

# 種結晶の数と配置を考慮して異方的に成長させた YBCO バルク磁石の パルス着磁特性

## Characteristic Pulsed-Field Magnetizing of Anisotropic-Grown Y-Ba-Cu-O Bulk Superconducting Magnets with Use of Various numbers and Positions of Seed Crystals

岡 徹雄, 山田 幸正, 堀内 琢磨, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄(新潟大学);  
横山 和哉(足利工大); マルコ・ランガー(IFWDドレスデン)

OKA Tetsuo, YAMADA Yukimasa, HORIUCHI Takuma, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, SATO Takao (Niigata University);  
YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Inst. Tech.); Marco LANGER (IFW Dresden)

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

### 1. はじめに

熔融法とよぶ一種の焼結法により粗大な結晶に合成された高温超伝導バルク体はその強いピン止め力により、バルク磁石とよぶ優れた磁場捕捉性能をもち、擬似永久磁石として利用できる。超伝導状態で外部から磁場を印加するパルス着磁法(PFM)はその簡便な着磁法として知られ、5Tを超える磁場捕捉が報告されている [1]。この PFM では、量子化した磁束の運動による発熱がバルク磁石内部で起こり、その捕捉磁場性能を著しく下げることが知られている。

種結晶から結晶成長したバルク磁石は一般に Growth sector boundary (GSB) で区切られた不均質な巨視的構造をもち、これが磁場侵入挙動に影響を与えと考えられる。そこで筆者らは磁場捕捉性能の向上をねらい、磁場侵入の促進を目的に、より不均質性を強めた構造を意図的に作り、磁場印加と磁束の侵入挙動を実験的に評価した。

### 2. 実験方法

Y123系とよぶ円柱状の YBaCuO バルク磁石の合成時に、結晶成長の起点となる種結晶を2個並列して配置した前駆体を使って、異方的に成長させたバルク磁石を得た。Φ20mm × t10mm に成形した前駆体は60~80時間かけて0.25K/hの速度で冷却した。Y211相の含有率は仕掛け組成で28.5mol%である。Fig.1に典型的なバルク磁石の外観を示す。GM冷凍機(AISIN, GD101S)により30.6Kまで伝導冷却し、液体窒素冷却したコイルとパルス電源(日本電磁測器, SBV-10124, 120mF)を用い、2.8~5Tのパルス磁場を逐次印加して着磁した。着磁工程中と工程後の捕捉磁場はホールセンサー(F.W.BELL, BHT-921)により試料表面中央で評価し、試料表面の微細組織をEPMA(JEOL; JXA-8621)によりYとBaについて分析した。

### 3. 結果と考察

バルク表面中央への磁場侵入に対する磁場捕捉率の変化を印加磁場に対してFig. 2に示す。図中の#1と#2は従来法である1つの種結晶を試料中央に設置した試料であり、#3~5は2個の種結晶を並列配置したものである。両者への磁場侵入は明確に異なり、後者へはより低磁場で磁場は侵入した。低磁場での着磁は発熱の低下を暗示し、着磁しやすいバルク磁石を可能にすると考えられる。EPMAによる特性X線の強度比Y/Baの半径方向での距離依存性をFig. 3に示す。rの位置によって変化が逆転し、個々のGrowth sector region (GSR)によって、Y211粒子とこれに起因する臨界電流密度 $J_c$ が異方的に分布すると予想される。これが選択的かつ低磁場での磁場侵入を促したと考えられ、磁場侵入ゲートの意図的な構成が発熱の低下と高磁場捕捉に繋がる可能性を示している。

### 参考文献

- H. Fujishiro, et al.: Physica C, Vol.445-448 (2006) p.334-338,

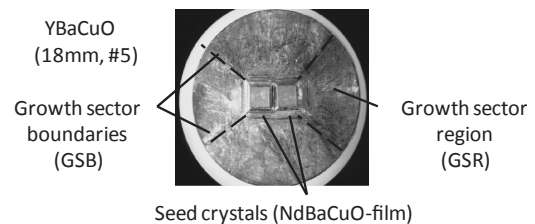


Fig. 1 Anisotropic-grown YBaCuO bulk magnet

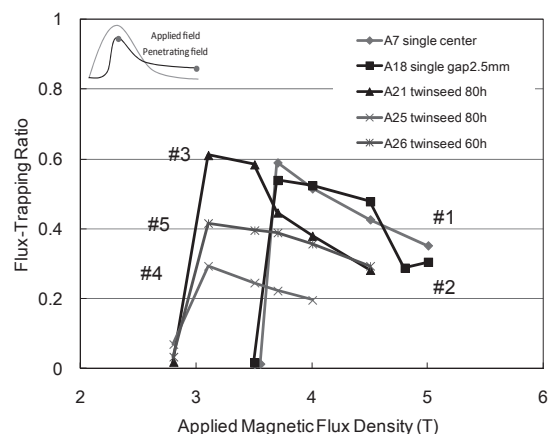


Fig. 2 Flux-Trapping ratios after PFM

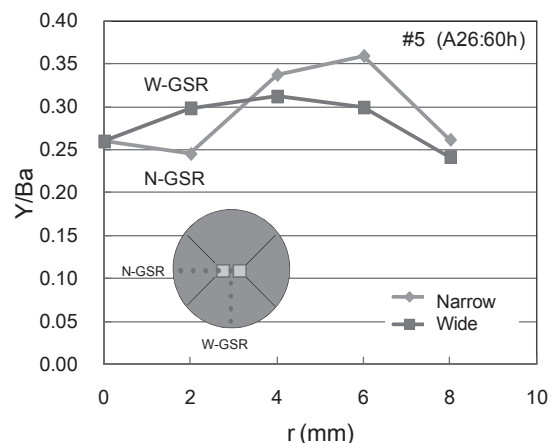


Fig. 3 Y/Ba Intensity Ratios in EPMA

## 磁場侵入経路の導入を狙ったバルク超伝導体の合成

### Synthesis of melt-processed bulk superconductors aimed at the introduction of the magnetic penetration route

堀内 拓磨, 山田 幸正, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄 (新潟大); 横山 和哉 (足利工大); LANGER Marco (IFW)

HORIUCHI Takuma, YAMADA Yukimasa, OGAWA Jun, HUKUI Satoshi, OKA Tetsuo (Niigata University);

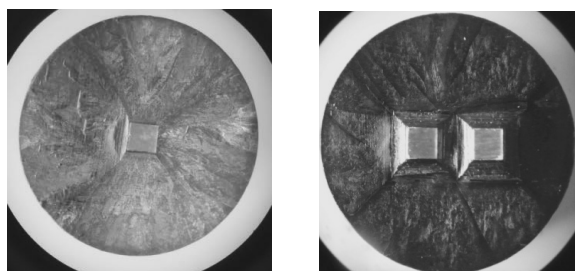
YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Institute of Technology); LANGER Marco (IFW)

#### 1. はじめに

バルク超伝導体の着磁において静磁場着磁法は理想的な着磁が可能となるが大型の装置必要であるのに対し、パルス着磁法は装置が簡便なため活躍の場を期待されている。しかし、パルス着磁法では磁束線の急激な運動に伴う影響が無視できず磁場捕捉性能が低下する。本研究では一般的に磁束は  $J_c$  値が低いほど侵入しやすいことから種結晶を2個用いることによりできる結晶成長領域 (Growth Sector Region; GSR) の異なりが磁場侵入経路の導入に起因するのではないかと考え、種結晶を2つ使用し、その間隔を変更したバルクを作製した。各々の試料にパルス着磁を行い、試料中心部での捕捉磁場と中心から6 mm 地点の温度上昇の挙動を観察し、磁場捕捉性能、磁場侵入にどのような影響を及ぼすか調査した。

#### 2. 実験方法

Fig.1 (a), (b)に実際に作製したY系バルク超伝導体を示す。超伝導相 Y123 とピン止め点 Y211 の粉末を調合し、直径20mmに圧粉、種結晶を試料表面に設置し、熔融することでバルク超伝導体を得る。熔融時に設置する種結晶の個数を1個から2個に変更し、その2個の種結晶間隔を1, 2, 3 mmと変更した試料を作成した。種結晶2個の場合GSRは上下側と左右側で面積が異なることが見て取れ、上下側の領域の広いGSRをWide-GSR、左右側の領域の狭いGSRをNarrow-GSRと名付ける。



No. 1 center -seeded sample

(a)

No.4 twin-seeded sample  
with a gap 3 mm

(b)

Fig.1 YBCO bulk superconductor samples

#### 3. 実験結果

Fig.2よりNo. 1, 2, 4で2T以上と同程度の磁場を捕捉した。種結晶2個の試料が低印加磁場(2.8~3.3T)で磁場が侵入し種結晶を2個用いることで磁場が侵入しやすくなった。種結晶間隔の異なる試料を比較すると、No. 2 が最も低印加磁場で着磁され、高い捕捉磁場を示した。No. 2 は Wide-GSR と Narrow-GSR の温度差が最も大きく温度変化にも顕著な差が見られることから、それぞれの GSR で磁場侵入挙動が異なるだけでなく、磁場侵入挙動の差が磁場捕捉性能に影響を与えたと考えられる。

#### 4. まとめ

種結晶を2個、その種結晶の間隔を1, 2, 3 mmと変更したバルクを作製し以下の結果を得た

- 種結晶2個用いると種結晶1個では磁場が侵入しなかった低印加磁場領域(2.8~3.3T)で磁場が侵入する
- Wide-GSR、Narrow-GSR では磁場侵入が異なり、Wide-GSRの方が磁場の侵入が速い

これらの結果から種結晶2個の場合に磁場の侵入が容易となり、Wide-GSR、Narrow-GSRでの磁場の侵入の違いが捕捉磁場に大きく影響したと考える。

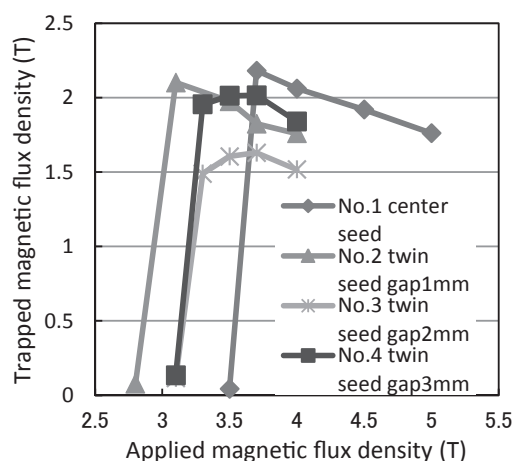


Fig.2 Trapped magnetic flux density measured at the center of the samples

RE123 溶融凝固バルクにおける RE 混合および Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 添加効果Effects of RE-mixing and Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> doping for RE123 melt-solidified bulks

瀬戸山 結衣, 下山 淳一, 山木 修, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二(東大院工); 水戸瀬 智久, 淡路 智(東北大金研)  
 SETOYAMA Yui, SHIMOYAMA Jun-ichi, YAMAKI Shu, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo);  
 MITOSE Tomohisa, AWAJI Satoshi (Univ. of Tohoku)  
 E-mail: 6071721904@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 1. 緒言

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123)溶融凝固バルクの臨界電流密度( $J_c$ )特性改善にはピンニングセンターの制御が重要となる。例えば RE<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (RE211)といった常伝導析出物は自己磁場下において、RE の Ba サイトへの低濃度の部分固溶(RE/Ba 固溶)領域や、(Nd,Eu,Gd)123<sup>[1]</sup>のような複数の RE 元素の使用(RE 混合)は磁場中において、 $J_c$  改善に有効であることが知られている。しかし RE 混合による  $J_c$  改善効果は再現性にやや乏しく起源が十分に理解されていない。前回の発表では、1 - 2 種類の RE を用いて作製した計 8 種類の試料の超伝導特性や組織の違いを考察し、RE 混合が 123 相における RE/Ba 固溶量を制御できる可能性を指摘した<sup>[2]</sup>。今回はそれらの試料の低温・高磁場での  $J_c$  特性の評価や、TEM による微細組織観察を通じ、RE 混合の本質解明に迫った。また、新規ピンニングセンター探索を目的として、Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 微量添加が Y123 バルクの  $J_c$  特性にいかに関与を及ぼすかを検討した。

## 2. 実験方法

RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (RE : Dy, Y, Er), BaCO<sub>3</sub>, CuO の原料粉を混合し、固相反応法により RE123 粉末と RE211 粉末を合成した。これらをモル比で RE123:RE211 = 7:3 となるように秤量し各々 Pt を 0.5 wt% 添加して混合後、一軸プレス(100 MPa)により 20 mmφ × 10 mm<sup>t</sup> のペレットに成型した。種結晶に Nd123 単結晶を用い、底面加熱式の電気炉にて溶融凝固を行った。育成したバルクの様々な部分から約 2 mm × 2 mm × 1 mm<sup>t/c</sup> の小片を切り出し、450°C 酸素気流中で 100 h 以上アニールした。今回は得られた試料について TEM による微細組織観察、最高 18 T までの VSM による磁化測定を行った。Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 添加効果の検討では、BaCO<sub>3</sub>, CuO, CuCl<sub>2</sub> から固相反応法で合成した Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 粉末を Y123 : Y211 = 7 : 3 の混合物(Pt 0.5 wt% 添加)へ、Y123 粉末に対し 0, 0.5, 1.0, 5.0 mol% 添加し、溶融凝固による結晶育成、超伝導特性や組織の評価を行った。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 に(Dy,Er)123, (Y,Dy)123, (Y,Er)123 の 40 および 60 K における  $J_c$  の磁場依存性を示す。これらの試料の中では (Dy,Er)123 が、40 K では ~ 11 T まで、60 K では ~ 5 T まで最も高い  $J_c$  を示したが、さらに高磁場領域では (Y,Dy)123 や (Y,Er)123 の  $J_c$  が高くなった。RE/Ba 固溶は RE が Dy のようなイオン半径の大きな中軽希土類であると生じやすい。低温・高磁場領域では RE/Ba 固溶による 123 母相の汚れが  $J_c$  を低下させる影響が強まるため、(Dy,Er)123 や (Y,Dy)123 よりも固溶量が少ないと考えられる (Y,Er)123 が、15 T では最も  $J_c$  が高くなったと説明できる。また Y123 を原料に用いた試料では 40 K における  $J_c$ - $B$  曲線で 2 つのピークが確認され、高磁場まで高  $J_c$  (~ 2.8 × 10<sup>5</sup> A cm<sup>-2</sup>, 40 K, 15 T) を維持した。これはより高温では 1 つに見えていたピークが分裂したものと考えられ、~ 3 T でのピークは周期的な格子欠陥によるもの、10 T 以上の高磁場領域でのピークは化学的なピンニングセンターの働きによるもの、とそれぞれ推測できる。このピークの分裂は RE 混合試料のみで確認され、高  $J_c$  を高磁場まで保つことに寄与していると考えられる。以上の結果から、Y123 相原料を用いた RE 混合バルクが、低温・高磁場での応用を考えると材料として高いポテンシャルを有することがわかった。

Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 添加試料はいずれの添加量においても鋭い超伝導転移を示し、 $T_c$  は ~ 92 K であった。Fig. 2 に  $a$ -growth 領域での 77 K における  $J_c$  の種結晶からの距離依存性を示す。Y123 原料に対し Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> を 0.5 mol% 添加したバルクにおいて、自己磁場下で最も高い  $J_c$  (~ 9.5 × 10<sup>4</sup> A cm<sup>-2</sup>) が得られた。無添加試料では種結晶から離れるにつれ  $J_c$  が低下した一方で、Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> を添加した試料ではその  $J_c$  の低下が抑制されることがわかった。今回、Y123 溶融凝固バルクへの新規ピンニングセンター導入を目的として添加を試みた結果、ピンニングセンターが生成した可能性も考えられるものの、通常のバルクにおいて種結晶から離れた位置で  $J_c$  が低下する要因(211 相の堆積や過剰な RE/Ba 固溶)が Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> の添加により緩和された可能性、もしくは、Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> 由来の化合物が 123 相の配向を補助した可能性が示唆された。講演では両研究における試料の TEM 観察結果を併せて報告し、 $J_c$  改善の機構について議論する。

## 参考文献

- [1] M. Muralidhar *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 237001.  
 [2] Y. Setoyama, *et al. Abstracts of CSSJ Conference 87* (2013) p.28.

