

## 超電導ケーブルシステムへのゲッターポンプの適用

### Adoption of getter pumping system for HTS cable system

渡部 充彦, 増田 孝人 (住友電工);

山口 博史, 棚澤 昌幸, 三村 智男 (東京電力ホールディングス)

Michihiko Watanabe, Takato Masuda (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);

Hirohito Yamaguchi, Masayuki Tanazawa, Tomoo Mimura (Tokyo Electric Power Company Holdings)

#### 1. はじめに

超電導ケーブルシステムの長期運転においては真空断熱層を高真空に保持し、熱侵入量の増加を抑制することが重要となる。このため事前にベークアウトを十分に行うなどの処置に加え、定期的な真空排気を行うなどの対応が必要になる。本稿では従来のターボ分子ポンプに代わり、ゲッターポンプを用いて超電導端末の真空排気を行った結果を報告する。

#### 2. 真空維持の課題

2012年及び2017年に東京電力ホールディングス・旭変電所にて、66kV超電導ケーブルシステムの1年以上にわたる実系統送電運転をそれぞれ実施した[1][2]。その際の課題の一つとして、真空断熱層の真空管理が挙げられる。真空多層断熱方式では気体による熱伝導を抑制するため、真空度を $1 \times 10^{-4}$ Torr以下に保持する必要がある。しかし2017年に実施した実系統運転時に1年間の封止真空推移を観測した結果、真空度は特に夏期の温度上昇や日射の影響により、最終的に端末部においては初期値 $10^{-5}$ Torr台から、 $10^{-3}$ Torr台まで悪化した。2012年の運転では、ターボ分子ポンプによる真空排気を実施し送電には影響がなかったが、将来電力機器として超電導ケーブルを適用する場合、真空ポンプの常時設置、稼働は維持費の点やポンプ異常停止時の影響、バックアップ機構等の考慮が必要となり導入のネックになりかねない。

#### 3. ゲッターポンプの仕様、特長

上記ネックを軽減するため、ターボ分子ポンプに代わりゲッターポンプによる真空排気の検討を行った。本ポンプは多孔質性焼結合金から成るゲッター材への水素の固溶と、活性ガスの化学吸着と内部拡散により気体を捕獲し、排気効果を得るものである。主な得失は、1)コンパクト・軽量かつ機械駆動部がなく故障しにくい、2)捕獲したガスは再活性化(高温下での真空排気)しない限り再放出されない、3)不活性ガス(He、Ar等)は捕獲できない、4)捕獲量が有限(再活性化すれば再利用可能)等である。

#### 4. ゲッターポンプの基礎特性評価

これら得失を踏まえ、ゲッターポンプの基礎特性評価を行った。その結果、超電導ケーブルシステム真空層の残留ガスは $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CO_2$ など活性ガスが主であり、不活性ガス分圧は $1 \times 10^{-4}$ Torr未満で無視できること、端末部の封止真空度を $1 \times 10^{-3}$ Torrから $1 \times 10^{-4}$ Torrとするためのガス排気量は約3Torr・Lと試算され、今回使用するゲッターポンプの排気量

は今回の対象ガスに対して約100 Torr・L以上と十分な特性であること、模擬真空槽による試験でも良好な排気特性が得られたことなどにより旭変電所の実系統システム端末真空槽を用いた排気試験を系統接続終了後に実施した。

#### 5. 実系統システムへの適用

ゲッターポンプの活性化を実施した後実系統システムの端末真空槽へ接続し、真空排気を行った結果をFig.1に示す。封止真空度が $4.4 \times 10^{-3}$ Torrの時点から排気を行い、約10時間で $10^{-6}$ Torr台まで到達、その後約3週間の連続排気を実施し、期間中 $10^{-6}$ Torrオーダー以下を維持できることを確認した。排気量は計算上約13Torr・Lである。

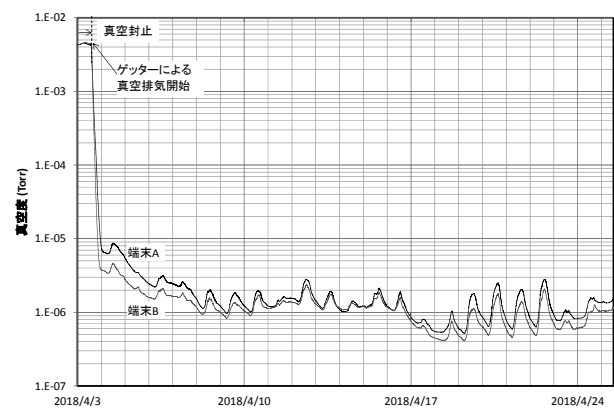


Fig1. Vacuum performance of getter pump for HTS cable termination

#### 6. まとめ

ゲッターポンプを実系統連系試験で用いた端末真空槽の真空引きに適用し、良好な排気特性を得ることが出来た。

#### 謝辞

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術機構の助成により実施したものである。

#### 参考文献

- [1] Maruyama et.al. 'Results of Japan's first in grid operation of 200 MVA Superconducting Cable System', IEEE Trans.on Applied Superconductivity, Vol 25, Issue 3, Jun., 2015.
- [2] 棚澤他、「高温超電導ケーブル実系統連系の終了」、電気学会 B 部門大会、329(2018).

# 三相同一軸型高温超電導ケーブルの低熱伝導層が ケーブルの長距離化に及ぼす影響

## Influence of Low Thermal Conductive Layer on Transmission Cable Length in Tri-axial HTS Cable.

遠藤 夏実, 長崎 陽, 宮城 大輔, 津田 理(東北大)

ENDO Natsumi, NAGASAKI Yoh, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: natsumi.endo.t7@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

我々は、超電導ケーブルを洋上風力発電の海底送電ケーブルに用いることを目指し、三相同一軸型超電導ケーブルの長距離化に有効なケーブル構成について検討している<sup>[1]</sup>。そして、外部からの侵入熱による冷媒の温度上昇を抑制するために、熱伝導率の低い低熱伝導層をケーブル内に設けることが、ケーブルの長距離化に有効であることを明らかにしてきた<sup>[2][3]</sup>。しかし、長距離化に適したケーブルの設計指針を確立するには、ケーブルの長距離化に有効な低熱伝導層の適用位置や厚さを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、低熱伝導層の適用位置や厚さが、ケーブル内の電磁的・熱的現象や1つの冷却ステーションで送電可能なケーブル長に及ぼす影響について検討した。

### 2. 解析方法

本解析に用いた三相同一軸型超電導ケーブルの諸元をTable 1に示す。また、その解析モデルをFig. 1に示す。なお、各相は、銅テープで構成されたシールド層、超電導層、絶縁用のPPLP<sup>®</sup>により構成され、コルゲート管に收容されると仮定した。ケーブルの冷却は1つの冷却ステーションで行うとし、循環系の構築が簡易な向流を採用した。また、冷媒は内側流路、外側流路の順に流れ、回帰するものとした。ケーブル内の熱解析では、銅テープ線の渦電流損、超電導線の交流損失、PPLP<sup>®</sup>の誘電体損失、冷媒の摩擦損失、ケーブル外部からの侵入熱を考慮し、各相の超電導線における交流損失は、有限要素法による薄板近似モデルを用いた電磁界解析により評価した。なお、ケーブル最長距離は、冷媒温度で決定される最長距離と冷媒圧力で決定される最長距離の短い方に依存するとし、断熱管内半径は、ケーブル長が最も長くなるように最適化した。

### 3. 解析結果及び考察

Fig. 2に低熱伝導層をケーブル導体部の内側または外側に設けた場合の低熱伝導層の厚さに対する1つの冷却ステーションで冷却可能なケーブル最長距離を示す。Fig. 2より、低熱伝導層をケーブル導体部外側に設けるよりも、内側に設ける方が、ケーブル最長距離が長くなることがわかった。これは、低熱伝導層を設ける位置によって、超電導層の交流損失が変化するためである。低熱伝導層をケーブル導体部の内側に設ける場合は、外部からの熱侵入による導体部の温度上昇を抑制できないが、ケーブルの導体部径が大きくなり、各相の電流負荷率低下により超電導層の交流損失を低減できるためと考えられる。

また、Fig. 2より、三相同一軸型超電導ケーブルに低熱伝導層を設ける場合、ケーブルの長距離化に適した低熱伝導層の厚さが存在することがわかった。Fig. 2の領域Iでは、低熱伝導層の厚さが十分でないため、外側冷媒から内側冷媒への熱伝搬を十分に抑制できていない。このため、低熱伝導層の厚さを増加すると熱伝導抑制効果が向上し、ケーブル最長距離が増加した。一方、領域IIでは、低熱伝導層が厚くなるにつれて、熱伝導抑制効果は向上するが、同時に断熱管内半径が大きくなるために、外部からの侵入熱が大きくなり、

冷媒である液体窒素の冷却能力を超え、ケーブル最長距離が減少した。この様に、低熱伝導層の厚さ増加による外側冷媒から内側冷媒への熱伝導抑制効果の増大とケーブル外部からの侵入熱増加による温度上昇は、トレードオフの関係にあるため、低熱伝導層の厚さに対するケーブル最長距離には、極大値が存在する。したがって、ケーブル内において、内側冷媒の入口温度が最小かつ外側冷媒の出口温度が最大となる厚さの低熱伝導層を導体層の内側に設けることが、ケーブルの長距離化に有効であることがわかった。

Table 1 Specifications of analytical model of an HTS tri-axial cable with low thermal conductive layer.

Nominal voltage [kV]	6.6
Transmission capacity [MW]	40
Outer radius of inner refrigerant flow path [mm]	20.89
Twist pitch [mm]	500
Critical current at 77 K [A]	200
Cu layer thickness [mm]	0.01
PPLP <sup>®</sup> insulation thickness [mm]	2.0
Thermal conductivity of low thermal conductive layer [W/m/K]	0.018
Flow rate of LN <sub>2</sub> [L/min]	60
LN <sub>2</sub> inlet temperature [K]	65
LN <sub>2</sub> inlet pressure [MPa]	1.0

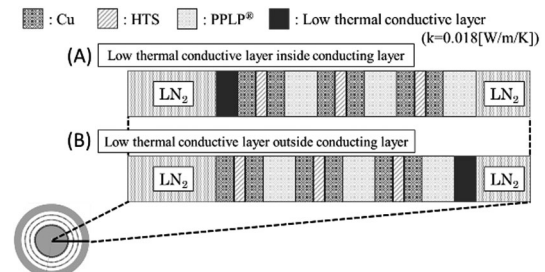


Fig. 1. Analytical model of an HTS tri-axial cable.

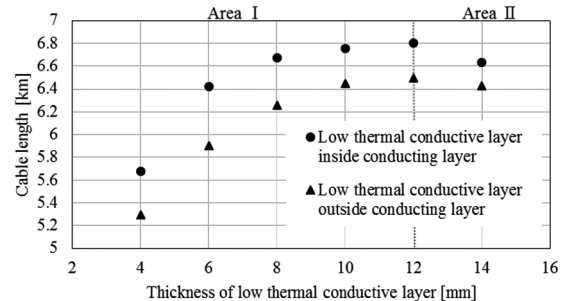


Fig. 2. Dependence of maximum cable length on thickness of low thermal conductive layer.

### 参考文献

1. D. Miyagi, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 4 (2018) 17662561.
2. N. Endo, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.159
3. N. Endo, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29, No. 5 (2019) 2904546.

