

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246110

研究課題名(和文)レアアースフリー強力超伝導磁石の創製と応用検討

研究課題名(英文)Development of rare-earth metal free superconducting strong magnets

研究代表者

岸尾 光二(Kishio, Kohji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50143392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,300,000円

研究成果の概要(和文)：既存の強力磁石(Ndネオジウム、Smサマリウム永久磁石、レアアースRE123系超伝導バルク磁石)と同等以上の磁力を有し、RE(希土類)を構成元素に用いない新しい小型強力磁石の候補として、金属間化合物超伝導体二ホウ化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)に着目し、バルク超伝導磁石の作製方法の確立と、磁力特性の基礎評価を目的に研究を行った。数センチサイズのMgB<sub>2</sub>バルク体の再現性良い作製技術を確立し、開発した低温磁力測定系を用いてその捕捉磁場特性の評価を行った。冷凍機冷却で比較的容易に到達可能な温度域でテスラクラスの強力な磁力を持つことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：MgB<sub>2</sub> is expected to be applied at 5-30 K using a compact cryocooler as rare-earth metal free strong superconducting magnets. In this study we have developed reproducible fabrication process for disc-shaped MgB<sub>2</sub> bulks with several centimeters in size and trapped field measurement system with GM cryocooler. Trapped field of MgB<sub>2</sub> bulks showed several teslas at intermediate temperature which can be easily reached by compact cryocoolers.

研究分野：固体化学

キーワード：超伝導 磁石

### 1. 研究開始当初の背景

ネオジウム磁石、サマリウム磁石、RE123系超伝導磁石をはじめ、強力磁石はいずれも希土類元素(RE: レアアース)を含む。また、従来系の超伝導コイルは希少な液体ヘリウム(沸点 4.2 K)を冷却に要する。価格高騰が問題となったレアアース、ヘリウムを国外からの全量輸入に頼るわが国にとって、代替材料の研究開発は重要な課題である。

一方、超伝導バルク磁石は、永久磁石と同様に電磁石を用いて磁化(着磁)することで磁石となるが、これを超伝導転移温度以下の冷却下で行う必要がある。磁力はバルクのサイズとバルク内を循環する臨界電流密度(以後  $J_c$ )の積で決まる。RE123系で研究が進み、30 mmの小型バルクが17 Tもの非常に強い磁力を持つのが特徴である。また、超伝導コイル磁石では困難な持ち運びも比較的容易で、小型簡易NMR、MRI等への応用が期待される。

金属間化合物ニホウ化マグネシウム(MgB<sub>2</sub>)は高温超伝導体の中で唯一、結晶粒界の弱結合が無く、粉末の成型・焼結という簡便な製法で、比較的高い臨界電流密度を持つ試料を再現性良く作製可能である。

### 2. 研究の目的

既存の強力磁石(ネオジウム、サマリウム永久磁石、レアアース RE123系超伝導バルク磁石)と同等以上の磁力を有し、RE(希土類)を構成元素に用いない新しい小型強力磁石の候補として、金属間化合物超伝導体 MgB<sub>2</sub>に着目し、バルク超伝導磁石の作製方法の確立と、磁力特性の基礎評価を目的に研究を行った。

具体的には、

- (1)大型 MgB<sub>2</sub>バルク体の作製技術の確立
- (2)MgB<sub>2</sub>バルク体の機械加工特性の確認
- (3)冷凍機を用いた低温磁力測定系の開発
- (4)MgB<sub>2</sub>バルク体の捕捉磁場特性の評価
- (5)MgB<sub>2</sub>バルク体の機械強度の基礎評価を検討項目とした。

### 3. 研究の方法

(1) MgとBを1:2の割合で秤量、混合し、一軸加圧により直径10-100 mm、厚み10 mmの円盤状となるように成型した。次いで、化学的反応性に富む金属Mgの酸化・蒸発を防ぐため、準密閉環境下においてAr雰囲気中で850°C、3 hの熱処理を行うことでMgB<sub>2</sub>バルク体を得た。

