

平成21年 5月29日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560003
 研究課題名（和文）新しいパルス着磁法による7テスラを超える超伝導バルク磁石の実現と磁束運動の解明
 研究課題名（英文） Superconducting bulk magnet with higher trapped field over 7 Tesla magnetized by a newly pulsed-field magnetization
 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

研究成果の概要：複数パルス磁場印加による超伝導バルクの捕捉磁場の向上を目的に、バルク直上の捕捉磁場分布の解析や強いピン止め力を有するバルクを用いた実験的検討を行った。新しいパルス着磁法(MMPSC)は、磁束の大きな粘性力により臨界電流密度 J_c 以上の磁場勾配を保持することが出来るため、最終的な捕捉磁場の向上が実現することが定性的に実証できた。今後更なる捕捉磁場向上を目指す基礎的な実験結果を得ることが出来た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：超伝導応用、パルス着磁技術、超伝導バルク、結晶工学、熱物性、環境技術

1. 研究開始当初の背景

バルク超伝導体の特徴的な応用の一つである「超伝導バルク磁石」は、磁気浮上、磁気分離等への応用が検討されている。超伝導バルクを最も有効に磁化する方法は磁場中冷却着磁 (FCM) であるが、最近、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。しかし PFM では、磁束線が磁束ピン止め力 (F_p) や磁束粘性力 (F_v) に逆らって急激に運動するために起こる発熱が非常に大きいため、捕捉磁場 B_t^p は FCM による捕捉磁場 B_t^{FC} よりも小さい。研究代表

者のグループは、この問題を解決するために新しい2段階パルス着磁法 (MMPSC法) を提案し、 $B_t^p=5.20$ T の PFM による世界最高の捕捉磁場を実現した。

2. 研究の目的

本研究では 2003 年から行ってきた捕捉磁場向上に関する研究をさらに系統的に推進し、MMPSC 法による着磁メカニズムを明らかにし、系統的なパルス着磁実験とシミュレーションにより、 $B_t^p=7$ T を超える捕捉磁場の実現を目指す。さらに得られた結果より新しい

パルス着磁法や新しい応用を提案する。具体的には、以下の項目について詳細に実験的検討を行った。

- (1) MMPSC法の着磁メカニズムの解明
- (2) 強いピン止め力を有する超伝導バルクを用いた $B_p=7$ Tの実現の検討
- (3) 直径 65mm 超伝導バルクに対する捕捉磁場及び総磁束量の向上に関する検討
- (4) 5 連型超伝導バルク磁石の開発と産業応用に関する検討

3. 研究の方法

様々なピン止め力を有する超伝導バルク(直径 45mm, 65mm)を冷凍機で伝導冷却し、ソレノイド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)及び、複数パルス着磁法(IMRA法)をバルク温度 T_s と印加磁場 B_{ex} を変化させて行い、捕捉磁場 B_c 、総磁束量 F_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に、バルク直上(0.5mm)の二次元磁場分布を測定する測定系を使って、精密な磁場分布をバルクからの距離 z の関数として測定した。

4. 研究成果

(1) MMPSC法の着磁メカニズムの解明

図1にMMPSC法の概略図を示す。この方法は、2段階に温度を設定し($T1$, $T2$)、各段階で最適なパルス磁場($B1$, $B2$)を複数回印加する方法である。第1段階において磁場分布を凹型(いわゆる”M字型”)に捕捉させることが重要な条件であることが実験的に示されているが、なぜM字型の捕捉磁場分布が必要なのか、その理由については明確な説明が示されていない。

・45mm GdBaCu0 バルクを第1段階で $T1=70$ K に冷却し、立ち上がり時間 12ms、 $B1=3.2$ T のパルス磁場を2発印加してM字型磁場分布を形成した後、 $T2=30$ K の第2段階で $B2=6.3$ T のパルス磁場を印加した。図2にその時の印加磁場 $\mu_0 H_a(t)$ と各地点(#1, #2, #3)での局所磁場 $B_L(t)$ の時間依存性を示す。バルク周辺の B_L (#1), B_L (#3)は $t=6$ ms から遅れて立ち上がり、バルク中心の B_L (#2)は印加磁場がピークに達した直後の $t=13$ ms から急激に立ち上がることが分かる。

