

ナノ組織制御で高温超電導体の磁場特性を飛躍的に向上

(77Kで14T以上 世界最高の磁場特性)

—高温超電導体の高磁場応用に大きく期待—

平成14年7月17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

岩手県工業技術センター

超電導工学研究所1)は[岩手県工業技術センター](#)2)と共同で、RE-Ba-Cu-O系バルク超電導体(REは希土類元素)3)のナノメートル4)オーダーの微細組織を制御することにより、臨界電流密度の磁場依存性5)を飛躍的に改善する技術の開発に成功した。

現在、高温超電導材料開発は、その実用化に向けて活発な応用開発が進められている。中でも、RE-Ba-Cu-O系バルク超電導体は、永久磁石の数倍も強力な超電導バルク磁石6)が作製できることから注目されている。超電導バルク磁石とは、バルク超電導体内に微細な非超電導物質を分散させた構造からなっており、非超電導物質の強いピン止め力7)を利用し、大きな磁場を捕捉させたものである。さらに、より強力な磁石を作製する方法としては、材料の大型化とともに臨界電流密度の磁場依存性を高めることが重要である。ここで、実際に臨界電流密度を高めるには、微細な非超電導物質の粒子を多数添加することが有効である。

RE-Ba-Cu-O系バルク超電導体において、現在最も広く研究開発が進められている材料はY-Ba-Cu-Oバルク超電導体であるが、液体窒素温度(77K)において、磁場を加えると同時に臨界電流密度が低下していき、約5 T8)前後で臨界電流密度がゼロとなってしまう(図1参照)。しかし、以前に超電導工学研究所が開発したOCMG法9)によって作製したLRE-Ba-Cu-O系バルク超電導体(LREは希土類元素のうち、La、Nd、Sm、Eu、Gd)は、高磁場中での臨界電流密度の特性が上がり、約8 T前後まで磁場特性が改善できた。これは、低酸素雰囲気下で結晶成長させることにより、RE123超電導体内に微細なピン止め点10)が生成されたためである。

今回開発した材料は、このOCMG法の技術をさらに発展させたもので、NdとEuおよびGdを混合させ、さらに、組成および作製プロセスを最適化11)したものである。これにより、図1に示す様に、高磁場下で世界最高の臨界電流密度(10 Tで20000 A/cm²)を達成し、さらに臨界電流密度の磁場依存性を14 T以上まで高めることに成功した。作製したバルク材料の微細組織を透過型電子顕微鏡(TEM)により観察したところ、20ナノメートル以下の縞状の組織が見られた(図2参照)。また、同材料を走査型トンネル顕微鏡(STM)により観察したところ、大きさが数ナノメートルの粒状の物質が縞状に並んだ組織が観察された(図3参照)。この縞状に析出させた組織が、臨界電流密度の磁場依存性の大幅な向上

に寄与していると考えられる。

Y-Ba-Cu-Oバルク超電導体においては、現在、液体窒素温度(77 K)において1 T程度の超電導磁石が作製されている。この度開発した材料は、強い磁場下で臨界電流密度が飛躍的に向上していることから、液体窒素温度(77K)で10 Tを超える強い磁石を作製できる可能性がある。それにより、液体窒素温度のような高温域における強力バルク磁石などへの高磁場応用が促進されるものと期待される。強力バルク磁石の応用としては、水浄化装置、磁気断層撮影装置、資源回収用の磁気分離装置、励磁装置、強力磁気浮上装置、等が考えられる。なお、本研究の成果は8月4日から米国で開催される超電導体に関する国際会議ASC (Applied Superconductivity Conference) 2002で発表する予定である。

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

超電導工学研究所 盛岡研究所 電話:019-635-9015

<補注>

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(理事長は荒木浩 日本経済団体連合会副会長)の研究所で所長は田中昭二東大名誉教授。

超電導工学研究所 盛岡研究所(腰塚直己所長代理)においては、第三研究部(村上雅人部長)の盛岡分室所属のミリヤラ・ムラリダ主任研究員および田町研究所所属の坂井直道主管研究員がバルク超電導体の高臨界電流密度化に関する研究に従事している。

2 岩手県工業技術センター(斎藤紘一所長)では、金属材料部(南幅留男部長)の齋藤貴主任専門研究員および小野元専門研究員、化学部(小向隆志部長)の鎌田公一主任専門研究員(現同センター企画情報部)らがバルク超電導体の研究開発に従事している。

