmed theoretically for various system configurations. Preliminary experiments were carried out also using 200-meter DC HTS facility at Chubu University.

### 2. Experimental

The 200-meter experimental DC HTS cable facility at the Chubu University was built in 2009–2010 in order to develop new technologies to achieve a record cooling length of the HTS cable and minimum cost of the installation.

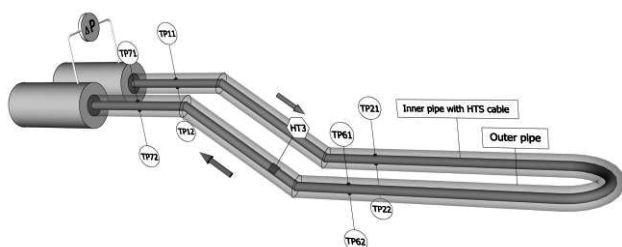


Fig. 1. Sketch of the 200m DC HTS cable facility at the Chubu University. Only terminal units, cryogenic pipes, differential gauge ( $\Delta P$ ), selected thermometers (TP) and one heater (HT3) are shown in the picture. Level difference is 2.6 m.

Level difference together with the low hydraulic resistance caused by using direct smooth pipes creates favorable conditions for observation of the thermosiphon effect. Liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) flows through a narrow space between the HTS cable of the diameter of 35 mm and the inner surface of the cryogenic pipe of the diameter of 57.2 mm. Several pairs of

platinum resistance thermometers located at different positions measured the actual distribution of temperature inside the channel. The overall pressure drop between terminal units was measured by means of the differential gauge. In order to simulate natural heat load and thus vary the density of LN<sub>2</sub>, the system was supplied with three heaters with capacity of up to 350 W, two of which are located at the downstream and upstream sections of the cryogenic pipe. The heater and the sensors used in experiment are shown in Fig. 1. In this experiment, the heater was used as a starter to heat ascending flow of LN<sub>2</sub> before switching off the pump.

### 3. Results

The experiment began at the circulation flow rate of about 11 L/min. After a short-time preheating of LN<sub>2</sub>, cryopump was turned off. Decaying positive oscillations of the flow rate were observed. The steady state at 2 L/min was achieved after about 40 min. The experiment lasted more than 6 hours without trouble, and then the cryopump was started again. The maximum output temperature was 80.3 K. Therefore, the HTS cable temperature remained within operating range.

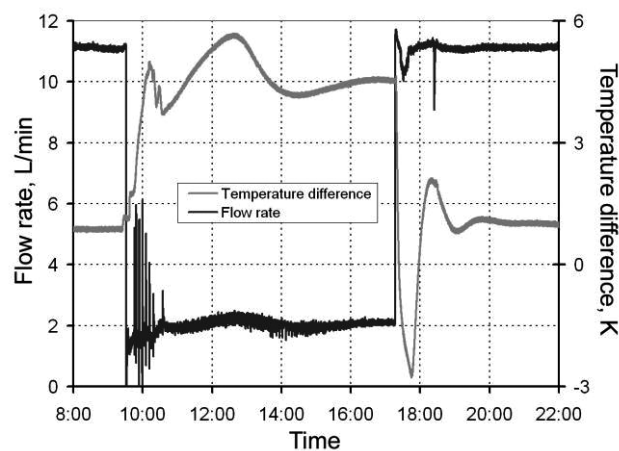


Fig. 2. Time dependences of the flow rate (black line) and temperature difference (gray line) during the experiment.

### 4. Conclusion

The thermosiphon effect arising in the real HTS cable cooling system in the presence of the level difference was observed experimentally. Although the level difference was insignificant (2.6 m), the effect was strong enough to keep HTS cable temperature at an acceptable level.

### References

1. S. Yamaguchi, et al.: Proc. 23 Int. Cryog. Eng. Conf. Int. Cryog. Mater. Conf. 2010. (2011) 1041–1047
2. Y. Ivanov, et al.: Proc. 23 Int. Cryog. Eng. Conf. Int. Cryog. Mater. Conf. 2010. (2011) 1017–1022
3. Y. Ivanov, et al.: Phys. Procedia. Vol. 27 (2012) 368–371

# REBCO 線材の半田接続特性

## Solder joint properties of REBCO coated conductors

藤田 真司, 高嶋 秀行, 大杉 正樹, 大保 雅載, 飯島 康裕(フジクラ)  
 FUJITA Shinji, TAKASHIMA Hideyuki, OSUGI Masaki, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (FUJIKURA);  
 E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

### 1. はじめに

REBCO 線材同士の接続に関して、様々な検討が成されているが、作業が容易で比較的低い接続抵抗が得られることから、一般的に半田付けによる接続が広く用いられている。フジクラでは従来から販売している銅テープ貼合せ線材の他に、新たに銅テープフォーミング構造を開発している。今回、これらの安定化層複合線材を用いて、半田接続部の接続抵抗や機械特性を調べたので報告する。

### 2. 評価線材の諸元

今回評価した 2 種類の IBAD/PLD 線材の仕様概要を Table 1, Fig.1 に示す。Table 1 にあるように線材(a)は 75 μm 厚の安定化銅をラミネート(Snで貼り合せ)した構造、線材(b)は 20 μm 厚の銅テープを線材周囲に包み込むようにラミネートした構造である。いずれの線材も基板厚は 75 μm であり、今回は 5mm 線材を使用した。なお、線材(b)は新規構造であり、量産準備中の短尺試作品となる。

### 3. 実験条件

接続構造としては、Fig.2 のようにラップ接続とブリッジ接続がある。同じ接続長(L)であればブリッジ接続はラップ接続 4 倍の接続抵抗であるが、ブリッジ接続は線材の表裏が入れ替わらない利点があり、測定が容易であることから今回は主にブリッジ接続構造で実験を行った。

接続方法は、線材の接続する箇所に予め半田を塗布しておき、これらを重ねあわせて熱プレスにより接合した。接続に使用した半田は Sn/Pb 共晶半田であり、接続温度は 200°C である。接続抵抗の測定は液体窒素中で四端子法によって行い、電流を 10, 20, 30, 50, 100 A で 10 秒程度保持してその間の電圧を平均することで I-V 直線を描き、その傾きから算出した。

### 4. 実験結果

フォーミング構造(FYSC-SCF05)で接続長 L を 10~100 mm とした際の接続抵抗を Fig. 3 に示す。L = 40 mm で 58.1 nΩ, L = 100 mm で 18.7 nΩ (共に n = 3 平均)であった。各測定点の抵抗値から面積当たりの抵抗値に換算すると 26.1 nΩ cm<sup>2</sup> であり、これは貼合せ構造(FYSC-SC05)のものと同様である。接続抵抗の計算は以下の式を用いた。

$$R(L) = \frac{4}{wL} (2R_{GdBCO-Ag} + 2\rho_{Sn}d_{Sn} + 2\rho_{Cu}d_{Cu} + \rho_{solder}d_{solder})$$

ここで、w は線材幅、R<sub>GdBCO-Ag</sub> は GdBCO と Ag の界面抵抗、ρ<sub>x</sub>, d<sub>x</sub> はそれぞれ x の 77.3 K における抵抗率(実測値)と厚さである。計算に使用した数値を Table 2 に示す。GdBCO と Ag の界面抵抗の値は Sn, Cu, Solder の抵抗の合計と接続抵抗の実測値の差分から算出した。接続抵抗への各抵抗成分の寄与としては GdBCO と Ag の界面抵抗が支配的である。また Cu は導電率が Sn や半田に比べて 1 桁小さいため、安定化層の Cu 厚さが多少異なっても接続抵抗への影響は小さいと考えられる。当日は接続部の機械特性や各種半田の評価についても報告する予定である。

Table 1 Specifications of REBCO coated conductors

Type	(a)FYSC-SC05	(b)FYSC-SCF05
Tape width (mm)	5	5
Tape thickness (mm)	0.17	0.13
Copper stabilizer thickness (μm)	75	20
	copper tape	copper tape

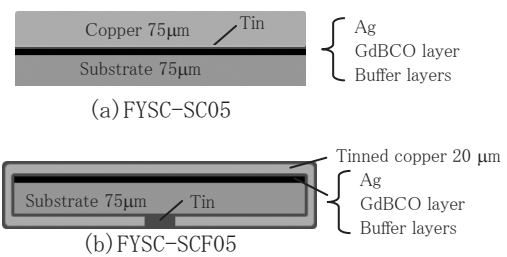


Fig. 1 Schematic of REBCO coated conductors

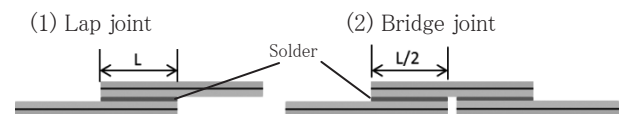


Fig. 2 Schematic of joint configurations

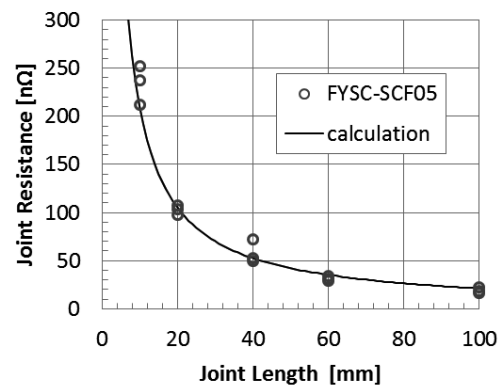


Fig. 3 Measured results of bridge joint resistance with joint length L = 10, 20, 40, 60, 100 mm for FYSC-SCF05

Table 2 The values used for joint resistance calculation

R <sub>GdBCO-Ag</sub>	ρ <sub>Sn</sub> d <sub>Sn</sub>	ρ <sub>Cu</sub> d <sub>Cu</sub>	ρ <sub>Solder</sub> d <sub>Solder</sub>
10 nΩ cm <sup>2</sup>	25.6 nΩ m 7.5 μm	2.2 nΩ m 20 μm	33 nΩ m 5 μm



## REBCO 多芯テープ線材の作製方法と評価

### Fabrication method and evaluations for REBCO multi-core tapes

金 新哲, 松田 徹郎, 柳澤 吉紀, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研); 小黒 英俊(東北大)

Xinzhe Jin, Tetsuro Matsuda, Yoshinori Yanagisawa, Masato Takahashi, Hideaki Maeda (Riken); Hidetoshi Oguro (Tohoku Univ.)

E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

#### 1. はじめに

今回我々が開発した REBCO 多芯テープ線材について[1]、全体的な線材開発内容とコイルにおける作製評価など2件のオーラル発表を予定しており、詳細についてより多く議論するために、線材の具体的な作製方法と評価をテーマとして本ポスター発表も考えている。

REBCO 多芯テープ線材とは元の REBCO 単芯テープ線材に内部スリットをいれることで製作する線材である。これは遮蔽電流磁場の改善により NMR/MRI などにおける実用上での性能向上を目指したもので、元の単芯テープ線材の臨界電流と機械強度をできるだけ低下させないことを前提としている。発表当日には、今まで設計加工した REBCO 多芯テープ線材用シングルスリッターや、それを用いたテープ線材の長手方向に沿って折り曲げる方法 (ESBS) と部分的な圧力を加えることで応力集中させる方法 (ESPC) などによる多芯テープ線材の製作方法、および実用に向けた評価などについてより詳しく言及する。

#### 2. 多芯テープ線材の製造

本研究では、今後の REBCO 多芯テープ線材用マルチスリッターの開発に向けて、簡易なシングルスリッターを設計製造し、多芯テープ線材の製造評価を行った。Fig. 1 にその写真を示した。このシングルスリッターは、ガイドローラーの材質を軟質または硬質にすることで、それぞれ折り曲げる ESBS 法または応力集中の ESPC 法による多芯テープ線材の製造が可能である。今回は厚さ 0.1mm の RE123 テープ線材 (SuperPower 製、幅:4mm) に対し、有機材料である POM のローラーガイドによる ESBS 法を用いて、内部スリットがそれぞれ 1, 2, 3, 4本の多芯テープ線材を作製した。

作製の詳細は次の通りである。まず元のテープ線材の端部を内部スリットの加工部にセットし、バネ式の圧力コントロールによりローラーカッターでテープ線材に 50N の荷重を印加した。ローラーカッターの刃先の幅は 20 $\mu$ m 程度である。それからテープ線材の端部を引っ張り、もう片方には適切な張力を印加しながら、ローラーカッターとガイドローラーの回転により内部スリットの加工を行う。このように、一回通すことで内部スリット 1 本が加工でき、線材幅方向におけるローラーカッターの位置を変化させながらテープ線材の表面に凹線をいれることで複数の内部スリットを加工した。

#### 3. 製造評価

ESBS 法の基本的な考えは、テープ線材が全体的に切断されない程度の折り曲げを与えることで、セラミックスの REBCO 層 (中間層を含む) のみを切断することである。そのため、曲げるための印加応力を適切にコントロールすることが重要である。なお、テープ線材に真っすぐな内部スリットを入れるための工夫は欠かせないものの、ローラーカッターの回転以外の動きをさせないように、そして線材がガイドローラーに沿って左右に揺れずに内部スリットの加工部を通り抜けることが必要になっている。

これまでは上記のシングルスリッターで内部スリット4本で長さ十数 cm、内部スリット2本で長さ 5.6m までの多芯テープ線材が作製でき、ほぼ直線に近い内部スリットの加工がされていた。臨界電流と機械強度において、内部スリットが4本の多芯

テープ線材は元の単芯テープ線材と比較して 90%以上の臨界電流と引張強度があることから、ESBS 法では特に問題なることはないと考えている。

このような製造方法は、簡便かつ量産にも向いていることが特徴である。なお、今後製造加工においてより精細な工夫を加えることにより、REBCO 多芯テープ線材のさらなる長尺化が可能であると考えている。

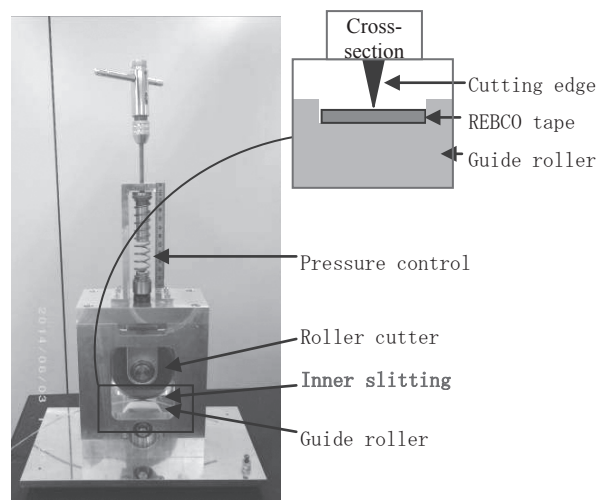


Fig. 1 Single slitler for REBCO multi-core tape

#### 4. まとめ

今回設計製作した REBCO 多芯テープ線材用シングルスリッターを用いて、内部スリット4本、線材長さ5.6mの多芯テープ線材の製造加工を行った。実験評価では、臨界電流と機械特性が元の単芯テープ線材に対し90%以上を保持していた。このようなことから、今後のマルチスリッターの開発研究のために多くの設計案と製造技術が得られた。

#### 5. 今後の予定

内部スリット本数がさらに多い多芯テープ線材の製造とその長尺化を目指した製造装置の実用的な研究開発を進める。

#### 参考文献

- [1] 金新哲, 前田秀明, “高温超伝導多芯テープ線、その製造方法、および製造装置”, 特願 2014-164590, 2014.08.12

# GdBCO コート線材の磁束ピンニング特性に対する 電流方向に平行な交差面で導入した柱状欠陥の影響

## Effect of columnar defects with splay plane parallel to current direction on flux pinning properties in GdBCO coated conductors

古木 裕一, 末吉 哲郎, 甲斐 隆史, 岩永 泰弥, 藤吉 孝則 (熊本大学)

FURUKI Yuichi, SUEYOSHI Tetsuro, KAI Takafumi, IWANAGA Yasuya, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)

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

### 1. はじめに

高温超伝導体における臨界電流密度  $J_c$  の異方性を改善する方法の一つとして、複数方向への1次元ピンの導入が考えられる。強いピン力を持つ1次元ピンを複数方向に導入することで広範囲の磁場方向での高  $J_c$  化が期待できることに加え、それぞれの1次元ピンの向きが異なるために、1次元ピンに固有の磁束線のキック変形に伴う顕著な熱活性化運動の阻止が見込める。これまで、我々は重イオン照射を用いて印加電流方向に垂直な面内に対して交差した柱状欠陥を導入し、 $J_c$  の磁場角度依存性に与える影響について調べてきた[1]。

本研究では、2方向に交差した柱状欠陥を、印加電流方向に平行な面内に導入し、その交差角が磁場中の臨界電流密度  $J_c$  へ及ぼす影響について系統的に調べた。

### 2. 実験方法

重イオン照射に用いた試料は、フジクラ社製のGdBCOコート線材(5 mm幅、膜厚2.2  $\mu\text{m}$ 、 $I_c = 280$  A)で、フォトリソグラフィにより長さ1 mm、幅約40  $\mu\text{m}$ のブリッジ状に加工した。重イオン照射には、270 MeVのXeイオンを用いた。c軸と試料のブリッジ方向が作る面内で、c軸に対して試料に交差した柱状欠陥を導入するために、c軸に対して $\theta = \pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ$ でそれぞれビームを傾けて照射を行うことで、印加電流方向に対して平行な面内に交差した柱状欠陥の導入を行った。照射量は、それぞれの角度方向に $9.67 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> (マッチング磁場  $B_\phi = 2$  Tに相当)とした。

臨界電流密度  $J_c$  は、通電法により評価し、電界基準  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  で定義した。 $J_c$  の磁場角度依存性では、電流と常に直交するように磁場を印加し、磁場とc軸のなす角度  $\theta$  として測定を行った。また、 $J_c$  の磁場依存性では、c軸に対して常に平行に磁場を印加して測定を行った。

