バルク超電導体のパルス着磁技術の動向と熱物性データベース

藤代 博之*(岩手大学)

Recent Development of Pulse Field Magnetization and Database of Thermal Properties for HTSC Bulks

Hiroyuki Fujishiro* (Iwate University)

The pulse field magnetization (PFM) technique has been intensively investigated to realize the REBaCuO superconducting bulk magnet because of the relatively compact and inexpensive setup of the apparatus compared with the field-cooled magnetization (FCM). The trapped field B_T by PFM is, however, lower than that by FCM due to the large temperature rise by the magnetic flux movement. The enhancement of B_T over 5 T has recently achieved by a modified multi pulse technique with stepwise cooling (MMPSC). The bulk magnet due to PFM is expected to apply some engineering fields. In this report, we summarize the recent development of the PFM technique. We also mention the thermal properties of REBaCuO bulks such as thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal expansion and introduce you the database (*http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/database.html*) opened on the Web site.

キーワード:バルク超電導体、パルス着磁、超電導バルク磁石、捕捉磁場、温度上昇、熱伝導率、熱拡散率、比熱、熱膨張、熱物 性データベース

(Superconducting bulks, Pulse field magnetization, Superconducting bulk magnet, Trapped field, Temperature rise, Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Specific heat, Thermal expansion, Database for thermal properties)

1. はじめに

REBaCuO 系バルク超電導体は、作製プロセスの改良に より臨界電流密度 Jc や捕捉磁場 BT などの超伝導特性が向 上し、その応用が盛んに検討されている. その中で超強力 な磁石(超電導バルク磁石)への応用は、バルク内の高密 度に微細分散したピン止め中心に磁束線を捕捉すること で、Nd-Fe-B 系永久磁石を遙かにしのぐ捕捉磁場を実現す ることができ、すでに磁場中冷却着磁法(field cooled magnetization: FCM)により、29 K で 17 T を超す捕捉磁場が 報告されている⁽¹⁾. 超電導転移温度 T_c (~90 K)以下に冷却し たバルクに、1 s 以下の強いパルス磁場を印加して磁束を捕 捉させるパルス着磁法(pulse field magnetization: PFM)もま た、超電導マグネットを用いないために着磁装置が小型で 可搬, 安価となるため, 最近盛んに研究されている. 液体 窒素温度(77 K)付近では, PFM 法の1つである反復着磁法 (Iterative magnetizing operation with gradually reduced pulse field amplitude: IMRA 法)⁽²⁾や,段階的に温度を下げながら パルス磁場を印加する Multi-pulse technique with stepwise cooling (MPSC) 法⁽³⁾などにより, FCM による捕捉磁場 B_T^{FC} とほぼ同等の捕捉磁場 B_T^P が実現されている. しかし, 高 い Jcのため大きな捕捉磁場が期待できる 50 K 以下の極低 温では、 B_T^P は B_T^{FC} に比べて非常に小さい. その主な原因 は、PFM においてはバルク内で磁束線がピン止め力 F_p や 粘性力 F_v に逆らって急激に運動することによるバルク内の 温度上昇のために J_c が低下するためであると想像される が、名古屋大学の水谷ら⁽⁴⁾や ISTEC の深井ら⁽⁵⁾の報告以外、 系統的な温度上昇に関する実験結果は存在しなかった.本 研究グループは 2003 年からパルス着磁現象を温度測定に よる発熱現象から明らかにしてきた⁽⁶⁻¹⁰⁾.その結果を考察 する中から、バルクの初期温度 T_s と印加磁場強度 B_{ex} を最 適化する2段階着磁法(Modified MPSC; MMPSC)を提案し、 これまでの PFM における捕捉磁場の最高値 3.80 T⁽¹¹⁾を上回 る B_T^P =5.20 T の磁場を捕捉することに成功した^(12,13).本報 告では、本研究グループの検討結果を中心に、パルス着磁 の最近の動向と産業応用の可能性について述べる.

