

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560002

研究課題名(和文) スプリット型パルスコイルによる超強力な超伝導バルク磁石の実現と磁気分離への応用

研究課題名(英文) Realization of high-strength superconducting bulk magnets using split-type coil and the application to magnetic separation

研究代表者

藤代 博之 (FUJISHIRO, Hiroyuki)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：90199315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：着磁実験及びシミュレーション解析により、様々な超伝導バルク(REBCO, MgB2)や様々なコイル(ソレノイド型、スプリット型)を用いたパルス着磁(PFM)および磁場中冷却着磁(FCM)における捕捉磁場向上への検討を行った。2次元及び3次元の電磁界と温度の連成問題を有限要素法により着磁現象を解析するモデルを構築し、実験結果をシミュレーションにより再現した。

高性能なMgB2のPFMにおいては、高磁場印加でflux jumpが顕著に実験的に観測された。これは安定性パラメータと最小伝搬領域の解析で、特性の低いバルクと比べflux jumpが起こりやすいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：The magnetic flux trap phenomena in various superconducting bulks (REBCO, MgB2) have been investigated using pulsed field magnetization (PFM) and field-cooled magnetization (FCM) by experiments and numerical simulation in order to enhance the trapped field, where various-type pulsed coils (solenoid-type, split-type) were used. Two-dimensional and three-dimensional analyses of electromagnetic and thermal fields were constructed using finite element method (FEM). The results of the simulation reproduce well the experimental ones.

In the PFM experiments for the high-quality MgB2 bulks, flux jump took place frequently, which was a clear contrast with the conventional MgB2 bulk, which comes from the instability of the magnetic flux in the superconductor. The instability can be identified by the stability parameter β and minimum propagation zone l_m .

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：パルス着磁 磁場中冷却着磁 REBCO超伝導バルク MgB2超伝導バルク 捕捉磁場 シミュレーション 磁気分離

1. 研究開始当初の背景

REBaCuO 系超伝導バルク(RE:希土類元素)は、REBa₂Cu₃O₇ 超伝導相と RE₂BaCuO₅ 非超伝導相、Ag, Pt などからなる複合材料であり、超伝導相の c 軸配向結晶化と非超伝導相への磁束の強いピン止めにより、5 T(テスラ)を超える「超伝導バルク磁石」が実現している。この強力な疑似永久磁石は従来型の種々の磁石では実現できない磁場範囲と価格・規模を有する特徴を持ち、環境浄化用磁気分離などの新しい応用が始まっている。

超伝導バルクを磁化(着磁)する一般的な方法は、超伝導磁石の強い静磁場を用いた磁場中冷却着磁(FCM)であるが、近年、簡便で安価な方法としてパルス着磁(PFM)が盛んに研究されているが、大きな発熱により捕捉磁場の最高は 3.8 T と低かった。研究代表者のグループは、パルス着磁における発熱現象を理解するために温度測定的重要性を指摘し、温度上昇と捕捉磁場の関係を多くの学術論文、学会等で発表してきた。研究の中から、新しい 2 段階パルス着磁法(MMPSC 法)を提案し、2005 年に 5.20 T の PFM による世界最高の捕捉磁場を実現した。

これまでの検討はソレノイド型コイル(solenoid-coil)を用いた実験と解析であったが、2005 年に東京海洋大学の和泉らのグループが、超伝導バルクを両面から挟む渦巻き型コイル(vortex-coil)を用いたパルス着磁法を提案し、低い磁場印加から磁束がバルク中心に捕捉されることや、ソレノイド型コイルより大きな磁場を捕捉することなどの実験結果を報告した。