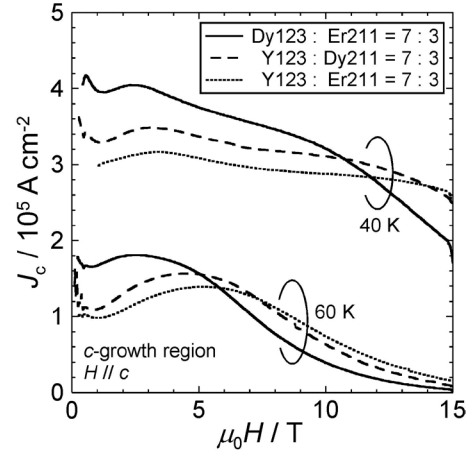


Fig. 1  $J_c$ - $H$  curves at 40 and 60 K for RE-mixed bulks.

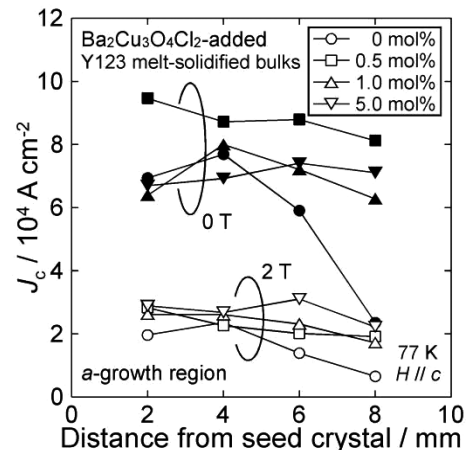


Fig. 2 Variation of  $J_c$  with distance from seed crystal in  $a$ -growth regions of Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> added Y123 bulks at 77 K.



# 低温における Ga 添加 Y123 溶融凝固バルクの $J_c$ - $B$ 特性

## $J_c$ - $B$ characteristics of Ga-doped Y123 melt-solidified bulks at low temperatures

山本 修, 下山 淳一, 瀬戸山 結衣, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二 (東大院工); 水戸瀬 智久, 淡路 智 (東北大金研)  
 YAMAKI Shu, SHIMOYAMA Jun-ichi, SETOYAMA Yui, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku,  
 KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo); MITOSE Tomohisa, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)  
 E-mail: 3450281928@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(RE123)溶融凝固バルクは高磁場下でも高い  $J_c$  を示すことから、強力な超伝導磁石として非常に高いポテンシャルを持っている。しかし、強力超伝導磁石としての応用の多くは液体窒素温度以下で運転することを想定しているのに対し、これまでの研究における  $J_c$  の最適化は主に 77 K で行われてきた。77 K で最も良い特性を示す条件が、低温でも最も良い特性を示すとは限らないことは既にわかっており[1]、RE123 バルク応用の拡大には、77 K 以下の低温で高い  $J_c$  を達成するための改善指針の確立が不可欠である。そこで本研究では低温で高い捕捉磁場特性を有する小型超伝導バルクの開発を目的とし、磁場中での  $J_c$  の改善に有効であることが知られている Ga の微量添加[2]を行った Y123 溶融凝固バルクの低温における  $J_c$ - $B$  特性の評価を行った。

### 2. 実験方法

本研究では原料粉末に Y123 と Y211 を低温固相反応により同時生成させたものを用いている。具体的には、出発原料をモル比で Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : BaO<sub>2</sub> : CuO = 13 : 34 : 48 となるように秤量し、さらに作製するバルクによって Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や Pt 粉末を添加、混合後 20% O<sub>2</sub>/Ar 気流中、800°C で 60 h 焼成することにより Y123 と Y211 を 7 : 3 の比で含む原料粉末を作製した。得られた原料粉末を一軸プレス(100 MPa)により 10 mmφ×8 mm<sup>t</sup> のペレットに成型し、Nd123 単結晶を種結晶としてペレットの上面中央に置き、底面加熱方式の電気炉にて空气中で溶融凝固を行った。作製した溶融凝固バルクから小片を切り出し、所定の温度にて 100 h の酸素アニールを行った後、SQUID 磁束計や VSM による磁化測定から  $J_c$  を評価した。

### 3. 結果と考察

前回の発表において、従来は Y211 を微細化する目的で加えられていた Pt を加えずに Y123 バルクを作製すると、40 K において磁場中での  $J_c$  が改善するという結果が得られたことを示した。この効果が Ga を微量添加した Y123 溶融凝固バルクにも有効であるかを確認するため、Pt 無添加 Ga 添加 Y123 バルクを作製した。Fig. 1 に Ag<sub>2</sub>O を 10 wt% 加え、Ga を Cu-O 鎖の Cu に対して 0.5 mol% ドープしたバルクの 40 K における  $J_c$  の磁場依存性を示す。Pt 無添加による磁場中での  $J_c$  の改善は Ga ドープ試料においても再現し、*c*-growth 領域の  $J_c$  は、40 K、3 T において  $5.8 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$  という非常に高い値に達した。しかし、Fig. 1 に示した SQUID による 5 T までの磁化測定の結果では、3 T 以下の  $J_c$  しか正しく評価することができず、まだ  $J_c$  の第 2 ピークが現れていなかった。そこで、東北大学の金属材料研究所の VSM を用いて 18 T までの磁化測定を行った。Fig. 2 に Ga を微量ドープした試料の 15 T までの  $J_c$  の磁場依存性を示す。なお、Pt-free の試料は Fig. 1 に示したものと同一であるが、Pt-added の試料は Fig. 1 に示したものは別の試料であり、 $J_c$  が少し低下していることを注記する。Ga を微量ドープした試料の低温での  $J_c$  のピークは非常にブロードであることが明らかになり、特に Ga ドープ Pt 添加した試料の 20 K での  $J_c$  は 8 T 付近において  $9.3 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$  に達した。また、Pt フリーの試料の 40 K での  $J_c$  は 10 T 付近でも  $5 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$  程度を保っていることから、この  $J_c$  からビオサバールの法則を用いて捕捉磁場を計算したところ、実際に育成したバルクのサイズであ

る直径 8 mm、厚さ 4 mm という小型のバルクでも 10 T 級の磁場が捕捉できることが示唆された。

当日は、Ga を微量添加した Y123 バルク以外にも電子線を照射した Y123 バルクの  $J_c$  の磁場依存性についても報告する。

### 参考文献

- [1] Y. Ishii *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** (2009) 3487-3490.  
 [2] Y. Ishii *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 202513.

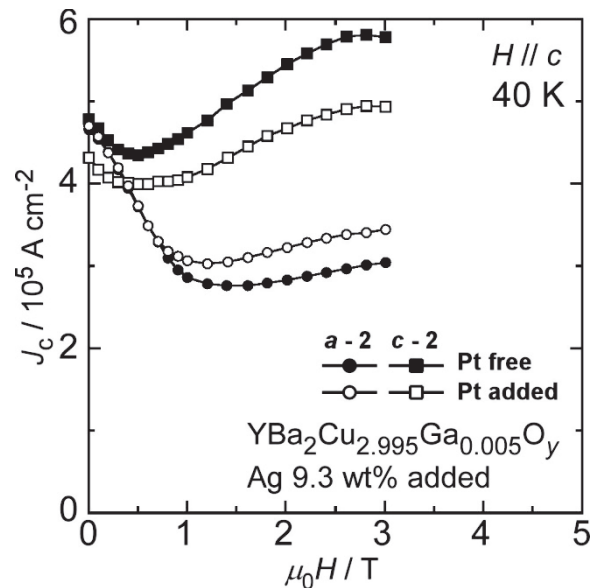


Fig. 1 Magnetic field dependence of  $J_c$  at 40 K for Ga-doped and Ag-added Y123 bulks.

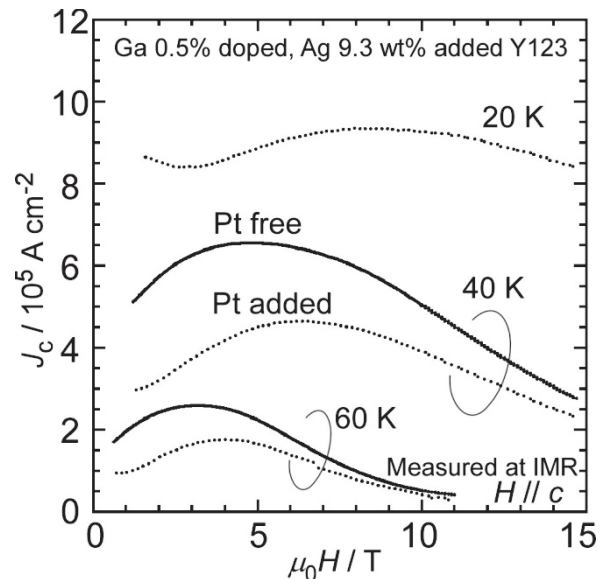


Fig. 2  $J_c$ - $B$  properties measured by VSM at 20, 40, 60 K for 0.5% Ga-doped and 9.3 wt% Ag-added Y123 bulks.

# 磁場配向法による $c$ 軸配向 Hg(Re)1212 焼結体の作製

## Preparation of $c$ -axis aligned Hg(Re)1212 sintered bulk via magnetic orientation

椎野 匠, 下山 淳一, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二 (東大院工)

SHIINO Takumi, SHIMOYAMA Jun-ichi, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)

E-mail: 6894966696@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

Hg系銅酸化物超伝導体(HgBa<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>y</sub>)のHgサイトへのRe置換は化学的安定性を改善し、かつ異方性を低下させることから、不可逆磁場が上昇する[1]。本研究では最も高い $T_c$ (~135 K)を有する $n=3$ のHg(Re)1223において、磁場配向法によって強く $c$ 軸配向したバルクを作製することに成功している[2]。同じホモログシリーズの $n=2$ であるHg(Re)1212もHg(Re)1223と同じく $c$ 軸が磁化容易軸であるためこの手法によって $c$ 軸配向体を作製することが可能であり、高い $T_c$ (100-120 K)を有するため液体窒素を冷媒とした応用が期待できる材料である。 $J_c$ を支配する要因の一つとして粒間結合が挙げられるが、銅酸化物超伝導体においてはキャリアのオーバードープ状態は粒間結合の向上につながる。Hg(Re)1212はHg(Re)1223よりもオーバードープ状態が容易に達成されるため、 $T_c$ ではHg(Re)1223に劣るが高臨界電流特性の多結晶材料作製に期待が持てる。本研究では、磁場配向法によってHg(Re)1212の $c$ 軸配向体を作製し、それを焼結することによって高臨界電流特性 Hg(Re)1212 多結晶バルクの開発を目指している。

### 2. 実験方法

ReO<sub>3</sub>、BaCO<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub>、CuOを仕込組成がRe<sub>0.1</sub>Ba<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>y</sub>となるように混合し空气中880°Cで焼成後、急冷を行った。ここで得られたプリカーサ0.75 gと0.29 gのHgOの混合物をペレット成型し石英管に真空封入した後820°Cで10時間焼成し、Hg(Re)1212焼結体を得た。その焼結体を粉碎後、有機溶媒中に分散させスラリーとし、8 Tの磁場中でスリップキャストを行った。得られた堆積物を仮焼し有機物を分解した後、一軸プレスを行い、プリカーサとHgOの混合圧粉体と共に石英管に真空封入し様々な条件で再焼成した。試料の構成相の同定及び配向度の評価をX線回折(XRD)測定によって行い、超伝導特性はSQUID磁束計を用いた磁化測定より評価した。また、微細組織は走査型電子顕微鏡により観察した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1のXRDパターンに示すように、HgOとプリカーサの混合物を焼結した試料はHg(Re)1212が主相であったが、不純物相が残存していた。しかし磁場配向体においては表面とその研磨面のXRDパターンは強い(00 $\ell$ )由来のピークを示しており、磁場配向体内部まで配向していることを示唆している。Fig. 2のXRDパターンより、再焼成後においてもHg(Re)1212相及び $c$ 軸配向を保持していることをXRDパターンから確認した。Fig. 3にHg(Re)1212焼結体及び磁場配向→再焼成後のHg(Re)1212バルクの $J_c$ - $H$ 曲線を示す。いずれのバルクもHgOとプリカーサの混合物を焼結した試料よりも低い $J_c$ を示した。内部の配向度が弱いことや磁場配向後に見られる不純物相が電流パスの障害となっていることが考えられる。現在、Hg(Re)1212の単相合成、より粒間結合に優れた高度に $c$ 軸配向したバルクの作製条件の最適化に取り組んでいるところである。当日は、粒間結合の向上を図り、BaのSr置換を行ったHg(Re)1212の $c$ 軸配向体の作製及びその超伝導特性についても報告する予定である。

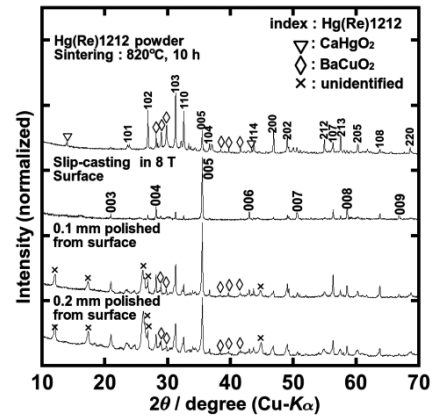


Fig. 1 XRD patterns of Hg(Re)1212 powder and the surfaces of magnetically oriented Hg(Re)1212 aggregates.