着磁過程や交流損失における発熱現象の考察や解析,電流リードの設計,さらに熱応力の計算などには,バルク超 電導体の熱伝導率,熱拡散率,熱膨張などの熱的パラメー タが必要である.これまでに種々のバルク超電導体の熱物 性測定を行い,Web上で公開しているバルク超電導体のデ ータベース(http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/database.html)につ いても解説する⁽¹⁴⁾.

2. バルク超電導体のパルス着磁技術の動向

(2・1) これまでの進展 パルス着磁は永久磁石を着磁す

る方法として以前より使われてきたが、実用サイズのバル ク超電導体をパルス磁場により着磁する本格的な研究は, 1990 年代中頃から名古屋大学の水谷グループと(株)イムラ 材料開発研究所で開始された.パルス着磁を行ったときの 着磁現象を把握するため、パルス磁場印加後にバルク体に 捕捉された磁束 $B_{\mathrm{T}}^{\mathrm{P}}$ の捕捉磁場分布と、総捕捉磁束量 Φ_{T} の 印加磁場依存性を調べ、その結果を FCM と比較した⁽¹⁵⁾. 伊藤らは複数個のホール素子を用いて、パルス磁場印加中 における超電導バルク内での磁束密度分布の時間的変化を 測定した.その結果,運動する磁束線にはピン止め力 Fpの 他に速度に比例する粘性力 F_v が働き, それがバルク内部へ の磁束線の侵入を妨げていることを明らかにした(16). 寺崎 らはピックアップコイルを用いて平均的な磁束線の総量の 時間的変化を測定した. 77 K における系統的な実験から, 比較的捕捉磁場の小さい Y 系バルクでは、最適な印加磁場 を選べば FCM とほぼ同等な磁束量を捕捉できることが分 かった⁽¹⁷⁾. さらに捕捉磁場の大きな Sm 系バルクに対して は、電磁軟鉄などの yoke を用いることで磁束量を増大出来 ることを示した(18).水谷らはさらに、同一温度で磁束線を バルク中央へ侵入させた後、印加磁場を徐々に減少させる 複数パルス印加法 (IMRA 法) を提案し, yoke + IMRA 法 で Sm 系バルクに対して FCM の約 90 %まで着磁すること に成功した⁽¹⁹⁾.図1に IMRA 法の概念図を示す.

バルクの温度 T_s の低温化は、臨界電流密度 J_c が向上するためピン止め力 $F_p=J \times B$ が増大し捕捉磁場が向上すること



図1 IMRA 法の概念図 Fig. 1. The schematic concept of the IMRA method.



図2 MPSC 法の概念図 Fig. 2. The schematic concept of the MPSC method.

が期待される.近年の冷凍機の進歩により,冷凍機冷却の バルク超電導磁石の開発も盛んになってきている.Sander らは図2に示すように,温度を段階的に低下させながら, 同じ強度のパルス磁場を複数回印加する MPSC 法を提案 し,捕捉磁場の向上を報告した⁽³⁾.また,藤代らはパルス の立ち上がり時間を長くする方法⁽²⁰⁾や,バルクの外周に金 属リングを密着させ,熱容量を増加させてバルクの発熱を リングで吸収すること⁽²¹⁾も捕捉磁場の向上に効果があると 報告している.

装置に組み込んだまま着磁出来るパルス着磁の利点を生かし、イムラ材料開発研究所では超電導バルク磁石の界磁 により回転力を得る超電導モータを製作し、ゴルフカート に搭載して走行させることに成功している⁽²²⁾.東京海洋大 学の和泉らは、バルク体を界磁とするアキシャルギャップ 型のモータを開発した⁽²³⁾.この際のバルクの着磁には"渦 巻き型コイル"という新しいタイプのスプリット型パルスコ イルを用いており、従来のパルスコイルとは異なるパルス 着磁法の可能性を示した⁽²⁴⁾.