(2) (1)で得たバルク体試料に対し、必要に応じ、切り出しや穴開けの機械加工を施し、顕微鏡による微細組織観察を行い、加工後の組織を評価した。

(3) 大口径超伝導マグネットとGM冷凍機・クライオスタット、計測機器を組み合わせることで、5 K以下までの温度においてバルク磁石の着磁、捕捉磁場の計測が可能な測定系を立ち上げた。試料の捕捉磁場の計測にはトランスバース型極低温ホール素子を用

いた。なお必要に応じて三軸ステージにより空間分布を取得した。

(4) 得られたMgB<sub>2</sub>バルク体試料を(3)で準備した冷凍機で冷却し、超伝導マグネットを用いて磁場下冷却(FC)条件により6 Tの磁場下で着磁した。バルク体の捕捉磁場はバルク体表面中心に配置したホール素子を用いて測定した。試料温度は試料表面に配置したセルノックス温度センサーを用いて測定した。また、バルク体から切り出した試料片に対して、SQUIDにより磁化測定を行った。

(5) 得られたMgB<sub>2</sub>バルク体試料を小片試料に加工し、ロードセルを用いて圧縮力を加え、圧縮強度の評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 大型 MgB<sub>2</sub>バルク体の作製技術の確立

作製した20 mmφのMgB<sub>2</sub>バルク体について、顕微鏡を用い微細組織観察を行った。焼成前後の反応性を評価するため、レーザー顕微鏡にて光学観察を行った結果を、図1に示す。焼成前試料の微細組織は、原料粉であるホウ素(赤茶色)とマグネシウム(銀色)に由来する色が確認でき、色ムラもなく均一に混合できていることが分かった。焼成後の試料では、原料粉末同士の反応が進み、MgB<sub>2</sub>由来の青みがかった黒色が確認できた。

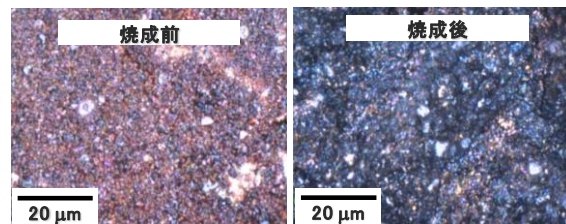


図1 MgB<sub>2</sub>バルク体の焼成前後における光学顕微鏡像(左)焼成前、(右)焼成後

MgB<sub>2</sub>バルク体内の均一性を評価するため、内部の空隙のばらつきの評価を行った。焼成後のMgB<sub>2</sub>バルク体のX線CTスキャン像を図2に示す。図2(左)の黒い部分が空隙を表している。また図2(右)に空隙を抽出した像を示すが、比較的均一に分散して空隙が試料内に存在していることが分かった。

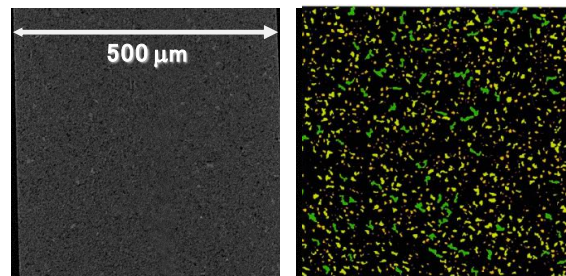


図2 焼成後のMgB<sub>2</sub>バルク体のCTスキャン像(左)二次元断面、(右)空隙分布

超伝導特性を評価したところ、MgB<sub>2</sub>バルク体の超伝導転移温度  $T_c$  は約38 Kであった。磁化ヒステリシスから見積もった臨界電流

密度  $J_c$  は 20 K、自己磁場下において  $2.5 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> であった。 $T_c$ 、 $J_c$  とともに MgB<sub>2</sub> 線材、バルクで得られる典型的な値であった。

また、直径 100 mm までの比較的大型 MgB<sub>2</sub> バルク体を同様の製法で作製したところ、マクロスケールのクラック等は見られず均一な組織を有することが分かった。 $T_c$ 、 $J_c$  はバルク径の異なる試料においても同様であった。この結果は、MgB<sub>2</sub> バルク体においては、組織的な均一性や良好な超伝導特性を維持したままサイズのスケールアップが図れることを示唆する。

