

# 充填粉の精製による ex situ 法 MgB<sub>2</sub> 線材の J<sub>c</sub> 特性の改善

Improved J<sub>c</sub> property in ex situ processed MgB<sub>2</sub> tapes by refinement of filling powder

藤井 宏樹, 小澤 清, 伊藤 真二, 北口 仁(NIMS)

FUJII Hiroki, OZAWA Kiyoshi, ITOH Shinji, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

## 1. 序

MgB<sub>2</sub> 線材の J<sub>c</sub> の高磁界特性の改善に対し、炭素置換は最も有効な手法の一つである。線材の一般的製法である PIT 法のうち、ex situ 法では、in situ 法と比べて高密度コア層が得られるものの、置換反応が起こりづらく、結晶粒間結合も強固ではない。これまで有機酸溶液処理やミリング処理による炭素置換によって、ex situ 法線材の J<sub>c</sub> 特性を改善してきたが、炭素置換量の増大や粒間結合の改善による更なる特性向上を試みた。

## 2. 実験

MgB<sub>2</sub> : Mg : C = 100 : p : q (p = 0, 10, 20, 30; q = 0, 1.5, 5, 10, 15) のモル比混合粉末に対し、種々の有機媒体中、ボールミルによる湿式粉碎処理を行った。これらの粉末を乾燥して Fe 管に充填後、線材形状に加工し、Ar ガス気流中加熱処理を施した。種々の媒体を試したが、充填粉の乾燥が十分でないと加工が困難であり、線材試料が得られたのは鉱油(MO)とシリコンオイル(SO)のみであった。t °C で乾燥させた粉末及びそれを元に作製した線材を MO(t)、SO(t) と表す。また、比較のために未処理粉使用線材の作製も行った。

## 3. 結果と考察

### 3-1. 有機媒体効果

乾燥後の充填粉 MO(t) と SO(t) [(p,q) = (10,0)] とに残留する炭素量 z (MgB<sub>2</sub> : Mg : C = 100 : 10 : z) の化学分析結果と、それを元に作製した線材試料での、格子定数から類推した炭素置換量 x (MgB<sub>2-x</sub>C<sub>x</sub>) とを Table I に示す。どちらの媒体でも、充填粉の乾燥温度 t が高い程 z は減少していた。また、MO(t) 粉では、残留炭素ほぼ全量が炭素置換反応に用いられていたが、SO(t) 粉については、線材試料での x は微量であった。

Fig.1 にこれらの線材及び未処理粉使用線材の DC 磁化曲線を示す。未処理粉線材と比べて、MO(180)線材の T<sub>c</sub> は 34 K に大きく低下しているが、SO(t)線材の T<sub>c</sub> は 37 K でほぼ同じであった。この低下は炭素置換によるものである。

一方、遷移幅 ΔT<sub>c</sub> については、未処理粉線材と比べて、炭素置換量の多い MO(180)線材の ΔT<sub>c</sub> は大きくなっていったが、SO(t)線材のそれはほぼ同じであった。AC 磁化率の振幅依存性も MO(t)線材で大きくなっており、MO(t)線材では、炭素置換に伴って MgB<sub>2</sub> から放出された硼素が弱結合を引き起こしているものと考えられる。一方、SO(t)線材で残留炭素が多いのにも拘わらず ΔT<sub>c</sub> が小さいのは、残留して置換反応に寄与しない SO が加熱処理中に蒸発したためだと考えられる。

### 3-2. Mg 及び炭素添加効果

上記結果に基づき、MO(180)試料で Mg 添加効果を調べた。Mg 添加量に拘わらず、T<sub>c</sub> は 34 K 程度であったが、ΔT<sub>c</sub> は、p = 30 で明らかに大きくなっており、J<sub>c</sub> 特性は p = 10 で最も優れていた。

炭素添加効果は p = 10 の MO(180)試料について調べた。Fig.2 にこれらの線材の DC 磁化曲線を示す。q = 0, 1.5 での ΔT<sub>c</sub> はほぼ等しかったが、q ≥ 5 では q の増加に伴い大きくなり、粒間結合が劣化したことが示唆された。a 軸長から類推した炭素置換量 x は、q = 0, 1.5 でそれぞれ 0.04–0.05, 0.05–0.06 で、q ≥ 5 では 0.06–0.07 であった。q ≥ 5 で x が一定なのは、線材試料の x が MgB<sub>2</sub> 中の炭素の固溶限界量に達したためであると思われる。900 °C での固溶限界量は x = 0.06–0.07 と報告されており[1]、q ≥ 5 の炭素添加試料では、q = 0 の x = 0.04–0.05

と併せて固溶限界以上に達したので、置換反応に消費されなかった添加炭素が、顕著な弱結合を引き起こしたものと考えられる。これにより、q = 10, 15 の試料では I<sub>c</sub> = 0 A となった。

## 参考文献

1. T. Takenobu, et al.: "Intralayer carbon substitution in the MgB<sub>2</sub> superconductor," *Phys. Rev. B*, Vol. 64 (2001) p. 134513(1)-134513(3).

Table I. Carbon content z (MgB<sub>2</sub> : Mg : C = 100 : 10 : z in molar ratio) in MgB<sub>2</sub> + Mg powders milled with oils after drying at t °C and the carbon substitution amount x in MgB<sub>2-x</sub>C<sub>x</sub> in the corresponding tape samples.

Organic media (t)	z	x
MO(180)	5.3	0.04–0.05
MO(230)	4.0	0.03–0.04
SO(270)	19	≈ 0
SO(300)	3.3	≈ 0

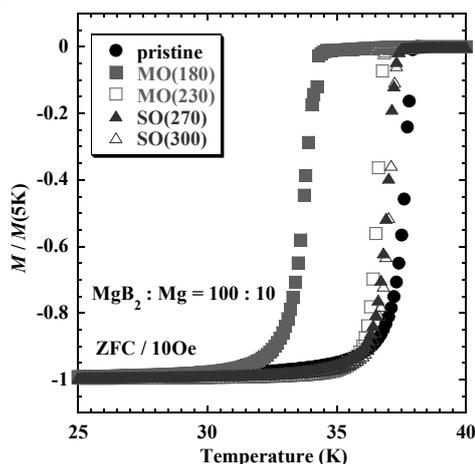


Fig. 1. DC magnetization curves as a function of temperature for MgB<sub>2</sub> tapes listed in Table I, together with tape using pristine powder, in 10 Oe in a ZFC mode. The magnetization M is normalized to that measured at 5 K, M(5K), for each tape.

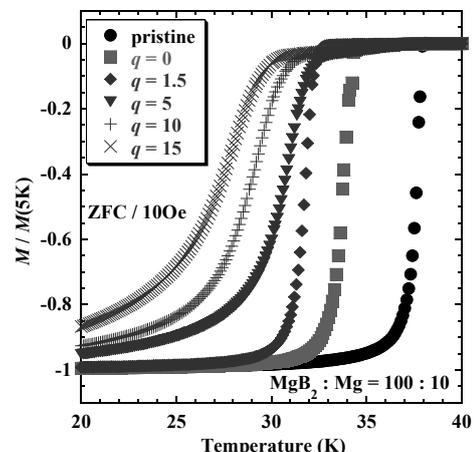


Fig. 2. DC magnetization curves as a function of temperature for MgB<sub>2</sub> tapes using mixed powders of MgB<sub>2</sub> : Mg : C = 100 : 10 : q with MO treatment in 10 Oe in a ZFC mode. The magnetization M is normalized to that measured at 5 K, M(5K), for each tape.

# Mg 粉末添加内部 Mg 拡散法 MgB<sub>2</sub> 線材における MgB<sub>2</sub> の層厚と臨界電流特性

## The thickness of MgB<sub>2</sub> layer and the critical current properties of Mg powder-added internal Mg diffusion (IMD)-processed MgB<sub>2</sub> wires

葉 術軍<sup>1,2</sup> 松本 明善<sup>1</sup> 戸叶 一正<sup>1</sup> 熊倉 浩明<sup>1</sup> 寺西 亮<sup>2</sup> 木吉 司<sup>1,2</sup>

YE Shujun<sup>1,2</sup>, MATSUMOTO Akiyoshi<sup>1</sup>, TOGANO Kazumasa<sup>1</sup>, KUMAKURA Hiroaki<sup>1</sup>, TERANISHI Ryo<sup>2</sup>, KIYOSHI Tsukasa<sup>1,2</sup>  
(1 NIMS 2 Kyushu University)

E-mail: YE.Shujun@nims.go.jp

### 1. はじめに

内部 Mg 拡散法(Internal Mg diffusion(IMD) method)による MgB<sub>2</sub> 線材では、Mg が B 層に拡散して MgB<sub>2</sub> が生成するため、MgB<sub>2</sub> 層の密度が上昇し、高い臨界電流密度 (critical current density, J<sub>c</sub>) が得られる。これまでの研究では、Mg の拡散を十分に行きわたらせるために、薄い B 層を使って来た。しかしながらこれでは、実用的に重要な工学的臨界電流密度(Engineering critical current density, J<sub>e</sub>)が低くなってしまふ。厚い B 層を使って MgB<sub>2</sub> 超伝導層の体積 (MgB<sub>2</sub> layer fraction)を増やすと、Mg 原子の拡散距離が長くなって、反応が不十分になり、未反応の B が多くなって、J<sub>c</sub> が下がると同時に J<sub>e</sub> も下がる。本研究では、Mg 粉末を B 層に添加して、未反応 B 量を減少させるとともに、線材の中心に挿入する Mg 棒を細くする実験を行った。これによって未反応 B の量を低下させることができるとともに、熱処理後に超伝導コアの中心に形成される孔を小さくすることができ、J<sub>e</sub> の向上に貢献すると考えられる。本研究では、この Mg 粉末の添加による、Mg 層厚と臨界電流特性(J<sub>c</sub> と J<sub>e</sub>)との関係を調べた。

### 2. 実験

Mg 粉末を添加した B 粉末を用いて IMD 法で線材を作製した。Mg の添加量を増大させるとともに、Mg 棒の径を減少させた。Mg 添加の量は 0 mol%(#1), 6 mol%(#2), 15 mol%(#3), ならびに 24 mol%(#4)であり、これに対応して Mg 棒の直径は 2 mm, 2 mm, 1.7 mm, 1.3 mm とした。また、Mg と B の化学量論比 (1:2)を確保するため、#4 のチューブの内径は 4 mmとした (他の線材は 3.5 mm)。さらに、高磁界特性を改善させるためにいずれの線材にも 10 mol%の SiC を添加した。比較のために、同様に SiC 添加した PIT 法線材 (#5)も作製した。IMD 法による線材作成の詳細は、論文(1), (2)を参照。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に、作製した線材の MgB<sub>2</sub> 層厚を示す。添加した Mg 粉末の密度を増大させ、これに伴って Mg 棒の径を減少させることにより、未反応 B 量が少ない状態を保って MgB<sub>2</sub> 層厚を増加させることが可能になる。Fig. 2, 3 には 10 T, 4.2 K における J<sub>c</sub>ならびに J<sub>e</sub>を示した。Mg 添加量の増加により、未反応 B の量が低下するために J<sub>c</sub>は上昇して、6 mol%で最大値をとり、その後 J<sub>c</sub>は低下して、PIT線材において J<sub>c</sub>は一番低くなる。6 mol%以上で J<sub>c</sub>が低下するのは、MgB<sub>2</sub> 層内の空隙率が增大するためと考えられる。すなわち、Mg 粉末添加の効果には (1) 未反応 B を減少させること、(2) MgB<sub>2</sub> 層の空隙を増大させること、の二つがあり、両者の兼ね合いで実際の J<sub>c</sub>が決まる。

一方、J<sub>e</sub>も Mg 添加量とともに上昇し、15 mol%添加の時に一番高くなった。この後、J<sub>e</sub>と同じように、Mg 粉末添加量とともに減少し、PIT 法による線材で J<sub>e</sub> は一番低くなった。このようにして J<sub>e</sub> を最大にする Mg 添加量は J<sub>c</sub> を最大にする添加量よりもかなり多いこと、ならびに最大の J<sub>e</sub> は Mg 無添加の場合よりも約 2 倍に向上することが判った。

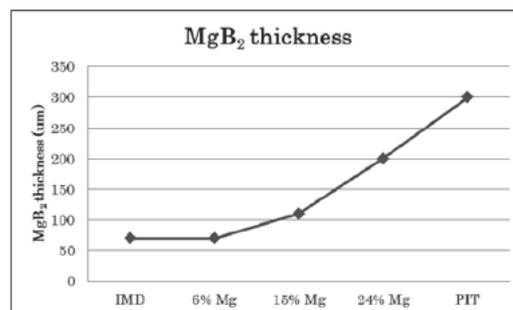


Fig. 1 MgB<sub>2</sub>層厚の Mg 添加量依存性

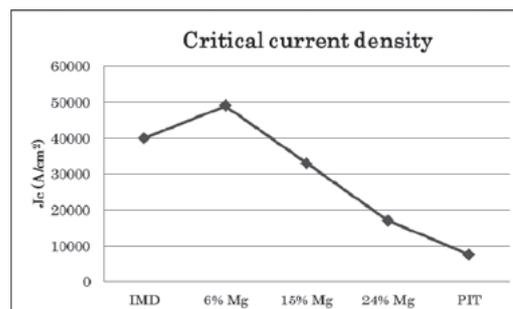


Fig. 2 J<sub>c</sub> 特性の Mg 添加量依存性

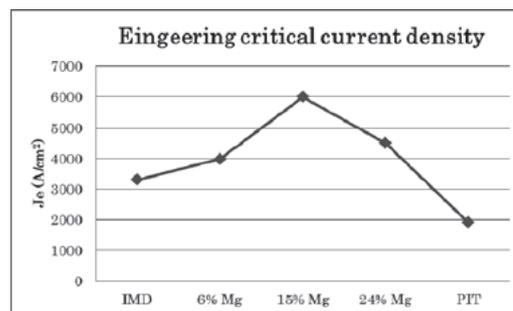


Fig. 3 J<sub>e</sub> 特性の Mg 添加量依存性

### 参考文献

- Ye S J, Matsumoto A, Togano K and Kumakura H 2011 *Physica C* 471 1133
- Ye S J, Song M, Matsumoto A, Togano K, Zhang Y, Kumakura H, Takeguchi M, Teranishi R, Kiyoshi T 2012 *Supercond. Sci. Technol.* (accepted)

(本研究は JST 先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の助成を受けた。)

# Cold High Pressure Densification プロセスによる MgB<sub>2</sub> 線材の作製 -Mg 粒径依存性-

## *In situ* MgB<sub>2</sub> wires fabricated by Cold High Pressure Densification -Mg particle size dependence-

兼田貴洋, 前田徳, 高野良紀(日大); Jung Ho Kim, Md Shahriar Al Hossain, Shi Xue Dou (Wollongong 大)  
KANEDA Takahiro, MAEDA Minoru, TAKANO Yoshiki (Nihon Univ.);  
KIM Jung Ho, HOSSAIN Md Shahriar Al, DOU Shi Xue (Univ. Wollongong)  
E-mail: maeda@phys.cst.nihon-u.ac.jp

### 1. はじめに

*In-situ* Powder-In-Tube法で作製したMgB<sub>2</sub>線材の実用化における課題の一つとして, MgとBの化学反応により形成される空隙の制御が挙げられている. この線材コア内に存在する多数の空隙は, 輸送臨界電流( $I_c$ )特性の著しい低下を招く. そこで我々は, 空隙の形や大きさを制御するために異なる粒径のMg粉末を用いた. さらに線材コアの高密度化を図るためにCold High Pressure Densification(CHPD)を導入し, 臨界電流密度( $J_c$ )の向上を試みた.

### 2. 実験

MgB<sub>2</sub> 線材の作製に使用した試薬は, 結晶性ホウ素粉末(97 %, 1  $\mu\text{m}$ )と平均粒径が異なる3種類のマグネシウム粉末(99 %, 50  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 300-760  $\mu\text{m}$ )である. 線材のバリア材とシース材は, それぞれFeとMonelを用いた. また比較のため, この線材に室温でアンビルを用いて4方向から加圧するCHPDで平角線材を作製した. 加えた圧力は1.5 GPaである. 熱処理条件はAr中で600  $^{\circ}\text{C}$ , 16時間とした. 線材試料の諸元をTable. 1に示す. 線材の $I_c$ は, 温度4.2 Kで, 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ の電場が発生した電流で定義し,  $J_c$ は $I_c$ を線材のコア断面積で割って算出した. また, 線材コアを観察するため走査電子顕微鏡(SEM)を用いた.

### 3. 結果及び考察

Fig. 1に線材コア断面の2次電子像を示す. N005のコア断面には大きな空隙は見られない. しかしN007では, 細長い空隙が存在することがわかる. この原因は原材料に粒径の大きいMg粉末を用いたためと考えられる. また, N005CではN005と比べ組織の形状に大きな変化は見られないが, N007CではN007と比べると細長い空隙が排除されている. CHPDの導入により, コアは密になることがわかる.

Fig. 2に4.2 Kでの $J_c$ 磁場依存性を示す. CHPDで加圧する前の線材(N005, N006, N007)では, 大きい粒径のMg粉末から作製した線材の方が他の線材に比べ $J_c$ が低い. これは線材コア内に, 大きい空隙が存在するためである. また, 本研究で得られた $J_c$ のMg粒径依存性は, 以前我々が報告した結果と異なる[1]. この主な原因は, 熱処理条件などを含めた作製工程による違いであると考えられる. CHPDを用いて加圧することで, すべての線材に $J_c$ の向上が見られた. 特に8 Tでの $J_c$ において, N007では $1.0 \times 10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$ の値を示すが, N007Cでは $8.5 \times 10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$ の値となり, 8.5倍増大した. これはSEMの結果が示すように, コアが密になったためと考えられる.

以上の結果から, 異なる粒径のMg粉末を用いることで線材コアの空隙の形や大きさが変化し, CHPDの加圧によりコアが密になり,  $J_c$ が増大することがわかる.

### 4. 謝辞

本研究はJSPS科研費24760259の助成を受け, 実施したものである.

Table 1. Specification of wires.

Sample	Mg Size ( $\mu\text{m}$ )	Pressure (GPa)
N005	50	0
N006	150	0
N007	300-760	0
N005C	50	1.5
N006C	150	1.5
N007C	300-760	1.5

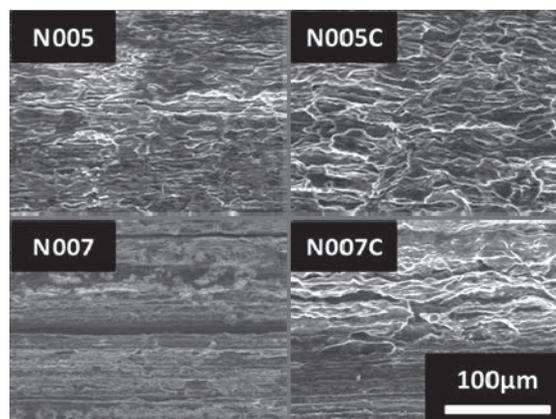


Fig. 1. SEM images of cores of wires

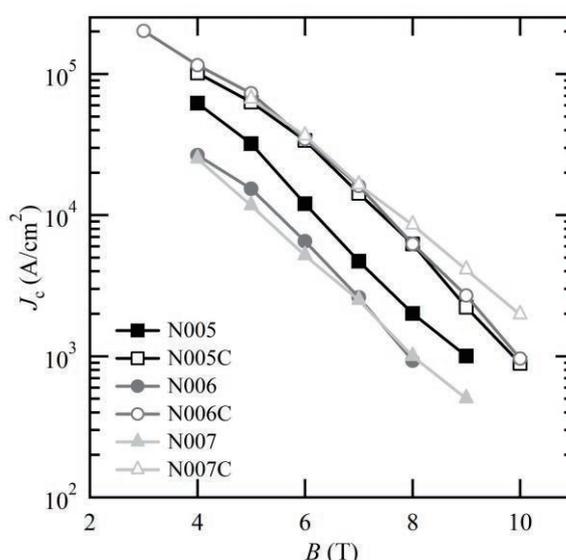


Fig. 2.  $J_c - B$  curves at 4.2 K for all wires.

### 参考文献

[1] Y. Osaki, et al.: Abstracts of CSSJ Conference. **83** (2010) 92

# 高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si 複合材料の時効挙動と超伝導特性

## Aging Behavior and Superconductive Property

### of High Volume Fraction MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si Composite Materials

川本 幸弥; 富山大(富山大・院生), 松田 健二, 川畑 常真; (富山大), 池野 進; (北陸職業能力開発大学校)  
 KAWAMOTO Chihaya, MATHUDA Kenji, KAWABATA Tokimasa (Toyama University);  
 IKENO Susumu (Hokuriku Polytechnic College)  
 E-mail: ikenolab@eng.u-toyama.ac.jp

#### 1. 緒言

本研究室ではこれまで Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, TiC, などのセラミック粒子を時効硬化型アルミニウム合金中に分散させた複合材料を作製し、その時効硬化挙動を調査してきた。<sup>(1~3)</sup> そして高温でも比較的安定な MgB<sub>2</sub> 粒子を低体積率(4%, 8%)で分散させた複合材料においては他の粒子と比べて時効挙動を阻害しないことが明らかになってきた。そこで MgB<sub>2</sub> 粒子を高体積率(50vol%)で Al-1mass%Mg<sub>2</sub>Si 合金中に分散させた複合材料を作製しその時効挙動と組織観察結果、また超伝導特性について報告する。

#### 2. 実験方法

粒子は高純度化学研究所製の MgB<sub>2</sub> 粒子を用い、複合材料ビレットは三次元溶湯浸透法を用いて作製した。さらにビレットをφ10mmに押し出し加工した。硬さ測定に用いた試料は848Kで3.6ksの溶体化処理後、氷水中焼入れし、423K、473K、523Kの時効熱処理を行った。硬さ測定には「Mitsutoyo HM-101」を用いた。荷重は2.94Nとし、保持時間は15sで行った。組織観察にはEDSを備えた日立製S-3500H走査型電子顕微鏡(SEM)とトプコン製の透過型電子顕微鏡(TEM)EM-002Bを用いた。電気抵抗率の温度依存性は、カンタムデザイン社製物理特性測定システム(PPMS)で直流四端子法により、温度2Kから300Kの領域で測定した。磁化の温度・磁場依存性はカンタムデザイン社製物理特性測定システム(SQUID)を用いて測定した。

#### 3. 実験結果

Fig.1は高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al-1.0%Mg<sub>2</sub>Si のφ10mm 押出材である。押出材の表面には押出による割れ等もなく押出性は良好であった。Fig.2はそれぞれ高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si のビレット材と押出材の横断面のSEM像である。これらの黒いコントラストが MgB<sub>2</sub> 粒子である。これらから Fig.2(a)のビレット材で粗大だった粒子が押出により図 2(b)の様に微細に分散していた。Fig.3は高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al-1.0%Mg<sub>2</sub>Si のφ10mm 押し出し棒の時効硬化曲線を示す。この曲線から高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al-1.0%Mg<sub>2</sub>Si の硬さは Al-1.0%Mg<sub>2</sub>Si と比べると全体的に硬さが上がっていることが明らかである。この硬さの増加は、セラミックス粒子を分散させたことによる複合強化による硬さの増加だと考えられた。Fig.4(a)は磁化率と温度の関係を示しており、高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si ビレット材と MgB<sub>2</sub>/Al ビレット材の超伝導転移温度 T<sub>c</sub> には差がなく、MgB<sub>2</sub> 自体が持つ T<sub>c</sub> である 38K と比べても変わらないという結果になった。また Fig.4(b)は臨界電流密度 J<sub>c</sub> と磁場の関係より高体積率 MgB<sub>2</sub>/Al ビレット材よりも MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si ビレット材の方がより高磁場においても高いことがわかった。



Fig.1 The extruded 50 vol. % MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si composite material.

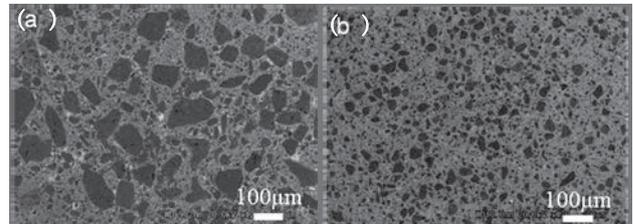


Fig.2 SEM images of (a) billet and (b) the extruded 50 vol. % MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si composite material.

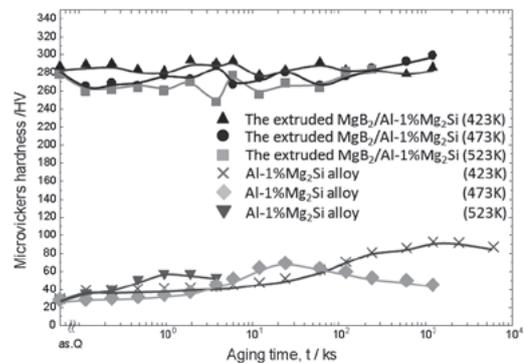


Fig.3 Age hardening curves of Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si matrix alloy and the extruded 50 vol. % MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si composite material.

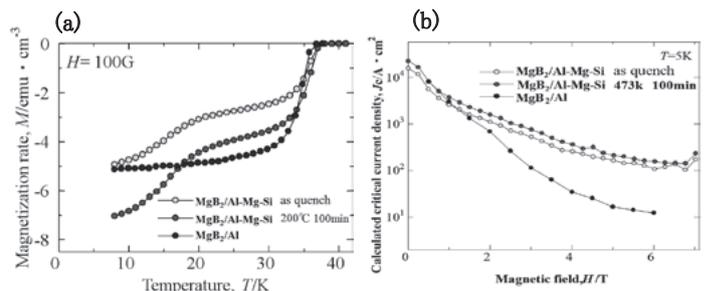


Fig.4 Relationship between (a) magnetization rate versus temperature curves, (b) calculated critical current density versus magnetic field of MgB<sub>2</sub>/Al billet, as quenched MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si alloy sample and MgB<sub>2</sub>/Al-1.0mass%Mg<sub>2</sub>Si alloy sample aged at 473K for 100 min.

#### 4. 参考文献

- [1] S.Ikeno, K.Kawashima, K.Matsuda, (1990) J Japan Inst Light Metal Vol.40, No.7 501-506
- [2] S.Ikeno, K.Furuta, T.Teraki, Y.Uetani, (1996) J Japan Inst Light Metal Vol.46, No.1 9-14
- [3] S.Ikeno, K.Matsuda, T.Teraki, (1997) J Japan Inst Light Metal Vol.47, No.10 527-532

## 放電プラズマ焼結体を用いて作製した Dy123 バルクの特性評価

Evaluations on properties of Dy123 bulks fabricated from spark plasma sintered precursors

村上 明(一関高専);岩本 晃史(核融合研)

MURAKAMI Akira (Ichinoseki National College of Technology); IWAMOTO Akifumi (NIFS)

E-mail: amura@ichinoseki.ac.jp

## 1. はじめに

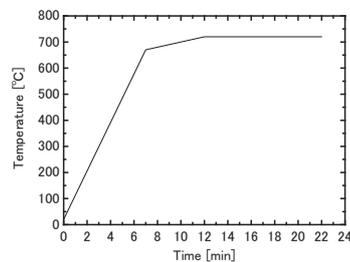
希土類系の酸化物高温超電導バルク(以下、「バルク」)の応用にとって、電磁力や熱応力に対するバルクの強度信頼性の確保が重要である。バルクは、原料粉末を混合・成形した前駆体を加熱して半熔融状態にした後、その上部に種結晶を配置して温度勾配下で結晶成長させて作製される。なお、この一連のプロセスは、一般に大気中や低酸素分圧下で行われる。このようにして作製したバルクには、強度の低下を招く気孔が必然的に含まれる。一方、前駆体を酸素雰囲気中で加熱して結晶成長させたバルクには、気孔は殆ど含まれない[1]。バルクに気孔が含まれる原因の一つとして、前駆体に含まれる空隙などが考えられ、それを減らすことで大気中で作製されるバルクの気孔を減らすことができると予想される。前駆体は、一般に単軸成形やCIP(Cold Isostatic Pressing)により成形されたものであるが、成形後に圧力を除くと少なからず回復・膨張し、内部に空隙が生じると考えられる。そのため、本研究では、圧力下で焼結した前駆体を用いて  $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Dy123)バルクを作製し、組織の観察や諸特性の評価を行った。

## 2. 実験方法

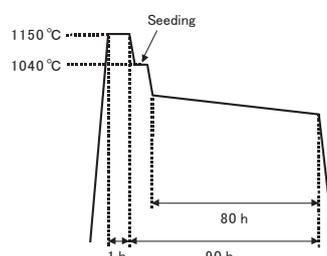
高密度の焼結体が比較的低温かつ短時間で得られる放電プラズマ焼結SPS(Spark Plasma Sintering)により原料粉末を焼結し、直径20mm程度の前駆体を得て、それを結晶成長させることでDy123バルクを作製した。原料粉末は、Dy123に $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ (Dy211)を25mol%, Ptを0.5wt%添加したものとした。SPSおよびその後の結晶成長プロセスにおける温度と時間の概略をFig.1に示す。SPSは、650°C、700°C、750°Cの三通りの温度(SPSダイの温度)において、50MPaの圧力下で行った。SPSによる前駆体を大気中で加熱して半熔融状態にした後、Nd系の種結晶を用いて結晶成長させた。その後、450°Cで100時間程度の酸素アニールを行った。各バルクを「Bulk 650」、「Bulk 700」、「Bulk 750」と呼ぶことにする。作製したバルクに対して捕捉磁場の測定を行った後、試験片を採取して曲げ負荷による破壊強度の評価や組織・破断面の観察を行った。

## 3. 結果

作製したDy123バルクの外観と、1T程度の外部磁場印加による77Kでの捕捉磁場分布をFig.2に示す。すべてのバルクにおいて種結晶からバルクの端まで結晶成長による境界が見られることから、多結晶化せずに結晶成長したことが分かる。しかし、Bulk 650では、マクロなクラック(図中矢印)が生じたため、捕捉磁場の分布は、良好なものとはならなかった。クラックは、SPS焼結が不完全であったことに起因すると考えられる。一方、Bulk 700には、マクロなクラックは観察されず、捕捉磁場の分布は中心付近が高い良好なものとなった。Bulk 750でもマクロなクラックは観察されなかったが、Bulk 700と比較して捕捉磁場のピークは低いものとなった。組織写真の画像解析よりDy211粒子の面積率を求めた結果、Bulk 750での面積率はBulk 700でのそれよりも高く、SPS時にDy123が融け出したことなどが推測される。これらのバルクにも気孔は含まれていたが、従来のバルクと比較して少ない傾向が見られた。



(a)



(b)

Fig.1 Schematic illustrations of (a) SPS process and (b) melt-process.