 $\langle 2 \cdot 2 \rangle$ 温度測定の重要性 本研究グループはパルス 着磁現象を理解し捕捉磁場の向上を実現するには、温度測 定による発熱現象の解明が重要であると考え,基礎的検討 を行ってきた. 図3に GM 冷凍機にセットした超電導バル クと着磁コイルの様子を示す. クロメル・コンスタンタン 熱電対(線径 76 µm)を位置 P0~P4 に貼り付け,中心の 温度 T0 と成長領域境界(Growth Sector Boundaries; GSBs)で 囲まれた4つの成長領域(Growth Sector Regions; GSRs)の中 心から9 mmの距離での温度 T1~T4 のパルス磁場印加後の 時間依存性を測定した. バルク初期温度 T_s(40~70 K)と 印加パルス磁場強度 Bex (3.01 T~5.42 T) を変化させた. 同一強度の磁場パルスをバルク表面の温度が初期温度に回 復した後,合計5回繰り返し印加した (No.1~No.5 pulse). 捕捉磁場は PH の位置 (B_T^{P}) および,バルク表面から 3 mm 上の2次元分布(B_T^{3mm})をホールセンサにより測定した.

図4に*T*_s=40Kに冷却した SmBaCuO系バルクへ*B*_{ex}=3.01 TのNo.1 pulse およびNo.5 pulse 印加後の各地点での温度 変化*T*(*t*)をそれぞれ示す.ゼロ磁場冷却(ZFC)状態へのNo.1 pulse 印加の場合,*T2*,*T3*が速く立ち上がってピークを







図 5 温度上昇と捕捉磁場のパルス印加回数依存性 Fig. 5. Pulse number dependence of maximum temperature rise $\Delta T \theta_{max}$ and trapped field B_T^P .

生じ、次いで T4, T1, 最後に T0 が立ち上がる. このような 場所による温度応答の違いは、磁束がバルク内で臨界電流 密度 J_c の低い場所から選択的に侵入し、この部分で磁束侵 入に対する表面バリアを破壊し発熱していることを示して いる. 挿入図に示す磁場分布 B_T^{3mm} から、温度上昇が大き い P2, P3 で磁場が捕捉されていることが分かる. 同一強度 のパルス磁場を5回印加後(No. 5 pulse)では温度上昇は低減 する. B_{ex} が大きくなると、磁束の侵入に対するすべての表 面バリアが崩壊し、バルク周辺からほぼ均等に磁束が侵入 し、それに対応した発熱が起こり $T1(t) \sim T4(t)$ に大きな違い が見られない. 例えば B_{ex} =4.64 T での B_T^{3mm} は磁束が中心 まで進入するため、きれいな円錐状の捕捉磁場分布を示 す. このように、バルク内の J_c の不均一性と磁場捕捉分布 を反映して発熱分布が生じていることが分かる.

図5に T_s =40 K と 60 K で B_{ex} =3.01 T と 4.64 T のパルス磁 場を印加した場合の,バルク中心(P0)での最大温度上昇 ΔTO_{max} と捕捉磁場 B_T^P のパルス磁場印加回数依存性を示 す.いずれの場合も No. 1 pulse での温度上昇 ΔTO_{max} が最も 大きく,磁場印加回数の増加とともに ΔTO_{max} は減少し一定 値に近づく. ΔTO_{max} はバルク温度 T_s が低いほど大きく印加 磁場 B_{ex} が大きいほど大きい. 捕捉磁場 B_T^P は No. 1 pulse で最終値の 80 %以上が捕捉され,磁場印加回数の増加とと もに一定値に近づく. 飽和傾向を示す $\Delta T0_{max}$ と B_T^P のパルス磁場印加回数依存性は類似しており、磁場の捕捉と温度上昇が密接に関係していることを示唆している.