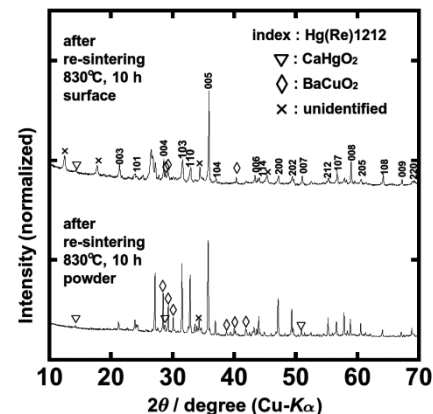


Fig. 2 XRD patterns of magnetically oriented Hg(Re)1212 aggregates before and after re-sintering.

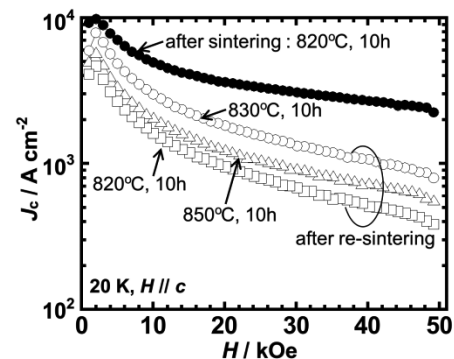


Fig. 3  $J_c$ - $H$  curves of Hg(Re)1212 bulks.

### 参考文献

1. J. Shimoyama, K. Kitazawa and K. Kishio *Proc. Of 10th Anniv. HTS Workshop on Physics*, **85** (1996).
2. T. Ozaki, J. Shimoyama, H. Ogino, A. Yamamoto and K. Kishio, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013;**23**:6800404.

# 高温超電導バルク材における捕捉磁場特性の温度領域による逆転現象

Crossover phenomenon in the temperature dependence of trapped magnetic fields in HTS bulks

手嶋 英一、森田 充(新日鉄住金)、内藤 智之、藤代 博之(岩手大)  
 TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.),  
 NAITO Tomoyuki, FUJISHORO Hiroyuki (Iwate Univ.)  
 E-mail: teshima.a5b.hidekazu@jp.nssmc.com

## 1. はじめに

RE-Ba-Cu-O系(REはYまたは希土類元素)高温超電導バルク材は、磁場中でのピン止め力が強いいため、卓上型NMR/MRI、医療用小型超強力磁石、MDDS、船舶用モータ、風力発電機などの強磁場発生源としての応用が期待されている。このようなバルク磁石応用では高い捕捉磁場が求められるが、捕捉磁場は液体窒素中(77K)で評価されることが多い。一方、多くのバルク磁石応用は、より強い磁場強度を得るために、冷凍機冷却によって30-50Kの温度領域を想定している。従来、77Kで捕捉磁場が高いものは、より低い温度領域でも高い捕捉磁場特性を有すると考えられており、実際報告されているデータでもそのような傾向を示していた[1]。しかし、最近、良質な単結晶試料において、臨界電流密度( $J_c$ )が温度領域で逆転する可能性があることが示唆されている[2]。高温超電導バルク材でも材料の最適化が進み、高品質な試料が得られるようになってきており、バルク材の捕捉磁場特性の温度依存性を詳細に調べることは有用であると考えられる。そこで、本研究では、77Kでの捕捉磁場特性の異なる直径46mmの大型Gd系バルク材を用いて、捕捉磁場特性の温度依存性の比較評価を行った。

## 2. 実験

本研究で用いたGd系バルク材は、高配向した超電導相(123相)中に $1\mu\text{m}$ 程度の非超電導相(211相)が微細分散した試料で、Gd123相:Gd211相=1:3の組成比にて改良型QMG法[3]により作製した。試料サイズは直径46mm、厚さ15mmとした。機械的特性を改善するため銀添加を行い、さらにSUSリングで補強した。77Kでの捕捉磁場は、磁場中冷却で着磁した後、JIS規格(H73132007)に基づき減磁後15分以上経過してから、試料表面の約0.6mm上をホール素子を走査して測定した。一方、捕捉磁場の温度依存性は、10Tの外部磁場中で40K程度まで冷却した後、昇温しながら試料中央表面に貼付したホール素子で測定した。

## 3. 結果

Fig.1は、本研究で用いたGd系バルク材の外観写真と77Kでの捕捉磁場分布である。77Kでの捕捉磁場のピーク値は試料Aで1.51T、試料Bで1.04Tであった。Fig.2は、試料Aと試料Bの捕捉磁場の温度依存性を示す。77KではFig.1と同じように試料Aの捕捉磁場の方が高いが、60K以下の温度領域では逆に試料Bの方が高くなるのが分かった。すなわち、高温超電導バルク材の捕捉磁場特性が温度領域によって逆転することが初めて実験的に確認で

きた。なお、50K以下で再び差が小さくなるのは、本実験での印加磁場(10T)のためであり、印加磁場の制約がなければ、差は更に大きくなるものと予測される。捕捉磁場の温度領域における逆転現象は、バルク材の中に複数のピン止め種が存在し、それぞれの要素ピン止め力の温度依存性が異なることから起こるものと考えられる。高温超電導バルク材の品質が向上してきたために、このような現象が実験的にも観測されるようになったと推定される。想定される運転温度領域によってピン止め点を最適設計することで、今後バルク材の捕捉磁場特性はさらに大幅に向上することが期待できる。

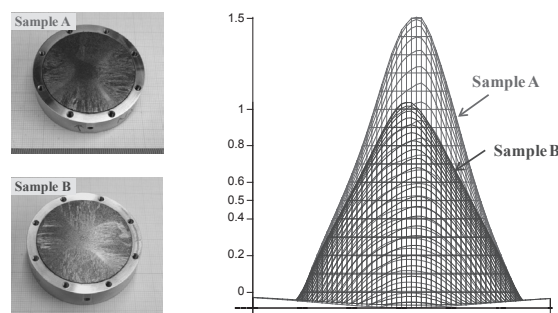


Fig.1 Appearance of Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors 46 mm in diameter and their trapped field distributions at 77K.

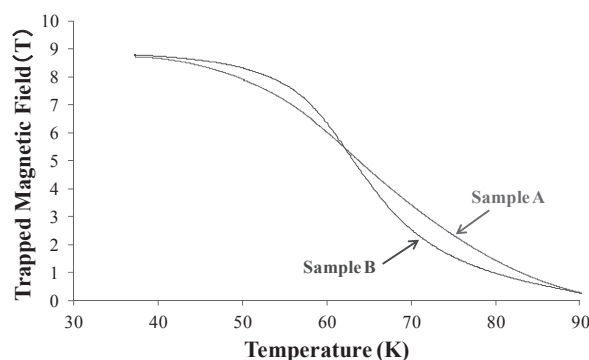


Fig.2 Temperature dependence of trapped magnetic field of the Gd-Ba-Cu-O bulks shown in Fig.1.

## 参考文献

1. U.Mizutani et al. : PhysicaC **335** (2000) 92-96
2. Y.Ishii et al. : J. Cryo. Soc. Jpn. Vol.44 No.12 (2009) 573-578
3. M.Morita et al. : Physica C **253-240** (1994) 209-212



# 超電導バルクの磁場中冷却着磁過程のシミュレーション

## Numerical simulation in superconducting bulk during field cooled magnetization

藤代博之, 内藤智之 (岩手大), 手嶋英一 (新日鐵住金)

FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.), TESHIMA Hidekazu (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.)  
(E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

### はじめに

本研究グループはこれまで、超電導バルクのパルス着磁 (PFM) 現象について実験とシミュレーションで検討してきたが[1]、磁場中冷却着磁 (FCM) における捕捉磁場強度や磁場分布については、Bean model を用いた解析や、 $J_c$ - $B$  特性が優れているほど捕捉磁場特性が良いという程度の定性的な議論しか行われてこなかった。本研究では REBCO 系や  $MgB_2$  バルクの FCM 過程の捕捉磁場シミュレーションについてモデルの構築と解析結果を示す。実験結果と比較した結果、解析において各温度で  $J_c$ - $B$  特性の実測値を用いることで信頼性の高い再現が可能となった。

### 解析と検討

SUS リングにマウントした直径 46 mm、厚さ 15 mm の新日鐵住金製 GdBCO 超電導バルクを、各温度  $T$  において超電導マグネット (内径 120 mm、外径 150 mm、高さ 100 mm) を用いて、10 T からの FCM (減磁速度:  $-0.17$ ~ $-0.22$  T/min) を行うことを想定してモデルを構築した。電磁界と熱伝導の軸対称連成方程式を (株)フォトンの EDDY-THERMO により有限要素法を用いて解析した。超電導体の非線形な  $E$ - $J$  特性は  $n$  値モデル ( $n=8$ ) を用い、各温度における  $J_c$ - $B$  特性は、Jirsa らの論文[2]を参考に第 1, 第 2 ピークを表現した (1) 式を使って、Kii らの実験結果[3]を再現して用いた。熱伝導方程式にはバルクおよび SUS リングの比熱及び熱伝導率の温度依存性も解析に導入した。

$$J_c = J_{c1} \exp\left(-\frac{B}{B_L}\right) + J_{c2} \frac{B}{B_{\max}} \exp\left[\frac{1}{n} \left(1 - \left(\frac{B}{B_{\max}}\right)^n\right)\right] \quad (1)$$

図 1 に各温度でのバルク中心表面 ( $z=0$  mm) における捕捉磁場  $B_z$  の結果を示す。比較のために Bean model と Kim model ( $B_0=10$ ) の場合の結果も示す。また挿入図には各モデルにおける 40 K の  $J_c$ - $B$  特性を示した。simulation の結果は、捕捉磁場  $B_z$  は温度低下とともに増大するが、FCM の印加磁場が 10 T であるため、最終的には  $B_z=10$  T に漸近する。図中には GdBCO バルクの FCM の実験結果を示すが[4]、 $J_c$ - $B$  特性を反映させた simulation 結果は実験値を非常に良く再現することが分かった。

図 2 に  $T=40$  K においてバルク中心表面 ( $z=0$  mm) における捕捉磁場  $B_z$  と最高温度  $T_{\max}$  の時間依存性の simulation 結果を示す。熱解析においてバルクと cold stage の接触熱伝導率を  $5 \times 10^{-3}$  W/mK と仮定すると、 $T_{\max}$  は減磁終了直後に約 1.6 K となり、時間依存性とともに実験結果を再現できることが分かった。

図 3 に  $T=40$  K における FCM 後の捕捉磁場分布の simulation 結果を示す。バルク表面 ( $z=0$  mm) では  $J_c$ - $B$  特性を反映して先端が尖った分布形状を示すが、 $z$  の増大とともに最大強度は減少し、なだらかな分布となる。図中には中心 ( $z=0$  mm) の捕捉磁場及び、 $z=4$  mm における磁場分布の実験値[4]を示すが、simulation 結果よりも絶対値が低い結果となった。これはバルク内の  $J_c$ - $B$  特性の分布の影響や反磁場の影響のためであると考えられる。

発表では  $MgB_2$  バルクの解析結果についても報告する。

### 参考文献

- [1] H. Fujishiro *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 105021
- [2] M. Jirsa *et al.*, Phys. Rev. B **55** (1997) 3276
- [3] T. Kii *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4100904
- [4] H. Teshima *et al.*, Physics Procedia **45** (2013) 61

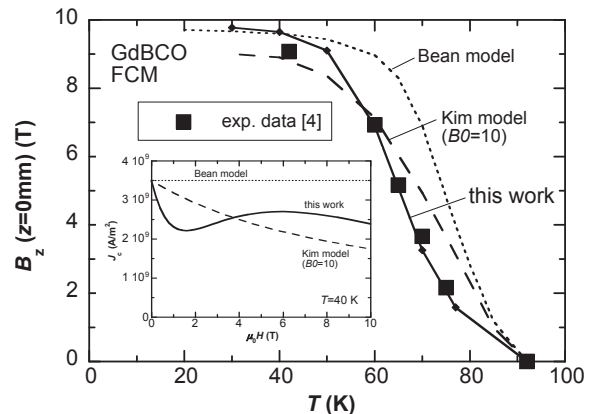


Fig. 1. Results of the simulation of trapped field  $B_z$  at the center of the bulk surface as a function of temperature under the various conditions of  $J_c$ - $B$  characteristics. The experimental results [4] are also shown.

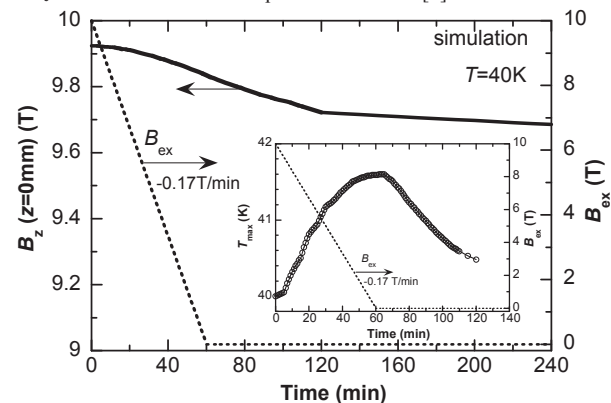


Fig. 2. Time dependence of trapped field  $B_z$  and temperature rise  $T$  during FCM process from 10 T at 40 K.

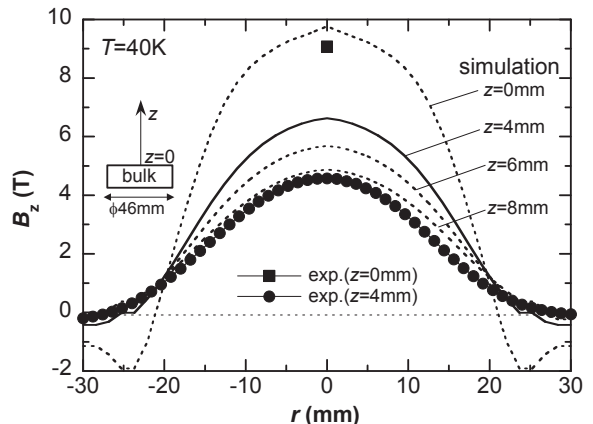


Fig. 3. Trapped field profiles on the bulk after FCM process from 10 T at 40 K, as a function of the distance  $z$  from the bulk surface. The experimental results [4] are also shown.