図3(a), (b)に、図2の結果を用いて推定した増磁過程($t \leq 12$ ms)と減磁過程($t \geq 12$ ms)のバルク内部の磁束分布の時間依存性をそれぞれ示す。図3(a)中の $t=0$ msの太い点線が第1段階で形成されたM字型の初期磁場分布である。バルク周辺部の B_L (#1), B_L (#3)は $t \leq 6$ ms ではほとんど変化せず#1, #3地点にkinkを生じる。この結果は磁束の粘性力 F_v

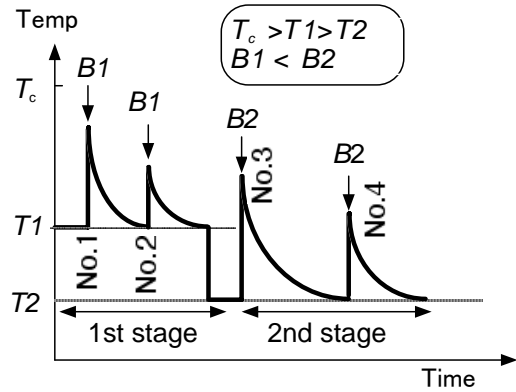


図1 MMPSC法の概略図

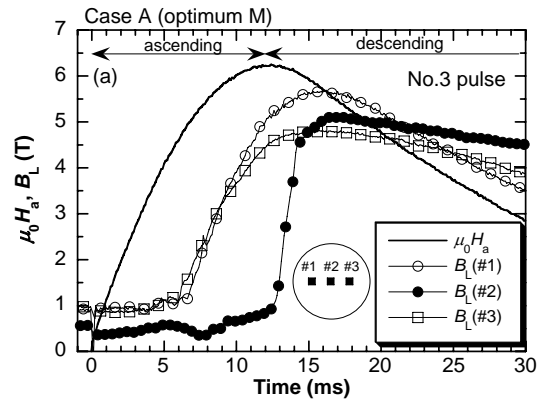


図2 $T2=30$ K, $B2=6.3$ Tにおける印加磁場 $\mu_0 H_a(t)$ と各地点での局所磁場 $B_L(t)$ の時間依存性

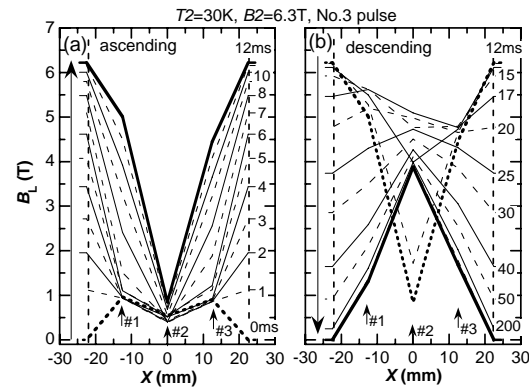


図3 (a)増磁過程及び、(b)減磁過程におけるバルク内での磁束の運動

が増磁過程の初期には支配的であることを示唆する。 $t \geq 6$ msでは B_L (#2)はほとんど増加しないが、 B_L (#1), B_L (#3)は徐々に増加し、 $t=12$ msでは磁場分布は直線的になる。減磁過程直後($t=15$ ms)には B_L (#2)が急激に増加し、その後 B_L (#1), B_L (#3)が徐々に減少して、最終的に最大 B_L (#2)=4 Tの円錐型磁束分布が実現する。

第1段階で、図3(a)とは異なるM字型の磁場分布に対する結果と比較すると、図3の

結果は増磁過程終了時 ($t=12$ ms) のバルク内の磁場勾配 (dB/dx) の違いが顕著である。すなわち、バルク内の磁場勾配は Bean model では臨界電流密度 J_c を示すが、図 2 の条件では磁束に対する粘性力が大きいため J_c より大きな磁場勾配が実現する。外部磁場速度 v がほとんどゼロとなる $t=12$ ms 付近で粘性力が減少し (F_v は v に比例する)、周辺部に留まっている多くの磁束が中心部へフローすると考えられる。一方、第 1 段階で中心部に多くの磁束を捕捉させた場合には、 $t=12$ ms の磁場勾配が J_c よりも小さく、バルク周辺部の磁束はバルク中心部ではなく外部に排除される。このように、第 1 段階での M 字型磁束分布の中心部の凹みの程度が磁場勾配 (dB/dx) の大きさを決定する主要因であると結論することができる。第 2 段階の温度・磁場条件 (T_2 , B_2) や温度上昇の大きさなども、最終的なバルク中心での捕捉磁場に影響していることが明らかになった。