図 6 に SmBaCuO バルクに対する種々の T_s , B_{ex} における パルス着磁において, バルク中心での最大温度上昇 ΔTO_{max} を No. 1 および No. 5 pulse の場合について示す. No. 1 pulse においては, ΔTO_{max} は T_s の上昇と共にほぼ単調に減少する ($T_c=92$ K でゼロになる)が, No. 5 pulse においては $B_{ex} \leq 3.84$ T の場合には ΔTO_{max} はわずかにピークを示す. パルス磁場 印加による発熱量 Q は、次式を用いて算出することが出来 る.

$$Q = \int_{T_s}^{T_s + \Delta T \theta_{\text{max}}} C(T) V dT = Q_p + Q_v$$
(1)

ここで Q_p はピン止め力損失, Q_v は粘性力損失, V は試 料の体積である. C(T)は同一組成の試料の熱伝導率と熱拡 散率の同一セッティング測定から C=κ/αにより求めた⁽¹⁴⁾. 図7には No. 1 と No. 5 pulse に対して算出した発熱量 Q(No.1), Q(No.5)の T_s依存性を示す. 推定された発熱量 Q は、図6のATOmaxとはかなり異なる温度依存性を示す. No.1 pulse において Q は、 B_{ex} が大きい場合には T_s の上昇と共に 減少するが、Bex が小さい場合にはピークを示し Tc でゼロ となる. これに対し No. 5 pulse においては、ピークを示 す傾向(dQ/dT_>0の傾向)がより顕著である.図5(b)より, 捕捉磁場 B_T^P はどの場合でも No. 3 pulse 以降は飽和してい るので, No. 5 pulse における発熱 O(No.5)は、 <u>磁場の捕</u>捉と 関係するピン止め損失 Q_pが非常に小さく、ほとんどが磁 束の運動による損失 Q_v と考えて良い($Q(No.5)=Q_v$). $Q_{\rm v}$ が磁場パルスの強度やバルクの温度に依存しないと仮定す ると, ΔQ=Q(No.1)-Q(No.5)は No. 1 pulse に対す 止め 力損失 Q_p と考えることが出来る($\Delta Q=Q_p$). このよ 同-パルス印加の場合の発熱量 Qの解析から Q_{p} と Q_{p} 離が 可能になった.



Fig. 6. The maximum temperature rise $\Delta T \theta_{max}$ for various B_{ex} and T_s (No. 1 and No. 5 pulses).



図7 推定発熱量Q (No. 1 および No. 5 pulse) Fig. 7. The estimated generated heat Q for various B_{ex} and T_s (No.1 and No.5 pulses).

〈2·3〉 MMPSC 法による捕捉磁場向上 超電導バルク に捕捉される磁場を増大させる 1 つの方法は、バルクの温 度 T_s の低温化である.実際、これまでに報告した T_s =40 K 以上での結果においても T_s が低いほど大きな捕捉磁場 B_T^P が得られている.しかし更なる T_s の低温化は、ピン止め力 の増大による発熱(ピン止め損失 Q_P)の増加と、比熱 Cの減少による温度上昇の増加があり、パルス着磁法では単 なるバルクの低温化は得策ではない.