2. 研究の目的

ソレノイド型コイルと渦巻き型コイルの利点を取り入れたスプリット型コイルを用いた新しいパルス着磁法を系統的に検討し、その有効性を明らかにする。

- (1) シミュレーション解析により、様々な超伝導バルク(REBCO, MgB₂)や様々なコイルを用いた PFM および FCM 着磁の捕捉磁場向上への検討
- (2) 様々な超伝導バルクに対する PFM 及び FCM による捕捉磁場向上の実験的検討
- (3) 新しいバルクとして REBCO と MgB₂ のハイブリッドバルクに対する捕捉磁場の実験とシミュレーションによる検討

3. 研究の方法

超伝導バルク内の電磁場・温度の連成解析により、様々な超伝導バルクやコイルに対する捕捉磁場シミュレーションを行った。また、様々なピン止め特性を有する超伝導バルクを冷凍機で伝導冷却し、ソレノイド型及びスプリット型パルスコイルとコンデンサバンクを用いて、同一パルス法(SPA)、二段階 PFM 法(MMPSC 法)をバルク温度 T_s と印加磁場 B_{ex} (立ち上がり時間: 10 ms) を変化させて行い、捕捉磁場 B_T、総磁束量 Φ_T を測定

した。バルク超伝導体への磁場捕捉状態を確認するために、バルク直上(0.5mm)の二次元磁場分布を測定した。シミュレーション解析では、電磁界と熱伝導の連成方程式は、東京大学の大崎の解析を参考に、超伝導体の非線形な E-J 特性は n 値モデルを用い、臨界電流密度 J_c の磁場・温度依存性は①式のように Kim モデルを用いて表現した。

$$J_c(T, B) = J_{c0} \frac{B_0}{|B| + B_0} = \alpha \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \frac{B_0}{|B| + B_0} \quad \text{①}$$

4. 研究成果

(1) シミュレーションによる検討

最初に和泉らの vortex-coil を用いた実験結果をシミュレーションで解析した。図 1 に REBCO バルクに対して、印加磁場 B_{ex} とバルク中心表面での捕捉磁場 B_z(r=0) の関係についてのシミュレーション結果を示す。solenoid-coil ではバルク中心表面に B_{ex}=4 T から磁場が捕捉されはじめ、B_{ex}=6 T で最大 B_z(r=0)=1.7 T となる。バルクの外径よりもコイル外径が小さな vortex S-coil では B_{ex}=2 T 付近からバルク中心表面に磁場が捕捉されはじめ、B_{ex}=9 T で最大 B_z(r=0)=2.6 T の磁場が捕捉される。一方、バルクの外径よりもコイル外径が大きい vortex L-coil では、次第に solenoid-coil の振る舞いに近くなる。これらの結果は和泉らの実験結果を定性的に再現している。

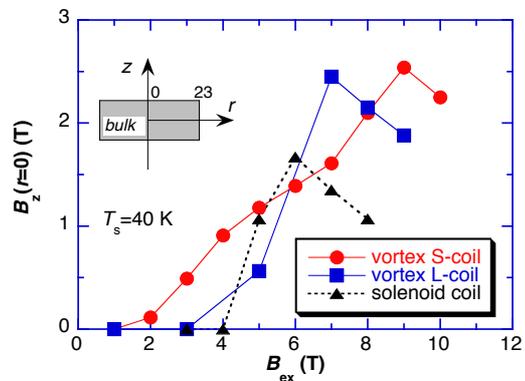


図1 solenoid-coil と vortex-coil の比較

次に 3 次元シミュレーションの結果を報告する。図 2 に成長領域境界(GSB)の臨界電流密度 J_c が成長領域(GSR)より約 4 倍大きな不均一な J_c 分布を仮定した直径 45 mm の REBCO バルクに T=40 K で B_{ex}=6 T のパルス磁場を印加した後の局所磁場と温度の時間変化を示す。パルス磁場を印加した直後には、磁束は J_c の低い GSR から侵入しそれに伴って温度上昇も GSR で主に起こるが、最終的には磁束は GSB 領域に捕捉されることが分かる。この結果は実験結果を定性的に再現しており、シミュレーション解析が有用な手法であることが明らかになった。