3 RE-Ba-Cu-O系超電導体(REは希土類元素)は、REBa₂Cu₃O_y(RE123)超電導体とRE₂BaCuO₅(RE211)非超電導体からなる混合体で、現在、液体窒素温度における実用化にもっとも注目を集めている超電導体である。RE211相は絶縁体で、臨界電流密度を高めるのに重要なピン止め点として作用することが知られている。

4 ナノメートル(nm)は10億分の1メートル(10⁻⁹ m)

5 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。液体窒素温度(77K)において結晶のc軸に平行な磁場を加えた条件下で、Y-Ba-Cu-Oバルク超電導体の臨界電流密度の磁場依存性を測定すると、外部磁場を増加させるとともに臨界電流密度は低下する。臨界電流密度がゼロとなる磁場のことを不可逆磁場といい、実用上はこの磁場以下でないため、非常に重要である。

6 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、磁石と同様の機能を発揮する。ここで、大型で臨界電流密度の高いバルク超電導磁石は、より強い磁場を捕捉することが可能である。

7 RE-Ba-Cu-O系超電導体は、ある一定以上の磁場を加えると一部磁場が侵入した状態となる。この状態で電流を流すと、内部に侵入した磁場(量子化磁束)はローレンツ力を受けて動こうとするが、超電導体内の格子欠陥、析出相(絶縁相、常伝導相)、不純物、転位、粒界等の不均質な部分に磁束が捕捉され動きが妨げられる。これを磁束ピン止めという。ピン止め力よりローレンツ力のほうが大きくなれば、磁束が動き電圧が発生する(電気抵抗が生じる)。

8 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。

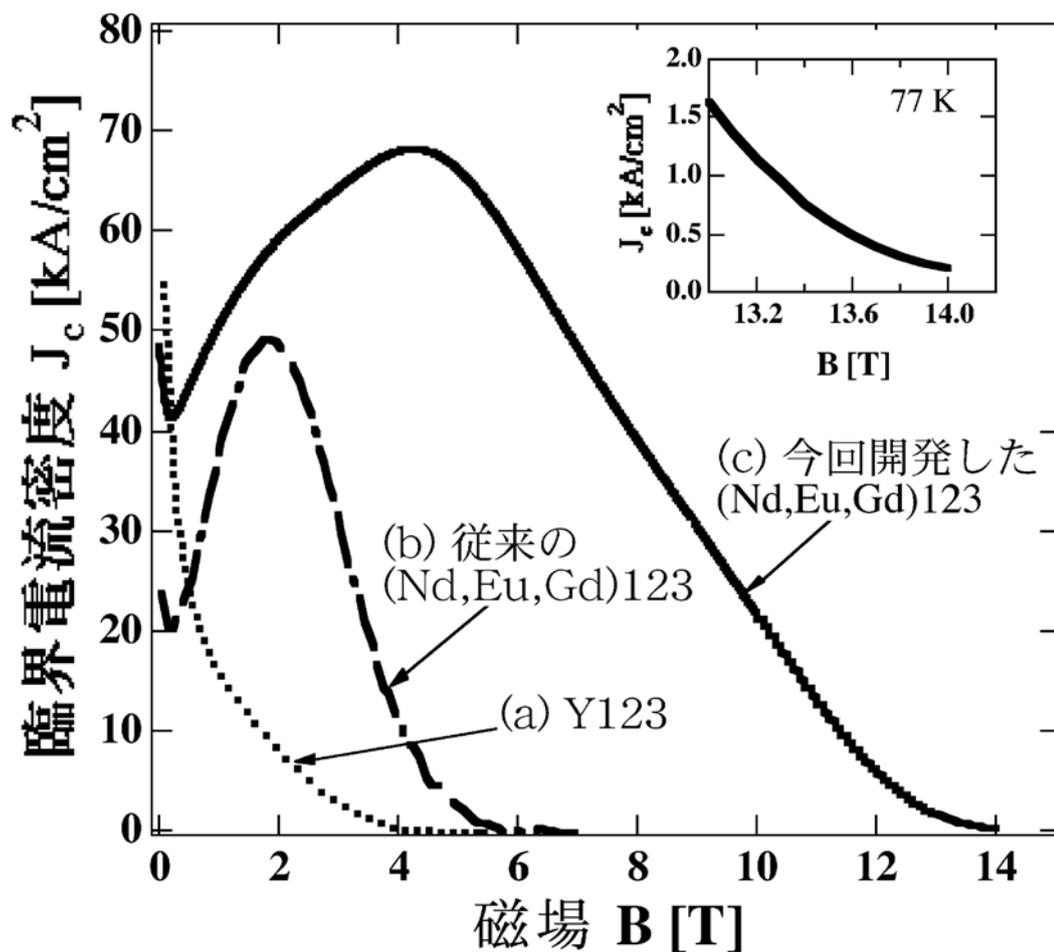
9 OCMG法は oxygen-controlled-melt-growth法の略で、酸素制御熔融成長法である。低酸素分圧下(空気よりも酸素濃度の低い雰囲気)でLRE-Ba-Cu-O系超電導体(LREはNd, Sm, Eu, Gd)を熔融凝固させる手法であり、この手法により画期的な高性能LRE-Ba-Cu-O系超電導体が開発された。超電導工学研究所では、このプロセスと材料(LRE-Ba-Cu-O系超電導体; LREはNd, Sm, Eu, Gdおよびその混合)の両方の基本特許を米国、欧州、日本で取得している。