(2) 強いピン止め力を有する超伝導バルクを用いた $B_T^P=7$ T の実現の検討

磁場中冷却着磁 (FCM) の場合には、捕捉磁場はバルクの J_c が大きいほど大きく、低温化によりさらに大きな磁場を捕捉できる。これまで検討した 45mm 超伝導バルクは 77K での FCM により $B_T^{FC}=1.5$ T \sim 1.7 T の捕捉磁場を有していたが、さらに捕捉磁場の大きな超伝導バルク ($B_T^{FC}=1.9$ T \sim 2.2 T at 77K) を (財) 超電導工学研究所より借用し、様々な温度と印加磁場で PFM を行い、7T を越える捕捉磁場の実現を目指した。

FCM による捕捉磁場の大きな超伝導バルクは面内のピン止め力の不均一が大きく、低温においてその傾向が顕著になることが分かった。そのため MMPSC 法を用いても、結果的にはこれまでの最高の捕捉磁場 $B_T^P=5.2$ T を上回る捕捉磁場を達成できなかった。不均一なピン止め力を有するバルクに対する新しい PFM 法の開発が必要である。

(3) 直径 65mm 超伝導バルクに対する捕捉磁場及び総磁束量の向上に関する検討

Bean の臨界状態モデルによると、超伝導バルクの臨界電流密度 J_c が等しいならば、FCM によるバルク中心での捕捉磁場 B_T^{FC} は直径 d に比例し、総磁束量 F_T^{FC} は直径 d の三乗に比例するため、大型超伝導バルクへの期待は大きい。しかし、直径 60 mm を越える大型バルクをパルス着磁する場合、中心での捕捉磁場 B_T^P の向上のためには大きな磁場パルスを印加しなければならず、装置の制約上、 B_T^P の向上は難しいという問題があった。本研究では、大型バルクの長所を生かして直径 65 mm の Gd

系超伝導バルクへ複数パルス磁場印加 (SPA+IMRA 法) による総磁束量 F_T^P の向上を検討し、FCM による総磁束量 F_T^{FC} との比較を行った。さらに、同一バルクを用いて PFM における温度上昇を測定し、得られた捕捉磁場や総磁束量の結果に対して温度上昇の観点から考察した。

図 4 に SPA+IMRA 法の概念図を示す。バルク温度 T_s (一定) において同一強度 B_1 の磁場パルスを 3 発印加し (SPA 法)、その後、印加磁場強度を徐々に減少させながら複数回の磁場を印加した (IMRA 法)。

図 5 に $T_s=40$ K、SPA 法における磁場強度 6.3 T、その後、印加磁場を約 0.4 T ずつ減少させて印加する計 10 発のパルス磁場を印加する SPA+IMRA 法を用いた場合の磁場分布のパルス印加回数依存性を示す。 $T_s=40$ K ではピン力が強いため、 $B_1=6.6$ T の磁場印加では中心まで十分に磁束が進入できず、凹型の磁場分布となる。その後 IMRA 法を適用することで周辺部に多くの磁束が捕捉され、最終的に総磁束量は飽和する傾向が見られる。

図 6 に SPA+IMRA 法により得られた総磁束量 F_T^P とバルク表面からの距離 z の関係を示す。 F_T^P は z とともに単調に減少し、温度の低下とともに増大する。 $T_s=40$ K では $z=0.5$ mm で $F_T^P=5.05$ mWb と高い値を