### 3. 実験結果および検討

Fig. 1に、70 K、2 Tにおける $J_c$ の磁場角度依存性について示す。c軸方向付近の $J_c$ に注目すると、c軸に対して $\theta = \pm 15^\circ$ の柱状欠陥を導入した試料では、c軸方向で急峻に立ち上がる単一の $J_c$ のピークが見られた。これは交差角が小さな場合で生じるスプレイ効果に起因しているものと考えられる[2]。交差角を $\theta = \pm 45^\circ$ に広げた試料では、c軸方向を中心として広範囲の磁場方向で $J_c$ が増加するようなブロードなピークが観察された。更に交差角を広げた $\theta = \pm 75^\circ$ では、c軸方向に $J_c$ のピークは出現しないが、広範囲の磁場方向で高い $J_c$ を持つような、フラットに近い $J_c$ の磁場角度依存性を示した。

Fig. 2に、照射した3つの試料の77.3 Kにおける $J_c$ の磁場依存性について示す。 $\theta = \pm 15^\circ$ の柱状欠陥を導入した試料において最も磁場依存性が小さく、交差角が広がるにつれて磁場依存性が大きくなっていくことが観察できる。また、低磁場では交差角の広い

試料の $J_c$ が高く、高磁場では交差角の狭い試料の $J_c$ が高い。特に、 $\theta = \pm 75^\circ$ の試料は磁場の増加に伴い $J_c$ が急激に減少しており、 $\theta = \pm 15^\circ, \pm 45^\circ$ の試料とは異なる振る舞いが確認された。

以上の結果より、次のことが考えられる。(i) 傾斜磁場下では、磁束線に対して交差角が広い柱状欠陥が、網目になってピン止めするため、広範囲の印加磁場方向において高い $J_c$ を示す。(ii)  $B \parallel c$ の低磁場では、交差角が大きい試料ほど、磁束線の運動方向を遮るように柱状欠陥が傾いているため、高い $J_c$ を示す。ただし、傾斜した柱状欠陥は、磁束線と交錯して、点状のように相互作用しているため、ピン力は弱く、高磁場で急激に $J_c$ は低くなると考えられる。

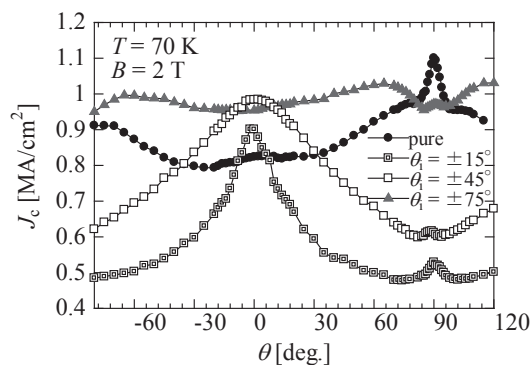


Fig. 1 Angular dependences of  $J_c$  at 70 K and 2 T for GdBCO coated conductors

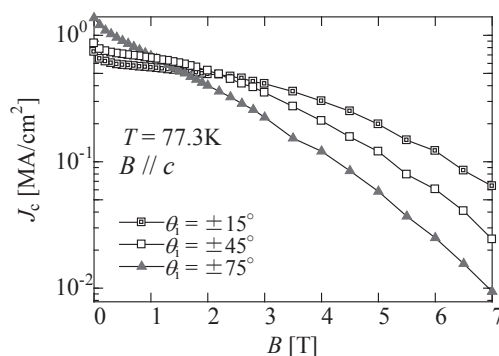


Fig. 2 Magnetic field dependences of  $J_c$  at 77.3 K for GdBCO coated conductors

### 謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構の施設供用制度にて実施したものである。

### 参考文献

- [1] Y.Furuki, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.89 (2014) p.125
- [2] T. Hwa, *et al.*: Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 3545.

# BaMO<sub>3</sub>(M=Zr, Sn, Hf)/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 擬似多層膜の超伝導特性に対する ナノ粒子の粒径の影響

Influence of the nanoparticle diameters on superconducting properties in  
BaMO<sub>3</sub>(M=Zr, Sn, Hf) / YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> quasi-multilayered films

上瀧 哲也, 浦口 雄世, 牧原 隆博, 末永 桃太郎, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則, 光木 文秋, 池上 知顯 (熊本大学)  
KOTAKI Tetsuya, URAGUCHI Yusei, MAKIHARA Takahiro, SUENAGA Momotaro, SUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori,  
MITSUGI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.)  
E-mail: tetsuya@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導体の応用の更なる拡大のためには、全ての印加磁場方向において臨界電流密度  $J_c$  の向上が必要となる。ナノ粒子のような三次元ピンは、ナノロッドのような一次元ピンよりピン力は劣るが、等方的なピンニング効果を得ることができるため、全磁場方向の  $J_c$  の向上を期待できる。

これまで我々は、擬似多層膜法により3種類の BaMO<sub>3</sub>(M = Zr, Sn, Hf)ナノ粒子を YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YBCO)薄膜中に様々な間隔で導入し、ピン物質の種類とその空間分布が超伝導特性に与える影響について報告した[1]。その中で、BaSnO<sub>3</sub>(BSO)を導入した擬似多層膜において最も高い  $J_c$  を示し、BaHfO<sub>3</sub>(BHO)を導入した擬似多層膜では  $J_c$  の改善がみられなかった。今回、成膜時の基板温度を変化させることでナノ粒子の粒径の制御を行い、超伝導特性にどのように影響するのかについて調べた。

## 2. 実験方法

BMO/YBCO 擬似多層膜は、PLD 法を用いて SrTiO<sub>3</sub>(100)基板上に作製した。KrF エキシマレーザの繰り返し周波数は5Hz、酸素雰囲気中 300mTorr の下で成膜を行った。YBCO層を堆積した後に BMO を数パルス堆積し、この行程を繰り返すことで擬似多層膜を作製し、BMO を三次元ピンとして YBCO 内に導入した。成膜においては 740°C, 760°Cの2つの基板温度を用いた。YBCO 層の総堆積パルス数は 3000 パルスである。

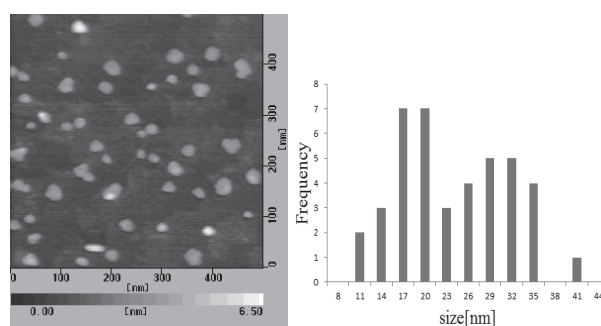
また、ピン物質の種類および基板温度が BMO ナノ粒子の粒径、形状にどのように影響するかを調べるために、アニール処理を施した SrTiO<sub>3</sub>(100)基板上に BMO を堆積させ、AFM によって表面観察を行った

## 3. 結果および考察

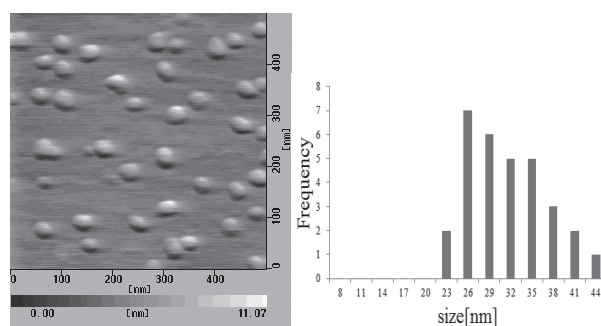
Fig. 1 に、BSO, BHO を4パルス堆積させた時の AFM による表面像と、粒径分布のヒストグラムを示す((a)BSO; 740°C, (b)BSO; 760°C, (c)BHO; 760°C)。BSO ナノ粒子の堆積において、基板温度 740°Cでは径の大きさにバラつきが見られるが、基板温度を 760°Cと高くすると径の大きさが揃う傾向を示しているように見える。ナノ粒子の径の平均は、740°Cで 22.3nm, 760°Cで 30.3nmであった。次に基板温度を 760°Cとし、ピン物質 BSO と BHO について比較すると、粒径は BHO の方が小さく、径の平均は 12.5nmであった。ただし、粒径のバラつきについては、ほとんどないように見える。前回の報告において BSO を導入した擬似多層膜において高い  $J_c$  を示したのは、BSO の粒径が大きいことに起因しているものと考えられる。一方、BHO は粒径が小さくピン止め点として作用しにくく、 $J_c$  の改善が得られなかったと考えられる。

以上の結果より、BMO/YBCO 擬似多層膜において、基板温度およびピン物質の種類によりナノ粒子の径の制御が可能となり、三次元ピンの最適な導入形態について調査を行う。これについては、当日詳細に報告する。

(a) BSO on SrTiO<sub>3</sub> (740°C)



(b) BSO on SrTiO<sub>3</sub> (760°C)



(c) BHO on SrTiO<sub>3</sub> (760°C)

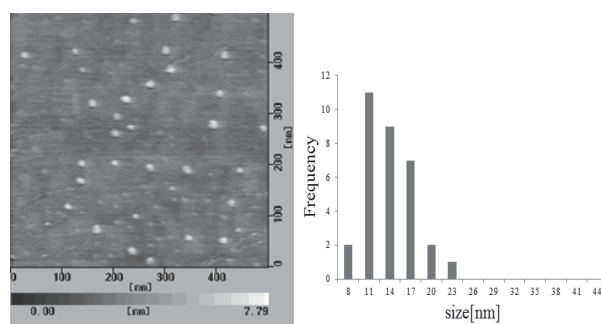


Fig. 1 AFM images and histograms of BMO nanoparticles on SrTiO<sub>3</sub> ((a)BSO;740°C, (b)BSO;760°C, (c)BHO;760°C).

## 参考文献

- [1] T. Kotaki, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.89 (2014) p.124

## Ti 添加 Gd123 バルク体及び MOD 法 Gd123 薄膜の臨界電流密度特性

 $J_c$  properties of Ti-doped Gd123 bulks and thin films fabricated by MOD method

久保 勇人, 水口 佳一, 三浦 大介 (首都大学東京); 喜多 隆介, 鈴木 寛 (静岡大学)

KUBO Hayato, MIZUGUCHI Yoshikazu, MIURA Osuke (TMU); KITA Ryusuke, SUZUKI Hiroshi (Shizuoka Univ.)

E-mail: kubo-hayato@ed.tmu.ac.jp

## 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>(RE123)超伝導体は液体窒素温度(77 K)においても高い超伝導特性を示すが、高磁場中では磁束フローの影響により、臨界電流密度  $J_c$  が低下してしまう。そのため高磁場中での  $J_c$  向上には有効なピン止め点の導入が必要となる。Zr や Hf の添加により有効な人工ピンの研究は進んでいるが、Ti 添加に関しては初期の研究を除いて報告は少ない。

そこで本研究では Gd123 バルク体および Metal Organic Deposition (MOD) 法薄膜に微量の Ti を添加することで磁場中  $J_c$  の向上を試みた。

## 2. 実験方法

## &lt;Gd123 バルク体作製方法&gt;

Gd123 バルク体は固相反応法を用いて作製した。まず、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaCO<sub>3</sub>, CuO を秤量、混合し、900°C で 12 時間仮焼成を行った。そして再び混合し、930°C で 12 時間本焼成後、470°C で 24 時間酸素アニールを行い、Gd123 バルク体を作製した。

## &lt;Gd123 薄膜作製方法&gt;

トルエンを溶媒とする金属オクチル酸塩 Gd, Ba, Cu を秤量、混合した溶液を LaAlO<sub>3</sub>(001) 基板の上に垂らし、スピコーターで均一に塗布し、120°C で 30 分乾燥後、600°C で 30 分仮焼成を行った。この工程を 3 回行うことで仮焼膜を作製した。次に 860°C で 30 分本焼成を行い、350°C で 2 時間酸素アニールを行うことで目的の薄膜を作製した<sup>[1]</sup>。

## &lt;評価方法&gt;

Gd123 バルク体及び薄膜の評価方法として、XRD による構成相の同定と SEM による微細構造観察、SQUID による磁化特性である。バルク体の  $J_c$  評価は残留磁化法<sup>[2]</sup>を用い、粒内と粒界の電流を求めた。薄膜の  $J_c$  は直流磁化法を用いて、磁化の磁場曲線から Bean モデルを用いて算出した。

## 3. 結果

Y123 に Ti を添加することにより、イオン半径及び価数の近い Cu が置換され YBa<sub>2</sub>(Cu<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>)<sub>3</sub>O<sub>7</sub> となる報告<sup>[3]</sup>があるため、本研究では Gd123 バルク体、薄膜それぞれに Ti を 0-3 mol% 添加した試料を作製した。

Fig. 1 は残留磁化法における dm/dB の磁場依存性を示す。バルク体では粒間と粒内で電流が存在するので、Fig. 1 のように二つのピーク  $B_1$ 、 $B_2$  が現れる。残留磁化法を用いて Ti 添加 Gd123 を測定した結果、粒間電流の向上が確認された。これは粒間に存在する弱結合の改善が行われた結果である。

Fig. 2 は 4.2 K と 77.3 K における Ti 0, 1 mol% 添加 Gd123 薄膜の  $J_c$ -B 特性を表している。Ti を添加した結果、全体的に磁場中  $J_c$  の向上が確認された。

Fig. 3 は Gd123 薄膜において 0, 1 T 中  $J_c$  の Ti 添加量依存性を示す。Ti を添加した結果、 $J_c$  の向上が確認された。しかし、添加量を 3 mol% 以上にすると  $J_c$  は低下した。Fig. 3 の結果より、Gd123 における Ti 添加量として 1 mol% 付近が最適であると考えられる。

## 参考文献

[1] Kazuhiro Yamada, et al.: Micron 50 (2013) 44-50

[2] A. Yamamoto, et al.: Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 095008 (11pp)

[3] Y. NISHI, et al.: Journal of materials science letters 7 (1988) 359-360

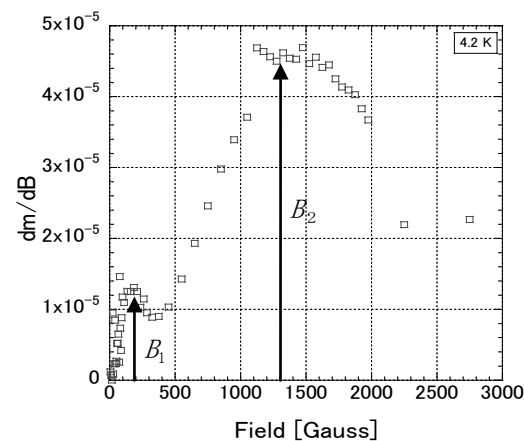


Fig. 1 Magnetic field dependence of dm/dB at 4.2 K.

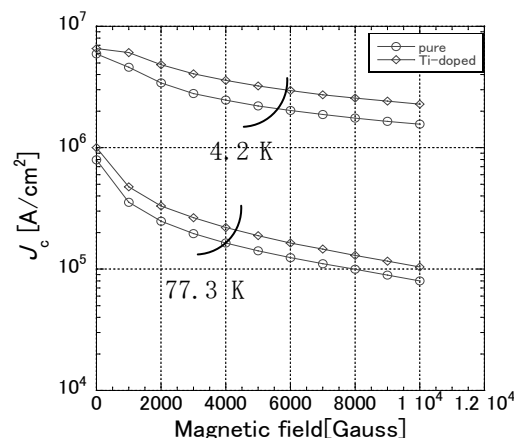


Fig. 2 Magnetic field dependence of  $J_c$  in non-doped and Ti-doped Gd123 films at 4.2 K and 77.3 K.

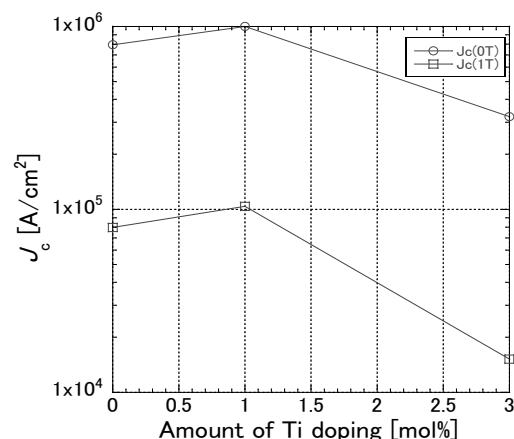


Fig. 3 Amount of Ti doping in Gd123 dependence of  $J_c$  in 0, 1 T at 77.3 K.