著者はこれまでの一連の実験から、比較的高い温度で磁 場をある程度捕捉させてピン止め損失 Q_pを低減し,その 後ピン止め力の大きい低温でパルス磁場を印加すれば、磁 束が捕捉されていない低温状態へパルス磁場を印加する場 合に比べ発熱を低減できて捕捉磁場 B_T^Pが増大できると考 え、バルクの温度 T_s と印加磁場強度 B_{ex} を最適化する2段 階着磁法(MMPSC法)を提案した.図8に概念図を示す. MMPSC 法は、第1段階でバルクを比較的高温(例えば Ts1=45 K)に冷却して、比較的弱いパルス磁場(例えば Bex1=4.5 T)を2回印加して,バルク中心に約1Tの磁場を 捕捉させる.次に第2段階でバルクをさらに低温(T₂2=28 K) に冷却し、最適な強いパルス磁場(Bex2=6.7 T)を2回印加す る. 第1段階における少量の磁束の捕捉が, 第2段階の磁 場印加での温度上昇を低減し, 第2段階のピン止め力の強 い低温でより強いパルス磁場の印加により捕捉磁場を向上 させるものである. この方法を用いて 2005 年 2 月に, GdBaCuO 系バルク(新日鐵(株): 直径 45mm, 厚さ 20mm) 表面で B_T^P=4.47 T の磁場捕捉に成功した. さらに 7 月に, 同じバルクにステンレス製リングを装着し⁽²¹⁾,熱容量の増 大効果により B_T^P =5.20 T を達成した. 図9にこれまでの捕 **捉磁場向上の推移を示す**.このような2段階のパルス着磁 法が、これまでの PFM における捕捉磁場の最高値 3.80 T を上回る高い磁場を捕捉する有効な方法であることが明ら

図 10 に GdBaCuO バルクを用いて B_T =5.20 T を捕捉した ときの、印加磁場 $\mu_0H_a(t)$ とバルク表面 3 カ所(C: center, M: middle, E: edge)の局所磁場 $B_L(t)$ を示す. No.1 pulse (T_s 1=47 K,

かになった.



〈2・4〉 超電導マルチバルク磁石装置の開発 以上述べてきた超電導バルク磁石は、1台の冷凍機で1個のバルク磁石しか実現できず、バルク磁石の磁極も片面しか利用できなかった.バルク磁石の応用範囲を広めるには、列状または面状に複数個配列したマルチバルク磁石を開発が必要である.しかし、マルチバルク磁石を磁場中冷却法で実現



図 10 MMPSC 法における印加磁場 $\mu_0H_a(t)$ と局所磁場 $B_L(t)$ の時間依存性 (No. 1 and No. 3 pulse) Fig. 10. The time dependences of the applied field $\mu_0H(t)$ and the local fields $B_L(t)$ at positions C, M and E for the (a) No. 1 pulse and (b) No. 3 pulse applications..

(25). 列状 するには大口径の超電導マグネットが必要であり に並んだバルク磁石の着磁は不可能であった. 者らは複 数個のバルクを ab 面方向から冷却し, スプリ ト型のパ ルスコイルを用いてバルクの c 軸方向に磁場を 加する手 法("ab-plane cooled type")を提案し, 直径 45 m のバル クを2個配置した2連型超電導バルク磁石を した ^(26,27). 図 11 に"ab-plane cooled type"バルク磁石 概略図と 実際の装置の写真を示す.この配置では、2個の バルクは ab 面(側面)方向から真鍮部材で締め付け,真鍮 部材を冷 凍機のコールドステージに熱的に接続 1 ミルク



図 11 マルチバルク磁石装置の概略図 Fig. 11. The experimental setup around the bulks and the type coil ("*ab*-plane cooled type" system).



図 12 マルチバルク磁石の磁場分布と磁極に吸着した鉄球 Fig. 12. The line scan profiles of the B_T^{4mm} value on both "front" and "back" surfaces and photograph of the iron balls attracted on the magnetic pole surfaces.

を着磁後,スプリットコイルを次のバルクへ移動し PFM を行うので,原理上いくつでも着磁が可能である. 図 12 に2個のバルクに最適な着磁を行った後の磁場分布 を示す.真空容器表面で最大 20 T の磁場を確認し、表裏 ほぼ同一な磁場分布を得ることが出来た.この両面利用な バルク磁石の応用を現在検討している.

3. バルク超電導体の熱物性データベース



バルク超電導体の測定を行った.これらの測定結果を熱物 性データベースにまとめ、2004 年 2 月から Web 上での公 開を開始した.このデータベースの特徴は、単なる測定デ ータの羅列ではなく、試料相互の関係が分かるような「提 案型データベース」としてまとめている点にある.図 13 に測定装置の概略を示す.