図 3 に Mg-RLI 法で作製した MgB₂ バルク(直径 30 mm, 厚さ 9 mm) の 14 K における

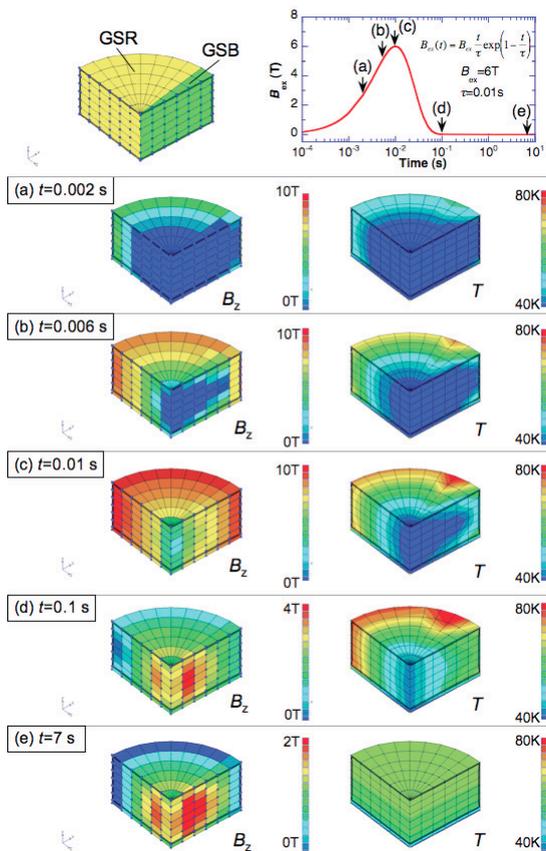


図2 PFMの3次元解析の例

捕捉磁場 B_T^C と印加磁場 B_{ex} の関係を示す。磁束は $B_{ex}=1$ T 付近からバルク中心に捕捉され始め、 $B_{ex}=1.5$ T で最大 $B_T^C=0.7$ T に達した。図中にはシミュレーションの結果を示すが、 J_{c0} の値を変化させたところ、 $J_{c0}=4.1 \times 10^8$ A/m² で実験値をほぼ再現した。

図4に $J_{c0}=4.1 \times 10^8$ A/m² の条件における MgB₂ バルクへの捕捉磁場断面分布の印加磁場依存性を示す。低磁場印加では捕捉磁場分布は中心が凹んだ分布を示すが、 $B_{ex}=1.4$ T 以上では分布は円錐型に変化し、さらに印加磁場を増加させると捕捉磁場が減少することが再現された。このように、MgB₂ バルクの PFM に対してもシミュレーション解析が有効な手法であることが明らかになった。

