研 究

超伝導永久磁石の開発に関する現状

水谷宇一郎^{☆1}, 岡 徹雄^{☆2}, 伊藤 佳孝^{☆2}, 生田 博志^{☆3}^{☆1}名古屋大学大学院工学研究科結晶材料, 〒464-8603 名古屋市千種区不老町.^{☆2}(株)イムラ材料開発研究所, 〒448-0021 刈谷市八軒町 5-50.^{☆3}名古屋大学理工科学総合研究センター, 〒464-8603 名古屋市千種区不老町.

Recent Development in Superconducting Permanent Magnets

Uichiro Mizutani^{☆1}, Tetsuo Oka^{☆2}, Yoshitaka Itoh^{☆2} and Hiroshi Ikuta^{☆3}^{☆1}Dept. of Crystalline Materials Science, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku, Nagoya 464-8603.^{☆2}IMRA MATERIAL R&D CO., LTD., Hachiken-cho, Kariya 448-0021.^{☆3}Center for Integrated Research in Science and Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku, Nagoya 464-8603.

Received August 17, 1999

SYNOPSIS

The c-axis oriented single-domain Sm123 bulk superconductors have been synthesized in the melt-texturing process. The maximum trapped flux density has reached 1.7 T at 77 K and 9.0 T at 25 K at the center of sample surface. Detailed analysis on the flux motion through the pulsed field magnetization (PFM) process revealed that the iteratively magnetizing pulsed field operation with reducing amplitude (IMRA method) is very effective in magnetizing high J_c bulk superconductors at temperatures near 30K, attained by a cryocooler and vacuum pumps. A compact superconducting permanent magnet system driven by the PFM technique has been constructed, which is capable of generating magnetic fields up to 2 T in the open space outside the magnetic pole.

KEY WORDS

melt-processing, bulk superconductor, trapped field magnet, pulsed-field magnetization, magnetic field generator

1 緒 言

高温超伝導体は1986年にスイスで発見された¹⁾. 新たに合成されたランタン・バリウム・銅の複合酸化物(La-Ba-Cu-O)は, それまで最高の超伝導遷移温度 T_c をもつニオブ・ゲルマニウム系(絶対温度23K, 零下250°C)より高い30Kの T_c を示した. 翌年には液体窒素の沸点77K(零下196°C)を超える90Kの T_c をもつイットリウム系超伝導体(Y-Ba-Cu-O)が確認され²⁾, これを契機に活発な開発競争が全世界で始まった.

従来の超伝導体は T_c が低く, 液体ヘリウム(4K, 零下269°C)で冷却してはじめて用いることができた. 液体ヘリウムは高価で資源的にも希少なため, 超伝導技術は一般工業に利用されることはなく, 用途は極めて限定されていた. これに対し高温超伝導体は T_c が高く, 安価な液体窒素で冷却できる. このことから, 電力をはじめとした広い分野で応用が期待された. 実際, 今日では高温超伝導体を応用した磁気センサや電流リード(超伝導マグネットに電流を導入する端子)など具体的な製品が開発され, 市場に現れつつある.

これら応用研究のひとつにバルク超伝導体の研究がある³⁻⁵⁾. Y-Ba-Cu-Oに代表される123系と呼ばれる超伝導体を一旦溶

かして塊状(バルク状)に凝固させた試料は, 磁場に反発して空中に浮上するなど, 特徴的な振る舞いをする. 特に, 磁場を捕捉することによって得られる「超伝導永久磁石」⁶⁾と呼ぶべき性質は, 従来の永久磁石はおろか, 大型電磁石の磁場をはるかに上回る強力な磁場を発生できることが最近の研究で明らかになってきた.

従来の永久磁石が発生できる磁場は実質的には1T(テスラ, 1テスラは1万ガウス)以下である. 水冷した銅コイルによる大型の電磁石でも2T以下である. これ以上の磁場は超伝導コイルを使った超伝導マグネットで得られるが, 液体ヘリウムを使用するためにコストが高く, 一般には普及していない. バルク超伝導体は従来の永久磁石と異なった原理で, 強い磁場を簡便に発生できるため, 広範な市場応用が期待できる.