10 LRE-Ba-Cu-O系においては、 $\text{LRE}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (LRE123)超電導母相中に、LRE濃度が母相よりも少し高い $\text{LRE}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_z$ (LRE123ss、 $0 < x < 0.2$)相が微細に析出する。このLRE123ss相は、低い磁場では超電導体であるが、磁場が高くなると非超電導体に変化し、これがピン止め点として働くようになる。そのため、磁場を加えていくと、1~5 Tの高い磁場において臨界電流密度が最大を示した後、減少していく。

11 具体的には、Nd:Eu:Gdの比を通常用いている1:1:1から少しずらした組成(33:38:28の比)とし、さらに3~10%の(Nd, Eu, Gd)211非超電導相と混合した粉末を成型し、酸素濃度の低い雰囲気中で熔融した後、徐々に冷却させることで結晶成長させた。

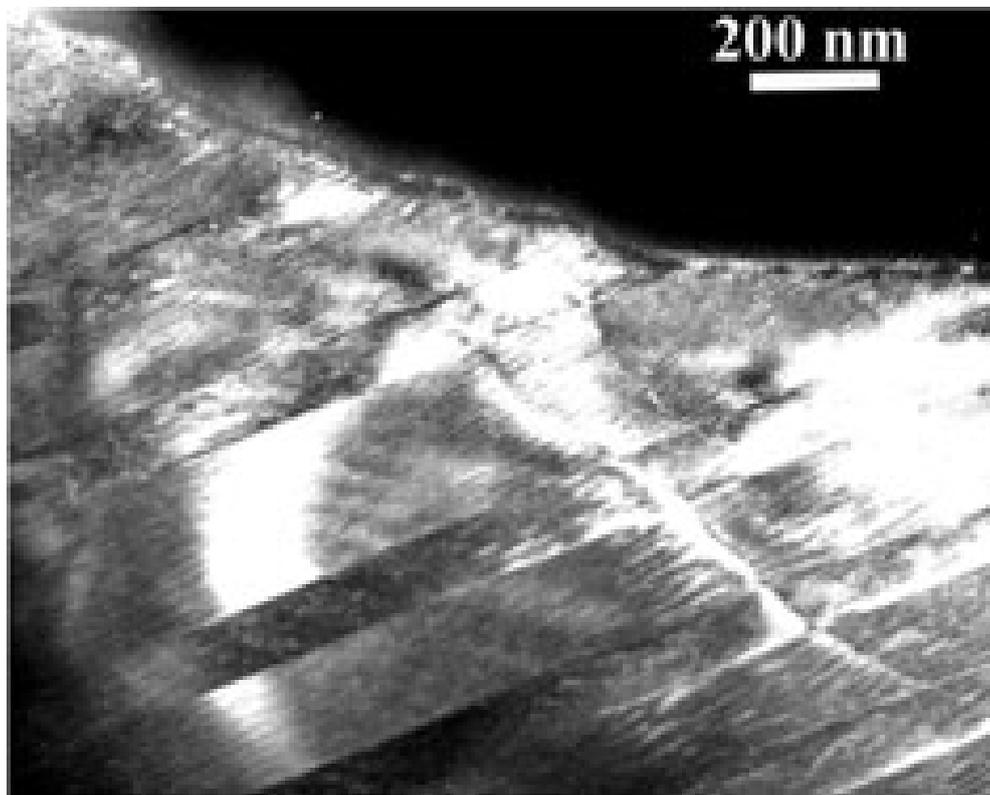
添付資料

図1



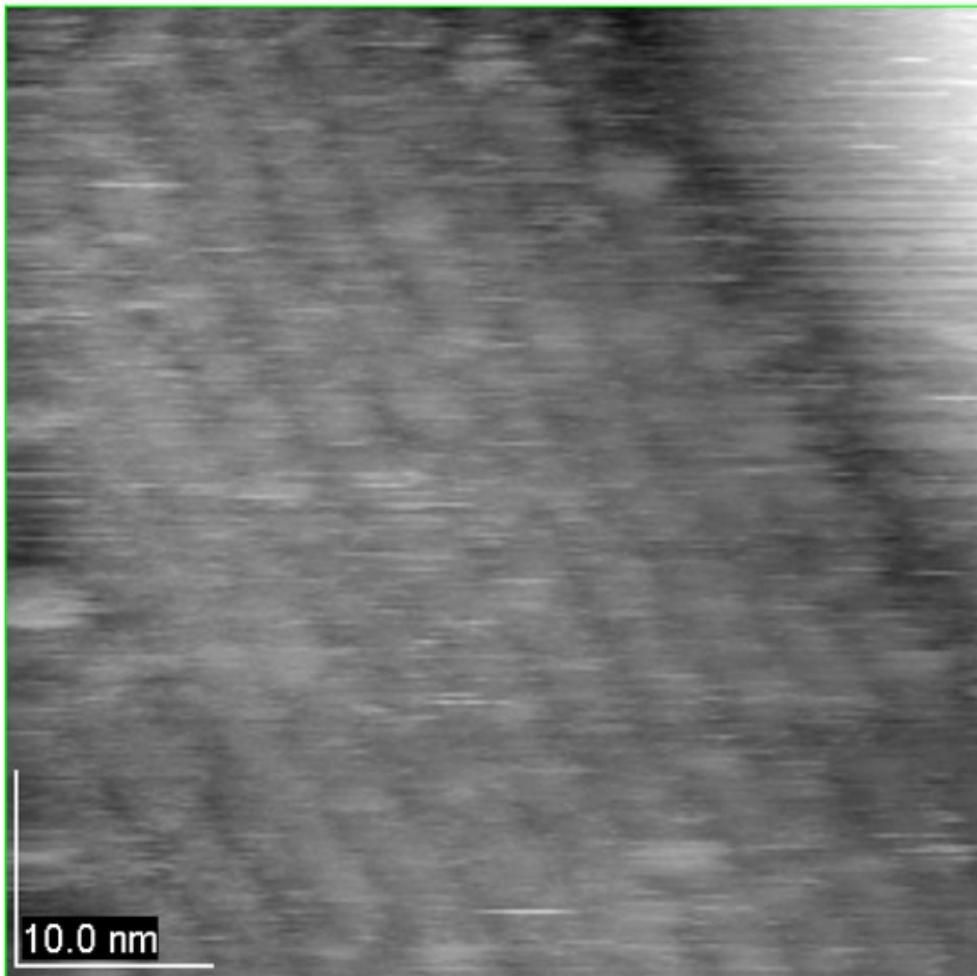