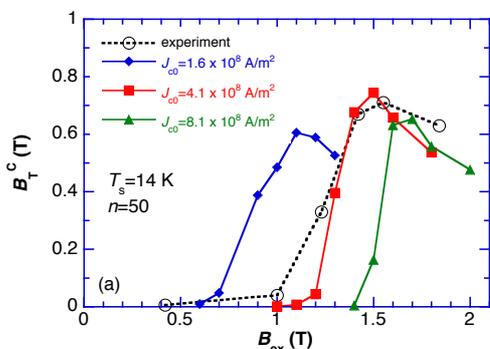


図3 MgB₂ バルクに対する PFM の実験結果とシミュレーション結果

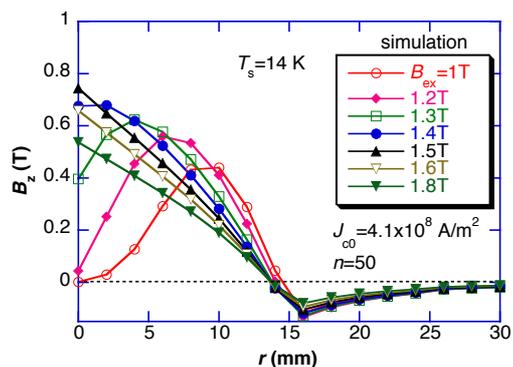


図4 捕捉磁場分布(断面)の印加依存性

(2) MgB₂ に対するパルス着磁の実験結果

FCM 着磁では通常、 J_c が大きなバルクほど捕捉磁場 B_{ex} が大きくなることが実験的にも理論的にも分かっている。しかし MgB₂ バルクでは着磁温度 ($T=20$ K) において REBCO バルクに比べて比熱 C が小さく熱伝導率 κ が大きいので、どのような振る舞いをするかの実験的な結果が存在しなかった。そこで J_c の異なる種々の MgB₂ バルクに対して PFM 実験を行った。

図5にHIP法で作製した直径38mmの高密度 MgB₂ バルクの14Kと20Kにおける捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。このバルクは $T=15$ K で FCM による捕捉磁場が $B_T=2.44$ T であり、図3の Mg-RLI 法により作製したバルクよりも FCM による捕捉磁場と J_c が高い。しかし、PFM による捕捉磁場はほぼ同程度かわずかに高い ($B_T=0.8$ T) 程度であった。この理由は着磁時における flux jump のためである。図6に $T=20$ K で $B_{ex}=2.2$ T を印加した場合の印加磁場と捕捉磁場の時間依存性を示す。 $T=90$ ms 付近で flux jump が起こり、捕捉磁場が急激に減少していることが分かる。図中にはもし flux jump が起こらないと仮定した場合の曲線を示すが、捕捉磁場は約60%に減少している。図5中の点線は flux jump が起こらないと仮定したときの捕捉磁場の推定値である。この結果から、最大捕捉磁場は14Kで1Tを超えることが分かる。Mg-RLI 法により作製したバルクでは flux jump は起こらず、 J_c の高いバルクで頻繁に flux jump が起こることが確認された。

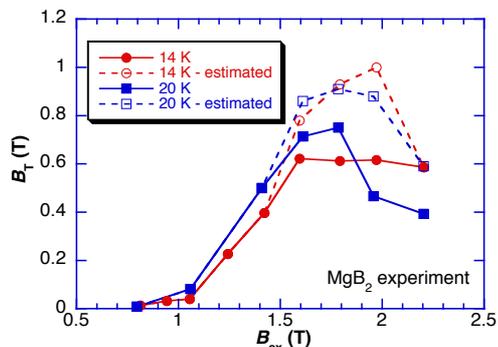


図5 HIP 法で作製した MgB₂ バルクの捕捉磁場の印加磁場依存性

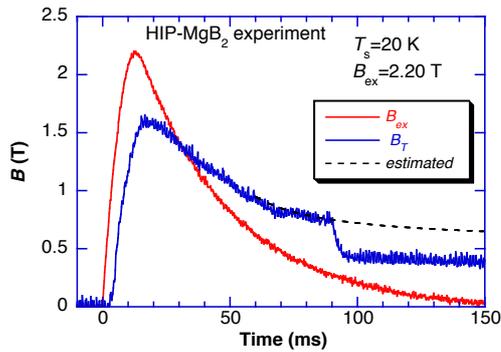


図6 HIP-MgB₂バルクに2.2 Tを印加した場合の印加磁場及び捕捉磁場の時間依存性

flux jump の発生の要因について、安定性パラメータ β と最小伝搬領域 l_m により評価する。

$$\beta = \frac{\mu_0 J_c^2 a^2}{\gamma C (T_c - T_0)} < 3 \quad (2)$$

$$l_m = \left\{ \frac{2\kappa(T_c - T_0)}{\rho J_c^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