〈3・2〉 代表的な結果 これまでに測定した同和鉱業 (DOWA)、新日本製鐵(NSC)、超電導工学研究所(ISTEC)の 作製したバルク材の組成,種類,測定方向等を表1に示す. 特徴的な測定結果について簡単にまとめる.図 14 に代表 的なバルクの熱伝導率の温度依存性を示す⁽¹⁴⁾. ab 面内と c 軸方向の熱伝導率の異方性が 5~10 程度存在する. RE 元 素の違いにより特徴的な温度依存性を示すが、特に Sm 系 で熱伝導率が小さいのは Ba-Sm 置換による結晶性の低下の ためであることが明らかになっている. また Dy 系は Sm 系と同様に熱伝導率が低く、大気中で成長できるなど利点 が大きいため、特に電流リードへの応用が検討されている ^(28,29). Ag 添加により熱伝導率は ab 面内, c 軸方向とも増 大する.また、211 粒子の含有量の増加により熱伝導率は 減少し,同じ 211 添加量でも 211 粒子のサイズが小さくな ると熱伝導率が低減するが,これは粒界散乱の増大と考え ることが出来る(30,31).

図 15 に Sm 系バルク(Sm123:Sm211=100:20)の Ag 添加 量による熱収縮 *dL/L* の温度依存性を示す⁽³²⁾. *dL/L* は *ab* 面 内と *c* 軸方向では約2倍の異方性が存在する. 熱収縮(膨 張)が大きい Ag の添加量の増加により *dL/L* が増大し, 熱 収縮(膨張)が小さい RE211 相含有量の増加により *dL/L* が減少することが系統的に調べられている⁽³²⁾.

2004 年 2 月から Web 上での公開している熱物性データ ベースは, 定期的に新しいデータを追加している. 2006 年

12 月末現在,約 2500 件のアクセス数に達した.このデー タベースが超電導バルクの応用展開の一助になれば、と考 えている.



図 14 REBaCuO バルクの熱伝導率 Fig. 14. The thermal conductivity of various REBaCuO bulks.



図 15 SmBaCuO バルクの熱収縮 *dL/L* (Ag 添加量依存性) Fig. 15. The thermal dilatation *dL/L* of SmBaCuO bulks for various contents of Ag.

Company & Institute	RE element	(123):(211)=100:X	Ag content (wt.%)	Measuring direction
DOWA	Y	X=33~40	0~15	<i>ab</i> and <i>c</i>
	Sm	X=10~40	0~20	<i>ab</i> and <i>c</i>
	Gd	X=40	10~15	<i>ab</i> and <i>c</i>
NSC	Y	X=0~33	0	<i>ab</i> and <i>c</i>
	Gd	X=33~50	10	<i>ab</i> and <i>c</i>
	Dy	X=33	0	<i>ab</i> and <i>c</i>
ISTEC	Nd	X(422)=20~30	0~10	ab
	Gd	X=50	0~30	ab
	Dy	X=5~40	0~10	ab
	Но	X=40	10	ab
	(Nd,Eu,Gd)	X=11~43	0~20	ab

表1 熱物性データベースに収録されている超電導バルクの種類と組成

文 献

 M. Tomita and M. Murakami: "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K", Nature, Vol. 421, p. 517 (2003)

(2) U. Mizutani, T. Oka, Y. Itoh, Y. Yanagi, M. Yoshikawa and H. Ikuta, "Pulsed-field magnetization applied to high-T_c superconductors", Appl. Supercond., Vol. 6, p. 235 (1998)

(3) M. Sander, U. Sutter, R. Koch, M. Kläser, "Pulsed magnetization of HTS bulk parts at T<77 K", Supercond. Sci. Technol. Vol. 13, p. 841 (2000)</p>