以上より、大型 MgB<sub>2</sub> バルク体の作製に必要な基盤的知見を得た。

## (2) MgB<sub>2</sub> バルク体の機械加工特性

超伝導バルク磁石を応用で用いる際には、応用形態に沿った形状加工が必要である。例えば、磁気分離等の強力磁石として用いる場合は、磁石をある程度の範囲にわたり敷き詰めるため、タイル形状であることが望まれ、アンジュレータの加速器用磁石として用いる場合は半円の形状で用いられる。MgB<sub>2</sub> バルク体を様々な応用で用いられることを考え、その機械加工特性の評価を行った。

円盤状の MgB<sub>2</sub> バルク体を精密切断機により、多角形状に加工した。充填率が 50% 程度であり、比較的硬度が小さいということも由来し、試料表面に振動によるクラック、欠け等は見られなかった。四角形状の角の部分を電子顕微鏡で観察したところ、ひび等は見られず、想定通りに加工を施すことができた。

以上から、MgB<sub>2</sub> バルク体は加工性に優れ、任意形状への加工が可能であり、応用上有利な材料であることを明らかにした。

## (3) 冷凍機を用いた低温磁力測定系の開発

超伝導バルク磁石の磁石特性の評価は、研究が進んでいる RE123 系（超伝導転移温度約 94 K）の場合、主として液体窒素冷却下（77 K）で行われていた。MgB<sub>2</sub> バルク磁石の磁石特性評価は、40 K 以下の冷却下で行う必要があるため、冷凍機冷却測定系を開発した。

5 K 以下までの温度においてバルク磁石の着磁、捕捉磁場の計測を行うため、大口径超伝導マグネットと GM 冷凍機・クライオスタット、計測機器を組み合わせた測定系を開発した。環境温度、外部磁場の制御・計測とトランスバース型極低温ホール素子を用いた試料の捕捉磁場の計測が可能な仕様とした。

また、冷凍機冷却下における任意温度での磁場分布計測のため、3 軸ステージを用いた走査型極低温ホールプローブを開発した。

## (4) MgB<sub>2</sub> バルク体の捕捉磁場特性の評価

### ① 磁化ヒステリシス

強磁性材料を用いた永久磁石の磁石性能を表わす指標としては従来、残留磁化  $B_r$ 、保磁力  $H_c$ 、および最大エネルギー積  $(BH)_{max}$  があり、これら 3 つの値はいずれも大きい

ほど、高性能な磁石とされる。超伝導バルク磁石における強磁性発生のメカニズムは強磁性永久磁石と原理的に全く異なるが、同様の巨視的パラメータが明確に存在し、その特性は強磁性磁石と巨視的に等価であることを示すことが必要である。この目的のためにヒステリシス測定を実行した。

30 mm φ MgB<sub>2</sub> バルク試料を所定の温度に無磁場下で冷却した後、一定速度で外部磁場（±8 T）をサイクリックに印加し、バルク二個を対向させたジオメトリに於いて、中心部に定置したホール素子により局所磁束密度  $b_{center}$  を記録した。図 3 には、温度 10, 20, 30 K における  $b_{center}$  の反時計回りの測定結果を示す。初磁化曲線においては、増磁をしてもしばらくは  $b=zero$  であり、円盤形磁石の中心軸上で外部磁場は試料内の超伝導遮へい電流により完全に遮へいされている。さらに増磁すると  $T=10$  K の場合、約 3.8 T で  $b_{center}$  が増加し始める。この時の磁場を、中心到達磁界  $H_p$  と呼ぶ。さらに増磁を続けると  $H_{rev}=6$  T 強において  $b_{center}$  は  $B=\mu_0 H$  に一致しそのまま 8T まで線形に増加する。

次に印加磁場を折り返して減磁すると、 $b_{center}$  は  $B=\mu_0 H$  に沿って下降するが  $H_{rev}$  において今度は左方向へ枝分かかれし、傾斜を緩めながら移動する。さて、外部磁場がゼロに到達した時、残余する（ここでは局所）磁束密度が残留磁束密度（捕捉磁場） $b_r$  である。