## Y(Ca)123 焼結体の密度制御と超伝導特性 Superconducting properties of density controlled Y(Ca)123 sintered bulks

市川 直樹, 今 康一, 稲森 聡, 内藤 恭吾 (ティーイーピー); 下山 淳一, 廣田 哲也 (東大院工)  
 ICHIKAWA Naoki, KON Kouichi, INAMORI Satoshi, NAITO Kyogo (TEP); SHIMOYAMA Jun-ichi, HIROTA Tetsuya (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: n.ichikawa@tepceram.co.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123)の焼結体は、現在、coated conductor用のターゲット材料として生産されているほかは用途が極めて少ない。RE123の優れた特徴である低い電氣的磁氣的異方性とこれによる高い不可逆磁場とピンニングが効きやすいという性質は、単一結晶からなる溶融凝固バルクや薄膜、2軸配向多結晶薄膜である coated conductor でしか生きていない。一般に、RE123多結晶体では粒界における弱結合の問題があり、高度な2軸配向組織の形成によるのみこの問題はほぼ回避できる。これに対し、通常の固相反応法で作製されるRE123の無配向焼結体では粒間のJ<sub>c</sub>が溶融凝固バルクや薄膜材料に比べて2~4桁低く、20 Kにおいてもせいぜい数百 A cm<sup>2</sup> でしかなかった。しかし、このJ<sub>c</sub>が1桁でも向上すれば普及性の高い超伝導電流リードなどの材料開発につながる。上記のターゲットの作製・開発においては、ターゲット自体の使用時の安定性を高める製法が優先的に採用され、焼結体自体の超伝導特性は全く考慮されていない。一方、その開発過程においては仮焼粉末作製の量産技術の最適化や粒径制御の技術が確立できており、さらに、焼結体作製の手法や条件と焼結体組織の関係が明らかになってきている。

以上の背景のもと、本研究では焼結前の成型時の圧力と、焼成後の微細組織、超伝導特性を系統的に調べることで、量産可能な方法での高臨界電流特性 Y123 無配向焼結体の開発を目指している。今回は Y123 および Y サイトに Ca を 5% 置換した Y(Ca)123 焼結体について、成型時の圧力を 100~300 MPa の範囲で変え、焼成を空気中の様々な温度で行った試料を作製し、微細組織および超伝導特性を調べた結果を報告する。

### 2. 実験方法

作製した焼結体の仕込組成は、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> および Y<sub>0.95</sub>Ca<sub>0.05</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> で Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、BaCO<sub>3</sub>、CuO を出発原料とした。これらを秤量、湿式混合後、仮焼、粉碎、焼成の過程を経て最後にボールミル粉碎によって微細な Y123 および Y(Ca)123 単相の粉末を得た。これらの粉末を 80 MPa の一軸プレスにより 20 mmφのペレットに成型し、ビニール袋内に真空封入後、100, 200, 300 MPa の静水圧プレス(CIP)を行った。焼結は空气中 840~880°C で 24 h 行い徐冷した。得られた試料の微細組織は SEM により観察し、密度は試料の体積と質量から計算した。さらに、800°C、酸素分圧 1 kPa 下で 12 時間アニールし、最後に 300°C で酸素アニールを行った後に、格子定数を粉末 X 線回折測定により、超伝導特性については SQUID 磁束計を用いた磁化測定によって評価した。粒間 J<sub>c</sub> は残留磁化法により調べた。

### 3. 結果と考察

本研究で用いた 123 相粉末は最終的にボールミル粉碎によって微細化したものであり、比較的低温で十分焼結が進むことが特徴である。静水圧プレスの圧力が異なる試料の密度の焼成温度依存性を Fig. 1 に示す。プレス圧力が高いほど焼結後の密度が高い傾向にあること、Ca ドープ試料の密度が若干高いことがわかった。880°C で焼成した試料は相対密度が約 95% と高いが、目視できる大きなクラックが生じていた。プレ

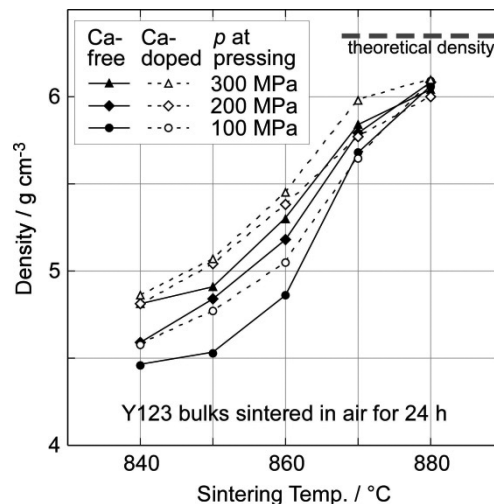


Fig. 1 Sintering temperature dependence of density of Ca-free and Ca-doped Y123 sintered bulks .

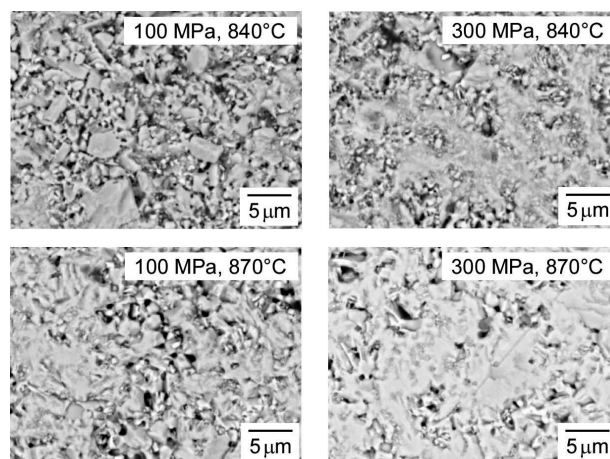


Fig. 2 Secondary electron images of polished surface of Y(Ca)123 bulks pressed under 100 MPa or 300 MPa and sintered at 840°C or 870°C for 24 h in air.

ス後の密度は Y123 で 300 MPa の場合、約 4.4 g cm<sup>-3</sup> であり、840°C でも焼結反応が進行していることがわかった。

Fig. 2に100 MPa、300 MPaでプレスし840°C、870°Cで焼結したY(Ca)123試料の研磨面の二次電子像を示す。870°C焼結の試料ではクラックが無く緻密な組織となっている。また、300 MPaでプレスした場合には840°Cでの焼結でも緻密に見える領域が現れている。

粒間のJ<sub>c</sub>は、850°Cで焼結した試料が最も高く、300 MPaでプレスしたY(Ca)123試料の残留磁場下のJ<sub>c</sub>は、20 Kで6.0 kA cm<sup>-2</sup>、40 Kで4.4 kA cm<sup>-2</sup>と非常に高い値を示した。この結果は、高温で焼結した試料においてはクラックの発生はないものの、粒間の結合が弱めるような液相由来の弱超伝導または非超伝導領域の介在を示唆するものである。

# Y系超伝導転位並列導体における電流分流特性の解析(Ⅲ)

## Analysis of the current sharing properties of Y-based superconducting transposed parallel conductors

河原 史典, 山下 康平, 岩熊 成卓(九州大学);  
 KAWAHARA Fuminori, YAMASHITA Kohei, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);  
 E-mail: te10108p@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

酸化物超伝導線材を電力機器の巻線や大型超伝導マグネットに適用するためには大電流量化が必要となる。現在の酸化物超伝導線材は、結晶の配向性を向上させるためにテープ状に加工されているため、大電流量化するためにはテープ状の素線を並列に重ね合わせて並列導体を構成しなければならない。しかし、単に積層しただけでは素線間のインダクタンスバランスがとれず、遮蔽電流の誘起や偏流が発生する。遮蔽電流はループ電流であるから、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施し、電流分流を均一に近づけることで遮蔽電流を低減し、磁場の均一化を図ることができる。

本研究ではY系超伝導テープ線材で構成した転位並列導体について、電流リード部の接触抵抗と、n 値モデルに基づく通電時の磁束フロー抵抗を考慮して電流分流の数値解析を行った。n 値と臨界電流密度の変化が電流分流比に与える影響について考察した。

### 2. 電流分流比の計算法

素線数3本の転位並列導体を用いてこれまでの研究から判明している最適な転位方法を Fig.1 に示す。多層ソレノイドコイルを Fig.1 のように巻いた場合の素線間電流分流について数値解析を行った。各素線の自己インダクタンス及び相互インダクタンスに加え、電流リードとの接触抵抗  $R_N$  と、超伝導素線における磁束フロー抵抗  $R_{HTS}$  からなる抵抗  $R_x$  を考慮にいと等価回路は Fig.2 で表され、回路方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 + R_N + R_{HTS1} & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} & j\omega L_2 + R_N + R_{HTS2} & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} & j\omega M_{32} & j\omega L_3 + R_N + R_{HTS3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

各素線の磁束フロー抵抗  $R_{HTSx}$  は高温酸化物超伝導線材の通電特性を n 値モデルで近似すると、

$$R_{HTSx} = V/I = V_c (I^{-1} / I_c^{-n})$$

で表される。接触抵抗  $R_N$  には実測値を用いた。

### 3. 結果

n 値と臨界電流密度の片方を固定し、片方を基準値から変化させて電流分流比に与える影響について調べた。各素線の臨界電流密度を  $I_c=100A, 90A, 80A$ 、通電電流を 100A、n 値を  $n=7$  とした場合の電流分流比の解析結果を Fig.3(a) に示す。各素線の臨界電流密度を  $I_c=90A$  で固定し、n 値のみを  $n=5.6, 7, 8.4$  と変化させた場合の解析結果の一例を Fig.3(b) に示す。高周波領域ではインダクタンス成分の影響が大きく、転位によって各素線のインダクタンスが均等になるようにしているため電流分流は均一化される。一方低周波、特にその極限である直流では抵抗成分の影響が大きく、電流は均一に流れないことがわかる。他の場合における電流分流の様相については当日報告する。

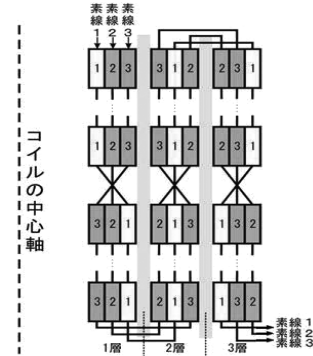


Fig.1 3-strand superconducting transposed parallel conductors

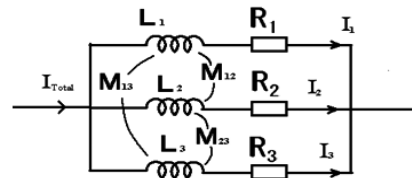


Fig.2 Equivalent circuit of a 3-strand parallel conductor

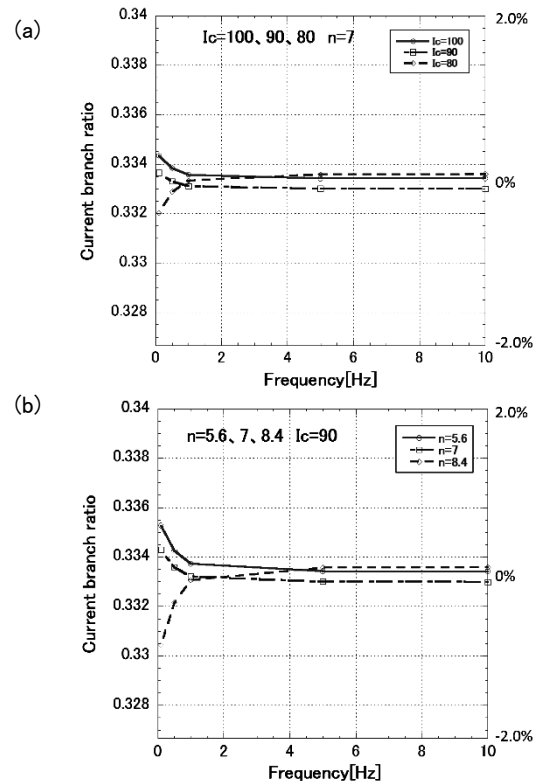


Fig.3 Current branch ratio

(a)  $n=7, I_c=100, 90, 80A$       (b)  $n=5.6, 7, 8.4, I_c=90A$

## Y系超伝導転位並列導体で構成したコイルの付加的交流損失特性(3)

## Additional AC loss properties of Y-based superconducting parallel conductors

槻木 優樹, 岩熊 成章(九大); 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC)

TSUKIGI Yuki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: tsukigi@sc.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々は大電流量化を目指す酸化物超伝導体の構成法として Fig. 1 に示すように素線を並列に並べ、巻き線途中で転位を施す方法を提案している。超伝導線材を用いて転位並列導体を構成すると素線に発生する交流損失に加え転位並列導体化に伴う損失が発生する。この損失のことを付加的交流損失と呼んでいる。本研究では実際の酸化物超伝導線材の通電特性を模擬して n 値モデルを採用し、転位並列導体をコイルに巻いた場合の付加的交流損失の解析を行った。

## 2. 並列導体の付加的交流損失

Fig. 2 は 2 本並列導体の転位位置を中央から  $\Delta l$  だけずらしたコイルの概略図である。転位の左右で鎖交磁束の差が生じ、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。遮蔽電流を導出する際に、n 値モデルによる素線抵抗  $r$  を考慮すると、単位体積当たりの付加的交流損失は次式となる。

$$W = \frac{(4R + 2r)I^2}{2uwL}$$

L: 導体長、R: 並列導体端部の接触抵抗、r: 素線抵抗

## 3. 結果

本研究では磁界を一定値に保って利用する機器を想定したため、外部印加磁界は Fig. 3 のように想定し、励磁加速度を  $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$  [T/s] で比較した。また 500 巻きの 1 層コイルにおいて、転位位置がずれた場合を想定した。

Fig. 4 は付加的交流損失の時間変化である。励磁速度が遅いほど最大値が小さくなったが、磁界を一定にした後に減衰し始めるまでの時間も長くなった。

今後の課題は、より実際の機器構成に近いモデルを構築・解析していくこと、また、変動磁界中で並列導体の付加的交流損失を抑える方法を模索していくことなどが挙げられる。

$B_e$ : 外部磁界

$d_s$ : 素線中心間距離

$u$ : 線材厚さ

$w$ : 線材幅

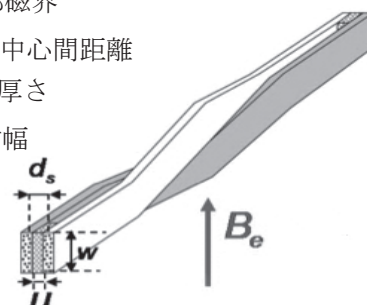


Fig. 1 A transposed two-strand parallel conductor



Fig. 2 two-strand parallel conductor wound into a 1-layer solenoidal coil

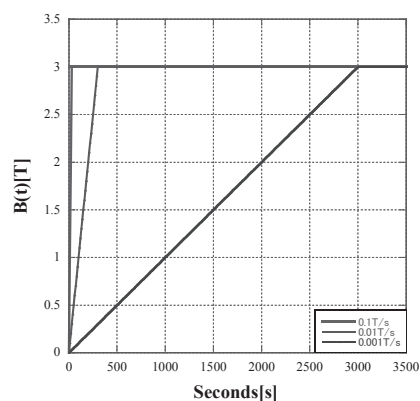


Fig. 3 The property of external magnetic field

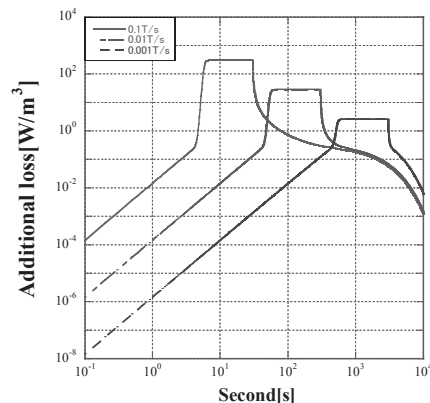


Fig. 4 The property of the Additional loss

# 鞍型ピックアップコイル法による REBCO 超電導テープ線材の磁化緩和特性の考察(1)

## Characteristic tests of magnetization relaxation of REBCO superconducting tapes by saddle-shaped pickup coil low

益田 佳一郎, 岩熊 成卓(九州大学); 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)  
 Masuda Keiichiro, Iwakuma Masataka (Kyushu Univ.); Izumi Teruo, Shiohara Yuh (SRL)  
 Email:masuda@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年、医療用 MRI の励磁用コイルへの高温超電導技術の導入による脱ヘリウムや高磁界化に期待が高まっている。しかしながら MRI には 1 時間当たり 1ppm 程度の磁界減衰率が要求され、Y 系超伝導テープ線材を用いる際、その磁化による遮蔽電流の緩和が磁界の時間的な均一性に影響を及ぼしてしまう。そこで本研究では、テープ線材に流れる遮蔽電流が緩和しきってから、MRI を使用するという手法に向け、超電導線材に流れる遮蔽電流の緩和特性を明らかにすることを目的としている。また Y 系の超電導コイルの直流通電後の磁化緩和を測定し、テープ線材の磁化緩和測定結果をもとに自己磁場中でのコイル全体の磁化緩和を推定、比較検討を行う。

### 2. 研究内容

連続的なデータ収録を行えるという鞍型ピックアップコイル法のメリットを活かし、超電導テープ線材の磁化緩和の初期過程の測定を行った。今回は EuBCO 超電導テープ線材を用いて、測定温度を 15K、20K とし、直流バイアス磁界を 0T~2.0T、線材の積層枚数を 3 枚にして測定した。Table. 1 に EuBCO 超電導テープ線材の諸元を示す。また、今回 YBCO 超伝導コイルに直流通電し、そのコイル中心部の磁化の緩和特性を、ホール素子を用いて測定した。以下、テープ線材の磁化の緩和率について簡単に述べる。磁束クリープの理論より、見かけのピンポテンシャルを  $U_0^*$  (eV)、温度を  $T$  (K)、ボルツマン定数を  $k_B = 8.61 \times 10^{-5}$  (eV/K)、超電導体を流れる電流密度を  $J$  (A/m) としたとき、緩和開始後十分に時間が経過すると以下の関係が成り立つ。対数減衰率は、

$$-\frac{d}{d(\log t)} \left( \frac{J}{J_{c0}} \right) = \frac{k_B T}{U_0^*} \quad (1)$$

となる [1]。また磁化  $M$  (A/m) と電流密度  $J$  (A/m) は

$$J = \frac{12MJ}{w(3l-w)} \quad (2)$$

の関係が成り立つので、以下の表式

$$-\frac{d}{d(\log t)} \left( \frac{M}{M_{c0}} \right) = \frac{k_B T}{U_0^*} \quad (3)$$