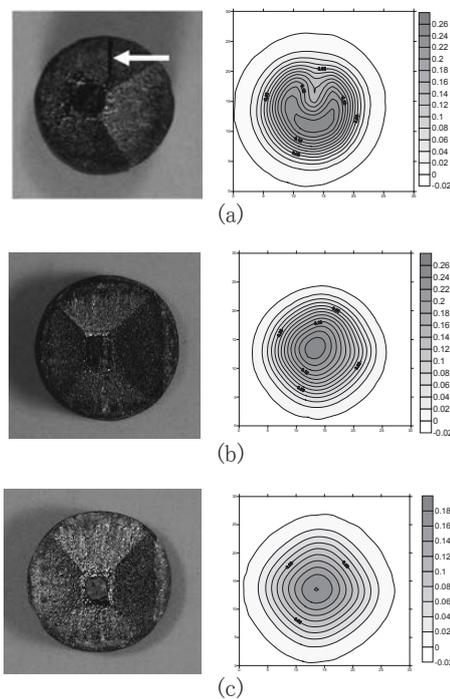


Fig.2 Dy123 bulks fabricated from spark plasma sintered precursors and trapped magnetic field profiles of (a) Bulk 650, (b) Bulk 700 and (c) Bulk 750, respectively.

## 参考文献

- H. Tanaka et al.: Physica C, Vol. 426-431 (2005) pp.660-665.

## 樹脂含浸がバルク超伝導体の諸特性に及ぼす影響

## Effects of resin impregnation on the characteristics of bulk superconductors

谷 雅史, 土屋 拓己, 木原 健翔, 大谷 一也, 川人 雅, 近藤 勝嵩, 鈴木 啓太, 腰塚 直己, 村上 雅人 (芝浦工業大学)  
 MASAFUMI Tani, THUCHIYA Takumi, KIHARA Kensho, OTANI Kazuya, KAWAHITO Masashi, KONDO Masataka, SUZUKI  
 Keita, KOSHIZUKA Naoki, MURAKAMI Masato, (SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY)  
 Email, mb12035@shibaura-it.ac.jp

## 1. 緒言

RE-Ba-Cu-O (RE: 希土類元素)系のバルク超伝導体は強力な磁石として機能することが知られている。

しかし、バルク超伝導体は、その応用の際、温度サイクルにより熱応力や磁場によるローレンツ力を経験する。これら応力により、クラックが生じて特性が劣化することが報告されている。

本研究では、応力緩和に有効と考えられる樹脂含浸がバルク超伝導体の捕捉磁場に及ぼす影響を調べた。樹脂としては、低温下で弾性と耐水性にすぐれたシリコン樹脂を基材とし、フィラー添加により樹脂の線膨張係数の調整を行った。

## 2. 実験方法

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>粉末とY<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>粉末を5:2のモル比で混合し、Φ48mmのペレットに圧粉成形したのち種結晶熔融成長法によりバルク超伝導体を作製し、その後300hの酸素アニール処理を行った。

シリコン樹脂に対して25~200%まで25%刻みにAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉を混合させ、線膨張係数と常温・低温下における機械特性を測定した。

これら実験結果をもとに、樹脂とバルク超伝導体の線膨張係数を比較し、含浸する樹脂のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉量を決定した。つぎに、最適組成の樹脂を用いて、鋳型にバルク超伝導体をセットし、周囲を覆うように樹脂を流し込んだ。鋳型を真空炉に入れ、気泡を取り除きつつ含浸処理を施した。Fig.1に樹脂含浸を施したバルク超伝導体の外観写真を示す。

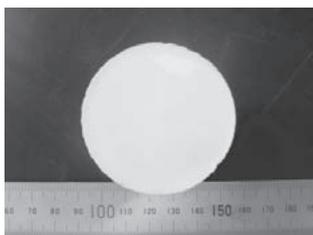


Fig.1 Y-Ba-Cu-O bulk superconductor with resin-impregnated

超伝導特性は、捕捉磁場により評価した。捕捉磁場測定は、電磁石による静着磁場を行ったあと、ホール素子二次元走査型磁場分布測定装置を用いて行った。この際、樹脂含浸の影響を調べるため、含浸した状態と含浸していない状態で繰り返し捕捉磁場測定を行い、捕捉磁場の変化を調べた。また、樹脂含浸による腐食耐性を調べるため、樹脂含浸前後のバルク超伝導体をそれぞれ水中に置き一定時間毎に磁場測定を行うとともに、外観写真も評価した。

## 3. 実験結果及び考察

Fig.2にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加率と線膨張係数の関係を示す。バルク超伝導体の線膨張係数は $17.34 \times 10^{-6}$  (1/K)である<sup>1)</sup>。よって、Fig.2のデータから、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の添加量としては175%が最適であることが分かる。

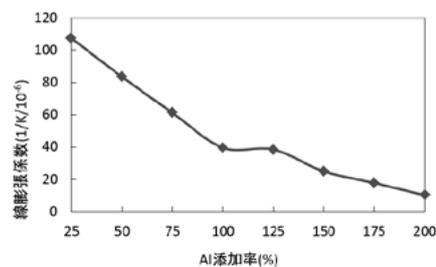


Fig. 2 Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on the coefficient of linear expansion for the resin.

Fig.3に、樹脂含浸処理が捕捉磁場測定回数と最大捕捉磁場に及ぼす影響を示す。Fig.3より含浸していないバルク超伝導体は測定毎に約50(G)ほど低下しているのに対し、含浸したバルク超伝導体では、ほぼ安定した測定結果が得られている。これは樹脂含浸によって、バルク超伝導体への温度変化や磁場印加による応力が緩和されているためと考えられる。

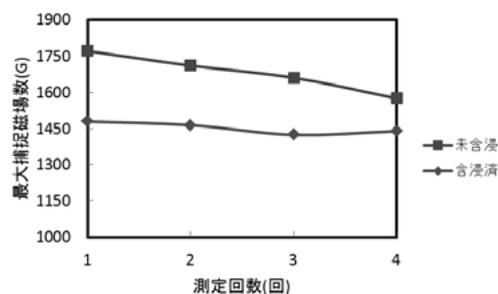


Fig. 3 Change of trapped magnetic field with the number of measurements

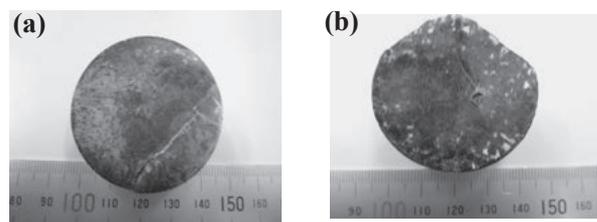


Fig. 4 Corrosion of bulk superconductors: (a) pristine; (b) with resin impregnation.

Fig.4に48時間の水中保持をしたあとのバルク体の表面性状を示す。含浸を行っていないバルク超伝導体(a)では、クラックが発生しているのに対し、(b)の樹脂含浸材では変化が見られない。この結果と、繰り返し測定で捕捉磁場特性に変化がないことから、樹脂含浸は耐食性の向上に寄与するものと考えられる。

## 参考文献

1. H. Fujishiro et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.16, No.2 (2006) p. 1007.

BaSnO<sub>3</sub> 添加が Y 系バルク超伝導体の特性に及ぼす影響Effects of BaSnO<sub>3</sub> addition on the characteristics of Y-based bulk superconductors

川人 雅, 岩崎弥友, 大谷一也, 近藤勝嵩, 谷 雅史, 鈴木 啓太, 土屋 拓己, 木原 健翔, 腰塚 直己,  
村上 雅人(芝浦 工大)

MASASHI Kawahito, MITOMO Iwasaki, KAZUYA Otani, MASATAKA Kondo, MASAHUMI Tani, KEITA Suzuki, TAKUMI THUCHIYA,  
KENSHO Kihara, NAOKI Koshizuka, MASATO Murakami (Shibaura Institute of Technology)

E-mail: mb12017@sic.shibaura-it.ac.jp

## 1. 緒言

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (RE123)系バルク超伝導体材料では臨界電流密度を向上させるために、磁束のピンニングセンターとして非超伝導粒子を分散させている。一般には RE<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (RE211) が分散粒子として利用される。ただし、粒子径が小さいほどピンニング効果は大きいと、より微細な RE<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuMO<sub>y</sub> (M=Zr, Hf, Nb, Ta, W, Mo, U, Sn, and Re)組成の化合物をピンニングセンターとして用いる試みも検討されている。粒径は RE211 の 1~5μm 程度に対し、RE<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuMO<sub>y</sub> では 50~300nm とされている<sup>1)</sup>。

本実験では BaSnO<sub>3</sub> を Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (Y211) に添加し、Y<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuSnO<sub>x</sub> (Y2411) と Y211 を共焼結させることにより、YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (Y123)相中に分散する Y211 を微細化させることを目的とした。

## 2. 実験方法

BaO<sub>2</sub> および SnO<sub>2</sub> を原料粉末とし BaSnO<sub>3</sub> を作製し、Y123 および Y211 は市販の粉末を用いた。BaSnO<sub>3</sub> を Y211 に対し、45、60mol%それぞれ混合し、1000℃で2回ずつ焼結を行い、Y211 と Y<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuSnO<sub>x</sub> の共焼結粉を作製した。

次に走査型顕微鏡(SEM)を用いて、作製した焼結粉と無添加 Y211 粉の粒径比較を行った。

それぞれ作製した焼結粉に Y123 を混合し、φ 20mm の治具を用いて圧粉成形を行い、前駆体を作製した。

NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> の種結晶を用い Top-Seeded Melt-Growth 法にて溶融成長させ、酸素アニール処理を施した。

作製したバルク超伝導体に、液体窒素中(77 K)で Fe-Nd-B 磁石(表面磁束 0.5 T)を用いて磁場を捕捉させ、二次元走査型磁場分布測定装置を用いて磁場分布を測定した。

## 3. 実験結果

Fig.1(a)に市販の Y211 粉末、(b)に Y211 に 45mol% の BaSnO<sub>3</sub> を添加して焼結した粉末の SEM 像を示す。

Fig.1(a)および(b)において観察される 1~2μm 程度の粒子は Y211 であり、Fig.1(b)に観られる、より小さな 50~300nm 程度の粒子は Y<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuSnO<sub>x</sub> である。Fig1 (b)の Y211 は、Fig.1(a)の Y211 と比べて、より球に近い形状を呈しており、Y211 の周りから Y<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuSnO<sub>x</sub> が生成した結果と推測される。

以上より、BaSnO<sub>3</sub> を Y211 に添加することで、Y211 粒子の周りに微細な Y<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuSnO<sub>x</sub> 粒子が生成したものと考えられる。

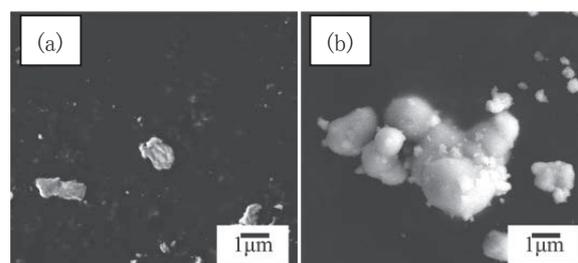


Fig.1 Scanning electron micrographs for the powders of (a)Y211; (b) Y211+45mol%BaSnO<sub>3</sub>

Fig.2 に無添加バルク体、Y211+45mol%BaSnO<sub>3</sub> バルク体、Y211+60mol%BaSnO<sub>3</sub> バルク体の最大捕捉磁場を示す。無添加バルク体の磁束密度は 500G、Y211+45mol%BaSnO<sub>3</sub> バルク体が 1980G、Y211+60mol%BaSnO<sub>3</sub> バルク体が 1490G であった。BaSnO<sub>3</sub> を添加したバルク体は無添加バルク体よりも磁束密度が向上したことが分かる。

Y211 粒子は Y123 溶融バルク体のピンニングセンターとしてよく知られているが、この Y211 粒子の微細化と同時に、より微細な Y2411 粒子が生成され、これもピンニングセンターとして働くことで、捕捉磁場が向上したものと考えられる。

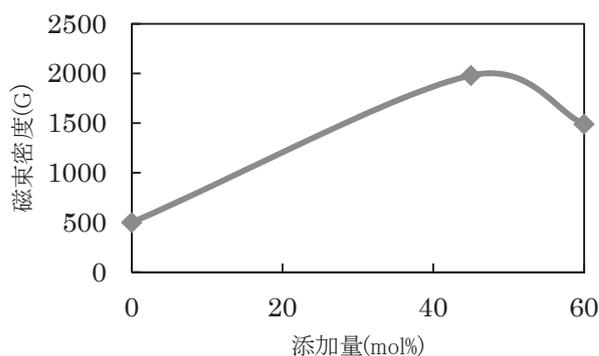


Fig. 2 Effects of BaSnO<sub>3</sub> addition to Y211 on the trapped fields for bulk Y-based superconductors.

## 4. 参考文献

1) N. Hari Babu, K. Iida, D. A. Cardwell: *Physica C*, vol. 445-448, (2006), pp. 353-356

## 形状記憶合金リングにより補強したバルク超伝導体の特性評価

### Characterization of bulk superconductor reinforced by Fe-Mn-Si shape memory alloy ring

大谷 一也, 川人 雅, 近藤 勝嵩, 鈴木 啓太, 谷 雅史, 本間 優作, 村上 雅人, 腰塚 直己, 関 宏範 (芝浦工大)

Otani Kazuya, Kawahito Miyahuji, Kondo Masataka, Suzuki Keita, Tani Masashi, Honma Yusaku,

Murakami Masato, Koshizuka Naoki, Seki Hironori (Shibaura Institute of Technology)

#### 1. 緒言

バルク超伝導体は強磁場マグネットとして産業応用が期待されている。しかし、バルク超伝導体は機械的強度が低いため、着磁の際のローレンツ力によりクラックが生じることが報告されている。このため、バルク超伝導体の機械的強度を改善する手法として形状記憶合金リングで補強すること提案されている。

本研究では Fe-Mn-Si 系形状記憶合金リングの締結効果を調べるため Gd 系バルク超伝導体を用い、形状記憶リングとバルク体を一体化させた時の超伝導特性および機械的特性を評価した。そして、これら結果をもとに、最適締結条件を検討した。

#### 2. 実験方法

供試材として新日鉄製 Ag 添加 Gd 系の  $\phi 39$  バルク超伝導体、およびそれぞれ肉厚の異なる Fe-Mn-Si 系の形状記憶合金(SMA)リングを用いた。SMA リングに溶体化処理を施し、 $\phi 35.8$  の拡径治具を用いて第 1 拡径処理を施したのち、 $\phi 37.7$  の拡径治具を用いて第 2 拡径処理を施した。また、拡系処理を施していないものも作製し、内径および外径において、最も良好な形状回復率の値を示す条件を検討した。

次に SMA リングをバルク超伝導体に締結するために SMA リングを  $\phi 39.1$  の大きさに加工を行った。また SMA リング締結前後での Ag 添加 Gd 系バルク超伝導体の捕捉磁場の变化を調べるため、1T の電磁石による静磁場着磁を行い、捕捉磁場をホール素子 2 次元走査型磁場分布測定装置により測定した。その後バルク超伝導体を SMA リングと一体化させるため、バルク超伝導体のまわりに SMA リングを配し電気炉で加熱処理を行い、リングの形状回復を利用した締結処理を施した。

SMA リング締結後、再度 Ag 添加 Gd 系バルク体の捕捉磁場の測定し、締結処理が捕捉磁場に及ぼす影響について調べた。その後、室温にて低温用のひずみゲージを用いて、極低

温下での熱収縮によるひずみ量を測定しフープ応力を算出した。

#### 3. 実験結果および考察

Fig. 1 にそれぞれの SMA リングの形状回復率の温度依存性を示す。

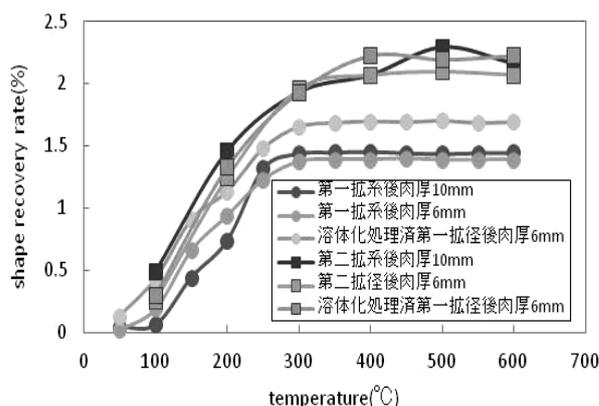


Fig. 1. The shape recovery rate of Fe-Mn-Si alloy rings as a function of temperature.

以上の結果から溶体化処理を施した第二拡径後の形状回復率が最も高いこと、肉厚が大きいほど値が高くなることもわかった。また SMA リング補強前後の最大捕捉磁場の値を Table1 に示す。この結果からリング補強によって最大捕捉磁場が高くなることがわかった。これは超伝導体のひずみ効果による臨界電流の低下がリングの圧縮予荷重により緩和されたためと考えられる。

Table1 Maximum trapped magnetic field of bulk superconductors around reinforcement ring

SMAリング	SMAリング補強前の最大捕捉磁場	SMAリング補強後の最大捕捉磁場
肉厚6mm	2950	3875
肉厚3mm	5345	6455
肉厚1.5mm	2850	4015

## 簡易 OCMG 法により製造した Nd-Eu-Gd バルク超伝導体の特性評価

### Characterization of Nd-Eu-Gd bulk superconductors fabricated with the simplified OCMG process

鈴木 啓太, 関 宏範, 井上 和朗, 大谷 一也, 川人 雅, 近藤 勝嵩, 谷 雅史, 腰塚 直己, 村上 雅人 (芝浦工大)  
 SUZUKI keita, SEKI hironori, INOUE kazuro, OTANI kazuya, KAWAHITO masashi, KONDO masataka, TANI masafumi,  
 KOSHIZUKA naoki, MURAKAMI masato (SIT)  
 E-mail: mb12030@shibaura-it.ac.jp

#### 1. はじめに

(Nd, Eu, Gd)-Ba-Cu-O 系バルク超伝導体は低酸素分圧下で熔融成長法により作製すると、高温、高磁場下においても、すぐれた臨界電流特性を示すことが知られている。しかし、低酸素分圧を実現するために、制御雰囲気中で熔融成長させる場合、製造工程が複雑になるため、大量生産が難しいという課題がある。

本実験では、電気炉に Ar ガスを導入することにより低酸素分圧を実現する簡易型 OCMG 法を使用して Nd-Eu-Gd 系バルク超伝導体の合成について検討した。

#### 2. 実験方法

市販の  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Eu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{BaO}_2$ 、 $\text{CuO}$  を原料粉末とし、組成が  $(\text{Nd}_{0.33}, \text{Eu}_{0.33}, \text{Gd}_{0.33})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{NEG123})$  と  $(\text{Nd}_{0.33}, \text{Eu}_{0.33}, \text{Gd}_{0.33})_2\text{BaCu}_5(\text{NEG211})$  となるように秤量し、3 回仮焼結した。その後 NEG123 と NEG211(NEG-NEG)、NEG123 と Gd211(NEG-Gd) を 10:2 になるようにそれぞれ混合し圧粉、Ar ガスを流しながらマッフル炉で熔融成長してバルク体を作製した。Gd211 は市販の粉末を使用した。

作製した試料に酸素アニールをした後、切断機でバルク上部から 1mm を  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 1\text{mm}$  の形状の試料を切り出し、超伝導量子干渉磁束計 (SQUID) を用いて臨界温度 ( $T_c$ ) を測定した。

#### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に SQUID にて測定した NEG-NEG バルク超伝導体の超伝導遷移の様子を示す。また、Fig. 2 に NEG-Gd バルク超伝導体の測定結果を示す。両試料とも、理想的な  $T_c$  である 95K よりも低い温度で超伝導遷移しており、Ba サイトが RE によって置換された  $\text{RE}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_7$  相が形成されたものと考えられる[1]。

NEG-NEG バルク体は、約 78K から反磁性を示し、57K 程度で試料全てが超伝導に転移した。NEG-Gd は 90K 近傍で反磁性を示すものの、より広い転移幅を呈した。

NEG-Gd バルク体が 90K 近傍で超伝導を示すのは、

Gd-211 の添加によって、空気中でも 90K 程度の  $T_c$  を有する Gd-123 が生成したものと考えられる。

今後は、さらに Ar ガスの導入方法を改善し、組成を制御することで、より臨界温度を有する Nd-Eu-Gd 系超伝導体の合成を期する。

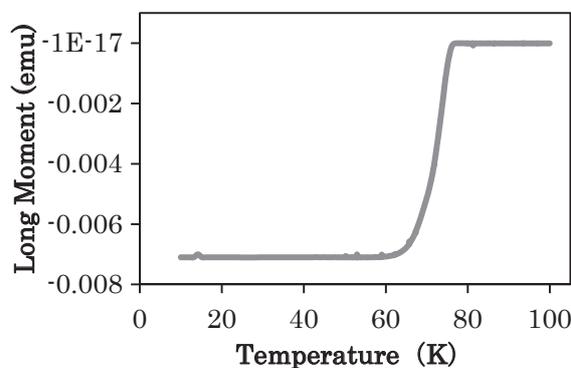


Fig. 1 Superconducting transition for an Nd-Eu-Gd bulk superconductor consisting of NEG123 and NEG211.

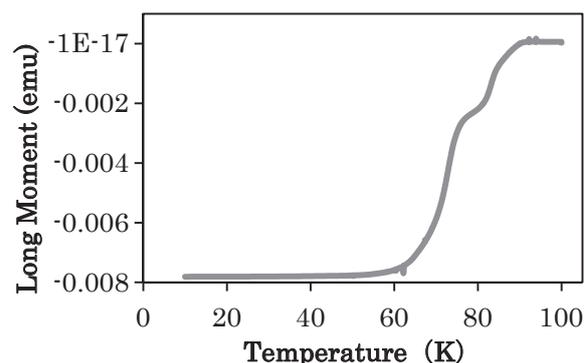


Fig. 2 Superconducting transition for an Nd-Eu-Gd bulk superconductor consisting of NEG123 and Gd211.

#### 参考文献

1. M. Namba *et al.*: High Magnetic Field Transport Properties of NEG123 and Y123 Bulk Materials, Abstracts of CSJ Conference, vol. 41 (2006) p. 359.

# φ 140mm の Gd 系バルク超電導体における捕捉磁界分布と電流密度分布

Trapped flux and current density distributions of single-grain Gd-Ba-Cu-O HTS bulk 140 mm in diameter

岡島 直輝, 大浦 雄紀, 大崎 博之(東大); 手嶋 英一, 森田 充(新日鐵住金)

OKAJIMA Naoki, OURA Yuki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo);

TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.)