筆者らはバルク超伝導体とその磁化挙動の研究を通じて, 超伝導永久磁石の実用化を検討してきた. 1995年にはこれを界磁に用いた超伝導モータを試作して最大出力3.5kWを記録し, バルク超伝導体の実用に近いレベルで機能することを実証した^{7,8)}. 以下にはバルク超伝導体の合成法, パルス磁場による着磁法, 冷凍機を組み合わせることによってコンパクト

な磁場発生装置ができることを示す。

2 超伝導体の磁気的性質

超伝導体をその T_c 以下に冷却すると電気抵抗が消滅して、超伝導状態となる。この状態ではジュール発熱が起こらないため、損失なく電流を流すことができる。電気抵抗の消滅と並ぶ超伝導体の代表的な性質に完全反磁性 (Fig.1) がある。Fig.1(a) は第一種超伝導体, (b) は第二種の場合である。超伝導体に外部から磁場を印加すると、表面に超伝導電流が誘起され、内部への磁場侵入が妨げられる。純金属に代表される第一種超伝導体では臨界磁場 H_c を超えるとこの効果は消失するが (a), 高温超伝導体が属する第二種超伝導体では、下部臨界磁場 H_{c1} を超えると磁化は減少するが、上部臨界磁場 H_{c2} まで超伝導状態が残る (b)。これを混合状態といい、Fig.2 にその様子を示す。混合状態において、磁場は磁束量子 ϕ_0 として超伝導体内部に侵入する。磁束量子は超伝導電流によってシールドされることで全体の超伝導状態は維持される。

この状態で外部から電流を与えると、発生するローレンツ力によって磁束は運動し、フロー抵抗として損失が生じてしまう。この磁束フローを抑制するため、磁束をピン止めすることが高い臨界電流密度 J_c (超伝導状態を壊さずに流せる最大の電流を意味する) を得る鍵である。超伝導体ではその組織制御によって微細な欠陥を導入し、ピン止め点の導入を果たしている。

Fig.1 Magnetization of superconductors against the applied field. (a) type I and (b) type II superconductors.

Fig.2 Schematic illustration of mixed state of a type II superconductor.

Fig.3に超伝導状態を貫く磁束量子とピン止め点の様子を示す⁹⁾。磁束の中心は常伝導状態になっており、超伝導状態よりも高いエネルギー状態にある。磁束量子に近い寸法の非超伝導相 (欠陥) があると、磁束量子はこの部分を優先して貫き、 $(1/2)\mu_0 H_c^2 \pi \xi^2 d$ のエネルギーをセーブして磁束は捕捉される。ここで μ_0 は真空の透磁率、 ξ はコヒーレンス長、 d は欠陥の寸法である。図に示すように、磁束量子にかかるローレンツ力 F_L は $F_L = J \times B$ であるから、これに抗するに必要なピン止め力 $F_P = J_c \times B$ が大きいほど、高磁場中で高い J_c をもつ超伝導体となる。

バルク超伝導体の磁化過程を模式的に Fig.4 に示す。バルク超伝導体を液体窒素に漬け、磁場をかけると磁場が排除され反磁性を示す (a)。磁場が強くなると超伝導体内部に磁場が侵入して磁束量子となり、ピン止め点に捕捉される (b)。外部磁場を排除しても捕捉された磁束は残り、まるで永久磁石のように振る舞う (c)。

3 バルク超伝導体の合成¹⁰⁻¹⁴⁾

RE123系 (REはY, ネオジムNdまたはサマリウムSmを表わす) のバルク超伝導体は溶融法によって合成される。材料の組織は超伝導相である母相 $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (元素の比から123相と呼ぶ) に絶縁相の RE_2BaCuO_5 (211相, Nd系では $RE_4Ba_2Cu_2O_{10}$, 422相) が分散したもので、211相がピン止め点として働くことから、高い J_c と優秀な捕捉磁場性能が得られる。より微細な211相の分散が高い J_c を生むことから、筆者らはあらかじめ合成した123相と微細な211相を混合して熱処理する方法を考案し、優秀な捕捉磁場性能が得られることを示してきた¹⁰⁾。

Y系では酸素雰囲気、Sm系とNd系ではSm, NdとBaの元素置換を押さえるために酸素分圧を低下させた雰囲気で行う。一旦1100°Cに加熱して溶融した試料に、母相より融点の高い種結晶をその表面に接触させ、約1000°Cから1°C/h以下の速度で徐冷して大型結晶を合成する。Sm系で合成した試料の例を Fig.5 に示す。中央に種結晶があり、ここからの優先的な核生成が起こって、結晶全体が擬似単結晶となる^{5,7)}。

Fig.3 Schematic illustration for flux pinning mechanism due to a non-superconducting particle.