で磁化  $M$  (A/m) は緩和する。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に鞍型ピックアップコイル法で測定した EuBCO 線材の磁化緩和特性の測定結果を示す。式 (3) が示すように、測定結果から温度が高くなるほど、緩和率が大きくなるのが分かる。これにより鞍型ピックアップコイルにより初期過程での磁化緩和の測定が行えることを示した。加えて Fig. 2 に Y 系コイルの磁化緩和を、Fig. 3 に I-V, I-B 特性を示す。Fig. 2 からコイルの磁場強度が大きくなっていることから、超電導テープ線材の遮蔽電流の減衰が伺える。今後の課題として、積層枚数変化時、磁場印加角度変化時の磁化緩和のデータ収集と考察を進めるとともに、外部磁場印加時の Y 系コイルの磁化緩和の評価を行っていく必要がある。

Table.1 Specifications of EuBCO superconducting tapes

Width	10mm
Stabilizer	Ag(4μm)
Superconductor	EuBCO+BHO(1.52μm)
Cap and buffer layers	CeO <sub>2</sub> (0.62μm)
	LMO(8nm)
	MgO(5nm)
	Y <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (14nm)
	Gd <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (0.8μm)
Substrate	Hastelloy(100μm)
Ic-self	500A

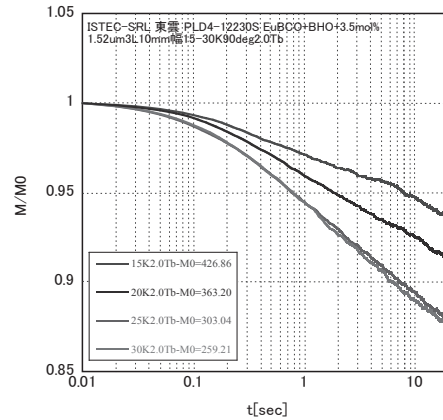


Fig.1 Characteristic of magnetization relaxation

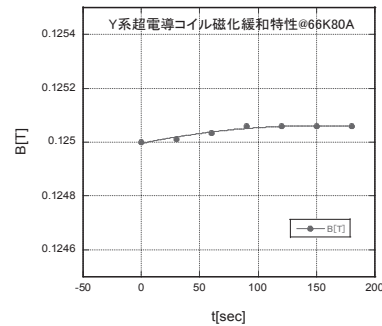


Fig. 2 magnetization relaxation of YBCO coil

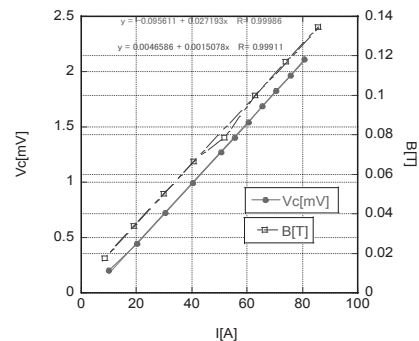


Fig. 3 I-V, I-B Characteristic of YBCO coil



# 無絶縁・部分絶縁 REBCO パンケーキコイルの通電特性評価のための回路解析法

## Circuit analysis method for electromagnetic characteristics in no-insulation and partial insulation REBCO pancake coils

荒川 一誠, 池田 愛花, 大木 隆広, 中田 恵理香, 南 克彦, 王 韜, 石山 敦士(早稲田大学); 王 旭東(KEK); 野口 聡(北海道大学); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

ARAKAWA Issei, IKEDA Aika, OKI Takahiro, NAKADA Erika, MINAMI Katsuhiko, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); WANG Xudong (KEK); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power);

E-mail: atushi@waseda.jp

### 1. はじめに

無絶縁 REBCO パンケーキコイルは高い熱的安定性を有した上で高電流密度化を実現できる可能性がある。一方で無絶縁コイル(No-Insulation: NI コイル)は励磁時の時間遅れが課題となっている。これを解決する手段のひとつとして無絶縁コイルへ部分的に絶縁を施す部分絶縁コイル(Partial Insulation: PI コイル)が提案されている。そこで我々は、新たに提案した PEEC(Partial Element Equivalent Circuit)モデルによりPIコイルの電磁氣的振舞いの評価を行った。また、その結果に基づいて従来の回路モデルで部分絶縁コイルを簡易的に評価する方法について検討した。

### 2. 解析手法・等価回路モデル

NI コイルは線材間の接触を介してコイル周方向だけでなく、径方向へも電流が流れる。先行研究[1]で提案されている等価回路モデルと我々が提案した PEEC モデルを Fig. 1(i)(ii)に示す。Fig. 1(i)の回路モデルでは NI コイル内において周方向と径方向の電流パスを考慮している。Fig. 1(ii)の PEEC モデルではコイルを細かい要素に分割し、それぞれの要素の周方向と径方向の電流パスを考慮する。今回は PEEC モデルによって数ターン毎に部分絶縁を施した場合のコイル中心磁場、周方向および径方向の電流分布を評価した。

### 3. 解析結果・考察

解析は先行研究[1]の実験コイルを対象として行った。コイルの諸元を Table 1 に示す。また、無絶縁・部分絶縁コイルを 30 A 一定電流通電時から電源遮断した際のコイル中心磁場の解析結果を Table 2 に示す。解析は 60 ターンのコイル内に N ターン(2,3,4,5,10,15,30) 毎に絶縁を入れた場合を想定した。Table 2 より、部分絶縁を施すにつれて、中心磁場の減衰時定数が小さくなる事が確認できた。Fig. 2 に 10 ターン毎に絶縁が施された部分絶縁コイルの電源遮断後 0.01 s の周方向と径方向の電流分布を示す。Fig. 2 より周方向電流は絶縁が入った層の端で 0 A となるように分布し、その他のターンで増加する。また、径方向電流は各ターンで周方向電流に従って分布する。したがって、部分絶縁を施すと径方向に電流がバイパスする際の層間接触面積が減少するため、結果としてコイル全体としての層間接触電気抵抗  $R_c$  は増加する。絶縁面積の割合と層間接触電気抵抗、時定数の関係を Fig. 3 に示す。実線は NI コイルの層間接触電気抵抗  $R_c$  と層間の接触面積率から算出した PI コイルの層間電気接触抵抗と時定数であり、プロットは PEEC 解析の結果である。以上の結果より層間接触電気抵抗  $R_c$  は、層間の接触面積に反比例し、時定数は部分絶縁の面積に比例して小さくなる事が示された。

### 4. まとめ

部分絶縁されたコイルの電磁氣的振舞いを PEEC モデルによって明らかにした。結果より、部分絶縁した場合の層間接触電気抵抗は接触面積によっておおよそその値を予測できることがわかった。そのため、部分絶縁が時定数に与える影響は層間接触電気抵抗から簡易的な回路でも評価可能である。本研究の一部は科研費基盤研 (No.26249036) によった。

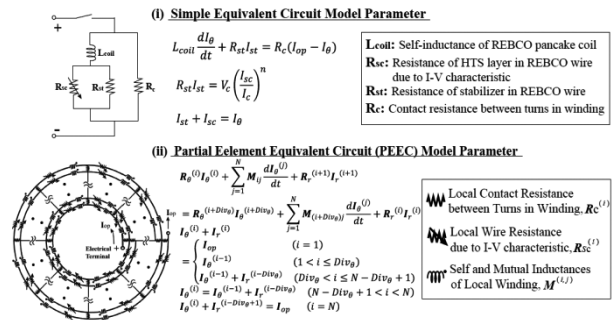


Fig. 1 Equivalent Circuit Models

Table 1 Specifications of the NI REBCO pancake coil

Parameters	60-turn NI pancake coil
Super Power® C4050 REBCO wire	
Overall width; thickness (mm)	40; 0.063
Copper stabilizer thickness (μm)	10 (5 per side)
Ic @ 77K, self-field (A)	>100
NI REBCO Pancake Coil	
i.d.; o.d.; height (mm)	60.0; 67.6; 4.0
Contact surface resistivity, R <sub>c</sub> (μΩ·cm <sup>2</sup> )	70.0
Ic @ 77K, coil-field (A)	43.0
Inductance (μH)	432.3

Table 2 Simulation Results

Insulated Layer (every "N" turn)	PI 2	PI 3	PI 4	PI 5	PI 10	PI 15	PI 30	NI
Time constant τ (s)	0.42	0.56	0.63	0.68	0.75	0.78	0.80	0.83
Turn-to-turn contact resistance R <sub>c</sub> (μΩ)	1027	770	685	634	575	553	540	520

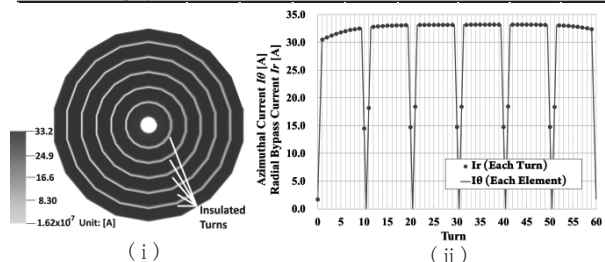


Fig. 2 Current Distribution at 0.01 s (i)Azimuthal Current (ii)Azimuthal Current and Radial Current in 1turn

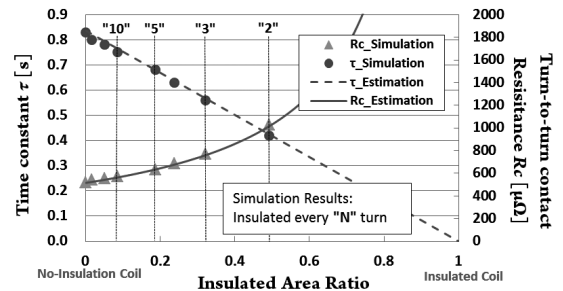


Fig. 3 Comparison of Contact Area Ratio, Time Constant and Turn-to-turn Contact resistance

### 参考文献

1. Xudong Wang, et al.:Supercond. Sci. Technol 26 (2013) 035012

## 層間接触電気抵抗の不規則分布を考慮した 無絶縁 REBCO パンケーキコイルの遮断特性解析

Numerical simulations of sudden discharge characteristic of no-insulation REBCO pancake coils  
with random contactless between layers

中田 恵理香, 池田 愛花, 大木 隆広, 荒川 一誠, 南 克彦, 王 韜, 石山 敦士(早稲田大学);  
王 旭東(高エネルギー加速器研究機構); 野口 聡(北海道大学);

NAKADA Erika, IKEDA Aika, OKI Takahiro, ARAKAWA Issei, MINAMI Katsuhiko, WANG Tao,  
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); WANG Xudong (KEK); NOGUUCHI So (Hokkaido Univ.);

E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

現在、高温超電線材を用いた無絶縁(NI: No-Insulation)コイルの研究開発が各所で進められている。NI コイルは、本来二律背反の関係にある高い工学的電流密度と高い熱的安定性の両方を同時に達成できる手段として注目されている[1][2]。一方で、電磁的・磁氣的現象がコイル内部でどのように起きているか不明な点が多い。そこで今回は PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) モデルを用いた回路解析により、ランダムに非接触部分が存在する NI コイルに対し、遮断特性を検討すると共にエネルギー収支の関係を評価したので報告する。

### 2. 解析条件

本解析では実際のコイルを想定し、コイル巻線時における巻線のゆがみや部分的な酸化などを模擬するため、層間ランダムに接触している状態を考え、非接触部分の面積をパラメータとして解析・評価した。また非接触部分以外の接触抵抗は  $70 \mu\Omega \text{ cm}^2$  として与えた[1]。先行研究[1]を基にした、解析対象とするコイルの諸元を Table 1 に示す。解析モデルである PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) モデルの概略図を Fig.1 に示す。モデルコイルを周方向に 36 分割し、各要素のインダクタンスはノイマンの公式より算出している[2]。電源遮断時の通電電流は 30 A ホールド状態である。

### 3. 解析結果

解析結果の例として、非接触面積 20% のコイルにおける電源遮断 0.001 秒後の電流分布、接触抵抗分布、及び発熱分布を Fig. 2 に示す。 $I_r$  は径方向電流であり、 $I_\theta$  は周方向電流を示している。Fig. 2 より、 $I_r$  は各非接触部分に対して対称に電流の絶対値が増加し、 $I_\theta$  の値は各ターンの非接触面積に依存していることがわかる。また、非接触部分以外のコイル全体で均一に発熱していることがわかる。

次に時定数、及び電流の最大値を Table 2 に示す。非接触部分が多いほど時定数は小さくなり、流れる電流が大きくなる傾向になることがわかる。これは非接触部分が増えることにより、コイル全体の抵抗値が大きくなるためである。また非接触部分が 50% を超えた場合でも、電流の最大値は 41.8 A とコイル  $I_c$  である 43 A を超えないことがわかる。また、通電電流より算出されるコイル全体の蓄積エネルギーと、層間接触抵抗で消費されるエネルギーの差は 1% 程度であった。以上の結果より、非接触部分がランダムに存在するコイルでも、層間接触抵抗によりエネルギーがコイル内でほぼ均一に消費されることが確認できた。

本研究は科研費基盤研究 A (No. 26249036) による。

Table 1 Parameters of NI HTS single pancake coil.

REBCO wire	Overall width, thickness (mm)	4.0; 0.063
	Copper stabilizer thickness ( $\mu\text{m}$ )	10 (5 per side)
Coil	i.d.; o.d.; height (mm)	60.0; 67.6; 4.0
	Turns	60
	$I_c$ at 77 K, self-field (A)	43
	$B_z$ per amp at coil center (mT/A)	1.17
	Inductance ( $\mu\text{H}$ )	432.3
Contact surface resistivity, $R_{ci}$ ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ )		70

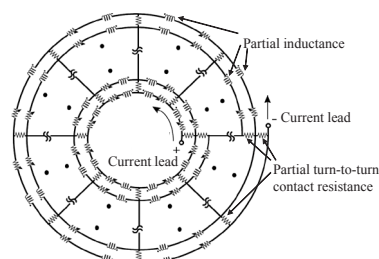


Fig. 1 Schematic drawing of the PEEC model

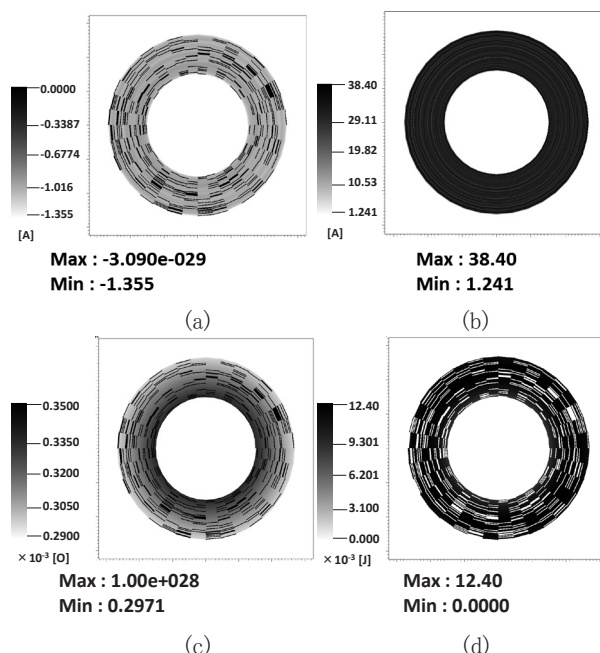


Fig. 2 Analytical results of the radial current distribution (a)  $I_r$ , the azimuthal current distribution (b)  $I_\theta$  at 0.001s, turn to turn contact resistance distribution (c), and distribution of Joule heat (d)

Table 2 Summary of the analytical results

Ratio of contactless [%]	Time constant [s]	Minimum of $I_r$ [A]	Maximum of $I_\theta$ [A]
0	0.82	-1.10	36.9
5	0.78	-1.14	37.4
10	0.74	-1.20	38.8
20	0.66	-1.35	38.4
30	0.57	-1.55	38.9
50	0.41	-2.00	41.8

### 参考文献

- X.Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol, Vol. 26 (2013) 035012
- T.Oki, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol.89(2014) p.65

# NMR 用 HTS コイルに誘起された遮蔽電流を抑制する HTS 補償コイルの製作・試験

## Fabrication and test of HTS compensation coil to suppress screening currents induced in HTS coil for NMR

椋川 一弘(九大); Gettliffe Gwendolyn, Chu Yong, 宮城 大輔, Lécresse Thibault, Hahn Seungyong, Bascuñán Juan, 岩佐 幸和(MIT)

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); GETTLIFFE Gwendolyn, CHU Yong, MIYAGI Daisuke, LÉCREVISSE Thibault, HAHN Seungyong, BASCUÑÁN Juan, IWASA Yukikazu (MIT)  
E-mail: kajikawa@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

MRI/NMR 用マグネットでは ppm~ppb オーダの磁界均一度が要求される。しかし、現在市販化されている HTS テープ線材を巻いた超電導コイルでは、テープ面に垂直な磁界成分により誘起された幅広面内の遮蔽電流がコイル中心部の磁界均一度を極端に低下させることが知られている。この HTS コイルに誘起された遮蔽電流を低減するために、異常横磁界効果に基づいて付加的な補償コイル (shaking コイル) により交流磁界を短時間印加する方法が提案されている[1-3]。そこで、本研究では、線幅の狭い HTS テープ線材を用いた新しい shaking コイルを提案する。また、RE 系 coated conductor を用いて shaking コイルを実際に製作し、Bi-2223 テープ線材を巻いた NMR 用 HTS インサートが作る遮蔽電流磁界 (SCF) の低減効果を実験的に検証した。

### 2. HTS 補償コイル (shaking コイル) の設計・製作

Fig. 1 と Table 1 に示すような HTS shaking コイルを設計・製作した。既存の HTS インサートは、幅 3.1 mm、厚さ 0.25 mm の Bi-2223 銀シーステープ線材を 50 個のダブルバンケーキ状に巻線したものであり、総ターン数は 7200 である[4]。この HTS インサートの内径・外径・高さはそれぞれ、78.2 mm、120.3 mm、327.6 mm である。一方、HTS shaking コイルは、幅 2.01 mm、厚さ 0.1 mm 以下の coated conductor を用いて巻線した。臨界電流  $I_c$  は、77 K・自己磁界下で 53~56 A である。shaking コイルの内径と高さはそれぞれ、130 mm、360 mm である。また、その層数は 2 であり、2 層目に長さ  $h$  が 300 mm のノッチ部を有する。従って、1 層目のターン数は 164、2 層目は  $14 \times 2$  である。このようなノッチ付ソレノイドを採用することにより、HTS インサート内の各ターンに印加される局所磁界の径方向成分を極力少なくすることが期待できる。shaking コイルの全長は約 80 m であるが、購入できる coated conductor の単長が約 35 m に制限されたため、3 片をハンダ付によりラップ接続することとした。短尺線材を用いて事前に幾つかの接続試料を製作した結果、 $I_c$  が 53 A の線材同士の超電導層に近い側を 136 mm にわたってハンダ付することにより、接続抵抗 52 nΩ、臨界電流 52.3 A を最終的に達成することができた。製作した shaking コイルの  $I_c$  は、77 K で 45 A だった。

### 3. 実験結果

HTS インサートと HTS shaking コイルを同軸に配置し、液体窒素中に浸漬した。HTS インサートの巻線に遮蔽電流を誘起するために、大口徑の室温ボアをもつ LTS マグネットを使用した。まず、LTS マグネットを 1.25 T まで励磁した後、0 T まで減磁した。励減磁直後の磁束クリープによる遮蔽電流の減衰が落ち着くまで、約 15 分待機した。その後、HTS インサートの中心部に配置したホールセンサを用いて、軸方向の SCF を計測した。実験結果を、Fig. 2 に示す。shaking コイルによる SCF の減少は、1) 印加する交流磁界振幅と 2) サイクル数により決定される。

本研究は、JSPS 科研費 24360110 の助成を受けたものである。

### 参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Abst. of CSSJ Conf. 85 (2011) 1D-a07.
2. K. Kajikawa, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 125005.
3. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 22 (2012) 4400404.
4. H. Lee, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 1546.