E-mail: okajima@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

バルク超電導体は、磁束ピンニング効果により永久磁石より数倍高い捕捉磁界性能を持つため、モータや磁気分離装置等への応用が検討されている。バルク超電導体が発生する磁束量は、第一次近似的には臨界電流密度と試料サイズに比例する。磁束量の増加により応用性能が向上するため、バルク超電導体の大型化とその電磁特性向上の研究がされている。

本研究では、RE 元素組成勾配法を適用し作製した直径 140 mm の大型 Gd 系バルク超電導体の 77 K での捕捉磁界分布を測定し、バルク体中の電流密度分布の推定を行う。

## 2. 実験方法

測定に使用するのは、直径 140 mm、厚さ 20 mm の Gd 系バルク超電導体である。作製には改良型 QMG 法に RE 元素組成勾配法が適用され、中心部の RE 元素は Gd が 100 %で、外側に行くほど Dy 添加量を 5 %ずつ増大し、最外周は Gd80 %、Dy20 %である。Dy 添加量を多くすることで、外周部ほど熔融温度が低くなり、単結晶状大型バルク材の結晶成長が可能となる。

バルク超電導体の着磁は、超電導マグネットを用いて外部磁界 3.5 T を発生させ、液体窒素による磁界中冷却により行った。着磁後、バルク超電導体の表面から 0.94 mm、2.94 mm の面上をアキシヤル型ホールセンサで磁束密度分布を測定した。バルク超電導体の裏側も同様の測定を行った。

## 3. 実験結果

得られた磁束密度分布を Fig. 1 に示す。表側では、最大磁束密度 2.61 T、磁束量 8.50 mWb、裏側では、最大磁束密度 2.49 T、磁束量 8.30 mWb であった。強い磁界中で電流密度が大きくなるピーク効果が見られた。

## 4. 電流密度分布推定

実験結果から、逆問題によりバルク超電導体中の電流密度分布の推定を行った。軸対称モデルにおいてバルク断面を半径方向 10 mm 毎、高さ方向 10 mm 毎に 14 分割し、各々の領域の電流を一定と仮定し、さらに 0.2mm 四方に分割し、その中心に電流が流れているものとした。計算には磁束密度についての実験結果の周方向平均値(Fig. 2)を使用した。誤差を軽減させるため、磁束密度を測定した 88 点から電流密度 14 点を求める優決定問題とし、最小二乗法を用いて解いた。

バルク内部の磁束密度を求めるため、逆問題により得られた電流密度を用いて FEM 解析を行った。解析結果から分割した領域の平均磁束密度を求め、 $J$ - $B$  曲線(Fig. 3)を描いた。

これらの結果から、本バルク超電導体に流れる電流密度は  $10^8$  A/m<sup>2</sup> 前後であることが分かった。中心部の電流密度が小さくなっているが、モデル上、中心部や端部の解析精度は低下しやすく、また、中心まで着磁できていない可能性もあるため、さらなる検討が必要である。中心部の結果を除けば  $J$ - $B$  曲線に磁界の大きい場所で電流密度が大きくなるピーク効果が見られる。

## 5. まとめ

直径 140 mm の Gd 系大型バルク超電導体の 77 K での捕捉磁界分布を測定し、バルク体中の電流密度分布の推定を行った。本バルク超電導体において、表面から 0.94 mm 上方で最大 2.61 T の磁束密度と磁束量 8.50 mWb が得られた。バルク内部の電流密度は  $10^8$  A/m<sup>2</sup> 前後であるとわかった。

今後の課題として、電流密度分布の推定の分割数を増やす、組成によるバルク内部の電流密度の変化について考慮する等があげられる。

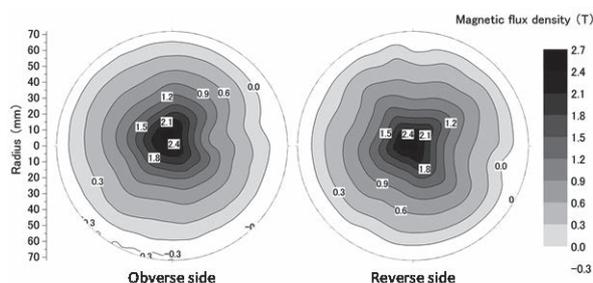


Fig.1 Magnetic flux density distributions

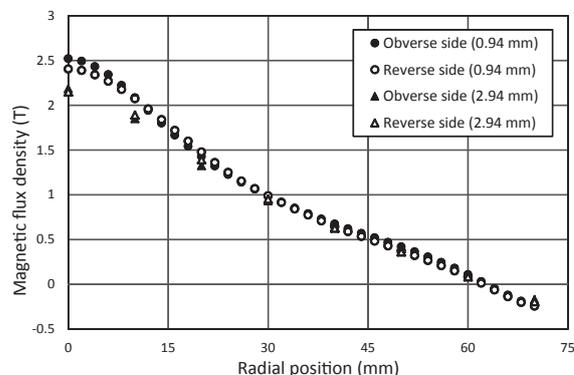


Fig.2 Average Magnetic flux density of radial position

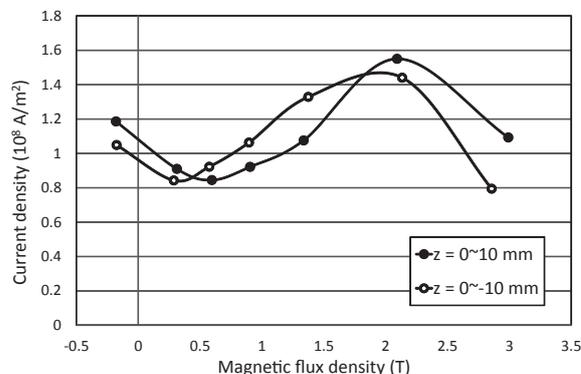


Fig.3 J-B relations

## 参考文献

1. H. Teshima, et al: CSJ 46 (2011), p.73

## 固相エピタキシャル成長法による YbBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> 薄膜の作製 Fabrication of YbBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> thin films by solid phase epitaxial growth

多田 善紀, 高平 俊輔, 一野 祐亮, 吉田 隆(名古屋大学)

TADA Yoshinori, TAKAHIRA Shunsuke, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka(Nagoya U)

E-mail: tada-yoshinori11@ees.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

高い臨界温度や高い磁場中超伝導特性の観点から RE-Ba-Cu-O 系超伝導体の研究が盛んに行われているが、本研究ではその中でも高温下においても酸素欠損を起こしにくい REBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub>(RE124)超伝導体[1]の *c* 軸配向薄膜の作製に取り組んだ。本研究は、このような特長を有する RE124 超伝導体の線材応用を目的とし薄膜化を試行した。一般的に RE124 超伝導体は RE123 超伝導体と比較した際に生成領域が狭いため *c* 軸配向薄膜の作製が困難とされている。そこで本研究ではパルスレーザー蒸着法(PLD法)を用いて前駆体薄膜を作製し、後熱処理によって結晶化を行う固相エピタキシャル成長法を用いることで、より幅広い酸素分圧化で結晶化を試行し、RE124 の *c* 軸配向薄膜の生成を試みた。

### 2. 実験方法

本研究では RE124 の中でも Yb124 を超伝導層として用い、固相エピタキシャル成長法により Yb124 の *c* 軸配向薄膜の作製を試みた。なお、基板は MgO(100)単結晶基板と SrTiO<sub>3</sub>(100)単結晶基板を用いた。まず室温下で PLD 法により Yb124 アモルファス薄膜を作製後、管状電気炉にて O<sub>2</sub> フロー中、750°Cにおいて 1~40 h アニールを行うことで結晶化を図った。作製した試料の結晶構造を X-Ray Diffraction(XRD)、組成比を Inductively Coupled Plasma(ICP)分光法、臨界温度は直流四端子法を用いて評価した。

### 3. 結果と考察

XRD による結晶構造評価の結果、Fig. 1 のように SrTiO<sub>3</sub> 基板において 20 h 以上のアニールを行うことにより Yb124 の *c* 軸配向膜の作製に成功した。同条件の作製プロセスを行った MgO 基板には Yb123 の *c* 軸配向膜が成長した。*ab* 面内における基板と Yb124 との格子不整合性は SrTiO<sub>3</sub> 基板が 1.80%、MgO 基板が 8.98%と SrTiO<sub>3</sub> 基板の方が優れているため、SrTiO<sub>3</sub> 基板上においてのみ Yb124 が成長したと考えられる。アニール時間においては 20 h 未満のアニールを行った薄膜は基板にかかわらずすべて結晶化が不完全(アモルファス)であることを XRD により確認した。また作製した SrTiO<sub>3</sub> 基板上においてアモルファス薄膜の作製時にターゲット基板間距離を変化させることにより薄膜の組成比が Yb : Ba : Cu=1 : 3.13 : 3.46 から Yb : Ba : Cu=1 : 2.84 : 3.64 へと改善された。これによって、Fig. 2 に示した通り、Yb124 薄膜の臨界温度は 74.6 K から 78.7 K へと向上した。これは、化学量論比に近づくことによって析出物の生成が抑制されたことにより臨界温度が向上したと考えられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金(23226014)の助成を受け行ったものである。

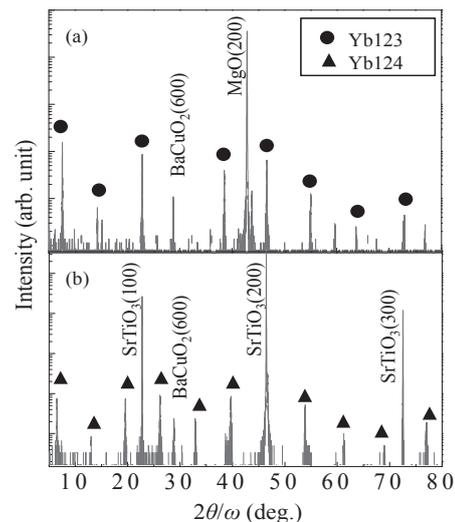


Fig. 1 XRD pattern of Yb124 fabricated under same condition on (a)MgO(100), (b)SrTiO<sub>3</sub>(100) substrate

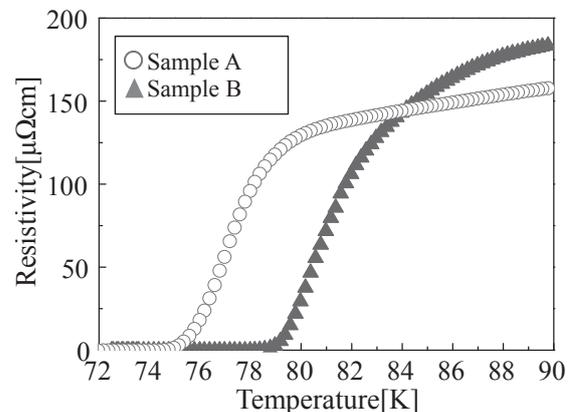


Fig. 2 Resistive transition of Yb124 thin films  
Sample A: Ba/Yb = 3.13, Cu/Yb = 3.46,  
Sample B: Ba/Yb = 2.84, Cu/Yb = 3.64

### 参考文献

1. D. E. Morris, et. al.: Physica C, Vol. 159 (1989) p.287

## MgB<sub>2</sub> 超電導バルク磁石の熱処理条件の最適化 Optimization of Processing Conditions for MgB<sub>2</sub> Superconducting Bulk Magnets

富田 優, 赤坂友幸, 石原 篤(鉄道総研); 山本 明保(東大, JST さきがけ); 下山 淳一, 岸尾 光二(東大)  
TOMITA Masaru, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi (Railway Technical Research Institute);  
YAMAMOTO Akiyasu (The Univ. of Tokyo, JST-PRESTO); SHIMOYAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji (The University of Tokyo)  
E-mail: ai@rtri.or.jp

### 1. はじめに

冷凍機冷却による 5-30 K で応用可能な超電導バルク磁石として MgB<sub>2</sub> バルク体を検討した。金属系超電導体としては最高の転移温度  $T_c$  (40 K) を持つ MgB<sub>2</sub>[1] は、超電導コヒーレンス長が長く電磁的異方性が低いことから、無配向の多結晶体においても  $10^5$  A/cm<sup>2</sup> 以上の比較的高い臨界電流密度  $J_c$  を持つ巨視的超電導電流が得られる[2]。この結晶粒間における弱結合の不在は、多結晶試料全体にわたっての均一な超電導電流分布を可能とする[3]。また、MgB<sub>2</sub> バルク体はマグネシウムとホウ素の混合粉末に熱処理を施す *in-situ* 法などにより比較的容易に、かつ低コストで作製可能である。

MgB<sub>2</sub> は線材化研究が積極的に行われているが、弱結合フリーに由来する特徴は RE 系溶融凝固バルクで研究が進んでいる超電導バルク磁石としても最適である。すなわち、40 K 以下で動作可能な強力磁石として、輸送・医療等への応用が期待でき、とくに、高い磁場均質性が求められる MRI, NMR 等の計測機器への応用に適すると考えられる。

最近我々はクラックの無い均一な組織を持つ MgB<sub>2</sub> バルク体を作製する技術を開発し、比較的大型のバルク体の作製が可能となった[4]。本研究では、様々な熱処理条件で Mg と B の混合粉末の圧粉成型体を熱処理することにより円盤型 MgB<sub>2</sub> バルク体を作製し、その捕捉磁場特性を評価した。

### 2. 実験方法

Mg と B の混合粉末を 20 mmφ、厚さ 10 mm の円盤状に成型し、Ar 雰囲気下で 650-950°C、3 h の熱処理を行い MgB<sub>2</sub> バルク体を得た。一部のバルク体は、機械的強度を高めるために MgB<sub>2</sub> バルク体/金属(SUS)複合体とした。得られたバルク体試料をヘリウム冷凍機で 15 K まで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場下冷却(FC)条件により 6 T の磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場特性に関してはバルク体表面に配置したホール素子を用いて測定し、捕捉磁場の温度依存性を評価した。なお、試料温度はバルク体底面の温度とした。

### 3. 結果と考察

作製した MgB<sub>2</sub> バルク体試料は、作製時の熱処理温度にかかわらず、いずれも表面にマクロスケールのクラック、ポイド等はみられなかった。しかしながら、650°C において熱処理をした試料では表面に未反応の金属マグネシウムがみられた。

様々な熱処理温度で作製した、直径 20 mmφ、厚さ 10 mm のバルク体試料を着磁後、バルク体表面中心において測定した捕捉磁場の温度依存性を Fig.1 に示す。また、熱処理温度と 15, 20, 30 K における捕捉磁場の関係を Fig.2 に示す。捕捉磁場は熱処理温度が高いほど向上する傾向を示し、750°C 以上で熱処理を行った試料では 15 K で 1.5 T 以上の高い捕捉磁場を示すとともに、ほぼ同じような温度依存性を示すことが明らかになった。また、850°C で熱処理を行った試料が全測定温度領域で最も捕捉磁場が高く、15 K で 1.82 T を示し、バルク全体で  $J_c$  を一定と仮定し、Biot-Savart の法則を用いてバルク内の平均  $J_c$  を算出したところ、約  $4.5 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> であった。一方で、650°C で熱処理を行った試料の捕捉磁場は 0.34 T@15 K と低く、3 h の熱処理では相生成が不十分であることが示唆される。

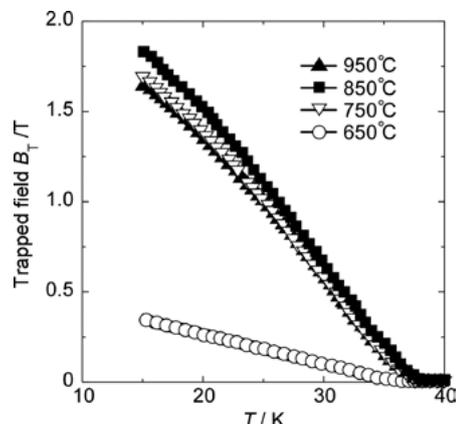


Fig.1. Surface trapped magnetic field as a function of temperature for disk shape MgB<sub>2</sub> bulk samples (20 mmφ×10 mm<sup>2</sup>) heated at 650, 750, 850 and 950°C for 3 h.

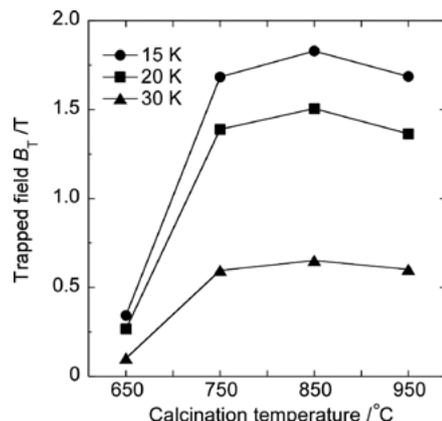


Fig. 2. Surface trapped magnetic field as a function of heating temperature for disk shape MgB<sub>2</sub> bulks (20 mmφ×10 mm<sup>2</sup>).

### 4. 結論

MgB<sub>2</sub> バルク体を作製し、超電導バルク磁石としての素質を検討した。熱処理温度を 650-950°C で制御したところ、850°C で熱処理を行った MgB<sub>2</sub> バルク体において約 1.82 T(@15 K) の表面捕捉磁場が得られた。バルク体の臨界電流密度、微細組織の改善により捕捉磁場のさらなる向上が可能で、MgB<sub>2</sub> バルク体は数テスラ級の強力超電導バルク磁石候補として有望であるといえる。

### 5. 謝辞

本研究はJSPS科学研究費補助金(23246110)ならびにJST さきがけの助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 山本明保 ほか, 応用物理 **79**, 48 (2010).
- [4] 例えば、富田優 ほか, 第 83 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.86 (2010).

## シミュレーションを用いたパルス着磁における MgB<sub>2</sub>バルク内の磁束運動と温度変化

### Flux motion and temperature change in the MgB<sub>2</sub> bulk during pulsed field magnetization using a simulation

小山 允, 田村 拓也, 佐々木 智久, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)

OYAMA Mitsuru, TAMURA Takuya, SASAKI Tomohisa, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail:t2211004@iwate-u.ac.jp

#### 1. はじめに

本グループはパルス着磁法(PFM)における REBCO 系酸化物高温超電導体内の磁束運動と温度変化の二次元軸対称シミュレーションを用いて解析を行うことで、PFM 中におけるバルク超電導体内の磁束運動を再現し、磁束の動きを知ることで捕捉磁場向上を目指してきた[1]。最近、捕捉磁場分布の均一性の高さから MgB<sub>2</sub> のバルク磁石への応用を目指して PFM による MgB<sub>2</sub> バルクへの着磁実験が行われている[2]。そのため、PFM 中での MgB<sub>2</sub> バルク内の磁束運動の再現による捕捉磁場の向上に注目した。本研究では、軸対称シミュレーションを行うことで PFM 中における MgB<sub>2</sub> バルク内の磁束運動と温度変化を調べ、これまでの実験結果との比較・検討を行う。

#### 2. 解析法

モデルにカプセル法で作成された直径 30 mm、厚さ 9 mm の円筒バルクを用いた。また、このバルクを初期温度 14 K、印加磁場  $B_{ex}=1.5$  T の PFM で印加した時に中心捕捉磁場は 0.71 T となった[2]。図 1(a)は実験配置を示し、図 1(b)は解析に用いた二次元軸対称の有限要素解析モデルを示す。解析には電磁界と熱伝導の連成方程式を用いた。超電導体の非線形な  $E$ - $J$  特性は  $n$  値モデルを用い、臨界電流密度  $J_c$  の磁場依存性は(1)式のように Kim モデルを用いて計算した。

$$J_c(T, B) = \alpha \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \frac{B_0}{|B| + B_0} \quad (1)$$

定数  $\alpha=5.0 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup> とし、バルクの初期温度を 14 K、パルス磁場  $B_{ex}(t)$  は立ち上がり時間  $\tau=0.01$  s とする。

#### 3. 結果と考察

図 2 に MgB<sub>2</sub> バルクの表面中心における捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。●が実験、○がシミュレーションでの表面中心の捕捉磁場を示す。シミュレーションの捕捉磁場の概型は実験結果と比較的近い。しかし、詳細に比較するとシミュレーションは実験に比べ磁束がバルク中心に低印加磁場で捕捉されにくく、最適印加磁場以上では捕捉磁場の低下が大きい。そのため、シミュレーションは実験結果との差異が存在する。この原因として以下のことが考えられる。今回の解析では MgB<sub>2</sub> の比熱と熱伝導率を一定の値とした。しかし、実際の MgB<sub>2</sub> の比熱と熱伝導率は温度によって異なる。また、初期温

度と臨界温度での比熱には約 10 倍の差がある。このことが温度変化に影響することで最終的な温度分布や  $J_c$  分布が実際の実験と異なったために捕捉磁場分布に影響を与えたことが考えられる。

講演では MgB<sub>2</sub> バルクの比熱と熱伝導率が温度依存を考慮した PFM 中における磁束運動と温度変化について解析結果の報告も併せて行う。

#### 参考文献

- [1] H. Fujishiro *et al*, IEEE Trans Appl, Supercond, 22 (2012) 4700204  
 [2] H. Fujishiro *et al*, Jpn. J. Appl. Phys.51 (2012) 103005  
 [3] T.Naito, T. Sasaki and H. Fujishiro, Supercond. Sci. Technol. vol. 25 (2012) 095012

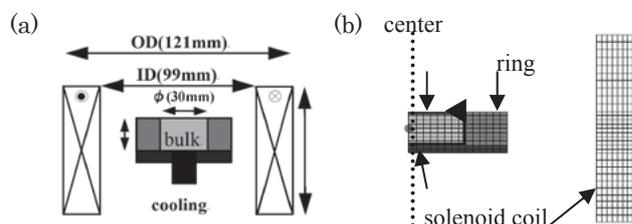


Fig.1 (a) The analytical setup for the pulsed field magnetization using the solenoid coil. (b) Axial symmetry model for finite elemental method simulation

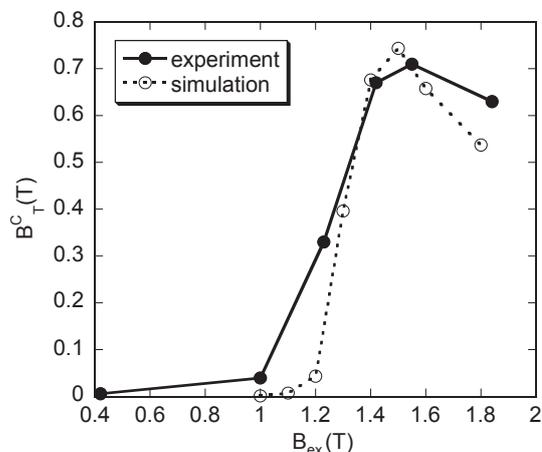


Fig.2 Results of the simulation of the trapped field  $B_T^C$  as a function of the applied field  $B_{ex}$ . The experimental results were reproduced by the simulation using the parameters of  $\alpha=5.0 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup> and  $n=50$ .

## ツイストを考慮した Nb<sub>3</sub>Sn 線材の力学特性

### The mechanical characteristic of twisted Nb<sub>3</sub>Sn wire

富田 三雄, 町屋 修太郎 (大同大学); 長村 光造 (応用科学研究所)  
菅野 未知史 (KEK); 土屋 佳則 (NIMS)

TOMITA Mitsuo, MACHIYA Shutaro (DAIDO Univ.); Osamura Kozo (Research Institute for Applied Sciences)  
SUGANO Michinaka (KEK); TUCHIYA Yoshinori (NIMS)  
E-mail: ailiandalice@gmail.com

#### 1. はじめに

通常、超伝導線材の力学では複合則が用いられている。すべての相が同じひずみを共有するモデルが通常使われるが、これは力学的にセルフコンシステントではない問題があった。さらに、Nb<sub>3</sub>Sn のようにフィラメントがツイストされている場合は単純な複合則からさらに誤差が生じる可能性もある。よって、本研究は複合材の形状の影響を考えるため、ツイストの影響を有限要素法を用いて、解析を行なった。これによりツイストにより、どのような力学特性に差が生じるのかを明らかにしたい。

#### 2. 実験および解析

本研究では、まずツイストの影響を確かめる為にツイストがある材料とツイストを行っていない材料を準備した。その材料を、0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4%の軸方向へのひずみをかけた状態でX線ひずみ測定および伸び計をつけることで引張試験も同時に行った。ここで得られた応力ひずみ線図を Fig. 1 に示す。

また、フィラメントをツイストすることの影響を力学的に確かめる為に、有限要素法のモデルを作成した。Nb<sub>3</sub>Snのフィラメントの構造を考えると、外側のフィラメントは小さな螺旋角を持ち、一方内側のフィラメントは小さな螺旋角を持つ問題がある。これらを同時にモデル化することは、モデルの複雑化するため、本研究ではブロンズのマトリックスを仮定し、その中に1本のNb<sub>3</sub>Snフィラメントをツイストした簡略化したモデルとした。また内径側と外形側の影響を考慮するため、螺旋角の異なる Fig. 2と Fig. 3のようなモデルを複数作成した。

これらのモデルのほか、フィラメントがストレートな状態のモデルも作成した。これらのモデルから有限要素法を用いて解析を行ない、ツイストにより力学特性についてどのような変化がみられるかの検討を行ったので実際の引張試験の結果とも併せて、比較検討を行いたい。

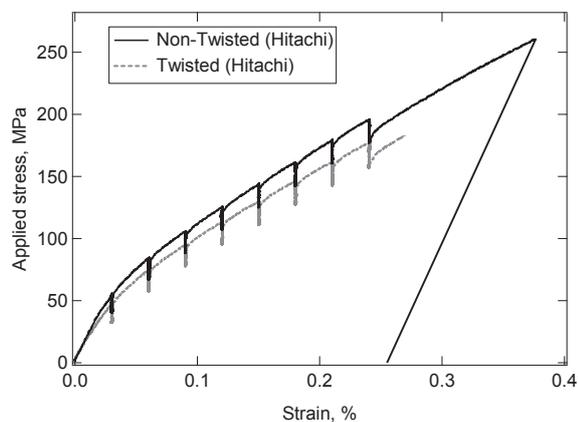


Fig. 1 Stress-strain curve

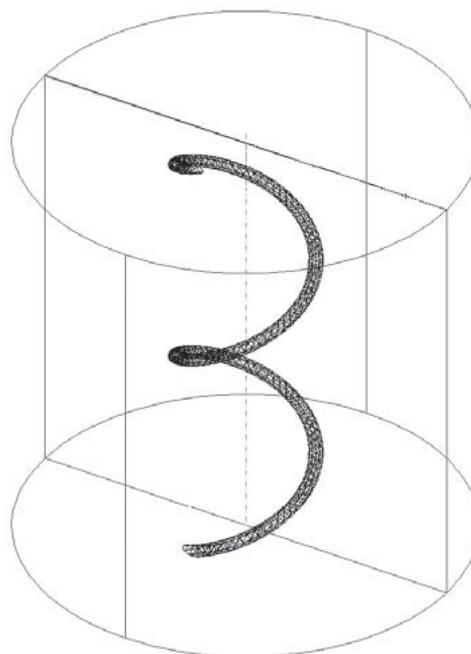


Fig. 2 The twisted model

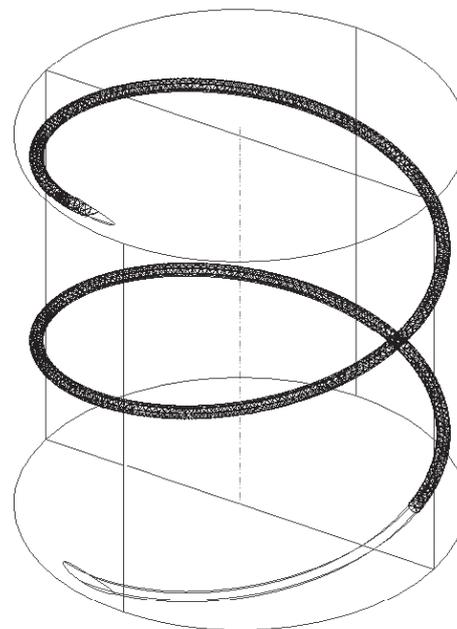


Fig. 3 The twisted model

#### 3. 参考文献

省略

# パルス中性子を用いた RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 線材の常温での引張ひずみ特性

## Tensile strain characteristics of the RHQ-Nb<sub>3</sub>Al wire at room temperature using the pulsed neutron beam

金 新哲, 中本 建志, 土屋 清澄, 山本 明, 荻津 透, 菅野 未知央(KEK);  
 ハルヨ ステファヌス, 阿部 淳, ゴン ウー, 岩橋 孝明(JAEA); 菊池 章弘, 竹内 孝夫(NIMS)  
 Xinzhe Jin, Tatsushi Nakamoto, Kiyosumi Tsuchiya, Akira Yamamoto, Toru Ogitsu, Michinaka Sugano (KEK);  
 Stefanus Harjo, Abe Jun, Gong Wu, Takaaki Iwahashi (JAEA); Akihiro Kikuthi, Takao Takeuchi (NIMS)  
 E-mail: shintetsu.kin@kek.jp

### 1. はじめに

高磁場超伝導磁石のために開発されている RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 線材は、臨界電流が応力ひずみに依存性を示していることが知られている[1]。そのため応用に向けては、機械特性に関するより深い知見を得ることが求められている。本研究は、J-PARC 内 MLF の BL19「匠」のパルス中性子ビームを利用して、常温で素線の長手方向の引張応力を印加しながらひずみ測定を行ったので報告する。

### 2. 試料測定

試料は、内部マトリックスの材料がすべて Ta となる RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 素線である。Fig. 1 に、素線の断面構造を示した。

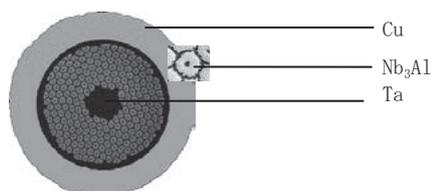


Fig. 1 Cross section of sample.  
The matrix material is Ta.

Table 1 Specification of sample

Diameter (mm)	1
Cu/non-Cu	1
Matrix material	Ta
Nb <sub>3</sub> Al filaments diameter (mm)	0.4
Nb <sub>3</sub> Al Filaments number	222

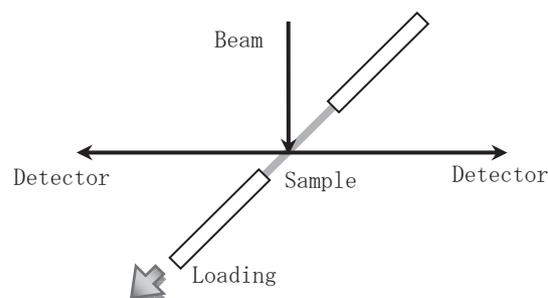
試料は Fig. 2 (a)の平面図に示したように、常温引張試験機で軸方向に引っ張りながら測定を行った。引張試験機は入射ビームから 45° の角度をなしており、二つの検出器から素線の軸方向と横方向で同時に回折パターンを得ている。Fig. 2 (b)は、測定イメージの正面図であり、点線はビーム回折の範囲を示す。歪みゲージは伸び計の外部に、軸方向と横方向それぞれ 2 枚ずつ張り付けた。

### 3. 測定結果及び解析

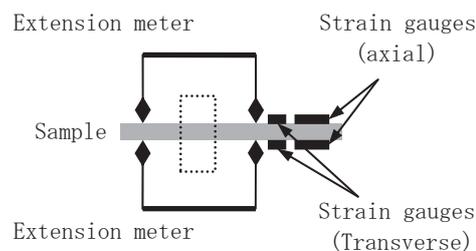
Fig. 3 に、試料の軸方向に 28N と 10N の引張力を印加したときのシングルピーク解析結果を示した。この結果から、引張応力の違いが 18N 以上で、ピーク位置の違いが観察できることがわかる。その他の結果については学会当日に報告する。

### 4. まとめ

マトリックス材料がすべて Ta となる、RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 素線の軸方向引張応力ひずみによる中性子回折測定を行った。解析結果では、素線引張における内部 Nb<sub>3</sub>Al フィラメントのひずみが観察されている。



(a)



(b)

Fig. 2 Schematic illustration of neutron diffraction measurement with loading of the sample.

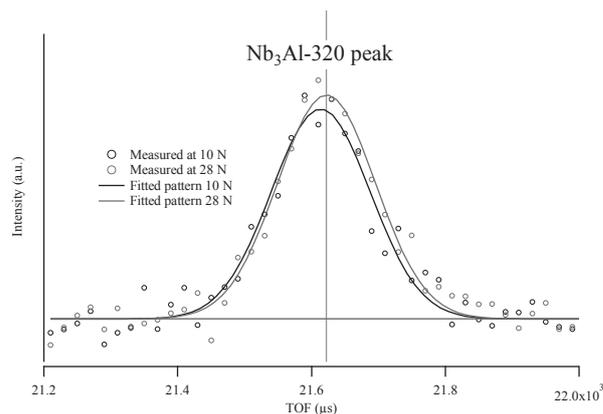


Fig. 3 Neutron diffraction patterns and their analysis in axial direction.