ただし、 γ は密度、 ρ は T_c 直上での電気抵抗率、 T_0 は着磁温度、 a はフィラメント径(=10 μm と仮定)である。安定性パラメータ β は3以下が安定化の条件であるが、 J_c の大きなHIP-MgB₂の方がMg-RLIバルクより安定性が悪いことが分かった。また、最小伝搬領域 l_m もHIP-MgB₂の方がMg-RLIバルクより小さく安定性が悪いことが分かる。このように必ずしも J_c が大きなバルクの方がPFMによる捕捉磁場が大きいとは言えないことが分かった。

(3) GdBCO と MgB₂ で作製したハイブリッドバルクに対するパルス着磁

REBCO系バルクは高い捕捉磁場を得られるが、バルク体の作製には結晶配向が必要であるため、バルクの大型化が困難である。一方、MgB₂は捕捉磁場が低いものの、RE系に比べ、電磁的異方性が低くコヒーレンス長が長いことから多結晶でバルクの作製が可能であるため、大型バルクの作製が比較的容易である。2つを組み合わせることで高い捕捉磁場、軽量、レアアースの減量、バルクの大型化が実現可能である。

直径38 mm、厚さ7 mmのMgB₂バルク円環の中に、直径20 mmのGdBCOバルクを挿入したハイブリッドバルクに対するPFMによる捕捉磁場の実験とシミュレーションによる検討を行った。各バルクに対する最適な温度と印加磁場が異なるので、最初にGdBCOバルクを20 Kで着磁し(1st stage)、その後14 KでMgB₂バルクを着磁(2nd stage)する2段階の着磁を行った。図7に捕捉磁場分布の断面図を示す。1st stageでは円錐状にGdBCOバルクに磁場が捕捉され、2nd stageでは周辺のMgB₂バルクに磁場が捕捉されるが、MgB₂のみに14 Kで着磁した場合(図中赤線)と比べて

GdBCOバルクへの着磁により捕捉磁場が減少する。また、中心の磁場は2nd stageでの磁場印加による発熱でわずかに減少することが分かる。今後はシミュレーション解析を進めるとともに、さらに大きなハイブリッドバルクの実験を行い、その優位性を明らかにしたい。

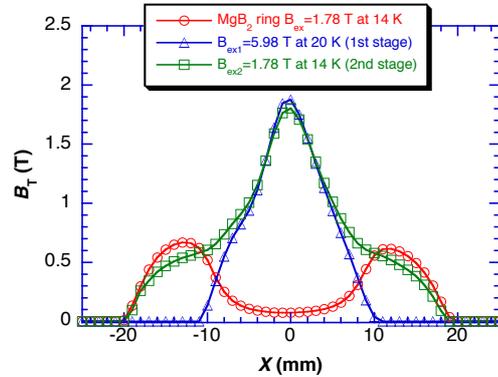


図7 ハイブリッドバルクに対するパルス着磁後の捕捉磁場分布

(4) 研究のまとめ

3年間の研究により以下のことが明らかになった。

- ① 超伝導バルクのPFMにおける2次元及び3次元の電磁界と温度の連成問題を有限要素法により解析するモデルを構築した。Split-coilのsolenoid-coilには無い特徴(低い印加磁場から磁束を捕捉できるなど)をシミュレーションにより再現した。
- ② 3次元シミュレーション解析において、 J_c の高いGSB領域を導入した解析を行った。その結果、磁束は J_c の低い領域から優先的に侵入し、最終的に J_c の高いGSB領域に磁束が優先的に捕捉されることを再現できた。
- ③ REBCO系バルクの他に、MgB₂バルクへのPFMに対する実験とシミュレーションを行った。シミュレーションにより定性的に実験結果を再現することが出来た。
- ④ J_c の高いHIP-MgB₂のPFMにおいては、高磁場印加でflux jumpが顕著に観測された。これは安定性パラメータ β と最小伝搬領域 l_m の解析で、 J_c の低いMg-RLI法で作製したMgB₂と比べflux jumpが起こりやすいことが分かった。
- ⑤ GdBCOとMgB₂で作製したハイブリッドバルクに対するパルス着磁を行い、利点を生かした大型化の可能性を明らかにした。
- ⑥ 当初の計画にあった超伝導バルク磁石の磁気分離への応用は、結果を出すまでに