# 対向型バルク磁石による均一磁場発生 of 基礎的な検討

## Fundamental examination of a homogeneous magnetic field generation by a face-to-face superconducting bulk magnet

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

近年、超伝導バルク体を用いた研究用の小型 NMR/MRI 装置が開発され、マウス胚の MR 顕微画像が撮影できることが実証された[1]。同装置はリング状の Eu 系バルク体を積層し、それを磁場中冷却法により着磁することで、ボア内で均一磁場を発生させている。

本研究は、装置の汎用性や操作性を考慮して、対向型バルク磁石装置の磁極間で均一磁場を発生させることを目的とする。リング型バルク体を用いることで、磁場分布は台形型となり、更にそれらを異極対向配置することで、磁極間中央部で均一磁場を発生させることが可能となる。本文では、既存のバルク体の着磁結果を用いて、数値解析により磁場分布や均一度を評価する。

### 2. 解析方法

$\phi 60 \times 20$  mm の Gd 系超伝導バルク体を対向型バルク磁石装置に装着してパルス着磁を行ったところ、捕捉磁場は約 3 T であった。この実験結果から、臨界電流モデルを用いて、数値解析により臨界電流密度を算出した。次に、Fig.1 に示すように、バルク体の中央部に穴を開けてリング形状とすることを想定し、内径の大きさ  $a$  を 10~50 mm、及び対向する磁極間距離  $d$  を 4~30 mm に変えた時の磁場分布を評価した。

### 3. 結果および検討

Fig.2 に内径が 30 mm または 50 mm、および磁極間距離が 10 mm または 20 mm の磁極間中央部分の一次元磁束密度分布を示す。横軸は径方向の座標を表し、0 は中心を表している。内径が 30 mm の場合、磁束密度は 1.5 T 以上と大きい、磁束の均一性はほとんど見られない。一方、内径が 50 mm の場合、磁束密度は 0.7 T 以下と小さいものの、磁束の均一性が確認できる。

次に、各磁場分布の結果から 1% および 5% 以内の均一度の割合を計算した。Fig. 3 に比較した結果を示す。内径が 50 mm の方が 30 mm の場合よりも均一度は高いことがわかる。また、磁極間距離が 10 mm の場合では 20 mm の場合よりも均一度が高く、均一度が 1% の割合は内径が 50 mm の場合では、20 mm の場合と比較して 1.3 倍以上に向上した。

### 4. まとめ

本文は対向型バルク磁石装置の磁極間で均一磁場を発生させることを目的として、既存のバルク体の着磁結果を用いて数値解析を行い、磁場分布や均一度の評価を行った。解析の結果、バルク体の内径が大きいほど、また磁極間距離が短いほど均一度が高くなることがわかった。

今後は、さらに均一度が向上する条件や均一磁場空間を拡大する方法を検討し、さらに対向型バルク磁石装置を用いて実験を行う予定である。

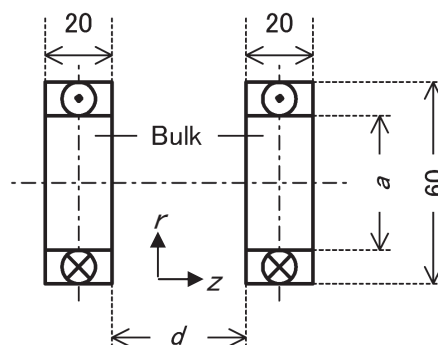


Fig.1 Principle of a homogeneous magnetic field generation

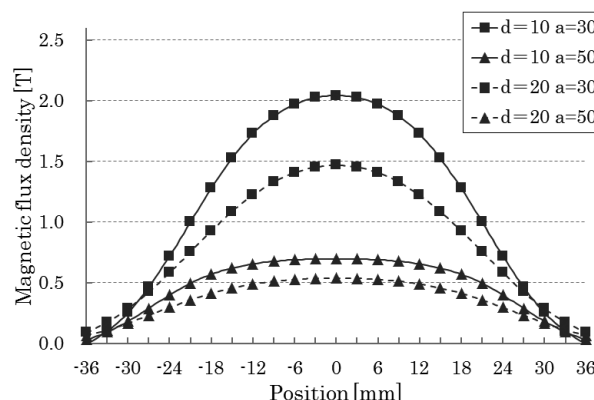


Fig.2 One dimensional magnetic flux distribution

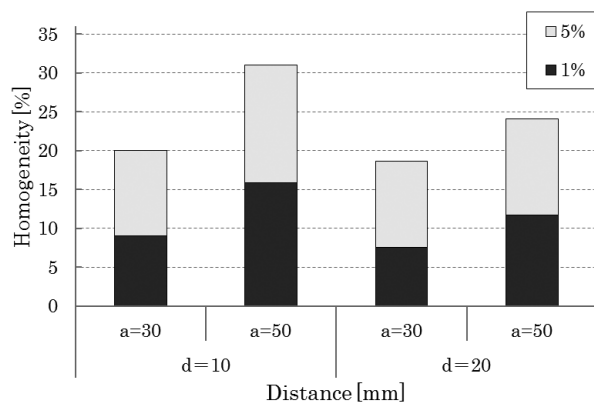


Fig.3 Comparison of the homogeneity

### 参考文献

1. 仲村: 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集 (2012) 2S-p01



## 細孔の大きさによるバルク体への着磁特性の影響

### Influence of the hole size on magnetizing properties of a bulk superconductor

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)

TSUKUI Tomotaka, MITA Hiroaki, TSUBONoya Noriyuki (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ); YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.)

#### 1. はじめに

超伝導バルク磁石は、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。一方、近年の材料技術の進歩により、大型で高特性の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、それらのバルク体を着磁し易くするため、細孔を開けたバルク体を提案し、着磁特性を評価している。これまでに  $\phi$  2[mm]の細孔バルク体を用いて実験を行ってきたが、本文では  $\phi$  1[mm]の細孔バルク体で実験を行い、着磁特性への影響を比較・検討する。

#### 2. 細孔ありバルク体

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、弱い磁場でも細孔部分から、効率的に磁束を侵入させることが出来る。しかし、その反面強い磁場を印加した際に、発熱に伴う磁束フローにより捕捉磁場が減少することが懸念される。Fig. 1に細孔の大きさが  $\phi$  1[mm](試料A)と  $\phi$  2[mm](試料B)のバルク体の写真を示す。両試料とも  $\phi$  60×20[mm] の  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  で、細孔を端から 3、7、11、15[mm]の位置に、細孔を4ヶ所開けている。さらに、両試料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

Fig. 1のバルク体を冷凍機に取り付け、真空断熱した後に冷却する。両試料ともに 3.1~7.0[T]の単一パルス磁場を、約 0.8[T]間隔の大きさとで印加する。これを 20~50[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、磁極表面の磁場分布を測定した。

#### 4. 実験結果

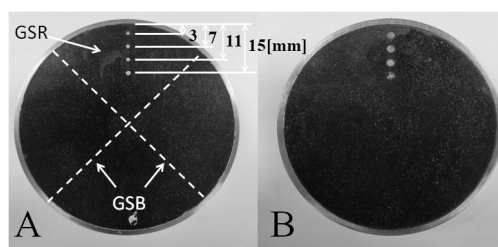
Fig. 2 に試料A、B、及び細孔のない通常試料の各印加磁場における総磁束量を比較した結果を示す。試料Aは 4.6[T]までの低印加磁場の場合、20 および 50[K]ともに試料Bと通常試料の中間的な特性を示している。5.4[T]以上の高印加磁場の場合、20[K]では磁束の減少傾向が試料Bとほぼ同じで、通常試料より磁束の減少が小さくなっている。一方、50[K]の印加磁場 5.4[T]の時は、試料Bよりも磁束の減少は少なかったが、印加磁場 6.2[T]以上では試料Bと同様に、通常試料より大きく磁束が減少することが確認できた。

これらの結果、低印加磁場では、細孔のサイズを大きくすることで、磁束が侵入し易くなることが確認できた。高印加磁場

では、低温の場合、磁束の減少が抑制されているが、細孔の大きさによる影響の違いは少ないと思われる。一方、高温の場合、試料 A、B 共に低温時に見られた抑制効果はなく、通常試料よりも磁束の減少が大きくなることが分かった。

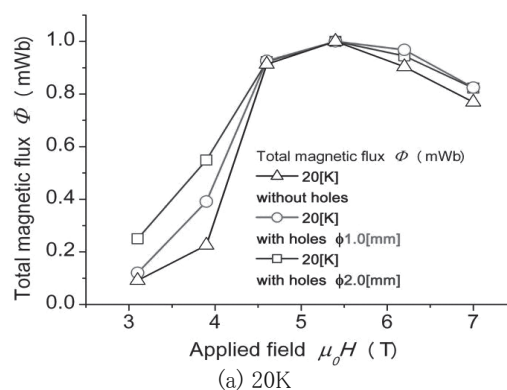
#### 5. まとめ

本文では、 $\phi$  1[mm]の細孔を開けた試料でパルス着磁実験を行い、これまでの  $\phi$  2[mm]の細孔と比較した。低温において細孔の有用性が確認でき、さらに細孔は大きい方が磁束の侵入が容易になることが確認できた。また、高温の場合、細孔の大きさにあまり関係なく、通常試料より磁束が大きく減少する事が確認できた。今後、同一試料による細孔を開けたバルク体の捕捉磁場特性を検証する予定である。

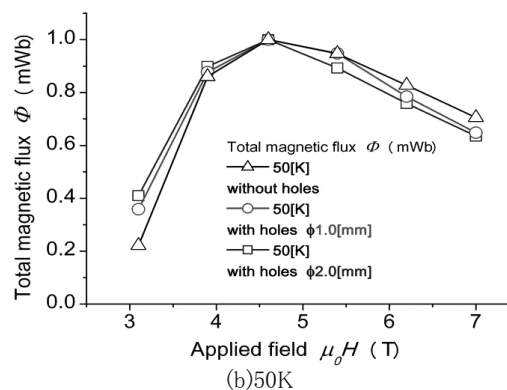


(a) hole size:  $\phi$  1mm (b) hole size:  $\phi$  2mm

Fig. 1. Photographs of bulk superconductors



(a) 20K



(b) 50K

Fig. 2. Comparison of total magnetic flux

# 風力用大容量 HTS 発電機の機器パラメータが発電機性能に及ぼす影響

## Influence of machine parameters of large-scale HTS generators for wind power systems on the generator performance

牧 直樹, 許 媛媛, 和泉 充 (東京海洋大学)  
 MAKI Naoki, XU Yuanyuan, IZUMI Mitsuru (TUMST)  
 E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

### 1. はじめに

洋上風力用に 10MW 級の大容量 HTS(高温超電導)発電機の開発研究が活発化しており、経済性の高い突極型 HTS 発電機的设计研究を進めている[1,2]。今回は、改良した设计プログラムを用いて 10 MW 機の運転温度や発電機外径などの機器パラメータが発電機性能に及ぼす影響を明らかにし、それに基づく最適设计結果について報告する。

### 2. HTS 機の基本性能と機器パラメータの影響

改良した设计プログラムを用いて発電機性能(重量、効率、HTS 長さ)に及ぼす機器パラメータの影響について検討した。

Fig.1 は HTS 発電機の基本性能に及ぼす界磁巻線運転温度の影響を示す。極数 96、極ピッチ 438 mm、固定子外径 14 m の場合であり、所要 HTS 長さや発電機効率に及ぼす影響が大きいことが分かる。実際には、この発電機性能と冷凍機の動力・信頼性を考慮して運転温度を決めることになる。

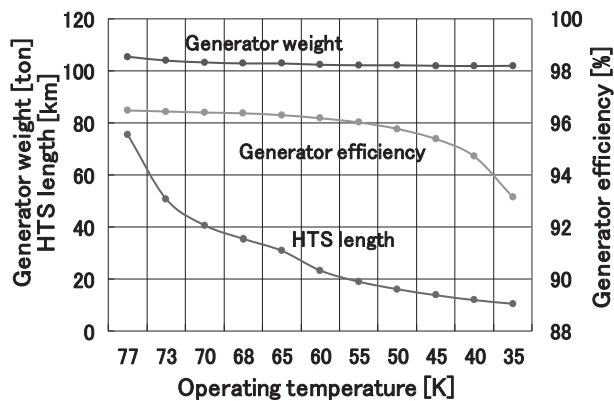


Fig.1 Influence of operating temperature on the basic performance of HTS generators

Fig.2 は HTS 発電機の基本性能に及ぼす固定子外径の影響を示す。運転温度 68 K、極ピッチ 438 mm の場合であり、固定子外径を 10 m 以上にしないと発電機重量が著しく増大することが分かる。陸上輸送制限 4 m を越えるので、海上輸送法や分割部品の現地組立法の開発並びに 10 m を越える大口径発電機の製作法の開発が必要になる。

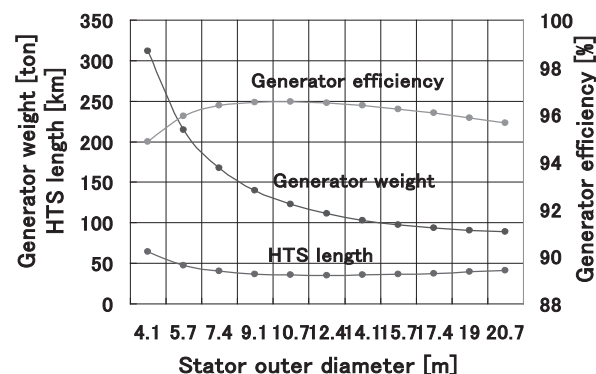


Fig.2 Influence of stator outer diameter on the basic performance of HTS generators

Fig.3 は HTS 発電機の基本性能に及ぼす回転子鉄心部磁束密度の影響を示す。運転温度 68 K、極数 96、固定子外径 14 m の場合であり、回転子鉄心部磁束密度 2 T 程度がバランスの良い電気性能を与えることが分かる。

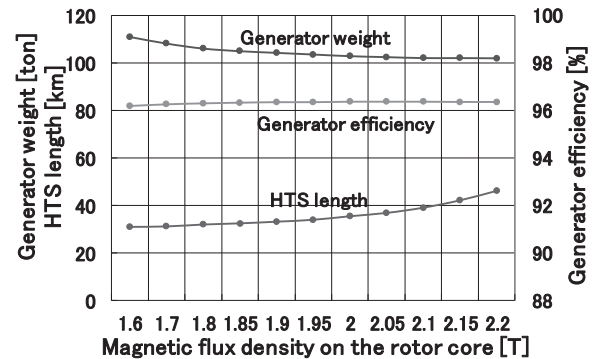


Fig.3 Influence of magnetic flux density on the rotor cores on the basic performance of HTS generators

