

## 超伝導バルク磁石のパルス着磁における永久磁石を用いたプレ着磁の効果

Effect of a pre-FC with permanent magnets on pulsed-field magnetization of superconducting bulk magnets

三田 裕幸, 津久井 友隆, 坪野谷 典之(足利工大); 岡 徹雄(新潟大); 横山 和哉(足利工大)  
 MITA Hiroyuki, TSUKUI Tomotaka, Tsubonoya Noriyuki (A.I.T.);  
 OKA Tetsuo (Niigata Univ.); YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.)

### 1. はじめに

バルク磁石の産業応用を広めるためには強磁場化とともに着磁の容易さが必要である。パルス着磁法(PFM)には、Fig.1に示すように、初期のパルス磁場印加で磁束のチャンネルを作り、2 発目以降のパルス磁場印加で効率的に磁束を侵入させる方法が提案されている。この時、1 発目に大きな磁場を印加して超伝導体を発熱させ、意図的に磁束フローを発生させてチャンネルを形成した。しかし、この方法では試料全体の温度が上昇して超伝導特性が低下してしまうこと、次のパルス磁場印加までの冷却に時間がかかることなどの問題があった。

本研究では、1 発目に大きな磁場を印加する代わりに、永久磁石を用いた FC (以下、「pre-FC」と呼ぶ)によって磁場侵入のチャンネルを作る方法を考案した。永久磁石による FC の場合は磁石を取り外す時の磁束フローはほとんど無視できるため、温度上昇による特性劣化がなくなる。そこで、pre-FCにより磁束チャンネルが形成できるか、また捕捉磁場を増大できるかについて検証した。

### 2. 実験

$\phi 60 \times 20$  mm の  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  超伝導バルク体を 2 段式 GM 冷凍機のコールドステージに取り付け、真空断熱した後に冷却する。冷却時に、最大磁束密度 500 mT の永久磁石を Fig.2 のように置き、FC によって着磁をする。この時、A と B の 2 通りの配置で実験を行った。なお、本実験で使用したバルク体に通常のパルス着磁を行った場合、Fig.2 の右上の GSR 部分の特性が低い傾向が見られた。永久磁石を取り除いた後、磁極に着磁コイルを取り付け、pre-FC と同極で 3.9 T のパルス磁場を印加する。なお、パルスの立ち上がり時間は 10 ms である。これを 20, 30, 40, 50, 60 K で行い、pre-FC 後およびパルス磁場印加後の磁極表面(バルク表面から 4 mm)の磁場分布を、ホールセンサを取り付けた 3 次元磁場分布測定装置により測定した。

### 3. 結果と考察

Fig.3 に通常 PFM, A 配置および B 配置での pre-FC を行った場合の総磁束量の比較を示す。20 K のときは pre-FC をした場合の総磁束量は大きい、30 K 以上の温度では pre-FC を行うことで総磁束量が低くなる結果が得られた。

Fig.4 に通常 PFM, A 配置および B 配置での pre-FC を行った場合の最大磁束密度の比較を示す。20 K のときはいずれの着磁方法ともほとんど同じだが、30 K 以上の温度では総磁束量の結果と同様に、通常 PFM だけの値よりも pre-FC を行った場合の方が小さくなっている。

以上の結果から、このような磁石の配置では磁束侵入のチャンネルは形成できなかつたと考えられる。ただし、A 配置および

B 配置でも総磁束量および最大磁束密度が低下してしまうことから、GSR 部の特に特性の低いから磁束が侵入してくるが、他の GSR 部分からも磁束が侵入しており、pre-FC の磁場でそれを阻害してしまう可能性が考えられる。

### 4. まとめ

本研究は超伝導バルク磁石の磁場強化および着磁の容易さを考慮して、永久磁石によって FC をした後に PFM を行う新たな着磁方法について検討した。永久磁石を用いて実証実験を行った結果、本手法では捕捉磁場が減少してしまうことを確認した。今後は、永久磁石の配置や形状を変えるなどして最適な着磁方法を検討する。

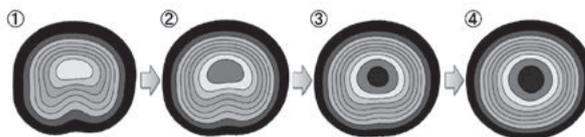


Fig.1 Principle of a multi-pulsed-field magnetization.

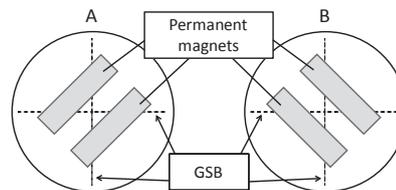


Fig.2 Arrangement of permanent magnets on the pre-FC.

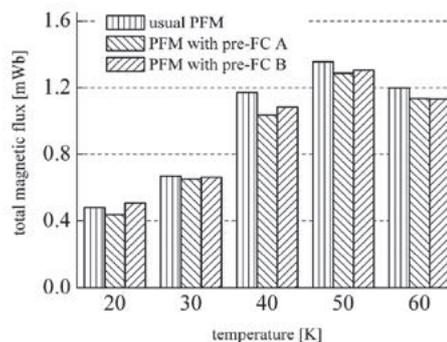


Fig.3 Comparison of the total magnetic flux.

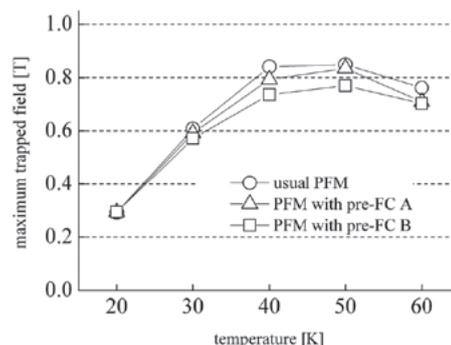


Fig.4 Comparison of the maximum trapped field.

## 細孔バルク体の捕捉磁場特性の評価

### Evaluation of the trapped field performance of a bulk superconductor with small holes

津久井 友隆, 三田 裕幸, 坪野谷 典之(足利工業大学); 岡 徹雄(新潟大); 横山 和哉(足利工大)  
 TUKUI Tomotaka, MITA Hiroaki, TUBONOYA Noriyuki (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ); YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.)

#### 1. はじめに

近年、環境や医療分野で磁気の利用が注目されている。工場排水の有害物質の除去や分離、有効物質の回収、さらに医療分野では薬の精製などへ応用が期待されている。このように磁気を利用する場合、磁場を強くすることにより精度が向上するため磁石の強磁場化が求められている。そのための強磁場発生装置の一つとして超伝導磁石がある。超伝導磁石は、従来の永久磁石や電磁石よりも容易に強磁場を発生させることができる。しかし、近年の材料技術の進歩により、大型で高特性の超伝導試料においてパルス着磁が難しくなる傾向にある。

本研究は、大型で高特性のバルク体を着磁しやすくするため、細孔を開けたバルク体を提案する。本文では温度を変化させたときのパルス着磁の捕捉磁場特性を評価する。

#### 2. 細孔あり超伝導体

一般にバルク体の Growth sector region (GSR)は Growth sector boundary (GSB)に比べて超伝導特性が低いいため、パルス磁場を印加すると GSR から選択的に磁束が侵入する。しかし、前述の通り材料の大型化・高特性化に伴い、GSR でも超伝導特性が高く、磁場を侵入させることが難しくなってきた。そこで、GSR に細孔を開け、意図的に超伝導特性を下げて、パルス磁場印加時に選択的に磁束を侵入させる方法を考案した。これにより、弱い磁場でも効率的に磁束を侵入させることが期待できる。その反面、強い磁場を印加した際の発熱に伴う磁束フローで捕捉磁場が減少してしまうことが懸念される。図1に今回実験で使用した細孔を加工したバルク体および細孔なしのバルク体の写真を示す。両試料とも  $\phi 60 \times 20$  [mm] の  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  である。細孔バルク体は、 $\phi 2$  [mm]の細孔を端から 3、7、11、15 [mm]の位置に4つ貫通させている。さらに、細孔には補強と冷却のために半田を充填している。

#### 3. 実験方法

図1のバルク体を2段 GM 式冷凍機に取り付け、真空断熱した後に冷却する。細孔ありバルク体および通常バルク体ともに  $3.1 \sim 7.0$  [T]の単一パルス磁場を、約  $0.8$  [T]間隔の大きさに印加する。これを  $20 \sim 50$  [K]まで  $10$  [K]ごとに行った。なお、いずれもパルス立ち上がり時間は約  $10$  [ms]である。各磁場印加後、三次元磁場分布測定装置に取り付けたホールセンサで磁極表面の磁束密度分布を測定した。測定範囲は  $90 \times 90$  [mm]で、測定間隔は各方向  $2$  [mm]である。

#### 4. 実験結果

図2に各印加磁場における最大磁束密度を温度別に比較した結果を示す。細孔バルク体は温度が高い場合、通常のバルク体より最大磁束密度が多く減少していることが分かる。温

度が低い場合、強磁場を印加した際の最大磁束密度の減少が通常バルク体より少ないことが分かる。また各温度において低印加磁場での磁束が入りやすくなったことも確認できる。強い印加磁場での磁束クリープが危惧されたが、低温では磁束の減少が抑制されていることが確認できた。

#### 5. まとめ

本文は大型で高特性の超伝導試料において着磁の容易さと磁石の強磁場化を目指し細孔を開けたバルク体を新たに提案し、各温度における捕捉磁場特性を評価した。細孔バルク体は、高温では印加磁場が低い段階から最大磁束密度が減少したが、低温では強磁場を印加しても、その減少が小さくなったことが確認できた。今後、細孔バルク体の捕捉磁場の増大と細孔の関係を検討していく予定である。

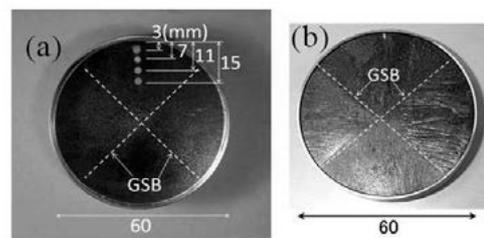
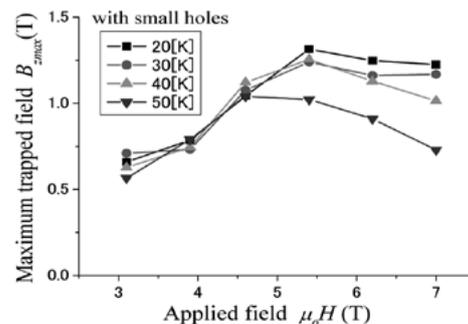
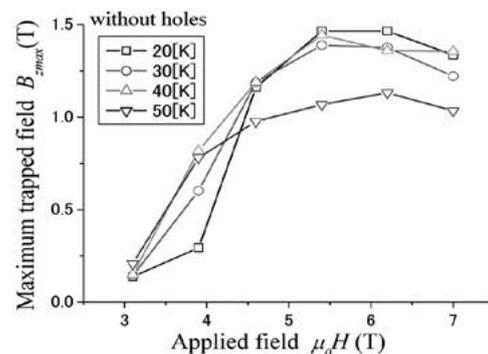


Fig. 1. Photographs of bulk superconductors (a)with small holes and (b)without holes.



(a) with small holes



(b) without holes

Fig. 2. Comparison of maximum flux density.