### 5. 今後の予定

RHQ-Nb<sub>3</sub>Al 線材の極低温における引張ひずみ測定を行う予定である。

### 参考文献

[1] X. Jin, *et al.*: Cryogenics, “Tensile Strain Dependence of Critical Current of RHQ-Nb<sub>3</sub>Al Wires”, (2012) in press.

# 高 Ga 濃度 $\text{TiGa}_3$ 化合物を用いて作製した $\text{V}_3\text{Ga}$ 超伝導線材の組織観察及び方位関係

## Microstructure and orientation relationship of $\text{V}_3\text{Ga}$ superconducting wire using high Ga content $\text{TiGa}_3$ compound

村上 聡(富山大・院生); 松田 健二, 西村 克彦, 川畑 常真, 砂田 聡(富山大);  
菱沼 良光(NIFS); 池野 進(職業能力開発大学校)

MURAKAMI Satoshi, MATSUDA Kenji, NISHIMURA Katsuhiko, KAWABATA Tokimasa, SUNADA Satoshi (Toyama University);  
HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); IKENO Susumu(Hokuriku Polytechnic College)

E-mail: ikenolab@eng.u-toyama.ac.jp

### 1. 諸言

現在の核融合装置は重水素とトリチウムの核融合反応を磁場による閉じ込めを行う核融合炉が前提となっており、真空容器内では核燃焼プラズマとともに高エネルギー中性子が必ず生成する。この中性子が各種ポートから透過や漏洩し、超伝導マグネットを放射化してしまう[1]。そのためこれらの材料は低放射化材料であることが望まれる。我々は Nb 金属よりも遥かに短い半減期を有している V 基化合物超伝導線材の中でも高磁界特性に実績を有する  $\text{V}_3\text{Ga}$  化合物に注目している[2]。今回、相変態過程を解明することを目的に高 Ga 濃度 Ti-Ga 化合物と V 金属母材を用いたパウダーインチューブ法で作製した超伝導線材の  $\text{V}_3\text{Ga}$  超伝導相の同定と結晶の形態、またコア/反応相/V 母相の界面の組織、各相間の方位関係を調査したので報告する。

### 2. 実験方法

Ti-Ga 化合物粉末は Ar 雰囲気中でタンマン溶解し、インゴットを作製し、それらを粉砕することで得られた。粉砕後、化合物粉末を V 管(外径 10mm、内径 6mm)に充填し、直径 1mm まで線引きし、単芯線材を作製した。これらの工程で良好な加工性を示し、断線なく加工が終了した。作製した単芯線材を 800°C で 20 時間 Ar 気流中で熱処理し、 $\text{V}_3\text{Ga}$  超伝導層を生成した。作製した単芯  $\text{TiGa}_3/\text{V}$  の組織観察用の試料は走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察は線材を U アロイに埋め込み、耐水研磨紙で 2000 目まで研磨後、3 $\mu\text{m}$  のアルミナ粒子を用いてバフ研磨を行い、表面を鏡面処理して作製し、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察は SEM 観察に用いた試料から日立製 FB-2100 集束イオンビーム加工装置 (FIB) を用いて作製した。観察には SEM は日立製 S-3500H、TEM はトプコン製 EM-002B を用いた。

### 3. 実験結果

Fig.1 は  $\text{TiGa}_3/\text{V}$  線材の熱処理後の断面 SEM 像である。左上の図は全形を示しており、赤枠部分を詳細に観察したものが下図となっており、TiGa コアと二つのコントラストから成る反応相と V 母相が観察された。二つの反応相を SEM-EDS 組成分析を行ったところ、白コントラストの部分が V:Ga=6:5、黒コントラストの部分が V:Ga=3:1 となり、化学量論組成の  $\text{V}_6\text{Ga}_5$  相、 $\text{V}_3\text{Ga}$  相が生成していると考えられた。

次に  $\text{V}_3\text{Ga}$  相から V 母相までを FIB (収束イオンビーム) によって TEM サンプルを作製し、TEM 観察により構造解析を行った。TEM 観察により得られた明視野像を Fig. 2(a) に示す。図中に示した点線は V 母相と  $\text{V}_3\text{Ga}$  相の界面である。 $\text{V}_3\text{Ga}$  相と V 母相の界面から得られた制限視野回折図形を Fig. 2(b) に示す。この回折図形は  $[113]\text{V}$ 、 $[122]\text{V}_3\text{Ga}$  として指数付けすることができた。また、メインスポットの真上に V の  $(1\bar{1}0)$  と  $\text{V}_3\text{Ga}$  の  $(201)$  のスポットが重なるところが見られた。以上の結果から  $[113]\text{V} // [122]\text{V}_3\text{Ga}$ 、 $(1\bar{1}0)\text{V} // (201)\text{V}_3\text{Ga}$  の結晶学的方位

関係を導くことができた。

$\text{V}_3\text{Ga}$  と  $\text{V}_6\text{Ga}_5$  間の TEM 観察結果及び結晶学的方位関係は当日報告する。

### 参考文献

- [1] T. Noda, T. Takeuchi and M. Fujita: Journal of Nuclear Materials 329-333 Part. 2 (2004) 1590  
[2] Y. Hishinuma, A. Kikuchi, Y. Iijima, T. Takeuchi, A. Nishimura: J. Japan Inst. Metals, Vol.71 (2007) pp.959 - 965

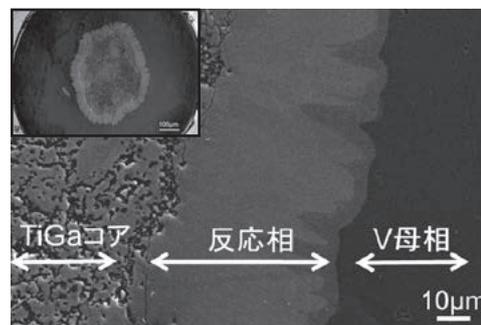


Fig.1 SEM image of cross section of  $\text{TiGa}_3/\text{V}$  wire

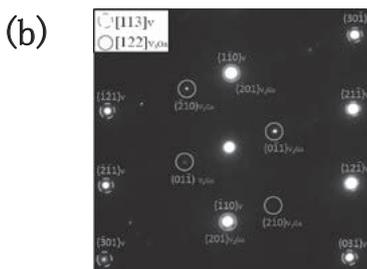
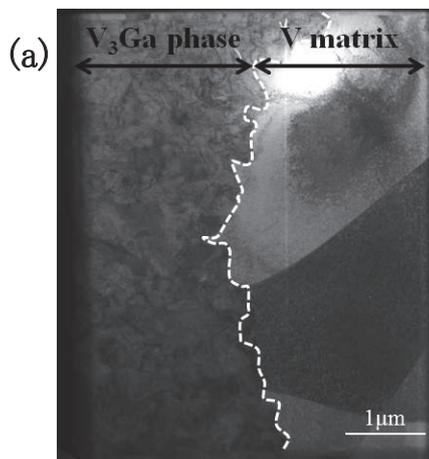


Fig. 2(a) TEM bright field image and (b) SAED pattern of  $\text{V}_3\text{Ga}$  phase/V matrix

## 長距離 HTS ケーブルにおける伝熱・流体特性の数値計算

## Numerical analysis of heat transfer and fluid characteristics in long distance HTS cable

丸山 修, 大熊 武, 和泉 輝郎 (ISTEC-SRL)

Osamu Maruyama, Takeshi Okuma and Teruo Izumi (ISTEC-SRL)

E-mail: maruyama.osm@istec.or.jp

## 1. はじめに

Y 系超電導線材を使用した高温超電導ケーブルはコンパクトなサイズにて大容量かつ低損失な送電が可能である。数百 m 以上の送電ケーブルを想定した場合、内部の超電導導体を液体窒素流体により安定かつ効率的に超電導状態に維持する冷却技術が必須となる。本稿では Y 系電力機器技術開発 PJ にて開発が進められている 275 kV ケーブル設計[1]を参考とし、ケーブル内に流れる液体窒素の圧力損失を含めた流体特性、外部からの侵入熱、交流損失及び誘電損失による発熱に対する冷却特性の計算結果について報告する。

## 2. モデル設計

ケーブルの設計緒元を Table. 1 に示す。実運用上では断熱管はコルゲート管を使用し、ケーブルコアの位置は偏心される設計を想定しているが、これらの構造の影響を除いたケーブルの基本的な冷却特性を把握するため、計算対象モデルを Fig. 1 の通り、断熱管をストレート管、ケーブルコアは断熱管の中心に位置する構造とした。発熱については外部からの侵入熱 1 W/m に加え、超電導導体層、絶縁層および超電導シールド層は一体かつ一様発熱(0.8W/m)とし、シールド層、銅フォーマの熱伝導特性及び液体窒素との熱伝達特性については、等価熱抵抗として評価した。

## 3. 計算方法

ケーブル内に流れる液体窒素の総流量  $W$  は、内外流路に配分される流量との関係  $W = W_1 + W_2$  (内側流量:  $W_1$ 、外側流量:  $W_2$ ) を満たすものとし、式(1)のとおり内外流路の圧力勾配 ( $\Delta P/\Delta L$ ) が等しくなる条件にて、流量配分  $W_1, W_2$  を求める式(2)を導出した。なお、式(1)における管摩擦係数  $f$  は Prandtl-karman の式を用いて算出した。

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = f_1 \times \frac{2}{d_{h1}} \times \frac{1}{2} \rho v_1^2 = f_2 \times \frac{2}{d_{h2}} \times \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1)$$

$$W_1 = A_1 v_1 = \frac{C}{1+C} W \quad (C^2 = \frac{f_2 d_{h1} A_1^2}{f_1 d_{h2} A_2^2}) \quad (2)$$

$d_h$ : 水力等価直径,  $A$ : 流路断面積を示す。(変数・定数の下付き数字 1, 2 は、1: 内側流路, 2: 外側流路を示す。)

内外流路における液体窒素とケーブルコア間の熱伝達係数は、各流路の Re 数・Pr 数を用いて、内側流路では平滑円環の経験式である Petukov の式から、外側流路では環状流路内の乱流の経験式である Dalle-Donne の式から与えられる Nu 数により算出した。求めた熱伝達係数と各層の熱抵抗により熱流束  $Q_{b,i,0}$  (Fig. 1 参照) を求め、式(3)により単位長さあたりの内外流路の温度勾配 ( $\Delta T_{1,2}/\Delta L$ ) を算出した。

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta L} = \frac{Q_i}{\rho C_p W_1}, \quad \frac{\Delta T_2}{\Delta L} = \frac{Q_o + Q_b}{\rho C_p W_2} \quad (3)$$

( $C_p$ : 液体窒素-比熱,  $\rho$ : 液体窒素-密度)

以上のように導出された圧力勾配(式 1)および温度勾配(式 3)を用いて、液体窒素の温度が 65 K から 77 K に増加するまでの距離および圧力が 1.0 MPa から 0.2 MPa に減少するまでの距離を、液体窒素の総流量  $W$  をパラメータとして算出した。

## 4. 計算結果

上述の通り、流量とケーブル冷却距離の関係について算出した結果を Fig. 2 に示す。内外流路の冷却距離はほぼ一

致しており、内外流路の温度差の影響は殆どないことが分かる。また、温度勾配は流量に反比例するため(式 1 参照)、流量増加に伴い温度面における冷却距離は線形に増加するが、圧力勾配は二次関数的に増加するため液体窒素の圧送距離は大きく減少する(式 3 参照)。今回の設計では温度および圧力に関する冷却特性が交差する流量 32 litre/min の条件にて冷却距離が最大(約 6000 m)となること分かる。

## 5. まとめ

ケーブル設計を単純化したモデルでは内外流路に温度差はほとんど見られなかった。また、流量をパラメータとして、流量に対する温度特性および圧力特性を求めることでケーブル冷却距離を最大にするための最適な流量値(32 litre/min)を求めることができた。なお、実設計に沿った詳細な冷却特性を求めするため、ケーブルコアの偏心やコルゲート管の使用を考慮した場合、流体(圧力損失、流速、熱伝達等)機構が異なる可能性がある。これらの影響は現在解析中である。

## 6. 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研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

TABLE.1 CABLE DESIGN SPECIFICATIONS

Construction	Diameter(mm)	
Inner pipe	LN <sub>2</sub> flow	14
Former	Cu stranded hollow 400mm <sup>2</sup>	30.6
HTS conductor	2 layers YBCO tape	34
Insulator	PPLP 22- mm thick	79.4
HTS shield	1 layer YBCO tape	80
Cu shield	3 layers Cu tape 310m <sup>2</sup>	85
Outer pipe	LN <sub>2</sub> flow	98.5

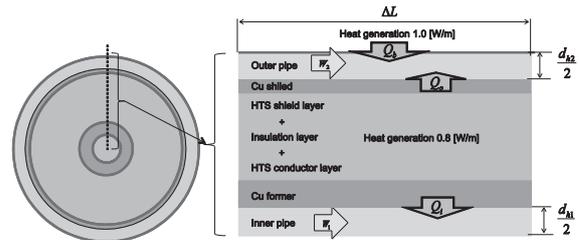
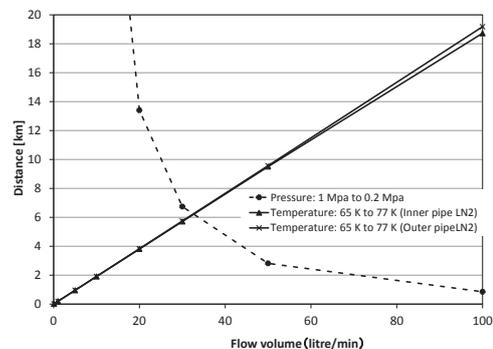


Fig. 1 Model for analysis

Fig.2 Distance of cable cooling by LN<sub>2</sub> volume flow

## [参考文献]

1. T.Nomura, et al. Abstract of CSJ Conference, vol. 84 p.193 (2011)

# 超電導特性の不均一分布を想定した YBCO 超電導ケーブルの通電・伝熱特性解析

Numerical analyses on electro-thermal characteristics of YBCO superconducting cable assumed non-uniform superconducting characteristics

王 旭東, 石山 敦士(早大); 大屋 正義(住友電工); 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)  
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); OHYA Masayoshi (Sumitomo Electric Industries);  
 MARUYAMA Osamu, OKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)  
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

## 1. はじめに

66 kV 級 YBCO 超電導ケーブルは、定常時に 5 kA<sub>rms</sub> の送電が要求される[1]。実用化の際に、仮に線材に欠陥があり特性が不均一に分布すると、定常時に電流分布が不均一となり偏流の可能性がある。また欠陥が局所であると発生する抵抗性電圧がケーブル内の誘導性電圧よりもはるかに小さいため、電流偏流が生じず劣化箇所での発熱によりケーブルの熱暴走・焼損に至る可能性がある。そのため、YBCO 超電導ケーブルの実用化を目指すには、長尺のケーブル導体に対して、超電導特性の不均一分布に起因する偏流特性および局所劣化を想定した伝熱特性の評価が重要となる。今回は、1 km のケーブル長に対して 1 層の超電導層をモデル化し、欠陥の程度と範囲が偏流特性に及ぼす影響を解析評価した。また、電流分布から発熱量を算出し、ケーブル導体をモデル化した伝熱特性も解析評価したので報告する。

## 2. 数値解析手法

解析パラメータを Table 1 に示す。66 kV 級 YBCO 超電導ケーブルは、HTS 導体層が 4 層で構成される構造となるが、今回は 1 層(15 本の線材)をモデル化し、1 km のケーブル長に対して超電導特性欠陥に起因する電流分布と伝熱特性を解析評価した。通電解析において、運転電流は 5 kA<sub>rms</sub> に対して 1 層分の 1.25 kA<sub>rms</sub> とした。1 層(線材 15 本)の中で 1 枚の線材(Tape 1)だけに欠陥を設定し、全欠陥の合計長さを 1 mm-1 km としてパラメータ化した。また線材  $I_c$  は健全部で 240 A とし、欠陥部を 120-0 A(健全部の 50-0%)までとしてパラメータ化した。またケーブル長手方向の両端がそれぞれ等電位面として、素線電流の合計が通電電流となるように設定した。伝熱解析は、初期運転温度を 64 K として、負荷率の関数として AC-Loss を考慮した。ケーブル最外層の表面が液体窒素に接しているとして熱伝達境界を設定し、ケーブル長手方向の両端面は断熱境界とした。通電・伝熱解析は、式(1, 2)を用いた回路モデルと 3 次元有限要素法を組み合わせで行った。 $R_i$  は欠陥部分の常電導抵抗、 $M_{ij}$  は素線の自己および相合インダクタンス、 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱容量、 $k$  は熱伝導率、 $Q_j$  はジュール発熱である。

$$[R_i]\{i\} + [M_{ij}] \frac{d}{dt} \{i\} = \{V\} \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \quad (2)$$

## 3. 結果とまとめ

欠陥線材 Tape 1 に流れる電流の peak 値と欠陥の合計長の関係を図 1 に、その際の 1 サイクル平均発熱を図 2 に示す。Fig. 1 より、欠陥の合計長が大きくなるにつれて抵抗成分も大きくなるため、偏流が起こり、電流は欠陥  $I_c$  に収束する。しかしながら、欠陥の合計長が全体の 0.1% (1 m) 以下では  $I_c$  が 0 A であってもほとんど欠陥線材から転流が生じず、欠陥部で発熱が発生し続けることになる。Fig. 2 より、欠陥  $I_c$  が小さいほど発熱が大きくなり、欠陥の合計長が全体の 2-6% (20-60 m) で発熱が最大となる。欠陥長が 1, 10, 100 mm (発

熱が約 0.02, 0.2, 2 W) に対して通電・伝熱連成解析を行い、その温度上昇の結果および欠陥長が 10 mm での欠陥断面(円周方向と長手方向)の温度分布を Fig. 3 に示す。欠陥が 100 mm 長の場合に熱暴走が発生し、局所的に発熱が集中する結果となった。

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 Parameters of numerical simulation

Operating current	1.25 kA <sub>rms</sub> (5 kA <sub>rms</sub> /4 layers) 83 A <sub>rms</sub> (118 A peak) per tape
Operating temperature	64 K
HTS conductor	1 layer, 4 mm wide/tape
Initial $I_c$	240 A/tape, 3.6 kA/layer (load factor: 0.49)
Degraded tape	Tape 1 (Tape 2-15: no defect)
$I_c$ defect	120, 96, 72, 48, 24, 0 A
Defect length	1 mm - 1 km
AC-Loss	Function of load factor Ex. 1.6 W/m at 0.49

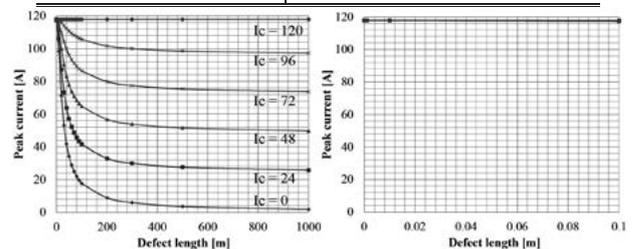


Fig. 1 Peak current vs. defect length of Tape 1

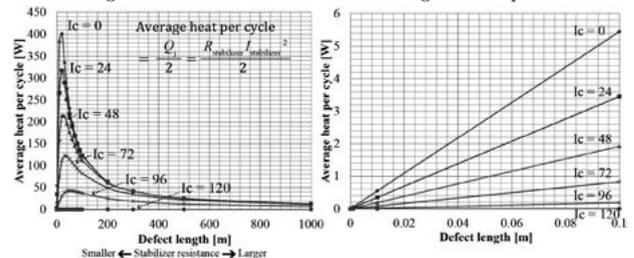


Fig. 2 Average heat per cycle vs. defect length of Tape 1

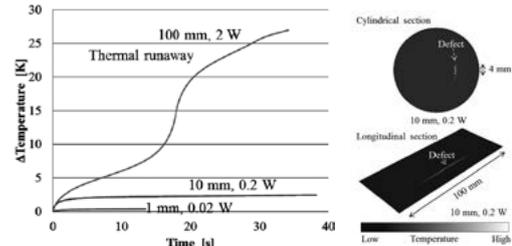


Fig. 3 Temperature results (defect: 1, 10, 100 mm)

## 参考文献

1. M. Ohya, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, (2011) pp.1009-1012

# Model of DC HTS cable with effect of increasing critical current under longitudinal magnetic field

V. S. Vyatkin, E. S. Otabe, J.Wada, K. Tanabe, M. Kiuchi, T. Matsushita  
Kyushu Institute of Technology  
E-mail: vyatkin@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

## 1. Introduction

It is known that critical current density increases in the longitudinal magnetic field for low temperature superconducting tapes and wires [1]. Increase of critical current vs. external magnetic field takes place because the magnetic field and current create the force-free configuration during longitudinal magnetic field. In present stage, it was found that critical current density of HTS tape increases in angular dependence but decreases in field dependence. In this study, the model of multilayer cable with different angle between tape direction and axis of the cable is proposed using the experimental data about angular and field dependence of critical current in HTS tape.

## 2. Model

To use the longitudinal magnetic field effect of increasing critical current in the superconducting cable, the construction of cable is proposed as shown in Fig.1 [2].

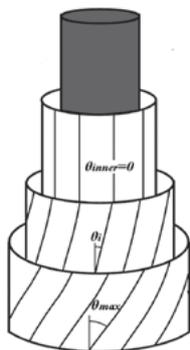


Fig.1. The construction of multilayer cable. Inner layer ( $i=0$ ) is parallel to the cable axis. Most outer layer ( $i=N$ ) has maximal inclination  $\theta_{max}$ . Intermediate layers angle distributed linearly from inner layer ( $\theta_0=0^\circ$ ) to outer layer ( $\theta_N=\theta_{max}$ ) ( $\theta_i = i \theta_{max} / N$ ). The calculation performed for  $\theta_{max}$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  to find the optimal construction of the cable.

Each layer creates the magnetic field acting to the inner layers and outer layers. The critical current determines according the dependence (fig.2) of critical current density vs. angle between tape direction and local magnetic field. This dependence measured for short YBCO HTS samples and used for calculation of critical current of the cable.

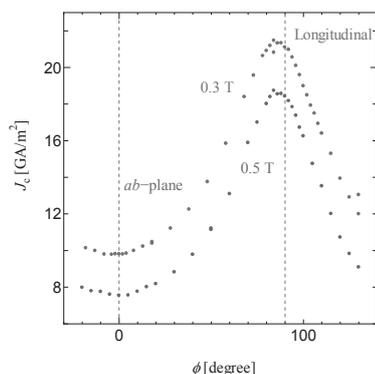


Fig. 2. The angular dependence of critical current density of HTS tape.  $0^\circ$  corresponds to  $J \perp B_{ext}$  (field in ab-plane of the sample).  $90^\circ$  corresponds to  $J \parallel B_{ext}$ .

To found the critical current of the cable it was composed

the system of equation, based on the dependence of critical current density ( $J$ ) of superconducting tape in  $i$ -th layer ( $i=0..N$ ) vs. magnetic field ( $B_i$ ) acting to the tape and angle ( $\phi_i$ ) between tape direction and magnetic field. To build the function  $f(B, \phi)$  it was used known angular dependences for  $B=0.3T$  and  $0.5T$  (from fig.2) and linear field extrapolation for other fields.

$$J_i(B_i, \phi_i) = f(B_i, \phi_i) = f(J_0, \dots, J_N) \\ i = 0 \dots N$$

## 3. Result

The equations were solved by the iteration method. It was calculated the dependences of the total critical current vs. angle between the cable axis and outer tape direction.

It is confirmed that this construction of the cable have the maximum of the total critical current of the cable vs. angle  $\theta_{max}$  (vs. construction of the cable) even under zero external magnetic field as shown in Fig. 3.

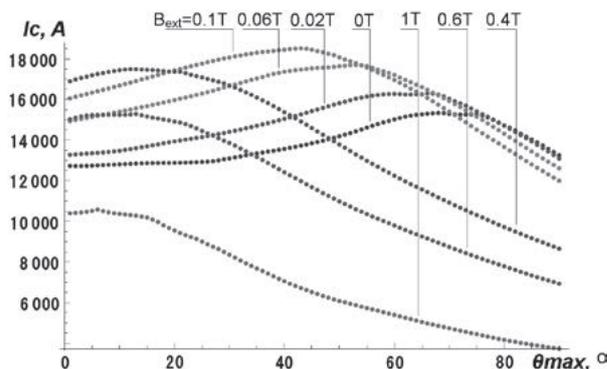


Fig. 3 . The dependences of critical current of superconducting cable vs. configuration of cable (angle  $\theta_{max}$  of the most outer superconducting tape) for different external magnetic field (0T, 0.02T, 0.06T, 0.1T, 0.4T, 0.6T, 1T).

## 4. Conclusion

The calculation of critical current of the longitudinal magnetic field effect was performed for the superconducting cable using real angular and field dependences of critical current density for the superconducting tape. While the critical current density have no maximum (only maximum in angular dependence) as a function of the external magnetic field, it was obtained that the critical current of the cable increases and weak external magnetic field lead to the further increasing of critical current of the cable with longitudinal magnetic field effect comparing with conventional cable.

### References:

- [1] Bychikov Yu F, et al., JETP Lett. 9 (1969)404.
- [2] Matsushita, T., "Flux Pinning in Superconductors" Springer 2007.