### 3. HTS 機の最適设计

有効出力 10MW 機を対象に、上記機器パラメータの影響を考慮して最適化した主な電気设计結果を Table 1 に示す。界磁巻線冷却法の異なる 3 種類を示しており、次項が分かる。

- いずれも超低速機の性能向上のため、発電機外径が 14 m で発電機長さが 0.3 m の大口径短軸機である。
  - 低温運転時には导体電流密度が増大するので、HTS 長さは 68、50 K では 77 K 運転時の 2/5、1/5 に低減できる。
  - 発電機重量は 102 ~ 106 トンであり、低温になるほど幾分軽量化するが、冷却温度の影響は小さい。
  - 50 K 運転時の冷凍機動力は他機よりも著しく増大する。
- 以上の点から、現状では 68 K 運転が望ましいと言える。

Table 1 Main optimized design results of HTS generators (10 MW, 10 rpm, 3.3 kV, 96 poles, 8 Hz, pf=1.0)

Operating temperature [K]	77	68	50
Coolant for field winding	LN <sub>2</sub>	Sub-cool LN <sub>2</sub>	Conduction
Stator outer diameter [m]	14.1	14.1	14.1
Stator length [m]	0.312	0.313	0.316
Magnetic flux [Wb/pole]	0.119	0.119	0.119
Magnetic flux density in air gap [T]	1.10	1.10	1.09
Magnetomotive force of field winding [kA/pole]	36.7	35.9	35.4
HTS field current [A]	64	134	293
Length of HTS wires [km]	104	42	22
Rotor weight [ton]	49	46	45
Generator weight [ton]	106	103	102
Armature copper loss [kW]	271	271	271
Refrigerator power [kW]	30	42	105
Generator efficiency [%]	96.5	96.4	95.8

### 参考文献

1. N. Maki, M. Izumi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.203
2. N. Maki, Y.Xu, M. Izumi: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.90

# 高温超電導誘導同期回転機における電機子巻線技術開発

## Technology development of armature windings in HTS induction/synchronous machine

中村 武恒 (京大), 伊藤 佳孝, 吉川 雅章, 寺澤 俊久 (イムラ材研), 福井 聡 (新潟大), 古瀬 充穂 (産総研)  
 NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA MATERIAL);  
 FUKUI Satoshi (Niigata Univ.); FURUSE Mitsuho (AIST)  
 E-mail: tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指した高温超電導誘導同期回転機(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を実施している[1]。本回転機は、かご形誘導機の回転子巻線を超電導化することにより、同期回転に伴う高効率化や高トルク密度化他の飛躍的高性能化を実現することができる。一方で、上記性能を究極化するためには超電導固定子巻線技術も確立する必要があるが、少なくともレトロフィット機としては、我々のグループの回転試験成功[2]の他はほとんど例が無いと思われる(最近になって、ケンブリッジ大学のグループが成功したとの報告があるが、詳細は不明)。全超電導回転機の真の革新性を明示するためには、低電圧駆動ならびに低交流損失化の観点から大電流量電機子巻線技術が不可欠になる(後述)。本研究では、大電流・低損失超電導固定子巻線技術を実現するために実施している検討現状について報告する。

### 2. 高温超電導固定子巻線法の検討

Fig. 1には、NEDOプロで開発した高温超電導固定子(3相、8極、DI-BSCCO<sup>®</sup>テープ材使用)の外観写真[2]を示す。我々は、本固定子とDI-BSCCO<sup>®</sup>回転子を組み合わせて回転数1800 rpmにおける連続無負荷回転試験に成功した[2]。一方、本プロジェクトでは冷却系まで含めたシステム全体の高効率化を志向しており、冷凍機COPの制約から77 K程度の高温運転を目指している。しかしながら、同温度ではHTSコイルの臨界電流が低く、Fig. 1に示す固定子巻線では30 A程度である。従って、Fig. 1では巻数30に増やして高電圧駆動することで出力を維持しているが、これでは超電導化の圧倒的優位性を見出すことができない。さらに、固定子(電機子)巻線には3相交流電流が流れることから、交流損失低減技術も不可欠である。

上記背景に基づき、筆者は電機子巻線の大電流量化が重要との認識のもとで研究開発を展開している。即ち、HTS-ISMは所謂電気装荷極大化型回転機ということができ、鉄心を積極利用するが故に駆動電圧を低減して高トルク時の磁気飽和を抑え、その代わりに大電流量導体化を実現する必要がある。そのためには、バンドル導体化が必須となり、かつその経験磁界を極限まで低減する必要がある。本回転機において、固定子巻線は鉄心スロット内に収められるが、その磁気鏡像効果をうまく利用することによって上記磁界を低減することが可能である。また、上記コイル経験磁界低減、HTS特有のコイル巻線形状に伴うスロット占率低下他の制約条件をクリアするため、1スロット1コイルサイドの単層巻が基本になるのでは無いかと考えられる。

一方、交流損失に関しては、電流負荷率の調整によって低減する戦略を考えている。電磁エネルギー変換に際しての超電導体の特長は、電界( $E$ )—電流密度( $J$ )構成関係にのみ現れる[3]。従って、上記構成関係さえ定量化できれば、形式的にはMaxwell方程式との組み合わせで議論でき、近年では市販の電磁界解析ソフトによって比較的容易に評価できる。ただし、量子化磁束の履歴運動が本質である交流損失(ヒステリシス損失)を議論する際には、非線形でかつ閾値を与える臨界電流をしっかりと考慮する必要がある。

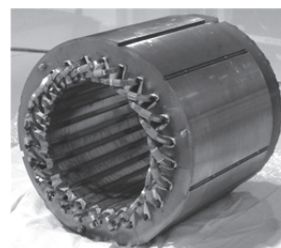


Fig.1 Photograph of fabricated HTS stator

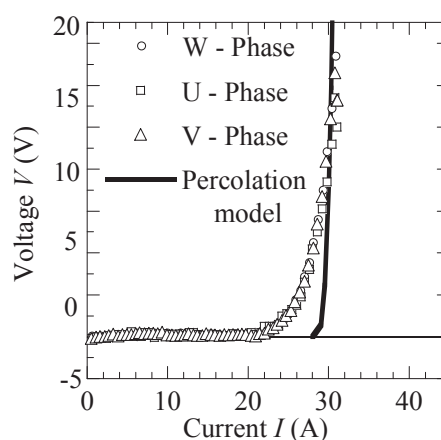


Fig. 2 Voltage( $V$ )-current( $I$ ) curves of DI-BSCCO<sup>®</sup> stator coil (Fig. 1).

### 3. 大電流・低損失固定子巻線開発のための検討例

まず、固定子巻線(Fig. 1)の臨界電流について、定量評価を行った。評価に際しては、木須らが提案しているパーコレーション遷移モデルを利用した[4]。まず、スロット内の磁界ベクトル分布を2次元静磁界解析に基づいてデータベース化し、上記モデルを利用してコイルの通電特性を評価した。Fig. 2にはその結果を示すが、立ち上がり付近を除いて実験結果と解析結果は良く一致している。立ち上がり付近の不一致は、コイルエンドの影響を考慮していないことが主因と考えられるが、現在検討中である。さらに、上記解析コードを利用し、磁気鏡像効果によってテープ材に垂直に印加される磁界成分を低減すると、Fig. 1の固定子について臨界電流が47.7 A(約1.5倍)に改善された[5]。現在は、臨界電流200 A程度@77 K程度の固定子開発にも成功している(なお、既述した単層巻とすることで臨界電流はさらに改善すると期待される)[5]。

### 謝辞

本研究は、JSTの委託事業「戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA) (低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム)」の一環として実施された。

### 参考文献

1. 中村武恒: 応用物理, Vol. 82, No. 7 (2013) pp. 579-582
2. D. Sekiguchi, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3 (2012) 5200904 (4 pp)
3. 松下照男: 磁束ピンニングと電磁現象(産業図書) (1994)
4. 木須隆暢 他, 低温工学, Vol. 34, No. 7 (1999) pp.322-331
5. 投稿準備中



# 系統安定化用超電導フライホイール蓄電装置の検討

## Study of superconducting flywheel energy storage system for power plant

長谷川 均, 長嶋 賢, 山下 知久(鉄道総研); 前田 忠和(クボテック); 松岡 太郎(古河電気)  
宮崎 和也(山梨県); 清水 秀樹(ミラプロ)

HASEGAWA Hitoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI); MAEDA Tadakazu (KUBOTECK)

MATSUOKA Taro (FURUKAWA ELECTRIC); MIYAZAKI Kazuya (YAMANASHI Pref.); SHIMIZU Hideki (MiraPro)

E-mail: hasegawa.hitoshi.10@rtri.or.jp

### 1. はじめに

現在、NEDO の助成事業により、系統安定化用蓄電装置をプロジェクト各社とともに開発している。蓄電装置としては、二次電池、電気二重層キャパシタなどいくつかの方法が考えられるが、我々のプロジェクトでは、寿命、コスト、蓄エネルギー容量、出力等を検討し、フライホイールを用いた蓄電装置の適用を検討している。フライホイール蓄電装置は、電力を回転エネルギーに変換して蓄エネルギーを行うため、電気化学的な反応を使用しない。このため、二次電池等で課題となっている、化学的な劣化を生じない。また、鉛やカドミウムなどの有害物質を含まない、リチウムなどの希少な元素を使用しないなどの特徴がある。さらに、蓄電容量と出力を独立して設計できるため、高出力低容量や低出力高容量といった機器設計の自由度が大きい。一方で、体積当たりの蓄エネルギー量が二次電池等に比べると小さいといった課題があり、弾み車の大質量化や高回転化の必要がある。

本報告では、現在検討中のフライホイール蓄電装置の概要について述べる。

### 2. 超電導フライホイール蓄電装置の構成

弾み車は直径2m程度であり、炭素繊維は通常のファイラメントワインディングを使用しない円形螺旋織物方式を検討している。この織物方式では、直径が大きく厚み方向に薄い弾み車を作ることができる特徴がある。このような円盤状のものを積み重ねることにより、蓄エネルギー容量に応じた弾み車が構成できる。回転数は定格で  $3,000 \sim 6,000 \text{min}^{-1}$  で運転し、例えば、弾み車質量1,000kgで30kWh級、3,000kgで100kWh級、10,000kgで300kWhといったスケールアップができる。

このような重量物を損失を極力少なく浮上するため、ステータにRE系高温超電導コイル、ローターに高温超電導バルク体を使用し非接触で支持する構造とした。また、冷凍機損失の低減や冷却期間の短縮をはかるため、低温とする部分を超電導軸受部分のみに限定し、弾み車を格納した容器は減圧とするものの常温となる構成とした。発電電動機は永久磁石同期電動機を使用し、電力変換器の直流で系統とやりとりをする。(Fig.1)

### 3. 太陽光発電所との系統連系

実証試験として山梨県米倉山の太陽光発電所に接続し系統安定試験等を行う予定である。(Fig. 2)

実証試験では、太陽光発電装置とは6.6kV交流系統で連系する予定であるが、直流リンク部での電力安定化も検討していきたい。

### 4. おわりに

現在、系統安定化に限らず、安全、低コスト、安定な蓄エネルギー装置の要望が高くなってきており、フライホイール蓄電装置が注目されている。大きな重量の弾み車を低損失で支持する構成として超電導軸受を使用することを提案し、実証試験を行っていく予定である。

なお、この研究開発は NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」にて行われている。

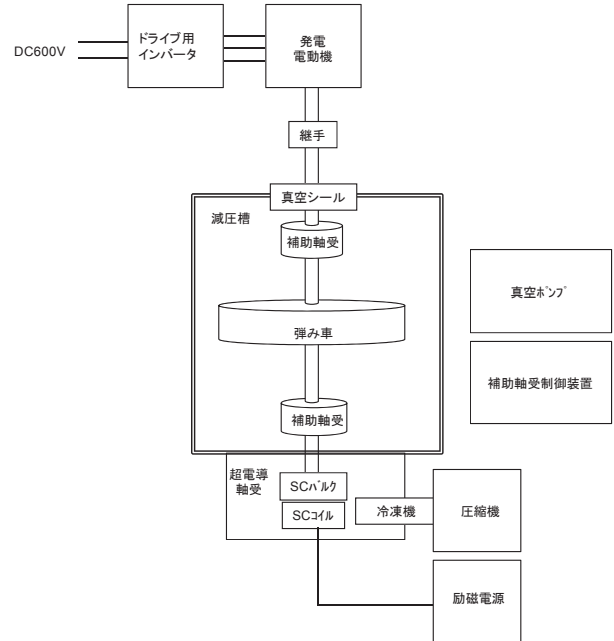


Fig.1 Flywheel energy storage system using superconducting bearing

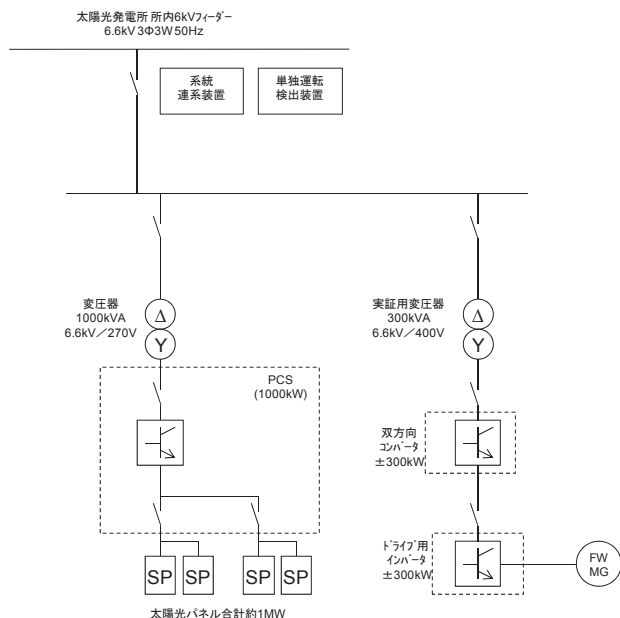


Fig.2 Circuit diagram of photovoltaic power plant

### 参考文献

1. Arai, Yoshizawa, Kashiwagi, Nagashima: "Contactless rotation of high temperature superconducting magnetic bearing over 20-kN load", Spring meeting of Cryogenics and Superconductivity, May 2013 (in Japanese)

# 高温超電導体を用いた可変リアクトルに関する基礎検討

## Fundamental study on variable reactor using a high temperature superconductor

佐藤 裕太, 本田 慎太郎, 宮城 大輔, 津田 理 (東北大)

SATO Yuta, HONDA Shintaro, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku university)