さらに外部磁場を負の方向に変えると、 $b_{center}$  はゆるやかに傾斜を強めながら  $-H_p$  直前で最大傾斜に達して zero ラインを横切る。この時の磁場が、保磁力  $-H_c$  と定義できる。減磁を続けさらに  $-8T$  で正側に折り返し増磁を行なうと反対側の 8T に達するまで、図 3 でわかるように完全に対称なヒステリシスループが完成することがわかった。また以上のサイクリックループは何度繰り返しても一致することから、超伝導バルク磁石の巨視的性質はスピンに基づく強磁性永久磁石と等価であることが証明された。

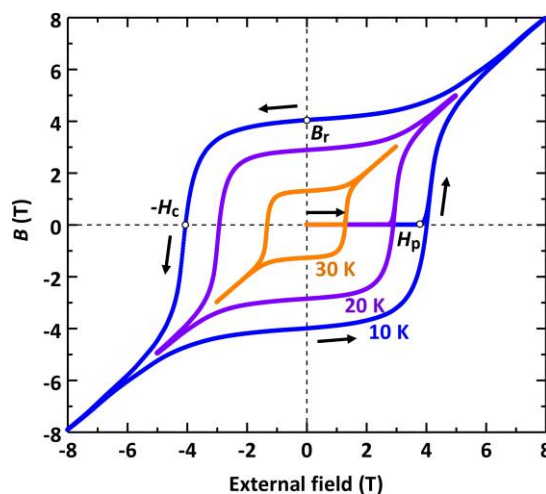


図 3 MgB<sub>2</sub> バルク磁石の 10, 20, 30 K における BH ヒステリシスループ。

## ②磁場分布特性

次に磁気計測に要求される磁場均一性の評価を行った。30 mmφMgB<sub>2</sub> バルク磁石の磁場分布を測定したところ、理想的な円錐型分布を有することが明らかになった。

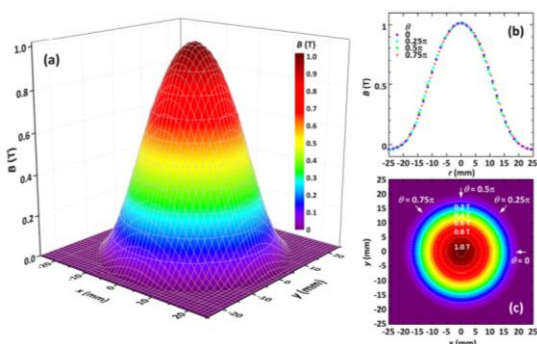


図4 MgB<sub>2</sub> バルク磁石の磁場分布特性  
(a)3次元, (b)動径断面, (c)高さ断面

## ③MgB<sub>2</sub> バルク磁石の捕捉磁場に及ぼすサイズ、アスペクト比効果

MgB<sub>2</sub> バルク磁石の捕捉磁場の決定因子を評価するため、同一の厚みを持ち直径(サイズ)のみ異なる一連の円盤状試料、同一の直径(20 mm)を持ち厚みのみ異なる一連の円盤状試料を作製し、捕捉磁場を測定した。

直径10-60 mmφ, 厚さ10 mmのバルク体試料を20 Kにおいて着磁後、バルク体表面中心の位置において捕捉磁場を測定したところ、直径10 mmφ試料の20 Kにおける捕捉磁場は約1 Tであったが、直径20 mmφ試料で約1.5 T、直径30 mmφ試料で約1.8 T、最大の直径60 mmφ試料では約2.2 Tが得られ、バルク径の増大とともに捕捉磁場は向上する傾向を示した。一方で、直径30 mmφ以下の試料と比較すると、直径40 mmφ以上のバルク径がより大きな試料において、捕捉磁場の増加率は緩和する傾向がみられた。

次に、バルク厚の異なるMgB<sub>2</sub> バルク体の着磁後の捕捉磁場の温度依存性を図5に示す。捕捉磁場はバルク厚とともに系統的に減少し、バルク厚1 mmのときの捕捉磁場は10 mmのときの約54%であった。バルク厚と捕捉磁場の関係について、規格化した電流密度を一定としてBiot Savart則により見積もったところ、厚みが薄い試料において、捕捉磁場のシミュレーションと実測値の間に乖離が見られ、実測値が高くなる傾向を示した。

以上のサイズ、アスペクト比依存性からは、MgB<sub>2</sub> バルク磁石においては捕捉磁場特性に比較的強いJ<sub>c</sub>の磁場依存性が影響を及ぼしており、そのモデル化には電流密度を磁場の関数として導入する必要があることが示唆された。