Fig.4 Magnetic field distribution of a melt-processed bulk superconductor when dc field is applied. (a) Meissner effect, (b) magnetic suspension when field is increased and (c) superconducting permanent magnet when field is removed.

Fig.5 A Melt-textured Sm-Ba-Cu-O bulk superconductor with the size of 36 mm in diameter, containing Ag particles. The c-axis is aligned perpendicular to the sample surface.

211相が熱処理時の融液中で粗大化しないよう、Y系及びSm系の原料には白金(Pt)粉末を微量添加する。この方法によって焼成後に組織中に分散する211相を $1\mu\text{m}$ 程度に抑えることができ、高い J_c を得ることができる。また、Sm, Nd系では機械的強度の向上を目的に酸化銀粉末を原料に混合する。この結果c軸配向した大型結晶が、Sm系で最大 $\phi 36^{12)}$ 、Nd系では最大 $\phi 30^{13)}$ まで合成されている。なおSm, Nd系試料はその試験時にかかる熱応力や電磁力による破損を防ぐため、金属製のリングの中に低温用樹脂充填剤で埋め込んで補強する。

バルク超伝導体を磁化したときの捕捉磁場の分布をFig.6(a)に示す。試料は $\phi 36$ のSm系で、超伝導マグネットの発生する4Tの静磁場中で77Kに冷却して着磁した。ホール素子を試料表面から0.5mmの位置で走査し、表面に垂直な方向の磁場を測定した。比較のためにフェライト磁石($\phi 22$)の分布をFig.6(b)に添える。

縦軸に磁場をとると、バルク超伝導体に捕捉された磁場は円錐状に分布し、試料表面の中央が最大で、周辺部分ではゼロに近い。この分布は永久磁石の示す台形の分布とは対照的である。超伝導体の磁場分布は同心円状に流れる超伝導電流の作る磁場として解析でき、表面に磁荷が並ぶ永久磁石とは原理的に異なる。もし試料に亀裂などの欠陥があれば、超伝

Fig.6 Trapped field distribution of (a) a Sm-Ba-Cu-O bulk sample with the size 36 mm in diameter magnetized by the static field, and (b) commercially available Nd-Fe-B permanent magnet with the size 22 mm in diameter. The axial component B_z was measured by scanning a Hall sensor at 0.5 mm above each sample surface.

導電流の経路が妨げられ、円錐形状が崩れてしまう。従って、図に示す試料のように欠陥のない均一な組織が強磁場の捕捉

には不可欠である。Fig.6に示す77KでのSm系バルクの最大磁場は試料表面で1.7Tを示す一方、Nd系 $\phi 30$ のバルクでは77Kで1.0Tを示した。これらは従来のNd-Fe-B系永久磁石の性能をはるかに超える^{12,13)}。

Sm系で合成した $\phi 30$ のバルク超伝導体を最大10Tを発生する超伝導マグネットの静磁場中で冷却して着磁したときの捕捉磁場を冷却温度に対してFig.7に示す。捕捉磁場は、外部磁場を取り去った後、超伝導バルクの表面中心でホール素子を用いて測定した。温度の低下とともに捕捉磁場は、 J_c の増加を反映して、急激に増加し、最大値は25Kでの9.0Tであった¹⁴⁾。これは77Kの性能の約5倍にもなり、冷却が如何に効果的であるかがわかる。しかもこの磁場性能は従来の永久磁石の約10倍、大型電磁石の約4倍にも達する強烈なものである。このようにバルク超伝導体を77Kより低い温度に冷却することで、従来にない強力な磁石が実現できることがわかる。