E-mail: yutasato@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

分散型電源である風力発電や太陽光発電の大量導入に伴い、急峻な電圧変動や逆潮流による系統末端電圧の上昇といった問題が生じる可能性がある。このため、電圧調整装置が重要な役割を果たすことになるが、既存の電圧調整装置である SVR では、機械式のタップ切換のため、急峻な変動に対応できず、連続的な電圧調整ができない。また、SVC では、半導体を使用しているため、装置が大型化し、回路が複雑になるため高価となる[1]、といった課題がある。そこで、本研究では、高温超電導体を用いた超電導可変リアクトルの構造や動作原理等について検討した。

### 2. 超電導可変リアクトルの構造と動作原理

超電導可変リアクトルの構造を Fig.1 に示す。鉄心に一次巻線と励磁用コイルを巻いた超電導バルク体(以下、バルク体)を取り付けた構造である。バルク体に磁場を印加していない状態では、一次コイルで発生した磁束はバルク体によって打ち消されるため、装置には漏れインダクタンスのみが生じる。一方、バルク体に巻いたコイルにより磁場を印加すると、バルク体の臨界電流密度が低下し、鉄心内に磁束が生じる。従って、バルク体に印加する磁場の大きさを制御することで、リアクトルのインダクタンスを任意にコントロールすることが可能となる。

### 3. 超電導可変リアクトルの動作原理の検証実験

Fig.1 に本検証実験で使用した小型モデルを示す。本実験では、鉄心内の磁束を検出するためにピックアップコイル( $\phi$  0.8mm, 20 turns)を用いた。小型モデルは、鉄心(断面積 100 mm<sup>2</sup>, 磁路長 400 mm)、一次コイル( $\phi$  0.5mm, 20 turns)、YBCO バルク体(内直径 16 mm, 外直径 27 mm, 高さ 10 mm)、励磁コイル( $\phi$  0.3mm, 100 turns, ソレノイド)で構成されている。まず、室温及びバルク体が超電導になっている状態において鉄心内の磁束密度を測定し、バルク体の遮蔽特性を評価した。次に、バルク体が遮蔽できる範囲内で一次起磁力を固定し、励磁コイルに通電する電流量(バルクに加える磁束密度)を変化させたときの鉄心内の磁束密度を測定し、インダクタンスの変化量を算出した。

### 4. 実験結果

バルク体の遮蔽特性実験の測定結果を Fig.2 に、バルク体を励磁した時の鉄心内の磁束密度の測定結果を Fig.3 に、そのときのインダクタンスの変化を Fig.4 にそれぞれ示す。Fig.2 より、一次起磁力が大きくなるにつれて鉄心内の磁束密度が大きくなることが確認された。そして、一次起磁力が 6 AT 程度までは鉄心内に磁束が発生せず、バルク体内に誘起される電流によって遮蔽できることが分かった。また、Fig.3, 4 より、バルク体に印加する磁束密度を大きくするにつれて、鉄心内の磁束密度が大きくなり、それに応じてリアクトルのインダクタンスも大きくなる事が分かった。

### 5. まとめ

鉄心及び一次コイル、励磁コイルを巻いた超電導バルク体で構成される超電導可変リアクトルを提案し、その動作原理を検証した。そして、バルク体に印加する磁束密度の大きさを制

御することで、リアクトルのインダクタンスを任意にコントロールできることを確認した。

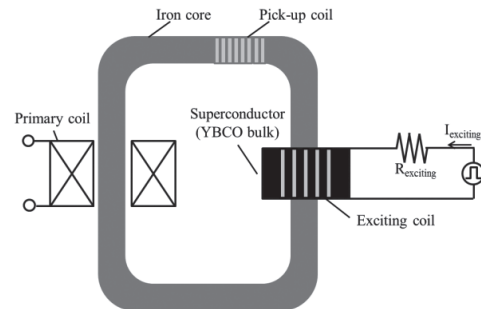


Fig.1 Superconducting variable reactor

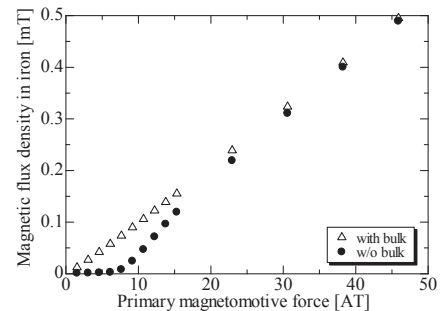


Fig.2 Magnetic shielding characteristics of YBCO bulk

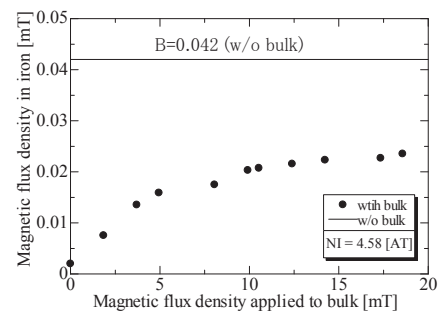


Fig.3 Magnetic shielding characteristics of YBCO bulk with applied magnetic field

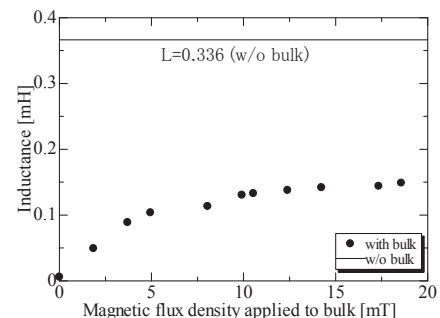


Fig.4 Inductance of primary coil as a function of magnetic flux density applied to YBCO bulk

### 参考文献

1. T.Ohinata, et al.: *IEE Japan*, Vol.126-A, No.10 (2006), pp.997-1003

# 高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータの通電特性評価

## Evaluation of current-carrying properties of HTS linear switched reluctance motor

平山 齊, 浅川 慎一郎, 川畑 秋馬(鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, ASAKAWA Shinichiro, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

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

### 1. はじめに

産業応用分野においてリニアモータを動力源としたリニアドライブシステムが数多く利用されている。リラクタンス力を利用したリニアスイッチトリラクタンスモータ(LSRM)は、高性能な希土類永久磁石を必要とせず、堅牢かつ安価な可変速モータとして期待されているが、産業応用分野に適用するためにはモータのサイズおよび質量の低減、ならびに推力、効率の改善が要求される。本研究では、LSRMの高効率化、高推力化を目指して、励磁巻線に高温超伝導体を使用したLSRM(HTS-LSRM)を提案している[1]。今回、固定子鉄心に巻線された高温超伝導励磁巻線の通電特性を評価したので、その結果について報告する。

### 2. HTS-LSRM 固定子の構造および実験方法

HTS-LSRM 固定子の写真を Fig. 1 に示す。本 LSRM の固定子鉄心は突極構造をしており、固定子の各突極部に集中巻された励磁巻線が施される。励磁巻線は三相であり、図は三相のうち一つの相のみに施された4個のコイルからなる励磁巻線を示している。励磁巻線には Bi-2223 テープ線材を用いた。本実験機は、高温超伝導線材を LSRM に用いた場合の基本的な特性や数値解析による特性算定法などを評価することを目的としていることから、実用化には適さないが Bi-2223 テープ線材を使用している。使用した Bi-2223 テープ線材の臨界電流は、77 K、自己磁界中で 80 A である。コイル形状はレーストラック型ダブルパンケーキコイルで、ターン数は1極あたり24ターンである。ダブルパンケーキを構成する2つのコイルは、コイルの最内周で巻線に使用した Bi-2223 テープ線材を用いて、はんだ付けで接続されている。

Fig. 1 に示す励磁巻線を用いて、空芯および鉄心中のコイルの電圧  $V$ -電流  $I$  特性を測定した。電圧は、各極のコイルに電圧端子を取り付けてそれぞれのコイルで測定した。また、コイルの冷却は、励磁巻線を施した固定子全体を液体窒素に浸して行った。

### 3. 測定結果

Fig. 2 に、励磁巻線に直流電流を通電したときの  $V$ - $I$  特性の測定結果を示す。図には、励磁巻線を構成する4個のコイルのうち、1個のコイルの結果を示している。横軸は通電電流値、縦軸はコイルの電圧値である。図より、電流が小さい領域で電圧がほぼ電流に比例して増加していることが確認される。これは、ダブルパンケーキコイルの最内周で接続に用いているはんだの抵抗によるものであると考えられる。また、鉄心中と空芯で  $V$ - $I$  特性がほとんど変化していないことが確認される。この特性の数値解析による考察については当日に報告する。

### 4. HTS-LSRM の駆動回路

本リニアモータの励磁巻線には、可動子位置に応じて一定振幅の方形波電流が供給される。本リニアモータの駆動システムは、このような電流を供給するために電流形インバータを用いた駆動システムを構成している[2]。Fig. 3 に駆動システムを示す。本駆動システムは、整流回路、チョップ回路、電流形インバータ、クランプ回路および非対称 H ブリッジインバータから構成される。チョップ回路は、平滑用リアクトル  $L_s$  に流れる電流が電流振幅指令値となるように動作する。電流形イン

バータは負荷側への通電の制御を行い、電源側から負荷側へ電流を供給しない動作が可能であるため、LSRM の自在な印加角制御を実現できる。クランプ回路では、励磁する相の切替え時に発生するサージ電圧を抑える。非対称 H ブリッジインバータでは、電流形インバータから出力された電流を通電する相の切替えを行う。Fig. 2 の  $V$ - $I$  特性を電流値に依存する非線形抵抗素子として扱った場合の通電特性のシミュレーション結果や磁界解析結果については当日報告する。

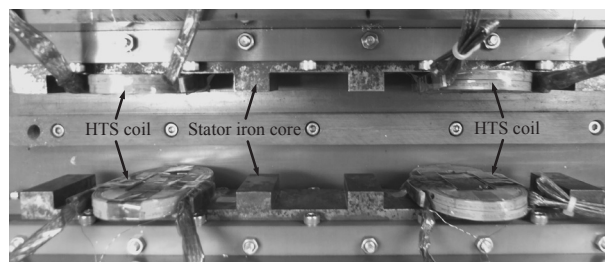


Fig. 1 Photograph of the HTS-LSRM stator

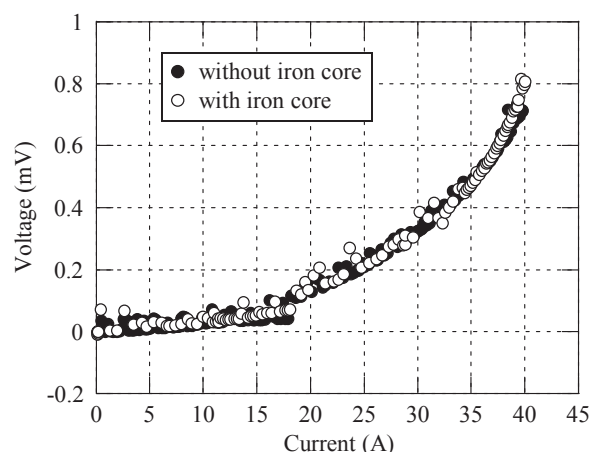


Fig. 2 Measured results of  $V$ - $I$  characteristics

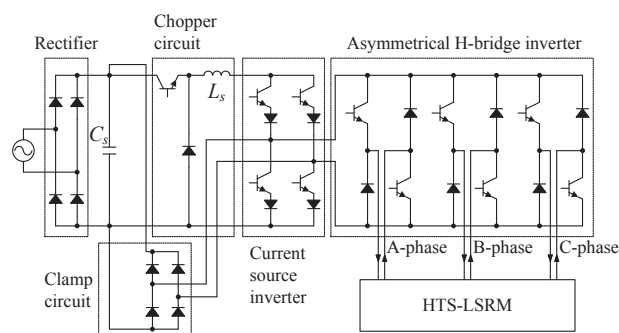


Fig. 3 Driving circuit configuration for the HTS-LSRM

### 参考文献

1. T. Hirayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.125
2. T. Hirayama, et al.: 2013 IEE-Japan Industry Application Society Conference, Vol. 3, No. 3-74 (2013) pp.355-356



# ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の超伝導コイル断面内応力解析

## Analysis of structural components of a superconducting coil for the LHD-type helical fusion reactor FFHR-d1

田村 仁, 柳 長門, 高畑 一也, 相良 明男 (NIFS)

TAMURA Hitoshi, YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, SAGARA Akio (NIFS)

E-mail: tamura@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

現在核融合研では、ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の概念設計を進めている。FFHR-d1 は大型ヘリカル装置(Large Helical Device; LHD) の4倍の大きさ基本形とした主半径15.6m の装置である[1]。超伝導コイルは、強制冷却あるいは間接冷却が候補となっており、超伝導体として Nb<sub>3</sub>Sn、Nb<sub>3</sub>Al の他 ReBCO 等の高温超伝導体の採用も考えられている。このようにいくつかの候補材料や冷却方式が検討段階にある状況ではあるが、超伝導マグネットシステムとして、その全体構造を決めなければ、プラズマ真空容器、重力支持、クライオスタットといった他の機器の検討を進めることができない。そのため、コイル巻線部の剛性をLHDやITER等のこれまでの実績を元に仮定することより支持構造物の応力・変形状態を解析して、設計を進めてきている[2]。

一方、ヘリカルコイル断面内の超伝導体、冷却機構、絶縁層等の健全性評価は、マグネットシステムの成立性を示す上で不可欠である。しかしながら、いくつかの設計オプションに対応したコイル断面構造を詳細にモデル化し、支持構造物を含めて応力解析を行うのは、コイル内部が数ミリ単位のスケールであるのに対し、全体寸法が数十メートルに達するため現実的ではない。そのため全体解析とマルチスケール解析による局所的な解析を行い、機械的挙動について評価した。

### 2. ヘリカルコイル断面形状

ヘリカルコイルの断面形状は、核融合炉のプラズマ閉じ込め磁場を決めるのと同時に、発生する電磁力に大きく影響する。FFHR-d1 の設計では、Fig.1 に示すように、ヘリカルコイルの電流中心が小半径 3.744m の位置に設定され、コイルの底側はプラズマおよびブランケットとの干渉を回避するために階段状となっている。巻線部分は 390 本の超伝導導体で、1 本は 94kA の電流値で、絶縁物や冷却機構を含めて 62mm 角の正方形をその領域としている。この断面形状を元に、磁場分布を求めた。磁場計算においては 62mm 角部分に均等に電流が流れるものとした。

### 3. 支持構造物の応力解析

磁場分布から導体に作用する電磁力をコイル断面毎に積算すると、最大で 64MN/m の電磁力がコイルに作用する。この電磁力を支持するために、SUS 製のトーラス構造物でヘリカルコイルを覆うが、核融合炉では、ブランケットの遠隔保守や加熱・計測機器のためのアクセスポートが必要なため、支持構造物はなるべく大きな開口部を持つことが望ましい。そのため、支持構造物の形状の修正と応力計算を繰り返し行い、形状を決めていった。ここででの計算では、広域的な応力分布を知ることが目的なため、超伝導部分は導体の断面面積率による複合則から得られる等価な剛性をモデルに与えて解析を行った。ヘリカルコイルは3次元形状なので、導体に作用する電磁力分布もコイルの空間的な場所および断面内の導体の位置によって変化するので、導体一本一本の領域をモデル化し、電磁力を与えた。Fig.2 に得られた広域的な応力分布とコイル巻線部を拡大した部分を示す。支持構造物に発生する最大相当応力は 660MPa で SUS316LN 等の許容応力内となった。

### 4. コイル断面内応力解析

支持構造物の解析で得られたコイル巻線部の応力・ひずみ分布は等価な剛性を持つ単一材料の値となるが、マルチスケール解析を考慮して、モデル化の際に導体1本の外形を保つようにし、巻線方向に進み角毎に分割した。この等価な要素に作用するひずみを境界条件として別に作成した詳細な導体モデルで解析を行った。Fig.3 は Fig.2(b)のコイル底部の導体に対して適用し、円形のケーブルインコンジット導体が絶縁層を介して支持プレートで囲まれている形状を模擬した場合の結果の例で、導体部のせん断応力分布を示したものである。講演では、種々の超伝導導体種類や断面構成による機械的挙動の違いについて評価した結果について詳細を報告する。

### 参考文献

1. A. Sagara, et al., Fusion Engineering and Design 87 (2012) pp. 594.
2. H. Tamura, et al., Fusion Engineering and Design, 88 (2013) pp.2033.

