

# 強磁場マグネット応用を目指した次世代高温超伝導線材の電流輸送特性評価

## Current Transport Properties of RE123 Coated Conductor for High Magnetic Field Applications

九大・シス情 井上 昌睦, 東川 甲平, Rene Fuger, 木須 隆暢  
東北大・金研 淡路 智, 難波 雅史, 渡辺 和雄  
超電導工研 福島 弘之, 衣斐 顕, 宮田 成紀, 山田 穰, 和泉 輝郎, 塩原 融

M. Inoue<sup>1</sup>, K. Higashikawa<sup>1</sup>, R. Fuger<sup>1</sup>, T. Kiss<sup>1</sup>, S. Awaji<sup>2</sup>, M. Namba<sup>2</sup>, K. Watanabe<sup>2</sup>,  
H. Fukushima<sup>3</sup>, A. Ibi<sup>3</sup>, S. Miyata<sup>3</sup>, Y. Yamada<sup>3</sup>, T. Izumi<sup>3</sup>, Y. Shiohara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of ISEE, Kyushu University

<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

<sup>3</sup> Superconductivity Research Laboratory, ISTEC

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導体を用いた次世代高温超伝導線材の開発研究は、国内外で精力的に進められており、77K、自己磁場中での臨界電流  $I_c$  値が 153A である 1.3km 長の長尺線材[1]や、 $I_c=310\text{A/cm-w}$  の 500m 長線材[2]が得られるに至っている。近年、これらの次世代高温超伝導線材を用いた超伝導機器の開発研究が始められており、国内では 2008 年度より(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のイットリウム系超電導電力機器技術開発プログラム[3]にて、超電導電力貯蔵システム(SMES)や超電導電力ケーブル、超電導変圧器の開発研究が実施されている。線材そのものの更なる高性能化に向けた開発研究も進められており、特に強磁場マグネット等の各種磁場応用機器開発において重要となる磁場中  $I_c$  の向上は、重要な開発項目の一つとして取り組まれている。磁場中  $I_c$  を向上させる方法としては、(1)希土類元素をイットリウムからガドリウム等の臨界温度が高いものに変更する、もしくは希土類元素の混晶系を採用するものと、(2)人工的なピンニングセンターを導入するものがあり、更にこれらを組み合わせたものも検討されている[4-6]。通常、これらの磁場中  $I_c$  特性向上の有無は、液体窒素温度程度の比較的高い温度で評価されており、冷凍機冷却が可能な 20K 近傍を含めた広範な温度領域に亘る評価はほとんど行われていない。

本研究では、 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (GdBCO) に人工ピン

ニングセンターとして  $\text{BaZrO}_3$  (BZO) を導入した高温超伝導線材(以下 GdBCO+BZO 線材と表す)の臨界電流特性を、広い温度、磁場領域に亘って実験により明らかとし、導入された人工ピンの効果について検討する。

### 2. 実験

実験に用いた GdBCO+BZO 線材の構成は、下地から順に、Hastelloy(100 $\mu\text{m}$ ) /  $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (0.8 $\mu\text{m}$ ) /  $\text{CeO}_2$ (0.4 $\mu\text{m}$ ) / GdBCO+BZO(1.2 $\mu\text{m}$ ) / Ag(10 $\mu\text{m}$ )となっており、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 層は Ion-Beam Assisted Deposition (IBAD)法で、 $\text{CeO}_2$ 層および GdBCO+BZO層は Pulsed Laser Deposition(PLD)法で作製されている。GdBCO内の BZOは、GdBCOに  $\text{ZrO}_2$ を混入したターゲットを用いることにより導入している。臨界電流  $I_c$ は、1cm幅の状態では約 250A/cm(77K、自己磁場)であった。

電流輸送特性の詳細な実験を行うため、線材を 1cm 長程度切り出した後、幅 75 $\mu\text{m}$ 、長さ 500 $\mu\text{m}$ のマイクロブリッジ形状に加工し、実験用の試料とした。加工方法はフォトリソグラフ法を用いたウェットエッチングである。