# 高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータの効率特性

## Efficiency characteristics of HTS linear switched reluctance motor

平山 斉, 宇和田 圭介, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, UWADA Keisuke, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

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

### 1. はじめに

リニアドライブシステムは産業応用分野において数多く利用されている。現在、工作機器や搬送装置用の動力源には、界磁に希土類永久磁石を用いたリニア同期モータが主に用いられている。しかしながら近年、希土類永久磁石の価格高騰や安定調達の懸念などからレアアースレスモータの開発が望まれている。著者らは、高効率かつ推力 / 体積が大きいリニアスイッチトリラクタンスモータ (LSRM) の開発を目的として、励磁巻線に高温超伝導体 (HTS) を使用した新しい LSRM を提案している[1]。本研究では、有限要素法を用いた磁場解析により、本リニアモータの基礎特性を明らかにする。

### 2. 両側式 HTS-LSRM の基本構造

本研究で検討する LSRM は、固定子を可動子の両側に配置した両側式の構造とする。両側式では可動子に発生する垂直力が相殺されるので、可動子の支持機構の負担を軽減することができる。

両側式高温超伝導 LSRM (HTS-LSRM) の基本構造を Fig. 1 に示す。本リニアモータは、固定子 6 極、回転子 8 極の回転形 SRM を直線上に展開した構造であり、固定子鉄心突極にのみ高温超伝導体を用いた集中巻の励磁巻線が施されている。各突極の励磁巻線は  $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$  が S 極,  $A'_1, B'_1, C'_1, A'_2, B'_2, C'_2$  が N 極になるように巻線されており、 $A_1$  と  $A'_1$  と  $A_2$  と  $A'_2$ ,  $B_1$  と  $B'_1$  と  $B_2$  と  $B'_2$ ,  $C_1$  と  $C'_1$  と  $C_2$  と  $C'_2$  がそれぞれ直列に接続され三相の巻線を形成する。ここで、 $A_1, A'_1, A_2, A'_2$  巻線からなる相を A 相,  $B_1, B'_1, B_2, B'_2$  巻線からなる相を B 相,  $C_1, C'_1, C_2, C'_2$  巻線からなる相を C 相とする。

### 3. 解析モデル

特性の算出は、有限要素法を用いた二次元非線形磁場解析により行う。解析には、JSOL 社製の電磁界解析ソフトウェア JMAG を使用した。

Fig. 2 に本リニアモータの解析モデルを示す。エアギャップ長は 0.5 mm, 鉄心の積厚は 100 mm である。励磁巻線には断面が 2.8 mm × 0.31 mm, 77 K で自己磁場中の  $I_c$  が 70 A の Bi-2223 テープ線材を用いる。今回解析に用いる Bi-2223 テープ線材の許容曲げ直径が 40 mm であるため、励磁巻線の最小曲げ直径を 40 mm とした。固定子の巻線領域は 1 相 1 スロットあたり幅 10 mm, 高さ 5.6 mm とし、励磁巻線は 2 ターン 15 層のダブルパンケーキ型コイルとしている。

A 相, B 相, C 相のそれぞれの励磁巻線には、可動子位置に応じた理想的なパルス電流を与える。ここで、各相に供給する電流の大きさには臨界電流値を用いた。モータ動作時の臨界電流値は、Bi-2223 テープ線材の垂直磁場成分による臨界電流の劣化を考慮した。また、解析は可動子移動距離 1 mm 間隔で行った。

### 4. 解析結果

Fig. 3 に推力 - 可動子位置特性の解析結果を示す。縦軸が臨界電流値を与えて算出した推力, 横軸が Fig. 2 に示した位置を零としたときの可動子の移動距離である。可動子の移動距離 0 ~ 14 mm で A 相, 15 mm ~ 29 mm で B 相, 30 mm ~ 44 mm で C 相を一定電流で励磁している。各可動子位置に

おいてコイルに印加される垂直磁場を求め、全可動子位置における最大垂直磁場と超伝導線材の  $I_c$ - $B$  特性から算出した臨界電流は 32.2 A であった。解析結果より、HTS-LSRM の平均推力は 325 N となった。同図には、通常の LSRM との比較として、励磁巻線に銅線を使用したときの推力特性も示している。通常の LSRM の解析は、モータの寸法は HTS-LSRM と同じとし、励磁巻線導体の占積率を 70 %, 電流密度を 6 A / mm<sup>2</sup> として行った。通常の LSRM の平均推力は 262 N であり、HTS-LSRM では同じモータ寸法において推力が大きくなり、推力 / 体積が向上していることがわかる。また、解析で得られた磁場分布により HTS-LSRM の損失を算出し、本リニアモータの効率特性を求めた。結果については当日報告する。

### 謝辞

本研究の一部は、パワーアカデミー研究助成により実施されたものである。

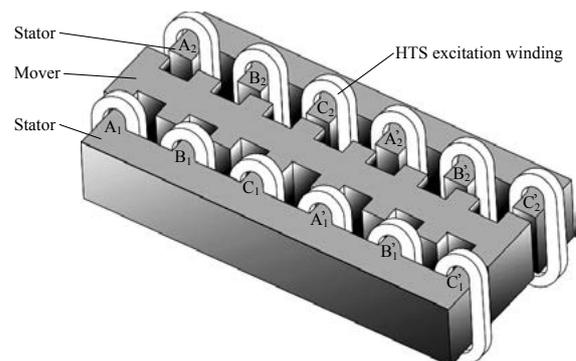


Fig. 1 Structure of the double-sided HTS-LSRM

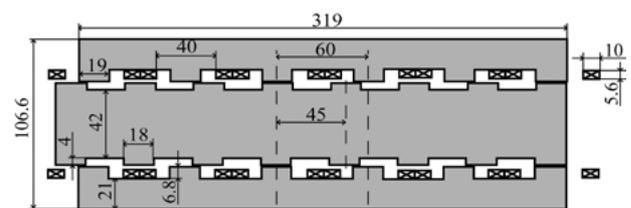


Fig. 2 Analysis model for the double-sided HTS-LSRM

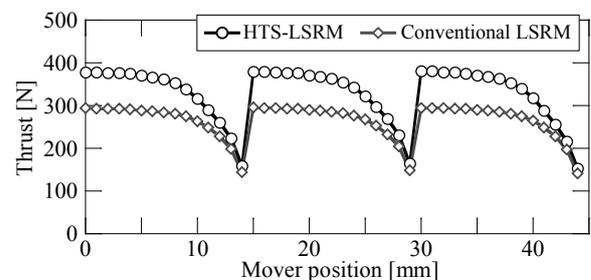


Fig. 3 Calculated results of thrust vs. mover position characteristics

### 参考文献

1. T. Hirayama, et al.: JIASC 2011, Vol. 3 (2011) pp.377-378

# 高温超電導マグネット用電源におけるネルンスト効果の検討

## Study of power source of THS magnet

竹田 篤弘, 岡村 哲至(東工大); 船木 一幸(JAXA)

TAKEDA Atsuhiko, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); FUNAKI Ikkoh (JAXA)

E-mail: takeda.a.ae@m.titech.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 木星及びそれ以外の探査を目的とした推進システムに高温超電導マグネットが必要とされている。この場合, システムの小型化及び軽量化が必須となっており, 本研究では電源に熱電素子を用いることで軽量化することを提案している。その一方策として, 熱電素子の物性の一つである温度差と磁場を起電力に変換するネルンスト効果に着目し, 温度差のみを起電力に変換するゼーベック効果を応用していた従来型電源に勝る性能を引き出すことに着目した。ネルンスト効果の極低温状態における性能に関しては未だ研究がほとんどなされていないため, 本研究ではまず極低温状態におけるネルンスト効果の確認を行う。

### 2. 実験方法

一般にゼーベック効果(温度差と起電力が垂直な位置関係)よりも変換効率がよいとされている<sup>(2)</sup>ネルンスト効果(温度差, 起電力, 磁場が全て垂直方向な位置関係)の測定を図1の装置を用いて行った。

図に示す様に, 熱電素子は銅ブロックで挟むことで温度差を与えている。高温端ブロックはヒーターで加熱し, 低温端ブロックは液体窒素で浸漬冷却することで最大 250℃程度の温度差を与えている。また各温度を抵抗温度計(Cernox)で測定した。用いた熱電素子は大きさが  $2.8 \times 2.8 \times 1.5$ [mm]で  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , 熱電素子には直接導線を接続して起電力を測定している。導線の接続には導電性接着剤を用いた。0.7[T]のネオジム磁石で磁場を加え, ネルンスト効果を確認するため磁場ありの場合と磁場なしの場合とで得られる起電力を比較した。

### 3. 実験結果及び考察

図2は磁場ありの場合となしの場合における起電力を示している。磁場を加えた場合磁場なしの起電力に比べ 15%ほど起電力が増大していることがわかる。その差分がネルンスト効果によるものと考えられるが, 磁場なしの場合においても起電力が測定されており, なんらかの原因でゼーベック効果が引き出されてしまったものと考えられる。そこで磁場なしの起電力がゼーベック効果であることを確認するため, 同装置でゼーベック効果のみを測定し, 磁場なしの値と比較した。図3はゼーベック起電力と磁場なしの状態で測定された起電力とそれらの比を取ったものを示している。そしてその比が一定となっていることから, ネルンスト効果を測定する際, 部分的にゼーベック効果が発生したのではと考えられる。その原因としては, 局所的に導線と熱電素子の間に接着剤が浸入し, 導線が浮き上がってしまったことでゼーベック方向の回路が短絡せず起電力が生じてしまったと考えられる。

#### 参考文献

- 大沢 泰地・岡村 哲至・船木 一幸: 「熱起電力励磁型高温超電導マグネットの宇宙機への応用」, 新エネルギー・環境研究会要旨, (2011)
- (社)日本セラミックス協会・日本熱電学会, “熱電変換材料(2005)”, p. 255 - p. 265

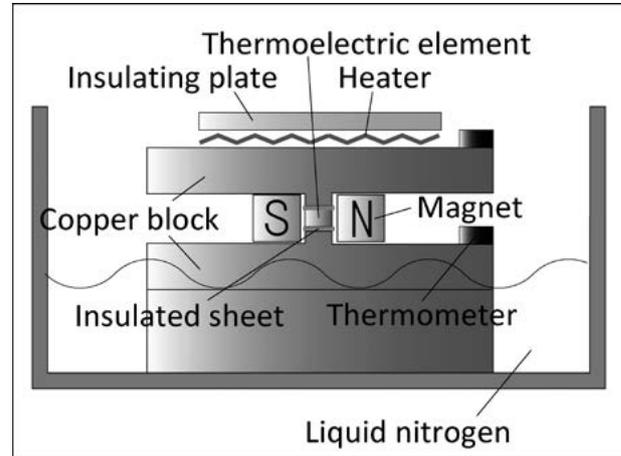


Fig.1 Schematic drawing of experimental equipment.

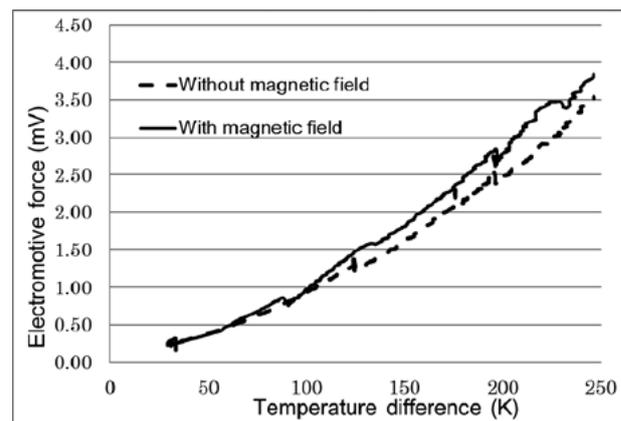


Fig.2 Electromotive force in experiment with magnet, without magnet.

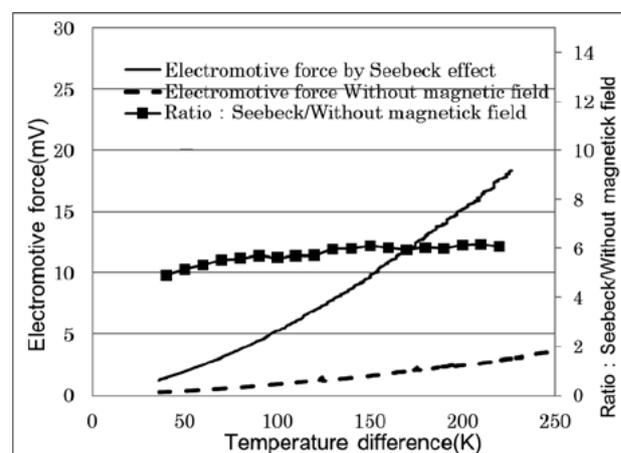


Fig.3 Electromotive force by Seebeck effect and experimental result without magnetic field, ratio of electromotive force by Seebeck effect to that without the magnetic field.

# 磁気力によるタンパク質溶液の流れのシミュレーション

## Flow simulation of protein solution induced by magnetic force

岡田 秀彦, 廣田 憲之, 松本真治, 和田 仁 (物材)

Hidehiko Okada, Noriyuki Hirota, Shinji Matsumoto, Hitoshi Wada (NIMS)

E-mail: OKADA.Hidehiko@nims.go.jp

### 1. はじめに

製薬、食品、環境産業等では、タンパク質の構造や機能を知ることが製品開発の基礎となっている。タンパク質の構造や機能を知る方法としては、タンパク質結晶のX線解析による構造解析が主流であり、精確な構造を知るためには、良質なタンパク質結晶を必要とする。

宇宙の微小重力環境下ではタンパク質溶液の対流が抑制され、結晶化が専ら拡散によって進行するため、X線解析に適した良質な結晶を得ることができるとされ、有用なタンパク質の結晶化実験が多く行われている。しかし、宇宙での実験には装置、実験機会等に大きな制約があることから、効率的な開発のためには同様の実験を地上で行う手法が必要である。その一つとして、反磁性体流体に働く重力を磁気力により制御する方法が注目されている。我々は、超伝導マグネットが発生する高磁気力を用いて対流を抑制し良質なタンパク質結晶を生成する装置を開発した。

本発表は、その研究の一環として装置の構造ならびに結晶化の条件の最適化のための行っている磁気力下でのタンパク質溶液の流れのシミュレーション解析によって得られた結果を報告する。

### 2. 高磁気力を用いたタンパク質結晶化装置

Fig. 1 にタンパク質結晶化装置用の超伝導マグネットの写真を示す。マグネットの室温ボア中にタンパク質溶液を入れる結晶化セルと、セル内を直接観測するための磁場中観測装置が置かれている。これらの装置により、実験中のタンパク質溶液が入ったセルをマグネット内から取り出すことなく、つまり環境を大きく変えることなく、結晶化の状況を知ることが可能となった。本発表はそのセル内でのタンパク質溶液の運動のシミュレーションである。

### 3. タンパク質溶液の流れのシミュレーション



Fig. 1 A photograph of the superconducting magnet for the protein crystal formation system.