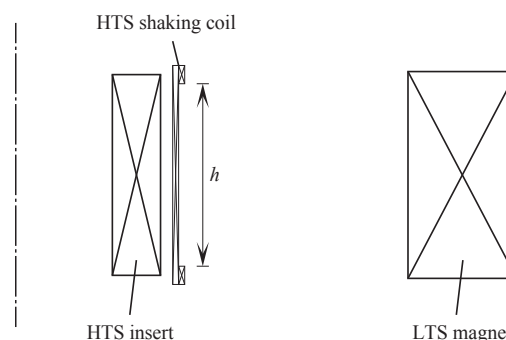


Fig. 1 Schematic illustration of HTS insert, HTS shaking coil and LTS magnet.

Table 1 Specifications of HTS shaking coil.

Tape width	2.01 mm
Tape thickness	92, 95, 92 μm
Tape $I_c$ at 77 K in self-field	54, 53, 56 A
Inner diameter of coil	130 mm
Height of coil	360 mm
Number of layers of coil	2
Notched length in 2nd layer, $h$	300 mm
Number of turns of 1st layer	164
Number of turns of 2nd layer	$14 \times 2$
Coil $I_c$ at 77 K in self-field	45 A

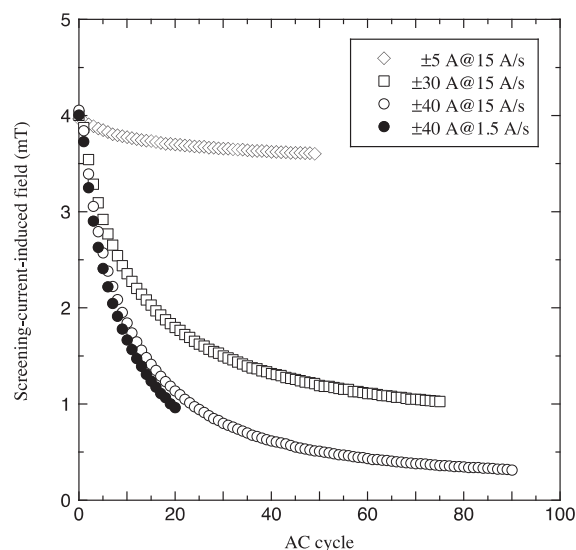


Fig. 2 Experimental results of decay property of SCFs for number of cycles of applied AC magnetic field.

# REBCO コイルにおける遮蔽電流による不整磁場の低減

## Reduction of Irregular Magnetic Field Generated by Screening Current in REBCO Coil

今市 洋平, 松見 絢子, 持田 歩, 有谷 有汰, 齋藤 隼, 王 韜, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史 (阪大);  
宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努 (東芝)

IMAICHI Yohei, Matsumi Ayako, MOCHIDA Ayumu, ARIYA Yuta, SAITO Jun, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);  
UEDA Hiroshi (Osaka Univ.); MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

経済産業省プロジェクト「高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発」において、我々は 10 T 級 (9.4 T) MRI の実現に向けた研究を行っている[1]。使用する REBCO コイルはテープ形状であるために、垂直磁場に対し遮蔽電流が顕著に誘導され不整磁場が生じる。従って MRI 磁石に必要な磁場均一度や時間安定性を保つために、遮蔽磁場の低減が必須課題となっている。低減策の一例として線材の細線化が挙げられ、先行研究[2]にて遮蔽磁場低減に対し一定の効果が示されている。そこで今回は 200mmφ, 10T 級均一磁場発生コイルを対象として、線材の細線化の効果について解析・評価したので報告する。

### 2. 電磁場解析

解析対象となるコイルの諸元を Table 1, 概略図を Fig. 1 に示す。このコイルは、中心磁界強度を 9.4 T±0.2 %, 100 mm DSV において磁界均一度 10 ppm 以下の設計仕様に対して、線材幅 5 mm, 基板層 75 μm, 銅層 20 μm, REBCO 層 2 μm の線材を用いて、巻線使用量を少なくなるように最適化設計したものである[3]。細線化モデルについては、元々 5 mm 幅 1 本だったテープを 2.5 mm 幅 2 本並行で配置した。数値解析には三次元有限要素法と高速多重極法を用い[4], 支配方程式は

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS' = -\frac{\partial B_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

を用いた。

### 3. 結果・考察

コイル電流を 0.1 A/s で 288 A まで励磁し、保持した時の系中心における不整磁場を Fig. 2 に示す。励磁完了時の不整磁場は、線材が 5 mm 幅 1 本の場合では -0.041 T, 2.5 mm 幅 2 本の場合では -0.019 T となっている。細線化を行ったことにより、不整磁場の大きさが半減していることが分かる。また、系の上半分におけるコイル 1~4 が系中心に作る各不整磁場を Fig. 3 に示す。細線化の有無に関わらず、コイル 1 の作る不整磁場のみ正負が反転しており、絶対値比較ではコイル 4 が最大となっている。また励磁完了時には、コイル 1~4 全ての不整磁場が細線化によって半減している様子が見て取れる。このことから今回のコイル設計においては、コイル形状や印加されている磁場分布に依らず、細線化は不整磁場低減効果を有すると考えられる。

Table 1 Specifications of 10-T class small-size model magnet

Coil specifications	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
width (mm)		5		
YBCO thickness (μm)		2		
Hastelloy thickness (μm)		75		
Cu thickness (μm)		20		
Inner radius (mm)	143.766	159.54	100	100
Outer radius (mm)	176.886	310.26	406.24	219.52
height (mm)	48	96	12	72
Turns/Single pancake coil	69	314	638	249
Number of Single pancake coil	8	16	2	12
Total turns	552	5024	1276	2988
Gap between turns (mm)	0.36	0.36	0.36	0.36
Gap between coils (mm)	1	1	1	1
Transport current (A)	288	288	288	288
Magnetic field @ center (T)	9.382			

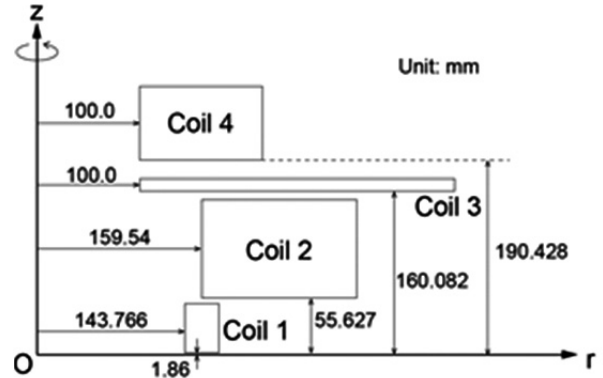


Fig. 1 Optimal design of each coil for the minimum volume under the specific field and the uniformity of field.

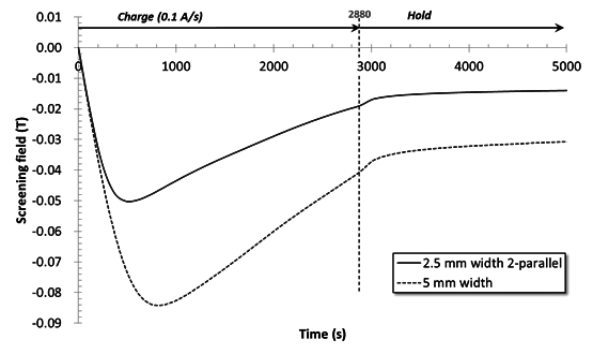


Fig. 2 Irregular magnetic field by all coils at center.

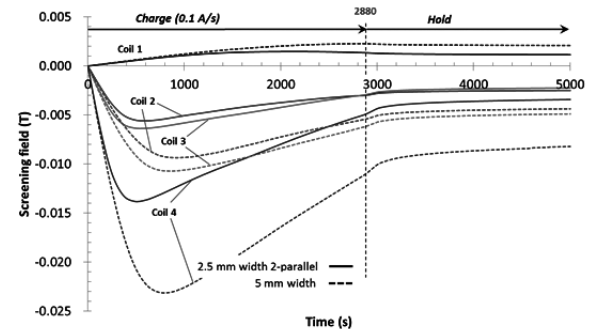


Fig. 3 Irregular magnetic field by each coil at center.

### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<高磁場コイルシステムの研究開発>」を通じて実施された。

### 参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p05.
2. A. Mochida, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 89 (2014) p.66.
3. A. Ishiyama, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 89 (2014) p.153.
4. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23 (2013), 4100805.

# HTS コイル(Bi-2223,REBCO)コイルの負荷率が 外層シムコイルの磁場補正効率に与える効果

Effect of load of HTS(Bi-2223 and REBCO) coils on the performance of an outer shim coil

梶田 健太郎, 井口 聖威也(上智大); 柳澤 吉紀(理研); 濱田 衛(JASTEC);  
松本 真治(NIMS); 高尾 智明(上智大); 前田 秀明(理研)

KAJITA Kentaro, IGUCHI Seiya (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); HAMADA Mamoru (JASTEC);

MATSUMOTO Shinji (NIMS); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: kentaro.kajita@riken.jp

## 1. はじめに

NMR 磁石では、コイル外側に設置した超伝導シムコイルによって磁場の不均一性を補正する。Bi-2223 や REBCO といった高温超伝導(HTS)コイルでは遮蔽電流の影響で、超伝導シムコイルの磁場補正効率(実際の補正能力/補正能力の設計値)が低下することがわかっている[1]。本研究では、400-500 MHz LTS/HTS 磁石に使用された Bi-2223, REBCO コイルの外層に超伝導シムコイルを模擬した銅製の鞍型外層 X シムコイルを設置し、その磁場補正効率を 77 K において検証した。さらに、過去に行った LTS/HTS NMR 磁石(4.2 K)における超伝導シムコイルの磁場補正結果も合わせ、HTS コイルの巻厚が磁場補正効率に与える影響を検討した。これらの結果を踏まえ、実現を目指す小型 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR 磁石において、超伝導シムコイルの磁場補正効率がどの程度低下するのかを検討した。

## 2. 実験方法

Bi-2223, REBCO コイルの諸元を Table 1 に示す。これらのコイルはほぼ同形状である。X 磁場成分を発生する超伝導シムコイルを模擬した鞍型の銅コイルを、HTS コイル外層表面に設置した。この X シムコイルは 1 A あたり 3.7 kHz/cm の X 磁場成分を発生する。HTS コイルを液体窒素で冷却し、通電電流を変えながら、X シムコイルに -12~12 A の電流を流し、HTS コイル中心付近でホール素子をらせん状に移動させながら磁場分布を測定した。得られた分布をルジャンドル関数展開し、X 磁場成分を求めた。

## 3. 実験結果

77 K における実験結果を Fig. 1 に示す。REBCO コイル(○)に比べて、Bi-2223 コイル(△)の方が X シムコイルの磁場補正効率が高い。低、中負荷率では、REBCO コイルの場合 X シムコイルの磁場補正効率はわずか 2~10% であるが、Bi-2223 コイルの場合 18~33% である。この領域では、負荷率上昇に応じて X シムコイルの磁場補正効率が徐々に向上する。80% 以上の高負荷率になると、REBCO、Bi-2223 ともに X シムコイルの磁場補正効率が 40~50% へと顕著に向上した。これは、通電電流が臨界電流に近づいたことで、遮蔽電流が流れる余地が顕著に減少するためである。

## 4. 検討: 1.2 GHz NMR 磁石における超伝導シムコイルの効率

Fig. 1 に示すようにコイル負荷率を横軸にとると、4.2 K における超伝導シムコイルの磁場補正効率[1](REBCO: ●、Bi-2223: ▲)は 77 K における結果とほぼ一致する。これは、外層シムコイルが発生する磁場は、77 K または 4.2 K における線材の完全侵入磁場と比べて非常に小さいためであると考えられる。そこで、X シムコイルの効率  $e$  を、負荷率  $i$ 、フィラメント幅  $w$ 、レイヤー数  $N$  に依存する関数として、下記のフィッティング式を導き、Fig. 1 にプロットした。Bi-2223 線材のフィラメント幅は先行研究[2]で得た知見より 0.9 mm とした。

$$e = \frac{0.0533}{N^{1.5}w} + \frac{75}{N^{1.5}} i + \left( 1 - \left( \frac{0.0533}{N^{1.5}w} + \frac{75}{N^{1.5}} \right) \right) i^{6.75} \quad (1)$$

式(1)を用い、別途設計を行った 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR

磁石[3]における超伝導シムコイルの磁場補正効率を求めた。この磁石の Bi-2223 コイルの総レイヤー数は 320、負荷率は 58% であることを考慮すると、X シムコイルの磁場補正効率はわずか 4.3% となる (Fig. 1 の二点鎖線参照)。Bi-2223 コイルの巻厚が増えたことで遮蔽効果が増し、400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石の場合と同程度の磁場補正効率[1]にまで低下するのである。この場合、超伝導シムコイルのみで、主要な磁場不均一性の調整を行うのは難しく、鉄シムが必要となる。

## 5. まとめ

HTS コイルを高負荷率で使用すれば、外層シムコイルの磁場補正効率を向上させることができる。

1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR 磁石では、超伝導シムコイルのみによる磁場補正は難しく、鉄シムが必要になる。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

Table 1. Specifications of a Bi-2223 coil and a REBCO coil

	Bi-2223	REBCO
Conductor	SEI, Ltd	Fujikura Ltd
Bare conductor width / thickness(mm)	4.55 / 0.36	5 / 0.15
Total conductor length (m)	1178.7	1748.8
Winding	Layer winding	Layer winding
Coil i.d. / o.d.(mm)	81.2 / 121.0	81 / 118.7
Coil length (mm)	375.23	400
Total turns	3870	5575.1
Number of layers	48	72
Coil $I_c$ at 77 K, 1 $\mu$ V/cm (A)	48.6	64.6
Coil n-value at 77 K	13	31
Self-inductance (mH)	312.8	602.5
Impregnant	Paraffin wax	Paraffin wax

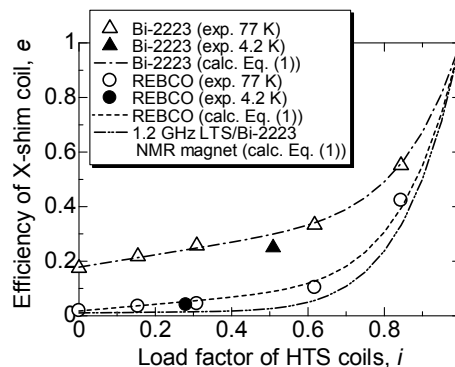


Fig.1 Efficiency of a X-shim coil vs. load factor of an HTS coil.