# 鉄道用超伝導直流送電の研究開発(S-イノベ成果の報告)

## Superconducting DC power transmission for railway (Project report for S-innovation)

富田 優(鉄道総研)

TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute)

E-mail: tomita.masaru.19@rtri.or.jp

### 1. はじめに

信頼性、利便性、経済性、環境調和性を有する鉄道は、エネルギー消費の合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していく。鉄道技術基盤で電力・電気技術の果たす役割は大きく、ここでは、超伝導の持つ低損失、高密度電流、高磁場といった特性に基づいた新しい機器やシステムが大いに活躍できる。鉄道き電システムに超伝導技術を適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電食の抑制など様々な効果が期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超伝導き電ケーブルの開発を進めている[1,2]。

### 2. S-イノベにおける超伝導き電ケーブルの開発

超伝導技術の鉄道システムへの適用に向け、これまで2007年から鉄道用超伝導直流送電の研究開発に着手し、2009年に国立開発研究法人 科学技術振興機構(JST)の長期の研究開発事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の研究課題である「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」が始動した。

当初は、基礎となる材料の高度化を目的とし、SEMやTEMによる微細組織の観察や材料合成方法の検討により、高 $J_c$ の指針を得た。また、超伝導き電ケーブルの設計に必要な、超伝導線材の機械特性評価、過電流特性などの各種基礎実験を行い[3]、その結果をもとに、鉄道用超伝導き電ケーブルを試作、通電や漏洩磁場に関する評価を実施した。

信頼性の高い冷却システムとして、冷却システムの全てのユニットを一体化した一体型冷却システムを開発し、超伝導き電ケーブルシステムを構内試験線に敷設した。冷却および電気的な評価試験により、鉄道現場に設置するシステムとしての健全性を確認した後、試験列車への超伝導送電を実施し、電車の走行試験に国内外で初めて成功した。

構内試験線で実施したこれらの試験結果を参考にして、実路線を選定し、鉄道現場における試験に着手した。実際の設備への接続や超伝導き電としての動作確認など、実用化に向けた基礎的な技術検証を目的として、営業線において夜間走行試験を実施した。き電回路へ組み込んだ超伝導き電ケーブルを介し、営業線を走行する実車両への送電に成功し

(Fig.1)、超伝導き電ケーブルが直流電気鉄道へ適用できることを確認した[4]。

現在も引き続き、超伝導ケーブルの鉄道への導入に向けた研究開発を進めている。超伝導き電ケーブルの単位長さは、輸送の制約から400~500mで構成されるが、事業者からは、より導入効果が得られる数kmにわたるシステムの実現が期待されている。その期待に応えるべく、JST 未来社会創造事業の「高温超伝導線材接合技術の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」において接続技術の開発を、NEDOの「運輸分野への高温超伝導適用基盤技術開発」において長距離冷却技術の開発を、それぞれ進めている。

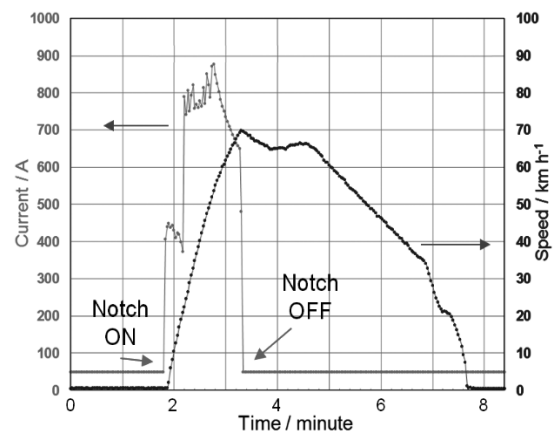


Fig. 1 The result of train running test

### 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究開発事業・戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)の助成を受けて実施した。

### 参考文献

1. M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
2. Superconductors drive trains, *Nature* **542** (2017) 275.
3. 福本祐介 ほか, 第86回秋季低温工学・超電導学会 講演概要集 p.101 (2012).
4. 富田優 ほか, 第87回秋季低温工学・超電導学会 講演概要集 p.30 (2013).

# 電動推進航空旅客機に用いる超電導同期機の電磁特性の比較

## Comparison of electromagnetic characteristics of superconducting synchronous machines for electrified aircraft propulsion systems

寺尾 悠, 石田 裕亮, 大崎 博之(東大)  
 TERAO Yutaka, ISHIDA Yusuke and OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)  
 E-mail: y.terao@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

### 1. Introduction

Electrified aircraft propulsion systems have been studied actively [1] and the propulsion systems demand electrical motors with higher output density (> 16 kW/kg) and higher efficiency (> 98%). The superconducting (S.C.) motors are one of the good candidates for the future aircraft systems. Using FEM, we designed two kinds of the S.C. motors: partial S.C. motors (PSCMs) and fully S.C. motors (FSCMs). And we compared and discuss the electromagnetic characteristics of the two S.C. motors in this presentation.

### 2. Superconducting Motor Specifications

Table 1 shows fundamental specifications of the two S.C. motors. We consider aircraft with 180 seats and then 44 MW for take-off is required. For this system, 3.0 and 5.0 MW motors are designed. The PSCM is made of YBCO field coils and copper armature windings. And the FSCM employed YBCO field coils and MgB<sub>2</sub> armature windings. These S.C. wires are cooled at 20 K with liquid hydrogen. The diameter of the motors is limited less than 800 mm. Also, the cryostat for the motors are made of FRP.

Figs 1 and 2 show 2-dimensional analysis model of the PSCM and the FSCM. Based on the preliminary design study results, number of poles for 3.0 and 5.0 MW PSCM was 14 and 16, respectively. Also, based on the reference [2], 4-pole was chosen for the 3.0 and 5.0 MW FSCM structures. We will evaluate the output density and efficiency with these models.

### 3. Analysis Results

Table 2 shows the analysis and design results of the two S.C. motors. The structure of the PSCMs have large diameter and shorter length. On the other hand, the FSCMs are almost the same of the diameter and the length. This structural difference came from the difference of the pole-pitch of the two S.C. motors. As a result, the output density of the FSCM exceeded over 20 kW/kg, while the PSCM reached 17 kW/kg in case of the 5.0 MW machine. Also, as for the efficiency of the motors, the two PSCMs reached 98%. However, the efficiency of the two FSCMs was 1% higher than that of the PSCMs. One of the reasons are the choice of the number of poles. According to the results, 5.0 MW PSCM, 3.0 MW and 5.0 MW FSCM can be the good candidates for the electrified aircraft propulsion systems. However, we should also consider system redundancy for the future aircraft when we chose the motor output.

Table 1. Superconducting Motor Specifications

Motor type	PSCM	FSCM
Motor output	3.0, 5.0 MW	
Rotation speed	5000 rpm	
Motor diameter	< 800 mm	
Cooling temperature	20 K (Liquid Hydrogen)	
Field coils	YBCO	YBCO
Armature Windings	Cu (300 K)	MgB <sub>2</sub>

### 4. Conclusions

We have designed and compared two kinds of S.C. motors for future aircraft systems. The motor with higher output can reach higher output density. However, when we decide the rated power of the S.C. motors, system redundancy should be taken into consideration.

### Acknowledgement

This research is partially based on results obtained from a support by Nagamori Foundation.

### References

- C. E. Jones, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.26, No.6 (2016), pp. 1-9
- Y. Terao, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.29, No.5 (2019), pp. 1-5

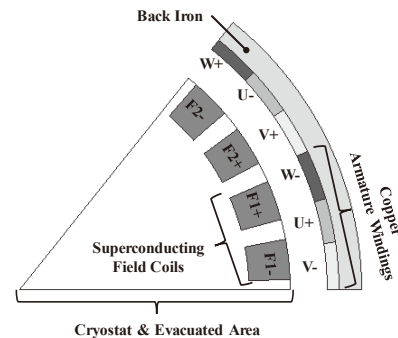


Figure 1. Analysis model of the PSCM structure (14-pole).

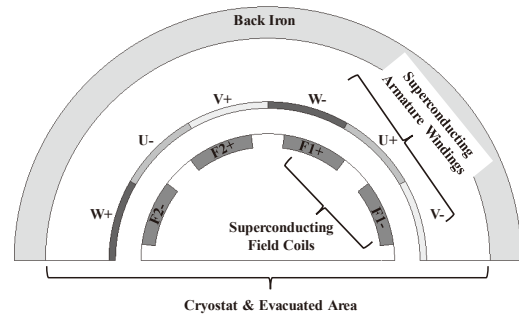


Figure 2. Analysis model of the FSCM structure (4-pole).

Table 2. Superconducting Motor Characteristics

	3.0 MW	5.0 MW	
PSCM	Number of Poles	14	16
	Diameter	713 mm	793 mm
	Length	158 mm	171 mm
	Output Density	14 kW/kg	17 kW/kg
	Efficiency	98%	98%
FSCM	Number of Poles	4	4
	Diameter	350 mm	400 mm
	Length	356 mm	434 mm
	Output Density	20 kW/kg	23 kW/kg
	Efficiency	99%	99%



# 航空機電動化のための推進用界磁超電導モータの電磁設計

## Electromagnetic Design of Propulsion Motors with Superconducting Field Winding for Electrified Aircraft

石田 裕亮, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大)

ISHIDA Yusuke, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: Ishida-yusuke537@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

近年の航空需要の増大により、航空機にはより一層の低炭素化・高効率化が求められている。このような状況下で、航空機の推進システムへ、従来のターボファンエンジンに代わり電気モータを使用する電動推進式航空機が提案されており、永久磁石型同期モータ(PM モータ)を用いた 1 人乗り小型プロペラ機の実証試験は既に行われている。更なる大型機への技術拡張も検討されているものの、100 席以上の航空旅客機の電動推進化には 16 kW/kg 以上の高出力密度のモータが必要とされている[1]。しかし、従来の PM モータの出力密度は 5 kW/kg 程度であることを踏まえると、大幅な出力密度の改善が必要である。本発表では、全超電導モータ(FSCM)に比べ、多極化による出力密度向上が期待できる界磁超電導モータ(PSCM)について理論解析式を用いた電磁設計を行い、モータ出力と回転数が出力密度に与える影響を考察した結果を報告する。

### 2. モータ仕様

Table 1 に PSCM の仕様を示す。Fig. 1 は 12 極の場合の PSCM の 1/12 モデルを表したものである。界磁コイルには臨界温度が高く、良好な  $J_c - B$  特性を示す YBCO 線材を用いることとし、電機子巻線は水冷の銅線を想定する。YBCO 線材の運転温度は液体水素温度の 20 K とした。180 席程度かつ離陸時最大出力 44 MW の航空旅客機に PSCM を搭載することを想定し、PSCM の出力を 1, 2, 3, 5, 7 MW とした。これは、それぞれ 44, 22, 15, 9, 7 基の PSCM を航空機に搭載することに相当する。回転数は 5000, 6000, 7000 rpm とした。ファンの直径は 1.6 m を想定しており、回転数が 7000 rpm を超える場合はファンの翼端が音速を超えるため考慮していない。界磁コイル-電機子巻線間のギャップはクライオスタットの壁の厚さ等を考慮して 35 mm とした。モータ直径、磁気装荷、極数は変数とし、それぞれの場合で出力密度が最大となるよう値を設定した。

### 3. 設計結果

Table 1 の基本仕様に従い設計した結果得られた出力密度を Fig. 2 に、効率を Fig. 3 に示す。Fig.2 及び 3 から、モータの出力及び回転数が増加するに伴って、出力密度と効率は増加している。特に、出力 5 MW の回転数 6000 rpm 以上、また出力 7 MW の全回転数において出力密度が航空旅客機に必要な 16 kW/kg を達成している。バックヨークの体積当たりの鉄損は印加磁界の周波数に伴って増加するものの、出力密度増加によるバックヨークの体積の減少の効果が大きく、鉄損の総量は減少し効率が改善する傾向が見られた。

### 4. まとめと今後の予定

本研究では理論解析式による設計により、PSCM の出力密度及び効率が出力や回転数に伴って増加することを明らかにした。また、PSCM は航空旅客機に必要な 16 kW/kg 以上の出力密度の達成が見込める結果となった。一方で、モータ出力はシステムの冗長性に、回転数はパワーエレクトロニクスやファン等に影響を及ぼすと考えられるため、今後は周辺システムに配慮した設計を行っていく。

### 参考文献

1. B. Łukasik, et al.: ASME Turbo Expo 2017, Vol. 1 (2017) p. V001T01A017

Table 1 PSCM specifications

Motor output	1, 2, 3, 5, 7 MW
Rotational speed	5000, 6000, 7000 rpm
Line-to-line voltage	1.41 kV
Diameter	< 800 mm
Electric loading	120 kA/m
Field coils	YBCO
Armature windings	Copper

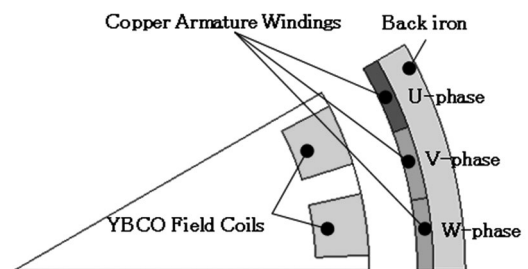


Fig. 1 Analysis model of a 12-pole PSCM

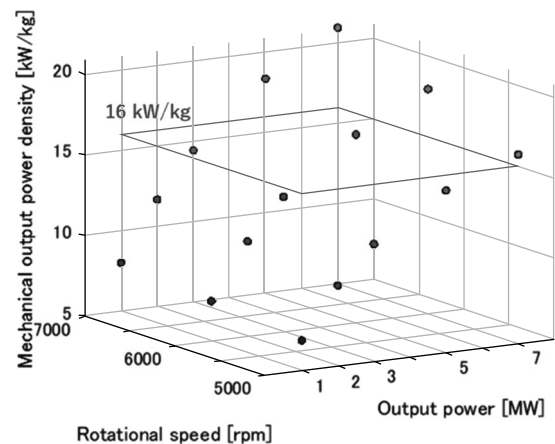


Fig. 2 Mechanical output power density of PSCM design cases

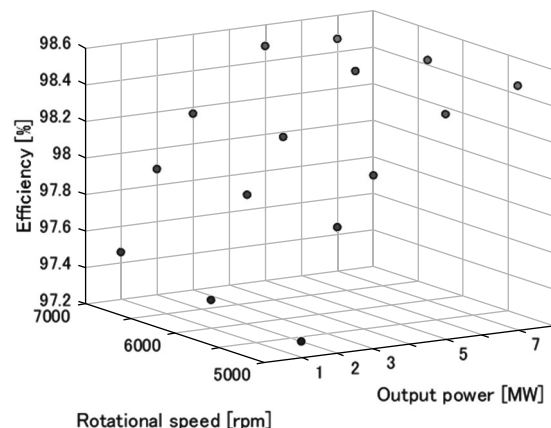


Fig. 3 Efficiency of PSCM design cases

## 閉磁路型収束着磁法を用いた高温超電導回転機の電磁解析とコイルの評価試験

## Evaluation of HTS winding for rotating machine with closed circuit magnetization

門脇 駿, 都築 啓太, 山村 昇, 岩月 峻大, 及川 大, 塚本 武彦(豊田高専)