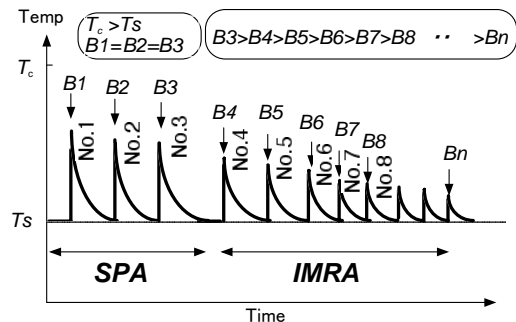


図 4 SPA+IMRA 法の概念図

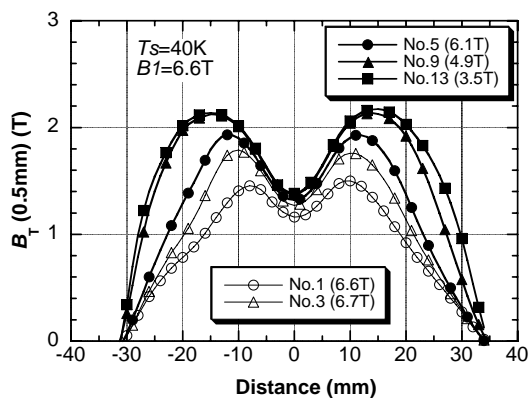


図 5 SPA+IMRA 法の各段階における捕捉磁場分布

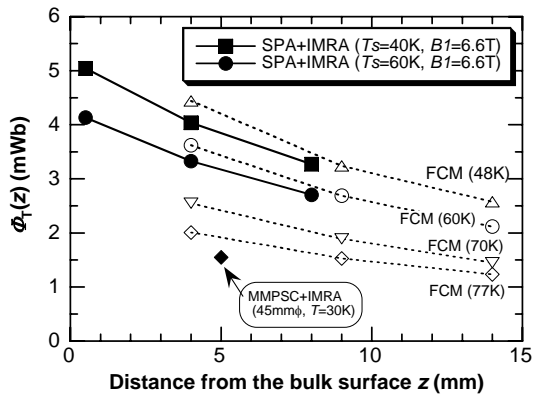


図6 SPA+IMRA法により65mmバルクに捕捉された総磁束量 $\Phi_T(z)$ とバルクからの距離 z の関係。FCMにより捕捉された総磁束量 $\Phi_T^{FC}(z)$ の結果も示す。

示し、同様の方法で着磁した直径45mmのバルクの約2倍の F_T^P 値を示した。図中には様々な温度で $B_{ex}=3T$ の磁場中でFCMを行った後の F_T^{FC} の z 依存性を点線で示す。 $T_s=40K$ でのSPA+IMRA法による F_T^P は、48Kでの F_T^{FC} とほぼ等しい値を示すことが分かった。FCMは印加磁場 B_{ex} の増大により F_T^{FC} を増大させることが出来るが、フープ力によりバルクが割れる問題があり、複数パルス磁場印加法(SPA+IMRA法)は F_T の増大に対する1つの方法を提案している。

(4) 5連型超伝導バルク磁石の開発と産業応用に関する検討

本研究グループは、前項までに示した捕捉磁場向上に関する系統的な検討の他に、2個または5個のバルク磁石を列状に配置したマルチバルク磁石装置の開発を行ってきた。マルチバルク磁石装置は、冷凍機で冷却した超伝導バルクを両側から挟み、スプリット型パルスコイルを用いたパルス着磁法でのみ実現することができ、真空容器表面で2T以上の強磁場を発生している。さらに、磁気勾配($dB/dx=150T/m$)や磁気力場($BdB/dx=200T^2/m$)も永久磁石を用いた場合の10倍以上大きく、他に類を見ない装置である。5連型の場合、表面と裏面を合わせて10個の磁極を活用できる。本研究では、5連型バルク磁石装置を用いて、強磁性粒子(マグネタイト: Fe_3O_4)、弱磁性粒子(ヘマタイト: Fe_2O_3)を水に分散させ、磁極を通過した後の粒子濃度及び磁気分離率を、粒子の粒径、流量、初期濃度に対して実験的に検討した。

水中の初期分散濃度を P_0 とし、1つの磁極における磁気分離率を k ($0 \leq k \leq 1$)とすると、 n 個の磁極を通過した後の濃度 P は $P=P_0(1-k)^n$ と表すことが出来る。この計算結果を図7に