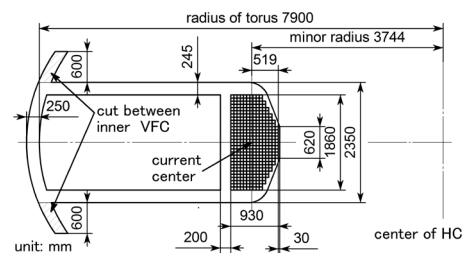


Fig.1 Cross section of the helical coil perpendicular to the coil winding direction.

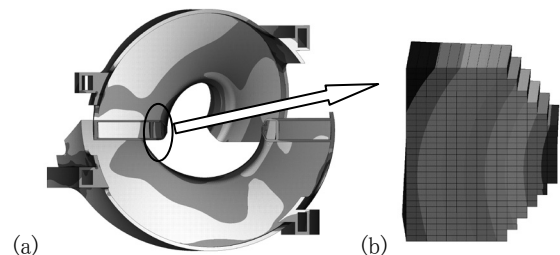


Fig.2 (a) Spatial stress distribution of the support structure. (b) Longitudinal strain distribution in a helical coil cross section.

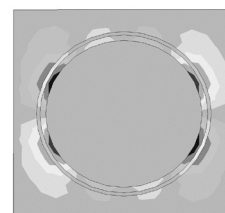


Fig.3 In-plane shear stress distribution in a superconductor.

# ヘリカル型核融合炉への適用をめざした 100 kA級高温超伝導導体の製作と試験 —(1)全体概要—

## Fabrication and testing of a 100 kA-class HTS conductor developed for the helical fusion reactor —(1) Overview—

柳 長門(NIFS), 寺崎義朗(総研大), 伊藤 悟, 清野祐太郎(東北大), 夏目恭平, 濱口真司, 野口博基, 田村 仁, 三戸利行, 相良明男(NIFS), 橋爪秀利(東北大)

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

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

### 1. はじめに

概念設計が進んでいるヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の超伝導マグネットシステムは、蓄積磁気エネルギーが 160 GJ に及び、3 次元形状をしたヘリカルコイル(大半径 15.6 m)には、最大経験磁場 12 T において 100 kA 級の導体が要求される [1]。その選択肢のひとつとして、高温超伝導 (HTS) 導体を検討している。HTS 導体は冷却安定性が高く、クエンチする心配を大幅に軽減できるとともに、巨大なヘリカルコイルを短尺導体の接続によって迅速に製作できると期待される [2-4]。2012 年より、NIFS と東北大学・量子エネルギー工学専攻との共同研究として大電流容量 HTS 導体サンプルを製作し、NIFS の大型導体試験装置を用いて特性試験を行っている [4-6]。前回までに報告した 30 kA 級導体では、温度 20 K、磁場 6 T において 45 kA の臨界電流を確認した。今回は、100 kA 級導体の試験結果について報告する。

### 2. 100 kA 級 HTS 導体サンプル

導体サンプルの断面構成を Fig. 1 に示す。フジクラ製の GdBCO 線材 (FYSC-SC10、幅 10 mm、厚み 0.22 mm、臨界電流  $\sim 600$  A@77 K, s.f.) を合計 54 枚用い、3 列  $\times$  18 層で単純積層して銅ジャケットに収めた。30 kA 級導体では、GdBCO 線材は 20 枚 (2 列  $\times$  10 層) 使ったため、線材量は 2.7 倍となった。外側には機械的な固定のためにステンレスジャケットをボルト締めし、これにヒータを仕込み FRP ジャケットで断熱することで液体ヘリウム中において温度 30 K までの試験を可能とした。さらに 20 mm 厚のステンレス板を配置し、強大な電磁力を支えた。サンプル全体はレーストラック形状であり、東北大学によって開発された機械的ブリッジジョイント [5] を入れて 1 ターンループを形成し、スプリットコイルで印加した外部磁場を変化させて電流を誘起した。

### 3. 通電試験結果の概要

温度 20 K において臨界電流を測定したときの通電波形を Fig. 2 (上) に示す。サンプル電流は、ログスキーコイルを用いて測定した。この場合、サンプル電流が 103 kA に達したところでクエンチが生じている。外部磁場は 5.3 T であった。この場合、クエンチは機械的な固定の甘い円弧部から生じた可能性があり、検討している。一方、Fig. 2 (下) は、温度を 4 K まで下げ低磁場においてサンプル電流が 120 kA まで達した例である。この場合、クエンチは生じず、その後、約 20 分に至る減衰時定数を確認した。この時定数よりサンプルのインダクタンスをもとに接続抵抗が求められ、所定の接続抵抗率を達成したことが確認できた。これについては、次の講演で報告する [7]。一方、導体全体の臨界電流に関する数値解析も進めており、サンプル電流によって生じる自己磁場が線材テープ面に垂直方向に作る成分が臨界電流を支配的に決めていることがわかった [6]。この解析についても別途報告する [8]。

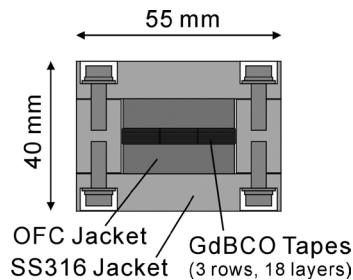


Fig. 1 Cross-sectional image of the 100kA-class HTS conductor sample.

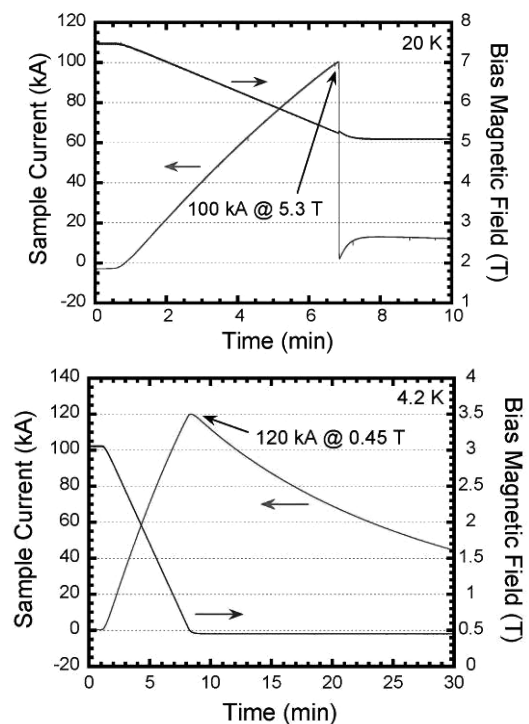


Fig. 2 Waveforms of the sample current and bias magnetic field measured at temperature 20 K (upper) and 4.2 K (lower).

### 参考文献

- [1] A. Sagara et al.: Fusion Eng. and Des. **87** (2012) 594.
- [2] H. Hashizume et al.: Fusion Eng. and Des. **63** (2002) 449.
- [3] N. Yanagi et al.: Fusion Sci. and Tech. **60** (2011) 648.
- [4] N. Yanagi et al.: to be published in IEEE Trans. Appl SC.
- [5] S. Ito et al.: to be published in IEEE Trans. Appl SC.
- [6] Y. Terazaki et al.: to be published in IEEE Trans. Appl SC.
- [7] S. Ito et al.: Abstract CSJ Conf. **88** (2013) 3C-p07.
- [8] Y. Terazaki et al.: Abstract CSJ Conf. **88** (2013) 1P-p25.

# ヘリカル型核融合炉への適用を目指した 100 kA 級高温超伝導導体の製作と試験

## (2) 接合部抵抗評価

### Fabrication and test of a 100 kA class HTS conductor to be used for a helical fusion reactor

#### (2) Evaluation of joint resistance

伊藤 悟, 清野 祐太郎(東北大); 柳 長門(NIFS); 寺崎 義朗(総研大); 相良 明男(NIFS); 橋爪 秀利(東北大)

ITO Satoshi, SEINO Yutaro (Tohoku Univ.); YANAGI Nagato (NIFS);  
TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); SAGARA Akio (NIFS) HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)  
E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1[1]のマグネットに適用できる 100 kA 級の高温超伝導 (HTS) 導体の開発へ向け, NIFS と東北大の共同研究で大型 HTS 導体サンプルの製作と試験を行っている。また, マグネットを分割製造し, 組み立てて使用する分割型高温超伝導マグネットの採用を検討していることから[2,3], 導体サンプルは機械的ブリッジジョイントを用いた接合部を有する。これまで 30 kA 級 HTS 導体サンプルを製作して通電試験を行い[4], 接合抵抗が許容値以下に低減できることを示してきた[5-7]。このたび, 導体をさらに大型化し, 100 kA 通電試験を行うこととなった。本講演では, 100 kA 級導体の接合部の設計・製作, 予備試験・本試験での接合抵抗の評価結果について報告する。なお, 本試験の概要, および通電電流値の評価については, 別講演[8]にて報告する。

### 2. 導体サンプル構成

Fig. 1 に 100 kA 級 HTS 導体サンプルの構成を示す。導体サンプルは 3 列 14 層 (3 列 18 層) に単純積層された GdBCO テープ (フジクラ製 FYSC-SC10) を銅ジャケット, ステンレスジャケットに収めて製作しており, 機械的ブリッジジョイント (接合面に In 箔を挿入) により接続してレーストラック形状の 1 ターンループとしている。30 kA 級導体サンプル (2 列 10 層) [4-7] では, 接合部の GdBCO テープを全て配置してから接合力を負荷して機械的接合を行ったが, 今回は橋渡し部の GdBCO テープを 1 層配置することに接合力 (接触圧力 119 MPa) を負荷し, 接合状況を逐一確認する施工方法に変更した。

### 3. 接合抵抗の評価結果

100 kA 通電試験に先駆けて, 3 列 4 層の GdBCO 導体を機械的ブリッジジョイントしたサンプルの通電試験 (予備試験) を東北大学にて実施した。予備試験では, 各層に独立した電流供給端子を取り付けて, 液体窒素中で層ごとに接合抵抗を評価した。電流と層ごとの接合抵抗率 (接合抵抗 × 接合面積) ・全層の平均接合抵抗率の関係を Fig. 2 に示す。接合抵抗の平均値は過去の 1 列 1 層・2 層の試験結果 [9] における接合抵抗の 2 倍程度に抑えることができた。

Fig. 3 に NIFS で行った 3 列 14 層導体の通電試験での接合抵抗・接合抵抗率の評価結果および予備試験と過去の試験 [9] における接合抵抗率を示す。電流は外部磁場の変化 (電磁誘導) によって印加し, ログスキーコイルにより評価した。接合抵抗は外部磁場を一定にした後の電流の減衰時定数より評価している。本試験では, データごとに到達電流が異なる (23~120 kA [8]) が, 到達電流が 100 kA を超えても接合抵抗が上昇しないことを確認できた。また, 自己磁場時の接合抵抗は, 予備試験における測定値の約 1/2 となった。20 K 以下における接合抵抗は 77 K における接合抵抗の約 1/2 であることが要素試験 [10] により示されており, 今回の試験結果は妥当な結果と言える。外部磁場増加にともなう接合抵抗増加は, 磁気抵抗効果によるものと考えられ, 定量的評価については今後の課題である。また, 1 列 1 層・2 層の場合 [9] の接合抵抗に比べて, 今回の接合抵抗の評価結果が高くなっているのは, 接合面における接触圧力分布の不均一性に起因するものと考えられ, こちらの改善についても今後の課題となる。

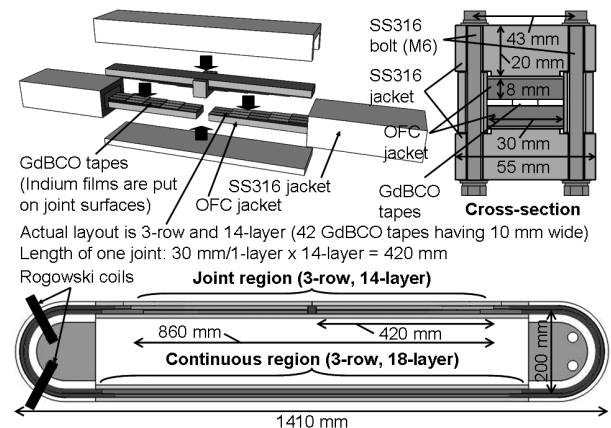


Fig. 1 Sample's structure in the test

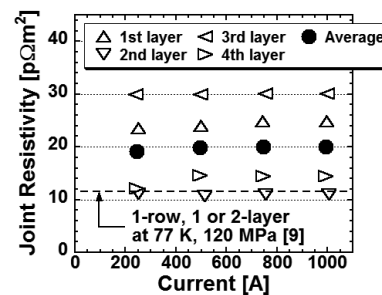


Fig. 2 Joint resistivity as a function of applied current in a pilot experiment.