KADOWAKI Shun, TSUZUKI Keita, YAMAMURA Sho, IWATSUKI, Takahiro, OIKAWA Dai, TSUKAMOTO Takehiko (NITTC)

E-mail: D1802@toyota.kosen-ac.jp

## 1. はじめに

近年、地球温暖化などの問題から、船舶用の推進システムに関しても環境負荷の低減が求められている。

船舶用推進機においては、従来主流であったディーゼルエンジンによる推進システムから、電気推進システムを導入する事による環境対応が選択肢の1つとして考えられている。電気推進システムは、推進用回転機の小型化などにより燃費が向上することが知られており、超電導材料を応用した超電導回転機が様々な機関で研究開発されている。超電導材料を回転機に応用する際には、界磁部に励磁した超電導コイルや、着磁したバルク磁石を用いる構造が一般的である。

しかし、従来の超電導コイルやバルクを界磁とした回転機には、回転物に大電流を流す機構や回転機とは別に着磁を行う機構を組み込む必要があるなど装置の複雑化、大型化が課題となっていた。そこで超電導回転機構造の単純化や小型化が可能となる着磁法の研究と、要素技術の成立性を検証する実証試験が必要である。

我々のグループでは、回転機の電機子コイルに直流の電流を印加し、回転子表面に配置したバルクに着磁を行うことで界磁極を形成する閉磁路型収束着磁法[1,2]を考案した。

## 2. 研究目的

これまでに閉磁路型収束着磁法を実現する超電導電機子を用いた 15 kW 級回転機の検討を、電磁解析ソフトウェア (MagNet7) を用いて行った。界磁極形成や運転の基礎原理が確認されたため、小型の超電導コイルの検証と大型化に向けての検討の準備ができた。

本研究は 15 kW 級の成果をもとに、小型試作コイルでの通電試験を実施し、大型化した 1 MW 級モデルを有限要素法による電磁解析を用いた概念設計の実施を目的とする。

## 3. 実験方法および解析モデル

実用化に向けた実験として、小型試作超電導コイルの直流及び交流の通電試験を実施する。これらの結果をもとに、出力 1 MW の船舶推進用のラジアルギャップ型超電導回転機の検討を行う。ローター表面には Gd 系のバルクを使い、電機子コイルには Bi2223 の超電導線材を想定している。極数やバルクの厚みなど様々な検討を行ったが、本概要では、電機子の配列と巻き数の検討の一部を例として示す。

Fig. 1 に解析モデルを示す。超電導コイルを1層当たり 300 turn のダブルパンケーキコイルとした。まず、同巻数とした電機子の配列について、2層コイルを用いた Model 1 と、1層コイルによる Model 2 で比較を行った。さらに、電機子を3層、4層...と多段化することによる、超電導バルク体への磁束密度および回転機出力について比較、検討を行う。

## 4. 結果

小型試作超電導コイルの通電試験より 30 K において、直流 200 A 以上の通電が確認された。さらに交流電流については 77 K において、周波数 20 Hz 以下で 20 A 以上の通電が可能であることが分かった。

通電試験の結果より、電機子電流は着磁時 DC 200 A、運転時 AC 20 A として 1 MW 級回転機の解析を行った。

Fig. 2 に電機子コイルの配列を変化させた Model 1 および Model 2 の着磁時におけるバルク表面への印加磁束密度分布を示す。Model 2 が Model 1 と比較して、着磁時の最大磁束密度および総磁束が増大した。加えて出力トルクの平均値に対するトルクリップルは 3 % 以下であった。

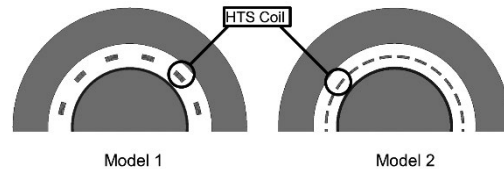


Fig. 1 The array of HTS coils

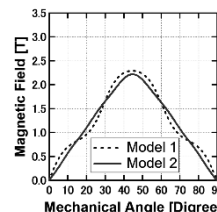


Fig. 2 Applied magnetic field distribution in different HTS winding design

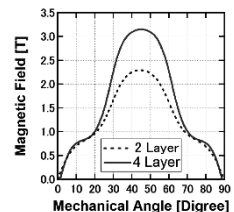


Fig. 3 Applied magnetic field distribution in different layers of HTS winding

Table 1 Parameters for HTS motor

Parameters	Values
Output	1,000 kW
Rotating Speed	106 rpm
Number of Poles	4
Outer diameter of Rotor	250 mm
Thickness of RotorCore	150 mm
Thickness of Bulk	10 mm
Outer diameter of Stator	1000 mm
Thickness of Stator	150 mm
Length (straight)	1,000 mm

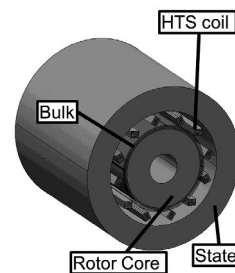


Fig. 4 The structure of 1MW HTS motor

Fig. 3 に電機子コイル層数に対する印加磁束密度分布の変化を示す。出力トルク等の観点から、電機子コイルは4層のモデルを最適モデルとして選定した。Fig. 4 に 1MW 級回転機のモデルについて電磁解析による最適化を行ったモデルの外観、Table 1 にそのパラメータを示す。

## 5. まとめ

本研究では、閉磁路型収束着磁法を用いた 1 MW 級超電導回転機の概念設計を実証の結果と電磁解析により行った。

検討の結果より、機器内のバルク体表面において、界磁極に 3 T 以上の磁束印加が可能となる超電導コイル構造の目処を立てた。トルク密度を計算した結果、本研究での構造を適用することにより既存の 1 MW 級超電導回転機に比べ体積あたりの出力が大きくなることがわかった。これにより、閉磁路型収束着磁法を用いることで従来よりも小型な超電導回転機の実現が期待される。

## 参考文献

1. K. Tsuzuki, et. al., Design of Bulk Rotating Machine Using Closed-Circuit Magnetization, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, Early Access, Page 1-1
2. K. Tsuzuki, et. al., Magnetic Field Analysis of High-Temperature Superconductor Field Pole Using Convergence Magnetized Method with Closed Magnetic Circuit, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.44

# パルス着磁した Mg-B バルク超伝導体からの磁場散逸現象

## Magnetic Flux Dissipation from Mg-B Bulk Superconductors Activated by Pulsed Field

岡 徹雄(芝浦工大); 横山 和哉(足利大); 沖 隼光(新潟大); 山中 健悟(芝浦工大); 小川 純, 福井 聡(新潟大);  
ユリアナ シャイター, ウォルフガング ハスラー (IFWドレスデン); ロンジ ダディエル, 坂井 直道, ムラリダ ミリアラ,  
村上 雅人(芝浦工大); ノウデム ジャック(カーン大)

OKA Tetsuo (SIT); YOKOYAMA Kazuya (ASHITEC); OKI Hayami (Niigata Univ.); YAMANAKA Kengo (SIT); OGAWA Jun,  
FUKUI Satoshi (Niigata Univ.); Juliane SCHEITER, Wolfgang HAESSLER (IFW Dresden); Longji DADIEL, SAKAI Naomichi,  
Muralidhar MILYALA, Masato MURAKAMI (SIT); Jacques Noudem (Univ. Caen)  
E-mail: okat@sic.shibaura-it.ac.jp

### 1. はじめに

Mg-B 系のバルク超伝導体はその等方性や金属間化合物である加工性の良さなどから、新たな捕捉磁場磁石 Trapped Field Magnet として発展が期待できる。しかし、その密度などの諸特性は画一的でなく、工法に依存することが知られている。広く使われている 2 つの製法で作成した MgB<sub>2</sub> バルク試料によるパルス着磁での磁場侵入とその捕捉磁場性能を比較した。スパークプラズマ焼結をパルス磁場で励磁した場合の磁場捕捉現象を実験的に調査し、侵入した磁束がフラックスジャンプによって試料から散逸する挙動を評価した。試料はホッププレスで合成し、無添加の試料とこれにチタンを添加した試料を比較した。実験では試料への磁束の進入の時間変化をホール素子によって詳細に測定した。

### 2. 実験方法

MgB<sub>2</sub> 試料の作成はホットプレス(HP)法とスパークプラズマ焼結(SPS)法による。HP は IFW ドレスデンで作成し、SPS はカーン大から提供を受けた。Table1 にその諸元を示す。SPS では 9.6 mm の厚い試料が作成でき、わずかだが高密度な試料が得られている。パルス着磁は 0.5 T から 2.2 T までの、立ち上がり時間 10 ms の磁場を 60 mF の電源によって印加した。磁場測定は FW ベル社の BHT921 を用いて、バルク試料上面中央で測定した。

### 3. 実験結果

- (1) 磁場遮蔽効果; 成分組成がわずかにことなるが、Fig.1 によれば、磁場侵入の開始点が試料厚さに依存することがわかる。MgB<sub>2</sub> の均質性から磁場侵入に対する遮蔽効果はその厚さによく依存することがわかった。
- (2) 磁束侵入挙動; Fig.2 から、磁場侵入は 3 つの型があることがわかる。低磁場印加では侵入した磁場 BP は減衰せず(No Flux Flow)、高磁場ではフラックスジャンプ(Flux Jump)が発生して捕捉磁場を散逸させる。その間では速いフラックス流(Fast Flux Flow)が磁場散逸を起こして発生して捕捉磁場性能を下げる事がわかる。
- (3) 磁場捕捉性能; 磁場捕捉性能は今回の試験では 0.77 T と 0.75 T であって有意差はなかった。磁場捕捉率の定義を行い、そのパラメタから 2 つの製法によって、3 つの磁場侵入形態が観測された[1]。偶発的な FJ と系統的な FFF の発生があり、今後の実験で明らかにする。

### 4. 結論

製法の違いによる MgB<sub>2</sub> バルク磁石の磁場捕捉性能をパルス着磁により評価した。最大で 0.77 T の磁場捕捉が 1.2 T の磁場印加により得られたが、頻繁な FJ の偶発的な発生によってその捕捉磁場の散逸が見られ、捕捉磁場性能は大幅に減退した。その発生は Ti 添加により高印加磁場側にシフトすることが観測され、材料組成やその合成法によって改善される可能性を示した。

Table 1 Specification of bulk samples

Sample name	Diameter[mm]	Thickness[mm]	Density[g/cm <sup>3</sup> ]	Remarks	Processes
MH104b	20.10	3.30	2.31	Ti 2.5wt%	HP
F526	19.90	9.60	2.62	pure	SPS

HP: hot pressing, SPS: spark plasma sintering

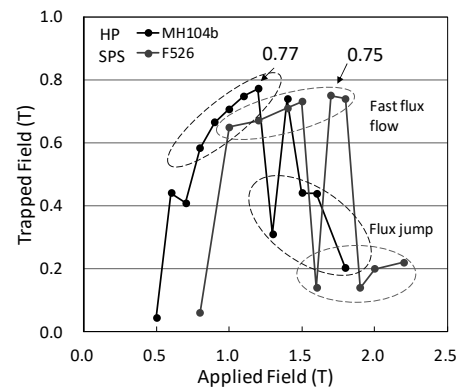


Fig.1 Penetration Fields in various pulsed-field applications

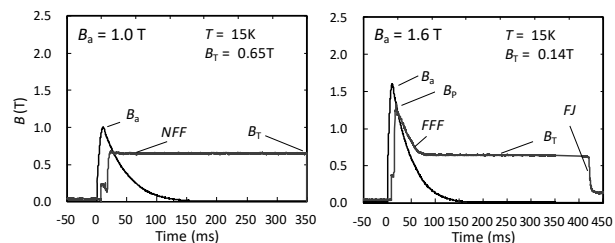


Fig.2 Evolutional profiles of flux invasion at 1.0 and 1.6 T

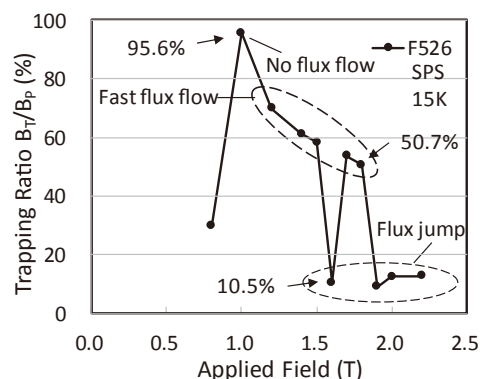


Fig.3 Trapping Ratio  $B_T/B_p$  on SPS sample

### 参考文献

1. Tetsuo Oka, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2908752, 01 April 2019, pp. 1-5



# パルス着磁における REBaCuO リングバルク及びディスクバルクにおける 応力解析シミュレーション

Numerical simulation of the mechanical stress in REBaCuO superconducting  
ring and disk bulks during pulsed-field magnetization