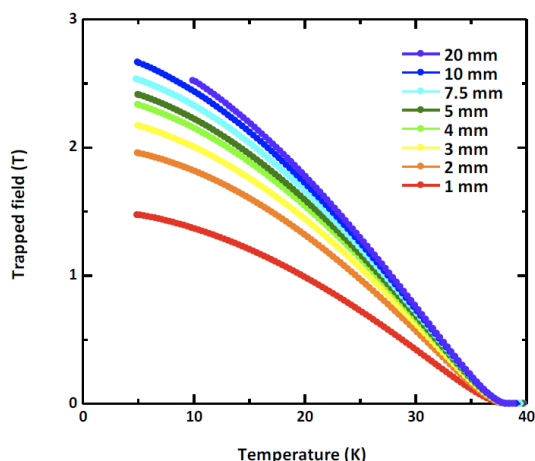


図5 MgB<sub>2</sub> バルク磁石の捕捉磁場温度依存性のサイズ効果。

## ④高性能 MgB<sub>2</sub> バルク磁石の捕捉磁場評価

上述の結果から、改良型プロセスによりJ<sub>c</sub>の外部磁場依存性を改善したMgB<sub>2</sub> バルク磁石について、対向型ジオメトリ中心部において捕捉磁場測定を行った。7 Kで目標としていた5 Tが得られた。1.5, 3, 4 Tの磁場強度が、それぞれ28, 20, 15 Kで得られた。これらは冷凍機冷却により、比較的容易に到達可能な温度域で有り、MgB<sub>2</sub> 超伝導バルク磁石のクライオマグネット応用への有望性が示された。

## (5)MgB<sub>2</sub> バルク体の機械強度の基礎評価

最もスタンダードなMgB<sub>2</sub> バルク体の圧縮強度を評価した結果、約50 MPaであり、一般的なセラミックス材料より小さいため何らかの補強が必要であることが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

[1] A. Yamamoto, H. Tanaka, J. Shimoyama, H. Ogino, K. Kishio and T. Matsushita: “Towards the realization of higher connectivity in MgB<sub>2</sub> conductors - *in-situ* or sintered *ex-situ*?,” *Japanese Journal of Applied Physics* 51, 010105 1-6 (2012). 査読有り DOI: 10.1088/0953-2048/25/3/035007

[2] H. Tanaka, A. Yamamoto, J. Shimoyama, H. Ogino and K. Kishio: “Strongly connected *ex situ* MgB<sub>2</sub> polycrystalline bulks fabricated by solid-state self-sintering,” *Superconductor Science & Technology* 25, 115022 1-7 (2012). 査読有り DOI: 10.1088/0953-2048/25/11/115022

[3] T. Matsushita, J. Tanigawa, M. Kiuchi, A. Yamamoto, J. Shimoyama and K. Kishio: “Effect of packing density on the critical current density at high magnetic fields in polycrystalline MgB<sub>2</sub> superconductors,” *Japanese Journal of Applied*

*Physics* 51, 123103 1-7 (2012). 査読有り DOI: 10.1143/JJAP.51.123103

[4] A. Ito, A. Yamamoto, J. Shimoyama, H. Ogino and K. Kishio: “Synthesis of denser *in-situ* MgB<sub>2</sub> bulks using MgB<sub>4</sub> precursor,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23, 7101005 1-5 (2013). 査読有り DOI: 10.1109/TASC.2013.2240035

[5] M. Muralidhar ほか 5 名: “Optimization of the fabrication process for high trapped field MgB<sub>2</sub> bulks,” *Physica C* 494, 85-88 (2013). 査読有り DOI: 10.1016/j.physc.2013.04.012

[6] M. Muralidhar, Y. Fukumoto, A. Ishihara, K. Suzuki, M. Tomita, M. R. Koblishka, A. Yamamoto and K. Kishio: “Recent developments in melt processed Gd-123 and MgB<sub>2</sub> materials at RTRI,” *Physica C* 496, 5-10 (2014). 査読有り DOI: 10.1016/j.physc.2013.05.029