試料が磁化するとその磁場に応じた電磁力が、磁化に垂直な方向にかかる。そのため、さらに低温のデータが欠落しているのは、その最低温度で評価した後、更に低温で磁化した際に電磁力に耐えられず破壊したことを意味する。単に J_c だけでなく、電磁力に抗する機械的強度の優劣が最終的な捕捉磁場性能を決めていることがわかった。図に付記したように、銀の添加量が多いほどより捕捉磁場が増大しており、試料の強度が向上していることを示す。銀は結晶の合成中に起こる亀裂の伝播を抑制し、均一な結晶を得る上で必要だが、このように捕捉磁場による電磁力に対して不可欠なことが判明した。

4 バルク超伝導体のパルス磁化過程¹⁵⁻²⁰⁾

バルク超伝導体を磁化する3つの方法、磁場中冷却、ゼロ磁場冷却、パルス着磁によって77Kで磁化した試料の捕捉磁場の総量をFig.8に示す^{15,17)}。試料はY系 $\phi 35$ mmで、試料表

Fig.7 Temperature dependence of the trapped magnetic flux density for several melt-processed samples magnetized by a static field up to 10 T.

面から0.5mmの位置でホールセンサを走査し、軸方向の磁場成分を検出して積分してある。バルク超伝導体をもつ性能まで最も有効に磁化する方法は静磁場着磁(Field cooling)であり、最も少ない印加磁場で磁化できる。ゼロ磁場冷却(Zero field cooling)の場合は磁場のない状態で試料を77Kに冷却し、準静的に磁場を印加、除去する。磁束はピン止め力に逆らって侵入するが、 J_c を反映した磁場傾斜をもって侵入するため、中心まで磁化するには静磁場より大きな磁場が必要である。

以上の着磁方法では大型の超伝導マグネットの静磁場を使う必要があり、応用が著しく制限される。これに対しパルス着磁では、簡便に着磁できる反面、磁場はさらに侵入しにくく、着磁に大きな磁場が必要となる。Fig.8では約2Tが必要で、静磁場着磁の数倍である。磁場がバルク超伝導体に侵入する時に、その速度に比例して働く粘性力 F_v が余分にかかるためである。パルス着磁では磁束が試料中を運動するため、発熱が生じて局所的に J_c を下げ、捕捉磁場性能が下がる。2T以上の磁場で捕捉磁場が減少するのはそのためである。77KのY系ではどの方法でもほぼ試料の性能まで着磁できるが、Sm系や低温では高い J_c を反映して発熱が激しく、着磁は困難になる。

パルス磁場の印加中に試料への磁束の侵入をピックアップコイルで測定した結果がFig.9である¹⁹⁾。温度は77Kである。図の横軸は位置を表し、0がバルク超伝導体表面中央、aが周辺である。図の左半分が増磁過程、右が減磁過程である。

ピン止めによる磁気遮蔽と磁束の運動による粘性力の効果で試料中に大きな磁場勾配が生じるため、高い J_c をもつ材料ほどその着磁は困難になる。このため印加磁場の小さい領域では磁場侵入が妨げられ、殆ど着磁されない(Fig.9(a))。しかし外部磁場が2.4T以上では、磁場は試料内部へと雪崩的に侵入して中心に達し、試料は完全に着磁される。外部磁場が2Tを超えると、それまで下に凸だった分布が上に凸に変化し、磁場の侵入速度が急激に上がることがわかる。磁束の運動に

Fig.8 Applied field dependence of the total magnetic flux trapped at 77K by pulsed-field magnetization, zero field cooling and field cooling modes.

Fig.9 Change in the flux density distribution in the sample during the pulsed-field magnetization process. The distribution in the ascending and descending stages are shown on the left and right hand sides of each figure, respectively. The maximum applied fields are shown in each figure.

Fig.10 Applied field dependence of the trapped flux density at the center of the sample obtained in the single pulse mode at different temperatures.

Fig.11 Histories of the trapped flux density at the center of the sample by the IMRA method at 35K with various initial applied fields. The arrow indicates the direction of history.