平野 達也, 藤代 博之, 内藤 智之 (岩手大); Mark Douglas Ainslie (Cambridge 大)

HIRANO Tatsuya, FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.); Mark Douglas Ainslie (Univ. of Cambridge)

E-mail: g0318132@iwate-u.ac.jp

## 1. はじめに

バルク超電導体の特徴的な応用の一つである超電導バルク磁石は強力な磁場発生源としての実用化に向け、バルク作製技術及び着磁技術の研究が進んでいる。バルク超電導体の着磁方法の一つであるパルス着磁 (Pulsed-Field Magnetization, PFM) は、数ミリ秒の増磁過程と減磁過程から構成されるため、電流磁気相互作用による電磁応力は複雑な挙動を示す[1]。高い着磁特性を示す REBaCuO 系超電導バルクは脆いセラミックス材料であり、捕捉磁場は超電導特性に伴い発生する電磁力と材料強度により制限される。今後の超電導バルク応用において、バルク体の応力挙動の理解は重要な課題となる。本研究では有限要素法を用いて電磁界・温度-応力解析を行い、異なる内径のリング及びディスク形状の REBaCuO バルクに対しパルス着磁における応力を算出し、バルク形状に伴う電磁応力及び熱応力を検討した。

## 2. 解析方法

Fig. 1 に示すように (a) ディスクバルク (直径 64 mm、厚さ 20 mm) 及びリングバルク (外径 64 mm、各内径 (b) 4 mm、(c) 20 mm、(d) 40 mm、厚さ 20 mm) の 4 つの異なる形状をした REBaCuO バルクに対して、ソレノイドコイル (内径 99 mm、外径 121 mm、高さ 50 mm) を用いたパルス着磁を検討した。バルクはコールドステージ上に配置し、バルクの  $c$  軸方向からの冷却を想定した。バルクの超電導特性は Kim model ( $B_0 = 1.3$  T、 $\alpha = 3.45 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup>) を仮定した。着磁温度  $T_s = 65$  K、印加磁場  $B_{ex} = 4$  T (立ち上がり時間 13 ms) のパルス磁場により着磁を行った。電磁界・温度-応力シミュレーションには PHOTO-series ((株) フォトン) を用い、3 次元有限長モデルを構築し解析を行った。

## 3. 解析結果

Fig. 2(a) に各形状におけるバルク中心での捕捉磁場  $B_t$  の時間依存性を示す。内径の拡大に伴い磁束遮蔽効果は弱まり、侵入磁場が増大した。Fig. 2(b) に各形状におけるバルク内径での電磁フープ応力  $\sigma_\theta$  の時間依存性を示す。増磁過程において、侵入磁場の増大に伴い圧縮応力は増大し、 $t = 11$  ms 近傍で最大となった。圧縮応力から引張応力に変化する減磁過程において、 $t = 30$  ms 近傍で引張応力は最大となった後、捕捉磁場の低下に伴い減少した。Fig. 3(a) に、各形状における  $t = 11$  ms のバルク中心 ( $z = 0$  mm) における電磁フープ応力  $\sigma_\theta$  分布を示す。ディスクバルクはボアによる応力集中が生じないため、リングバルクと比較して最大圧縮応力は小さくなった。リングバルクは内径の減少に伴い最大圧縮応力は増大した。これは、磁場印加時に発生する遮蔽電流の面積が増大したためだと考えられる。Fig. 3(b) に、各形状における  $t = 30$  ms のバルク中心 ( $z = 0$  mm) における電磁フープ応力  $\sigma_\theta$  分布を示す。内径の拡大に伴い最大引張応力は増大した。これはバルク形状によるバルク内周への応力集中のためだと考えられる。以上より、異なるバルク形状に対するパルス着磁における応力挙動は誘導電流の面積とバルク形状による応力集中の両面によって決定されると言える。

講演では熱応力を加え、さらに詳細なバルク形状に対するパルス着磁における応力挙動について磁場、熱の観点から議論する。

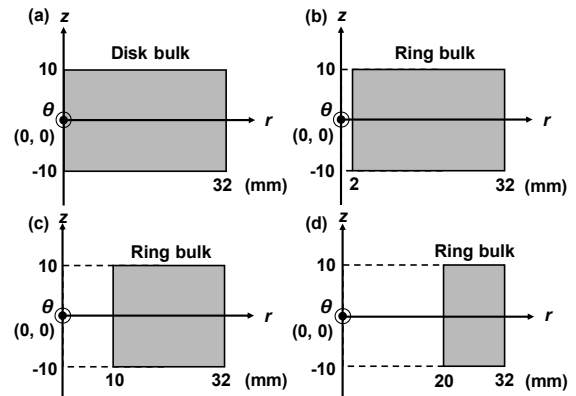


Fig. 1 Schematic view of numerical models for the (a) disk bulk (ID = 0 mm), (b) ring bulk (ID = 4 mm), (c) ring bulk (ID = 20 mm) and (d) ring bulk (ID = 40 mm).

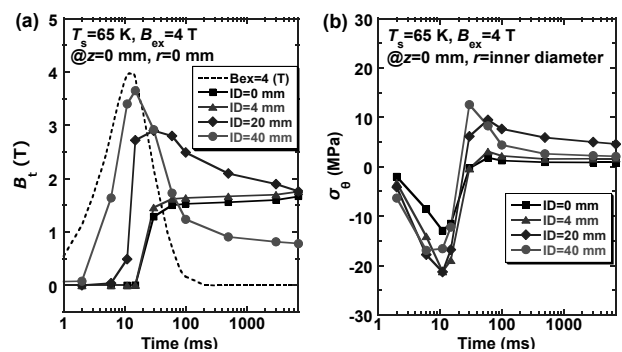


Fig. 2. Time evolution of (a) the trapped field,  $B_t$ , and (b) the electromagnetic stress,  $\sigma_\theta$ , for the various bulk configurations during PFM ( $T_s = 65$  K,  $B_{ex} = 4$  T).

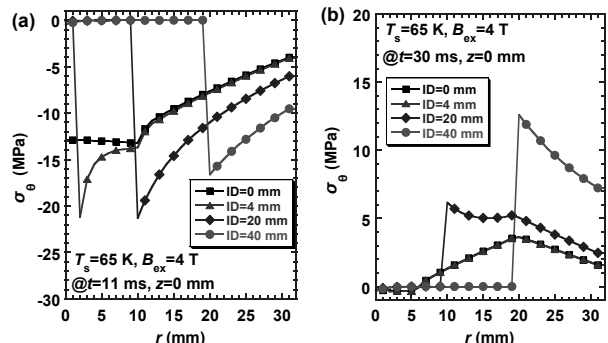


Fig. 3. Cross sectional plots of the electromagnetic stress,  $\sigma_\theta$ , for the various bulk configurations ( $z = 0$  mm) at (a)  $t = 11$  ms and (b)  $t = 30$  ms, during PFM ( $T_s = 65$  K,  $B_{ex} = 4$  T).

## 参考文献

1. H.Wu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **31** (2018) 045008



# パルス着磁における軟鉄ヨークの大きさがバルク磁石の捕捉磁場特性に及ぼす影響

## Influence of the size of soft-iron yoke on trapped field performance of HTS bulk in pulsed field magnetization

横山 和哉(足利大);岡 徹雄(芝浦工大)  
 YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Univ.); OKA Tetsuo (SIT)  
 E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

### 1. はじめに

バルク磁石の実用化に向けては、捕捉磁場の増大と共に着磁の簡便化が重要である。パルス磁化法は汎用の銅コイル及びコンデンサ電源を使用し、短時間で磁化できるため、実用化においては有用な手法である。一方で、捕捉磁場が試料の最大性能の半分程度であるため、捕捉磁場の向上が必要である。そのために、着磁方法の改善等のソフト的な手法や、磁化装置の改造等のハード的な手法が考えられる。本研究はパルス幅を延ばすための軟鉄ヨークに注目し、ヨークがバルク体より小さい場合、同じ場合、大きい場合について着磁実験を行い、ヨークの大きさが捕捉磁場特性に及ぼす影響を評価した。

### 2. 実験方法

軟鉄ヨークはバルク体を挟む構造になっており、一方はサンプルステージに配置し、材質はパーメンジュールで、大きさはφ64×20 mmである。他方は着磁コイルに取り付けてあり、材質は純鉄で、直径はφ40, φ64, φ80 mmの3種類を用意し、厚みはすべて47 mmである。なお、上記の大きさのヨークをS-, M-, L-yokeと呼ぶ。

φ60×20 mmのGdBCOバルク体(日本製鉄製)を、2段GM冷凍機(RM20, アルパック製)のコールドヘッドの先端に接続したサンプルステージに配置し、真空断熱した後に20, 30, 40, 50 Kに冷却する。各温度において3.9~6.2 Tのパルス磁場(立上時間:10 ms, 全パルス幅:100 ms)を1回印加し、試料表面の中央に貼り付けたホールセンサ(BHT-921, F.W.BELL 製)、及びセルノックス抵抗温度計(CX-1030-SD-HT-1.4L/J, Lakeshore 製)により、着磁中の磁束密度、 $B_T$ 、及びの時間変化、 $T$ 、を測定した。着磁後、着磁コイルを取り外し、3Dホールセンサ(BH-703, F.W.BELL 製)を用いて磁極表面(試料表面から約4 mm)の磁束密度分布を測定した。また、実測データから総磁束量、 $\Phi$ 、を算出した。

### 3. 結果及び考察

Fig. 1に試料表面中央の磁束密度、 $B_T$ 、及び磁極表面の最大磁束密度、 $B_{Zmax}$ 、の印加磁場依存性を示す。試料表面においては低印加磁場で大きな差が現れており、M-yokeとL-yokeの最大捕捉磁場は、それぞれ4.07 T及び3.65 Tとなっており、約12%前者が大きくなっている。一方、磁極表面の結果は、いずれの印加磁場でもM-yokeが最も大きくなっているが、最大値を取る印加磁場5.4 Tの値は、M-yokeが2.56 T、L-yokeが2.54 Tとほぼ等しくなっている。

Fig. 2に各ヨークにおける総磁束量の比較を示す。L-yokeとM-yokeに大きな差はなく、S-yokeは15%以上小さい値となっている。最大値を取る印加磁場5.4 Tの値は、M-yokeが3.28 mWb、L-yokeが3.53 mWbとなり、約8%大きい結果となった。

### 4. まとめ

パルス着磁において、パルス幅を延ばし、バルク体をより長く磁場に曝すために軟鉄ヨークを用いているが、本文はその大きさが捕捉磁場特性に及ぼす影響を調査した。温度及び印加磁場を変えて単一パルス磁場を印加する実験を行った結果、S-yokeからM-yokeに変更することで、捕捉磁場及び総磁束量が増大する一方、M-yokeとL-yokeでは大きな変化はなかった。これはヨークの大きさに最適値があることを示唆しており、バルク磁石の実用化においては、ヨークを常時搭載する機器において、重量削減につながる。

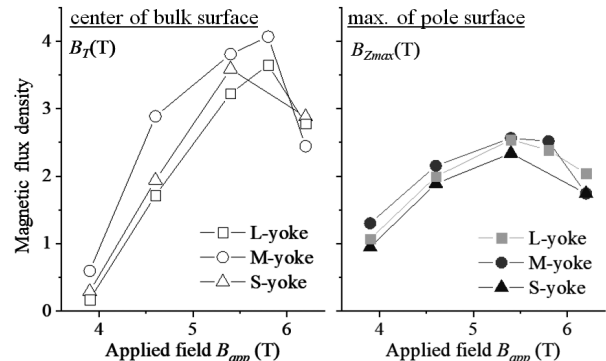


Fig. 1. Magnetic flux density at bulk surface ( $B_T$ ) and pole surface ( $B_{Zmax}$ ) for  $B_{app}=3.9\sim 6.2$  T

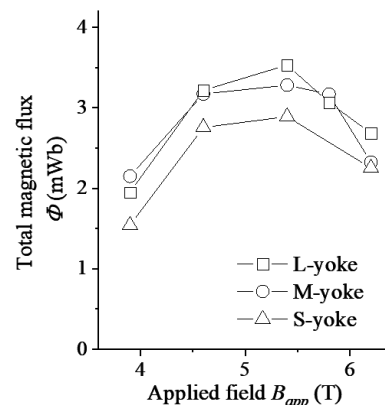


Fig. 2. Comparison of total magnetic flux

# MSR-QMG<sup>®</sup>バルクマグネットの15T着磁過程と磁氣的安定性

## 15T magnetization process and magnetic stability of MSR-QMG bulk magnet

森田 充, 手嶋 英一, 成木 紳也, 澤村 充(日本製鉄); 淡路 智(東北大学)