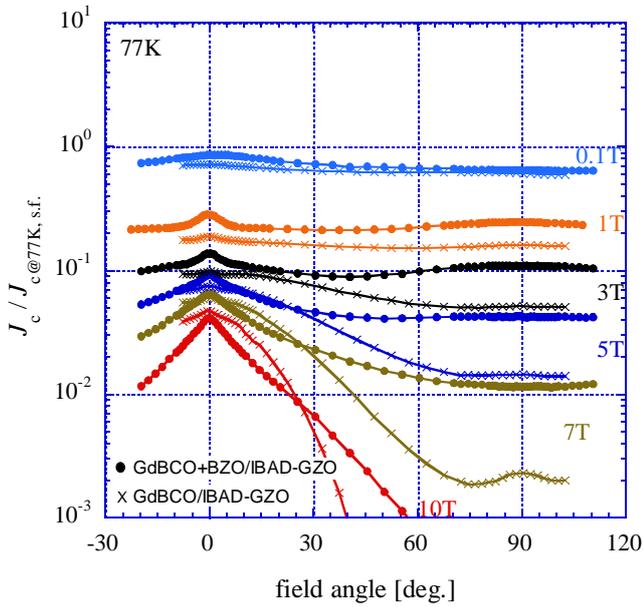
実験は、直流四端子法による電流-電圧測定を、温度、磁場、磁場印加角度を系統的に変化させながら行った。温度は、液体ヘリウムの気化ガスの流量および昇温用ヒータの出力を調整することにより制御している。磁場は、17T 以下の磁場領域には超伝導マグネット(20T-SM)を、18T 以上の磁場領域

にはハイブリッドマグネット（28T-HM）を用いて印加しており，最大印加磁場は 27T である．磁場印加角度は，試料ステージをステップモータで回転させることにより変化させている．

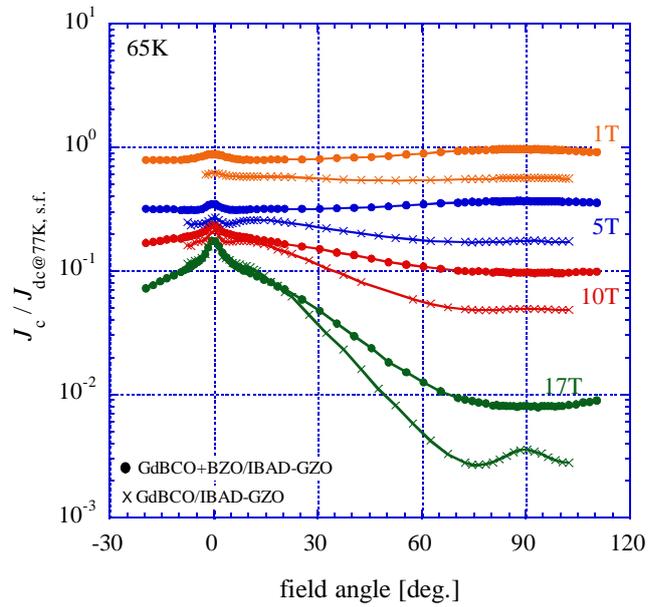
### 3．実験結果および考察

Fig.1 に  $J_c$  の磁場印加角度依存性を，Fig.2 に  $J_c$  の温度，磁場依存性を示す．導入した人工ピンの寄与

について考察するため，両図とも 77K，自己磁場の  $J_c$  にて規格化するとともに，人工ピンを導入していない GdBCO 線材の臨界電流特性[7]を同一グラフ上にプロットしている．Fig.1 の  $J_c$  の角度依存性を見ても，膜面に垂直な磁場印加方向（ $\theta=90^\circ$ ， $B//c$ -axis）のみならず，広い角度領域に亘って  $J_c$  が向上しており，全体として  $J_c$  の異方性が小さくなっていることが分かる．また，条件によっては（例え