従来のY123系バルク体(a)、(Nd,Eu,Gd) 123 (Nd:Eu:Gdの比は1:1:1)バルク体(b)および今回開発した(Nd,Eu,Gd)123系 (Nd:Eu:Gdの比は33:38:28で5%の(Nd,Eu,Gd)211を添加している)バルク体(c)の臨界電流密度(J_c)の外部磁場(B)依存性(77 Kにおいて、試料のc軸に磁場を平行に印加して測定)。14 Tにおいても J_c がゼロになっていない(14 Tまで超電導体として利用可能であることを示す)。

図2



透過型電子顕微鏡(TEM)により観察した(Nd,Eu,Gd)123系(Nd:Eu:Gdの比は33:38:28で5%の(Nd,Eu,Gd)211を添加している)バルク体の微細組織。20ナノメートル以下の縞状の組織が見られる。

図3



走査型トンネル顕微鏡 (STM) により観察した (Nd, Eu, Gd)₁₂₃ 系 (Nd:Eu:Gd の比は 33:38:28 で 5 % の (Nd, Eu, Gd)₂₁₁ を添加している) バルク体の微細組織。大きさが数ナノメートルの RE 濃度がマトリックスよりも高いと見られる領域 (粒子状) が縞状に配列した組織がみられる。この組織が臨界電流密度の磁場依存性の大幅な向上に寄与している。