MORITA Mitsuru, TESHIMA Hidekazu, NARIKI Shinya, Sawamura Mitsuru (NSC); AWAJI Satoshi (Tohoku University)

E-mail: morita.d98.mitsuru@jp.nipponsteel.com

### 1. はじめに

優れた特性を有する QMG<sup>®</sup>(単結晶状の 123 相中に 211 相が微細分散したバルク状酸化物超電導材料) は, 1988 年に初めて開発された[1-3]。その後, 希土類元素 (RE) を置換した種結晶を使用する単結晶育成技術により大型の QMG が製造可能となり種々の応用開発が進められた[4]。バルクマグネット応用は, 1989 年に提案され RE 置換種結晶技術によりその基本形が完成した[5, 6]。最近では, 特に低温・強磁場での着磁により数 T の磁場が捕捉可能となり各種のバルクマグネット応用例が報告されている[7]。

今回は, リング状の MSR-QMG (Metal Sheet Reinforced-QMG) バルクマグネットを用い, 15T の着磁に成功したことを報告した[8, 9]。今回, 補強部材中の銅の割合を高めた試料を作製し, 15T 無冷媒マグネットを用いて 15T 着磁を行ったので報告する。

### 2. 実験方法

2-1 試料準備: Fig. 1 に前回報告した試料 (a) と今回作製した試料 (b) の断面構造を示す。試料 (b) は, 試料 (a) に対し上下の端部に無酸素銅を多く使用している。形状および製造方法は, 外径 26.5mm, 内径 11.0mm, 厚さ 4.0mm の QMG リングを積層し, それらの間にステンレス鋼および無酸素銅を配置し, さらに内周リング, 外周リング, 最内周リングおよび最外周リングを半田で接続することによって作製した。また, 試料の上下に温度計を貼り付け着磁中の試料温度を記録した。

2-2 着磁方法: 100K で 15T の外部磁場を印加した後, 24K, 20K で, 種々の減磁速度で減磁着磁を行った。その時の試料中央に配置したホール素子により捕捉磁場を測定した。

### 3. 実験結果・考察

Fig. 2 に 24K での各試料に対する減磁パターンを示す。試料 (a) では, 0.079T/分の減磁速度で減磁した場合, 約 8T の外部磁場でクエンチが発生したが, 15T から 0.079T/分で減磁した後, 約 11T から 0.039T/分で減磁した場合, クエンチすることなく着磁を完了した。試料 (b) では, 15T から 9T まで 0.114T/分および 0.15T/分で減磁した後, 約 0.05T/分で, 減磁することで 15T 着磁をクエンチすることなく完了できた。このことから, 銅の割合を高めた試料 (b) においても 15T 着磁が可能であり, かつ, 銅の割合を高めたことで比較的高速で減磁を行った場合でもクエンチが発生せず, 結果として, 試料 (a) に対して短時間で着磁を完了することができた。

また, 両方の試料に関して, 各着磁過程での試料の上部と下部との温度差 (試料内部の発熱) が, 着磁の進行とともに増加するものの, 着磁の終盤で, 一旦, 温度差が低下した後, 着磁完了近傍で増加する傾向が見られた。着磁過程における発熱 (AC ロス) は,  $J_c$  に比例することから, 着磁終盤に一旦発熱が減少する現象は, QMG リングの  $J_c$  の磁場依存性におけるピーク効果が影響しているものと考えられる。当日は,  $J_c$  のピーク効果と発熱量についても議論する。

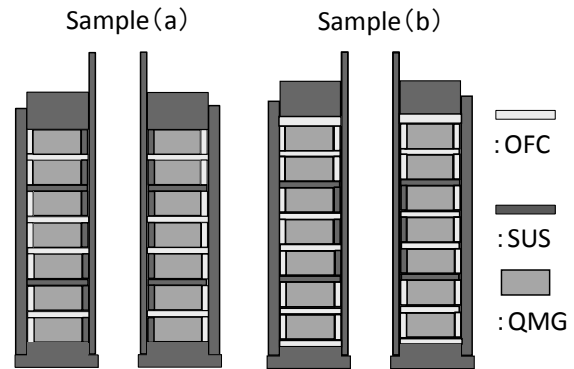


Fig. 1 Cross-sectional structure of samples.

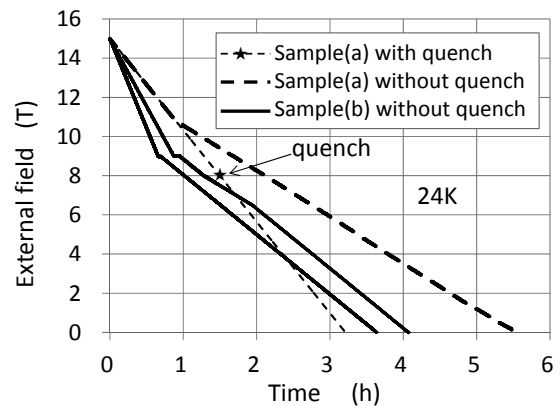


Fig. 2 Comparison of demagnetization pattern of each Sample.

### 謝辞

これらの 15T 着磁実験は, 東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センターにて実施した。

### 参考文献

- 森田 充, 松田 昭一: New Superconducting Materials Forum News, No.10 (1988) 15
- M. Morita, et al.: Physica C 172(1990)383-387 [参考文献 1.の英訳]
- 森田 充: 博士論文「溶融成長法による大型酸化物超伝導体の作製と高臨界電流密度化に関する研究」北海道大学学術成果コレクション (HUSACP) <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/statistics/statslist.php?staturl=fma3serq5o2379t>
- M. Morita et al.: Advances in Superconductivity III (1991) 733
- 森田 充: 特許登録番号: 2055511
- M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 41 (1989) p.14
- 森田 充等: 新日鐵住金技報 第 407 号 (2017)
- M. Morita, et al.: Abstracts of ICMC-CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.14
- 森田 充, 淡路 智, 赤瀬善太郎, 進藤大輔: 「金属」 Vol.88 (2018) No.11 p924

## YBCO バルクの最大 22 テスラの強磁場下における磁場捕捉とフラックスジャンプ

## Trapped fields and flux jumps in YBCO bulks under high magnetic fields up to 22 Tesla

内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大); 淡路 智 (東北大)

NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

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

## 1. はじめに

RE-Ba-Cu-O バルク (RE は希土類元素; REBCO) の捕捉磁場  $B_T$  は磁場中臨界電流密度よりも機械的特性に制限されることが多い。例えば、磁場 20T を捕捉した REBCO バルクには数百 MPa のフープ応力が働くが [1-3]、バルクの引張強度 (主に 3 点曲げによる測定) は高くても 150MPa 程度であり [4]、外部補強無しではバルクの破壊が起こる。応力が集中する空孔、第 2 相との界面や結晶欠陥などが破壊の起点と考えられている。Tomita と Murakami は YBCO バルク対に対して真空樹脂含浸による空孔等の充填および炭素繊維を含む樹脂による外部補強を施すことにより、バルク対中心で 29K において 17.24 テスラの磁場を捕捉することに成功した [1]。その後、Durrel 等によりステンレスリングを焼嵌めした GdBCO バルク対中心で 26K において 17.6 テスラの捕捉磁場が報告された [2]。両実験で観測されたドーム型の捕捉磁場分布  $B_T(r)$  (捕捉磁場の半径方向の場所依存性) はバルクがフル着磁になっていないことを示しており、捕捉磁場の傾き  $dB_T/dr$  から本来の捕捉磁場は 20 テスラを優に超えることが予想される。なお、17 テスラ級の捕捉磁場は使用した励磁用超伝導マグネットの最大発生磁場 18 テスラに制限されている。従って、実験的には機械的強度に加えて、励磁用マグネットの発生磁場も克服すべき課題となるが、我々は YBCO バルクによる 20 テスラ級磁場の捕捉を目指すことにした。数百 MPa のフープ応力に耐える補強容器を有限要素法によるシミュレーションを元に設計し、東北大金研強磁場センターのハイブリッドマグネット (最大発生磁場 28 テスラとなる水冷および超伝導マグネットの組合せ) で着磁実験を行った。

## 2. 実験方法

Fig.1 にステンレス (SUS316) 製補強容器と YBCO バルク対を示す。2 次元の直交する  $r$  および  $z$  軸を定義した。 $r$  軸は半径方向、 $z$  軸はバルク厚さ方向にそれぞれ平行であった。座標原点はバルク対の中心とした。各 YBCO バルク (直径 20mm、厚さ 10mm) は、SUS316 リング (外径 30 mm、内径 20mm、高さ 10mm) に挿入された後、両表面を直径 30 mm、厚さ 1.5mm の 2 種類の SUS316 円盤 A および B で覆われた (それぞれ 6 本のネジで固定)。なお、円盤 A には幅 3mm、深さ 0.5mm の溝があり、バルク対において対向するように配置した。その空間 (幅 3 mm、高さ 1mm) に 4 個の低温用ホール素子を  $r$  軸上 ( $r=0, 2, 5$  および 9mm) に配置した。また、下部バルクの底面にセルノックス温度計を取り付けた。この構造における磁場 20 テスラの捕捉条件下でのフープ応力は最大 +10 MPa とシミュレーションから見積もられており、先に示したバルクの破壊強度に比べて十分低いと言える [3]。磁場中冷却着磁実験はヘリウムガスフロー型のクライオスタットおよびハイブリッドマグネットを用いて最大 22 テスラの磁場下で行った。

## 3. 実験結果と考察

Fig.2 にバルク温度  $T_s = 28K$ 、印加磁場  $B_{ex}^{max} = 18$  テスラの磁場中冷却過程を示す。左縦軸はホール素子による局所磁場、右縦軸はバルク温度を示す。また、横軸のタイムステップ ( $TS$ ) は、 $TS = 10 \times (B_{ex}^{max} - B_{ex}) / B_{ex}^{max}$  で定義した。ここで、 $B_{ex}$  は掃引外部磁場 ( $B_{ex}^{max} \rightarrow 0$  テスラ) である。中心磁場  $B_1 (r=0mm)$  は外部磁場の減少とともに緩やか

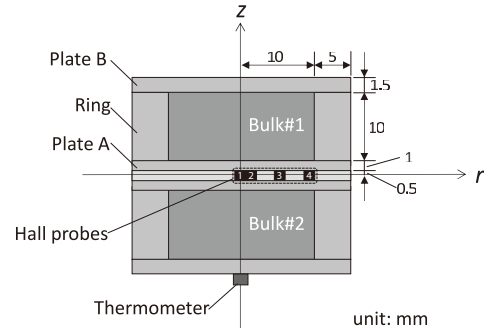


Fig.1: Schematic image of the stacked YBCO bulk pair reinforced by the stainless steel (SUS316) capsule.

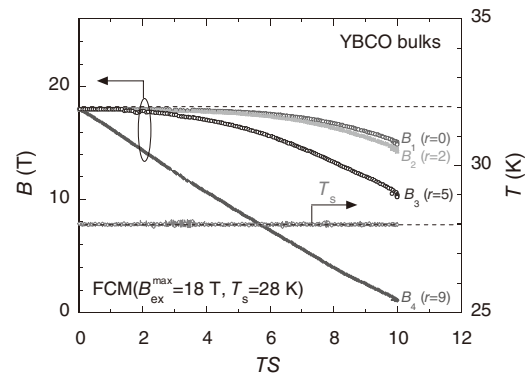


Fig.2: Time step ( $TS$ ) dependence of the magnetic flux density and temperature of the stacked YBCO bulk pair during FCM from  $B_{ex}^{max} = 18T$  at  $T_s = 28 K$ .

に減少していき、外部磁場ゼロで 15.1 テスラを示した。その後、磁化緩和により 15 分間で捕捉磁場は 14.6 テスラまで減少した。減磁過程におけるバルク温度はほぼ一定であった。また、この実験後に液体窒素中、1 テスラの磁場中冷却着磁で得た捕捉磁場分布はほぼ歪みのない同心円形状であった (ここでは示さない)。したがって、この構造により、少なくとも 15 テスラ級磁場をバルクの破壊なく捕捉できることが分かった。講演ではより高磁場の捕捉を目指した実験結果と併せて報告する。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP15K04718 および JP18K04920 の助成を受けて実施した。

## 参考文献

1. M. Tomita and M. Murakami, Nature **421** (2003) 517.
2. J.H. Durrel *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **27** (2014) 082001.
3. H. Fujishiro *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **32** (2019) 045005.
4. K. Katagiri *et al.*, Cryogenics **48** (2008) 87.