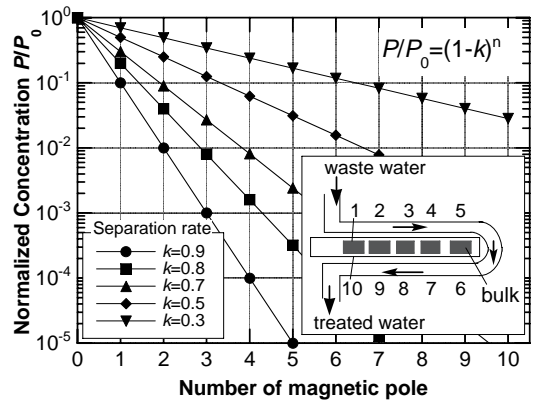


図7 磁極1つあたりの分離率 k の関数としての規格化した粒子濃度 $P/P_0=(1-k)^n$ と磁極数 n の関係。

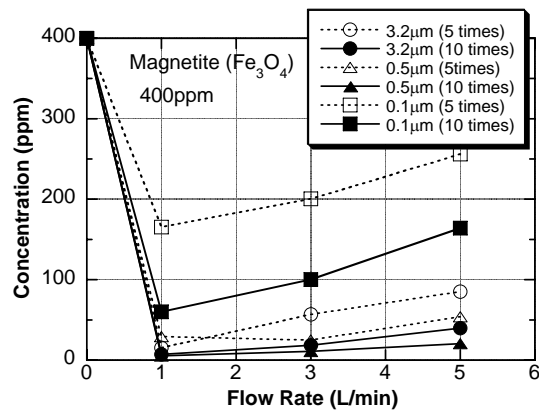


図8 粒径の異なるマグネタイト(Fe_3O_4)粒子を分散させた懸濁液の磁気分離の流量及び磁極数依存性

示す。磁極1個当たりの磁気分離率が $k=0.3$ と低くても、10個の磁極を通過することで最終的な濃度は初期濃度の3%まで低下する(磁気分離率は97%)。このことは、弱磁性体や強磁性ナノ粒子のような磁気力が弱い場合でも高精度の磁気分離が可能になる。

図8に種々の平均粒径(3.2mm, 0.5mm, 0.1mm)を有するマグネタイト(Fe_3O_4)粒子を初期濃度400ppmで分散させた原水を、5磁極及び10磁極を通過後の濃度の流量依存性を示す。図7の挿入図に実験に用いた流路の概略を示すが、断面が $30 \times 80 \text{ mm}^2$ で磁気分離はopen gradient方式で行った。粒子濃度は吸光度測定により決定した。3.2mm, 0.5mmのマグネタイト粒子の濃度は1L/minの流量で10ppmまで低下し、流量の増加とともに濃度はわずかに増加する。10磁極通過後の濃度が5磁極通過後の濃度よりも低下することが分かる。粒径0.1mmのマグネタイト粒子では、磁気力の低下から分離率が低下するが、10磁極通過後の濃度は170ppmまで減少することが分かった。

粒径1mmのヘマタイト(Fe_2O_3)粒子を

500ppm に分散させた原水の磁気分離を、流路の磁極前面に強磁性メッシュを入れた高勾配磁気分離 (HGMS) 方式で行った。磁場が存在しなくても磁性メッシュのフィルター効果で流量 1L/min で 10 磁極通過後に 180ppm まで濃度が低下し、磁場の印加でさらに 60ppm まで低下した。流路の構造や磁性メッシュ挿入方法の改良により、更なる濃度の低下と大流量化が期待できる。

(5) 研究のまとめ

2 年間の研究により以下のことが明らかになった。

- ・ PFM 後の超伝導バルク (0.5mm) 直上の二次元捕捉磁場分布の精密測定は、ピン止め力分布とその温度依存性、及び磁束の侵入経路に対する重要な情報を与える。
- ・ MMPSC 法による捕捉磁場の増大効果は、第 1 段階での M 字型磁束分布の中心部の凹みの程度が磁場勾配 (dB/dx) の大きさを決定する主な要因であり、ピン止め力の強い低温の第 2 段階での強磁場印加で周辺の磁束が中心へフローするためと結論することができる。
- ・ 一般的に FCM では、ピン止め力の強いバルクの捕捉磁場は大きい、PFM の場合はピン止め力の不均一やピン止め損失の増大などのため、7T を越える捕捉磁場の増大は確認できなかった。このようなバルクに対する新しい PFM 法の開発が必要である。
- ・ 直径 65mm を越える大型超伝導バルクの PFM による着磁は、装置の制約から中心の捕捉磁場 B_p の増大は困難であるが、総磁束量 F_p の増大は IMRA 法の適用により大きな効果があることが明らかになった。
- ・ PFM 法の利点を生かした 2 連型及び 5 連型超伝導バルク磁石を、高精度の磁気分離に応用することを検討した。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 8 件)

- ① H. Fujishiro, T. Hiyama, T. Miura, T. Naito, S. Nariki, N. Sakai, I. Hirabayashi, “Pulsed Field Magnetization for GdBaCuO Bulk with Stronger Pinning Characteristics”, IEEE Trans. Appl. Supercond. (2009) 査読有, 掲載決定

