

高温超電導でのMRIも可能に
液体窒素温度で4Tを超える超強力超電導バルク磁石の開発に成功

平成14年10月30日

(財)国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所

超電導工学研究所¹⁾は、液体窒素温度(77 K)で3.05 Tテスラ²⁾の高い磁場を発生できるバルク高温超電導磁石³⁾を開発した。さらにこのようなバルク磁石を2個重ねて、その間の磁場を測定した結果、世界で初めて4.3 Tの非常に高い磁場を発生させることに成功した。これは、2年前に当研究所で開発に成功した3.3 Tを上回るものである。

今回の開発がバルク超電導磁石を用いて既に実用化されている水浄化用磁気分離装置や励磁装置などの性能の向上や冷却コストの低減に大きく寄与することは確実であり、さらにそれ以外の新規産業分野での応用開発も活発化するものと期待できる。

<背景>

バルク超電導体は永久磁石を遥かに超える強力な磁場を発生することができ、その磁力を利用した水浄化用および資源回収用の磁気分離装置、励磁装置、強力磁気浮上装置、磁気断層撮影装置(MRI)などへの応用が活発化している。このうち水浄化用磁気分離装置や励磁装置などはすでに実用化段階に至っている。バルク超電導磁石の材料として、現在最も広く研究開発が進められている材料はY(イットリウム)系材料であるが、液体窒素温度(77 K)での捕捉磁場⁴⁾は1 T程度が限界であった。しかしながら水浄化装置の浄化能力の向上など、上記の装置をより高性能にするためには、さらに強力なバルク超電導磁石が必要となっており⁵⁾、国内外で捕捉磁場の向上を目指した開発が活発に行われている。

バルク超電導磁石は使用する際に冷却が必要である。冷却に必要なコストを差し引いても、現在最も強力な永久磁石よりも実用上優位になる磁場の値は3 Tと考えられており、超電導工学研究所では液体窒素温度でこの値を達成することを目標に開発を進めてきた。今回の開発では目標を大きく上回る4.3 Tの捕捉磁場を達成することに成功した。

<材料の大型化>

バルク超電導磁石の捕捉磁場を向上させるためのポイントは

1) 臨界電流密度⁶⁾を高くすること

2) 材料の大型化⁷⁾

の2点である。超電導工学研究所では従来より、Y(イットリウム)系材料よりも高い臨界電流密度を持つGd(ガドリニウム)系材料⁸⁾に着目してきた。今回バルク体の捕捉磁場の値を更新できたポイントはGdバルク材料の大型化と微細組織の均質化にある。プロセス技術の進展によりY系材料ではすでに直径が10 cm以上の大型のバルク超電導体が作製されているが、現状ではバルク体の直径を5 cmよりも大きくした場合、クラックの発生⁹⁾や不純物の析出、微細組織の不均一化、結晶配向の乱れ¹⁰⁾などによって、臨界電流密度

が低下し、捕捉磁場がかえって低くなる問題があった。

今回、超電導工学研究所では、以下の3つの要素技術によってバルク全体が高い臨界電流密度を示すクラックの全く無い大型Gd系バルク体の作製に成功した。

- 1) Gd系バルク体の直径を6.5 cmまで大きくすることができた。
- 2) クラックの抑制に効果のある銀の粒子を均一に微細分散させることができた。
- 3) 原料粉の作製条件、結晶成長条件の最適化によって微細組織の均一化がはかれた。

開発した直径6.5 cmのバルク体について、表面での捕捉磁場を測定したところ、77 Kで3.05 Tを記録し、これまでの値を更新した。さらに、このようなバルク体を2個重ねて、バルク体間の磁場を測定した結果、4.3 Tの非常に高い磁場を発生させる事ができた。液体窒素温度のような高温域で、市販されている希土類永久磁石(約0.4~0.5 T)の約10倍およびY系超電導バルク磁石の約3倍もの強い磁力を持つ磁石の開発に成功したことから、超電導バルクの永久磁石応用が加速されるものと期待される。