# ハイブリッド型超電導バルク磁石レンズ(HTFML)の実証実験

## A Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML): proof of concept

難波 空, 藤代 博之, 内藤 智之 (岩手大); AINSLIE Mark (Cambridge 大)

NAMBA Sora, FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.); AINSLIE Mark (Univ. of Cambridge)

E-mail: g0318128@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

REBaCuOやMgB<sub>2</sub>バルク超電導体は「磁束ピン止め効果」を利用してバルク内に磁場を捕捉し、コンパクトかつ強力な擬似永久磁石となる。バルク作製技術の進展によって、冷凍機冷却で数テスラ級のバルク磁石の実現が比較的容易になっているが、産業応用には更なる捕捉磁場向上が求められている。他方で、「磁気シールド効果」を利用した磁気レンズにより外部磁場をレンズ中心に収束し、外部磁場を超える高磁場発生を実現する手法がある。これまでに外部磁場 8 T に対し収束磁場 12.4 T が達成されたが[1]、収束磁場を維持するには継続的な着磁コイルの運転を要する。

昨年、我々はバルク磁石と磁気レンズを組み合わせたハイブリッド型バルク磁石レンズ(HTFML)を提案した[2]。HTFMLはバルク磁石の捕捉磁場を磁気レンズが収束することにより、外部磁場よりも大きな磁場を持続的に発生することが可能であり、超電導バルクの応用において発生磁場増大に貢献する可能性を秘めている。本研究では、MgB<sub>2</sub> バルク磁石円筒とGdBaCuO バルク磁気レンズで構成した HTFML の実証実験を行った。

### 2. 実験方法

Fig. 1 に HTFML の構成を示す。MgB<sub>2</sub>バルク円筒(外径 60 mm, 内径 40 mm, 高さ 60 mm, E.P.C. S.R.L., Italy)をバルク磁石として用いた。磁気レンズは4つのGdBaCuO バルク片から成る。2つのGdBaCuO バルク(日本製鐵)をそれぞれ切断した後、最適形状に加工した[3]。MgB<sub>2</sub>バルク円筒にGdBaCuO レンズを挿入し、HTFML を準備した。着磁中に生じる電磁応力によるバルクの破壊を防ぐため、それぞれステンレス鋼で補強した。温度はMgB<sub>2</sub> バルク上とGdBaCuO バルクのステンレス製治具上で、それぞれセルノックス抵抗温度計により測定したHTFML 中心の磁場をホールセンサーにより測定した。

着磁は以下の手順で行った。

- (1)  $T_1 = 40$  K ( $92 < T_1 < 39$  K)において  $B_{app} = 1 \sim 3$  T の磁場を印加
- (2) 外部磁場を一定に保ち、 $T_2 = 20$  K ( $< 39$  K)まで冷却
- (3)  $-0.011$  T/min で減磁し、MgB<sub>2</sub>バルクを着磁

### 3. 測定結果

Fig. 2 に印加磁場  $B_{app} = 2$  T の着磁過程における収束磁場  $B_c$  の時間依存性を示す。(1)40 K における励磁過程ではGdBaCuO レンズのシールド効果により外部磁場が収束され、外部磁場が 2 T に到達したときの収束磁場  $B_c$  は 3.65 T である。(2)20 K への冷却後の(3)減磁過程において、収束磁場の減衰はほとんどなく、減磁終了から 60 分後の  $B_c$  は 3.55 T である。以上の結果から、HTFML が実験的に証明された。

Fig. 3 に印加磁場  $B_{app} = 1 \sim 3$  T の着磁過程における収束磁場  $B_c$  の外部磁場依存性を示す。印加磁場  $B_{app} = 1, 2, 3$  T に対する最終的な収束磁場  $B_c$  はそれぞれ 1.99, 3.55, 3.20 T であり、いずれも印加磁場を上回る収束磁場を達成した。一方で、印加磁場上昇に伴い、磁場増幅率( $B_c/B_{app}$ )は低下したことから、HTFML の性能はバルク磁石の捕捉磁場特性及び磁気レンズへの磁束侵入量に大きく依存することが示唆された。

講演では、MgB<sub>2</sub> バルク円筒の捕捉磁場特性及びGdBaCuO バルクレンズのシールド効果についても報告する。

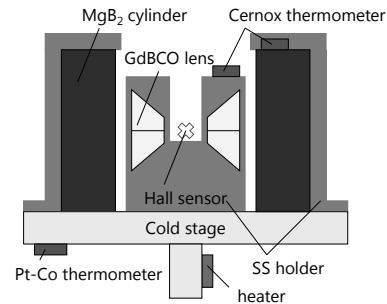


Fig. 1. Experimental setup of the HTFML consisting MgB<sub>2</sub> cylinder and GdBaCuO lens.

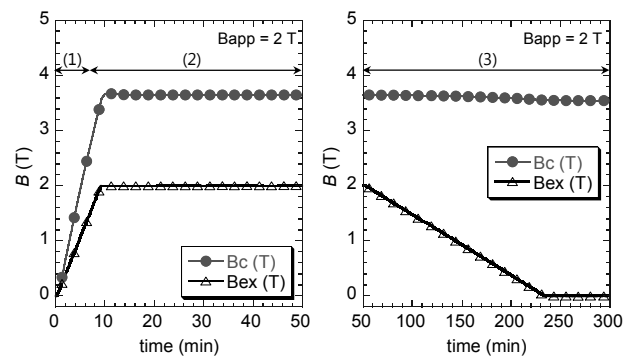


Fig. 2. Concentrated magnetic field,  $B_c$ , and external field,  $B_{ex}$ , at the center of the HTFML as a function of time during the magnetizing process for an applied field  $B_{app} = 2$  T.

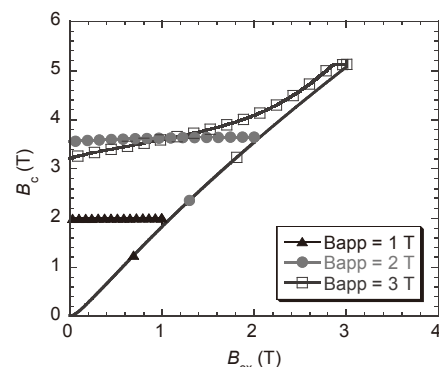


Fig. 3. Concentrated magnetic field,  $B_c$ , at the center of the HTFML as a function of external field,  $B_{ex}$ , for each  $B_{app}$ .

### 参考文献

- [1] Z. Zhang *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **25**, 115012 (2012).
- [2] K. Takahashi *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **31**, 044005 (2018).
- [3] S. Namba *et al.*, IEEE Trans Appl. Supercond., to be published.

## REBCO 溶融凝固バルクにおける水蒸気含有酸素気流中での酸素拡散

## Oxygen diffusion in REBCO melt-solidified bulks annealed under flowing humid oxygen

元木 貴則, 箭内 優, 布川 航太, 権藤紳吉, 下山淳一 (青学大)

MOTOKI Takanori, YANAI Yu, NUNOKAWA Kota, GONDO Shinkichi, SHIMOYAMA Jun-ichi (AGU)

E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

## 1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは、強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。REBCO 材料の特性として、酸素量を制御しキャリアの最適または弱いオーバードープ状態にすることで優れた超伝導特性が実現するが、大型擬似単結晶とみなせる溶融凝固バルクでは酸素拡散が遅く、その大型化に伴い必要な酸素アニール時間が大幅に増大し、大型バルクでは数百時間という長い酸素アニールが必要となる。

一方、我々は水蒸気含有酸素雰囲気中アニールによって SrTiO<sub>3</sub> 単結晶上にエピタキシャル成長させた REBCO 薄膜に Cu-O 二重鎖型の積層欠陥が生成することを見出した [1]。この結果を踏まえ本研究では、REBCO 溶融凝固バルクに対する水蒸気含有酸素雰囲気での低温アニール効果を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験方法

RE として Y を選択し、Pt を 0.1 wt%, Ag<sub>2</sub>O を 10 wt% 添加した ~13 mmφ の YBCO 溶融凝固バルクを 2 つ作製し、水蒸気含有酸素雰囲気 (P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ~ 2 kPa) および通常の乾燥酸素雰囲気下で 400°C においてアニールし、アニール時間と質量変化の関係を調べた。また Y123 溶融凝固バルクから ~1 × 1 × 1 mm<sup>3</sup> 程度の小片試料を切り出し、SQUID 磁束計を用いて磁化特性を評価した。

## 3. 結果と考察

RE123 単結晶においては、c 軸方向の酸素拡散係数は ab 面内に比べて極めて小さいことが知られている [2]。そこで、Y123 バルク体においても酸素拡散は主に ab 面内のみで等方的に進行し、簡単のため拡散係数は酸素量によらず一定であると仮定した。このようにして、無限に長い円柱内への側面からの拡散と近似すると、その質量変化は下式で求められる [3]。ここで、M(t) は時刻 t におけるバルクの質量、α<sub>n</sub> は 0 次の第一種ベッセル関数が 0 となる点を与える n 番目の根、θ = Dt/R<sup>2</sup> (D: 拡散係数、R: バルク半径) である。

$$\frac{M(t) - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\exp(-\alpha_n^2 \theta)}{\alpha_n^2}$$

乾燥もしくは水蒸気含有酸素雰囲気中におけるバルクの質量変化のアニール時間依存性を Fig.1 (a), (b) にそれぞれ示す。上式において D をフィッティングパラメータとして最小二乗法により求めた曲線を合わせてプロットしている。通常の乾燥雰囲気中では質量変化が見られなくなるまで 300 h 程度必要であったのに対し、水蒸気含有雰囲気下では 150 h 程度で十分であることが明らかになった。フィッティングパラメータから求めた拡散係数は水蒸気含有雰囲気下で乾燥雰囲気に比べ約 2 倍となることが示され、水蒸気含有雰囲気下での酸素アニールがアニール時

間の短縮に極めて有効であることが示された。

また、アニール後のバルク体から切り出した小片試料の帯磁率測定から、水蒸気含有雰囲気下でアニールした試料では、バルク中心部でも 90 K 級の鋭い超伝導転移を示し、内部まで十分酸素拡散していることが確認された。

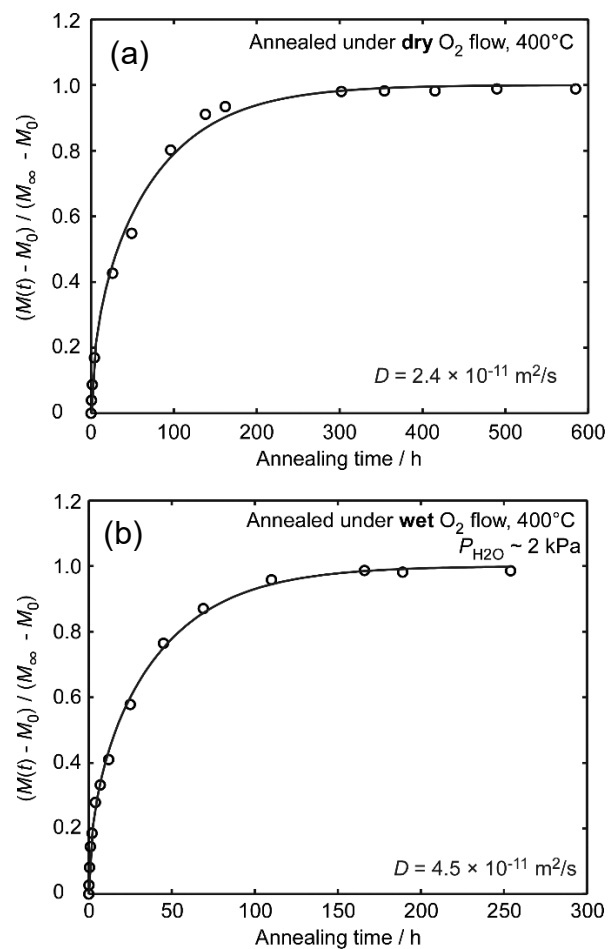


Fig. 1 Relationship between oxygen annealing time and changes in mass rate for YBCO melt-solidified bulks annealed under flowing dry O<sub>2</sub> (a) and wet O<sub>2</sub> (b). Solid lines are fitted curves estimated by the least-square method using D as a fitting parameter.

## 参考文献

- [1] S. Gondo *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference 97* (2018) 105.
- [2] S. Tsukui *et al.*, *Physica C* **351** (2001) 357-62.
- [3] H. S. Carslaw *et al.*, "Conduction of heat in solids," Oxford Univ. Press (1959).