## 鉄道用 10 kA 級超電導ケーブルの開発

### Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway system

富田 優, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 鈴木 賢次(鉄道総研)

TOMITA Masaru, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji (RTRI)

E-mail: tomita@rtri.or.jp

#### 1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導ケーブルの開発を行っている<sup>1)</sup>。超電導ケーブルを現行の鉄道電力システムへ適用する場合、直流遮断器によって接続されるため、臨界電流値の設定は、直流遮断器の定格動作電流値を超える電流値としなければならない。この直流遮断器の定格動作電流値は現状 1~12 kA であり、導入線区によって異なるため、線区に応じた設計が必要となる。都心部の路線においては現状 10 kA 級の遮断機を用いている<sup>2)</sup>。

今回、実路線にも適用可能な 10 kA の臨界電流値を有する超電導ケーブルを設計、製作したので報告する。

#### 2. 構造

Table.1 に製作した超電導ケーブルの仕様を、Fig.1 に内部構造を示す。超電導ケーブルの冷却方式を見かけ上 1 本で循環できる構造とするため、フォーマを空芯とすることで冷媒経路とした。冷媒の圧力損失を考慮すると  $\phi 30$  mm 程度の内径が必要となるため、内径  $\phi 31$  mm、外径  $\phi 35$  mm の空芯アルミ材とし、熱収縮吸収のためフォーマ上に PPLP 層を設けた。また、各超電導層に過電流保護のため銅材を  $70 \text{ mm}^2$  以上隣接させる<sup>3)</sup>と、P 層の内径は  $\phi 41$  mm 程度となる。この場合、超電導線材は 2 層巻で 53 本巻線することができ、1 本あたりの臨界電流値を 190 A とすると、10070 A となり 10 kA の臨界電流値を満足する。P 層と N 層間には絶縁層を設け、N 層は 2 層巻とし、超電導線材を 61 本巻線した。

#### 3. 通電試験

鉄道用超電導ケーブルを液体窒素浸漬冷却し、P 層および N 層それぞれに通電し、電流-電圧特性を測定した。測定結果を Fig.3 に示す。P 層、N 層それぞれで 10 kA を超える臨界電流値を確認した。P 層の 1 本あたりの臨界電流値は 191 A となり、巻線や磁場の影響による臨界電流値の低下はなく、設計通り巻線できていることを確認した。

#### 謝辞

本研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて行った。

#### 参考文献

1. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki: Abstracts of CSJ Conference, Vol81 (2009) p.95
2. 林屋 均, 鉄道と電気技術, Vol22 (2011) p.54
3. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki, A. Ishihara, M. Miryala: Abstracts of CSJ Conference, Vol84 (2010) p.138

Table.1 Design of 10kA HTS cable

wire	DI-BSCCO Type-HT(CA50)
HTS layer	Positive Layer :2 Layer / 53 tapes Negative Layer :2 Layer / 61 tapes
Ic	DC10000A@77K
voltage	1500V

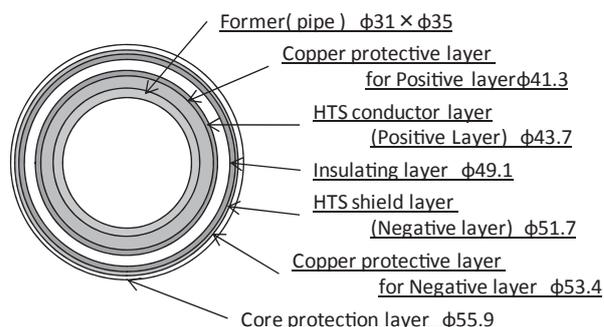


Fig.1 Schematic of HTS cable for railway



Fig.2 Photograph of HTS cable for railway

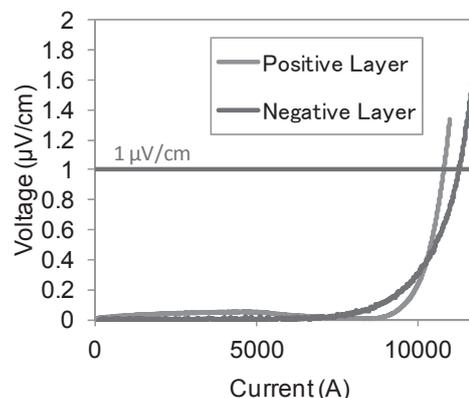


Fig.3 I-V curve for 10kA HTS cable

# 太陽光発電システムを使った鉄道用超電導ケーブルの通電試験

## Current measurement of the superconducting cable for railway systems using solar power

富田 優, 小林 祐介, 鈴木 賢次 (鉄道総研)

TOMITA Masaru, KOBAYASHI Yusuke, SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute)

E-mail: tomita@rtri.or.jp

### 1. はじめに

鉄道総研では、鉄道き電系に使用するための直流超電導ケーブルの開発を進めている[1]。また、太陽光発電技術のシステム効率の評価を目的として、研究所構内に、50 kW 級の太陽光発電システムを設置し、現在試験運用を実施している。

我々は、自然エネルギーを使った送電システムを想定し、太陽光発電システムと超電導ケーブルを接続させ、交直変換のない直流送電の試行実験を行った。

鉄道の直流電化区間などへの接続等、周辺技術の開発が必要であるが、交直変換のロスカットや電圧降下の抑制が期待され、将来の一つの送電形態として期待できる。

### 2. 仕様

超電導ケーブルは、Fig.1 に示すよう、全長 9 m(超電導部 6 m)で、両端には電流供給用の 2 本の銅のリードが備えてある。銅のリードと超電導線材が接続されており、ケーブル内は液体窒素によって冷却される。

Table.1 に、超電導ケーブルの仕様を示す。太陽光発電システムの発生する電圧は、インバータ起動時で DC 250 V、インバータ停止時で DC 300 V 程度あるため、この値を直流超電導ケーブルの耐電圧とした。ちなみに、太陽光発電システムのインバータ 5 ユニット中、1 ユニットの日の発電電流は最大 30 A である。

Table.1 specification of DC-superconducting cable

withstand voltage	300 V DC
critical current	more than 150 A (in LN <sub>2</sub> )
wire	Bi-2223
size	4 mm width x 1 mm t
length	6 m
coolant	LN <sub>2</sub>

### 3. 性能試験及び実系統接続試験

超電導ケーブルの断面をFig.2に示す。耐電圧試験は、室温と液体窒素温度 77 K の条件で、p 層と端末容器間、n 層と端末容器間、p 層と n 層間、のそれぞれを行った。臨界電流測定は、液体窒素温度 77 K の条件で、電圧基準である 1 μV/cm 以下で行った。LN<sub>2</sub>保持時間は、ケーブル近傍の左右中央の 3 点に温度計を配置し、すべての点で 77 K を保持できている時間を測定した。以上の性能試験の結果を Table.2 に示す。

性能試験後、Fig.3 に示すよう、太陽光発電システムに超電導ケーブルを接続した。

実系統に接続した際の通電試験の結果を Fig.4 に示す。ほぼ一定の電圧で、日光の照度に比例して増減しており、最大値も臨界電流以下で通電できていることがわかる。

Table.2 Performance test of DC-superconducting cable

withstand voltage test	more than 320 V DC (RT, 77 K)
critical current test	more than 200 A (in LN <sub>2</sub> )
LN <sub>2</sub> reserving time	4 hours

### 参考文献

[1] M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki: Abstracts of CSJ Conference, Vol81 (2009) p.95

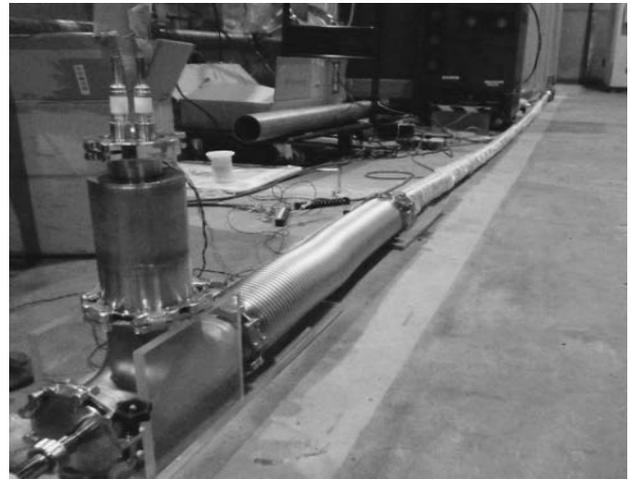


Fig.1 Photograph of prototype DC superconducting cable for photovoltaic power generation

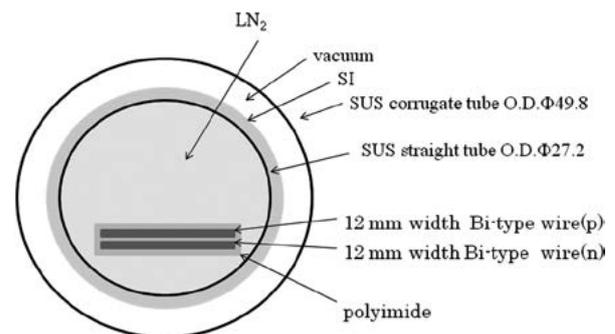


Fig.2 Cross-sectional structure of the superconducting cable

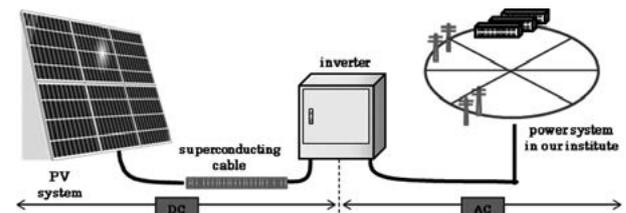


Fig.3 Schematic illustration of photovoltaic power system with our superconducting cable

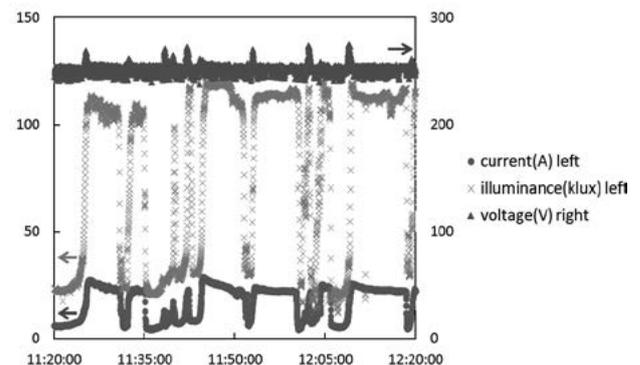


Fig.4 Result of current measurement in the superconducting cable using photovoltaic power generation

# 直流き電鉄道の複線区間への超電導ケーブルの導入効果の検討

## Application of superconducting power cables to double-track DC electric railway systems

松下 通生, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

MATSUSHITA Naoki, OSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: n-matsushita@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. 初めに

現在日本の電気鉄道で広く用いられている直流き電システムには、送り出し電圧が低いことによる送電時の損失、回生失効による回生ブレーキの動作の不確実性、そしてこれらに起因する電力利用効率の低下といった問題がある。これに対し、直流き電システムのき電線と並行に超電導直流ケーブルを導入すると、電力回生率の向上、き電システム内の損失の低減、さらに変電所等の設備数や個々の設備容量の削減等の効果が期待できる。そこで、高温超電導ケーブルを直流き電鉄道へ導入することについて、モデル路線を設定し、消費エネルギー量の得失や諸設備に要求される容量についてシミュレーションに基づく検討を行ってきた[1]。

今回はモデル路線を拡張し、並行して敷設された上り線と下り線、さらにこれらに付随する上下線一括き電方式のき電システムをモデル化した。また路線を走行する電気車は、より現実に即した出力特性を反映したモデル化を行った。そして、この路線に超電導ケーブルを導入するシミュレーションを実施し、それによる省エネ効果や設備容量の削減可能性等に目し、その導入効果の検討を行った。

### 2. モデル化と解析

Fig.1 に解析に使用したモデル路線の概略を示す。路線の全長は26.5km、駅数24、変電所数5(SS1~SS5)としている。上り線と下り線が存在する複線の路線とし、この上下線が1本のき電線、およびそれに並列に敷設された1本の超電導ケーブルを共用する形になっている(上下線一括き電方式)。超電導ケーブルは、5箇所の変電所を結ぶ形で導入した。

路線上を走行する電気車は、より現実に基づいた、速度領域によって出力特性および走行抵抗が変化するモデルとした。この特性を Fig.2 に示す。

この列車の運行間隔は上下線それぞれで5分間隔であり、上り線の列車が1番目の駅を発車すると同時に、下り線の列車が24番目の駅を逆方面に向かって発車するものとした。5分間隔で同一の運行パターンが繰り返されるため、解析はこの5分間について行った。

### 3. 解析結果

超電導ケーブルを導入する前後の、き電システム全体の5分間の変電所入力と回生エネルギー量を Fig.3 に、変電所の最大出力を Fig.4 に示す。超電導ケーブルの導入によって電力回生率が向上し、変電所入力を約16%削減する効果があるという解析結果が得られた。また、変電所の最大出力も30%以上小さくなっており、設備容量の低減効果があると言える。

### 4. まとめ

超電導ケーブルの導入によって、き電システムのエネルギー利用効率の向上や、各種設備の容量削減が見込まれると結果を得られた。

今後はモデル路線について、列車の運行頻度や編成、路線の駅や変電所の構成といったさまざまな条件を変化させ、それぞれに対して超電導ケーブルの導入効果を検討していく。

### 参考文献

1. H. Osaki, et al.: "Application of Superconducting Power Cables to DC Electric Railway Systems," Phys. Procedia, vo. 36 (2012) pp. 908-913

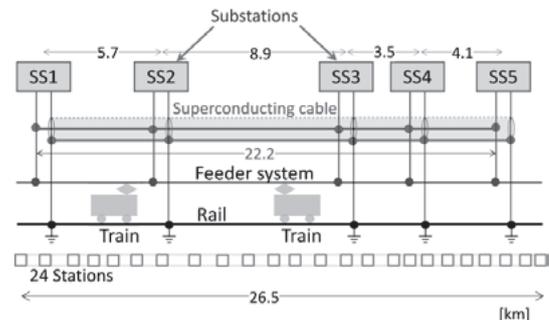


Fig. 1 Analysis model line

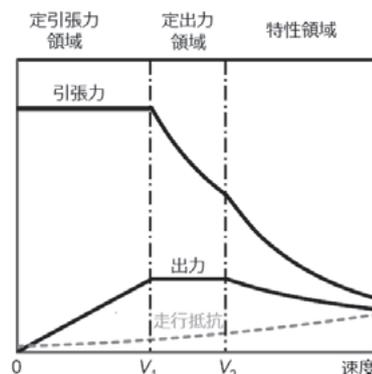


Fig. 2 Tractive force, train power, and train resistance

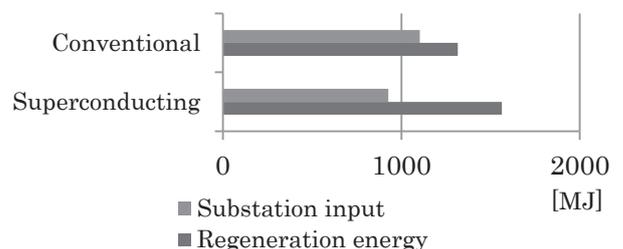


Fig. 3 Energy consumption and regeneration (5-min)

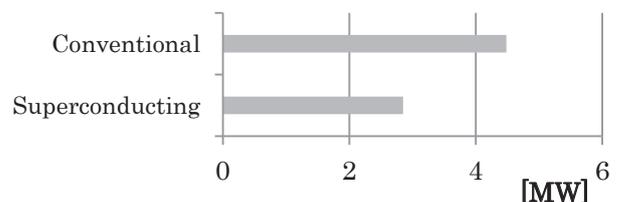


Fig. 4 Maximum substation output

# Bi-2223 小型コイルの交流電損失の周波数特性

## Frequency dependence of transport AC losses in a small-scale Bi-2223 coil

蔵脇 正弘, 柁川 一弘, 岩熊 成卓, 佐藤 誠樹, 船木 和夫(九州大学);  
林 敏広, 加藤 武志, 藤野 剛三(住友電工)

KURAWAKI Masahiro, KAJIKAWA Kazuhiro, IWAKUMA Masataka, SATO Seiki, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.);  
HAYASHI Toshihiro, KATO Takeshi, FUJINO Koso (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);  
E-mail: kurawaki@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

Bi-2223 高温超電導コイルにおける交流電損失の定量的評価手法の検討を行っている。

これまで、ツイストしていない Bi-2223 テープ線を使用した小型ダブルパンケーキコイル(DPC)(8stack, 16stack)を製作し、液体ヘリウム中での低周波数通電時のコイルの通電損失を測定した[1]。また、通電時のコイルの磁界分布に対応するコイル巻線の局所的な外部磁界損失を積算してコイルの通電損失を解析し、実測値との比較を行った[2]。

今回は、ツイストにより損失低減を図った Bi-2223 テープ線を使用した小型 DPC(16stack)について、幅広い周波数領域において液体窒素中で交流電損失を測定し、巻線の局所的な外部磁界損失を用いた解析結果と比較・検討したのでその結果を報告する。

2. コイルの諸元

コイルは 16 個の DPC を重ねた 32 層構成であり、外径、内径、高さはそれぞれ 119 mm, 84 mm, 116 mm である。インダクタンスの実測値は 59 mH、磁界発生率は 8.2 mT/A であり、30 A の通電で中心磁界 246 mT が発生する。コイルの中央部と端部に使用した Bi-2223 テープ線(Wire I, Wire II)の主な諸元を Table 1 に示す。

3. 解析方法

まず、コイル巻線部を要素分割した解析モデルを作成し、コイル巻線部の局所的な磁界について、垂直磁界と平行磁界の各成分に分けて要素ごとに求めた。一方で、垂直磁界と平行磁界に対する巻線線材の短尺試料の交流損失特性をそれぞれ測定し、Fig.1(0.1 Hz)に示すように数式化を行った。周波数ごとの近似式を Table 2 に示す。次に、巻線部の局所磁界の垂直成分あるいは平行成分がそれぞれ単独に巻線に印加された時の交流損失、 $W_{perp}$  と  $W_{para}$  を測定した短尺試料の交流損失特性から求め、次式に示すように、それらの和で巻線部の局所的な磁界に対する交流損失密度を近似した。

$$W(r, z) = W_{perp}[B_{perpm}(r, z)] + W_{para}[B_{param}(r, z)] \quad (1)$$

(1)式で得られる交流損失をコイル全体で積算することによりコイルの通電損失を評価した。ここで、垂直磁界損失については次に述べる近接ターンの効果[3]も考慮する必要がある。

4. 解析結果および考察

垂直磁界損失については、コイル巻線の短尺試料を 6 枚積層したときの実測値にコイルの近接ターンの効果を考慮した補正を行い、(1)式を用いて得られるコイルの通電損失の解析値(黒塗り印)を Fig. 2 に示す。0.1, 1.0, 5.0 Hz の各周波数において、実測[2]の結果(白抜き印)と解析値はよく一致しており、巻線の外部磁界損失を用いた解析によりコイルの交流電損失をある程度定量的に推定できることがわかった。

参考文献

1. K. Nogami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.201
2. T. Yahiro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.261

3. M. Kurawaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.91

Table 1 Bi-2223 テープ線の主な諸元

Parameters	Wire I	Wire II
Width	2.8 mm	2.8 mm
Thickness	0.25 mm	0.25 mm
Number of filaments	55	55
Twist pitch	8.0 mm	8.0
$I_c$ at 77 K and s.f.	64 A	70 A

Table 2 交流損失の近似式のパラメータ

$$W_{perp} = a B_{perpm}^b \text{ (Wire II)}$$

Hz	Range for $B_{perpm}$	a	b
0.1	< 19 mT / 19 mT <	$3.0 \times 10^8 / 2.6 \times 10^6$	3.2 / 0.86
1.0	< 23 mT / 23 mT <	$8.3 \times 10^7 / 1.5 \times 10^5$	2.9 / 1.3
5.0	< 38 mT / 38 mT <	$4.2 \times 10^7 / 2.3 \times 10^5$	2.8 / 1.2

$$W_{para} = a B_{param}^b \text{ (Wire I)}$$

Hz	Range for $B_{param}$	a	b
0.1	< 15 mT / 15 mT <	$9.4 \times 10^6 / 3.3 \times 10^3$	2.9 / 1.0
1.0	< 15 mT / 15 mT <	$1.0 \times 10^6 / 6.1 \times 10^3$	2.4 / 1.2
5.0	< 15 mT / 15 mT <	$6.5 \times 10^5 / 7.6 \times 10^3$	2.3 / 1.2

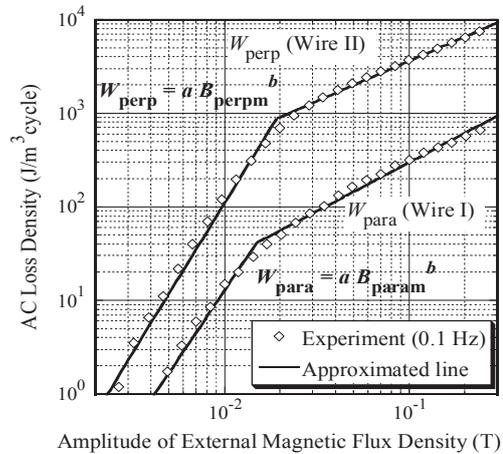


Fig.1 短尺試料の交流損失特性の数式化

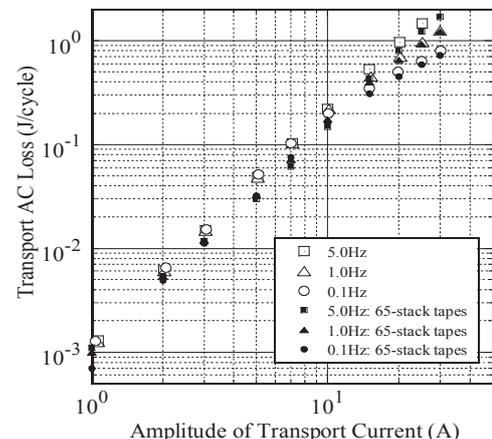


Fig.2 コイル通電損失の実験値と解析値の比較

## 2層にわたる超伝導2本転位並列導体の交流損失特性

AC loss properties of superconducting 2-strand parallel conductors wound into 2-layer.

坂川 涼, 熊野 圭恭, 岩熊 成卓, 船木 和夫 (九大); 林 秀美, 岡元 洋, 五所 嘉弘 (九電);  
田子森 秋彦, 大熊 武, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC)

SAKAGAWA Ryo, KUMANO Keisuke, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu-Univ.);  
HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi, GOSHO Yoshihiro (Kyushu Electric Power CO.);  
TAGOMORI Akihiko, OHKUMA Takeshi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

sakagawa@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は大電流容量化を目指す酸化超伝導体の構成法として、素線を並列に並べ、巻き線途中で転位(Fig.1)を施す方法を提案している。本研究はこの転位並列導体をコイル状にし、不均一な外部磁界を印加した場合に発生する付加的交流損失を定量的に明らかにすることを目的としている。コイルでは、2本導体端部ははんだ付けされる。今回は、巻線工程において転位位置がコイル中央からずれた場合の2層2本転位並列導体について解析を行った。

### 2. 並列導体の付加的交流損失について

Fig.2は2本転位並列導体を1層に巻いた際に、転位位置が最適転位位置である中央から $\Delta l$ だけずれたコイルの概略図である。解析の際には2層のコイルを対象とし、2層目でも同様に転位位置のずれが発生したモデルを想定している。Fig.3は想定した導体に印加される磁界分布のグラフである。コイルの真ん中の位置での磁界振幅を最大値  $B_m$ 、コイルの端部に近づくにつれ磁界振幅が小さくなるように定義した。このように転位位置のずれがあると転位の左右で鎖交磁束の差が生じ、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。その遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない場合の、非飽和条件下の付加的交流損失の式は次式で表される。

$$W = \frac{1}{k'} \frac{\pi \omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \frac{1}{2N^2 \mu_0 d_s w} \left( \frac{\Phi_{B(x)}}{L} \right)^2$$

一方、遮蔽電流が臨界電流値に達する場合である飽和条件下における交流損失は次式で表される。

$$W = \frac{2I_c d_s}{N^2 u w} \left( \frac{\Phi_{B(x)}}{d_s L} - \mu_0 \frac{k'}{u} I_c \right)$$

$k'$ : 幾何学定数       $N$ : コイルの全巻き数  
 $\Phi_{B(x)}$ : 左右の鎖交磁束の差

### 3. 考察

今回1層あたり100巻きの2層コイルにおいて、転位位置がずれた場合を想定した。1層目は最適転位位置から見て右側10巻き目( $\Delta l_1/w=10$ )に転位位置を固定し、2層目の転位位置を変化させて解析を行った。Fig.4は転位位置から見て右側の転位位置を20巻き目( $\Delta l_2/w=20$ )にしたときの付加的交流損失の外部磁界振幅  $B_m$  依存性の解析結果である。Fig.4において、付加的交流損失が急激に大きくなっているところがあるが、ここが非飽和状態から飽和状態への遷移点である。

解析の結果、右側の転位位置がどの場合でも、外部磁界振幅  $B_m$  が大きくなるほど付加的交流損失は大きくなることがわかった。また、2層目の転位位置のずれが左側10巻き( $\Delta l_1/w=10$ )に近づくほど付加的交流損失は小さくなること、非飽和状態から飽和状態に変化する外部磁界振幅が大きくなり、飽和状態に遷移しにくいということがわかった。これは、コイルの1層目と2層目での転位位置が左右対称に近づくほど、左右で二本導体に鎖交する磁束が打ち消され、遮蔽電流値が小さくなるためだと考えられる。

### 4. 謝辞

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

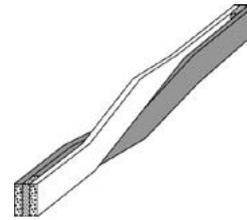


Fig.1 A transposed two-strand parallel conductor

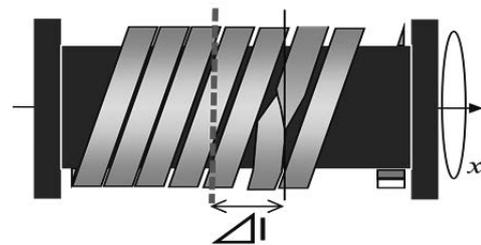


Fig.2 A parallel conductor wound into a coil

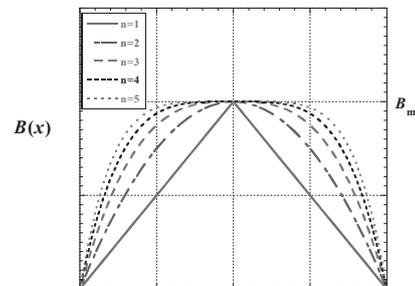


Fig.3 Schematic illustration of non-uniform magnetic field

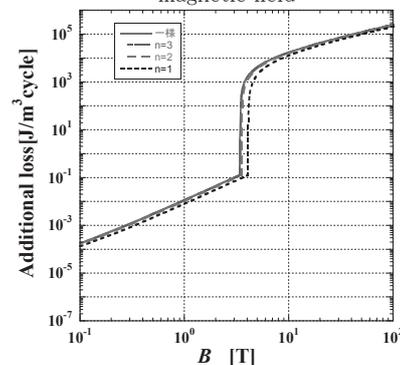


Fig.4 The dependence of the additional ac loss on  $B_m$  ( $\Delta l_1/w=10$   $\Delta l_2/w=20$ )

# 酸化物超電導並列導体をパンケーキコイル状に巻いた際の電流分流特性

## Study on the current sharing properties of superconducting parallel conductors wound into pancake coils

澤田 俊幸、岩熊 成卓(九州大学);富岡 章(富士電機);

林 秀美、岡元 洋、五所 嘉宏(九州電力);大熊 武、田子森 秋彦、和泉 輝郎、塩原 融(SRL);

SAWADA Toshiyuki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.); TOMIOKA Akira (Fuji Electric CO.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi, GOSHO Yoshihiro (Kyushu Electric Power CO.);

OHKUMA Takeshi, TAGOMORI Akihiko, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

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

### 1. はじめに

酸化物超電導線材を電力機器の巻線や大型超電導マグネットに適用するためには大電流容量化が必要となる。現在の酸化物超電導線材は、結晶の配向性を向上させるためにテープ状に加工されているため、大電流容量化するためにはテープ状の素線を並列に重ね合わせて並列導体を構成する必要がある。しかし、単に積層しただけでは自己磁界効果によりそれぞれの素線に流れる電流に偏りが生じてしまうため、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施し、電流分流比を均一にしなければならない。

これまで我々は、シングルパンケーキ接続のコイルにおける最適な転位パターンを明らかにしてきた。しかし、シングルパンケーキ接続のコイルではコイルの内側で転移と接続をする必要があり、実際の製作が難しいこともありうる。そこで、今回はシングルパンケーキ接続のコイルにおける最適な転移パターンを、比較的製作が容易なダブルパンケーキ接続のコイルに適用可能か検討した。YBCO 超電導テープ線材を用いて並列導体を構成し、シングルパンケーキ接続のコイルにおいて電流分流比を最も均一にする転位パターンを、ダブルパンケーキ接続のコイルに適用し電流分流特性を検討した。また、実用化の際には、コイルの大型化を図る必要があり、コイルの大型化への適用のために、コイル形状変化による電流分流特性への影響について検討を行ったので報告する。

### 2. 転位パターン

YBCO 超電導テープ線材 3 本、4 本、5 本により構成されたシングルパンケーキ接続のコイルにおいて、最も電流分流比が均一になる転位パターンを、ダブルパンケーキ接続のコイルに適用し、その転位パターンの有効性を検討した。Fig.1 に素線数 4 本における転位パターンを示す。

### 3. コイル形状変化の及ぼす影響

コイル形状変化については、素線数4本のダブルパンケーキ接続のコイルにおいて、ダブルパンケーキコイルの枚数を増やした場合、ターン数を一定にしてコイル内径を変化させた場合、そしてコイル内径を一定にしてターン数を変化させた場合について検討を行った。素線数4本における、電流分流比のパンケーキコイル枚数依存性の結果を Fig.2 に示す。

### 4. 結論

素線数が 3 本、4 本、5 本の際にシングルパンケーキ接続のコイルにおける最適な転位パターンを、ダブルパンケーキ接続のコイルに適用したが、電流分流比はほぼ均一になり、ダブルパンケーキ接続のコイルにも有効であることが明らかとなった。またこの補正方法ではコイル形状を変化させても電流分流比の変化がほとんど見られず、提案した転位パターンの機器適用性が明らかとなった。

### 5. 謝辞

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

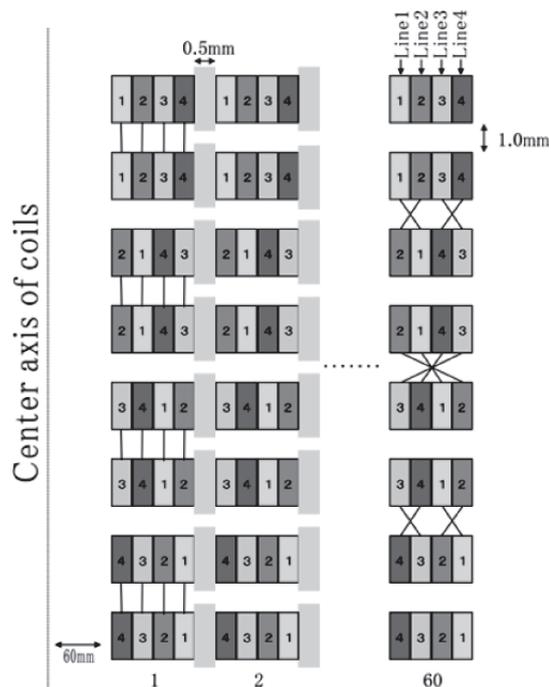


Fig.1 Most effective transposition pattern of 4-strands parallel conductor

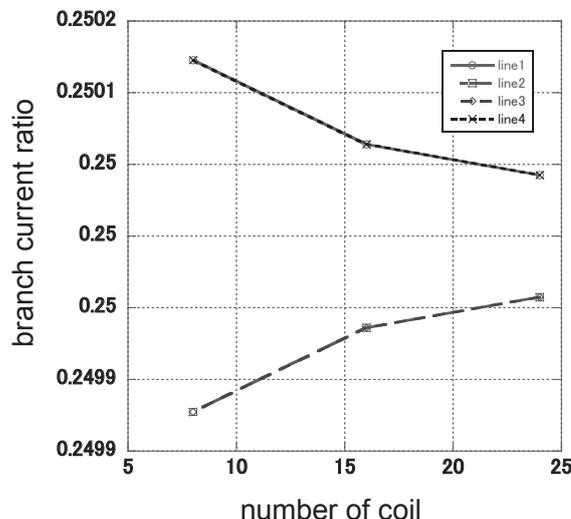


Fig.2 The branch current ratio in a 4-strands parallel conductor dependence on number of coil