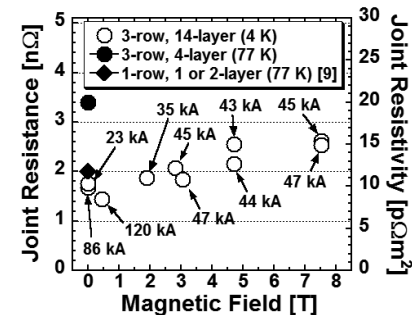


Fig. 3 Joint resistance and joint resistivity as a function of bias magnetic field (sample current is also shown in this figure)

### 参考文献

1. A. Sagara, et al.: Fusion Eng. Des. Vol. 87 (2012) p.594
2. H. Hashizume, et al.: Fus. Eng. Des., Vol. 63 (2002) p.449
3. N. Yanagi, et al.: Fus. Sci. Tech., Vol. 60 (2011) p.648
4. Y. Terazaki, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Accepted
5. S. Ito, et al.: Abst. CSJ Conf., Vol. 86 (2012) p.216
6. S. Ito, et al.: Abst. CSJ Conf., Vol. 87 (2013) p.36
7. S. Ito, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Accepted
8. N. Yanagi, et al., Abst. CSJ Conf., Vol. 88 (2013), 3C-p07
9. K. Kawai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, (2013), p.4801704
10. Y. Seino, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Accepted



# CIC 導体の撚りピッチがケーブル内の循環電流分布に及ぼす影響

## Influence of Twist Pitches on Circulation Current Distribution in a CIC Conductor

森村 俊也, 渡部 一晃, 伊東 大貴, 宮城 大輔, 津田 理(東北大);  
 濱島 高太郎(八戸工業大); 谷貝 剛(上智大); 小泉 徳潔, 布谷 嘉彦(JAEA); 高畑 一也(NIFS)  
 MORIMURA Toshiya, WATANABE Kazuaki, ITO Hiroki, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto(Tohoku University);  
 HAMAJIMA Takataro(Hachinohe Institute of Technology); YAGAI Tsuyoshi(Sophia University); KOIZUMI Norikiyo,  
 NUNOYA Yoshihiko(JAEA); TAKAHATA Kazuya(NIFS)  
 E-mail: morimura@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

超電導マグネットを構成するCIC導体は、多数の超電導素線を多段階に撚り合わせたケーブル構造を持つ。このケーブルに変動磁場が印加されることにより、素線間ループ部分に循環電流が誘起されるが、ケーブル構造の乱れなどにより、この循環電流分布が不均一になることが考えられる。

本研究では、我々が考案した推定手法[1]より求めた素線軌跡に対し、超電導マグネットの簡易運転モデルにおける循環電流分布を解析した。さらに、導体の撚りピッチを変化させた素線軌跡に対して循環電流分布を解析し、導体の撚りピッチが循環電流分布に及ぼす影響について検討・考察した。

### 2. 簡易運転モデル

CIC導体の諸元をTable 1に示す。素線数は486本である。本研究では、4mの直線導体に対し、導体断面の長軸方向のみで均一な外部磁場が印加される場合を考える。

超電導マグネットに電流を流すと、電流に比例した磁場が発生し、導体に印加される。超電導マグネットはパルス運転を行うことから、本研究では外部印加磁場として台形波を考えた。本研究で用いるCIC導体では、運転電流31.3kAに対し、最大磁場5.0Tが印加されることになる。よって、電流の立ち上がり速度を200A/sとすると、磁場の時間変化率は約0.032T/s(=5.0T/156.5s)となる。磁場の立ち上がり速度は、立ち上がり時と符号が異なるものの大きさは同じであるとした。また、フラットトップ領域は、10.0sとした。

### 3. 循環電流分布の様子

我々が考案した推定手法を用いて素線軌跡を解析し、簡易運転モデルにおける循環電流分布を解析した。素線軌跡の検討は5段階の撚りピッチが「70/120/170/250/400mm」となるもの(「軌跡1」と「40/80/100/200/400mm」となるもの(「軌跡2」)の2種類について行った。また、循環電流分布は、導体内部の素線間ループをLR回路として計算した。ループインダクタンスは、素線間ループを単一ループコイルとして求め、ループ端部の素線間接触抵抗は、我々が実施したジョイント部の抵抗測定試験結果[2]を参考に導出した。

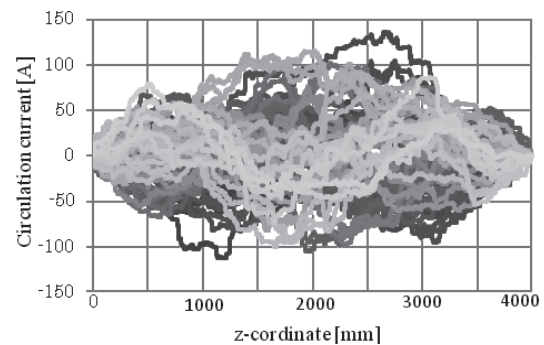
Fig.1(a),(b)に軌跡1,2について、486素線のうちある1つの4次サブケーブル(81素線)に磁場の立ち上がり開始から78.25s後に生じている循環電流分布を示す。このとき、素線には1本当たり、約30Aの輸送電流が流れている。Fig.1(a)より、軌跡1における循環電流分布は、非常に不均一となり、導体長手方向に対しても大きく変化している。一方、Fig.1(b)より、軌跡2の場合は、循環電流分布の不均一性が抑えられ、周期的な分布が得られた。1-5次の撚りピッチの最小公倍数が素線軌跡の周期を示す。軌跡1の撚りピッチの最小公倍数が714mと長いのにに対し、軌跡2のものは0.4mと短い。よって、軌跡2の方が素線間の接触間隔の短いループが多く表れ、循環電流が小さくなったと考えられる。以上より、循環電流分布は、撚りピッチの値だけではなく、その組み合わせに大きく依存することが考えられる。

### 4. まとめ

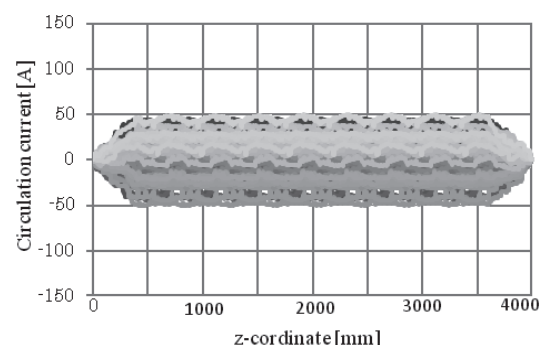
あるCIC導体において素線軌跡を推定し、超電導マグネットの簡易運転モデルにおける循環電流分布を解析した。その結果、導体内の循環電流分布が非常に不均一となることが確認された。そこで、撚りピッチの値を変化させた素線軌跡についても同様に循環電流分布を解析したところ、電流分布の不均一性が抑えられるとともに、周期性が表れることがわかった。よって、導体内の循環電流分布は、撚りピッチの大きさだけではなく、その組み合わせに大きく依存することが考えられる。謝辞:本研究の一部はJSPS科研費24360103の助成を受けたものです。

Table 1 Specifications of CICC

number of strands	486
strand diameter [mm]	0.89
cable size [mm]	20.5×24.8
conductor length [mm]	4000



(a) path 1



(b) path 2

Fig.1 Circulation current distributions in two types of CICC with different twisting pitch combinations

### 参考文献

- [1] D.Miyagi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.22 No.3 (2012) P.4802104
- [2] 森村 俊也, 他.: 低温工学講演概要集, Vol.87 (2013) P.39

# LHDヘリカルコイルの片側常伝導伝播の常伝導長に対するサブクールの効果 Effects of subcooling on the length of a propagating normal zone in the LHD helical coils..

今川 信作, 尾花哲浩, 柳長門, 野口博基(NIFS)  
 IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, NOGUCHI Hiroki (NIFS)  
 E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

## 1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカルコイルでは、図1に示すように、飽和ヘリウム冷却の場合に11.0 kA以上の電流値で片側常伝導伝播、11.4 kA以上では両側伝播が起こり得ることが実験で確認されている[1]。冷却安定性を改善するために、供給温度を3.5 K、コイル出口温度を4.0 K以下に低下させた場合には、片側伝播の起こり得る電流値(最小伝播電流)が11.4 kAまで上昇する。このサブクール冷却の場合、励磁による発熱の影響を小さくするため、11 kAで2時間の電流保持を行ってからそれ以上の励磁を行うようにしている。この方法での常伝導伝播がこれまでに2回観測され、バランス電圧の最大値が飽和ヘリウム冷却の場合の半分程度に小さいことが再現した。

## 2. 測定結果

ヘリカルコイルはI, M, Oの3つのブロックに分割されており、Iブロックに常伝導が伝播する場合にMとOには導体内の電流重心の変化に伴う誘導電圧が誘起される。Iの1層目を常伝導が伝播する場合の常伝導部の抵抗成分 $V_R$ は、IとMのバランス電圧を各々、 $e_1$ と $e_M$ とおくと、 $V_R = e_1 - e_M/0.68$ で与えられる[2]。この方法を用いて、17回目、23回目、および、25回目の常伝導伝播時の抵抗成分の時間変化を求めた結果を図2に示す。いずれのケースもヘリカルコイルの最下部付近で生じた常伝導部が外側赤道側(電流下流側)に片側伝播して、飽和ヘリウム冷却の場合はコイル上部、サブクール冷却の場合は赤道部付近で停止した。17回目は飽和ヘリウム冷却で観測された常伝導伝播の中で最も到達電圧が低かったケースである。サブクール冷却の場合は、到達電圧がその半分程度に低くなっていることが分かる。すなわち、片側に伝播する常伝導部の長さが半分程度に短くなっていることを意味している。

## 3. 評価結果

モデルコイルでの実験により、片側常伝導伝播の場合の导体抵抗値の時間変化は、図3に示すように、常伝導伝播開始から回復開始までの「伝播時間 $t_f$ 」をパラメータとする指数関数の回帰式で近似できる[2]。伝播速度が分かれば、この回帰式を伝播距離で積分することにより常伝導部の抵抗成分 $V_R$ を求めることができる。

25回目の常伝導伝播の場合について、前述の回帰式から求めた抵抗成分とバランス電圧から求めた抵抗成分の比較を図4に示す。伝播速度については、伝播距離が短かくてヘリカルコイルのピックアップコイルの検出時間差から求める方法では同定できなかったため、モデルコイルのサブクール後の4.4 Kでの実験値から平均7 m/sを採用した。导体抵抗の回帰式の積分により求めた $V_R$ を、バランス電圧から求めた値と比較すると、 $t_f = 0.03$  sが最適であることが分かる。この値は、飽和ヘリウム冷却の場合の0.06 s(at 11.0 kA)-0.12 s(at 11.3 kA)と比較して半分以下となっている。伝播時間 $t_f$ は同じ冷却状態(熱伝達率)では電流値が高いほど長くなり、同じ電流値では熱伝達率が高いほど短くなることから、サブクール冷却によって冷却が改善していることを示している。

## 参考文献

1. S. Imagawa, et al.: Fusion Science and Technology, Vol. 58, No. 1 (July 2010) 560-570.
2. S. Imagawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) 4700904.

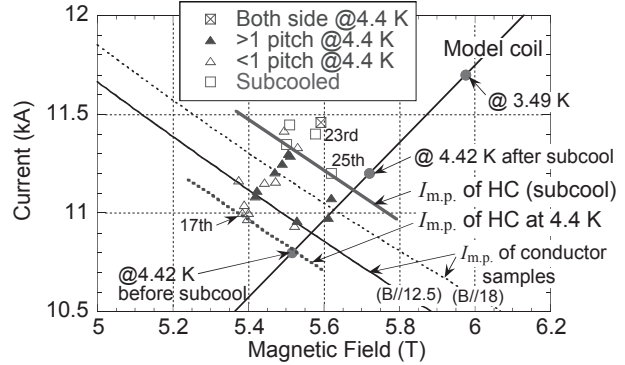


Fig. 1. Minimum propagating current,  $I_{m.p.}$ , of LHD helical coil. The magnetic fields of LHD are at the bottom.

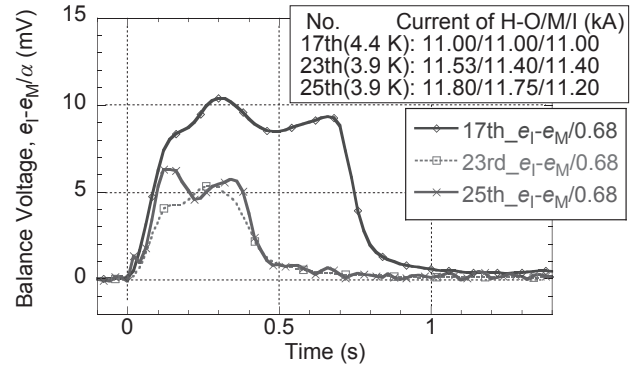


Fig. 2. The resistive voltage at 17th, 23rd, and 25th propagation of normal zones in the LHD helical coil.

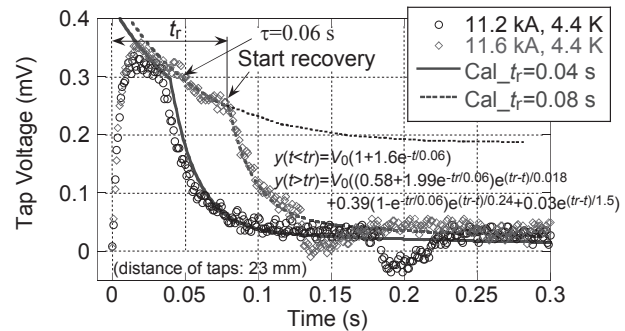


Fig. 3. Output of voltage taps of the helical coil conductor during one-side propagation of a normal zone in the HC model coil.

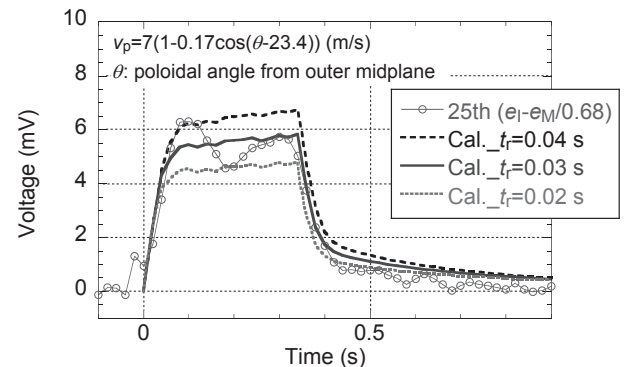


Fig. 4. Calculated resistive voltage at the 25th propagation. The stopping time of the propagation is set at 0.34 s.