# Gd123 溶融凝固バルクを種結晶とした Y123 溶融凝固バルクの育成と物性

## Crystal growth and physical properties of Y123 melt-solidified bulks grown on a Gd123 melt-solidified bulk as a seed crystal

箭内 優, 布川 航太, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

YANAI Yu, NUNOKAWA kouta, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama gakuin Univ.);  
E-mail: c5618059@aoyama.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (RE123)溶融凝固バルクは液体窒素温度 77 K を超える高い  $T_c$  を有し、高磁場下においても高い  $J_c$  を示すことから強力超伝導磁石としての応用が期待されている。一般に、RE123 溶融凝固バルクは低磁場下で優れた  $J_c$  を示す *a*-growth 領域と磁場中で優れた  $J_c$  を示す *c*-growth 領域からなり、これら両領域の  $J_c$ - $H$  特性の違いは捕捉磁場分布に影響する。RE123 溶融凝固バルクの最大捕捉磁場はバルクの直径に比例することが知られている[1]が、育成時の温度条件の決定が難しく、種結晶以外からの核生成が起こりやすいため大型化には高度な技術と長い育成時間が要求される。

これまでに我々は、Y123 より包晶温度が高い Gd123 溶融凝固バルクを種結晶とする方法でもバルク状の Y123 を任意の方位に結晶成長させることが可能であることを示し、方位の違いによる  $J_c$ - $H$  特性について報告してきた[2]。今回は、日本製鉄社製の Gd123 バルク上に Y123 焼結体を置き、全体が *a*-growth 領域もしくは *c*-growth 領域の Y123 溶融凝固バルクの育成を試みた結果を報告する。

### 2. 実験方法

Y123 と Y211 は Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaCO<sub>3</sub>, CuO を出発原料としてエタノールによる湿式混合後、Y123, Y211 とともに空气中 880°C, 12 h で中間粉碎混合をはさんで 2 回焼成することにより合成した。得られた Y123 と Y211 の粉末を 7 : 3 のモル比で秤量し、さらに Ag<sub>2</sub>O を 10 wt%, CeO<sub>2</sub> を 0.5 wt% を加えて混合した粉末を一軸プレスにより 16 mmφ × 8 mm<sup>t</sup> のペレットに成型し焼結した。この Y123 焼結体を Gd123 溶融凝固バルクの [001] または [100] 方位の表面上に置き、空气中での Gd123 の包晶温度以下での溶融凝固によって all *a*-growth 領域もしくは all *c*-growth 領域の Y123 溶融凝固バルクを作製した。育成した Y123 溶融凝固バルクを Gd123 バルクから切り離し、酸素アニールを行った後、~1 mm × 1 mm × 1 mm<sup>t</sup> の小片試料に切り出し、SEM 観察により微細組織を、SQUID 磁束計を用いた磁化測定より超伝導特性を評価した。

### 3. 結果と考察

Gd123 溶融凝固バルクの [001] 方位の表面上に結晶成長した all *c*-growth 領域の Y123 溶融凝固バルクの切り出し位置の模式図を Fig.1 に示す。例えば、種結晶中心から鉛直方向に 1 mm の試料を *c*-0,1、種結晶中心から動径方向に 2 mm、鉛直方向に 1 mm の試料を *c*-2,1 と表記する。種結晶から鉛直方向に 5 mm まで結晶成長が確認できた。Fig. 2 に all *c*-growth

領域の Y123 溶融凝固バルクの  $J_c$  特性を示す。切り出し横方向位置による  $J_c$  特性の差は小さく、概ね均質な試料が得られたことがわかった。しかし、磁場中での  $J_c$  や不可逆磁場がやや低いことからキャリアの弱いアンダードープ状態にあることが考えられる。発表では、all *c*-growth 領域の Y123 溶融凝固バルクに加えて all *a*-growth 領域の Y123 溶融凝固バルクの  $J_c$  特性、追加酸素アニールの効果を報告し、本手法を用いた大型バルク作製の可能性について議論する。

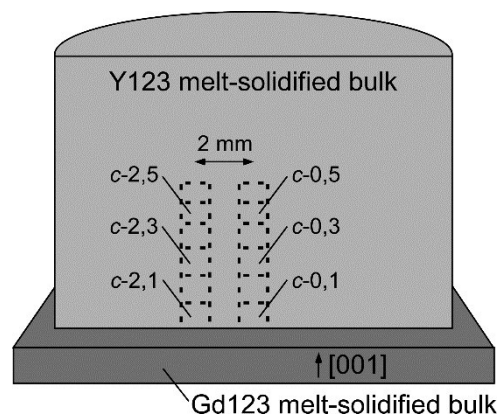


Fig. 1 Schematic illustration of Y123 bulk grown on [001] plane of a Gd123 melt-solidified bulk.

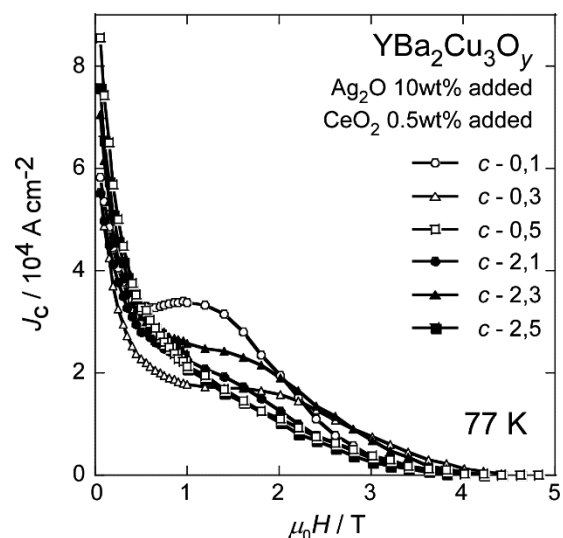


Fig. 2 Magnetic field dependence of  $J_c$  at 77 K of Y123 crystals cut from various part of all *c*-growth Y123 melt-solidified bulk.

### 参考文献

- [1] S. Nariki, *et al.*, *Supercond Sci. Technol.* **29** (2016) 034002.  
[2] Y. Yanai *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* Vol. 97 (2018) 22.



# MgB<sub>2</sub> 多結晶材料の組織及び臨界電流密度特性に与える炭化水素ガス処理の影響

## Structure and critical current density of MgB<sub>2</sub> polycrystalline materials prepared with hydrocarbon gas treatment

前田 穂 (Kangwon 国立大); 金正鎬 (Wollongong 大); 崔世鎔 (Kangwon 国立大)

MAEDA Minoru (Kangwon National Univ.); KIM Jung Ho (Univ. Wollongong); CHOI Seyong (Kangwon National Univ.)

E-mail: mmaeda@kangwon.ac.kr

### 1. はじめに

超伝導材料を駆使した超伝導技術の進展は、医療や電力システムを含めた様々な分野のテクノロジーを高度化する上で、重要な課題の一つである。この超伝導材料には、ニオブ系、ビスマス系、イットリウム系、鉄系、そして、二硼化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)などがあり、それぞれの固有の超伝導物性に応じて、材料研究・開発が進められている。これらの対象材料のうち、本研究で焦点を当てる MgB<sub>2</sub> 多結晶材料は、その材料的特徴により、低・中磁場領域での超伝導応用への進展が期待されている[1]。現在までの技術実証や商業応用への実例としては、電力供給ケーブルや(ニッチ市場における)低磁場級 MRI 診断装置などがあり、MgB<sub>2</sub> 多結晶材料のさらなる実用化への展開が望まれている[1]。

MgB<sub>2</sub> 材料の主な課題の一つとしては、磁場下の臨界電流特性の改善が挙げられている。この超伝導特性は、炭素添加によって向上することが良く知られている。しかしながら、その添加方法は単純ではなく、種々の添加剤の性質・特性に応じて、固相・溶液混合や液相・気相処理などの様々な手法の適用が可能であり、それ故に炭素の混入・分散手段が極めて多岐にわたる。従って、それぞれの添加方法による特性改善の本質的機構の探究や、最適手法の構築・確立に関するさらなる知見の蓄積が、MgB<sub>2</sub> 多結晶材料における重要な研究課題となっている。本研究では、添加剤として炭化水素のピレン(C<sub>16</sub>H<sub>10</sub>) [2] を用いた気相処理[3]に焦点を当て、MgB<sub>2</sub> 多結晶材料の臨界電流密度特性や、特に組成及び微視的構造に及ぼす影響を評価した[4]。本稿では、原材料粉末の気相処理の結果を中心に取り上げて述べる。

### 2. 実験方法

本研究で MgB<sub>2</sub> 多結晶体への炭素添加を目的とした気相処理は、ピレンを気化させた炭化水素ガスを適用して行った。具体的な方法としては、まず初めに、原材料の硼素の非晶質粉末と炭素添加剤のピレン粉末を Ta 管内に入れ、その両端をアルゴン中で溶接して封入した。そして石英管内に真空封入し、ピレンの沸点よりも十分高い 600°C の温度で加熱することで、炭化水素ガス処理した硼素粉末を得た。この気相処理した粉末を圧粉成形し、3-5mm 程度の粒径のマグネシウム粉末とともに、アルゴン中で Ta 管内に溶接封入した。さらに石英管内に真空封入し、1100°C の温度で 4 分間と 660°C または 710°C の温度で 48 時間の二段熱処理により、MgB<sub>2</sub> の焼結を実施した。また比較のために、無添加の試料も作製した。

### 3. 結果と考察

原材料の硼素粉末と気相処理後の粉末の XRD 測定結果を図 1 に示す。その回折プロファイルは、強度が低く幅広いピークと 2 つの鋭いピークの混在した XRD パターンを有していることがわかった。前者のハロー(halo)は、長距離秩序を持たない原子配列の特徴を示唆しており、硼素の非晶質構造を反映した結果であると考えられる。一方で後者の回折ピークは、長距離秩序を有する構造に由来しており、同定の結果、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> の結晶構造に起因していることが明らかになった。さらに、これらの非晶質硼素と結晶質の不純物が混在した粉末の回折パターンは、気相処理前と後において顕著な変化がないことがわかった。それ故に、600°C の温度における炭化水素ガス処理は、硼素粉末の構造の秩序化に大きな影響を与えないことが示唆される。

この気相処理済みの粉末から作製した MgB<sub>2</sub> 多結晶体の結晶構造と超伝導特性を表 1 に示す。無添加の試料と比較すると、気相処理に起因する炭素添加の効果は、*a* 軸長と超伝導転移温度の変化により、明確であることがわかった。さらに磁場下の臨界電流密度も、大きく改善していることが明らかになった。当日は、その他の構造解析の結果や様々な添加剤を適用した比較試料なども含めて詳細に報告する。

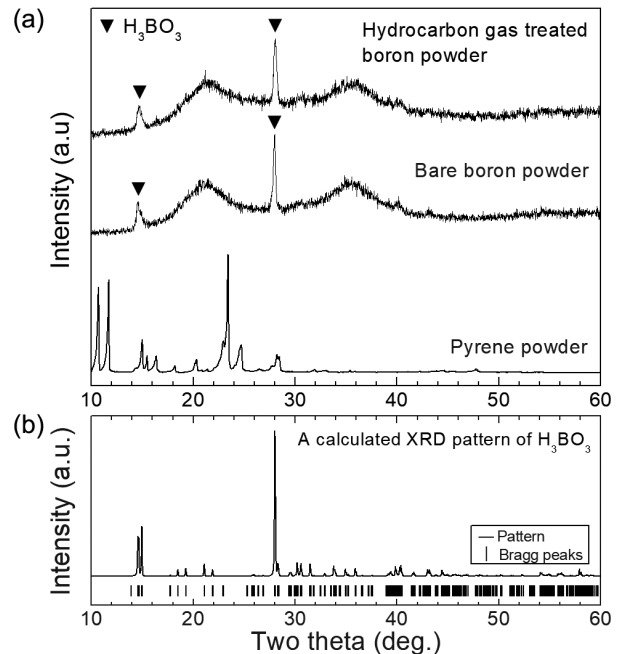


Fig. 1(a) XRD patterns of boron powders before and after the hydrocarbon gas treatment [4]. An XRD pattern of pyrene powder is also added in the figure. (b) A calculated pattern of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (boric acid or sassolite) [4].

Table 1 Lattice parameters (*a*, *c*), critical transition temperature (*T<sub>c</sub>*), and critical current density (*J<sub>c</sub>*) of MgB<sub>2</sub> bulk samples prepared with and without the hydrocarbon gas treatment [4].

	Hydrocarbon gas treated	Un-treated
<i>a</i> (Å)	3.069	3.083
<i>c</i> (Å)	3.525	3.521
<i>T<sub>c</sub></i> (K)	34.8	38.8
<i>J<sub>c</sub></i> (A/cm <sup>2</sup> ) (20 K, 4.3T)	~ 30000	~ 3000

**Acknowledgements** This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education under Grant 2017R1D1A3B03035092 and in part by “Human Resources Program in Energy Technology” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20184030202270). This study was also supported by 2017 Research Grant from Kangwon National University.

### 参考文献

- [1] 前田穂, Patel Dipak, Kim Jung Ho, 松本明善, 熊倉浩明: 超伝導磁石応用機器の次世代化に向けた MgB<sub>2</sub> 線材技術の開発, 電気学会研究会資料, ASC, pp.1-6 (2018).
- [2] J.H. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 042506 (2008).
- [3] M. Maeda *et al.*, J. Appl. Phys. **109**, 023904 (2011).
- [4] M. Maeda, S. Choi, J. Alloys Compd. **787**, 1265-1271 (2019).