# Y系超伝導変圧器の交流損失特性の評価

## Evaluation of ac loss properties of Y-based superconducting transformers

福田 幸弘, 片野坂 祐太, 川鍋 良平, 岩熊 成卓(九州大学); 岡元 洋, 林 秀美(九州電力); 富岡 章(富士電機); 田子森 秋彦, 大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC)

FUKUDA Yukihiko, KATANOSAKA Yuta, KAWANABE Ryohei, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.); OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); TOMIOKA Akira (Fuji Electric Co.); TAGOMORI Akihiko, OKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)  
E-mail: yukihiro@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. 研究背景及び目的

現在、我々は NEDO プロジェクトとして Y 系超伝導線材を用いた電力用変圧器の開発を進めている。超伝導機器の開発に当たり、超伝導巻線の交流損失を定量的に把握しておかなければ、冷却系を含めた機器の設計、およびその安定動作は難しい。本研究は、超伝導機器巻線の交流損失を定量的に予測する簡便な手法の開発を目的とする。

### 2. Y 系超伝導変圧器の仕様と交流損失解析

Table. 1 に検討した超伝導変圧器の仕様を示す。これは巻線の交流損失低減を検証するために設計、試作した小型モデル変圧器である。巻数比は 1:1 とし、また、巻線に超伝導線材の中心到達磁界以上の磁界が印加されるように、巻線のアスペクト比を大きく、すなわち巻線の高さ 107 mm に対し、一次、二次の巻線厚さが 50 mm 近くになるように設計した。Y 系超伝導線材は、厚さ 100 μm の Hastelloy テープを基板とする超伝導層厚 1 μm、銅安定化層を加えた全体が 270 μm 厚のものを使用した。

線材の交流損失特性は鞍型ピックアップコイルを用いて 65-77K の液体窒素中において測定した。テープ面に垂直磁界を印加した場合の測定結果を Fig.1 に示す。

変圧器巻線に印加される磁界は市販の磁場解析ソフトウェアを用いて求めた。各ターンにおける磁界振幅と磁界印加角度に対応した交流損失値を短尺線材の交流損失測定値から読み取り、全ターンについて積算して、巻線の交流損失として見積もった。

### 3. 超伝導変圧器の交流損失測定

巻線の損失は、液体窒素中において変圧器二次側を短絡し、一次側からパイポア電源で給電し、電流、電圧の内積の一周積分を求めることにより計測した。電流振幅は 15 A から 120 A、周波数は 10 Hz から 100 Hz とした。測定結果を Fig.3 に示す。実測値は、短尺線材の交流損失測定結果と磁場解析結果から見積もった計算値と極めて良く一致した。今後さらに超伝導変圧器の交流損失の計測、見積手法の開発を進め、精度を高めていく。

### 謝辞

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

Table. 1 Specifications of REBCO Superconducting transformer

	Primary	Secondary
Conductor	REBCO tape (non-divided)	
Dimensions	5mm×0.27mm	
I <sub>c</sub> (Designed)	> 350 A at self field, 64 K	
Max. Voltage	1.075 V peak	
Expected current	200 A peak	
Inner diameter	Φ183 mm	Φ128 mm
Outer diameter	Φ226 mm	Φ171 mm
Height	107 mm	107 mm

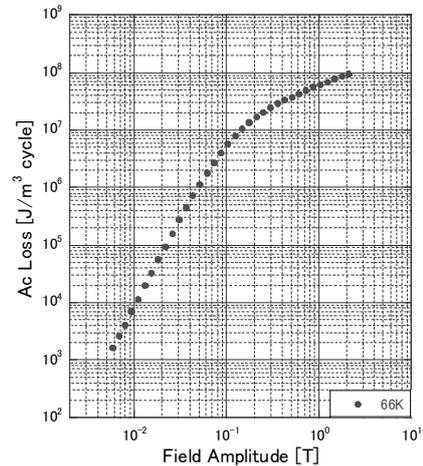


Fig.1 observed ac losses of Y-based superconducting tape

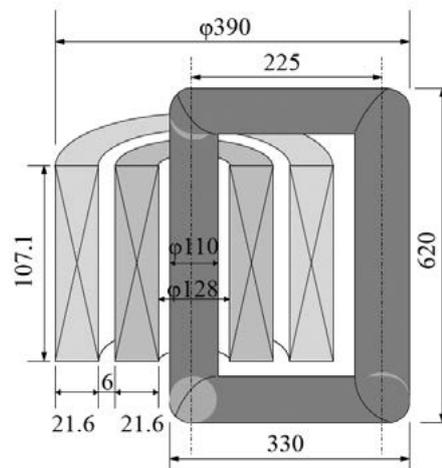


Fig.2 Dimensions of the model transformer

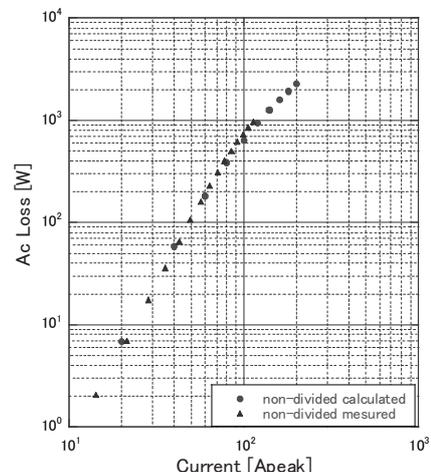


Fig. 3 Measured and calculated ac losses of the model transformer

# イットリウム系レーストラック型コイルの交流損失評価

## Evaluation and Analysis of the AC loss of the racetrack-shaped REBCO coil

高木 智洋, 大熊 武, 山田 穰 (ISTEC); 岩熊 成卓 (九州大)

TAKAGI Tomohiro, OHKUMA Takeshi, YAMADA Yutaka (ISTEC); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

E-mail: tmtakagi@istec.or.jp

### 1. はじめに

超電導コイルにおいて、電流変動による交流損失は電力を消費するばかりでなく、消費された電力が熱に変換されてコイル温度を上昇させてしまう。それゆえ、クエンチ予防という観点からコイルの交流損失量の評価及び推定が応用上重要となる。高温超電導 (HTS) 線材の交流損失に関する報告はこれまでに数多くなされているが、イットリウム系 HTS コイルについての報告はほとんどない。また、線材の交流損失特性からコイルの特性を推定することも容易ではなく、今の段階ではその手法が確立しているとはいえない状況にある。

今回我々は GdBCO 線材を用いて HTS コイルを作製し、これに交流電流を通电させてその交流損失を測定した。また、測定された線材の交流損失特性からコイルのヒステリシス損失を計算し、実測結果との比較を行った。本発表ではそれらについて報告する。

### 2. 実験方法

ISTEC-SRL 製の GdBCO 線材を用いて、レーストラック型ダブル・パンケーキコイルを作製した。線材は幅 5mm、厚さ 0.28mm で、上下に銅の保護層を形成している。さらにカプトテープ被覆で絶縁処理を施している。コイルは内径 80mm、外径 168mm、直線部の長さは 75mm、厚さは2枚で 10mm、ターン数は2枚で 280 である。このコイルを伝導冷却により 30~50K まで冷却し、0.01~1Hz の交流電流 (振幅 28~85A) による通電試験を行った。コイルのインダクタンスに起因する成分を回路的に相殺させた上で、コイルに生じる電圧波形を測定した<sup>[1]</sup>。その結果からコイル全体の交流損失量を導出した。

また、コイルに用いた線材の変動垂直磁場中での交流損失を測定し、その結果から算出したコイル全体の交流損失の計算値と実測結果との比較を行った。線材の交流損失測定には鞍型ピックアップコイルを用い、積層なしの単体試料および3枚積層の試料について測定した<sup>[2]</sup>。

### 3. 結果と考察

コイルの交流損失の測定結果を図1に示す。横軸が周波数を、縦軸がコイル全体の交流損失を表している。例えば、温度 30K、電流振幅 85A、周波数 0.1Hz のとき、コイル全体でのサイクルあたりの交流損失はおよそ 10J であった。電流振幅 85A のときの最大中心磁場は 0.2T 程度であった。コイル温度が 30K のとき、測定されたサイクルあたりの交流損失には顕著な周波数依存性が見られた。これは超電導層に生じるヒステリシス損失とともに、コイル磁場の変動による渦電流損失が含まれていることを示す。0.1Hz よりも大きな周波数では、渦電流損失が交流損失の大半を占めていることになる。渦電流損失を含めないサイクルあたりのヒステリシス損失は周波数 0Hz の切片に相当し、その値は 5~6J/cycle となる。一方コイル温度が 50K のときは、サイクルあたりの交流損失の周波数依存性が小さかった。これは、変動磁場により渦電流が生じる導体の電気伝導度が温度上昇に伴って低下したため、生じる渦電流が小さくなった効果であると考えられる。

線材の交流損失測定結果から導出した 50K におけるコイル全体でのヒステリシス損失の計算値と実測値との比較を図2に示す。実測値は3枚積層試料のデータから導出した損失よ

り小さく、これは線材の積層による反磁場効果によるものである<sup>[3]</sup>。コイルにおいては3枚積層試料よりも大きな反磁場効果が生じているといえる。

### 4. 結論

レーストラック型ダブル・パンケーキコイルを作製し、30~50K での交流通電試験を行った。電流・電圧の測定結果からコイル全体の交流損失量を導出したところ、ヒステリシス損失と周波数依存性を持つ渦電流損失の和が得られた。ヒステリシス損失に着目すると、実測された線材の特性から計算される値よりも小さくなった。これは線材の積層による反磁場効果で、その大きさは3枚積層時の値よりも大きいことが分かった。

### 5. 謝辞

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

### 6. 図表

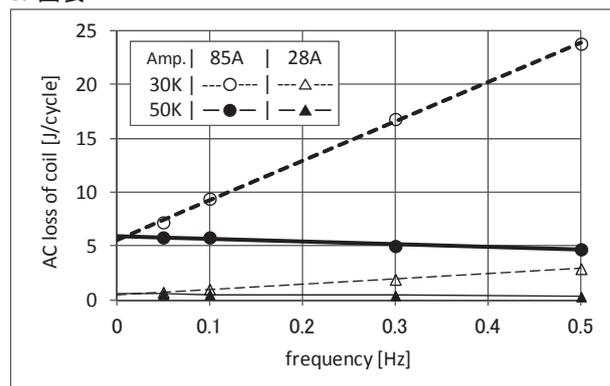


図1. レーストラックコイルのサイクルあたりの交流損失

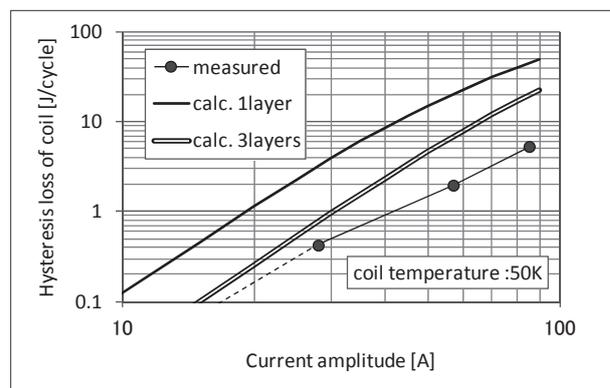


図2. 50K におけるコイル全体のヒステリシス損失  
●が実測値、2本の曲線が計算値を表す

### 参考文献

1. K. Kajikawa, et al., IEEE Vol.9, No.2 (1999) pp.746-749
2. M. Iwakuma, et al., Supercond. Sci. Tech., Vol.16 (2003) pp.545-557
3. 柁川ら, 電学論 B121 (2001) pp.1283-1289

## 5 T 発生可能な単段冷凍機冷却によるイットリウム系高温超電導磁石

## - 要素試験 -

## Five tesla class YBCO magnet cooled by single stage cryocooler

## - Element tests -

小方 正文, 水野 克俊, 長嶋 賢(鉄道総研)

OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI)

E-mail: ogata@rtri.or.jp

## 1. はじめに

イットリウム系高温超電導線材は磁場中で優れた通電特性を有するため超電導コイルへの適用が期待されており、その一つに超電導リニア応用が挙げられる。そこでイットリウム系線材の超電導リニア応用への可能性を実証するため、小型ながらコイル温度 50 K 程度で実機相当の 5 T が発生可能なイットリウム系高温超電導磁石を開発した。本発表では本超電導磁石の開発段階における要素試験結果について報告する。また、本磁石の完成試験結果に関する報告(1B-p02)も合わせて参照いただきたい。

## 2. 線材通電特性試験結果

本超電導磁石の製作には SuperPower 社製のイットリウム系線材(SCS4050-AP)を使用した。そして、高温超電導線材通電特性評価試験装置[1]により、巻線に用いた線材そのものの  $I_c$ -B- $\theta$ -T 特性も取得した(50 K における線材通電特性試験結果例を図 1 に示す)。

## 3. 含浸材料接着応力試験結果

通電特性劣化の無いコイル含浸材料のひとつとしてシアノアクリレート樹脂に着目している[2]。そこで上記線材を用いて含浸材料の接着応力試験を液体窒素中で実施し、シアノアクリレート樹脂の場合とエポキシ樹脂の場合の引張応力と試験後の線材表面状態を比較した(図 2)。その結果、エポキシ樹脂の方が明らかに引張応力が大きく、またエポキシ樹脂の場合には、内部剥離に伴う浮き上がり痕が線材表面に確認されるケースがあった。そこで本磁石に用いる超電導コイルの含浸材料には、シアノアクリレート樹脂または通電特性劣化の無い材料として実績を有するパラフィンワックスを採用した。

## 4. ユニットコイルの製作と通電確認試験結果

本超電導磁石には、図 3 および表 1 に示すユニットコイルを 10 個積層する構造を採用した。このコイル構造では 80 A 通電時に中心磁場が 5 T に達するが、図 1 の線材通電特性試験結果より、コイル温度 50 K 程度でほぼ達成可能であることがわかった。#1~#10 の各ユニットコイルは、銅製コイルケースにダブルパンケーキコイルを収納し、線材周りやケース内の空隙はシアノアクリレート樹脂またはパラフィンワックスを用いて含浸加工して製作した。製作したユニットコイルの通電特性確認結果は関連報告 1B-p02 を参照いただきたい。

この後ユニットコイルを 10 積層し、単段 GM 冷凍機で伝導冷却する輻射シールドレスのクライオスタットに納めて高温超電導磁石を完成させ、コイル温度 45 K で 5.2 T を達成した。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

## 参考文献

1. M.Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.102
2. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.104

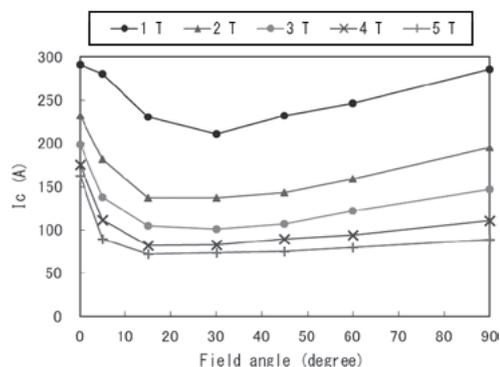


Fig.1  $I_c$ -B- $\theta$  results of REBCO wire at 50 K (Wire  $I_c$ : 125 A @ 77 K, s.f.)

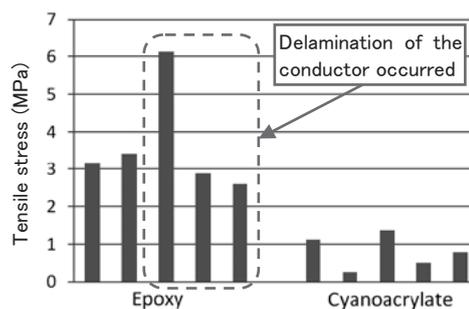


Fig.2 Tensile bonding strength result of epoxy resin and cyanoacrylate resin at 77 K

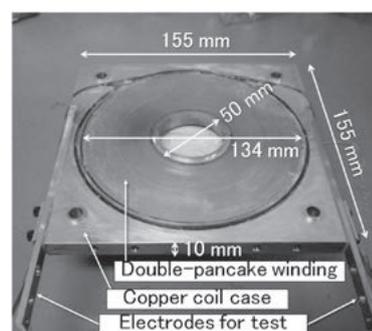


Fig.3 Appearance of unit coil (#1)

Table 1 Specifications of unit coil

Wire	REBCO(MOCVD) / Hastelloy (SuperPower: SCS4050-AP)
Width / Thickness	4.1 mm / 0.1 mm
$I_c$ (77 K, s.f.)	100 ~ 125 A
Turns	672 turns (336 turns $\times$ 2)
Wire length	196 m (98 m $\times$ 2)
Insulator	Polyimide tape
Inductance	40 mH
Detail of thickness	9 mm for winding setup, 1 mm for copper frame
Weight	1530 g

# SMES 用 YBCO コイルを想定した伝導冷却下での銅モデルコイルの伝熱特性評価

## Evaluation of conduction cooling effect of cryocooler-cooled Cu model coil for SMES application

増井 裕太, 琴寄 拓哉, 石山 敦士(早稲田大学);

渡部 智則, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 植田 浩史(大阪大学)

MASUI Yuta, KOTOYORI Takuya, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

WATANABE Tomonori, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

YBCO コイルの含浸剤にはエポキシが用いられてきたが、冷却時の熱応力による超電導線材の剥離による劣化が報告されており、その対策としてパラフィン含浸方式の採用が検討されている。SMES の実応用においては、伝導冷却下でのパラフィン含浸コイルに対する伝熱特性を明らかにする必要がある。そこで、今回は SUS 基板上に銅層を重ねて絶縁加工を施した YBCO 線材を模擬したテープ線材でモデルパンケーキコイルを作製し、パラフィン含浸の有無に対する伝熱特性を実験により評価したので報告する。なお、本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により、実施したものである。

### 2. 実験方法

今回はパラフィン含浸したパンケーキ銅コイルの伝熱特性を評価するため、模擬テープ線材を巻線したモデルコイルを作製し(Fig.1)、通電試験を行った。モデルコイルの内径は 100mm、外径は 123mm、高さは 24mm、ターン幅は 10.2mm、ターン数は 50 である。本実験では、銅モデルコイルに電流を流した際に生じるジュール熱を超電導コイルにおける交流損失とみなし、コイル内部に熱が生じた際のパラフィン含浸の有無による伝熱特性の評価を行った。また、コイルの温度変化を測定するためセルノックス温度計を巻線部の上に半径方向に 3 つ並べて設置した。実験は伝導冷却で冷却板(Fig.1)を 20K に設定し、発熱量 0.02W、0.04W、0.06W が発生する電流 1A、1.36A、1.65A を 25 分間通電し、通電開始から 65 分間温度測定を行った。

### 3. 解析方法

今回実験に用いたモデルコイルについて、有限要素法による数値解析に基づく伝熱特性評価を行った。解析方法は、回転対称有限要素法で、解析領域は Fig.2 に示したコイル・冷却板の断面である。今回は銅コイル下部と FRP が接触する面に関して、面接触している時の接触率を 100%として、接触率を変化させた時の温度上昇について数値解析を行った。境界条件は冷却板端面の温度を運転温度 20K で固定境界とした。コイル内部の熱的な振る舞いを解析するために、式(1)に示す熱拡散方程式を用いて数値解析を行っている。

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{k(T) \nabla T\} + Q_j(T) \quad (1)$$

ここで、C:熱容量[J/m<sup>3</sup>K]、T:温度[K]、t:時間[s]、k:熱伝導率[W/m K]、Q<sub>j</sub>:ジュール発熱量[W/m<sup>3</sup>]である。

### 4. 結果

実験結果の一例を Fig.3、Fig.4 に示す。Fig.3、Fig.4 は横軸が時間、縦軸が温度の初期温度からの変化量を示しており、温度の時間変化を示している。今回の実験では、温度上昇は発熱量にほぼ比例した。また、パラフィン含浸により温度上昇が非含浸時に比べ、約 5 分の 1 に抑えられた。解析結果と比較すると、接触率 60-70%の結果が非含浸時と、90-100%の結果がパラフィン含浸時の温度上昇量に近いという結果が得られた。

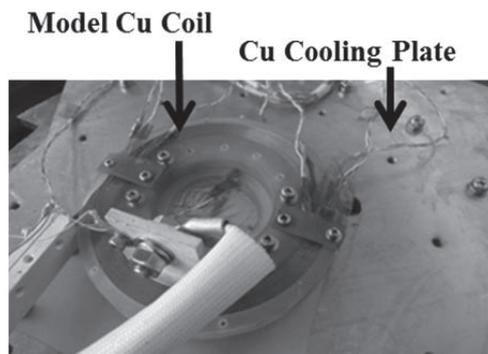


Fig.1 Overview of Model Coil

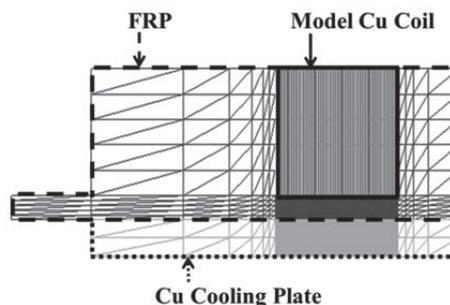


Fig.2 Simulation Model

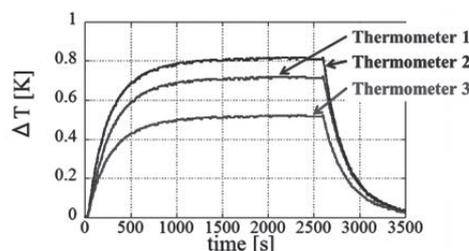


Fig.3 Experimental Results of Dry Winding (Sweep Rate:1A/s, Heat Generation:0.02W)

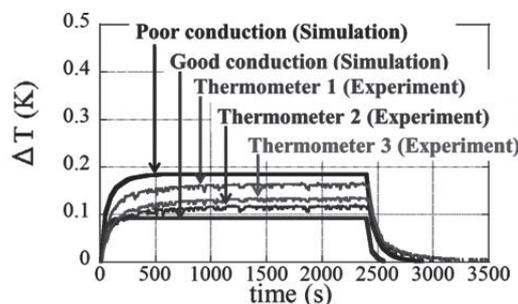


Fig.4 Experimental and Simulation Results of Paraffin Impregnation (Sweep Rate:1A/s, Heat Generation:0.02W)

### 参考文献

1. T.Suzuki, et.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.83(2010) p.223

## 冷凍機冷却レイヤー巻ワックス含浸 GdBCO コイル試験

### Wax-impregnated GdBCO layer-wound coil operation using cryocoolers

松本 真治, 木吉 司, 宮副 照久\*(物材機構, \*現 日立); 大塚 昭弘, 濱田 衛(JASTEC);  
前田 秀明(理研); 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大学); 末松 浩人(JEOL RESONANCE)

MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa, MIYAZOE Akihisa\* (NIMS, \*Hitachi); OTSUKA Akihiro, HAMADA Mamoru (JASTEC);  
MAEDA Hideaki (Riken); YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE)

E-mail: matsumoto.shinji@nims.go.jp

#### 1. はじめに

科学技術振興機構研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)「高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発」において、レイヤー巻 REBCO 高温超伝導コイルの製作・特性評価を行い、高温超伝導線材の高電流密度コイル化技術の構築を進めてきた。REBCO コイル試験を、4.2 K の液体ヘリウム温度、17.2 T の外部磁場中で行い、耐電磁力特性を評価し、REBCO 線材のコイル化技術を確立してきた [1]。また、得られたコイル化技術をもとに、実機サイズの内外径をもつ GdBCO insert コイルを開発し、4.2 K の液体ヘリウム温度、17.2 T の外部磁場中において 321 A、最大フープ応力(BJR) 408 MPa の電磁力下において、外部磁場と合わせて 24.0 T の磁場をコイル中心に発生させることに成功した[2]。現在、600 MHz 級の REBCO NMR マグネットの開発を目指している。

REBCO コイルは、冷凍機冷却方式での運転も期待されている。冷凍機冷却方式の場合、コイルをエポキシ樹脂で含浸するのがコイル冷却にとって好ましいとされているが、線材の剥離の問題がある。ワックス(パラフィン)による含浸また非含浸の場合は、線材の剥離は問題とならないとされている[3,4]。ワックス含浸 GdBCO コイルの冷凍機冷却方式での運転試験を行った。

#### 2. GdBCO コイル冷凍機冷却方式運転試験結果

GdBCO コイル諸元を TABLE I に示す。運転試験には、Gifford-McMahon (GM) 冷凍機を2機設置したクライオスタット(4 K 冷凍能力 2 W)を使用した。300 A(最大容量)まで通電した結果を Fig. 1 に示す。コイル発生電圧は、 $V_L = L(dI_{op}/dt)$  成分のレベルであった。コイル温度は、通電に伴い上昇したが運転に支障をきたすものではなかった。コイルには、銅電極が取り付けられているため、その部分の発熱による温度上昇も含まれている。

また、コイル中心での軸方向磁場およびコイル側面での径方向磁場を測定した。GdBCO 線材を貫く磁束に対して誘起された遮蔽電流が作る磁場が原因の、測定磁場とコイルの設計磁場との誤差が観測された。

#### 謝辞

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

#### 参考文献

1. S. Matsumoto et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 22, no. 3 (2012) p. 9501604.
2. S. Matsumoto et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 25, no. 2, (2012) p. 025017.
3. T. Takematsu et al.: Physica C, vol. 470, no. 17-18 (2010) p. 674-677.
4. Y. Yanagisawa et al.: Physica C, vol. 471, no. 15-16 (2011) p. 480-485.

TABLE I SPECIFICATIONS OF THE GdBCO COIL

GdBCO coil	
Conductor	Fujikura Ltd.
Conductor width × thickness (mm)	5.00 × 0.22
Insulated conductor (mm)	5.10 × 0.32
HASTELLOY® substrate (μm)	100
Inner diameter (mm)	79.00
Outer diameter (mm)	85.30
Coil height (mm)	100.54
Total layers	10
Total turns	186
Conductor length (m)	48.02
Winding type	Layer
Impregnation	wax
Operating current @ 300 A	
Magnetic field @ coil center (T)	0.54
Current density / coil (A/mm <sup>2</sup> )	176.0
Current density / conductor (A/mm <sup>2</sup> )	273.0

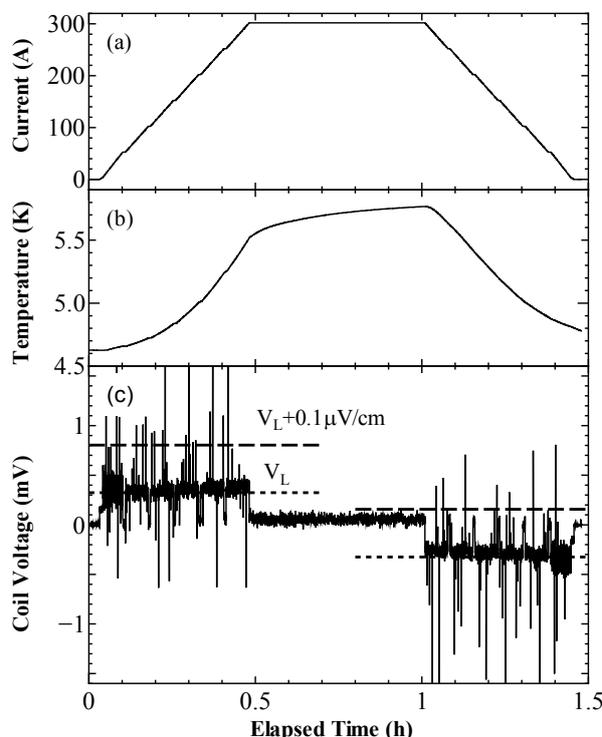


Fig. 1 GdBCO coil voltage and the temperature with the operating current  $I_{op}$  between 0 A and 300 A observed in self magnetic fields. (a) operating current (b) coil temperature (c) coil voltage, where  $V_L = L(dI_{op}/dt)$  is estimated using  $L = 1.62$  mH and  $dI_{op}/dt = 0.2$  A/s. The value of  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  including  $V_L$  is indicated.