## 参考文献

- [1] 柳澤他, 2014 年度春季低温工学・超伝導学会, 1A-p01
- [2] Xu et. al., ASC2014 preprint, 4LPo2C-06
- [3] 井口他, 2014 年度秋季低温工学・超伝導学会, 3B-p04

## 超電導バルク材を用いた磁気軸受 Magnetic Bearing of Bulk-Annulus Magnets

福本 祐介, 富田 優(鉄道総研)  
FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (RTRI)  
E-mail: fukumoto.yusuke.68@rtri.or.jp

### 1. はじめに

近年、世界中で超電導ケーブルの研究開発が活発に行われている。超電導ケーブルの冷却システムを構成する機器において、冷媒の循環ポンプは非常に重要な機器であり、メンテナンスなどで停止するとシステムの冷却が困難となる。この循環ポンプに使用されている遠心ポンプは、常温に配置したモーターで低温部のシャフト、インペラを回転し、その遠心力で送液する構造であるが、シャフトを長くすると軸が振れるため低温部に軸受が必要となる。低温部では潤滑油が使用できず、軸受のメンテナンス周期が短くなる問題がある。そこで我々は、低温中に配置されることに着目し、超電導バルク材を用いた磁気軸受を試作し、荷重試験を行った。

### 2. 磁気軸受の構造

試作した磁気軸受の構造を Fig.1 に示す。シャフトに永久磁石を組み込み、同極が対向しているヨーク部において高い磁場値、磁場勾配が発生している。この部分に円環状に加工した超電導バルク材[1]を配置し、磁場を捕捉することで安定した磁気浮上を得ることができる(Fig.2)。

### 3. 荷重試験

大きな磁場勾配を有する磁石対向部において超電導バルク材を着磁し、軸方向に荷重を加えた場合に生じる磁気力の測定値と解析値を Fig.3 に示す。磁場を捕捉している超電導バルク材に外部磁場が働いた場合の磁気力は、捕捉磁場と外部磁場の差および磁場勾配の積に依存するため、磁気力は変位量に従い緩やかに増加する。測定値と解析値の差は、超電導バルク材が永久磁石の磁場中を移動することで捕捉磁場値が変化しているためだと考えられる。

超電導バルク材と永久磁石のギャップ長を少なくし磁場勾配を大きい箇所へ超電導バルク材を配置することや、超電導バルク材の個数を増やすことで磁気力を高めることができる。

### 謝辞

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

### 参考文献

1. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.168

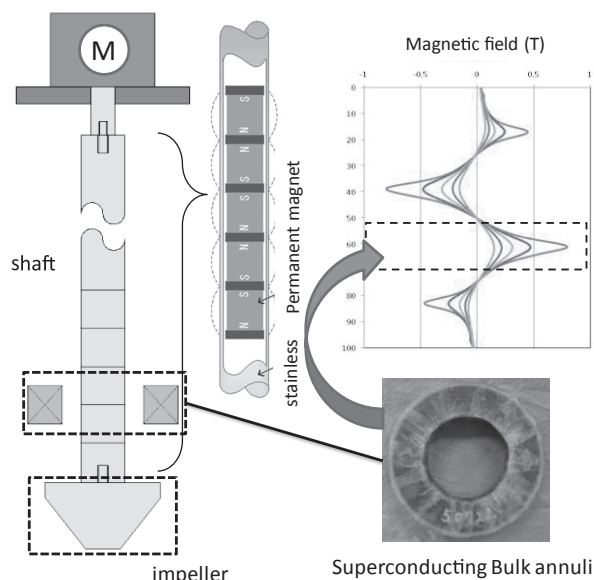


Fig.1 Structure of Magnetic bearing

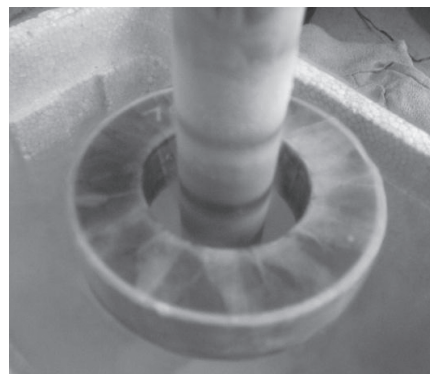


Fig.2 Stable levitation by flux pinning

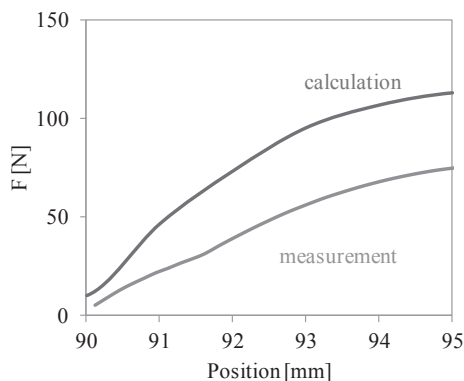


Fig.3 Comparison in the axial load test

# 磁気アルキメデス効果を用いた都市鉱山からの有価資源の回収 Re-collecting value resources from urban mine by Magneto Archimedes Effect

松浦 優也, 三浦 大介, 安齋 達貴, 佐藤健太(首都大)  
 MATSUURA Yuya, MIURA Osuke, ANZAI Tatsuki, SATO Kenta (Tokyo Metropolitan University)  
 E-mail: matsuura-yuuya@tmu.ac.jp

## 1. はじめに

都市鉱山とは、廃棄された携帯電話・パソコンなどの部品に含まれた貴金属等の有価資源を採掘可能な資源とみなそうとする概念である。都市鉱山という観点からみると、日本は世界有数の資源大国であり、その有価資源を回収しようと様々な試みがなされている。その試みのひとつとして磁気アルキメデス効果[1]を使うことが考えられる。磁気アルキメデス効果とは、大きな常磁性をもつ媒質中に物質を分散させ、磁場勾配をかけることで磁化率と密度の差により、物質がある決まった高さに浮上静止するというものである。この特徴をうまく利用すれば様々な混合物から該当物質のみを選択的に分離・回収できる可能性がある。本研究では磁気アルキメデス効果を用いて様々な混合物から有価資源を選択的に回収することを検討する。

## 2. 磁気浮上のシミュレーション

真空の透磁率  $\mu_0$  [H/m]、重力加速度  $g$  [m/s<sup>2</sup>]、磁束密度  $B$  [T]、溶液の密度  $\rho_f$  [kg/cm<sup>3</sup>]、磁化率  $\chi_f$  [-]、また被分離物質の密度  $\rho_p$  [kg/cm<sup>3</sup>]、磁化率  $\chi_p$  [-] とすると、磁気アルキメデス効果により浮上静止する条件は以下の式、

$$\frac{\chi_f - \chi_p}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} + (\rho_f - \rho_p)g = 0 \dots (1)$$

で求まる。

実験で使用する 10T 超伝導マグネットの磁場分布、溶液として使用する塩化マンガン(II)  $MnCl_2$  水溶液と被分離対称物質の密度(文献値)、及び磁化率(SQUID により実測定)により、浮上する位置の理論値を(1)式より計算で求めた。

また、密度を固定したときの磁化率による浮上位置の差、磁化率を固定したときの密度による浮上位置の差を密度 2~20 g/cm<sup>3</sup>、磁化率  $-10^{-2}$  ~  $-10^{-6}$  の範囲で計算しグラフにした。

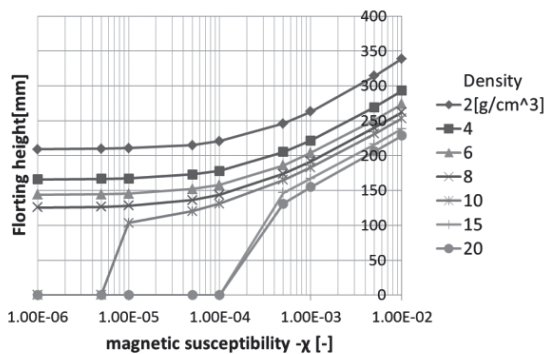


Fig.1 Magnetic susceptibility dependence of floating height at 10T

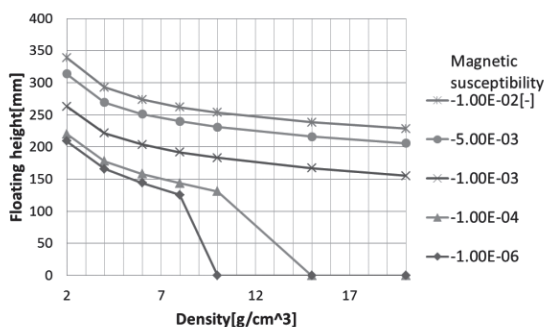


Fig.2 Density dependence of floating height at 10T

## 3. 実験方法

水に塩化マンガン(II)を溶かした塩化マンガン水溶液を製し、被分離物質と水溶液をメスシリンダーにいれる。磁場 10 T をかけた超伝導マグネットのボア内にメスシリンダーを挿入し、CCD カメラで浮上位置を観察した。

被分離物質は金、塩化銀、酸化パラジウム、銅、パラジウム、白金の 6 種について実験を行い、金は 50 wt%、その他の金 33 wt%の塩化マンガン水溶液で実験を行った。

## 4. 実験結果

浮上実験の結果を以下の表に示す。

Table.1 Floating experimental results

	B · dB/dz [T <sup>2</sup> /m]		Floating position [mm]	
	calculated value	experiment value	calculated value	experiment value
Gold	-379.79	-328	117.5	128
Silver chloride	-196.57	-148	153	164
Palladium oxide	-308.25	-230	132	146
Copper	-358.51	-240	122	144
Palladium	237.29	-	0	0
Platinum	-1799.69	-	0	0

また、金は顕微鏡で見ると多孔質であり空気を含んでしまうためそのままと浮上にばらつきが生じてしまっていたが、粉末にした金は一定の高さに浮上静止した。

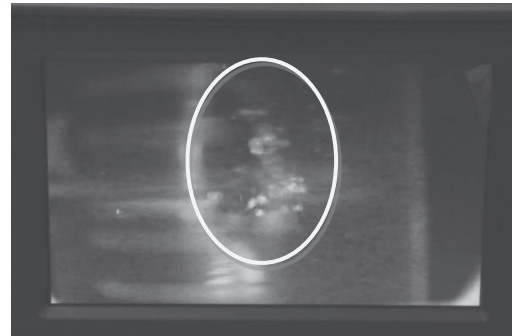


Fig.3 Floating gold powder

## 5. まとめ

浮上した金属について、実際の浮上位置と計算で求めた浮上位置を比べると、概ねの傾向は一致していたが、実験結果の方が 10~20 mm 低い値が出ていた。これは、金属の純度による密度の差や気泡・静電気力の影響、マグネットの径方向の磁場の变化等が原因であると考えられる。

また、パラジウムとプラチナは浮上せず沈んだままであったが、計算結果でも浮上しないことが確認できた。

実験により、被分離物質はパラジウムとプラチナを除いてそれぞれ違う場所に浮上静止したので、これらの混合物から対象とする物質だけを一度に分離回収することが可能であるといえる。

## 参考文献

[1] Y.Ikezoe, N.Hirota, J.Nakagawa, K.Kitazawa, "Making water levitate," Nature 393, 749-750(1998)

## 炭素系廃棄物からの磁性活性炭の調製と磁気分離応用 The preparation of the magnetic activated carbon from carbon-based waste and the magnetic separation study

安齋 達貴, 松浦 優也, 佐藤 健太, 三浦 大介 (首都大学東京)  
ANZAI Tatsuki, MATSUURA Yuya, SATO Kenta, MIURA Otsuke (Tokyo Metropolitan University)  
E-mail: anzai-tatsuki@ed.tmu.ac.jp

### 1. はじめに

活性炭には有効な吸着作用があり高度浄水処理工程の一部にも含まれている。活性炭の原料としては木炭、ヤシ殻炭、石炭が多く使われているが、一般的に製品化されていない炭素系の廃棄物からも同様に効果的な活性炭を作製できる可能性がある。

そこで、本研究では籾殻とコーヒー粕に担磁処理及び賦活熱処理によりメソ孔と強磁性体であるマグネタイトを精製させた、磁性活性炭(MAC= Magnetic Activated Carbon)を作製し、磁化特性を調査して磁気分離応用への検討をした。また、MACの吸着特性として、トリハロメタン前駆体であるフミン酸の水中からの除去性能を調査した。

### 2. 磁性活性炭の作製

籾殻及びコーヒー粕に対し硝酸鉄を含浸させた後、 $N_2$ と $CO_2$ によるガス賦活熱処理を行い、マグネタイトを生成させることで磁化を持つ磁性活性炭を作製できる。作製条件として、硝酸鉄濃度と含浸時間をTable.1のようにしたところ、飽和磁化はFig.1に示すように硝酸鉄濃度に依存することが分かり、1 Tの印加磁場において籾殻MACは22.2 emu/g、コーヒーMACは66.3 emu/gの最大飽和質量磁化を持った。

Table.1. Making condition of MAC

	硝酸鉄濃度 [mol/L]	含浸時間 [h]	原料
MAC1-1	0.4	1	籾殻
MAC1-2	0.8	3	
MAC1-3	1.6	3	
MAC2-1	0.4	1	コーヒー粕
MAC2-2	0.8	3	
MAC2-3	1.6	3	

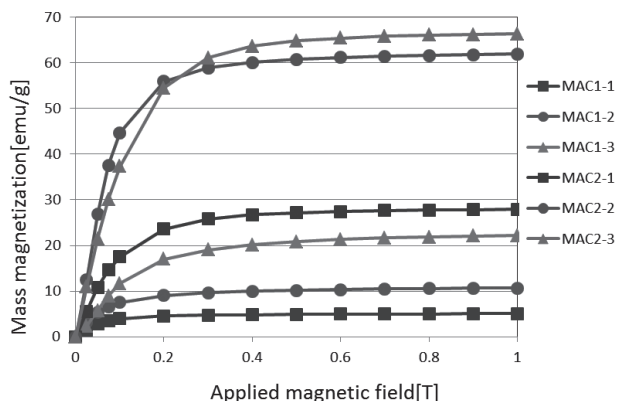


Fig.1. Magnetization characteristic of MAC

### 3. フミン酸への吸着特性

従来活性炭は細孔がナノ孔(~2 nmの細孔)であるために、水中の高分子のフミン酸に対しての吸着能力を持たない。活性炭に $CO_2$ ガス賦活熱処理を行うことで、ナノ孔がメソ孔(2~50 nmの細孔)へ拡大する。これにより孔径をフミン酸と同等の大きさにすることで、活性炭はフミン酸を物理吸着する事が可能になる。<sup>[1]</sup>

フミン酸溶液にMACを添加させた後、永久磁石による簡易磁気分離及び濾過により溶液とMACを分離し、溶液の残留濃度を分光光度計によって計測することで吸着性能を確認した。籾殻MACは20分で吸着量が飽和し、溶液に対し5000 mg/LのMACを添加し十分な時間攪拌したときに最大97.6%の高いフミン酸除去性能を示した。コーヒーMACは攪拌中に内部の成分が溶け出し、溶液を濁らせてしまったために吸着性能を確認できなかった。

### 4. 磁気分離実験

作製したMACの磁気分離性能を、超伝導磁石による高勾配磁気分離を用いた実験により調査した。イオン交換水に50 mg/Lの割合でMACを添加した試料水10 Lを用い、1 Tの磁場を形成した超伝導磁石内に直径100  $\mu$ mの磁性細線フィルタを装填し、そこに流速1 m/sで送り込んだ。この超伝導磁石から排出される試料水に残留したMACの量を測定することで漏れ率を算出した。吸着実験により、吸着剤として有効であった籾殻MACについて磁気分離実験を行ったところ、質量磁化22.2 emu/gのMAC1-3は試料水10 Lに対して、8 L以内では破過量が測定不可であり、総破過量が2.00 mg、漏れ率は0.40%であった。

### 5. まとめ

籾殻、コーヒー粕といった炭素系の廃棄物から同様の条件でMACを作製したときの、原料の違いによる磁化特性や吸着特性の違いを調査することで磁性吸着剤としての向き不向きを確認できた。コーヒーMACは磁化を持ちやすい反面、成分が吸着効果に悪影響を与えるため吸着剤としての使用が困難であるが、籾殻MACはフミン酸を最大97.6%除去でき吸着剤として十分に使用できると考えられる。また、飽和質量磁化22.2 emu/gのMACは1 Tで漏れ率0.40%と小さく、十分に磁気分離可能であると考えられる。更に、磁化特性と吸着特性からこの2つのパラメータはトレードオフの関係にあることが分かった。

### 参考文献

- [1] K.Kondo, T.Jin, O.Miura, "Removal of less biodegradable dissolved organic matters in water by superconducting magnetic separation with magnetic mesoporous carbon," Physica C 2010
- [2] T. Ogata, O. Miura, "Removal of Humic Substances and Ammonia Nitrogen in Water by Superconducting Magnetic Separation and Magnetic Activated Carbon," Applied Superconductivity, IEEE Transactions on (Volume:24, Issue:3)



## TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発⑨ (通電特性と電流分布の評価)

### Development of current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes ⑨ (Transport performance and current distribution of HTS current lead)

松村 亮佑, 細野 優人, 谷本 椋亮, 山田 豊(東海大);

引地 康雄, 箕輪 昌啓, 小泉 勉(昭和電線ケーブルシステム); 田村 仁, 三戸 利行(核融合科学研究所)

MATSUMURA Ryosuke, HOSONO Yuto, TANIMOTO Ryosuke, YAMADA Yutaka, (Tokai University);

HIKICHI Yasuo, MINOWA Masahiro, KOIZUMI Tsutomu (SWCC); TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail:4bazm020@mail.tokai-u.jp

#### 1. はじめに

前報 TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発⑧では、作製した 2 kA 級超電導電流リードユニットを 4 組集合させた集合型超電導電流リードの通電特性及び熱侵入量を評価した。本報では、新たに作製した 2 kA 級超電導電流リードの通電特性と、ログスキーコイル及びホール素子を用いて電流分布を評価したので報告する。

#### 2. 実験方法

TFA-MOD 法により作製した YBCO 線材は、幅 5 mm、厚さ約 110  $\mu\text{m}$  (Hastelloy substrate: 100  $\mu\text{m}$ , YBCO layer: 1.5  $\mu\text{m}$ , Ag layer: 6  $\mu\text{m}$ ) である。77 K における臨界電流:  $I_c$  値 150~180 A の YBCO 線材を 2 枚 1 組で重ね合わせ、それらを並列に表裏各 4 列(計 16 本)等間隔に配置した。Fig. 1 に試作した電流リードの外観及び模式図を示す。YBCO 線材両端を Cu 電極にハンダ接合し、2 枚のステンレス鋼板を、シャントを兼ねた補強材として用いた。電流リード全体の発生電圧  $V_{\text{Overall}}$ 、Cu 両電極と YBCO 線材間の発生電圧  $V_{\text{Cu}(+)}$  及び  $V_{\text{Cu}(-)}$ 、YBCO 各線材の発生電圧  $V_{\text{YBCO}}$  (電圧端子間距離: 170 mm) を測定した。