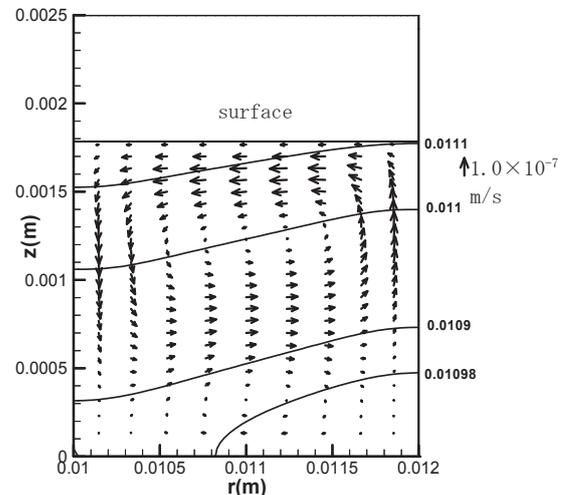


Fig. 2 Calculation result under magnetic force, when  $(\vec{B} \cdot \nabla) B_z = -1350 \text{ T}^2/\text{m}$  at the center of the cell. The average magnitude of velocity is  $3.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ . The concentration distribution is layered at an angle.

計算では、水に1種類のタンパク質が懸濁した溶液が断面  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  のセルを満たし、室温ボアの中心軸から  $1.2 \text{ cm}$  離れて置かれ、上部は開いて水分が蒸発するとしている。実際の超伝導マグネットでは試料付近と中心軸上では磁気力分布が大きく異なっているため、実際の磁気力分布を用いて溶液の運動、濃度分布、温度分布などの時間変化を調べた。図2に計算結果の一例を示す。実線は濃度分布、矢印は流れを示す。初期濃度(重量比)は均一で  $0.01$ 、等温条件 ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )、セルの中心で  $-1350 \text{ T}^2/\text{m}$  の磁気浮上条件での約  $27$  時間後の状態の計算結果である。磁場分布は実際の超伝導マグネットの磁場分布を用いている。流速は約  $10^{-7} \text{ m/s}$  で、濃度分布は層状でタンパク質の移動は主に拡散によると思われる。磁気力の横成分の影響で傾いた濃度分布となっている。

これらの計算から、実際のマグネットでは、今までの多くの研究で用いられていた一様磁気力での予想と異なる濃度や流速分布になることが分かった。

### 4. まとめ

これらの解析から縦方向の磁気力は対流を抑制する事が分かった。しかし、実際のマグネットの磁場分布に含まれる横方向の磁気力の影響で、小さな対流が発生し濃度分布も変わる事が分かった。今後はさらに解析を進める。

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

### 参考文献

1. H. Okada, N. Hirota, S. Matsumoto and H. Wada, J. Appl. Phys. 111, 093907 (2012).
2. H. Okada, N. Hirota, S. Matsumoto and H. Wada, IEEE Trans. Appl. Super. 22, 4904204 (2012)

# TFA-MOD 法を用いた Y 系超電導線材の特性向上

## Improvement of superconducting characteristics of YBCO coated conductor using TFA-MOD method

広長 隆介, 木村 一成, 高橋 保夫, 中西 達尚, 小泉 勉, 長谷川 隆代 (昭和電線);  
中村 達徳, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所)

HIRONAGA Ryusuke, KIMURA Kazunari, TAKAHASHI Yasuo, NAKANISHI Tatsuhisa,  
KOIZUMI Tsutomu, HASEGAWA Takayo (SWCC);

NAKAMURA Tatsunori, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)  
E-mail: r.hironaga041@cs.swcc.co.jp

### 1. はじめに

近年、電力ケーブルや変圧器、限流機、モーター等、高温超電導線材が用いられた機器の研究開発が様々な機関で行われている。高温超電導線材の中で、Y系線材は、液体窒素中での臨界電流密度が高いこと、材料に非貴金属が用いられているため、低コストでの作製が可能であることから、実用線材として期待されている。

現在、昭和電線では、低コスト線材の候補としてのTFA-MOD法を用いたY系超電導線材の開発を行っており、高特性化、長尺化等を踏まえ、特性の安定化及び歩留向上等を課題とし、安定製造技術の確立に向けた研究開発を行っている。

本報ではTFA-MOD法を用いたY系超電導線材の開発状況について報告する。

### 2. 実験方法

トリフルオロ酢酸塩 (Y-, Ba-), およびオクチル酸塩 (Cu-) を用い、金属元素組成比が Y:Ba:Cu=1.0:1.5:3.0 になるように原料溶液を調製し、これらを Hastelloy™ C-276/MgO (IBAD)/CeO<sub>2</sub>(Sputtering) の構造をもつ金属基板上に、Dip コーティング法を用いて原料溶液を塗布し、Reel-to-reel(RTR)式塗布・仮焼装置を用いて水蒸気を含む酸素雰囲気中、最高到達温度 450-500°C の条件下で前駆体膜を形成した。Dip コーティング工程においては、線材横方向の膜厚分布の均一性向上を図るため、塗布ダイスを用いた。その前駆体膜をパッチ式焼成炉にて、水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中、最高到達温度 740-750 °C の条件下で結晶化処理を行った。その後、Ag 安定化層を形成し、酸素雰囲気中においてポストアニールを行った。臨界電流( $I_c$ )値は、液体窒素中において、直流四端子法(電圧基準 1μV/cm)により行ない、膜厚測定及び線材断面組織観察には走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。

### 3. 結果

Figure 1にYBCO線材の幅方向に対する膜厚分布を示す。この結果から、溶液塗布時に塗布ダイスを用いることによって、超電導膜厚0.6μm, 1.3μm, 2.0μm各々において、線材幅方向に対して±10%以下の膜厚分布を持つことが確認された。更に、得られた仮焼テープの結晶化処理条件について最適化を行い、特性向上を図った。

Figure 2 に、結晶化処理後のSEM断面観察写真を示す。図(a)は膜厚0.6μm, (b)は2.0μmの試料である。図(a)においては、超電導層内に臨界電流密度を低下させるボイド及び異相が低減されていることが判る。一方(b)においては、線材表面付近にボイド及び異相の残存が確認され、厚膜化に伴う結晶化処理条件の最適化が課題とされる。また、77K、自己磁場中における各々の  $J_c$  値は膜厚 0.6μm においては 3.8 MA/cm<sup>2</sup>( $I_c=225$ A/cmw), 膜厚 2.0μm においては 2.2MA/cm<sup>2</sup>( $I_c=440$ A/cmw)が得られた。

### 謝辞

本研究は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受け実施したものである

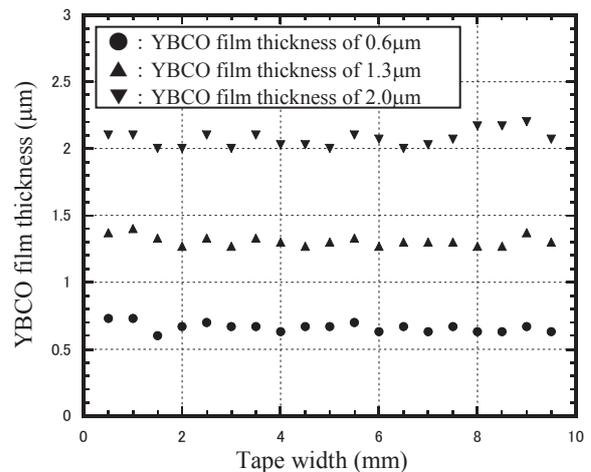
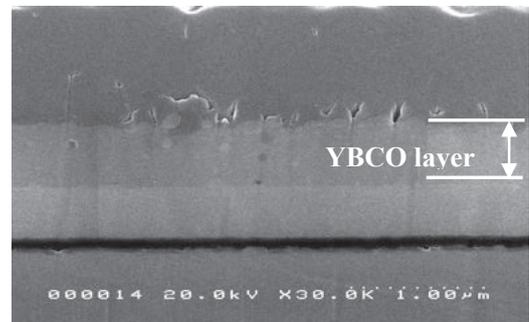
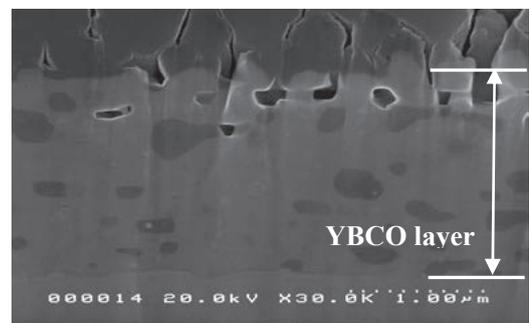


Figure 1 Distribution of cross-sectional YBCO film thickness.



(a)



(b)

Figure 2 Cross-sectional SEM image of YBCO tapes; (a) Sample of YBCO film thickness of 0.6μm. (b) Sample of YBCO film thickness of 2.0μm.

# バッチ式プロセスを用いた TFA-MOD 法 REBCO 線材の磁場中特性向上

## Improvement of magnetic properties for long REBCO coated conductors fabricated by the TFA-MOD method using a batch process

木村 一成, 広長 隆介, 高橋 保夫, 中西 達尚, 小泉 勉, 長谷川 隆代 (昭和電線);  
東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九州大学); 加藤 丈晴 (ファインセラミックスセンター);  
中村 達徳, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所)

KIMURA Kazunari, HIRONAGA Ryusuke, TAKAHASHI Yasuo, NAKANISHI Tatsuhisa, KOIZUMI Tsutomu,  
HASEGAWA Takayo (SWCC); HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (KYUSYU Univ.);  
KATO Takeharu (JFCC); NAKAMURA Tatsunori, YOSHIKAWA Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)  
E-mail: k.kimura066@cs.swcc.co.jp

### 1. はじめに

近年, REBCO 超電導線材の高性能化に伴い, 様々な分野において超電導機器の実用化に向けた開発が行われている。しかしながら, 応用機器の観点から, より高特性な線材が求められており, 特に加速器や超電導モーター等の高磁場を発生する機器に適用する線材として, 磁場中での特性向上が重要な課題となる。

当社ではバッチ式プロセスを用いた TFA-MOD 法による YBCO 超電導線材の開発を行っており, 高  $I_c$  化, 長尺安定性向上を主とした研究を進めている。一方, 磁場特性向上を目的として, 人工ピン止め点(Artificial Pinning Centers: APC)を導入した超電導線材の開発も行なっており, TFA-MOD 法にも導入することに成功している[1, 2]。我々は, Y 元素を一部 Gd 元素に置換した YGdBCO 超電導層内に BaZrO<sub>3</sub> を微細に均一分散させた, APC 導入型線材とした。

本研究では, 磁場特性の向上を目的とした, APC 導入型超電導線材の超電導層の厚膜化, 並びに, 本焼条件の最適化を行った。

### 2. 実験方法

トリフルオロ酢酸塩 (Y-, Gd-, Ba-), およびオクチル酸塩 (Cu-) を用い, 金属元素の組成比が Y:Gd:Ba:Cu=0.77:0.23:1.5:3.0 になるように原料溶液を調製し, 超電導体を構成する金属元素総量に対して 2.0 at% の Zr 元素をオクチル酸塩として添加した。この溶液を Hastelloy™ C-276/MgO (IBAD)/LaMnO<sub>4</sub>(PLD)/CeO<sub>2</sub> (Sputtering) の構造をもつ, 金属基板上に, Reel-to-reel (RTR) 式塗布・仮焼装置を用い, 塗布・仮焼工程を 10~12 回繰り返す, 前駆体膜を形成した。その前駆体膜をバッチ式焼成炉にて, 水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中, 最高到達温度 730~770°C の条件下で本焼成を行った。その後, Ag 安定化層を形成し, 酸素雰囲気中においてポストアニールを行った。

線材の  $I_c$  値は, 液体窒素中において, 直流四端子法にて評価した。 $I_c$  値は電圧基準 1.0  $\mu\text{V}/\text{cm}$  で定義した。また, 印加磁場角度依存性については, スプリット型の超電導マグネットを用いた。

### 3. 結果

50m 長 YGdBCO (Zr=20mM) 仮焼テープより切出し, 本焼した後, 安定化層を形成し, ポストアニールを行った。短尺試験片について, 磁場印加時の超電導特性について評価した。Figure 1 に 印加磁場 3T 中での  $J_c$  磁場角度依存性を示す。APC 非導入 YGdBCO 試料の印加磁場角度 180° での  $J_c$  値は 0.07  $\text{MA}/\text{cm}^2$  であるのに対し, APC を導入した YGdBCO 試料の  $J_c$  値は 0.3  $\text{MA}/\text{cm}^2$  ( $I_c=56 \text{ A}/\text{cm-w}$ ) であった。この結果より, APC 導入による印可磁場 3T 中における特性向上が確認された。また, YGdBCO (Zr=20mM) 線材の断面 TEM 観察を行ったところ, 直径 5~30nm の BaZrO<sub>3</sub> 粒子が超電導層内に微細に均一分散していることが確認された (Figure 2)。この TEM 観察結果から, BaZrO<sub>3</sub> 粒子の微細分散が, Figure 1 に示されるような高特性に至った理由の一つとして挙げられる。

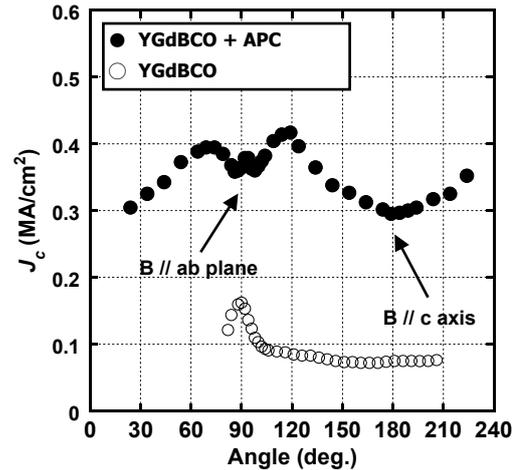


Figure 1.  $J_c$ - $B$ - $\theta$  characteristics of YGdBCO with Artificial Pinning Centers (APCs) ( $B=3\text{T}$ ). The characteristic of YGdBCO without APC was carried as reference.