- (4) Y. Yanagi, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Oka, Y. Yamada and U. Mizutani: "Low Temperature Pulsed Field Magnetization of Melt-Processed Y-Ba-Cu-O Superconducting Bulk Magnet", *Advances in Superconductivity IX*, Springer, Tokyo p. 733 (1997)
- (5) H. Fukai, H. Yamada, N. Sakai and M. Murakami, "Pulsed field magnetization of large-grain Gd-Ba-Cu-O bulk superconductor", Physica C, Vol. 392-396, p. 585 (2003)
- (6) H. Fujishiro, T. Oka, K. Yokoyama, M. Kaneyama and K. Noto, "Flux Motion Studies by Means of Temperature Measurement in Magnetizing Processes for HTSC Bulks", IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 14, p. 1054 (2004)
- (7) H. Fujishiro, K. Yokoyama, T. Oka and K. Noto, "Temperature rise in an Sm-based bulk superconductor after applying iterative pulse fields", Supercond. Sci. Technol., Vol. 17, p. 51 (2004)
- (8) H. Fujishiro, K. Yokoyama, M. Kaneyama, T. Oka and K. Noto, "Estimation of generated heat in pulse field magnetizing for SmBaCuO bulk superconductor", Physica C, Vol. 412-414, p. 646 (2004)
- (9) H. Fujishiro, M. Kaneyama, K. Yokoyama, T. Oka and K. Noto, "Generated heat during pulse field magnetizing for REBaCuO (RE=Gd, Sm, Y) bulk superconductors with different pinning ability", Supercond. Sci. Technol., Vol. 18, p. 158 (2005)
- (10) 金山雅彦,藤代博之,横山和哉,岡 徹雄,能登宏七,「20-40 K における Sm-Ba-Cu-O バルクに対するパルス着磁による捕捉磁場と発熱解析」,低温工学, Vol, 40, p. 231 (2005)
- (11) Y. Yanagi, M. Yoshikawa, Y. Itoh, T. Oka, H. Ikuta and U. Mizutani, "Trapped Field Distribution on Sm-Ba-Cu-O Bulk Superconductor by Pulse-field Magnetization", *Advances in Superconductivity XII*, Springer, Tokyo, p. 470 (2000)
- (12) H. Fujishiro, M. Kaneyama, T. Tateiwa and T. Oka, "A Record High Trapped Field by Pulse Field Magnetization Using GdBaCuO Bulk Superconductor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, p. L1221 (2005)
- (13) H. Fujishiro, T. Tateiwa, A. Fujiwara, T. Oka and H. Hayashi, "Higher trapped field over 5 Tesla on HTSC bulk by modified pulse field magnetizing", Physica C, Vol. 445-448, p. 334 (2006)
- (14) H. Fujishiro, K. Katagiri, A. Murakami, Y. Yoshino and K. Noto, "Database for thermal and mechanical properties of REBaCuO bulks", Physica C, Vol. 426-431, p. 699 (2005)
- (15) Y. Itoh and U. Mizutani, "Pulsed Field Magnetization of Melt-Processes Y-Ba-Cu-O Superconducting Bulk Magnet", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, p. 2114 (1996)
- (16) Y. Itoh, Y. Yanagi and U. Mizutani, "Flux motion during pulsed field magnetization in Y-Ba-Cu-O superconducting bulk magnet", J. Appl. Phys. Vol. 82, p. 5600 (1997)
- (17) A. Terasaki, Y. Yanagi, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Oka, H. Ikuta and U. Mizutani, "Flux Motion during Pulsed Field Magnetization in Melt-Processed YBCO", *Advances in Superconductivity XII*, Springer, Tokyo, p. 945 (2000)
- (18) H. Ishihara, H. Ikuta, Y. Itoh, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, T. Oka and U. Mizutani, "Pulsed field magnetization of melt-processes Sm-Ba-Cu-O", Physica C, Vol. 357-360, p. 763 (2001)
- (19) H. Ikuta, H. Ishihara, Y. Yanagi, Y. Itoh and U. Mizutani: "Extracting the utmost from the high performance of Sm-Ba-Cu-O bulk superconductors by pulse field magnetizing", Supercond. Sci. Technol., Vol. 15, p. 606 (2002)
- (20) H. Fujishiro, M. Kaneyama, K. Yokoyama, T. Oka and K. Noto, "Rise-Time Elongation Effects on Trapped Field and Temperature Rise in Pulse Field Magnetization for High Temperature Superconducting Bulk", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, p. 4919 (2005)
- (21) H. Fujishiro, K. Yokoyama, M. Kaneyama, T. Oka and K. Noto, "Effect of Metal Ring Setting Outside HTSC Bulk Disk on Trapped Field and Temperature Rise in Pulse Filed Magnetizing", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, p. 3762 (2005)
- (22) Y. Itoh, Y. Yanagi, M. Yoshikawa, T. Oka, S. Harada, T. Sakakibara, Y. Yamada and U. Mizutani, "High Temperature Superconducting Motor Using Y-Ba-Cu-O Bulk Magnets", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, p. 5574 (1995)
- (23) M. Miki, S. Tokura, H. Hayakawa, H. Inami, M. Kitano, H. Matsuzaki, Y. Kimura, I. Ohtani, E. Morita, H. Ogata, M. Izumi, H. Sugimoto and T. Ida, "Development of a synchronous motor with Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system", Supercond.