巻き数 3000 のログスキーコイルを 2 枚 1 組の各線材に装着し、電流スイープ時の起電力を測定することで YBCO 線材の電流分布を評価した。また、市販の廉価なホール素子を個別に特性を測定後、各線材に取り付けた。さらに YBCO 線材を 1 本ずつ切断し、その前後の  $I_c$  値から各素線  $I_c$  値と電流リード全体の電流分布を調査した。通電試験は核融合科学研究所において行った。

#### 3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に電流リードの通電結果 (@77 K, s. f.) を示す。液体窒素中・自己磁場下において 1.9 kA の通電を達成した。1.6 kA 通電時に、一部の YBCO 線材に電圧発生が見られ、1.91 kA 通電時にクエンチした。 $V_{\text{Cu}(+)}$  及び  $V_{\text{Cu}(-)}$  は通電電流に伴いほぼ直線的に増加し、1.8 kA 通電時の  $V_{\text{Cu}(+)}$  は 0.75~0.93 mV、 $V_{\text{Cu}(-)}$  は 1.02~1.21 mV となった。この時点の接続抵抗は、 $V_{\text{Cu}(+)}$  側では 0.42~0.52  $\mu\Omega$ 、 $V_{\text{Cu}(-)}$  側で 0.57~0.67  $\mu\Omega$  に相当し、 $V_{\text{Cu}(-)}$  の接続抵抗がやや高いものの、低抵抗の接続ができた。

Fig. 3 に作製した電流リードの電流分布評価結果を示す。YBCO 線材を 1 本ずつ切断した前後の  $I_c$  値から判明した各線材の  $I_c$  値の合計とログスキーコイル及びホール素子より推定した電流値の合計を比較した。ログスキーコイル及びホール素子より推定された電流値と、切断した前後の各線材の合計  $I_c$  値との差は、ログスキーコイルの場合、-73~+85 A で、平均では -10 A とログスキーコイルの評価値の方がやや低かった。一方ホール素子の場合、-4~+114 A で、平均 +67 A とホール素子の評価値の方がやや高かった。また、2 枚 1 組表裏 4 列計 16 本の YBCO 線材の中で、ほとんど電流が流れなかったと推定される線材が 3 本認められた。接続抵抗が特別に高いことはなく、その要因は明らかでない。ログスキーコイルとホール素子を用いて電流リード内の電流分布をある程度定量的に評価できた。

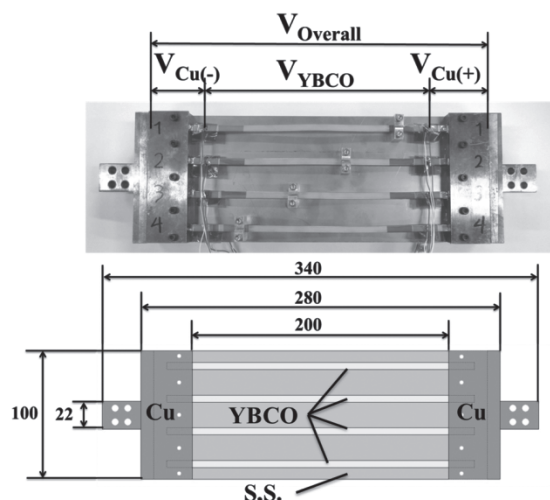


Fig. 1 YBCO Superconducting current lead.

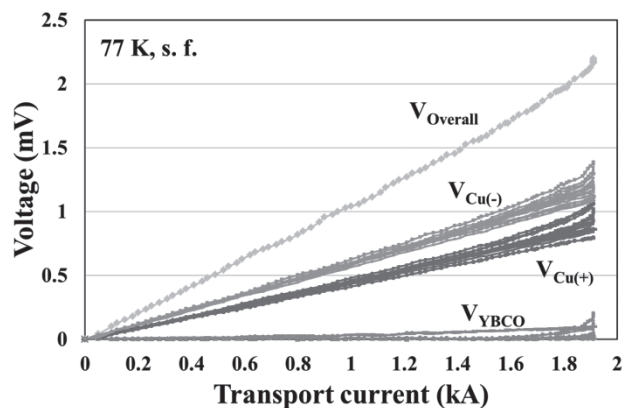


Fig. 2 Transport current performance of the current lead (@77 K, s. f.).

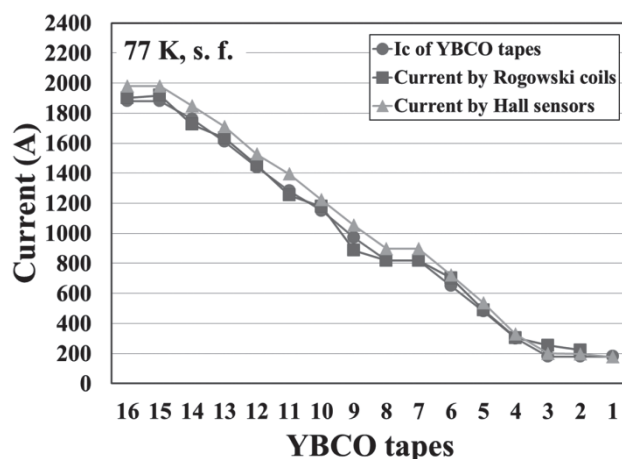


Fig. 3 Current distribution of the current lead.

## nPAD-YBCO<sup>®</sup>電流リードの機械的特性②

### Mechanical properties of nPAD-YBCO<sup>®</sup> current lead②

高橋 亨, 木村 一成, 引地 康雄, 箕輪 昌啓, 小泉 勉(昭和電線); 山田 豊(東海大)

TAKAHASHI Kyo, KIMURA Kazunari, HIKICHI Yasuo, MINOWA Masahiro,  
KOIZUMI Tsutomu (SWCC); YAMADA Yutaka (Tokai University)  
E-mail: k.takahashi043@cs.swcc.co.jp

#### 1. はじめに

超電導線材を利用した応用機器は、外部電源と極低温の真空容器内の応用機器とを繋ぐ電流リードが必要である。電流リードは電力供給だけでは無く、熱流入を出来るだけ防止することが求められる。しかし、銅を用いた電流リードでは熱侵入量が多く冷却コストが高いという問題点があるため、超電導体を用いた電流リードが開発されている。

超電導電流リードは外部磁場がかかる場所に設置されることが多いため、磁場中での特性が優れている超電導体を用いることで、使用線材の本数を減らし、熱侵入量の低減と小型化が可能となる。そこで我々は、磁場中での特性に優れたnPAD-YBCO<sup>®</sup>を用いて、通電容量や熱侵入量を改善した電流リードを開発した。

使用環境を想定し、超電導線材の機械特性や熱履歴に対する耐久性に加えて、電流リードの機械的特性の把握を進めてきた。さらに、磁場中で使用する事を想定し、ローレンツ力の影響を調査した。本報では、500A仕様nPAD-YBCO<sup>®</sup>電流リードの引張試験・片持ち曲げ試験を行った結果と応力解析を基に超電導線材の繰り返し引張試験を行うことにより、ローレンツ力の影響を推定した。

#### 2. 実験方法

線材は、幅 5mm、厚さ約 120 $\mu$ m (Hastelloy substrate: 100 $\mu$ m、REBCO layer: 1.5 $\mu$ m、Ag layer: 10 $\mu$ m)の構成とした。シミュレーションモデルは、1本の超電導線材の両端にCu電極を接合した構成とし、電極間距離100mm、接続部分を含めた全長は150mmとした。端部はボルトで超電導機器と繋げるため完全固定として解析を行った。また、メッシュ作成にはGAMBIT、応力解析にはADINAを使用した。nPAD-YBCOのテープ面に対して垂直にローレンツ力がかかった場合とテープ面に対して平行の2通りで解析を行った。外部磁場は、超電導マグネット近傍に設置される際に想定される0.7Tとした。ここで、超電導線材1本当たりに流れる電流値を125Aと仮定した。

応力解析の結果から得られた線材にかかる引張応力を基に印荷する応力を設定し、繰り返し1000回印荷し $I_c$ の変化を確認した。n数は3で行った。尚、引張試験機はShimadzu AG-100kND、つかみ具間距離は100mm、引張速度1mm/minとした。

引張試験・片持ち曲げ試験には500A仕様nPAD-YBCO<sup>®</sup>電流リード(温度範囲77K-4.2K、外部磁場0T、熱侵入量0.05W/本)を用いた。超電導電流リードの構成は4本の超電導線材を使用し、2枚を重ね合わせ、これを2列に並列配置した。両端をCu電極にはんだ接合後、GFRP製支持部材で補強して超電導電流リードとした。いずれも、液体窒素中で $I_c$ 測定後、引張・曲げ歪を室温で印荷し除荷後に $I_c$ ・接続抵抗の変化を確認した。

#### 3. 実験結果及び考察

想定される外部磁場である0.7Tでの応力解析を行った結果をFig.1に示す。Fig.1の(a)にテープ面に対して垂直にローレンツ力が印荷された場合、(b)にテープ面に対して平行にローレンツ力が印荷された場合の結果を示した。この結果から、ローレンツ力の働く向きに関わらず線材のハンダとの接続近傍の引っ張り応力が高くなった。この場合の線材に

かかる最大引張応力は(a)では0.14GPa、(b)では0.16GPaであった。

最大引張応力である0.16GPaの約3倍にあたる0.6GPaを繰り返し1000回印荷し $I_c$ の変化を確認した結果をFig.2に示す。 $I_c$ の低下が見られないことから、nPAD-YBCOは、外部磁場0.7T中で印荷されるローレンツ力に充分耐えうる強度を有していると推定される。これは、超電導線材の基盤にHastelloyを使用しているため高強度であるといえる。

尚、nPAD-YBCO<sup>®</sup>電流リードの引張試験・片持ち曲げ試験を行った結果は講演にて報告する。

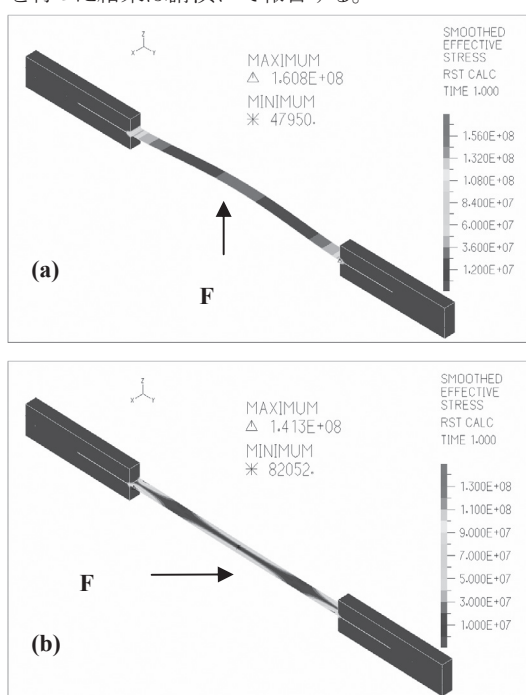


Fig.1 Stress analysis results of nPAD-YBCO current lead (a)  $B \perp ab$  (b)  $B // ab$

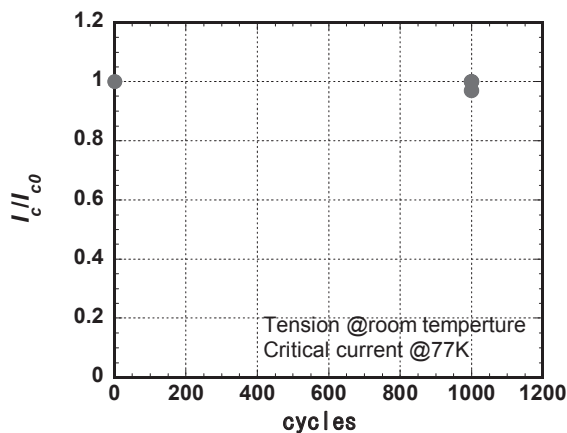


Fig.2 Change of the normalized critical current as a function of the cyclic number for nPAD-YBCO

#### 参考文献

1. K.Takahashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.171

## 20MVA 級超電導変圧器の限流機能についての検討

### Investigation of current limiting function of 20MVA class superconducting transformers

大坪 祐平, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓 (九州大学); 富岡 章, 今野 雅行 (富士電機); 五所 嘉宏, 江口 徹, 林 秀美 (九州電力); 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ); 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)  
 OTSUBO Yuhei, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.); TOMIOKA Akira, KONNNO Masayuki (Fuji Electric Co. Ltd.); GOSHO Yoshihiro, EGUCHI Toru, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co., Inc.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)  
 E-mail: otsuboy@sc.kyushu-u.ac.jp

#### 1. まえがき

超電導を電力機器に応用することにより、超電導体の低損失、高電流密度といった性質から、機器の小型・軽量・高効率化が期待されている。また、我々はこれまで、REBCO 超電導巻線を使用した変圧器において、突発短絡時に巻線が常電導転移して高抵抗となることに着目し、この高抵抗を利用した限流機能付き超電導変圧器の研究をおこなってきた。

今回、限流機能が発揮される際の、変圧器の応答特性をより詳細に調べることを目的とし、変圧器の鉄心の大きさと巻線の安定化材の厚さを変化させ、変圧器の突発短絡時の応答特性の解析を行った。

#### 2. 変圧器の設計

Fig.1 に変圧器の構造図を示す。これは変圧器の垂直方向の断面図であり、変圧器は一次巻線を二次巻線で挟む構造となっている。また、Table.1 に変圧器の諸元を示す。巻線は REBCO テープ線材を並列したものを使用し、一次巻線は 1本あたり 3 並列、二次巻線は 1本あたり 24 並列とした。また、パーセントインピーダンス %IZ は、実際の系統における 20MVA 級常電導変圧器のものと同等の 15%とした。

%IZ の式は次のように表される[1]。

$$\%IZ = 0.395 \frac{Pl_m [\alpha + (d_1 + d_2)/3] 2f}{sqe^2 h/k} \frac{2f}{100} [\%] \quad (1)$$

ここで、 $P$ :容量、 $l_m$ :巻線平均長、 $\alpha$ :巻線間間隔、 $d_1$ 、 $d_2$ :一次および二次巻線の幅、 $h$ :巻線高さ、 $k$ :磁束通路高さに対する補正係数、 $s$ :脚数、 $q$ :漏れ磁束通路数、 $e$ :1 ターンあたりの電圧である。さらに  $e$  は鉄心断面積  $S$  をもちいて次のように表される。

$$e = 4.44 fBS \quad (2)$$

ここで、巻線間間隔を定めてしまえば、変圧器の寸法は鉄心の大きさと巻線の幅によって決まることになる。そこで、今回は鉄心半径と、巻線の安定化材の厚さをパラメータとし、変圧器の設計をおこなった。その後、設計した超電導変圧器の、突発短絡時の応答特性を解析した。

#### 3. 数値解析

まず、有限要素法解析ソフトによる磁場解析をおこない、その後、定量的に妥当性が証明された、フラックスフローを考慮した数値解析プログラムによって、突発短絡時の変圧器の応答特性を解析した。

Fig.2 に安定化を厚さ 300um の銅に設定し、鉄心半径を 130mm から 230mm まで増加させた際の、突発短絡から 0.2 秒後の一次側短絡電流の解析結果を示す。短絡電流は鉄心半径の増加とともに単調に減少していることが確認できた。

当日には、短絡電流以外の応答特性の解析結果に加え、応答特性の、鉄心半径と安定化材に対する依存性を検討したものを発表する。

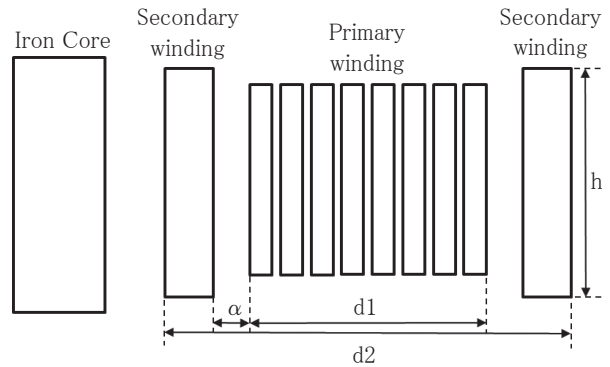


Fig.1 Cross section of 20MVA-class superconducting transformers

Table.1 parameter of 20MVA-class superconducting transformers

Phase	3 φ
Capacity	20MVA
Superconducting wire	REBCO tape
Voltage (Prim. /Sec.)	66kV/6.9kV
Current (Prim. /Sec.)	303A/2898.6A
Frequency	60Hz
Conductor (Prim. /Sec.)	3 parallel / 24 parallel
%IZ	15%
B	1.4T

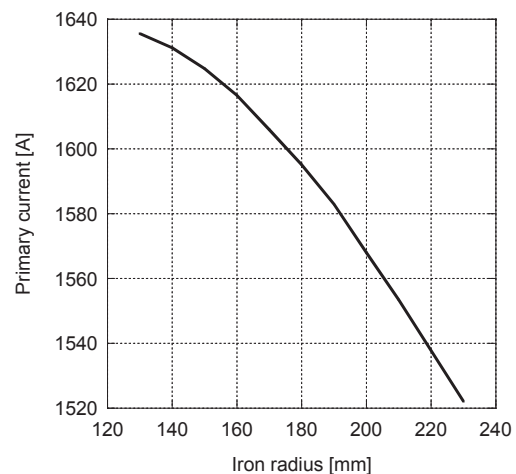


Fig.2 Primary current 0.2s after sudden short circuit

#### 参考文献

1. 大川 登, 前川 定: 変圧器 (1968) p171-180

# 薄膜型限流素子の電位・温度分布変化の可視化

## Visualization of voltage and temperature distribution change of a thin film type current limiting element

宮下 隼貴, 西原 太一, 星野 勉(明星大); 馬場 旬平(東大)

MIYASHITA Hayaki, NISHIHARA Taichi, HOSHINO Tsutomu (Meisei Univ.); BABA Jumpei (Univ. of Tokyo)

E-mail: 14m4001@stu.meisei-u.ac.jp

1. **はじめに** 薄膜型限流器を構成するには, 多数の素子を直列接続することになる. その際, 各々の素子特性, 特に温度上昇を把握して, 組み合わせる必要がある. これまで, 限流素子の通電方向の電位と, 温度を同時に測定することで, その相関性を見出す試みを行ってきた [1]. 電位測定のみで, 限流器を構成, 設計するための素子情報を得るためである. 今回, 通電領域軸と時間軸の平面に, 電位差と温度の等高線図を各々描くことにより, 両者の関係性を直感的に把握できるようにしたので, その概要を報告する.