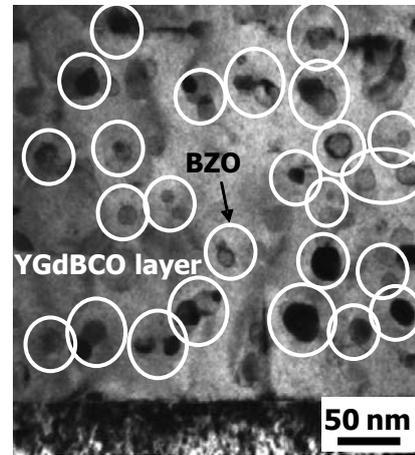


Figure 2. Cross-Sectional TEM image. The circles of this image shows BaZrO<sub>3</sub> particulates.

### 謝辞

本研究は, 「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として, 新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受け実施したものである。

### 参考文献

1. M. Miura, et al.: *Applied Physics Express* **1** (2008) 051701
2. M. Miura, et al.: *Applied Physics Express* **2** (2009) 023002

IRレーザーCVD法を用いた厚膜YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub>試料の作製Fabrication of Thick YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> Films by IR-Laser-Assisted Chemical Vapor Deposition

宮田 成紀、松瀬 研也、衣斐 顕、和泉 輝郎、塩原 融 (超電導工学研究所)

MIYATA Seiki, MATSUSE Ken-ya, IBI Akira, IZUMI Teruo, and SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)

E-mail: miyata@istec.or.jp

## 1. はじめに

イットリウム系高温超電導線材の開発が近年大きく進み、漸く市販が開始される段階に到達している。今後、産業レベルにおける普及を促進するためには、同線材を用いた機器開発分野における進展が重要であることはもちろんであるが、機器開発における選択肢として採用されるためには線材そのものの低コスト化が欠かせない。我々のグループでは、低コスト化という観点からイットリウム系高温超電導線材の製造速度の向上を目指し、IRレーザーアシストCVD (IRL-CVD) 法の開発を行っている。本成膜法は、CVD (化学気相蒸着) 法をベースに、膜表面へ IR レーザーの同時照射を行いながら成膜を進めるものである。これまでに Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> などにおいて成膜速度 200 μm/h 以上の高速成膜に成功している [1]。また YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> (YBCO) 成膜に関しても、我々のグループにおいてこれまでに 3 MA/cm<sup>2</sup> を超える臨界電流密度 ( $J_c$ ) 特性と、高速化においては 1.8 MA/cm<sup>2</sup> という高い電流特性を保持しながら成膜速度 58 μm/h の高速成膜を達成している [2]。今回、超電導線材として重要な臨界電流 ( $I_c$ ) 特性の評価を行うべく、Reel-to-Reel システムを用いた多層成膜により厚膜試料の作製を行った結果について報告する。

## 2. 実験方法

原料には、製造プロセスとしての安定性の見地から Y、Ba および Cu の dpm 錯体を thf 溶媒に溶かした単一カクテル溶液を採用した。気化器によって気化された原料ガスは真空排気された成膜チャンバー内へ導かれ、酸素ガスと混合された後、ヒーターおよび IR レーザー照射により分解され、基板上に YBCO 膜として堆積する。基板には、金属基板上に IBAD (ion-beam-assisted deposition)-MgO 層を含む中間層が成膜された二軸配向基板を用いた。試料はすべて搬送状態 (搬送速度 = 1.2 m/h) で作製された。成膜条件を Table I に示す。

## 3. 実験結果および考察

Reel-to-Reel 成膜により、搬送速度 1.2 m/h において多層成膜を行った。1, 2 および 4 層成膜で得られた YBCO 試料の膜厚および  $I_c$  値は 100 A (0.5 μm)、168 A (1.1 μm)、224 A (2.1 μm) であった (Table II)。他の気相法においてしばしば見られるように  $J_c$  値としては減少傾向を示しているが、これらの試料においては  $I_c$  値は膜厚とともに増加していることが確認された。ただし、2 μm 厚試料においては X 線測定における  $a$  軸配向粒からの回折強度が増大し、 $c$  軸配向粒の (005) 反射に対する強度比  $I(200)/[I(200)+I(005)] (=A_a)$  で 43% に達している。そのため、このままの条件でこれ以上試料の厚膜化を進めても、大幅な  $I_c$  の向上は見込めない。

一方、パイロメータを用い、これらの試料における試料表面からの放射輝度をその場測定で観察したところ、膜を重ねていくにしたがい系統的に大きく変化していることが観測された。1 層目の成膜に対して、二層目成膜時の放射輝度が大きく減少し、その後緩やかに上昇するという振る舞いが確認された。もし、この放射輝度の変化が試料温度の変化を示しているとすれば、何らかの原因により試料温度が 2 層目において低下していることになる。そこで、2 層目以降のレーザー照射エネルギーを増加させて、同様の多層成膜により試料を作製

した。上記試料と同一条件 (レーザー照射エネルギー = 260 W) で 1 層目の成膜を行い、2 層目から 4 層目までの成膜においてレーザー照射エネルギーのみ 20W 高い 280W に設定し、厚膜試料を作製した。このとき、2 層目成膜時における放射輝度の減少幅が縮小していることが確認され、また得られた試料 (膜厚 2.0 μm) において  $a$  軸の強度比は 8% に減少し、 $I_c$  値も 250 A に上昇していた。

このように改善されたプロセスにより特性が向上したことは重要な結果ではあるが、その解釈において試料からの放射輝度の変化をそのまま温度の変化と結びつけるにはいまのところ根拠が不十分である。放射輝度は、温度だけでなく表面状態によっても大きく変化するため、少なくともそれぞれの試料の表面形態を AFM 測定などにより評価し、放射輝度との相関を議論する必要がある。これらの点については引き続き検討していきたい。

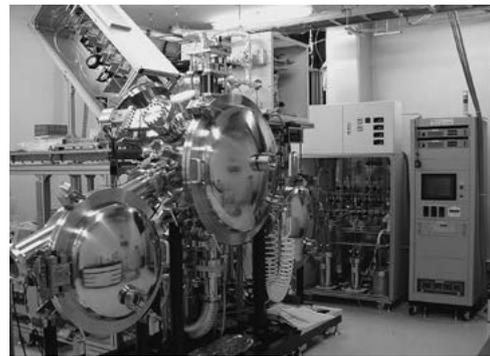


Fig. 1 Photograph of the IRL-CVD system.

Table I: Typical conditions of YBCO films depositions by IRL-CVD.

Precursors	Y(dpm) <sub>3</sub> , Ba(dpm) <sub>2</sub> , Cu(dpm) <sub>2</sub>
Solvent	tetrahydrofuran (thf)
Molar ratio	Y : Ba : Cu = 1.0 : 2.0 : 3.0
Molarity (total)	0.18 mol/L
Precursor delivery rate	0.2 - 0.4 g/min
Additional thf rate	0.2 g/min
Carrier gas flow rate (Ar)	0.6 - 1.0 L/min
Reaction gas flow rate (O <sub>2</sub> )	1.0 L/min
Total pressure	0.67 kPa
Vaporization temp.	280°C
Heater plate temp.	700°C
Laser power	260 W
Substrate transfer speed	1.2 m/h

dpm = dipivaloylmethanato

Table II: Properties of YBCO films fabricated by a multiple deposition technique.

Deposition times	Thickness [μm]	$I_c$ [A/cm <sup>2</sup> ·w]	$J_c$ [MA/cm <sup>2</sup> ]	$A_a$ [%]
1	0.54	100	1.8	0
2	1.1	168	1.6	3
4	2.1	224	1.1	43

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものです。

[1] T. Goto, J. Jpn. Soc. Powder Metall. 54, 863 (2007) など。

[2] 宮田ほか, 第 73 回応用物理学会講演会予稿集, 12p-A2-10.

## FF-MOD 法による Cu-rich Y123 薄膜の作製

## Fabrication of Cu-rich Y123 thin films by FF-MOD method

元木 貴則, 下山 淳一, 石渡 悠人, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二 (東大)

MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi, ISHIWATA Yuto, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku

and KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)

E-mail: 3064622801@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

有機金属熱分解(MOD)法は高真空装置や大出力レーザなどの高価な装置を必要としない  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (Y123)超伝導薄膜の作製方法である。現在、MOD 法による Y123 薄膜線材の開発ではトリフルオロ酢酸塩を原料にした TFA-MOD 法が主流で、既に量産化技術として確立されている。一方、フッ素を用いない Fluorine-Free MOD (FF-MOD) 法は、反応が比較的単純で工業化に適しているものの、これまで高い  $J_c$  を示す薄膜線材の開発例はほとんどなく、その一因として Y123 結晶内の欠陥が少なくピンニング力が弱いことが指摘されている。そこで本研究では、仕込組成や焼成条件を変えて Y123 薄膜を作製し、その微細組織・結晶性・超伝導特性の評価を行うことによりピンニング力の強い薄膜の作製条件を探った。

## 2. 実験方法

$\text{SrTiO}_3$  (STO) (100)単結晶基板上に Y, Ba, Cu のアセチルアセトン塩溶液[1]を塗布・乾燥した後、約  $500^\circ\text{C}$  で仮焼して有機物を分解した。この操作を 3 回繰り返して仮焼膜を得た。一部の試料では 2 回目の仮焼において Cu-rich な溶液を用いた。様々な酸素分圧、温度、保持時間の下で焼成を行い、膜厚約  $0.38 \mu\text{m}$  の Y123 薄膜を作製した。その後、酸素気流中  $450^\circ\text{C}$  でのアニールによってキャリア濃度を調節した。

これらの薄膜に対して、X 線回折による構成相の同定及び  $c$  軸配向度の評価、SEM による表面微細組織の観察、SQUID を用いた磁化測定 ( $H \parallel c$ ) を行った。 $J_c$  は磁化ヒステリシスの幅から拡張 Bean モデルを用いて計算した。

## 3. 結果

Cu-rich 層を挟んだ仮焼膜を焼成して得た試料においても、 $c$  軸配向した Y123 薄膜が得られた。0.1% $\text{O}_2$ /Ar 気流中、 $840^\circ\text{C}$ , 3 min 焼成した試料においては Cu-rich な試料において不可逆磁場の向上が示唆された。さらに低温低酸素分圧下での焼成により磁場中での  $J_c$  が向上した。特に、 $800^\circ\text{C}$ , 0.01% $\text{O}_2$ , 3min の焼成によって作製した膜は Fig. 1 に示すように 2 T まで  $10^5 \text{ A/cm}^2$  以上の  $J_c$  を維持した。この理由として Fig. 2 の XRD パターンに示すように、未同定相の強度が最も大きく、ピンニングセンターとして寄与している可能性が示唆された。この焼成条件では Cu 量の変化による特性の向上は見られなかった。

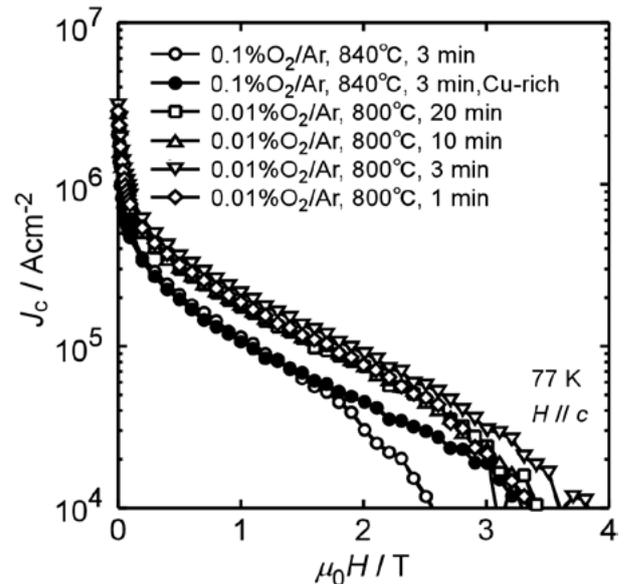


Fig. 1 Magnetic field dependence of  $J_c$  at 77 K for Y123 and Cu-rich Y123 thin films heat treated at various conditions.