# 浸透法で作製した大型 MgB<sub>2</sub> リングバルクの捕捉磁場特性

Trapped field properties of large-size MgB<sub>2</sub> ring bulk fabricated by infiltration method

高橋 裕平, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)

TAKAHASHI Yuhei, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: t5518001@iwate-u.ac.jp

## 1. はじめに

現在、(RE)BaCuO 系超電導バルク磁石を用いた NMR 装置の開発が行われており、リング形状の超電導バルク磁石のボア内で NMR 信号を得ることに成功している[1]。しかし、(RE)BaCuO 系バルクは作製時に原理的に不均一を生じるため均一磁場の発生は容易ではない。一方、MgB<sub>2</sub> バルクは多結晶体であることに由来する高い磁場均一性を持ち、(RE)BaCuO 系バルクに比べて作製コストが安価なため NMR 装置において MgB<sub>2</sub> バルク磁石を (RE)BaCuO 系バルク磁石の代替として利用することには大きなメリットがある。MgB<sub>2</sub> バルク作製の際、化学反応 ( $Mg + B \rightarrow MgB_2$ ) に伴う体積収縮に由来する低い充填率が問題となるが、圧力下焼結法や浸透法を用いることで充填率が 90% 程度の高密度バルクを作製可能である。特に浸透法は特殊な加圧炉を用いる必要がなく低コストでありながら 15.9 K においてバルク表面の捕捉磁場が 2.4 T[2]と高圧合成法によって作製されたバルクと同程度の捕捉磁場が報告されていること、バルク作製後に穴あけ加工等が不要なことから MgB<sub>2</sub> リングバルクの作製に適していると考えられる。そこで本研究では MgB<sub>2</sub> バルクがこれまでに 5.4 T の捕捉磁場を実現している[3]ことから MgB<sub>2</sub> バルク磁石を 200 MHz NMR 装置 (要求磁場強度 4.7 T) に応用することを目指して浸透法を用いた大型 MgB<sub>2</sub> リングバルクの開発を行った。また、リングバルクのボア内の捕捉磁場分布を測定するために新規に捕捉磁場分布測定装置を開発した。

## 2. 実験方法

原料粉末は結晶 B 粉末 (純度 99%、粒径 45 μm 以下)、Mg 粉末 (純度 99.5%、粒径 180 μm 以下) を用いた。まず、反応の促進と MgB<sub>2</sub> 粒の微細化のために B 粉末を遊星ボールミルによって回転速度 600 rpm で 1 h 粉碎した。カプセルに粉碎した B 粉末をリング状に充填した後、その上に Mg 粉末を充填し、アルゴン雰囲気中で密閉した。リングの内側にはステンレス製のスペーサーを配置した。熱処理は 900°C で 24 h 行った。作製した MgB<sub>2</sub> バルクは外径 60 mm、内径 30 および 40 mm、厚さ 15 mm で、捕捉磁場を磁場中冷却着磁の後、ホール素子により測定した。また、様々な形状のバルクの捕捉磁場特性を予測するために二次元有限要素モデルによるシミュレーション解析を行った。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 に外径 60 mm、内径 30 および 40 mm、厚さ 15 mm の MgB<sub>2</sub> リングバルクボア中心における捕捉磁場の温度依存性を示す。各バルクの最高捕捉磁場は 20 K において 1.74 T (ID=30 mm) および 1.02 T (ID=40 mm) であり、リング内径の拡大とともに低下した。内径 40 mm バルクにおいてシミュレーション結果と実験結果がよい一致を示しているため低温の捕捉磁場はシミュレーションによって 10 K において 1.46 T と予測される。内径 30 mm バルクにおいてシミュレーション結果は実験結果よりも 13% 程低い値となった。これは内径 30 mm バルクの  $J_c$  が内径 40 mm バルクの  $J_c$  よりも高いことを意味している。リング内径の拡大に伴う捕捉磁場の低下は、周回電流の流れる断面積が減少したことによるものであると考えられる。

Fig. 2 にシミュレーションによって得られた外径 60 mm、内径 40 mm のリングバルクの 20 K におけるバルクボア中心の

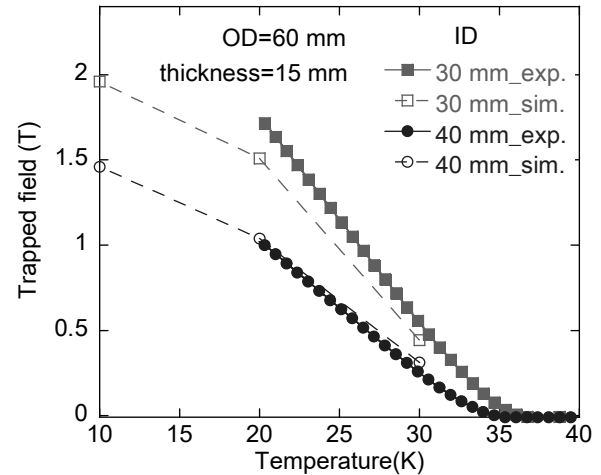


Fig.1 Temperature dependence of the experimental and simulated trapped fields at the center of the MgB<sub>2</sub> ring bulk bore.

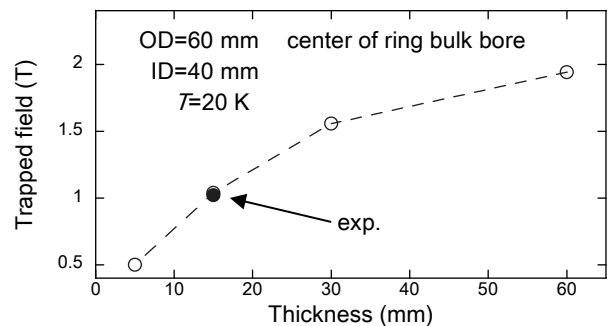


Fig.2 Simulation results for the thickness dependence of the trapped field at the center of the MgB<sub>2</sub> ring bulk (OD=60 mm, ID=40 mm) bore. The experimental result is also shown.

捕捉磁場の厚さ依存性と実験によって測定された厚さ 15 mm のバルクボア中心における捕捉磁場を示す。厚さ 15 mm のバルクのシミュレーションによって得られた捕捉磁場と実験によって得られた捕捉磁場はほぼ一致した。シミュレーション結果よりバルクボア中心の捕捉磁場はバルクを厚くすることによって向上することが分かった。しかし、200 MHz NMR 装置の要求磁場強度 (4.7 T) には不十分であり、今後バルクサイズの最適化や不純物添加による  $J_c$  の向上が不可欠である。

講演では実験において複数のバルクを積層させることで厚さを増した際の捕捉磁場特性や、面内および厚さ方向の捕捉磁場分布について報告し、NMR 装置に対する MgB<sub>2</sub> バルク磁石の有用性について議論する。

## 参考文献

1. T. Nakamura *et al.*: Concepts Magn. Reson. Part B (Magn. Reson. Eng.), **31B** (2007) 65-70
2. T. Naito *et al.*: Supercond. Sci. Technol., **29** (2016) 11500
3. G. Fuchs *et al.*: Supercond. Sci. Technol., **26** (2013) 122002

# Ba(Fe<sub>0.92</sub>Co<sub>0.08</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 多結晶バルクの粒内および粒間超伝導特性に及ぼす 高エネルギー混合の効果

The effects of high energy milling on intra- and inter-granular superconducting properties of Ba(Fe<sub>0.92</sub>Co<sub>0.08</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> polycrystalline bulks

徳田 進之介(東京農工大); 嶋田 雄介(東北大); 山本 明保(東京農工大)  
TOKUTA Shinnosuke (TUAT); SHIMADA Yusuke (Tohoku Univ.); YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)  
E-mail: s195941r@st.go.tuat.ac.jp

## 1. Introduction

The iron-based superconductors (IBSCs) with high  $T_c$  ( $\sim 58$  K) and  $H_{c2}$  ( $>100$  T) are promising candidates for high field magnet applications [1]. 122-phase IBSCs demonstrate small electromagnetic anisotropy, high  $H_{tr}$  close to  $H_{c2}$  [2], and a critical grain boundary angle twice as large as that of YBCO [3]; therefore, applications in polycrystalline form are expected. In this study, Ba(Fe<sub>0.92</sub>Co<sub>0.08</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> polycrystalline bulk samples were prepared by sintering mechanically alloyed powder in expectation of enhancement of  $H_{c2}$  by introduction of lattice defects and improvement of  $J_c$  by control of microstructure.

## 2. Method

All the powder processing was performed under high purity Ar glove box to prevent oxidation. Elemental metals (Ba, Fe, Co, and As) were ball-milled using a planetary ball-mill apparatus. The ball-milling condition was systematically varied by mainly changing the ball-milling time and evaluated quantitatively by ball-milling energy [4] ( $E_{BM}$ , 10–590 MJ/kg). For reference, hand-milling in a mortar was defined as 0 MJ/kg. The milled powders were pressed into disk-shaped pellets with a diameter and thickness of 7 and 1.2 mm, respectively. The pellets were vacuum sealed in quartz tubes and sintered at 600 °C for 48 h. The phases and microstructure were evaluated by XRD, SEM, STEM and EDS for before and after heating samples. The intra- and inter-granular superconducting properties ( $T_c$ ,  $H_{c2}$ , and  $J_c$ ) were evaluated by PPMS and SQUID VSM.

## 3. Results/Discussion

With an increase in the  $E_{BM}$ , FWHM of Ba122 XRD main peak expanded and  $c$ -axis remarkably elongated without the change in Co doping level. Lattice defects (stacking faults) introduced by high energy milling (shown in Fig. 1) are considered as one of the reasons for the FWHM broadening and increased  $c$ . Although deterioration of crystallinity suppressed  $T_c$  by 5.5%, it was still higher than the typical  $T_c$  of single crystals [5] (Fig. 2(a)). A slope of  $H_{c2}(T)$  increased by 50% and exceeded that of single crystals [6] and thin films [7] (Fig. 2(b)). It is considered that the lattice defects enhanced electron scattering and changed  $T_c$  and  $H_{c2}$ . As far as we know, this is the first example of artificially improved  $H_{c2}$  in 122-phase IBSCs by defects engineering. On the other hand, with an increase in the  $E_{BM}$ , magnetization  $J_c$  increased up to  $1.7 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> (5K, self-field), then decreased by an order of magnitude (Fig. 2(c)). The change of  $J_c$  seems to correspond to the change in microstructure. That is,  $J_c$  is improved by reduction of impurities due to mechanical alloying and reduced by formation of aggregates due to significant refinement of grains (Fig. 3). The maximum  $J_c$  value is the highest among Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> bulks fabricated under ambient pressure [8] and comparable to that of HIPped Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> wires [9].

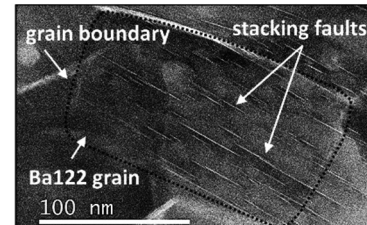


Fig. 1 BF-STEM image of the sample with  $E_{BM} = 80$  MJ/kg

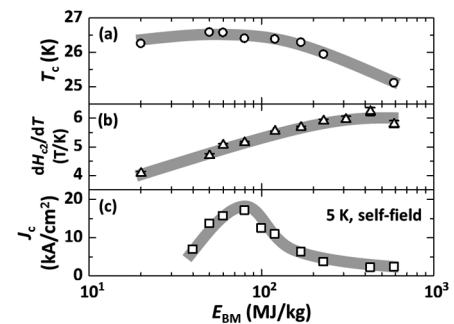


Fig. 2 Ball-milling energy  $E_{BM}$  dependences of (a)  $T_c$ , (b) a slope of  $H_{c2}(T)$ , and (c) self-field  $J_c$

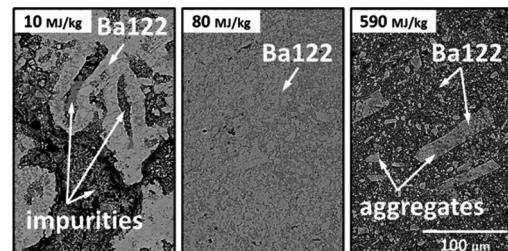


Fig. 3 SEM images (BSE) of the sample with  $E_{BM} = 10, 80, 590$  MJ/kg

## Acknowledgement

This work was supported by JST CREST (JPMJCR1814), JSPS KAKENHI (JP15H05519 and JP18H01699), MEXT Elements Strategy Initiative to Form Core Research Center, and Nanotechnology Platform (A-18-TU-0037) of the MEXT, Japan.

## References

1. H. Hosono, et al.: Mater. Today, Vol. 21 (2018) 278
2. A. Yamamoto, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 94 (2009) 062511
3. T. Katase, et al.: Nat. Commun., Vol. 2 (2011) 409
4. W. Häbler, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) 025005
5. Y. Nakajima, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 82 (2010) 220504
6. Y. Nakajima, et al.: J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 78 (2009) 023702
7. B. Maiorov, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 86 (2012) 094513
8. Y. Hayashi, et al.: Physica C., Vol. 504 (2014) 28
9. J. D. Weiss, et al.: Nat. Mater., Vol. 11 (2012) 682