よる発熱で温度が上昇し、 J_c が下がったためであると考えている。強いピン止め力のために着磁が困難であると考えられていたバルク超伝導体が、実用的に着磁できることが実験的に明らかになった¹¹⁾。

Fig.7に示したように、77K以下の温度に冷却すると、バルク超伝導体の捕捉磁場性能は著しく向上する。そこでギボード・マクマホン(GM)式冷凍機で冷却し、パルス着磁した試料の捕捉磁場をFig.10に示す¹⁹⁾。試料はSm系φ36mmで、捕捉磁場の測定は表面中央である。着磁は各温度で1回だけ行っ

た。Sm系はY系よりも J_c に優れるため、Y系77Kならば試料中央まで侵入した2Tの印加では、磁場は殆ど侵入しない。しかし49Kで4T、35Kで4.5T以上の磁場を印加すると、試料は中心まで着磁される。捕捉磁場性能はFig.8と同様にピークをもち、5Tの印加では発熱のために捕捉磁場は減少する。

試料に侵入する磁束の挙動は、既に捕捉されている磁場の影響を受ける。従って着磁されていない試料へ一回の着磁をする場合と、複数回繰り返す場合では結果が異なる。Fig.11に35Kで繰り返しパルス着磁を行った例を示す²⁰⁾。試料はY系φ36で、ホールセンサは表面中央にある。最初に着磁して得られる捕捉磁場はいずれも1T程度であるが、これを繰り返

し、しかもより小さな磁場を印加していくと捕捉磁場は、矢印に沿って、著しく増加する。しかも最初の磁場が大きいほど、最終的な捕捉磁場は大きい。

強磁場の印加は発熱を生み、 J_c は下がつて捕捉磁場は低くなる。しかし繰り返して、より低い磁場を印加すると、既にある磁場の効果で磁束の運動とそれによる発熱が抑制されると推察できる。反復して着磁する意味からこの方法を IMRA 法 (Iteratively Magnetizing pulsed-field operation with Reducing Amplitude) と呼ぶ。この時得られた最大の捕捉磁場は、7.1T から繰り返し着磁して得た 2.1T である。

この時の実験の様子を Fig.12 に示す¹⁷⁾。装置先端の真空容器の中に Y 系バルク超伝導体が装着しており、GM 式冷凍機で冷却されている。パルス着磁されたバルク超伝導体が空間に発散する磁場に鉄の玉が吸着している。このようにバルク超伝導体と冷凍機で冷却し、IMRA 法による工夫されたパルス着磁法を組み合わせると、強力な磁場を発生する「超伝導永久磁石」なる磁場発生装置が実現でき、広く一般工業に利用できる磁場発生機が実現する。

5 超伝導永久磁石の応用^{21,22)}

超伝導特性の優れた温度域を、寒剤を使わず冷凍機を用いて実現し、簡便に利用できる磁場発生機として、Fig.13 に示す超伝導永久磁石を試作した^{21,22)}。Fig.13(a) に外観を、(b) に内部構成を示した。装置はバルク超伝導体と冷凍機、真空ポンプシステムが一体になり、コンパクトに構成してある。着磁コイルと着磁電源は表示されていない。パルス着磁後の捕捉

磁場は極めて安定であり、着磁が済めば、応用分野によっては、これらはもはや必要がない。本体から突き出た上端部が磁極になり、上方に磁場が発散する。

φ36 の Sm 系バルク超伝導体がこの磁極中に真空断熱を保って設置され、GM 式小型冷凍機で 32K まで伝熱冷却される。バルク超伝導体表面から容器 (磁極) 外面までは 3mm ある。冷凍機の下方に圧縮機が組み込まれている。これらは交流 100V の電源で駆動し、電力は 800W である。熱放射はファンによる空冷式で冷却水は必要ない。磁極となる真空容器は真空ボ

Fig.12 Quasi-permanent magnet system. A Y-Ba-Cu-O sample with the size of 35 mm in diameter is cooled to 30K by the GM-cryocooler and magnetized by using the IMRA method. A large number of iron balls are attracted by the field of 0.8 T.

Fig.13 A compact superconducting permanent magnet system, (a) the whole assembly and (b) construction. The system consists of a vacuum pump, a GM-cryocooler and a Sm-based bulk superconductor.