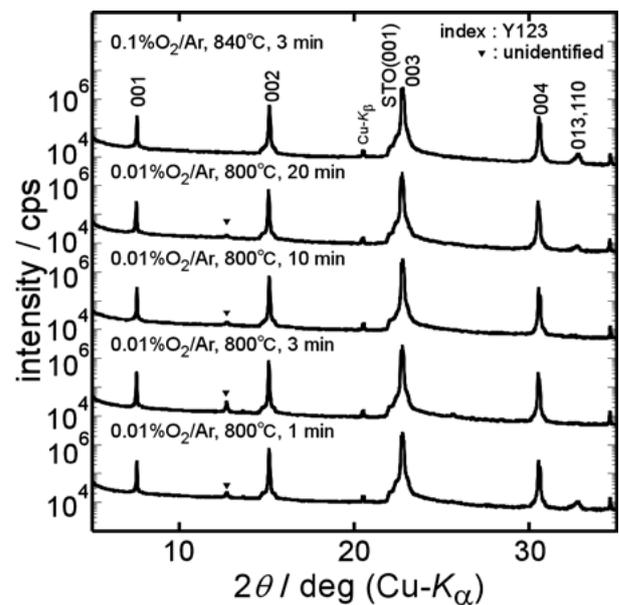


Fig. 2 Surface XRD patterns for Y123 thin films heat treated at various conditions.

## 参考文献

1. K. Tsukada *et al.*: *Physica C* **458** (2007) 29-33.

## FF-MOD 法 RE123 薄膜へのピンニングセンターの導入 Introduction of effective pinning centers to RE123 thin films by FF-MOD method

石渡 悠人, 下山 淳一, 元木 貴則, 岸尾 光二 (東大院工); 永石 竜起 (住友電工)  
ISHIWATA Yuto, SHIMOYAMA Jun-ichi, MOTOKI Takanori, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo); NAGAISHI Tatsuoki (SEI)  
E-mail: 7619874583@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123; RE = rare earth)薄膜の作製法の中で有機金属熱分解(MOD)法は、高真空装置や大出力レーザーなどの高価な装置を必要としない化学プロセスである。原料にフッ素を用いない Fluorine-free MOD (FF-MOD)法は TFA-MOD 法による薄膜線材開発に遅れているものの、RE123 の生成反応に水蒸気を必要としない、より簡便な手法である。しかし、FF-MOD 法では有効なピンニングセンターの導入手法が開発されておらず、他の手法による RE123 薄膜に比べて臨界電流特性が劣る。これまでの我々の研究により、FF-MOD 法における RE123 のエピタキシャル成長が極めて速やかに進行することが明らかになっており、RE123 薄膜の作製条件を結晶成長速度の観点から見直す必要がある。そこで本研究では、特に焼成時間に注目し、希土類混合及び Hf 添加によるピンニングセンターの導入を試みた。

### 2. 実験方法

原料溶液は Y, Dy, Ba, Cu のアセチルアセトン塩溶液[1]に、Hf 源として Hf-05 及び SYM-HF04 を加え作製した。Hf 源の溶液は高純度化学研究所から提供されたものである。SrTiO<sub>3</sub> (STO) (100)単結晶基板上に原料溶液を塗布・乾燥した後、約 500°C で仮焼して有機物を分解した。溶液の塗布、乾燥、仮焼を 3 回繰り返した後、P<sub>O2</sub> = 30 Pa の雰囲気中、温度を 840°C として様々な時間の焼成を行い、膜厚約 0.32 μm の RE123 薄膜を作製した。その後、酸素気流中 450°C でのアニールによりキャリア濃度を調節した。

これらの薄膜に対して、X 線回折 (XRD) による構成相の同定及び c 軸配向度の評価、SEM による表面微細組織の観察、SQUID を用いた磁化測定 (H // c) を行った。J<sub>c</sub> は磁化ヒステリシスの幅から拡張 Bean モデルを用いて計算した。

### 3. 結果

#### 3.1. RE 混合

Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (x = 0~1) 薄膜を作製した。RE123 (005) ピーク強度の Dy/Y 比依存性を Fig. 1 に示す。金属組成比が Y: Dy: Ba: Cu = (1-x): x: 2: 3 である溶液を全ての層に用いた場合には x = 0.4 以下の組成でのみ強い c 軸配向した RE123 薄膜が得られた。そこで、1層目を Dy を含まない Y123 層としたところ、x によらず強い c 軸配向膜が得られ 77 K, μ<sub>0</sub>H ~ 0 T において 2 MA/cm<sup>2</sup> を超える高い J<sub>c</sub> を示した。また、J<sub>c</sub> に焼成時間による違いは見られなかった。

#### 3.2. Hf 添加

Y<sub>0.98</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>Hf<sub>z</sub>O<sub>y</sub> (z = 0~0.1) 薄膜を作製した。Y123 (005) ピーク強度の Hf 添加量依存性を Fig. 2 に示す。全ての層に Hf を添加した場合には c 軸配向度が大きく低下したものの、Hf を含まない Y123 層を 1 層目に導入したところ c 軸配向度が大きく向上した。また、XRD より BaHfO<sub>3</sub> の生成が確認できた。Fig. 3 に示す通り、z = 0.01 では 77 K、低磁場における J<sub>c</sub> が向上した。また、Hf 添加の効果に焼成時間による違いは見られなかった。講演では断面観察の結果も報告する。

### 4. 結論

希土類混合及び Hf 添加によりピンニングセンターの導入を試みた。第 1 層を Y123 層とすることが c 軸配向膜の作製に極めて有効であることが分かった。Hf 添加により、BaHfO<sub>3</sub> が生成し J<sub>c</sub> が向上した。また、RE 混合や Hf 添加を施した場合にも結晶成長速度は変化せず、短時間焼成の有効性が確かめられた。短時間焼成はシンプルな化学プロセスである FF-MOD 法の特徴である。

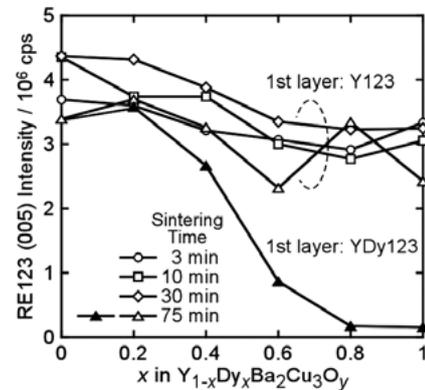


Fig. 1 Dy/Y ratio dependence of RE123 (005) intensity for YDy123 films

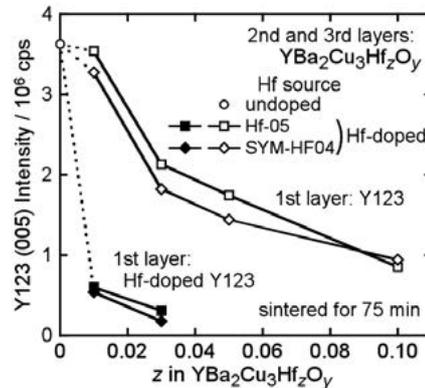


Fig. 2 Y123 (005) intensity of Hf-doped films

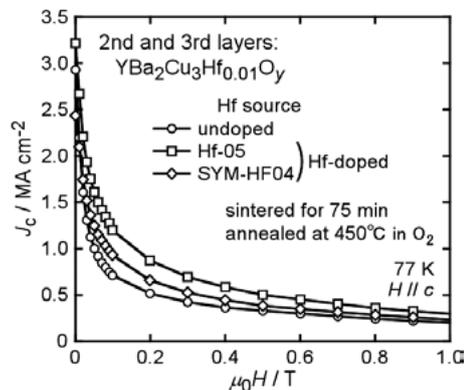


Fig. 3 J<sub>c</sub>-H curves of Hf-doped Y123 films grown on Y123 seed layer

### 参考文献

1. K. Tsukada et al.: *Physica C* **458** (2007) 29-33.

# 高温超電導ケーブルの実線路実証試験

## In-grid demonstration of high-temperature superconducting cable

大屋 正義, 芦辺 祐一, 渡部 充彦, 湯村 洋康, 中西 辰雄, 広田 博史, 増田 孝人 (住友電工);  
大野 隆介, 下田 将大, 仲村 直子, 駒込 敏弘, 矢口 広晴, 池内 正充, 町田 明登 (前川製作所);  
市川 裕士, 三村 智男, 本庄 昇一 (東京電力); 原 築志 (東電記念財団)

OHYA Masayoshi, ASHIBE Yuichi, Watanabe Michihiko, YUMURA Hiroyasu,  
NAKANISHI Tatsuo, HIROTA Hirofumi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd);  
ONO Ryusuke, SHIMODA Masahiro, NAKAMURA Naoko, KOMAGOME Toshihiro  
YAGUCHI Hiroharu, IKEUCHI Masamitsu, MACHIDA Akito (Mayekawa Mfg. Corporation);  
ICHIKAWA Hiroshi, MIMURA Tomoo, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company);  
HARA Tsukushi (TEPCO Memorial Foundation)

E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

### 1. はじめに

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」では、66kV 級の高温超電導ケーブルシステムを東京電力の旭変電所内に構築して、実システムに連系した実証試験を行うことで、線路設計、建設、運転および保守を含めたトータルシステムの安全性と信頼性を評価する。これまでに、要素開発を経て 30m 長の検証システムを構築し、30 年相当の長期課通電試験を完了した。現在、実証システムの建設は完了し、2012 年秋の実系統接続に向けて冷却試験が終了した段階である。

### 2. 実証ケーブルシステム

ケーブルシステムの容量は 230MVA (66kV, 2kA) であり、構成を図 1 に示す。ケーブル長は 230m であり、途中に半径 5m の U 字カーブを設け、両端に終端接続部を、中間に中間接続部を設けている。本システムを冷却システム (1kW 級冷凍機 6 台、循環ポンプ、リザーバタンク等) に接続して運用する。

ケーブル構造にはコンパクトな三心一括型を採用し、大電流容量・低損失・低コストの観点から、2 種類の DI-BSCCO 線材 (TypeHT, TypeACT)[1] を組み合わせた Hybrid 構造とした。なお、短絡電流対策として、導体部には銅撚線フォーマを、シールド部には銅テープ層を設けている。

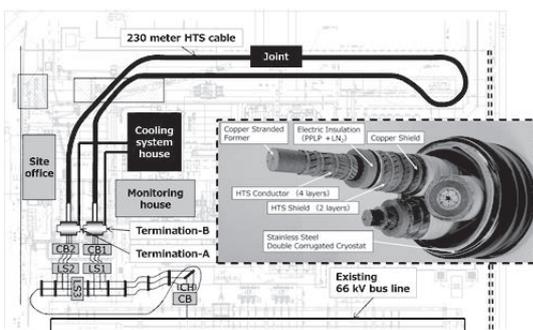


Fig.1 Layout of the demonstration system.

### 3. ケーブル製造および出荷試験

合計 99km の DI-BSCCO 線材を用いて 270m 長のケーブルを製造した。ケーブル両端および中央から切り出したサンプルで出荷試験を行い、要求特性を満たすことを確認した。

Table 1 Shipping test results.