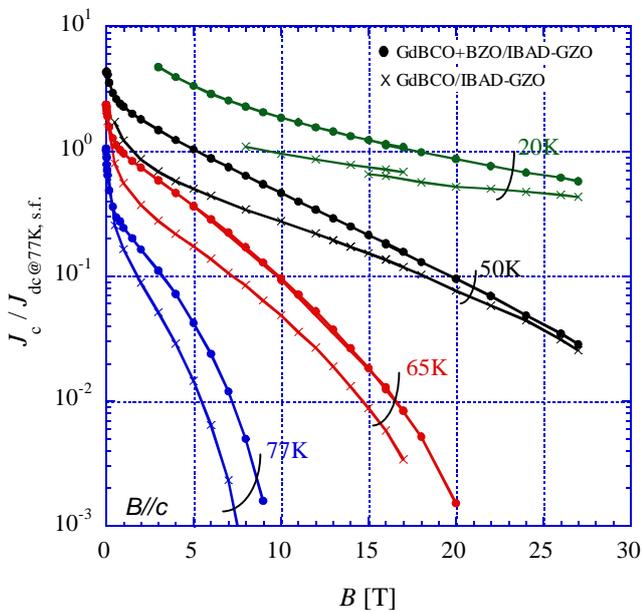


(a) 77K

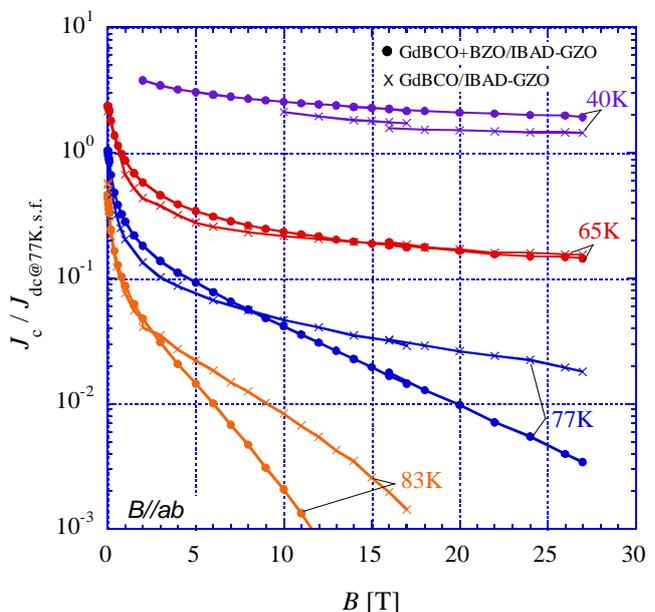


(b) 65K

Fig.1 Field angle dependence of normalized  $J_c$



(a)  $B//c$



(b)  $B//ab$

Fig.2 Temperature and magnetic field dependence of normalized  $J_c$

ば 65K の 1T や 5T ) 垂直磁場の  $J_c$  が 平行磁場 ( $\theta=0^\circ$ ,  $B//ab$ -plane) の  $J_c$  よりも高くなっている。これより,  $c$  軸方向に相間を有するピンニングセンターが効果的に導入されていることが分かる。20K においても垂直磁場中の規格化  $J_c$  は高くなっており, 18T にて 77K, 自己磁場の  $J_c$  と同程度の  $J_c$  が, 27T の強磁場中でも 77K, 自己磁場中の  $J_c$  の 60% 程度の  $J_c$  が得られている。これらの結果は, 人工ピンの導入に伴