ンプにつながる。主ポンプはターボ分子ポンプで油回転ポンプにつながり、これらも本体に組み込まれている。真空ポンプと冷凍機は前面のコントローラで制御される。スイッチを入れるだけで自動運転し、約2時間で32Kに達する。装置の主な仕様をTable 1に示す。装置全体の所要電力は1.3kW、重量は115kgである。現在、装置の性能は急速に向上し、冷凍機本体を分離したGM式冷凍機により、32Kでパルス着磁して得た性能は容器表面で2Tを記録している。

これまで高温超伝導体は液体窒素温度での応用が強調されてきた。しかし一般工業分野で液体窒素等の寒剤の使用は不便であり、特殊な技術を要する作業でもある。冷凍機による冷却の方が簡便で汎用的であることは疑いがない。臨界電流密度 J_c は温度低下とともに急峻に向上するから、冷凍機の利用は機器の性能向上に極めて有効である一方、寒剤という煩雑な作業からも解放される。

超伝導永久磁石は一旦着磁すると磁場の掃引や反転が困難なため、磁場を変化させて使う応用には向かない。まさに永久磁石としての使われ方が妥当であろう。バルク超伝導体のもつ急峻な磁場勾配は吸着などへの応用には好適であるし、強磁場空間が狭いことは外部への磁場の漏れが少ないという利点にもなる。

従来の永久磁石との性能比較をTable 2に示す。パルス着磁した超伝導永久磁石の発生する2Tの磁場は、ほぼ同じ形状のフェライト磁石の十数倍、希土類磁石の4倍である。静磁場によれば最高9Tが捕捉できるから、如何に材料性能に近くまで簡便に着磁できるかが今後の大きな課題である。超伝導永久磁石は従来の永久磁石や電磁石の磁場を超え、従来の超伝導マグネットにせまる磁場をコンパクトに発生できる磁場発生装置である。

6 おわりに

バルク超伝導体が発生できる磁場は、材料や着磁法の進展

Table 1 Specification of the superconducting permanent magnet system.

Size vacuum vessel	530 x 520 x 760 mm 62 mm dia.
Input power	1.3 kW (AC 100V)
Weight	115 kg
Cryocooler	GM cycle
Temperature	32 K
Superconductor	Sm-Ba-Cu-O (36 mm dia.)

を受けて今も急速に向上しつつある。超伝導永久磁石によって新たな産業への強磁場の応用が進むだろう。例えば、より小型で高性能なモータや発電機が実現するし、医療機器への応用も期待できる。急峻な磁場勾配を使って、流体からの常磁性粉の磁気分離が可能となるだろう。

本研究の一部は通産省よりエネルギー使用合理化新規産業創造技術開発費補助金の交付を受けて実施された。

文 献

- 1) J.Bednorz and K.Müller: "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", *Zeitschrift für Physik*, 64(1986) 189-193.
- 2) M.Wu, J.Ashburn, C.Torng, P.Meng, L.Gao, Z.Huang, U.Wang and C.Chu: "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure", *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987)908-910.
- 3) S.Jin, T.Tiefel, R.Sherwood, R.van Dover, M.Davis, G.Kammlott and R.Fastnacht: "Melt-textured growth of polycrystalline $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ with high transport J_c at 77 K", *Phys. Rev. B*, 37(1988)7850-7853.
- 4) M.Murakami, M.Morita, K.Doi and K.Miyamoto: "A New Process with the Promise of High J_c in Oxide Superconductors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28(1989)1189-1194.
- 5) S.Yoo, N.Sakai, H.Takaichi, T.Higuchi and M.Murakami: "Melt processing for obtaining $NdBa_2Cu_3O_7$ superconductors with high T_c and large J_c ", *Appl. Phys. Lett.*, 65(1994)633-636.
- 6) R.Weinstein, In-Gann Chen, J.Liu and K.Lau: "Permanent magnets composed of high temperature superconductors", *J. Appl. Phys.*, 70(1991)6501-6503.
- 7) 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.*, 34(1995)5574-5578.
- 8) 岡 徹雄, 伊藤佳孝, 柳 陽介, 吉川雅章, 榊原 務, 原田信太郎, 山田裕, 水谷字一郎: "高温超電導擬永久磁石と超電導モータへの応用", *日本金属学会誌*, 61(1997)931-936.
- 9) M.Murakami: "Melt-Processed High Temperature Superconductors", *World Scientific*, (1991)192.
- 10) T.Oka, Y.Itoh, Y.Yanagi, H.Tanaka, S.Takashima, Y.Yamada and U.Mizutani: "Critical current density and mechanical

Table 2 Magnetic field of various permanent magnets.