Items	Results
Ic measurement	Conductor: 6.9 kA, Shield: 7.3 kA
AC loss measurement	0.9 W/m/ph at 2 kA, 50 Hz
Bending test	No Ic degradation with 2.7 mφ bending
Withstand voltage test	No BD & PD at AC 90 kV for 3 hours No BD at Imp ±385 kV (3 times)

### 4. ケーブル布設

2 本のケーブル布設時には、中間接続部付近にドラムを配置し、それぞれ A 端末および B 端末側に引き込む形で管路

内に布設した。ケーブルにダメージを与えないよう、断熱管外周に配置したテンションメンバを把持するとともに、U 字カーブ出入口に配置したボールローラを用いて張力を緩和しながら布設を行った。発生した張力は最大 1.3ton であり、テンションメンバの設計値 2ton に比べて十分に小さい張力で布設を完了した。布設完了後、ケーブルを所定の長さに切断し、断熱管真空層を再処理した後に、機器の組立施工を行った。

### 5. 冷却試験

初期冷却時間を短縮するため、ケーブルシステムと冷却システムは分離並行して冷却を行った。ケーブルシステムでは、全長の温度勾配をなだらかに保つため、低温の窒素ガスで段階的に冷却を行った後に液体窒素を注入した。最終的に両システムを接続し、循環冷却モードに移行した。本工程に要した日数は約 3 日である。

初期冷却完了後に、超電導特性の健全性を確認するため、臨界電流 (Ic) 測定を実施した。測定では、実用化時の長尺システムを想定した「2 コア往復通電方式」を採用した[2]。図 2 は、ケーブル部平均温度 77.3K において測定した I-V 波形を示している。三相ともに測定された Ic 値は 6.4A であり、同図中に破線で示した予想波形 (使用線材の Ic 値と往復通電時の漏れ磁場による Ic 低下を考慮した数値シミュレーション結果) とほぼ一致し、超電導特性の健全性が確認された。これまでに、計 3 回の冷却試験 (ヒートサイクル有り) を実施し、Ic 特性が低下しないことを確認した。また、各冷却試験において、直流耐電圧試験 (151.8kV × 10 分間) にも合格した。

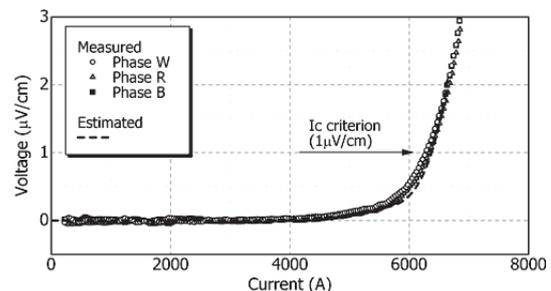


Fig.2 Ic measurement results.

### 6. さいごに

計 3 回の冷却試験が終了し、今後、現地竣工試験を経て 2012 年の秋に実系統への接続を行い、長期実証試験を通じてケーブルシステムの安全性と信頼性を評価していく。

#### 謝辞

本研究の一部は、NEDO の委託により実施したものである。

#### 参考文献

- http://www.sei.co.jp/super
- M. Ohya, et al.: Abstract of CSJ Conference, vol.85 (2011) p.21.

## 275kV-3kA 超電導ケーブルの設計と検証試験 Design of and Evaluation of a 275kV-3kA YBCO Superconducting Cable

中山 亮, 八木 正史, 三觜 隆治, 劉 勁, 滕 軍(古河電工);  
長谷川 隆代(昭和電線); 斎藤 隆(フジクラ); 雨宮 尚之(京大);  
石山 敦士, 王 旭東(早大); 早川 直樹(名大); 大熊 武, 丸山 修(SRL)

NAKAYAMA Ryo, YAGI Masashi, MITSUHASHI Takaharu, LIU Jin, TENG Jun, (Furukawa Electric);  
HASEGAWA Takayo(SWCC); SAITO Takashi(Fujikura); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); WANG Xudong,  
ISHIYAMA Athushi (Waseda Univ.); HAYAKAWA Naoki (Nagoya Univ.); OHKUMA Takeshi, MARUYAMA Osamu(SRL)  
E-mail: mr252088@mr.furukawa.co.jp

### 1. はじめに

高まる電力自給に代えて、275 kV-3 kA 超電導ケーブルを M-PACC プロジェクトで開発してきた。このケーブルは 1.5 GW という架空送電線に匹敵する大容量で、将来の電力基幹線としての実用化が期待されている。設計に必要な基礎技術は、電力試験、部分放電試験、交流損失試験、過電流試験などで蓄積され、その技術に基づいて、30 m ケーブルは設計され、製造された。ケーブル絶縁厚は、絶縁体の設計ストレスと IEC、JEC、他の超電導ケーブル試験に基づいた試験条件で決定された。古河電工では、30 m ケーブルと終端部、中間接続部を製造、試験設備を建設し、検証試験を 2012 年秋季から瀋陽古河で実施する予定である。この 30 m 検証試験では、長期の課通電試験を実施し、その条件は、3 kA の電流と、30 年の劣化を模擬した電圧とした。

### 2. 275kV-3kA超電導ケーブル(30m)の設計及び仕様

実証試験に用いるケーブルを図 1 に、ケーブルの構成及びその仕様を表 1 に示す。銅フォーマは中空で断面積 400 mm<sup>2</sup> であり、63 kA-0.6 s のケーブルと中間接続部の試験と解析を行い、上昇温度が約 20 K で、超電導に異常が無いことを確認した[1],[2]。超電導層は十分な電流容量を持たせるため 2 層であり、両端をレーザーで切断することによって、3 kA で 0.12 W/m の低交流損失の結果を得た[3]。試験電圧値と設計ストレスから算出した絶縁層の設計条件は、275 kV の系統異常電圧 310 kV で部分放電フリーであり、かつ、雷インパルスの系統異常電圧 1050 kV に裕度 1.1 を乗じた 1155 kV で破壊しない条件とした。設計ストレスは、選定した絶縁材料のモデルケーブル試験から、それぞれ 22 kV/mm、83 kV/mm として設計し、絶縁厚は 22 mm となった[3]。誘電損失と交流損失は、275 kV-3 kA で 0.8 W/m と見込まれる。

製造余長 2 m を抜き取り、大気圧液体窒素で臨界電流 ( $I_c$ ) を評価した結果、表 1 のとおり、設計どおりの 6000 A 前後であり、77 K においても交流 3 kA で十分な容量がある。さらに製造余長 5 m で、耐電圧試験を実施したところ、大気圧液体窒素の浸漬という厳しい条件でも 310 kV で部分放電フリーを確認した。さらに製造余長 2 m で 63 kA-0.6 sec の過電流試験を実施し、 $I_c$  低下が生じない事を確認した。

### 3. 実証試験概要

作製した 30 m ケーブルは図 2 のような配置で瀋陽古河に設置され、長期課通電試験が行われる。長期課通電試験は 200 kV-1 ヶ月、3 kA-8 時間オン 16 時間オフで行われ、その前後に各種試験で特性を評価する予定である。

### 4. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

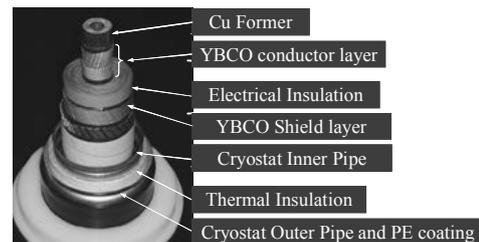


Fig.1 30 m YBCO Cable

Table.1 Components of 30 m YBCO cable

Component	Spec
Cu Former(stranded wire)	Cu stranded wire (midair) 400 mm <sup>2</sup> (calculated cross-section area 412 mm <sup>2</sup> ) $\phi$ 30.6
External Diameter of HTS Conductor layer	$\phi$ 35.4
HTS Conductor Layer (Two layers, 60 wires)	1-layer 30 wires(3 mm-width) $\phi$ 33.0 2-layer 30 wires(3 mm-width) $\phi$ 34.0 Measured $I_c$ 6440A at 77K
Insulated thickness design	22 mm (Designed stress AC 22.0 kV/mm, IMP 83.0 kV/mm)
External Diameter of Electric Insulation	$\phi$ 79.4
HTS Shield Layer (One layer, 43 wires)	43 wires(5 mm-width) $\phi$ 80.0 Measured $I_c$ 5920A at 77K
External Diameter of HTS Cable Core	$\phi$ 86.5
Dielectric Loss	Designed value 0.60W/m

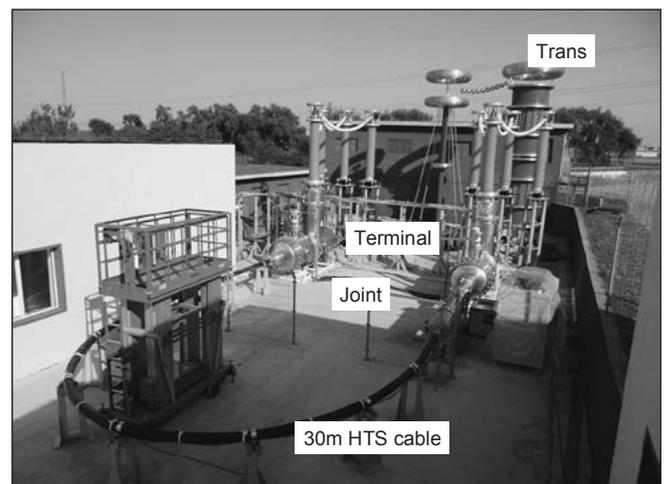


Fig.2 arrangement of model cable

### 参考文献

1. M. Yagi, et al.: Physica C, vol471, pages 1274-1278, 2011
2. T. Mitsuhashi, et al.: Abstracts of IEEJ Conference, Power and Energy Society (2012) 412
3. J. Teng, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85(2011) p.120

# YBCO 線材の安定化層厚のばらつきと過電流通電による局所劣化との関係

Relation of non-uniform thickness of YBCO stabilizer and local degradation due to overcurrent

王 旭東, 石山 敦士(早大); 八木 正史(古河電工); 丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)

WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); YAGI Masashi (Furukawa Electric Co., LTD.);

MARUYAMA Osamu, OKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)

E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

## 1. はじめに

YBCO 線材の電力応用において、突発的な過電流に対して劣化や焼損しない限界の温度を設計の指標・基準の1つとして考える必要がある。我々は劣化開始時の最高到達温度に注目し、過電流通電試験および超電導線材の劣化要因の一つと考えられる熱応力・歪みの解析評価を行ってきた[1, 2]。そして数値解析によりYBCO 線材の銅層の厚みのばらつきが過電流通電によるホットスポットを引き起こし、局所劣化に至る可能性があることが示された[3, 4]。そこで今回は、銅層厚に局所的なばらつきを持った YBCO 線材を用いて過電流通電試験を行い、銅層厚のばらつきとホットスポット・局所劣化との関係について評価したので報告する。なお、銅層は電気メッキ法により加工されており、現状の製造工程で最大 20%程度の厚みの不均一性が確認されている。

## 2. 実験

YBCO 線材は真空容器内の GFRP 製円筒状治具に取り付けられ、線材両端が電流リードと半田接続され、電流リードを介して GM 冷凍機により伝導冷却される。電圧端子は、線材長手方向に約 1 cm 間隔で銅層表面に圧着され、正極側から V1-V7 と番号付けして設置した。YBCO 線材 (Sample 1, 2) の諸元を Table 1 に示す。線材幅は 5 mm、線材長は 15 cm で、Sample 1 と 2 の初期  $I_c$  (1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ , 77 K) はそれぞれ約 150 A と 200 A である。Sample 1 と 2 の外観写真を Fig. 1 に示す。局所的な銅層厚のばらつきを模擬するために、Sample 1 と 2 は V23 区間内の 8 mm 長の範囲において、それぞれ 45  $\mu\text{m}$  (均一部より 10% 薄い) と 40  $\mu\text{m}$  (均一部より 20% 薄い) の不均一部分を電気メッキ時に作製した。過電流試験は初期冷却温度 77 K、外部磁場ゼロの条件で行った。実験は各電圧端子間の初期  $I_c$  を測定し、 $I_c$  以上の方形波状過電流を 1 秒間通電して、再び  $I_c$  測定を行い、劣化の有無を確認した。 $I_c$  の劣化を観測できなければ過電流を大きくしてもう一度通電し、劣化が確認できるまで過電流通電を繰り返して行い、各過電流通電時の最高到達温度を算出した。

Sample 1 と 2 の規格化した  $I_c$  と温度上昇の結果を Fig. 2 と 3 に示す。Fig. 3 に実験前後の線材外観写真が添付されている。Sample 1 は 220 A 通電後に V23 と V67 で 10% 以上の劣化が観測され、劣化温度は約 600 K である。Sample 2 は 240 A 通電後に V23 から電流リード付近までが焼損した。V23 は最大約 1000 K の温度上昇を観測し、その前後の区間も 600 K 以上の温度上昇を確認した。実験前の線材外観写真と実験後の焼損状態から、V23 区間周辺の発熱が電流リードに伝わり、焼損範囲が広がっていることがわかる。これは、本実験が真空断熱状態で伝導冷却を行っているため、発生した熱が電流リードへ流れやすいことが原因であると考えられる。以上から、V23 の銅層厚の局所的なばらつきが過電流通電時にホットスポットを引き起こし、局所的な劣化や焼損の原因となることが実験により確認された。

## 3. まとめ

銅層厚に局所的なばらつきを持った YBCO 線材を用いて過電流通電試験を行い、その結果、銅層のばらつきが局所

的なホットスポットを引き起こし、局所劣化の要因となりうることが示された。

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

Table.1 Specifications of coated conductors

Material	Thickness ( $\mu\text{m}$ )
Copper plating	50 (25 per each side) <sup>a</sup>
Sample 1	45 (22.5 per each side) <sup>b</sup>
Sample 2	40 (20 per each side) <sup>b</sup>
Silver sputtering	20
YBCO	1.5
Buffer	2.2
Hastelloy	100

<sup>a</sup> Uniform area. <sup>b</sup> Non-uniform area.