[7] S. Mizutani, A. Yamamoto, J. Shimoyama, H. Ogino and K. Kishio: “Understanding routes for high connectivity in *ex-situ* MgB<sub>2</sub> by self-sintering,” *Superconductor Science & Technology* 27, 044012 1-7 (2014). 査読有り DOI: 10.1088/0953-2048/27/4/044012

[8] A. Yamamoto, A. Ishihara, M. Tomita and K. Kishio: “Permanent magnet with MgB<sub>2</sub> bulk superconductor,” *Applied Physics Letters* 105, 032601 1-4 (2014). 査読有り DOI: 10.1063/1.4890724

[9] S. Mizutani, A. Yamamoto, J. Shimoyama, H. Ogino and K. Kishio: “Self-sintering-assisted high intergranular connectivity in ball-milled *ex situ* MgB<sub>2</sub> bulks,” *Superconductor Science & Technology* 27, 114001 1-8 (2014). 査読有り DOI: 10.1088/0953-2048/27/11/114001

[10] A. G. Bhagurkar ほか 5 名: “Synthesis of highly connected bulk MgB<sub>2</sub> by infiltration and growth,” *Superconductor Science & Technology* 28, 015012 1-6 (2015). 査読有り DOI: 10.1088/0953-2048/28/1/015012

[11] Y. Shimada ほか 8 名 “Microstructural characteristics of ball-milled, self-sintered *ex-situ* MgB<sub>2</sub> bulks,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 25, 6801105 1-5 (2015). 査読有り DOI: 10.1109/TASC.2014.2379928

[12] S. Sugino, A. Yamamoto, J. Shimoyama, and K. Kishio: “Enhanced trapped field in MgB<sub>2</sub> bulk magnets by tuning grain boundary pinning through milling,” *Superconductor Science & Technology* 28, 055016 1-7 (2015). 査読有り DOI: 10.1088/0953-2048/28/5/055016

[学会発表] (計 88 件)

- [1] A. Yamamoto *et al.*: 3 Tesla MgB<sub>2</sub> Bulk Superconducting Magnet , 22nd Magnet Technology Conference, Parc Chanot , Marseille(France), 2011.9.14.
- [2] H. Tanaka *et al.*: Relationship between sintering conditions and critical current properties of *ex-situ* MgB<sub>2</sub> bulks, 10th EUCAS, World Forum Den Haag, Hague(Netherlands), 2011.9.22.
- [3] A. Yamamoto: MgB<sub>2</sub> bulk superconducting magnet, The 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors (招待講演) , Sumitomo Club, Osaka(Japan), 2011.10.29.
- [4] M. Tomita *et al.*, Bulk Superconductors for Magnetic Applications, 46th ISS (招待講演) , Funabori Tower Hall, Tokyo(Japan), 2011.10.6.
- [5] A. Yamamoto *et al.*, Development of large size MgB<sub>2</sub> bulk magnet , 2012 MRS Spring Meeting & Exhibit, Moscone West and San Francisco Marriott, San Francisco(USA), 2012.4.13.
- [6] A. Ito *et al.*, Synthesis of dense MgB<sub>2</sub> bulks using MgB<sub>4</sub> precursor, ICMC2012, Fukuoka Intl. Congress Center, Fukuoka(Japan), 2012.5.17.
- [7] A. Yamamoto: Understanding The Routes to Superior Intergrain Connectivity and Critical Current Density in MgB<sub>2</sub> Superconductor, Intl. Union of Materials Societies Int'l Conf. on Electronic Materials (招待講演) , PACIFICO Yokohama, Yokohama(Japan), 2012.9.25.
- [8] A. Ito *et al.*, Synthesis of dense MgB<sub>2</sub> bulks using high purity MgB<sub>4</sub> precursor, Applied Superconductivity Conference 2012, Oregon Convention Center, Portland(USA), 2012.10.10.
- [9] A. Yamamoto *et al.*, Development of MgB<sub>2</sub> bulk superconducting magnets, ASC2012, Oregon Convention Center, Portland(USA), 2012.10.11.
- [10] A. Yamamoto: Synthesis of MgB<sub>2</sub> bulks and their field trapping properties, 25th ISS (招待講演) , Funabori Tower Hall, Tokyo(Japan), 2012.12.4.
- [11] A. Ishihara *et al.*, MgB<sub>2</sub> superconducting bulk for permanent magnet applications, 12th EUCAS, Genova(Italy), 2013.9.16.
- [12] S. Mizutani *et al.*, Development of high connectivity *ex-situ* MgB<sub>2</sub> bulks and wires by novel self-sintering technique, 26th ISS, Funabori Tower Hall, Tokyo(Japan), 2013.11.20.
- [13] S. Mizutani *et al.*, Development of High Connectivity *ex-situ* MgB<sub>2</sub> Bulks by Promotion