- ② H. Fujishiro, K. Kakehata, T. Naito, Y. Yanagi and Y. Itoh, “Enhancement of total trapped fluxes on $\phi 65$ mm GdBaCuO bulk by multi-pulse techniques”, Physica C, (2009), 査読有, 掲載決定
- ③ T. Hiyama, H. Fujishiro, T. Tateiwa, T. Naito, H. Hayashi and K. Tone, “Trapped Field Enhancement of Five-aligned Superconducting Bulk Magnetized by Pulse Field for Magnetic Separation”, Physica C, **468**, 1469-1472 (2008) 査読有
- ④ H. Fujishiro, T. Hiyama, T. Naito, T. Tateiwa and Y. Yanagi, “Possible explanation for trapped field enhancement on REBaCuO bulk by modified multi-pulse technique with stepwise cooling (MMPSC)”, Materials Science and Engineering B, **151**, 95-100 (2008) 査読有
- ⑤ T. Tateiwa, Y. Sazuka, H. Fujishiro, H. Hayashi, T. Nagafuchi and T. Oka, “Trapped field and temperature rise in rectangular shaped HTSC bulk magnetized by pulse fields”, Physica C, **463-465**, 398-401, (2007) 査読有
- ⑥ H. Fujishiro, T. Hiyama, T. Tateiwa, Y. Yanagi and T. Oka, “Importance of initial M-shaped trapped field profile using a two-step pulse field magnetization (MMPSC) method”, Physica C, **463-465**, 394-397, (2007) 査読有
- ⑦ H. Fujishiro, T. Tateiwa and T. Hiyama, “Enhancement of Trapped Field and Total Trapped Flux on High Temperature Bulk Superconductor by a New Pulse-Field Magnetization Method”, Jpn. J. Appl. Phys., **46**, 4108-4112, (2007) 査読有
- ⑧ H. Fujishiro, T. Tateiwa, K. Kakehata, T. Hiyama and T. Naito, “Trapped Field and Temperature Rise on $\phi 65$ mm GdBaCuO Bulk by Pulse Field Magnetization”, Supercond. Sci. Technol., **20**, 1009-1014, (2007) 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① H. Fujishiro, Enhancement of total trapped fluxes on $\phi 65$ mm GdBaCuO bulk by multi-pulse techniques., 21st International Symposium on Superconductivity (ISS2008), Tsukuba, 2008. 10. 29
- ② H. Fujishiro, Pulsed Field Magnetization for GdBaCuO Bulk with Stronger Pinning Characteristics., 2008 Applied Superconductivity Conference, Hyatt Regency Chicago, Illinois, Chicago, USA, 2008. 8. 20
- ③ 藤代博之、「強いピン止め力を有する超伝

導バルクへのパルス着磁」、2008年度春季低温工学・超電導学会、明星大学・八王子、2008. 5. 26

- ④ 藤代博之、「強いピン止め力を有するバルクにおけるパルス着磁特性」、第55回応用物理学関係連合講演会、船橋、日大理工学部、2008. 3. 29
- ⑤ H. Fujisiro, Trapped field characteristics on $\phi 65$ mm GdBaCuO bulk by modified multi-pulse technique with stepwise cooling (MMPSC), 20th International Symposium on Superconductivity (ISS2007), Tsukuba, 2007. 11. 7
- ⑥ H. Fujishiro, “Possible explanation for trapped field enhancement on REBaCuO bulk by modified multi-pulse technique with stepwise cooling (MMPSC)”, 6th International Conference on Processing and Applications of Superconducting REBCO Large Grain Materials (PASREG), Cambridge大学, UK, 2007. 9. 15
- ⑦ 藤代博之、「 $\phi 65$ mm大型超伝導バルクのパルス着磁特性(2) ---MMPSC法の効果---」、2007年度春季低温工学・超電導学会、2007. 5. 18 千葉大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：薄膜の製造方法及び半導体装置
発明者：吉本則之、藤代博之、小川 智
権利者：国立大学法人岩手大学
種類：特許権
番号：特願 2007-242624
出願年月日：平成 19 年 9 月 19 日
国内外の別：国内

[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) 研究分担者

平成 19 年度研究分担者

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

平成 19 年度研究分担者

岡 徹雄 (OKA TETSUO)
新潟大学・工学部・准教授
研究者番号：4 0 4 3 2 0 9 1

(3) 連携研究者

平成 20 年度連携研究者

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

平成 20 年度連携研究者

岡 徹雄 (OKA TETSUO)
新潟大学・工学部・准教授
研究者番号：4 0 4 3 2 0 9 1