## 補助コイルによる HTS マグネットの臨界電流向上効果 Improved Critical Current of the HTS Magnet using Auxiliary Coil

Dong Lak KIM, Yuna LEE, Yeon Suk Choi (Korea Basic Science Institute) ;  
Myung Hwan KU (Soonchunhyang Univ.)  
E-mail: dlkim@kbsi.re.kr

### 1. はじめに

本研究では20テスラ級の強磁場マグネットの開発を目指して15テスラの外部磁場の中に入れられる5テスラ級の高温超伝導マグネットを製作して特性を調べた。高温超伝導線材はテープ形状なので磁場の方向によって臨界電流が影響を受ける。ソレノイドマグネットの両端は磁場の垂直成分の影響が大きいのでこれによって臨界電流が下がる。この垂直磁場の影響を調べるため、マグネットの上下端に補助コイルを設置して磁場を観察した。

### 2. 高温超伝導マグネットの作製

高温超伝導線材「1」は、幅 4.1mm、厚さ 0.1mmのテープ形状になっていて、高温超伝導線材にかかる磁場によって臨界電流の異方性が現れる「2」。線材の広い面に対する垂直磁場の影響を調べるために、試料空間が外部バックグラウンドマグネットの持つ102mmの室温ボアに挿入できるヘリウムクライオスタットを製作した。ヘリウムクライオスタットの試料の設置部分は室温外径が 100mm、ヘリウム空間の内径が 80mmである。5テスラ級の高温超伝導マグネットは ReBCO 線材で巻線されたメインマグネットとして 16 個の DPC (Double Pancake Coil)と、垂直磁場の影響を調べるためにメインマグネットの上下端に補助コイルを1個ずつ取り付けた。製作された DPC は G10 のポビンに幅 4.1mm、厚さ 0.1mmの HTS 線材を層間絶縁なしに厚さ 0.1mmの Cu テープを安定層として共巻きした。DPC の大きさは内径 35mm、外径 74mmである。DPC に電極を半田付けして絶縁層を巻いた後完成された DPC の外径は77mmである。製作された DPC の臨界電流を測定したのを Figure1 に示す。

### 3. 実験結果と考察

高温超伝導マグネットを 4K に冷却して励磁させて得られた実験結果を Figure2に示す。モデル解析によると高温超伝導マグネットの最上短、下端の位置で垂直磁場が一番大きく発生される。実験の結果によると補助コイルが無い時にマグネットから発生された磁場は5.23テスラで、垂直磁場の影響が一番大きい両端の中で最下端の DPC にて 240A の臨界電流が観測された。補助コイルがある時には 260A にて5.58テスラが発生された。これらの結果から垂直磁場によって DPC の臨界電流が制限されるのを考慮すると補助コイルを設置することによって垂直磁場の影響が減少されて中心磁場が増加することを確認した。

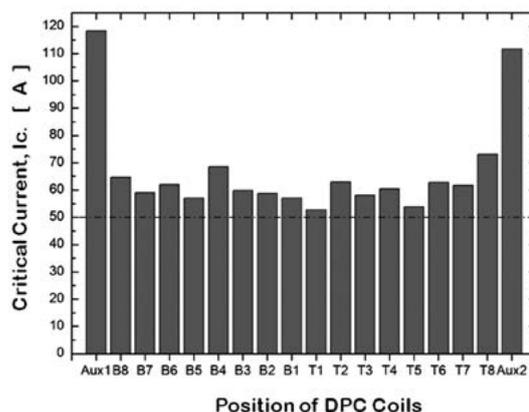


Fig.1 Critical Current of Main and Auxiliary DPC at 77 K  
(T: top, B: bottom, Aux: auxiliary coil)

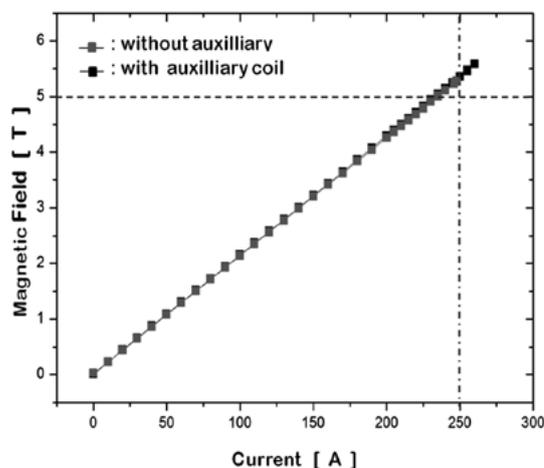


Fig.2 Magnetic Field at 4.2 K by with and without Auxiliary Coil

### 参考文献

1. (株)西南. website : [www.i-sunam.com](http://www.i-sunam.com)
2. D. Hazelton et al.: "SuperPower's YBCO coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 97(2009), no. 11, p.1831

## Y 系導体を用いたベクトルマグネット Vector magnet wound with YBCO conductor

古瀬 充穂, 岡野 眞, 淵野 修一郎(産総研); 内田 公(フジヒラ); 藤平 潤一(FEDLIC); 藤平 誠一(フジヒラ);  
門野 利治, 藤森 淳(東大); 小出 常晴(KEK)

FURUSE Mitsuho, OKANO Makoto, FUCHINO Shuichiro (AIST); UCHIDA Akira (FUJIHIRA); FUJIHIRA Jun-ichi (FEDLIC);  
FUJIHIRA Sei-ichi (FUJIHIRA); KADONO Toshiharu, FUJIMORI Atsushi (Univ. of Tokyo); KOIDE Tsuneharu (KEK)

E-mail: m.furuse@aist.go.jp

### 1. はじめに

文科省科学研究費助成事業「多自由度放射光 X 線二色性分光による強相関系界面新規電子相の研究」において、磁界方向と偏光方向を独立に制御できる多自由度軟X線二色性(XMCD)測定システムを開発した。試料に対して X 線ビームラインを含む二次元面内の自由な方向に磁界を印加できる、Y 系導体を用いたベクトルマグネットを搭載している。ベクトルマグネットの設計とユニットコイルの1個の試作試験結果はすでに報告した[1]。今回、全4個のユニットコイルを組み合わせ、磁界ベクトルを制御できることを確認した。マグネットは SuperPower 社製 YBCO 導体を用いており、遮蔽電流による発生磁界のヒステリシス、時間経過によるドリフトが観測された。

### 2. ベクトルマグネット概要

ベクトルマグネットの構成と磁界解析結果を図1に示す。中心の試料空間に3軸方向からアクセス可能とするため、コイルはスプリットされており、4つのユニットコイルで構成されている。各ユニットコイルは外径の異なる7つのシングルパンケーキコイルが重ねられて直列接続されている。導体は幅 4 mm、厚さ 0.1 mm の市販の YBCO 導体である。コイルは銅ブロックに納められ、冷凍機で伝導で 10K まで冷却される。

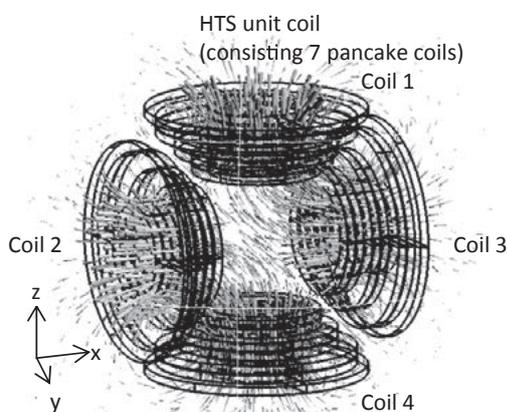


Fig. 1. Schematic of vector magnet

x 軸方向と z 軸方向に配置されたユニットコイルペア(コイル1と4、2と3)は直列に接続されており、それぞれ独立に倍ポラ電源で駆動される。各軸のコイルの通電電流を調整することにより、試料空間の中心に、任意の大きさ、角度の磁界を発生できる。

### 3. 励磁試験結果

コイル2と3に通電した時の試料空間中心のx軸方向磁束密度  $B_x$  をホール素子で測定した結果を図2に示す。明らかなヒステリシスが観測された。超電導体内に誘起された遮蔽電流に起因するものと考えられる。また、一定電流を長時間通電した場合、中心の磁束密度が時間とともに減衰する様子が

観測された(図3)。減衰カーブは  $1 - a \ln(t)$  でよく近似でき、磁束クリープによる遮蔽電流の緩和と推定される。

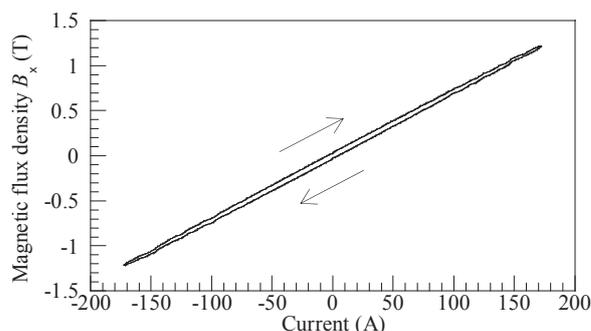


Fig. 2. Hysteresis of magnetic field at the center

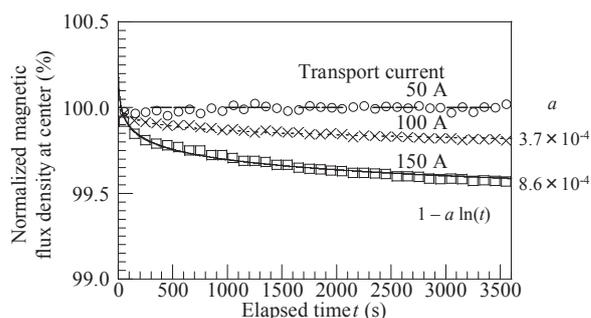


Fig. 3. Central magnetic field drift

これら遮蔽電流が XMCD 測定装置用のベクトルマグネットとしての性能に与える影響について考察する。そもそも XMCD 測定装置は、十分大きな磁界で試料を磁化することが目的であり、磁界の大きさの精度はそれほど重要ではない。しかし、試料とX線と磁界の角度の関係については精度が求められる。所望の方向に磁界を発生させるにあたって、各軸のコイルの通電電流はヒステリシスのために一意には決まらない。長時間経過させる、コイルの温度を上げるなどして遮蔽電流を減衰させる方法は現実的ではないため、図2のようなヒステリシス特性を知った上で、一度電流を最大値(図2では170A)まで上げた後、所望の磁界を発生する電流値まで下げる必要がある。通電電流を 0A にしただけでは、磁束密度を 0T にすることはできない。一方で、遮蔽電流の緩和による磁束密度変化は極めて小さく、これによる磁界角度の回転は無視できるほど小さい。よってベクトルマグネットの性能に対する遮蔽電流の影響は、注意深く電流を制御しさえすれば、問題ない。

本研究は科研費(22224005)の助成を受けたものである。

### 参考文献

1. M.Furuse, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.88

# 高温超伝導バルクスタガードアレイアンジュレータ実現に向けた 三次元磁場計測システム開発

## Development of a Field Measurement System for the Bulk HTSC SAU

柴田 茉莉江(低温工学会), 紀井 俊輝(低温工学会), 大垣 英明  
 SHIBATA Marie (CSJ), KII Toshiteru (CSJ), OHGAKI Hideaki  
 E-mail: marie82@iae.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

放射光施設の高性能化に向けて、短周期・強磁場なアンジュレータが期待されている。我々は、原理的に短周期・強磁場を実現できる高温超伝導バルクスタガードアレイアンジュレータを提案し、有効性の検証を行ってきた[1]。本アンジュレータは、外部のソレノイド磁場によって超伝導バルクに電流を誘起させ、周期磁場を生成する。挿入光源として使用するためには、アンジュレータ端部に及ぶ空間的な磁場計測が不可欠であるが、従来の磁場計測システムでは低温・真空封止で計測することができない[2]。今回我々は、77 K 以下の低温下かつ  $1.0 \times 10^{-4}$  Pa 以下の高真空下で、円形基盤上に4つのホール素子を並べたプローブを回転させながら前後に移動することで、三次元の磁場分布を測定可能なシステムを考案した。本発表では、この磁場計測システムの開発状況について報告する。

### 2. 冷却装置

Fig.1 が冷却装置の概念図である。まず、Fig.1 inlet から液体ヘリウムを流し、チャンバーに巻きつけられた管を通して Fig.1 outlet へ送ることによってチャンバーを冷却する。次に、冷却されたチャンバーと接触しているサンプルホルダ(銅製)が冷却される。その後、プローブ並びにサンプルが熱伝導・熱放射によって冷却される。なお、薄肉パイプ(SUS304)は外界とつながっているため、ガラスエポキシ(G10)を挿むことによって熱の流入を防いでいる。

### 3. プローブ

ホール素子は Arepoc HHP-MU を4個セラミック板に貼り付けて使用する。その有感領域は  $0.01 \text{ mm}^2$  であり、素子は 3 mm 間隔で配置する。測定は回転と後退(前進)を繰り返すことによって行うが、それぞれでは以下の駆動系を用いる予定である。回転運動用モーター、ドライバ: LIN ENGINEERING 5718L-01, 日本電産サーボ株式会社 FSD2U2P14-01 直線運動用モーター、ドライバ: slo-syn M061-CE02, 日本電産サーボ株式会社 FSD2U2P14-01。モーターコントローラ: Interface PCI-7414M。プローブを取り付けたロッドに軸受を付けることによって偏心を抑制している。

### 4. サンプル

サンプルには新日本製鐵株式会社(現新日鐵住金株式会社)製超伝導バルク材料(QMG)の  $\text{GdBaCuO}$  を用いる[3]。臨界温度  $T_c \approx 91 \text{ K}$  である。直径 25.2 mm の円形バルクの中央 4 mm を除いた薄鉢型で、厚さは 5 mm である。ポスター発表では試験測定で得られたバルクの磁場分布を紹介する。

### 5. 冷却試験結果

Fig.2 は上述のプローブならびにサンプルを挿入し、液体ヘリウムを巡らせて装置の冷却試験を行った結果である。Lake Shore Cryotronics, Inc. CX-1050-CU-HT-1.4L をサンプルホルダの背面にねじ止めた。冷却開始から 53 分ほどで臨界温度に到達し、56 分後には 77 K に到達したが、45 K

近傍で冷却速度に鈍りが見えた。272 分冷却し続けて到達した温度は 32.17 K である。また、試験中のチャンバー内圧力は常に  $1.0 \times 10^{-4}$  Pa 以下に保たれていた。

### 6. まとめ

アンジュレータの三次元磁場測定システムを確立すべく、本システムの冷却性能ならびにプローブ性能の評価を行った。本研究から、原理的に超伝導バルク磁石の三次元磁場分布が測定可能であること、さらに、サンプル冷却開始から 110 分程度で  $J_{c0} \approx 2500 \text{ A/mm}^2$  となる 40 K まで到達可能であることが確認された。しかし、冷却性能の向上のためにサンプルホルダの改良が求められる。更に、上述の駆動系を使用した装置の自動化を完了し、分解能などの評価を行う所存である。

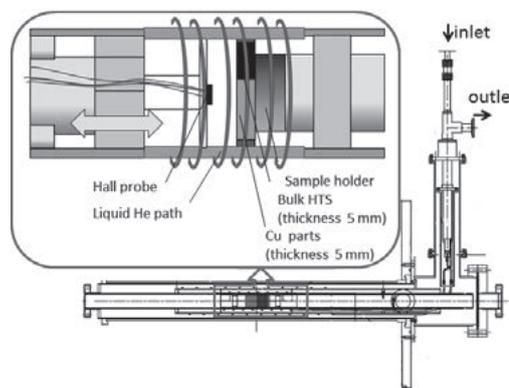


Fig.1 Refrigeration system

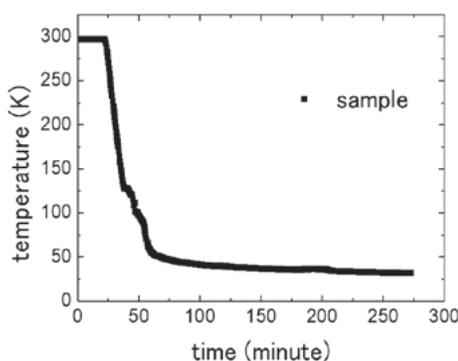


Fig.2 Result of cooling test

### 参考文献

1. T. Kii, et al., IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 22, No. 3 (2012)
2. T. Tanaka, et al., Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, WEPH052
3. H. Teshima et al., TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol. 46 No.32 (2011)

## バルク超伝導体を用いた短周期アンジュレータの開発-II Development of a Short Period Undulator Using Bulk Superconductor -II

紀井 俊輝(低温工学会), 柴田 茉莉江(低温工学会), 金城 良太, Omer Mohamed, Negm Hani, Choi Yong Woon, 吉田 恭平, Konstantin Torgasin, 島橋 享兵, 井門 秀和, 奥村 健祐, 全 炳俊, 増田 開, 大垣 英明  
Kii Toshiteru(CSJ), SHIBATA Marie(CSJ), KINJO Ryota, OMER Mohamed, NEGM Hani, CHOI Yong Woon, YOSHIDA Kyohei, KONSTANTIN Torgasin, SHIMAHASHI Kyohei, IMON Hidekazu, OKUMURA Kensuke, ZEN Heishun, MASUDA Kai, OHGAKI Hideaki  
E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

放射光の短波長化、輝度の向上は主に加速ビームの高エネルギー化、大電流化とアンジュレータの短周期・強磁場化によって達成されてきた。我々はバルク超伝導体をソレノイドコイル中に周期的に配置してバルク体内部に超伝導遮蔽電流を誘起することで短周期・強磁場を実現するバルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータを提案し開発を行っている。[1]これまでに液体窒素温度領域での動作原理検証に成功したが、放射光発生装置として実用的な磁場強度を実現するためには臨界電流密度  $1 \text{ kA/mm}^2$  以上となる温度領域での運転が必要であることも判明した。[2]そこで、77 K 以下の温度領域での実用性能の確認とヘリウム連続流クライオスタットと 2 T ソレノイドを用いた極低温試験機の開発を行った。

### 2. 動作原理

バルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータ(Bulk HTSC SAU)の磁場生成概念図を Fig. 1 に示す。このアンジュレータは、単一メインのバルク超伝導体を周期的にスタックしたものを、位相を半周期ずらし電子ビーム軌道を挟み配置した構造を持ち、外部ソレノイドにより磁場変化を与えた際に、磁場変化を打ち消すように誘起される遮蔽電流によりビーム軌道上に周期交替磁場を生成することができる。

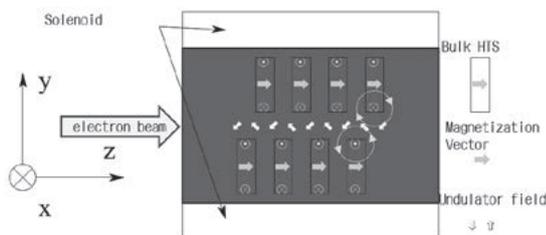


Fig. 1 Operation principle of the Bulk HTSC SAU

### 3. 極低温試験機

これまでに液体窒素温度 77 K での磁場生成・制御試験を実施し、遮蔽電流を制御すること周期磁場の制御ができることを確認したが、希土類銅酸化物系バルク超伝導体の臨界電流密度は  $100 \text{ A/mm}^2$  程度であるため、ビーム軸上に生成可能なアンジュレータ磁場は数 mT であった。[1]そこで、連続流ヘリウムクライオスタットによりバルク超伝導体温度を 77 K 以下の極低温領域まで冷却可能な試験機の開発を行った。Fig. 2 に極低温試験機の概略図を示す。極低温試験機は室温ボア系 3 inch の 2 T ソレノイド(Cryomagnetics Inc.)とヘリウムクライオスタットで冷却されるサンプル部から構成されている。クライオスタット内部に挿入するバルク超伝導体アレイは直径 25.2 mm の QMG®GdBaCuO (新日鐵住金(株))バルク超伝導体から切り出した厚さ 5 mm の半月型バルク 12 個で構成し周期長 10 mm、周期数 6、磁極間隔 4 mm とした。

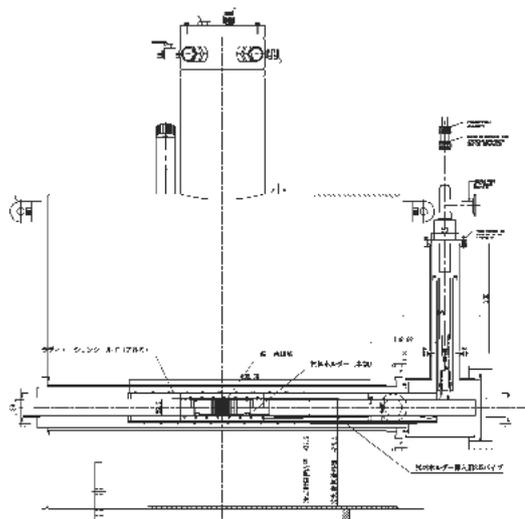


Fig. 2 Side view of SC solenoid and cryostat

### 4. 結果

連続流ヘリウムスタットにより超伝導体アレイを約 6 K に冷却し、ソレノイドにより最大 4 T の磁場変化を与え、アンジュレータ磁場の生成・制御試験を行った。Fig. 3 に 0.5~4.0 T の磁場変化を与えた際のアンジュレータ磁場分布を示す。4 T の磁場変化を与えた際に、アンジュレータ磁場は 0.85 T に到達し、実用的な強度域の磁場生成を確認した。

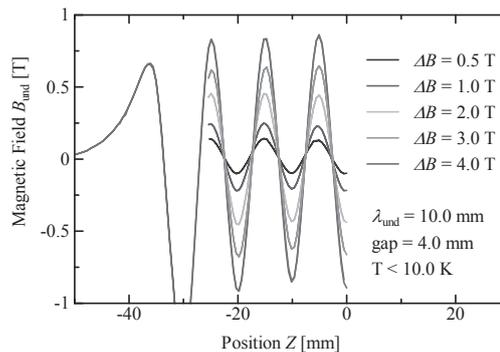


Fig. 3 Undulator field strength

### 5. まとめ

Bulk HTSC SAU の極低温試験機の開発を行い、周期 10 mm、磁極間 4 mm の条件で運転温度およそ 6 K にてアンジュレータ磁場強度 0.85 T を確認し、実用的な強度のアンジュレータ磁場が生成可能であることを確認した。

### 参考文献

1. T. Kii et al., J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 46 No. 3 (2011) pp. 118-124
2. T. Kii, et al., IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 22, No. 3 (2012) 4100904

## 次世代超電導サイクロトロンの開発: 開発課題 Development of Next Generation HTS cyclotron: Key Issues

石山 敦士, 王 旭東 (早大); 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治 (阪大); 野口 聡 (北大);  
長屋 重夫, 鹿島 直二 (中部電力); 宮原 信幸 (放医研)

ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong, (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.);  
NAGAYA Shigeo, WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

重粒子線がん治療の普及のためには、加速器の小型・軽量化とともに高効率・省エネルギー化が必要である。筆者らは高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代重粒子線がん治療用超電導サイクロトロンの実現を目指している。我々が開発している超電導サイクロトロンは、等時性磁場を発生するための円形スプリットコイルと周方向に強弱のある磁場 (AVF) を発生するためのスパイラルセクターコイルを組み合わせ、これらを空芯コイルシステムで実現しようとするものである[1]。本報告では、その開発課題と対応策についてまとめる。

### 2. 開発課題と対応策

#### 2-1. 高い発生磁場精度

加速器用コイル開発の重要課題であり  $10^{-4}$  程度の精度が必要となる

**<超電導線材内の遮蔽電流分布の影響>**: 超電導線材に磁場が加わると遮蔽電流が流れそれが不正磁場を作る。特にYBCO線材のようなテープ線材では深刻である。筆者らは過渡的な遮蔽電流分布とそれによって発生する磁場を高精度で計算可能な三次元過渡電磁場解析シミュレータを開発した[2]。これを用いることにより、遮蔽電流による不正磁場を抑える線材構成、巻線方法等の検討が可能となる。

**<コイル巻線精度の影響>**: テープ形状の超電導線材を精度よく巻線する技術開発が必要である。線材表面の凹凸を低減するための電気絶縁材の開発、新しいコイル巻線方式に基づく高精度巻線機の製作を行い[3]、モデルコイルによる評価実験によりその有効性を検証した[4]。並行して試設計した実規模コイル[1]について巻線誤差の発生磁場への影響を解析により評価し許容誤差を明らかにした[5]。現在スパイラルセクターコイルのような異形コイルのための新しい巻線方式を開発中である。

**<電磁応力による変形の影響>**: 高磁場・コンパクト化に伴う強大な電磁力による変形を抑える必要がある。作用する電磁力をコイル構造体全体で支えるパンケーキコイル構造を開発した (“Yoroi-coil” と称する) [6]。これにより電磁力による変形を抑制することが可能となる。

#### 2-2. 高耐放射線性

加速器用コイル開発の前提となる重要課題である。ここでは、現在市販されているY系線材およびBi-2223線材について、14MeV,  $1.74 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  (サイクロトロンの長期実運転に十分な照射量) の中性子照射を行い以下の耐放射線性に関する評価を行ってきた。

**<超電導線材の超電導特性 (I-V特性) への影響>**: これまでのところ、明確な特性変化は観測されていない。現在、 $J_c$ - $B$ - $\theta$ 特性の評価を実施している[7]。

**<超電導線材の機械特性への影響>**: 機械特性の評価実験 (最大0.6%のひずみを印加・開放してI-V特性を測定) を行ってきた。これまでのところ、非照射の線材と比較して明確な特性変化は観測されていない[8]。

**<超電導線材の放射化の影響 (RI生成物の評価)>**: 超電導線材・コイルが放射化することは、装置のメンテナンス時のハンドリングや廃棄時の処理、被曝管理を困難にし

てしまう可能性がある。そこで中性子照射によるRI生成物の評価を行ってきた。これまでのところ工業製品として問題となるようなRIは観測されていない[9]。

#### 2-3. 高い熱的安定性・信頼性

高温超電導コイルにおいても、励磁・減磁の繰り返し等による常電導転移・コイルクエンチ (熱暴走) の可能性は皆無ではないため、適切な熱的安定性評価基準の設定、クエンチ検出・保護法の確立が必要となる。

**<熱的安定性評価基準>**: 「冷凍機の冷却能力曲線とコイル発熱曲線」に基づく安定性評価基準を設定した[10]。

**<安定化材 (銅) 比の決定法>**: 安定化材の断面積を決定する方法として、コイルと並列に接続した外部保護抵抗によるエネルギー回収条件に基づく決定法を提案した[11]。これにより、コイル通電電流・電圧、蓄積エネルギー等が与えられれば、必要となる安定化母材断面比を決定することが可能となる。

**<常電導転移検出法>**: 高温超電導線材内の常電導伝播速度は数cm/sと極めて遅いため、局所的な常電導転移を電圧変化により検出することは困難である。そこで常電導転移に伴う集合体内の電流分布の変化を検出する方法を提案し、実験により有効性を検証した[12]。

#### 2-4. 高機械強度

高磁場・コンパクト化には、超電導線材の  $I_c$  向上も重要であるが、高機械強度化が必須となる。

**<パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造>**: Y系超電導線材の強度を活かしつつコイルを構成する枠や側板により電磁力をコイル構造体全体で支えるパンケーキコイル構造を開発した (“Yoroi-coil” と称する)。これにより、従来のNMR用等の低温金属系高磁場コイルの4倍以上の応力を想定したコイル設計が可能となると考える。

### 3. まとめ

国内外の関連する研究グループ間で、加速器応用に必要となる高温超電導マグネット技術課題の共有化と基礎・基盤技術確立に向けた議論が活発化している。今後は、実規模 (m級) のマグネットシステム実現に向けた更なる技術開発が進められていくことになる。

本研究の多くは、科研費基盤研究 (A) 「次世代重粒子線がん治療装置用超伝導加速器の基盤技術開発」 (23246053) によったことを付記する。

### 参考文献

- [1] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2B-a04 (2012)
- [2] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2B-a05 (2012)
- [3] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2B-a03 (2012)
- [4] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2P-p40 (2012)
- [5] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2P-p39 (2012)
- [6] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 1B-a07, 08, 09, 10 (2012)
- [7] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2P-p36 (2012)
- [8] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2P-p37 (2012)
- [9] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2P-p38 (2012)
- [10] IEEE Trans. Appl. Supercond., 11, p. 1832 (2001)
- [11] IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, p. 2430 (2007)
- [12] 86<sup>th</sup> CSJ Autumn Conference, 2C-a06 (2012)

## 次世代超電導サイクロトロンの開発: 高温超電導線材の中性子照射特性(超電導特性)

### Development of Next Generation HTS Cyclotron: Neutron Irradiation Experiments on HTSs (Superconductive Characteristics)