2. **可視化による特性把握** 限流動作時に, 素子温度がどこまで上がるか, 発熱量が所定時間内に除去出来るか, 端子電圧が過大にならないか, 等が設計する上で重要である. 個々の素子について, すべての項目を測定するのは, 煩雑である. そこで素子の電位分布から, 設計に用いるパラメータを推定しようとするものである. これまで商用周波数における限流動作の測定が行われ [2], 動的抵抗の推定式も提案されている [3]. 今回電気的, 熱的過渡特性を無視するため, 125 mHz という低周波数の正弦波電流を用いて測定を行った.

3. **測定条件** 供試素子は,  $210 \times 30 \times 1$  の形状で, 両端 10 mm に Au 電極が蒸着されている. 1 端から電極を除いて, 20 mm 毎の領域に区切った. Fig.1 に示すように, 通電膜側の領域境界に電位プローブ  $v_a \sim v_f$  を配し, 基板側の領域中心に温度プローブ  $T_1 \sim T_5$  を配した. 素子を液化窒素浸漬冷却し, 振幅 87 A, 位相 0 の正弦波電流を 1 周期通電した. 素子に流れる電流が 76 A に達した時に (1.6 s), 素子は常電導転移を開始し, 限流動作に入った. 温度プローブは T 型熱電対を用い, 冷媒の窒素を温度定点とした. 各領域の電位差を熱電対の熱起電力と, ショット抵抗で電圧信号にした直流電流と共に記録した. また, 電位プローブ  $v_d$  は接触不良であったので, 領域 3, 4 は同じ値に案分した.

4. **電位差及び温度の等高線表示** これまで, 各領域の電位差, 温度の時間変化をグラフ化してきた. それらのグラフでは, 電位差と温度の相関が明瞭には把握できなかった. そこで領域と時間平面状に, 電位差や温度の等高線を描くことで, 分布変化の可視化を試みた.

Fig.2 に単位長あたりの電位差の等高線図を示す. 通電開始から 1.6 s までは, 限流動作していないため, 各領域とも電位差は現れていなかった. 限流動作に入ると, 領域 2 にまず電位差が生じ, 周辺の領域に広がっていく様子が見て取れた. 2 s を過ぎて, 電流の減少に伴って電位差も少なくなっていた.

Fig.3 に温度の等高線を示す. 温度の変化は電位差の変化よりゆっくりだが, 1.6 s から領域 2 で温度が上昇を始めた. 領域 2 での発熱が周辺の領域に伝搬し, その領域でも発熱していたと考えられる. 供試素子では, 領域 2 に常電導域がまず発現し, 拡大していく様子が把握できる.

5. **おわりに** 実験結果より, 電位差が拡大した後, 温度が上昇しており, 温度が第 2 領域から他の領域に伝達していく様子が確認できた. また, 電位差が一番高い領域と温度が一番高い領

域が同じことが分かり, 電位差と温度の 2 つの間に相関性があることが示せた. 両者を可視化, 等高線図により直感的に把握することができた.

現在, 電位, 温度の同時測定の定形化のために, 電位プローブの最適化を行った. 今後, 温度プローブの最適化も行い, 繰り返し測定を行えるようにする.

### 参考文献

1. T. Nishihara, et. al.: ACASC2013, 196 (2013.10.24) 139
2. M. Mori. et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 3 (2011.6) 1217-1220
3. K. Hattori. et. al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 23, 3 (2013.6) 5602005

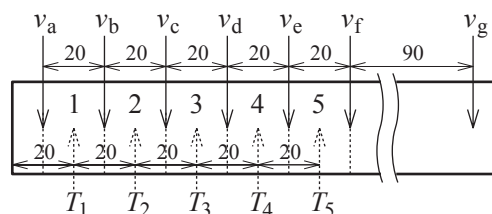


Fig.1 Positions of potential and temperature probes.

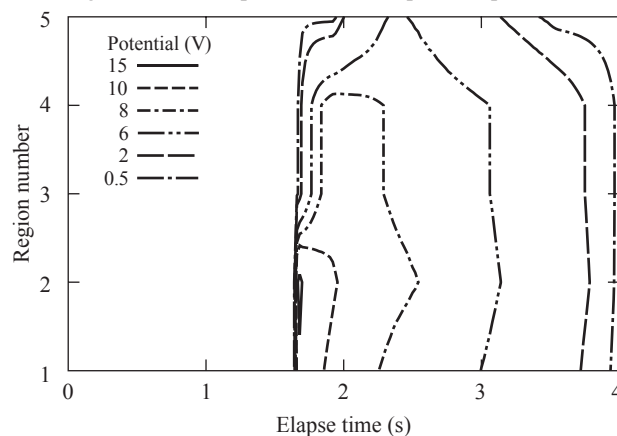


Fig.2 Contour map of the potential.

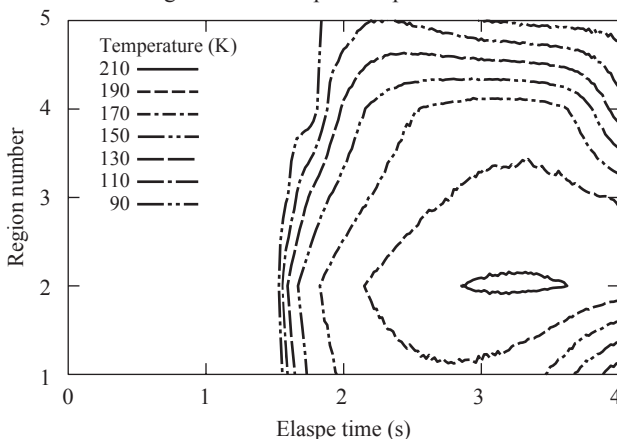


Fig.3 Contour map of the temperature.

## 洋上風力用 15MW 級 Y 系全超電導同期発電機の設計検討

Study on the design of 15MW REBCO fully superconducting generator for offshore wind power system

猿渡 将貴, 岩熊 成卓(九州大学); 長谷 吉二, 富岡 章(富士電機);  
和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

SARUWATARI Masaki, IWAKUMA Masataka (Kyushu University);

HASE Yoshiji, TOMIOKA Akira(Fuji Electric)

IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(ISTEC)

E-mail: masaki@sc.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

洋上風力発電は安定して強い風力が見込める一方で、浮体の建造コストや発電機の重量が問題となるため、大容量かつ軽量の発電機が求められる。発電機を超電導化し、空心構造にすることで磁気装荷の制限がなくなり、発電機を同寸法で大容量化、もしくは発電機を同出力で小型化することが可能である。これまで超電導回転機の研究は回転子の界磁巻線に直流超電導体を適用するタイプが主流であった。界磁巻線に加え、固定子の電機子巻線にも交流超電導体を適用することで更なる軽量化、小型化が可能である。

## 2. 風力用 15MW 級 Y 系全超電導同期発電機の設計検討

同期発電機の容量は電気装荷と磁気装荷の積に比例する。電気装荷は起磁力、すなわち巻数と電流の積に比例し、磁気装荷はギャップ磁束密度  $B_g$  と回転子直径、有効長の積に比例する。超電導界磁子は鉄心の飽和磁束 1.7T 以上の高磁場化が容易に図れるため、鉄心を使わない巻線構造とし、 $B_g$  をより高くすることで回転子直径や有効長を小さくすることが可能である。同時に無鉄心化による軽量化と銅損の低減による高効率化も期待できる。本研究では、回転子直径と  $B_g$  をパラメータとして界磁巻線、電機子巻線を共に超電導化した全超電導同期発電機を概念設計し、数値解析により超電導界磁コイル・超電導電機子コイルの通電特性や発電機の重量・寸法を比較検討した。

## 3. パラメータ設定および数値解析

解析は電磁場解析ソフト JMAG を用いた FEM 解析である。発電機の有効長は 1.5m を基準とした短軸長とし、回転子内径を 3.0m~5.0m まで 0.5m 刻みで設定した。解析モデルの一例として、超電導発電機の断面図を Fig.1 に示している。 $B_g$  を 2T, 3T, 4T とし、超電導線材長と発電機重量への影響を検討した。発電機の仕様を Table.1 に、想定した EuBCO 超電導線材の臨界電流特性を Fig.2 に、 $B_g$  を 2T とした場合の EuBCO 線材の使用線材長を Fig.3 に示している。

## 4. 解析結果および考察

小型化を目指し、回転子直径を小さくすると、界磁巻線、電機子巻線共に経験磁場が上昇することにより  $I_c$  が減少し、必要線材長が長くなった。とくに回転子直径を 4m 以下としたモデルでは線材長の増加率が高くなっている。その他の詳細は当日、報告する。

Table.1 Specification of superconducting generator

出力	15MVA
回転数	10rpm
定格電圧	6600V
定格電流	1315A
極数	32
ギャップ長さ	10mm

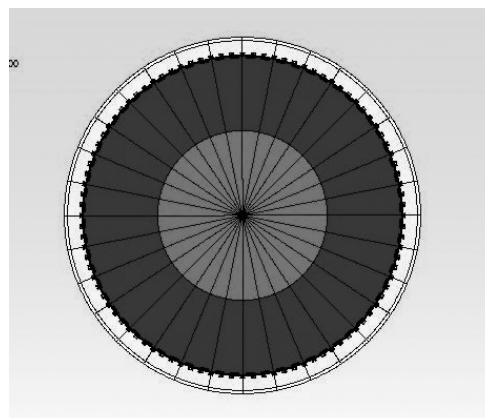


Fig.1 Cross section of superconducting generator

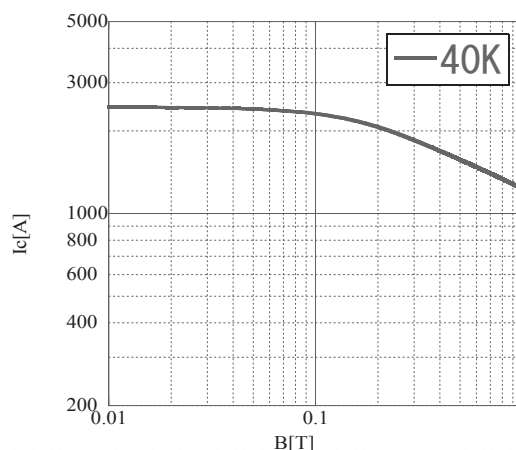
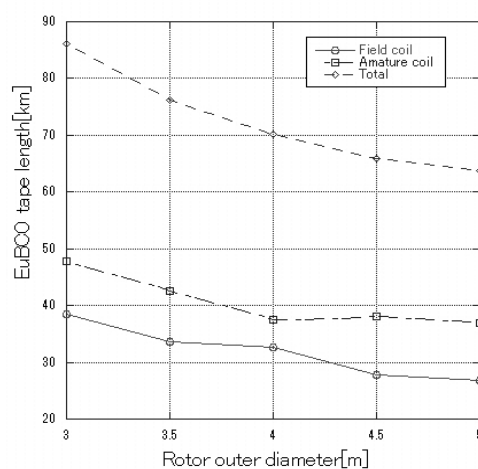
Fig.2  $I_c$ - $B$  properties of EuBCO superconducting tape

Fig.3 Length of EuBCO tape

## 超伝導バルク回転子の回転試験

## Rotation test of a superconducting bulk rotor.

山岸 一人(横浜国大);小川 純(新潟大学);塚本 修巳(上智大学)  
 YAMAGISHI Kazuhito (Yokohama National University); OGAWA Jun (Niigata University);  
 TSUKAMOTO Osami (Sophia University)  
 E-mail: yamagisi@ynu.ac.jp

## 1. はじめに

超伝導バルクの応用については、いくつかの技術的な課題が挙げられているが、我々はその中のひとつである変動磁界が超伝導バルクの捕捉磁束へ与える影響について研究を行ってきた。本報告では回転機応用に向けて超伝導バルクを回転子に使用し回転動作が可能な試験装置を製作し、回転試験を行った。回転子に超伝導バルクを使用した場合、変動磁界によって発生した交流損失により、バルクが発熱し、捕捉磁束が減少して交流機器に影響を与えることが考えられる。これらの要因により超伝導バルクに与える影響について測定を行ったので報告する。また、この回転試験において、我々が提案している捕捉磁束の減少抑制に効果があるシールドリングを使った試験も行っている。

## 2. 試験方法と結果

本試験装置は、図1で示されているように回転子とステータコイルが回転軸を中心として縦に配置されたアキシアル型の同期モータをモデルとなっている。回転子は、超伝導バルクと超伝導シールドリングをセットにしたモジュール(バルクモジュール)が4つで構成されている。それぞれのバルクの諸元は表1に示す。超伝導バルクの底部(裏側)の中心にはバルクの温度変化を測定するための温度センサーが設置されているものと、捕捉磁束を測定するホールセンサーが設置されているものがある。スペースの関係で一つのバルクに2種類のセンサーを設置できないため、バルクA、Cにはホールセンサー、バルクB、Dには温度センサーが設置されている。これら回転子の測定信号は、常温部のスリップリングを介して引き出されている。また、回転速度は常温部に設置されている回転計によって測定される。ステータは銅のコイルで構成されており、ステータコイルが発生させることができる磁界の最大値は50mTである。回転子を吊り下げているベアリングは、常温部にあるが、回転子とステータは液体窒素で冷却されている。回転子およびステータの材質は、GFRPであるので磁界の影響を受けない。また、回転子とステータの間隔は調整することが可能であり、今回の回転試験ではその間隔を2mmで行った。

超伝導シールドリングは表1で示すような超伝導線材をリング形状にしたものを三段に配置したものを使用した。この配置は、以前の研究結果[1]より捕捉磁束の減少抑制効果が認められたものである。今回の試験で用いたシールドリングは、10層のものを使用した。

回転機の回転速度とステータ発生磁界は駆動電源をPCによって制御を行い、定常時のステータコイルの発生磁界は一定値とした。定常速度運転時の回転速度は、100, 200, 300rpmで行った。この時のステータ電流周波数は、6.7, 13.4, 20Hzである。定常速度運転時間は600秒とし、その時のバルク温度および捕捉磁束の変化の測定を行った。図2にシールドリングを付けた場合のバルクの捕捉磁束の変化について比較した結果を示す。比較した回転試験は、回転速度300rpmで、ステータ磁界を50mTで行ったものである。この結果よりシールドリングを使った場合、捕捉磁束の減少はシールドリングがない場合と比べて変化が小さく、捕捉磁束減少抑制に効果的であることが示された。

以上、その他の結果については、講演当日に報告する。

Table 1. Specification of HTS Bulk and SC Tape wire

Bulk	Material	Diameter (mm)	Height (mm)	Trapped magnetic Field (T)	$J_c$ ( $A/m^2$ )	n value
A	Gd-Ba-Cu-O	34.55	10.46	1.164	$6.84 \times 10^7$	20
B	Gd-Ba-Cu-O	33.61	10.38	0.872	$4.74 \times 10^7$	20
C	Gd-Ba-Cu-O	32.52	10.36	0.904	$5.13 \times 10^7$	20
D	Gd-Ba-Cu-O	31.70	10.41	0.871	$5.19 \times 10^7$	20
Wire	Material	Thickness (mm)	Width (mm)	Min. Bending radius (mm)	$J_c$ ( $A/m^2$ )	n value
Tape	Bi2223/Ag Sheathed	0.32	2.8	25	$7.14 \times 10^7$	20

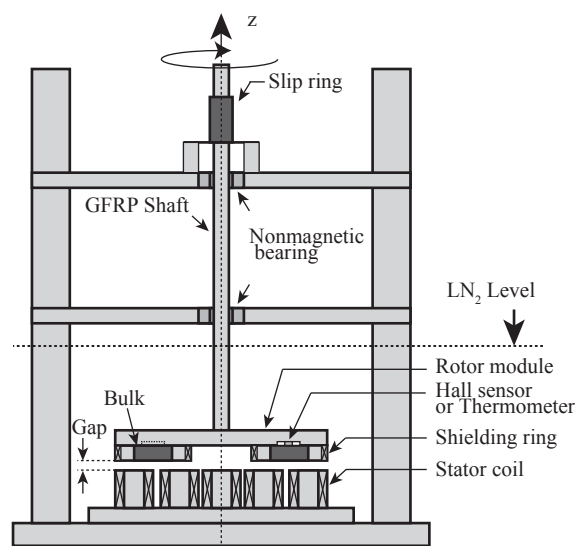


Fig.1 Illustration of the test equipment.

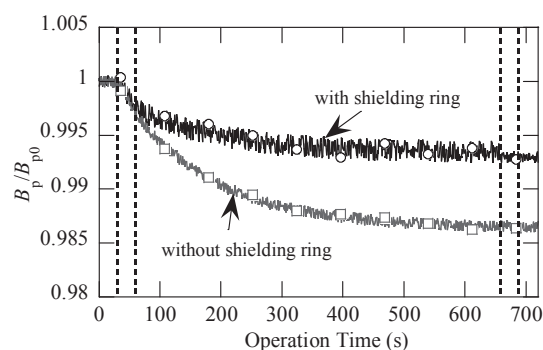


Fig. 2 Influence of the trapped magnetic flux on the bulk rotor by attaching a superconducting shielding ring.

## 謝辞

本研究は、JSPS科研費24560325の助成を受けたものである。

## 参考文献

1. K Yamagishi, et al.: J. Physics: Conference Series, 507, 2014