なお、本研究の成果は11月1日に長崎で開催される2002年度秋季低温工学・超電導学会で成木紳也、村上雅人が発表する予定である(11)。

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、(財)国際超電導産業技術研究センター・超電導工学研究所が、新エネルギー産業総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

本件に関する問い合わせ先:

(財)国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 第三研究部長 村上 雅人
電話:03-3454-9284
FAX:03-3454-9287

捕捉説明

1) 超電導工学研究所は(財)国際超電導産業技術研究センター(理事長 荒木 浩)の研究所(所長 田中昭二 東大名誉教授)。超電導工学研究所では第三研究部(部長村上雅人)の成木紳也 主任研究員がバルク超電導体の高捕捉磁場化に関する研究に従事している。

2) 磁束密度の単位で、1 T(テスラ)は、10000 G(ガウス)。通常の磁石が数百~数千ガウスであるから、普通の磁石では得られない、非常に強い磁場が得られることが分かる。

3) 超電導バルク磁石は、REBa₂Cu₂O_y (REは希土類元素、以下RE123と記す)超電導物質内に、RE₂BaCuO₅ (以下RE211と記す)の非超電導物質を分散させた構造からなっており、非超電導物質が磁束線を捕まえる力(ピン止め力)を利用して、大きな磁場を捕捉させるものである。磁場を捕捉させたバルク超電導体は超強力な永久磁石として機能することができる。磁石が捕捉した磁場を捕捉磁場と言い、バルクが発生できる磁力に相当する。

なお、超電導材料に外部から磁場をかけると、ある外部磁場を過ぎたところで超電導特性が失われる。このときの外部磁場を不可逆磁場といい、捕捉磁場とは区別される。超電導工学研究所ではREがNd, Eu, Gdの混合された材料で15 Tの世界最高の不可逆磁場を達成し、今年既に新聞発表を行っている。

4) バルク超電導体が永久磁石となる原理を図1-1に示す。バルク超電導体に室温で、電

磁石を用いて外から磁場を加えると(この状態ではバルク体は超電導にはなっていない)、外からの磁力線はそのままバルク体の中を貫通する。外から磁場を加えたままの状態、バルク体を液体窒素中で冷却し(バルク体が超電導状態に変化)、その後、外からの磁場を取り除くと、磁力線の一部は外に逃げることなく、RE211(非超電導物質)粒子に捕まり、そのままバルク内に残る。捕まった(捕捉された)磁力線は、バルク体が冷却されている限り永久にとどまっているため、図1-2のように実際に永久磁石として使うことができる。

5) 例えば水浄化用磁気分離装置では、液体窒素温度でのY系材料の捕捉磁場では磁力が不足し、十分な性能を発揮できない。超電導バルク磁石は温度を低くすることにより捕捉磁場を高くすることができる。そこで、現状では、冷凍機を用いてY系バルク体を35K程度にまで冷却し、捕捉磁場を約3Tまで高くすることにより、はじめて浄水機としての使用が可能となっている。今回開発した材料を用いると、液体窒素温度のような比較的高い温度でこれまでと同等の浄水能力を発揮できる磁気分離機の開発が可能となることから、冷却コストの削減が期待できる。また、今回開発した材料を冷凍機で50K程度に冷却した場合には、10T以上の超強力な磁場を発生できるため、水の浄化能力を著しく向上できるものと期待される。

6) 臨界電流密度とは単位断面積当たりの超電導体に抵抗ゼロで流すことのできる最大の電流値のことを示す。RE123超電導材料は高温高磁場下で高い臨界電流密度を示すことから、バルク材料への応用が有利な材料である。

7) RE123超電導材料の結晶は、結晶構造のc軸(RE/Ba/Cuが1:2:3の比で積み重なっている方向)に結晶の方位がそろって大型化した場合に、強い磁場を捕捉することができる。したがって、大型で結晶方位が配向したバルク体を作製することが重要である。バルク体は原料を高温で溶融した後、徐々に冷却して固めることにより作られる。バルク体の結晶方位の制御は溶融しているバルク体の表面に種結晶を置き、種結晶と同じ結晶方位になるようにバルクを成長させることにより達成される。図2の写真では中心にある種結晶から結晶が成長し、全体が配向した単結晶からなるバルク体ができている。