	Ferrite magnet	Rare earth magnet	Superconducting permanent magnet
Magnetic field (T)	0.12 (at RT)	0.5 (at RT)	2 (32K, pulse field)
	Sr-Ferrite 35 dia. x 20 B_z on the surface	Nd-Fe-B system 50x50x30 B_z on the surface	Sm-Ba-Cu-O system 36 dia. x 15 B_z on the pole surface

- strength of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting composites containing Zr, Ag and Y_2BaCuO_5 dispersions by melt-processing", *Physica C*, 200(1992)55-64.
- 11) U.Mizutani, A.Mase, H.Ikuta, Y.Yanagi, M.Yoshikawa, Y.Itoh, T.Oka: "Preparation and Superconducting Properties of c-Axis Oriented Y-Ba-Cu-O and LRE-Ba-Cu-O (LRE=Nd and Sm) Melt-Textured Bulk Superconductors", *Proc. of Int. Workshop on Superconductivity Co-Sponsored by ISTE and Okinawa Pref. Government, Okinawa*, (1998)46-49.
 - 12) H.Ikuta, A.Mase, Y.Yanagi, M.Yoshikawa, Y.Itoh, T.Oka, U.Mizutani: "Melt-processed Sm-Ba-Cu-O superconductors trapping strong magnetic field", *Superconductor Sci. and Technol.*, 11(1998)1345-1347.
 - 13) 細川哲央, 間瀬 淳, 吉川雅章, 伊藤佳孝, 柳 陽介, 岡 徹雄, 生田博志, 水谷宇一郎: "銀添加 RE-Ba-Cu-O (RE=Nd, Sm) の作製とその超伝導特性", 第46回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 No.1, 千葉, (1999)254.
 - 14) 生田博志, 岡 徹雄, 水谷宇一郎: "高温超伝導溶融バルク材料開発の現状", *応用物理*, 68(1999)403-406.
 - 15) Y.Itoh and U.Mizutani: "Pulsed Field Magnetization of Melt-Processed Y-Ba-Cu-O Superconducting Bulk Magnet", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35(1996)2114-2125.
 - 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.*, 82(1997)5600-5611.
 - 17) U.Mizutani, T.Oka, Y.Itoh, Y.Yanagi, M.Yoshikawa and H.Ikuta: "Pulsed-Field Magnetization Applied to High- T_c Superconductors", *Applied Superconductivity*, 6(1998)235-246.
 - 18) 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", *Proc. of 10th Int. Symp. on Superconductivity (ISS'97)*, Osamura and Hirabayashi, Gifu, 1997, ISTE, Springer-Verlag, (1998)945-948.
 - 19) Y.Yanagi, Y.Itoh, M.Yoshikawa, T.Oka, A.Mase, T.Hosokawa, H.Ikuta and U.Mizutani: "Flux Dynamics during Pulsed-Field Magnetization in R-Ba-Cu-O (R=Y, Sm) Bulk Superconductors", *Proc. of 11th Int. Symp. on Superconductivity (ISS'98)*, Koshizuka and Tajima, Fukuoka, 1998, ISTE, Springer-Verlag, (1999)717-720.
 - 20) Y.Yanagi, Y.Itoh, M.Yoshikawa, T.Oka, A.Terasaki, H.Ikuta and U.Mizutani: "Pulsed-Field Magnetization of Y-Ba-Cu-O Superconducting Bulk Magnet Cooled by Refrigerator", *Proc. of 10th Int. Symp. on Superconductivity (ISS'97)*, Osamura and Hirabayashi, Gifu, 1997, ISTE, Springer-Verlag, (1998)941-944.
 - 21) 水谷宇一郎, 岡 徹雄: "世界最強の磁石の開発", *配管技術*, 41(1999)45-50.
 - 22) 生田博志, 岡 徹雄, 水谷宇一郎: "高温超伝導体の強力擬似永久磁石としての応用", *日本応用磁気学会誌*, 23(1999)885-892.