は至らなかった。今後さらに検討を進め、実用化を目指したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① H. Fujishiro, T. Naito and T. Yoshida, “Numerical simulation of trapped field on MgB₂ bulk disk magnetized by field cooling”, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 065019 (7 pages) [査読あり] (doi:10.1088/0953-2048/27/6/065019)
- ② M. D. Ainslie, H. Fujishiro, T. Ujiie, J. Zou, A. Dennis, Y.-H. Shi and D. A. Cardwell, “Modeling and comparison of trapped fields in (RE)BCO bulk superconductors for activation using pulsed field magnetization”, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 065008 (9pages) [査読あり] (doi:10.1088/0953-2048/27/6/065008)
- ③ H. Fujishiro, T. Naito, M. Oyama, T. Arayashiki, T. Tamura, T. Sasaki and G. Giunchi, “Numerical simulation of trapped field and temperature rise in MgB₂ bulks magnetized by pulsed field”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 6800804 (4 pages) [査読あり] (doi: 10.1109/TASC.2012.2237224)
- ④ H. Fujishiro, T. Naito, T. Sasaki, T. Arayashiki, “Trapped field and temperature rise in MgB₂ bulks magnetized by pulsed field”, *Proc. ICEC24-ICMC2012* (2013) pp. 571-574. [査読あり]
- ⑤ H. Fujishiro, T. Arayashiki, T. Tamura, T. Naito, H. Teshima and M. Morita, “Trapped field profiles on square-shaped GdBaCuO bulks with different arrangement of growth sector boundaries”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 093005 [査読あり] (doi: 10.1143/JJAP.51.093005)
- ⑥ H. Fujishiro, T. Naito and M. Oyama, “Size effect of magnetizing solenoid coil for pulsed field magnetization on the trapped field on superconducting bulk”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** (2012) 4700204 (4 pages) [査読あり] (doi: 10.1109/TASC.2011.2178381)
- ⑦ H. Fujishiro, T. Naito and M. Oyama, “Three-dimensional simulation of magnetic flux dynamics and temperature rise in HTSC bulk during pulsed field magnetization”, *Physics Procedia*, **36** (2012) pp. 687-692. [査読あり] (doi: 10.1016/j.phpro.2012.06.268)
- ⑧ H. Fujishiro, T. Tamura, T. Arayashiki, M. Oyama, T. Sasaki, T. Naito, G. Giunchi and A. Albisetti, “Pulsed field magnetization of large MgB₂ bulk fabricated by reactive liquid Mg infiltration” *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**

(2012) 103005 (5 pages) [査読あり]

(doi: 10.1143/JJAP.51.103005)

- ⑨ H. Fujishiro, T. Naito and M. Oyama, “Mechanism of magnetic flux trapping on superconducting bulk magnetized by pulsed field using a vortex-type coil”, *Supercond. Sci. Technol.* **24** (2011) 075015 (7 pages) [査読あり] (doi: 10.1088/0953-2048/24/7/075015)
- ⑩ H. Fujishiro, T. Naito and D. Furuta, “Analysis of temperature and magnetic field distribution in superconducting bulk during pulsed field magnetization”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) pp. 2723-2726 [査読あり] (doi: 10.1109/TASC.2010.2089419)
- ⑪ H. Fujishiro, T. Naito, M. Oyama, “Simulation of flux dynamics in a superconducting bulk magnetized by multi-pulse technique”, *Physica C* **471** (2011) pp. 889-892 [査読あり] (doi: 10.1016/j.physc.2011.05.081)

[学会発表] (計 24 件)