8) 超電導工学研究所は、以前よりRE-Ba-Cu-O超電導体(ここでREはNd, Sm, Eu, Gd)を低酸素分圧下で溶融成長させるOCMG法(酸素制御溶融法; oxygen-controlled-melt-growth法)を開発し、この方法により作製した超電導バルク体の臨界電流密度が飛躍的に向上することを発見した。なかでも数百ナノメートルの非常に微細な非超電導物質(Gd211)を分散させた直径48 mmのGd系大型配向バルク体では既に77 Kで2 Tの捕捉磁場が得られている。さらに、このバルク体を2個重ねて、その間の捕捉磁場を測定すると約3 Tの捕捉磁場が得られることを確認していた。

9) バルク材料は機械的に脆い性質を有しており、バルクを大型化するとクラックが非常に入りやすくなる。大きなクラックが入った材料の捕捉磁場は著しく低下する。

10) バルクを大型化した場合、非超電導物質の粗大化や分散状態の不均一化、結晶方位が結晶成長とともにずれていくなどの現象が起こりやすく、特性が劣化する。

11) 低温工学・超電導学会での発表番号、題目

3A-p04、成木紳也、坂井直道、村上雅人「直径65mmの大型Gd123系バルク体の作製と捕捉磁場特性」(2002年11月1日発表予定、長崎市長崎ブリックホール)
(学会の開催期間は10月30日~11月1日)