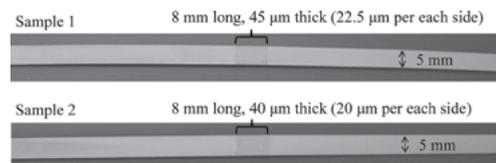


Fig. 1 Photographs of two samples

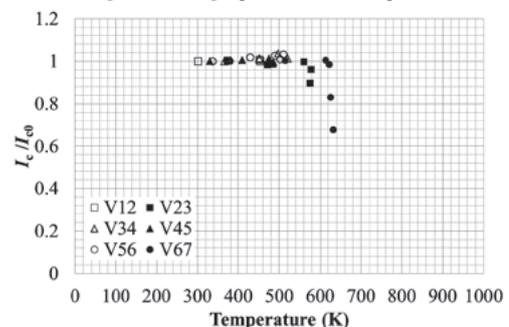


Fig. 2  $I_c / I_{c0}$  vs. temperature of sample 1

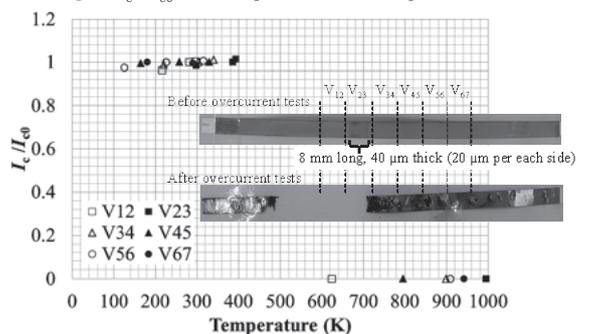


Fig. 3  $I_c / I_{c0}$  vs. temperature of sample 2

## 参考文献

1. H. Kono, X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Physica C: Superconductivity, Vol. 470 (2010) pp.1334-1337
2. A. Ishiyama, M. Arai, H. Momotari, X. Wang, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21 (2011) pp.3025-3028
3. X. Wang, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.106
4. X. Wang, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.23

# 大規模太陽光発電用超電導インバータの検討

## Superconducting Inverter for Large Scale Photovoltaic Power Generation

長村 光造 (応用科学研究所)

OSAMURA Kozo (Research Institute for Applied Sciences)

E-mail: kozo\_osamura@rias.or.jp

### 1. はじめに

電力の次世代ネットワークについては、理想的には不必要な電力損失が最小になる超電導技術を基幹とすることにより、大きな省エネルギー効果が達成される。そのためには発電機、送電経路、変圧器、限流器等々の個々の電力機器の超電導化と共に、それらを連係するインバータ、コンバータ等の電力変換器の超電導化が進められてこそいわゆる次世代ネットワークの実現が可能となる。そこでインバータの基礎技術分野であるパワーエレクトロニクス用スイッチングデバイスの特性について考えてみると、現用の Si を素材とするスイッチングデバイスの代表例を Si-MOSFET とすると、次世代高効率電力変換器としての方向性は WGS(ワイドギャップ半導体)の代表である SiC を素材とした MOSFET の開発が大きなターゲットとなっている。その特性は極めて優秀で製造コストが下がれば高い動作周波数で大きな電力変換容量の必要な用途に使用されると考えられる。一方本提案の超電導スイッチングデバイスはオン抵抗が極めて低いので導通損失を大幅に低減でき、大電流の通電が可能であるという特徴を持っている。しかし現状の技術では耐圧を高くできない、高速スイッチングが難しいという欠点がある。これらの欠点を含んでも、現状の超電導の性能により商用周波数帯での種々の応用に適用することが可能である。すなわちパワーエレクトロニクス用スイッチングデバイスは現状、将来共に Si および WGS を素材とするデバイスが主流を占めるが、低電圧、大電流、商用周波数帯での応用には超電導スイッチングデバイスが有利であり、省エネルギー、CO<sub>2</sub> 排出削減に大きく寄与すると考えられる。

### 2. 回路シミュレーションによる超電導インバータ動作の確認

回路シミュレーターにより高効率な超電導インバータの成立条件を検討した。実際の回路で使用する多くの定電圧電源についてシミュレーションを行った。定電圧電源からの直流を方形波の交流に変換する安定な条件を考察したところ、負荷に 100A の電流を流す条件についても変換効率の高い回路条件があることが明らかとなった。定電圧電源による直流/交流変換に関して、本超電導ブリッジ回路においても電力消費効率99%以上の変換条件があることが明らかとなった。ブリッジ回路の最大電圧は 100 V 以下であることがわかり、超電導インバータとして実現可能な条件であることが明らかとなった。

### 3. 大規模太陽光発電用超電導インバータ

さて太陽光電池からの直流電力はインバータ(パワーコンディショナ)により交流電力に変換し、交流系統に接続された負荷設備に電力を供給すると同時に、余剰電力を系統に逆潮流する装置で構成されている。その機能は最大電力追従機能(MPPT)、DC/AC 電力変換、系統連系の機能をそなえている。一例であるが太陽電池モジュールからの入力電圧 30V を昇圧チョップで 250V にしてから、インバータに投入する。表 1 に示すように電圧型 PWM インバータにはダイオード内蔵 IGBT が使用される。その消費電力は 200 - 326 W とかなり大きな値となる。そのためインバータの効率は一般的に 94%程度といわれている。表 2 に日本メーカの太陽電池モジュールの性能が示してある。例えば HIT-N230 モジュールは 72 枚のセルが 1580mm x 812mm のパネルに組み込まれている。1セルあたりの解放電圧は 0.5 ~ 0.7 V 程度である。モジュール化した場合には電圧は 12 ~ 50 V である。このように太陽電

池は本来的に低電圧・大電流の機器である。太陽電池で発電した電力をインバータ回路で交流に変換する。インバータの効率を高くするため昇圧チョップで電圧を高くすることが要求されている。この昇圧チョップ、インバータ回路でのトランジスタ、ダイオードによる電力損失が大きいことが問題となっている。

表1 パワーコンディショナに用いられるダイオード内蔵 IGBT の特性

機種	VCE (V)	Ic (A)	IF (A)	VF (V)	Pc (W)
IKW25NI20H3	1200	50	25	2.4	326
GT60M104	900	60	30	2.0	200

表2 現状の太陽電池モジュールの性能、ここで I<sub>sc</sub> は短絡電流、V<sub>oc</sub> は解放電圧、P<sub>max</sub> は最大出力である。

製品名	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>oc</sub> (V)	P <sub>max</sub> (W)	変換効率(%)
KJ775P-3CSCA	8.63	12.2	77.5	14.0
ND-165AA	8.48	25.65	165	14.3
PV-MA2000B	8.60	30.8	200	14.1
HIT-N230	5.83	51.2	230	17.9

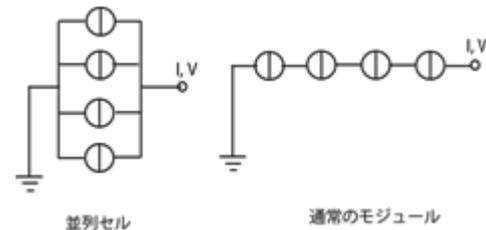


図1 太陽光セルの配列

そこで本研究では超電導インバータの低電圧・大電流の特性を生かして、太陽電池セルの起電力を直接交流に変換し、その後昇圧トランスで 100VAC/200VAC の交流を得ることを提案する。この超電導インバータ回路で 2V、500A の直流電力を変換した結果、4mΩ の負荷に 495A の方形波出力を得た。このときのブリッジ回路での消費電力は 2.6W であった。

### 4. まとめ

現状の太陽光発電では太陽光セルを直列に並べているため電圧が高く、セルの不均一さにより電圧の変動が起こりやすく、そのため MPPT のような機構が不可欠となる。一方太陽光セルを並列に配置する大きな利点は電圧が各セルの起電力 1V 以下で電圧変動が小さいことであり、そのため MPPT のような機構は不用になることである。また本研究で提案する冷凍冷却した超電導システムは大規模にするほど現状の半導体システムより省エネルギー性が優れていることを示すことができた。

# 高アスペクト比のテープ線材を用いた超伝導パルスコイルの性能向上 —新しい交流損失低減方法—

## Improvement of superconducting pulse coil by use of tapes with high aspect ratio of cross-section —A new method to reduce ac loss—

片山 拓郎, 森永 記史, 川越 明史, 住吉 文夫(鹿児島大)

KATAYAMA Takuro, MORINAGA Norifumi, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

E-mail: k5076271@kadai.jp

### 1. はじめに

通常丸線で用いられる NbTi 線材や MgB<sub>2</sub> 線材をテープ形状に加工すると、幅広面に平行な横磁界中で臨界電流が向上し、交流損失が低減する。我々は、このような高アスペクト比のテープ形状線材を活用することによって、超伝導パルスコイルを高性能化させることを提案している [1][2]。高アスペクト比のテープ形状線材を使用してパルスコイルを開発する場合、幅広面に垂直な横磁界を低減することが重要である。今回は、コイルエッジ付近でテープ線幅面に垂直に印加される変動磁界を低減するために、付加コイルを設置する新しい損失低減方法を提案する。また、Bi-2223 多芯テープ線で巻線したコイルを使って、この損失低減方法の効果を実証した実験結果について報告する。

### 2. 損失低減方法の原理

提案する損失低減法は、瞬時電圧低下補償用 SMES などのように、待機時間が比較的長い運転パターンを想定している。Fig.1 のような運転パターンで、放電時の交流損失を低減する。本損失低減法では、Fig.2 に示すような付加コイルを、メインコイルのエッジ付近にメインコイルと同軸に設置する。付加コイルとメインコイルは電氣的に絶縁されている。この付加コイルは、コイル端に取り付ける Edge コイルと、やや中央よりにセットする Middle コイルから構成されており、Fig.2 に示すようにその 2 つが短絡された閉ループを形成している。このループには、テープ面に垂直な磁界成分が鎖交する。したがって、メインコイルエッジ付近に加わる垂直方向の磁界が変化すると、その磁界変化を打ち消すような電流が誘起される。その結果、テープ面に垂直な磁界変動が抑制されて交流損失が低減する。

### 3. 損失低減効果の実証試験

本研究では、上述のような損失低減方法の効果を実証するために、Bi-2223 多芯テープ線で作成した試験コイルを作製し、実証試験を行った。コイルに使用した線材は、メインコイル、付加コイル共に、幅 4.2mm、厚み 0.22mm の Bi-2223 多芯テープ線材である。メインコイルは、内径 80mm、64 ターンのコイルでインダクタンスは 317  $\mu$ H である。作製した付加コイルは、メインコイル両端にセットする 2 つの付加コイルを、Middle コイルを共通にすることによって 1 つの閉ループにした。付加コイルを取りつけるとインダクタンスは 291  $\mu$ H となった。Middle コイルと Edge コイルは同半径であり、内径 92mm である。Middle コイルは 8 ターン、Edge コイルは 4 ターンである。付加コイルの損失低減効果を実証するために、付加コイルを設置しない場合と、設置した場合の 2 パターンについて、交流電流を通電したときの交流損失を測定した。交流電流は、3~20Arms、周波数 0.1~30Hz、とした。交流損失の測定は、メインコイル両端に取り付けた電圧端子を使用

し、4 端子法を用いて行った。冷却は、液体窒素を用いた浸漬冷却で行った。

測定した交流損失の周波数依存性を、Fig. 3 に示す。横軸は周波数で、縦軸は、測定した交流損失パワーを  $\omega LI^2$  で規格化した規格化損失である。これは、付加コイルの誘導電流により、実効的なコイルのインダクタンスが約 1 割低下することを考慮して損失低減効果を評価するためである。グラフから明らかのように、付加コイルを取り付けることによって、交流損失が低減している。損失の低減率は最大 40% である。以上から、本損失低減方法の原理が実証されている。なお、低周波領域で損失が上昇している原因は、付加コイルの短絡部で生じる抵抗損の影響である。

### 参考文献

1. K.Yasuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) p.262
2. T.Furubeppu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p209