- ① 藤代博之, 内藤智之, 手嶋英一, 「超電導バルクの磁場中冷却着磁のシミュレーション」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2013.12.6 (名古屋: ウィンクあいち)
- ② 氏家 徹, 吉田卓史, 内藤智之, 藤代博之, 「HIP 法で作製した MgB₂ バルクにおけるパルス着磁特性」: 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2013.12.4 (名古屋: ウィンクあいち)
- ③ H. Fujishiro, T. Naito, T. Ujiie, A. Figini Albisetti and G. Giunchi, “Trapped field and flux dynamics in MgB₂ superconducting bulks magnetized by pulsed field”, 26th International Symposium on Superconductivity (ISS2013), 2013.11.19 (Tokyo: タワーホール船堀)
- ④ H. Fujishiro, T Ujiie, T. Naito, A Figini Albisetti and G Giunchi, “Trapped magnetic field between double stacked MgB₂ bulks magnetized by pulsed field”, 11th European Conference of Applied Superconductivity (EUCAS2013) 2013.9.17 (Genova, Italy)
- ⑤ 藤代博之, 「基礎講座 2: バルク超電導体の着磁現象」第 12 回高温超伝導バルク材夏の学校 2013.8.23 (花巻: ホテル花巻) (招待講演)
- ⑥ 氏家 徹, 内藤智之, 藤代博之, 「2 枚重ねにした MgB₂ バルクにおけるパルス着磁特性」2013 年度春季低温工学・超電導学会, 2013.5.15 (東京: タワーホール船堀)
- ⑦ 藤代博之, 内藤智之, 小山 允, 横山和哉, 岡 徹雄, 「細孔を有するバルク体の

パルス着磁における磁束運動・捕捉磁場シミュレーション」、2013 年度春季低温工学・超電導学会、2013.5.13（東京：タワーホール船堀）

- ⑧ 田村拓也, 佐々木智久, 内藤智之, 藤代博之, 「大型 MgB_2 超電導バルクのパルス着磁特性」, 2012 年秋季低温工学・超電導学会, いわて県民情報交流センター, 2012.11.8 (盛岡)
- ⑨ 小山 允, 田村拓也, 佐々木智久, 内藤智之, 藤代博之, 「シミュレーションを用いたパルス着磁における MgB_2 バルク内の磁束運動と温度変化」, 2012 年秋季低温工学・超電導学会, いわて県民情報交流センター, 2012.11.8 (盛岡)
- ⑩ H. Fujishiro, T. Naito, M. Oyama, T. Arayashiki, T. Tamura, T. Sasaki, and G. Giunchi: “Numerical simulation of trapped field and temperature rise in MgB_2 bulks magnetized by pulsed field”, Applied Superconductivity Conference 2012, 2012. 10. 11 (Portland. USA)
- ⑪ H. Fujishiro, T. Naito, T. Sasaki, and T. Arayashiki: “Trapped field and temperature rise in MgB_2 bulks magnetized by pulsed field”, 24th International Cryogenic Engineering Conference- International Cryogenic Materials Conference 2012, 2012.5.17 (Fukuoka : 福岡国際会議場)
- ⑫ 小山 允, 内藤 智之, 藤代 博之, 「三次元シミュレーションを用いたパルス着磁における超電導バルク内の磁束運動」, 2011 年度秋季低温工学・超電導学会 2011.11.10 (金沢 : 金沢歌劇座)
- ⑬ H. Fujishiro, T. Naito, M. Oyama, “Numerical simulation of flux dynamics in a superconducting bulk magnetized by pulsed field”, 24th International Conference on Superconductivity (ISS2011), 2011.10.25 (Tokyo : タワーホール船堀)

[その他]

ホームページ等

<http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤代 博之 (FUJISHIRO HIROYUKI)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号 : 9 0 1 9 9 3 1 5

(2) 分担研究者

内藤 智之 (NAITO TOMOYUKI)

岩手大学・工学部・助教

研究者番号 : 4 0 3 1 1 6 8 3