添付資料

図1-1 バルク超電導体が磁力線を捕捉して永久磁石となる原理。

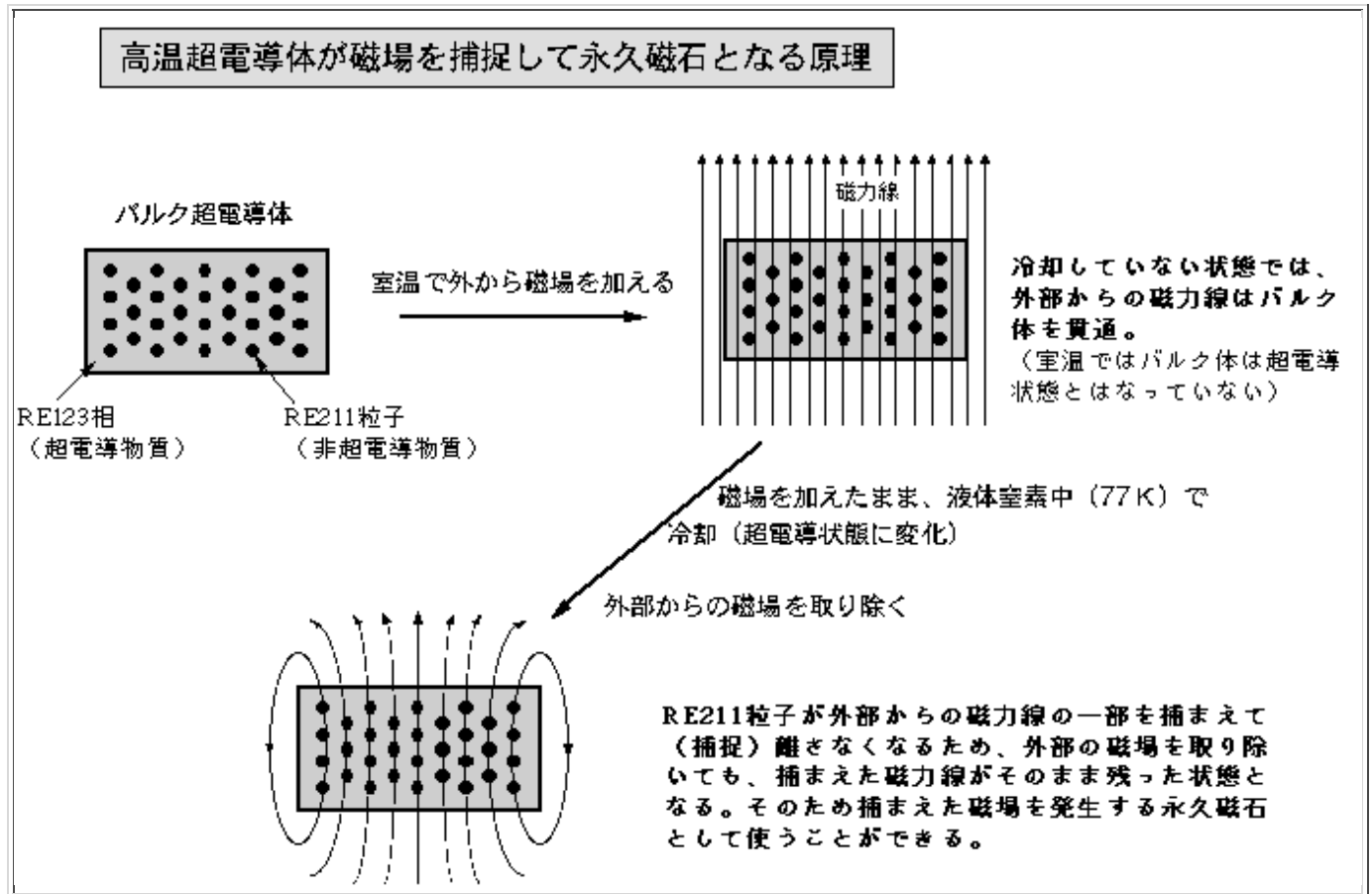


図1-2 液体窒素で冷却した超電導バルク磁石が、実際に永久磁石として鉄球をくっつけている様子。鉄球の大きさは9 mm径。容器内には液体窒素に浸した直径5cmのGd系バルク超電導体(捕捉磁場2T)が1個入っている。普通の磁石では鉄球を鉛直方向にせいぜい5個程度しかくっつけることができないが、この超電導バルク磁石は鉛直方向に約30個もの鉄球をくっつけており、いかに強力かがわかる。なお、今回開発したバルク体は、写真のものよりもさらに1.5倍強力な磁力を発生できる。

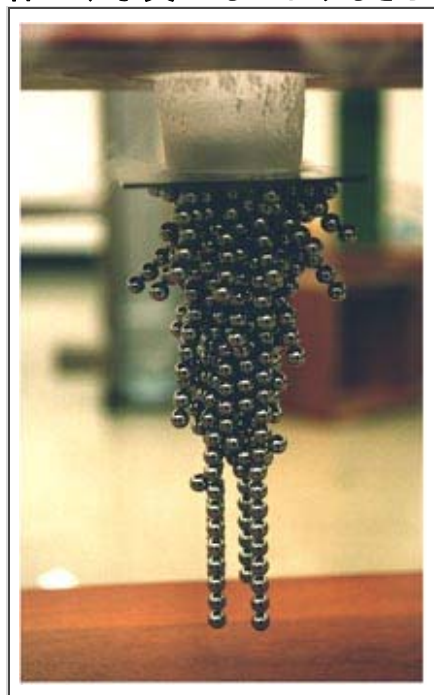


図2 本研究で開発したGd系バルク体を上から見た写真(直径65 mm、厚さ19 mm)