道辻 健太, 狩野 開, 矢崎 真二郎, 柄澤 彰良, 王 旭東, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大); 宮原 信幸(放医研)  
 MICHITSUJI Kenta, KARINO Hiraku, YAZAKI Shinjiro; KARASAWA Akira; WANG Xudong;  
 ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); UEDA Hiroshi (Osaka University); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)  
 E-mail: atsushi@waseda.jp

#### 1. はじめに

我々はYBCO超電導コイルを用いた小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指し、その基礎研究を行っている[1]。次世代超電導サイクロトロンの実運転において、YBCO線材は磁場中で放射化されることが想定される。そこでYBCO線材に磁場(永久磁石使用)を印加して、 $J_c-B-\theta$ 特性を測定した。また、放射線環境を想定して14MeV中性子を照射した線材についても上記同様に $J_c-B-\theta$ 特性を測定し、非照射の結果と比較した。

#### 2. 実験方法

試料線材の諸元をTable 1に示す。中性子照射は放医研サイクロトロン(AVF-930)を用い、14 MeV中性子を試料に照射した。その後、液体窒素浸漬冷却下(77 K)、最大約0.19 Tの外部磁場印加状態で $I_c$ 測定を行った。

線材に対して平行磁場(c軸と垂直)がかかる位置を基準( $\theta=0$ )として、ホール素子の出力電圧を監視しながら、 $5^\circ$ 刻みに回転させ $I_c$ 測定を行った。

実験装置の写真をFig. 1に示す。磁場は永久磁石と鉄で磁気回路を構成し、印加する。実験時の治具の回転の様子をFig. 2に示す。

Table 1 Specifications of HTS sample

	sample
material	YBCO
	AMSC
manufacturer	344
	Superconductor
process	MOD/RABiTS
length	100 [mm]
width	4.4 [mm]
thickness	0.22 [mm]
$I_c$ (nominal)	90 [A]

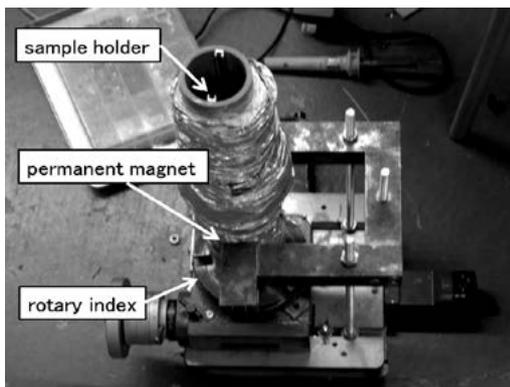


Fig.1 Experiment Apparatus

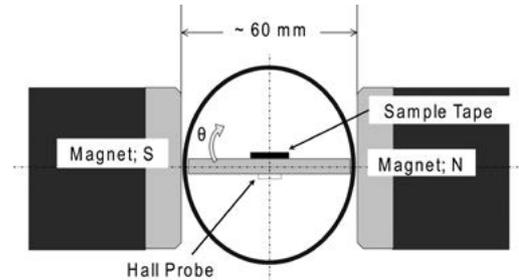


Fig.2 Schematic drawing of measurement of  $J_c-B-\theta$  property of HTS tape

#### 3. 実験結果

中性子照射および非照射の機械特性の測定例をFig. 3に示す。グラフ中の丸型のプロット(●)は非照射試料、菱形のプロット(◆)は照射試料を示す。また、線材の外部磁場印加により経験する磁場の角度依存性を第2軸に示す。

照射量による位相ずれや臨界電流 $I_c$ の変化、線材の個体差を考慮する必要があるが、単純な比較はできないが、Fig. 3より今回の評価実験の結果からは、c軸と平行磁場( $\theta=90^\circ, 270^\circ$ )付近で臨界電流密度 $J_c$ が最小となり、c軸と垂直磁場( $\theta=0^\circ, 180^\circ$ )付近で $J_c$ が最大となることなど、おおむね照射・非照射による角度依存性に変化は見られなかった。 $J_c$ 値の変化については、さらにサンプル数を増やして評価する必要がある。また、照射線量や印加磁場の大きさの影響も順次評価していく予定である。

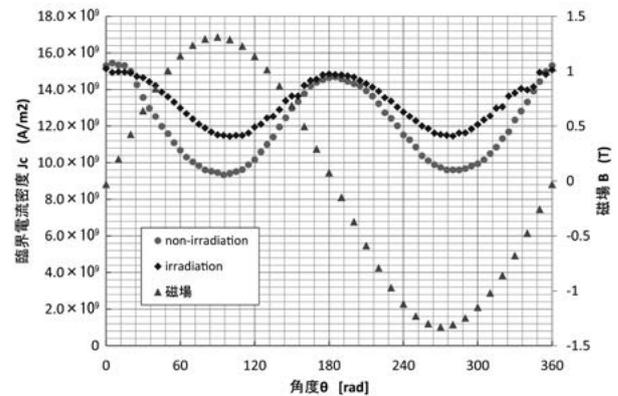


Fig.3  $J_c-B-\theta$  characteristics of sample

なお、本研究は科研費(基盤研究A: No. 23246053)に依ったことを付記する。

#### 参考文献

1. A. Ishiyama, M. Fukuda, et al; ASC-10-033(2010).
2. S. B. Kim, S. Murase, et al; IEEE Trans. On Applied Superconducting, vol. 15, No. 2, pp. 2645; June 2005.

## 次世代超電導サイクロトロンの開発： 高温超電導線材の中性子照射特性(機械特性)

### Development of Next Generation HTS Cyclotron: Neutron Irradiation Experiments on HTSs (Mechanical Characteristics)

道辻 健太, 狩野 開, 矢崎 真二郎, 柄澤 彰良, 王 旭東, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大); 宮原 信幸(放医研)  
 MICHITSUJI Kenta, KARINO Hiraku, YAZAKI Shinjiro; KARASAWA Akira; WANG Xudong;  
 ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); UEDA Hiroshi (Osaka University); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)  
 E-mail: atsushi@waseda.jp

#### 1. はじめに

我々は YBCO 超電導コイルを用いた小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指し、その基礎研究を行っている[1]。次世代超電導サイクロトロンの実運転においては、放射線環境下で冷却時の熱応力と励磁・減磁時の電磁応力による歪みが超電導コイルに印加されることが想定される。そこで、YBCO 線材に最大 0.6%の曲げ歪みを印加・解放して、超電導特性 ( $I$ - $V$  特性) を測定した。また、放射線環境を想定して 14MeV 中性子を照射した線材についても上記同様に測定し、非照射の結果と比較した。

#### 2. 実験方法

試料線材の諸元を Table 1 に示す。中性子照射は放医研サイクロトロン(AVF-930)を用い、14 MeV 中性子を試料に照射した。液体窒素浸漬冷却 (77 K) で、線材の初期  $I_c (=I_{c0})$  を測定後、曲げ歪みの印加時および印加後解放時において  $I_c$  を測定した ( $I$ - $V$  特性:  $1 \mu V/cm$  基準)。曲げ歪みは、Fig. 1 に示した U 字型の治具の底面にはんだにより試料を接着し、U 字治具を曲げることにより印加した。また、歪みの値はひずみゲージを線材の中央部、治具の肩部に取り付けて監視した。

Table 1 Specifications of HTS samples

	sample1	sample2
material	YBCO	YBCO
manufacturer	AMSC 344 Superconductor	Super Power SCS4050 2GHTS
process	MOD/RABiTS	MOCVD/IBAD
length	100 [mm]	100 [mm]
width	4.4 [mm]	4.1 [mm]
thickness	0.22 [mm]	0.160~0.212 [mm]
$I_c$ (nominal)	90 [A]	135 [A]

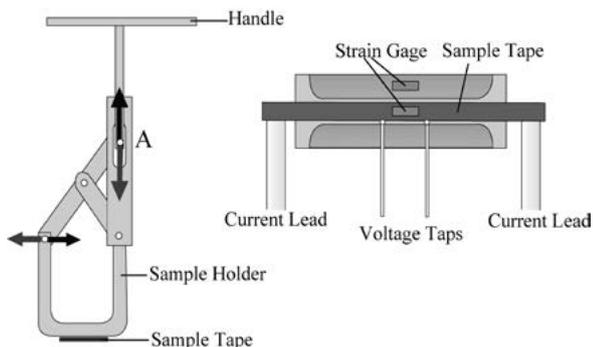


Fig. 1 Experimental Apparatus

#### 3. 実験結果

中性子照射および非照射の機械特性の測定例を Fig. 2, Fig. 3 に示す。グラフ中の丸型のプロット (●) は非照射試料、菱形のプロット (◆) は照射試料を示す。また、塗りつぶされたプロットは歪み印加時、白抜きのプロットは歪み解放時の結果をそれぞれ示している。

sample1, sample2 ともに照射と非照射間で明確な差異は見られなかった。

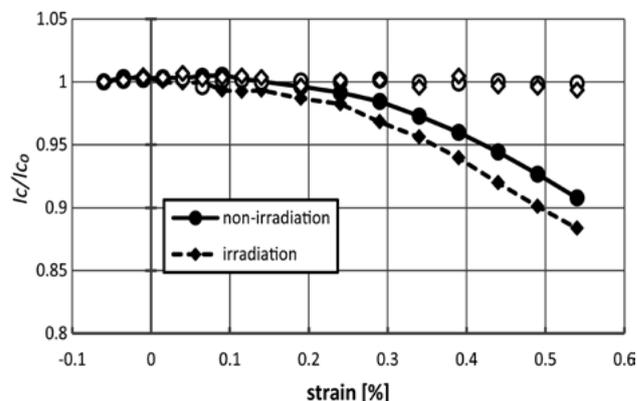


Fig. 2 Mechanical Property of sample 1

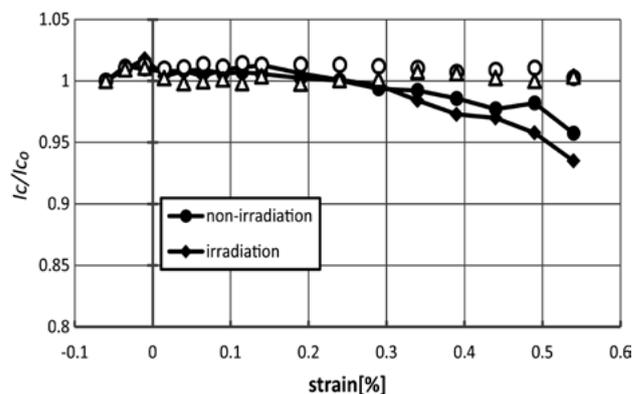


Fig. 3 Mechanical Property of sample 2

なお、本研究は科研費 (基盤研究 A : No. 23246053) に依ったことを付記する。

#### 参考文献

1. A. Ishiyama, M. Fukuda, et al; ASC-10-033.
2. H. Ueda, A. Ishiyama, N. Miyahara, et al.; IEEE Trans. On Applied Superconducting, vol. 19, No. 3, pp. 2872-2676.

## 次世代超電導サイクロトロンの開発： 高温超電導線材の中性子照射特性(放射化評価)

### Development of Next Generation HTS cyclotron: Neutron Irradiation Experiments on HTSs (Activation Analysis and Radiation Damage)

宮原 信幸(放医研); 狩野 開, 道辻 健太, 矢崎 真二郎, 柄澤 彰良, 王 旭東, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大)  
MIYAHARA Nobuyuki(NIRS), KARINO Hiraku, MICHITSUJI Kenta, YAZAKI Shinjiro; KARASAWA Akira; WANG Xudong;  
ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); UEDA Hiroshi(Osaka University)  
E-mail: happynob@nirs.go.jp

#### 1. はじめに

我々は YBCO 超電導コイルを用いた小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・建設を目指し、その基礎研究を行っている。次世代超電導サイクロトロンでは、YBCO 超電導コイルの各要素は放射環境での運転となる。このような環境中で機器が放射化することは、装置のメンテナンス時のハンドリングや廃棄時の処理、被ばく管理を困難にしてしまう可能性がある。したがって、YBCO 超電導コイルの加速器への応用に向けてコイルを構成する要素の放射化特性ならびに耐放射線性を評価する必要がある。

市販の超電導線材の中で YBCO 線材 (AMSC 社製), Bi-2223 線材 (住友電工製) についてはすでに評価・報告した [1]。今回は新たに YBCO 線材 (SuperPower 社製) について評価を行った。YBCO 線材 (SuperPower 社製) に中性子線 (14MeV, 77kGy) を照射した場合の RI 生成物と  $I-V$  特性についての評価を行ったので報告する。

#### 2. 実験方法

実験方法は以下の手順で行った。

- 照射前に高温超電導線材の  $I-V$  特性を液体窒素中で測定する。
- 放医研 AVF-930 サイクロトロン C-3 コースからの 14MeV 中性子を室温中でサンプルに照射し生成する RI の測定を行った。14MeV 中性子は、30MeV, 20  $\mu$ A deuteron (重水素) を水冷 4mm 厚 Be ターゲットに照射して生成した。ターゲットからの距離 100mm で照射野直径 40mm である。ターゲットから 2m 離れた位置で測定して逆二乗則より推定すると 7 時間トータルの中性子フラックス密度は  $1.74 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> であった。
- 照射終了後、Ge 検出器により超電導線材中に生成した RI をガンマ線スペクトルより推定する。
- 測定終了後、液体窒素中でサンプルの  $I-V$  特性の測定を行い、放射線により損傷の程度を見極める。

#### 3. 実験結果

##### 3.1 $I-V$ 特性

照射前後の  $I-V$  特性 (自己磁界下) を Table 2 に示す。いずれのサンプルにおいても照射前後で  $I_c$  の大きな差異は確認されなかった。

##### 3.2 ガンマ線スペクトル測定

サンプル線材内に生成したガンマ線放射核種およびその由来元素を Ge スペクトルから推定した結果を Table 3 に示す。基板の Ni 層から Co 系の娘核種が、安定化層の銀より Ag 系の娘核種が生成されたと考えられる。

生成核種のサンプル線材に対する  $I-V$  特性への影響は確認できなかった。

Table 1 Specification of HTS samples

	Sample1
material	YBCO
manufacturer	Super Power SCS4050 2GHTS
process	MOCVD/IBAD
length	100 [mm]
width	4.1 [mm]
thickness	0.160~0.212
$I_c$ (nominal)	135 [A]

Table 2  $I_c$  Comparison Before and After Irradiation

Sample No.	$I_c$ [A]			$I_{c,After}/I_{c,Before}$
	Before	After		
#1	134.58	135.35		1.01
#2	118.87	121.62		1.02
#3	136.11	137.55		1.01
#4	127.55	126.57		0.99
#5	132.65	133.47		1.01

Table 3 RI Induced by Neutron Irradiation

Nuclide	Half-life (Day)	Energy (KeV)	Number of photons	Specific Radioactivity (Bq/g)
<sup>106</sup> Ag	8.4	1045	788.6	21257.75
<sup>105</sup> Ag	41	344	195.4	1827.20
<sup>59</sup> Fe	44.6	1099	100.1	678.84
<sup>115</sup> Cd	44.8	933	439.2	98927.65
<sup>58</sup> Co	70.8	810	21013	76043.28
<sup>56</sup> Co	78.8	846	249.2	887.60
<sup>88</sup> Y	107	1836	48.57	169.60
<sup>110m</sup> Ag	250	884	335.8	1536.05
<sup>57</sup> Co	271	122	4461	17313.31
<sup>54</sup> Mn	313	834	209.6	693.73
Total	-	-	-	219334.63

なお、本研究は科研費 (基盤研究 A : No. 23246053) に依ったことを付記する。

#### 参考文献

- Toru Aoki, Atsushi Ishiyama, et al.: IEEE Trans. on Applied superconductivity, vol.21(2011) pp. 3200-3202

# 次世代超電導サイクロトロンの開発: YBCO パンケーキコイルの磁場精度解析

## Development of Next Generation HTS Cyclotron: Analysis of Magnetic Field Accuracy in YBCO Pancake Coil

王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大);  
長屋 重夫, 鹿島 直二(中部電力); 宮原 信幸(放医研)

WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka University);

NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power Co.,Ltd); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS);

E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

我々は、高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指している[1]。高温超電導サイクロトロンにおいて、発生磁場は、0.01%以内の高い精度が求められるため、コイルの巻線精度を最大限に高める必要がある。そこで、今回は、試設計した実規模のサイクロトロンを構成する円形スプリットパンケーキコイル[2]に対して、許容できるコイルの変形・変位について、数値解析により発生磁場精度を評価したので、その解析結果について報告する。

### 2. 解析目的と方法

Table 1 に試設計した HIMAC と同等の出力(400MeV/n, 30nA) を持つ次世代超電導サイクロトロンを想定した等時性磁場発生用メインコイル(4 対の円形スプリットパンケーキコイル)の諸元を示す。Fig. 1 にメインコイルの配置とミッドプレーン上の磁場を示す。なお、磁場精度を評価する範囲は等時性磁場となる位置 ( $r=0.2$  m) からビーム引出位置 ( $r=1.06$  m) までである。試設計したコイルを製作する時、巻線精度はコイルの発生磁場精度に大きく影響する。そこで今回、試設計したメインコイルに対して、実規模の超電導サイクロトロン用コイルのミッドプレーン上の磁場分布を計算し、コイルに巻線ずれが生じた時の磁場精度について評価した。すなわち、磁場精度が0.01%以内となるコイルの許容できる変形・変位を算出・評価した。

### 3. 解析条件と結果

今回の磁場精度解析では、コイルの発生磁場精度に対して径方向に巻線ずれを生ずる時の磁場精度と軸方向に巻線ずれを生ずる時の磁場精度を評価した。径方向に巻線ずれを生ずる時の磁場精度については、Fig. 2(a)のように、スプリットコイルの内径を固定とし、巻線が径方向に $\Delta r$ あるいは $-\Delta r$ の巻線誤差を生ずる場合のミッドプレーン上の磁場変化率を調べた。結果として、磁場精度が0.01%以内となる水平方向の許容巻線ずれが $\pm 200 \mu\text{m}$ となった。

また、軸方向に巻線ずれを生ずる時の磁場精度について、我々は、Fig. 2(b)のように、スプリットコイル全体が軸方向に $\Delta z$ あるいは $-\Delta z$ 分の巻線ずれを生ずる場合と、Fig.2(c)のように、スプリットコイルを構成する一方のコイルが $\Delta z$ あるいは $-\Delta z$ 分の巻線ずれを生ずる場合と想定した。結果として、スプリットコイルの巻線が垂直方向に $\Delta z$ あるいは $-\Delta z$ の巻線誤差を生ずる場合、磁場精度が0.01%以内となる垂直方向の許容巻線ずれが $\pm 40 \mu\text{m}$ となった。そして、スプリットコイルを構成する一方のコイルの巻線が $\Delta z$ あるいは $-\Delta z$ 分の巻線誤差を生ずる場合、磁場精度が0.01%以内となる軸方向の許容巻線ずれが $\Delta z = 20 \mu\text{m}$ ,  $-\Delta z = 40 \mu\text{m}$ となった。

### 参考文献

1. A. Ishiyama, H.Ueda, et al: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.144
2. H. Ueda, A. Ishiyama, et al: 86<sup>th</sup> CSJ Conference, 2B-a04(2012)

Table 1 Specifications of Main Pancake Coils

	Main Coil 1	Main Coil 2	Main Coil 3	Main Coil 4
Inner Radius	1.0888 m	0.5422 m	1.2 m	1.2 m
Outer Radius	1.4199 m	1.6421 m	1.3658 m	1.3822 m
Height of Each Coil	0.0381 m	0.0082 m	0.0569 m	0.057 m
Gap	0.3856 m	0.3692 m	0.204 m	0.09 m
Current Density	$1.13522 \times 10^8 \text{ A/m}^2$	$1.30277 \times 10^8 \text{ A/m}^2$	$1.14130 \times 10^8 \text{ A/m}^2$	$1.13856 \times 10^8 \text{ A/m}^2$

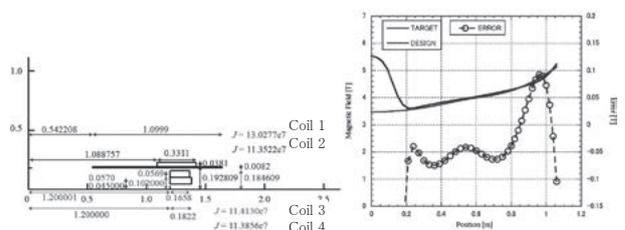


Fig. 1 Setup of Main Coils and Evaluation of Magnetic Field in Mid-Plane

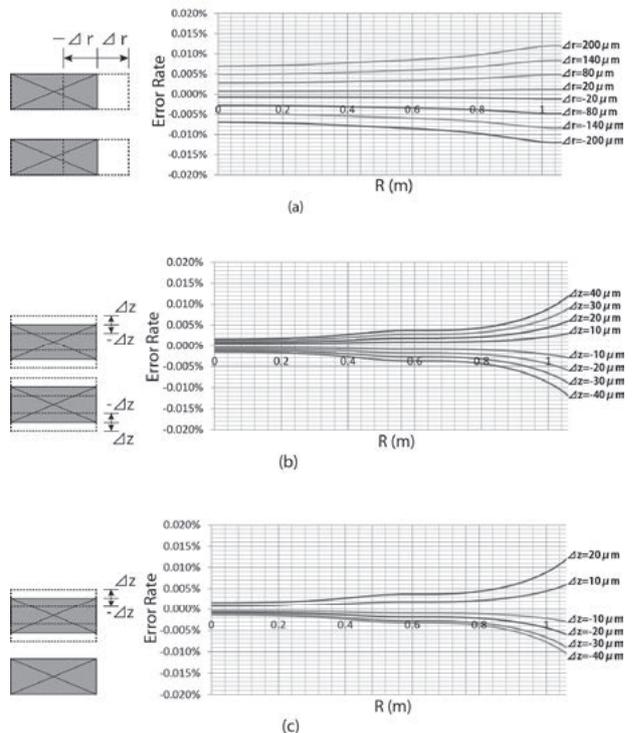


Fig. 2 Result of Magnetic Field Accuracy: (a) Radial Winding Error existed, (b) Axial Winding Error existed in both Coils of DP Coil, (c) Axial Winding Error existed in Single Coil of DP Coil

# 次世代超電導サイクロトロンの開発: YBCO パンケーキモデルコイルにおける巻線精度評価

Development of Next Generation HTS Cyclotron:  
Experiments on winding accuracy for YBCO pancake model coil

狩野 開, 道辻健太, 矢崎 真二郎, 柄澤 彰良, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);  
宮原 信幸(放射線医学総合研究所); 植田 浩史(大阪大学); 鹿島 直二, 長屋 重夫 (中部電力)  
KARINO Hiraku, MICHITSUJI Kenta, YAZAKI Shinjiro, KARASAWA Akira, WANG Xudong,  
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);  
KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)  
E-mail: atsushi@waseda.jp

## 1. はじめに

我々は、高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンの開発・実現を目指している[1]。医療用次世代超電導サイクロトロン用コイルには $\sim 10^{-4}$ の高い発生磁場精度が求められるため、コイル巻線の時の精度を出来るだけ高める必要がある。そこで我々は高精度巻線技術の開発を行い、それに基づいて巻線機を製作した[2]。

今回はこの高精度巻線機を用いて YBCO パンケーキモデルコイルを試作し、レーザー変位計と表面粗さ測定機を用いて定量的にモデルコイルの半径方向と垂直方向の巻線精度を評価したので報告する。

## 2. 実験装置

高精度巻線機を用いて YBCO パンケーキモデルコイルの試作と共に、レーザー変位計(変位計の分解能:  $0.25 \mu\text{m}$ , ただし測定器の分解能は  $1 \mu\text{m}$ )を用いて半径方向の巻き線誤差を、表面粗さ測定機(分解能:  $0.2 \mu\text{m}$ )を用いて軸方向の巻き線誤差を測定した。なお今回、試料線材としてフジクラ社製 YBCO 線材に絶縁層を塗布したものをを用いた。絶縁層を含む線材の厚さは平均  $260 \mu\text{m}$  である。

初めに YBCO 線材の線材厚のばらつきを測定し、その後、巻き枠による誤差、半径方向の巻線誤差を測定した。サンプリングレートを  $1 \text{点}/0.05 \text{度}$  とした。

垂直方向の巻き線誤差の測定条件としてサンプリングレートを  $1 \text{点}/1 \mu\text{m}$ , 走査速度を  $50 \mu\text{m}/\text{s}$  とした。また、測定は FRP 巻き枠から行い、測定開始点の表面粗さを  $350 \mu\text{m}$  とした。

## 3. 実験結果

試作したコイルの寸法はターン数 54, 内径  $100\text{mm}$ , 外径  $134.6\text{mm}$  であった。線材厚が  $260 \mu\text{m}$  より理想コイルの外径は  $128.08 \mu\text{m}$  となる。よって、今回の試作コイルでは毎ターン平均  $60 \mu\text{m}$  の半径方向の巻線誤差が生じていることになる。

図 1 に巻き枠と巻線の変位(コイル径方向)を示す。線厚は  $\pm 20 \mu\text{m}$ , 巻き枠は  $\pm 100 \mu\text{m}$  のばらつきが観測された。半径方向の巻き線誤差は  $\pm 80 \mu\text{m}$  であった。また、巻き線誤差として電流リード接続の際に行われた、はんだ付けの影響がターンの初めに大きく観測された。

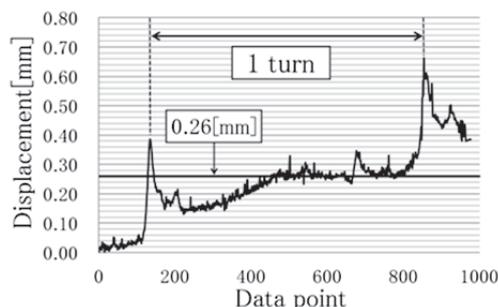


Fig. 1 Displacement of Winding wire

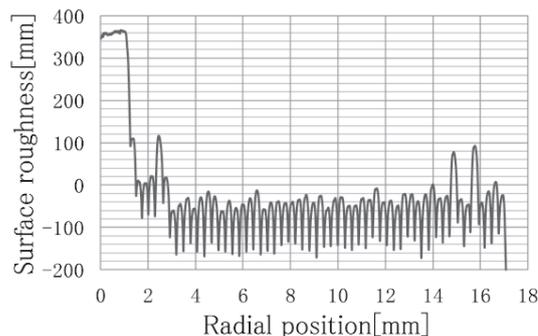


Fig. 2 Radial position vs. Surface roughness

図 2 に半径方向の距離と表面粗さ(コイル軸方向)の関係を示す。コイルの巻き始めと巻き終わりの部分において電流リード接続のはんだ付けの影響によりコイル軸方向の誤差が大きく生じ、最大誤差  $-175 \mu\text{m}$  であった。また、始めと終わりの誤差の大きい部分を除くと  $\pm 80 \mu\text{m}$  であった。今回は製作した巻線機を用いて初めての巻線作業であったことから、コイル巻枠等の寸法精度が不十分であったことから、今後はさらに高い精度での巻線が可能であると考えている。

## 4. 解析

超電導サイクロトロン用コイルの実規模モデルにおいて、今回の評価結果に基づいて垂直方向の誤差が  $\pm 80 \mu\text{m}$  の精度で巻けるとし磁場精度を評価した。図 3 に解析対象の試設計モデル(4 対の円形スプリットパンケーキコイルで構成)[3]を示す。なお  $z=0$  を対称面とするスプリットコイル構成となっている。評価点をビームの取り出しが行われる  $r=1.06\text{m}$ ,  $z=0$  とした。上下のコイル全体が共に  $+80 \mu\text{m}$  ずれた時  $1.92 \times 10^{-7}\%$  の誤差が生じた。上のコイルが  $+80 \mu\text{m}$ , 下のコイル  $-80 \mu\text{m}$  ずれた時  $-1.67 \times 10^{-2}\%$  の誤差が生じ、上のコイルが  $-80 \mu\text{m}$ , 下のコイルが  $+80 \mu\text{m}$  ずれた時  $1.67 \times 10^{-2}\%$  の誤差が生じた。

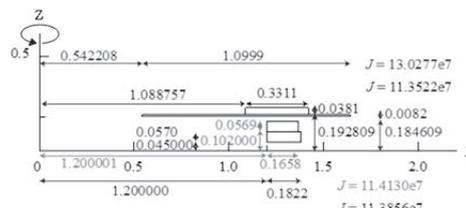


Fig. 3 Trial design model of analysis object

なお、本研究は科研費(基盤研究 A: No. 23246053)に依ったことを付記する。

## 参考文献

1. A. Ishiyama, et al: Abstracts of CSJ Conference Vol. 84(2011) p.134
2. A. Ishiyama, et al: 2B-a03, CSJ Conference
3. H. Ueda, A. Ishiyama, et al: 2B-a04, CSJ Conference