う各種超伝導応用機器の最適設計の変化を検討するうえで重要である。

$J_c$  値そのものを比較したのが, Fig.3 および Fig.4 である。Fig.3 に示す  $J_c$  の角度依存性について見てみると, GdBCO+BZO 線材の 77K, 自己磁場での  $J_c$  値が  $2.1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  と, 人工ピンを導入していない GdBCO 線材の  $J_c$  ( $=4.1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ ) の半分程度であるため, 低磁場領域においては全ての角度に亘って

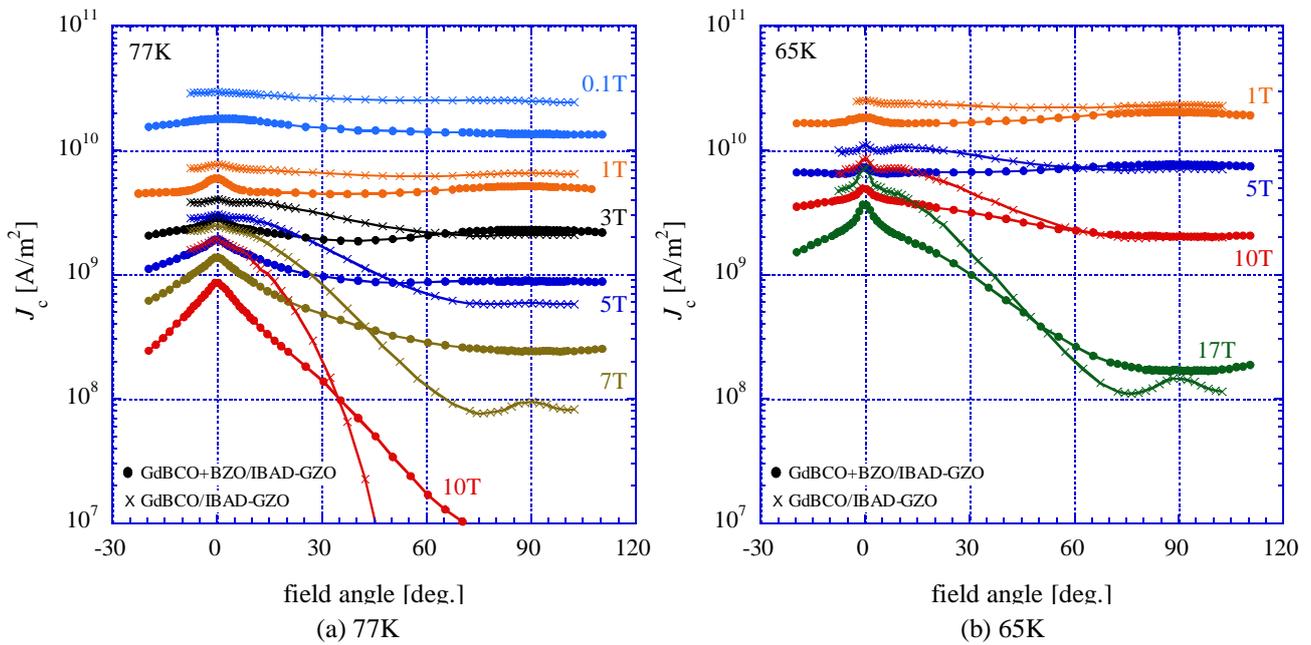


Fig.3 Field angle dependence of  $J_c$

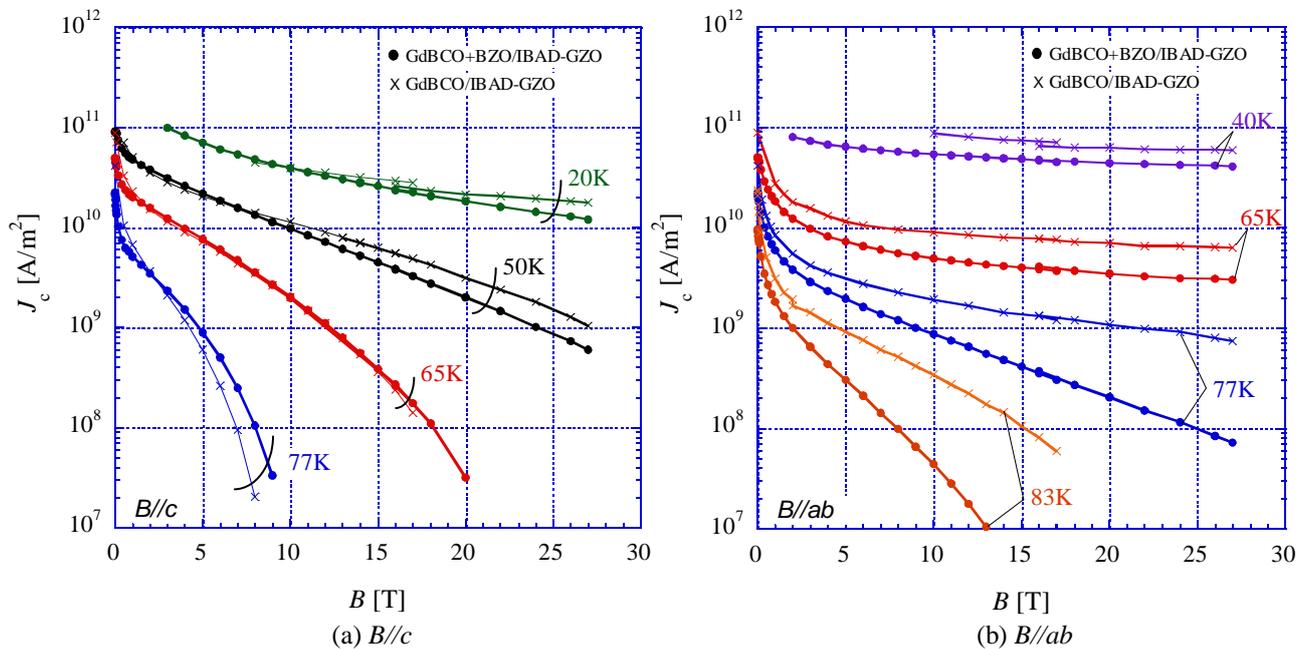


Fig.4 Temperature and magnetic field dependence of  $J_c$

GdBCO+BZO 線材の  $J_c$  値が低くなっているが、磁場の増加とともにその差は小さくなり、磁場の高い領域では角度に対する最小の  $J_c$  値は GdBCO+BZO 線材の方が高くなっているが分かる。また、垂直磁場での低温・強磁場特性( Fig.4 )について着目すると、20K、27T において  $10^{10} \text{A/m}^2$  を超える  $J_c$  が得られることが明らかとなった。現在、77K、自己磁場の  $J_c$  値が人工ピン導入前に比べて低いことから、人工ピン導入プロセスの最適化による更なる  $J_c$  特性の向上が期待される。

#### 4. まとめ

本研究では、人工ピンとして GZO を導入した GdBCO 線材の臨界電流特性を、広範な温度、磁場、磁場印加角度領域に亘って実験により調べた。その結果、幅広い角度領域に亘るピンニングの効果と、それに伴う異方性の改善が確認された。これらの結果は、各種超伝導応用機器の最適設計が人工ピンの導入に伴いどのように変化するかを検討する際の基礎データとして重要である。

#### 参考文献

- [1] V. Selvamanickam et al., DOE High Temperature Superconductivity Program Peer Review (2008)
- [2] 小泉勉 他, 2008 年秋季低温工学・超電導学会 2A-a08
- [3] 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)  
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p08016.html>
- [4] S.H. Wee et al., Supercond. Sci. & Tech. **21** (2008) 092001
- [5] M. Inoue et al., Physica C **463** (2007) 674
- [6] M. Miura et al., Appl. Phys. Express (2008) 051701
- [7] 井上昌睦 他, 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 19 年度年次報告 (2008) 24