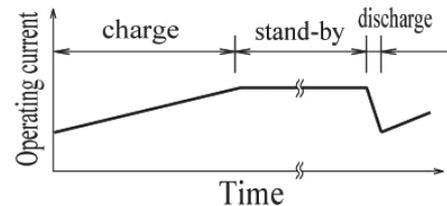


Fig.1 Operation pattern of the main coil

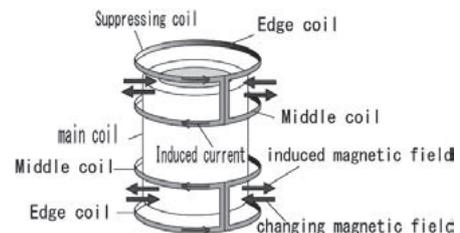


Fig.2 Principle of the new method to reduce ac losses

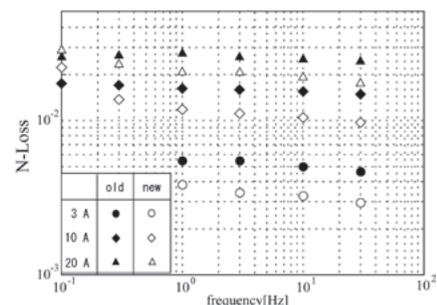


Fig.3 Frequency dependence of ac losses

# 電磁力平衡コイル用巻枠回転型ヘリカル巻線機の試作機開発

## Prototype Development of a Rotary Winding Form Type Helical Winding Machine for Force-Balanced Coils

遠藤 数馬(明治大学), 野村 新一(明治大学)  
 ENDO Kazuma (Meiji University), NOMURA Shinichi (Meiji University)

### 1. はじめに

電磁力平衡コイルは超電導電力貯蔵の性能を向上させる技術として有望視されているが、コイルの描く軌道が複雑でコイルの形状がトーラス環状であるため巻線作業の自動化が課題となる[1]。これを解決するため自動で電磁力平衡コイルの巻線軌道を描く機械の開発を進めている。

本稿では試作機を駆動させて単純ヘリカル軌道と変調ヘリカル軌道の一種である測地線軌道による軌道描画と銅線の巻線を行い、機械の性能評価を行った。

### 2. 測地線軌道

本研究で使用した測地線軌道とはある始点から終点までの最短距離を進む時の軌道のことである。

トーラス環の測地線軌道は巻線時に導線のブレを抑えることが容易だけでなく、内側を密に巻き、外側を疎に巻く軌道を持つ電磁力平衡コイルと軌道が類似している点でも有用である。

この特徴は電磁力平衡コイルの巻線をシミュレートできるとともに電力貯蔵用のコイルとして応用できる可能性を示している。

以下にトーラス環の測地線軌道の関数を示す。

$$\Phi = \frac{1}{N} \left( \theta + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \frac{\sin k\theta}{k} \right) + \Phi_0 \quad (1)$$

式(1)はヘリカル巻線の変調ピッチと呼ぶ。

$\phi$  と  $\theta$  はそれぞれトロイダル方向の角度とポロイダル方向の角度である。ポロイダル方向はトーラス環の小半径の回転方向のことを指し、トロイダル方向はトーラス環の大半径の回転方向を指す。N はヘリカル巻数と呼ばれ、トロイダル方向が1周する間にポロイダル方向が回転した回数表している。本研究では N=6 として実験を行った。Ck は軌道が変調する際に変化するパラメータであり、Ck の値が常に 0 であるとき軌道の分布は一律な単純ヘリカル軌道を描く。測地線軌道の場合、Ck はトーラス環の内側の時は水平に近い軌道に、外側の時は鉛直に近い軌道となる値に変化する。

### 3. 巻線機の単調・変調動作時の精度評価

Fig. 1 の試作機はプーリーベルトを利用してポロイダル方向を回転させる機構とトーラス環の小半径を挟み込む形でローラーを設置して歯車を通して動力を伝えてトロイダル方向を回転させる機構を用いてそれぞれステッピングモータを動力として駆動させている。

Fig.1 の機械を使用して大半径 150 mm、小半径 30 mm のベークライトでできたトーラス環に測地線軌道の描画と巻線を行った。

測定はトロイダル方向に分度器と直尺を用いて 10 度刻みの基準を作りポロイダル方向の角度を計測した。ポロイダル方向はハイトゲージにより高さを計測し、計測値から  $\sin \theta$  を用いて角度を算出した。測定精度はハイトゲージを使用した時  $\pm 0.01$  mm の測定誤差が発生した。

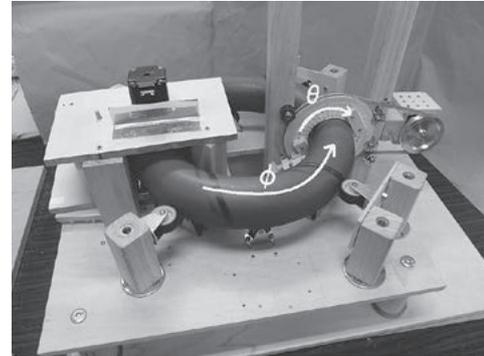


Fig. 1. A photograph of the prototype of the winding machine for the force-balanced coil helical windings.

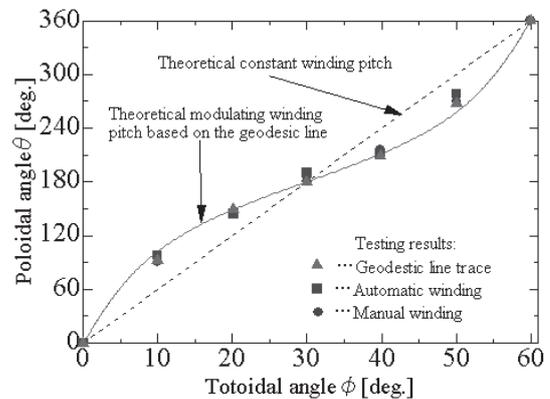


Fig. 2. Winding machine performance of the modulating helical winding pitch based on the geodesic line in the case of 6 poloidal turns per toroidal turn.

### 4. 測地線軌道の描画結果と考察

- Fig. 1 の試作機で巻線作業を行った結果、Fig. 2 となった。1プロットあたりの角度誤差の平均はペンによる軌道描画が 3.1 度、手巻きによる巻線軌道が 4.5 度、機械が巻いた導線の軌道が 5.7 度であった。測定誤差は最大 1 度程度存在するが誤差を考慮しても巻線と描画ともに精度が低いことが分かった。
- 機械による巻線作業は手巻きよりも安定していなかった。これは導線を巻きつける際にトーラス環に導線を密着させていなかったために巻線張力が不安定になり本来のトーラス環の小半径より大きい半径の位置で軌道を描いた結果、必要以上の導線を引き出し、余った導線が導線自身の持つ弾性によって軌道を変化させたためではないかと考える。
- 変調動作による軌道巻線作業が可能であるとわかったので、機械の動作精度を向上させつつ電磁力平衡コイルの軌道巻線作業を行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] N. Tanaka, et al.: "Development of a 7-T Force-Balanced Model Coil for SMES -Quench Properties-", Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 20

# 三相同軸構造超電導限流器の不均衡故障時の動作特性

## Current limiting characteristics at unbalanced fault of transformer type three-phase SFCL with coaxial structure

山邊 健太, 白井 康之, 野田 翔(京都大学); 馬場 旬平, 服部 圭佑(東京大学)

仁田 且三, 西原 太一, (明星大学); 小林 慎一, 佐藤 謙一, (住友電工)

YAMABE Kenta, NODA Sho, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto University)

BABA Jumpei, HATTORI Keisuke (The University of Tokyo); NITTA Tanzo, NISHIHARA Taichi (Meisei University)

KOBAYASHI Shin-ichi, SATO Ken-ichi (Sumitomo Electric Industries, Ltd)

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

### 1. はじめに

変圧器型超電導限流器は定常状態では磁束のキャンセルにより低インピーダンスである。系統事故が発生すると二次側が常電導化して磁界を打ち消せなくなり、限流器はまずリアクタンス成分で限流する。さらに大きな事故電流が流れると、一次側が常電導化し、その抵抗成分が加わってさらに高い限流効果を得る。本研究では同軸構造を持つ三相の変圧器型超電導限流器を試作し、不均衡動作時においても相間で互いに影響を及ぼすことなく上述のような段階的な限流インピーダンスの発生による限流が正常に可能かどうか模擬システムにおける実験で確認した。

### 2. 限流器(FCL)の構造

実験で使用した変圧器型超電導限流器は同軸状にコイルを配置した構造を持つ。コイル内の磁束による相間の影響は各コイルに用いられている2つのコイルを同方向に巻いて接続した巻き戻し構造によって解消される。それぞれのコイルで逆向きの磁束が発生するためコイルの内側では打ち消され磁束の影響は弱くなる。よって各相の限流器は同軸上にあっても独立的に動作することが可能である。使用した超電導線材はBSCCO線で、臨界電流は60Aである。

### 3. 実験方法

Fig.1 は実験で使用した一機二回線模擬送電系統である。このうち一回線の発電機母線至近端の Sw3 において結線を変更することで一線地絡、二線地絡、二線短絡の各不均衡事故を事故相の入れ替えも含め各3通りずつ模擬し、限流器の動作特性を調べた。スイッチングシーケンスは Fig.2 の通りである。以下、便宜上線流器の内側の層から順に A,B,C 相と呼ぶ。

### 4. 実験結果と考察

実験結果から代表してB相一線地絡事故の実験の結果を示す。Fig.3は事故中の限流器電流 $I_{fcl}$ で、実線が限流器を用いた場合、点線は限流器の代わりに待機時の限流器と同等のリアクトルを設置した場合の波形を示している。事故が起きたB相では最大500Aを超える電流を250A程度に抑制しているのが確認できる。一方健全相であるA,C相でもそれぞれインピーダンスが待機時よりも増加し事故中に増加する電流を軽減していた。限流器は設計通り事故相と健全相で異なる事故電流に合わせた動作をして事故の影響を抑制できた。同様の結果が事故相を入れ替えた試行及び他事故種の実験でも確認できた。変圧器型超電導限流器を同軸に設置したことによる各相のコイル間の磁束等による影響は小さく、各相の限流器は不均衡動作においても独立的に動作可能であることが確かめられた。

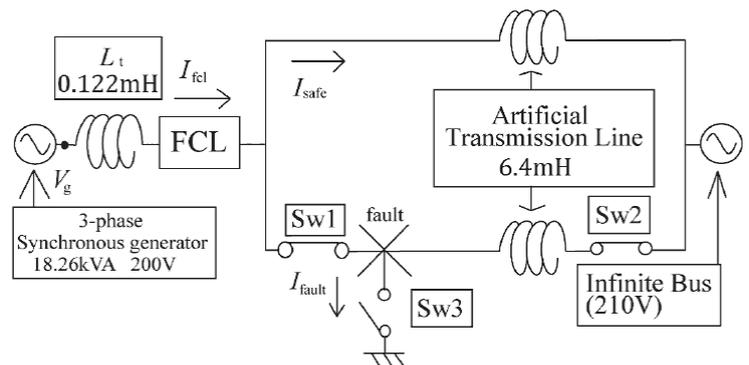


Fig.1 Experimental Circuit

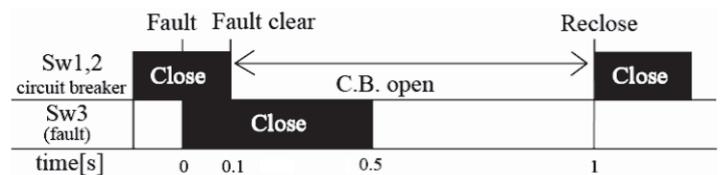


Fig.2 Switch Sequence

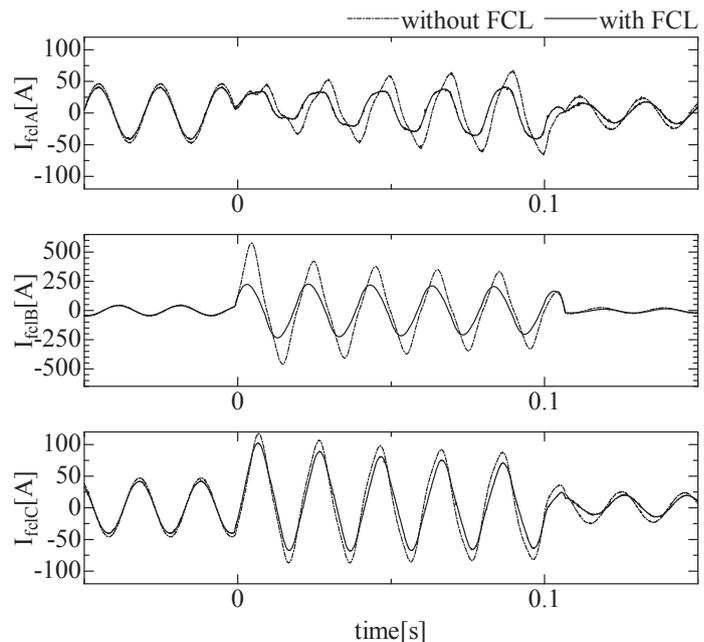


Fig.3 the Current of FCL