of Self-Sintering, 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, Marriott Marquis, San Francisco(USA), 2014.4.23.

[14] A. Yamamoto et al., Development of MgB<sub>2</sub> superconducting bulk permanent magnet ICSM2014 (招待講演), Kervansaray Lara Convention Center, Antalya(Turkey), 2014.4.29.

[15] A. Yamamoto: Can we realize self-assembled, strongly connected grain-boundaries in high performance MgB<sub>2</sub> bulks and wires?, International Conference "Superconductivity for Energy 2014" (招待講演), Savoy Beach Hotel, Paestum (Italy), 2014.5.18.

[16] A. Ishihara et al., Development of MgB<sub>2</sub> superconducting bulk for novel permanent magnet applications, Applied Superconductivity Conference 2014, Charlotte Convention Center, Charlotte(USA), 2014.8.12.

[17] S. Sugino et al., Thickness dependence of trapped field in MgB<sub>2</sub> superconducting bulk magnets, Applied Superconductivity Conference 2014, Charlotte Convention Center, Charlotte(USA), 2014.8.12.

[18] M. Tomita et al., Evaluation of trapped field property in MgB<sub>2</sub> superconducting bulk, The 15th IUMRS-International Conference in Asia, Fukuoka Univ., Fukuoka (Japan), 2014.8.24.

[19] S. Sugino et al., Field trapping properties of MgB<sub>2</sub> bulk magnets with varied grain size, 27th ISS, Funabori Tower Hall, Tokyo(Japan), 2014.11.27.

[20] S. Mizutani et al., Synthesis of high connectivity ex-situ MgB<sub>2</sub> bulks by short time self-sintering, 27th ISS, Funabori Tower Hall, Tokyo(Japan), 2014.11.27.

[21] A. Yamamoto et al., "Development of superconducting bulk permanent magnet," 2015 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演), San Francisco Marriott Marquis, San Francisco (USA), 2015.4.7.

[22] A. Yamamoto et al., "Enhanced trapped field in MgB<sub>2</sub> bulk magnets by tuning grain boundary pinning," 9th PASREG (招待講演), Liege (Belgium), 2015.9.2-4.

[23] A. Yamamoto et al., "Enhanced trapped field in MgB<sub>2</sub> bulk magnets by tuning grain boundary pinning" 12th EUCAS (招待講演), Convention Center of Lyon, Lyon (France), 2015.9.6-10

[図書] (計1件)

[1] A. Yamamoto and K. Kishio: "Bulk MgB<sub>2</sub> permanent magnet," *Intermediate*

*superconductors for applications: MgB<sub>2</sub>*, World Scientific (London), Ed: René Flükiger, Chapter 6 (2015). (出版予定)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸尾 光二 (KISHIO, Kohji)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 50143392

### (2) 研究分担者

山本 明保 (YAMAMOTO, Akiyasu)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 20581995

荻野 拓 (OGINO, Hiraku)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 70359545

下山 淳一 (SHIMOYAMA, Junichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号: 20251366

富田 優 (TOMITA, Masaru)  
鉄道総合技術研究所・研究開発推進室・担当部長  
研究者番号: 40462915

石原 篤 (ISHIHARA, Atsushi)  
鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・研究員  
研究者番号: 00568347

ミリヤラ ムラリダ (MIRYALA, Muralidhar)  
鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・主任研究員  
研究者番号: 90415951  
(平成25年10月まで、異動のため。)

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

赤坂 友幸 (AKASAKA, Tomoyuki)  
杉野 翔 (SUGINO, Sho)  
岩瀬 和至 (IWASE, Kazuyuki)  
廣田 哲也 (HIROTA, Tetsuya)