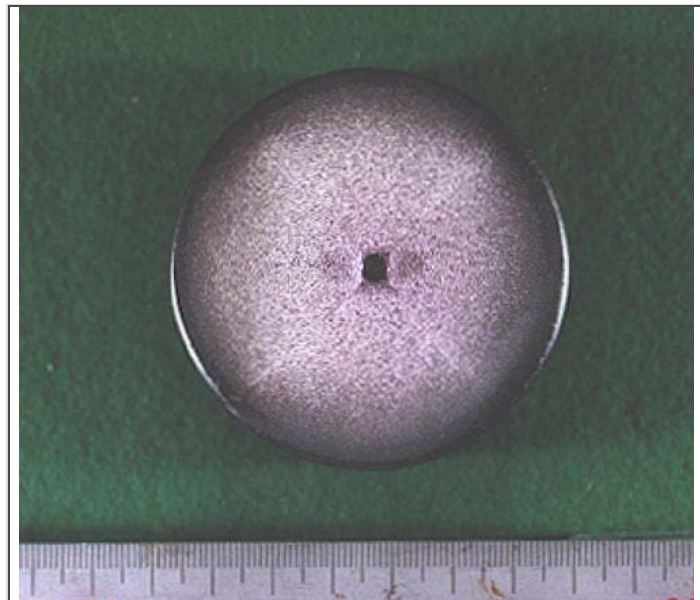


図3 本研究で開発した直径65 mmのバルク磁石が77 Kで捕捉した磁場の分布図。バルク表面から1.2 mm上部をホール素子を走査して測定したもの。バルク中央部で最も磁場が高くなり2.9 Tに達している。さらにホール素子を試料表面に接触させて測定したバルク表面直上の捕捉磁場の値は3.05 Tを記録した。

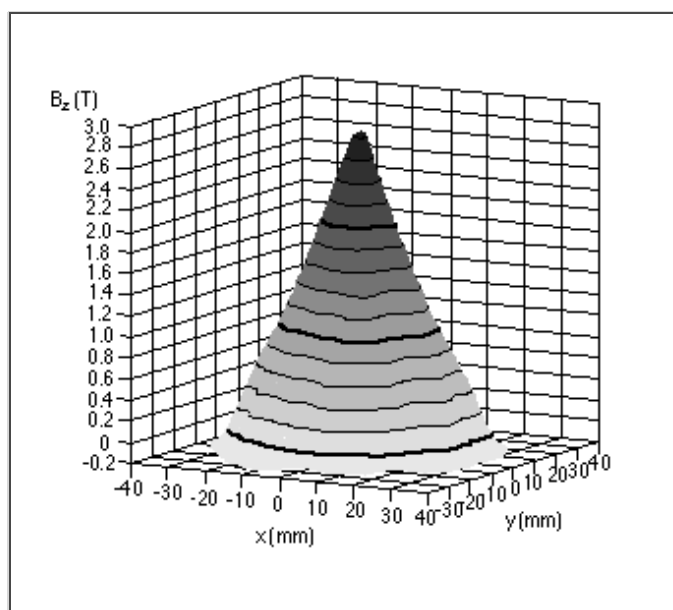
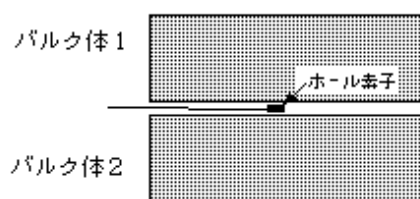
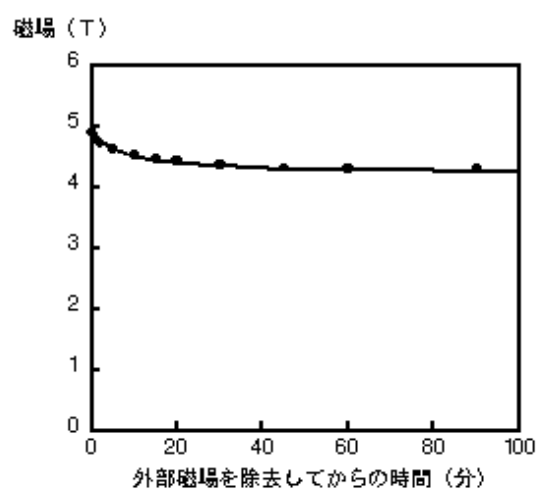


図4 (a)バルク体を2個重ねて捕捉磁場を測定する様子を示した模式図。および、(b)測定された磁場の時間変化。外からの磁場を完全に排除した直後は4.9 Tの磁場が捕捉されている。その後、最初の30分くらいの間、磁場は減衰するが(クリープ現象)、次第に一定となり、4.3 Tで変化しなくなった。この一定となった磁場が永久磁石として利用できる磁場

(a) ⇐



(b) ⇐



..