Sci. Technol., Vol. 19, p. S494 (2006)

- (24) T. Ida, H. Matsuzaki, Y. Akita, M. Izumi, H. Sugimoto, Y. Hondou, Y. Kimura, N. Sakai, S. Nariki, I. Hirabayashi, M. Miki, M. Murakami and M. Kitano, "Magnetization properties for Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors with a couple of pulsed-field vortex-type coils", Physica C, Vol. 412-414, p. 638 (2004)
- (25) T. Oka, K. Yokoyama and K. Noto, "Construction of Strong Magnetic Field Generators by High T_c Bulk Superconductors and Its Applications", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 14, p. 1058 (2004)
- (26) H. Fujishiro, A. Fujiwara, T. Tateiwa, T. Oka and H. Hayashi, "New Type Superconducting Bulk Magnet by Pulse Field Magnetization with Usable Surface on Both-sides in Open Space", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, p. 1007 (2006)
- (27) A. Fujiwara, T. Tateiwa, H. Fujishiro, H. Hayashi, T. Nagafuchi and T. Oka, "Development of five aligned superconducting bulk magnets by pulse field magnetizing", Physica C, Vol. 445-448, p. 399 (2006)
- (28) H. Fujishiro, M. Ikebe, H. Teshima and H. Hirano, "Low-Thermal-Conductive DyBaCuO Bulk Superconductor for Current Lead Application", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, p. 1080 (2006)
- (29) H. Fujishiro, S. Nariki and M. Murakami, "Thermal Conductivity and Thermoelectric Power of DyBaCuO Bulk Superconductor", Supercond. Sci. Technol., Vol. 19, p. S447 (2006)
- (30) H. Fujishiro and S. Kohayashi, "Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Thermoelectric Power of Sm-Based Bulk Superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 12, p. 1124 (2002)
- (31) H. Fujishiro, H. Teshima, M. Ikebe and K. Noto, "Thermal conductivity of YBaCuO bulk superconductors under applied field : effect of content and size of Y211 phase", Physica C, Vol. 392-396, p. 171 (2003)
- (32) H. Fujishiro, M. Ikebe, S. Kohayashi, K. Noto and K. Yokoyama, "Additional effect of Ag and 211 phase on thermal expansion of REBaCuO bulk superconductor (RE=Sm, Y)", Cryogenics, Vol. 43, p. 477 (2003)