

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 on RE123 Coated Conductor for High Magnetic Field Applications

九大・シス情 井上 昌睦, Rene Fuger, 東川 甲平, 木須 隆暢
東北大・金研 淡路 智, 難波 雅史, 渡辺 和雄
フジクラ 飯島 康裕, 柿本 一臣, 斉藤 隆
ISTEC・超電導工研 和泉 輝郎

M. Inoue¹, F. Rene¹, K. Higashikawa¹, T. Kiss¹, S. Awaji², M. Namba², K. Watanabe²,
Y. Iijima³, K. Kakimoto³, T. Saitoh³ and T. Izumi⁴

¹ Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

² Institute for Materials Research, Tohoku University

³ Fujikura Co. Ltd.

⁴ Superconductivity Research Laboratory, ISTEC

1. はじめに

強磁場マグネット応用に用いられる超伝導線材において重要な特性のひとつが、工学的臨界電流密度 J_c である。 J_c は、線材の臨界電流 I_c を線材の断面積全体で除して与えられ、強磁場マグネット等の巻き線構造を有する応用機器においては実用性能を決める重要な工学的パラメータとなる。高 J_c 化の方法としては、まず、(1) 臨界電流密度 J_c を向上させることが挙げられる。希土類系高温超伝導 (Rare Earth 123, RE123) 線材においては、中間層を含めた基板の平坦性や2軸配向性の向上、超伝導膜の作製プロセスの最適化等により、長尺に亘り高い J_c を有する線材が得られるに至っている[1-3]。また、更なる高 J_c 化を、特に磁場中において実現するため、人工的なピンニングセンターの導入も進められている[4,5]。一方、RE123 線材に有効な高 J_c 化の方法として、(2) 厚膜化による高 I_c 化、が挙げられる。RE123 線材においては基板や安定化層の断面積に対する超伝導層の割合が 1/100 程度と小さいことから、超伝導層を厚くすることにより高 I_c 化が実現できれば、 J_c は向上する。しかしながら、パルスレーザ蒸着 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 法においては膜厚の増加に伴い a 軸配向粒や異相が支配的になる等の配向性の乱れが顕著となり、膜厚に対する I_c の上昇が飽和してしまうことが知られている[6,7]。フジクラ (株) では、超伝導膜作製時の基板加熱方式を改良するとともに温度制御法を改善することにより、 I_c の膜厚に対する飽和を低減させることに成功している。これにより、短尺において $6\mu\text{m}$ 弱の膜厚で $1,040\text{A/cm}$ の I_c が得られている[8]。また、同手法の長尺線材作製プロセスへの適用により 80m を超える長尺に亘り 600A/cm の I_c を有する線材が得られるに至っている[9]。同線材においては I_c の長手方向のばらつきが

$\pm 2\%$ と小さいのも特徴で、基板の加熱方式の最適化が、厚膜化のみならず I_c の均一性向上にも寄与していると考えられる。しかしながら、これらの I_c の向上は、77K、自己磁場において確認されているものであり、広い温度、磁場領域に亘っての振る舞いについては明らかとなっていない。

本研究では、 620A/cm の I_c を有する $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ (GdBCO) 線材の電流輸送特性を広い温度、磁場領域に亘って明らかとする。

2. 実験

実験に用いた GdBCO 線材の構成は、下地から順に、HastelloyTM / $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ / CeO_2 / GdBCO となっており、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 層は Ion-Beam Assisted Deposition (IBAD) 法で、 CeO_2 層及び GdBCO 層は PLD 法で作製されている。各層の膜厚は Table 1 に示す。長さ 20cm の区間 I_c は、77K、自己磁場中において 620A/cm であった。

Material	Fabrication technique	Thickness
GdBCO	PLD	$2.5\ \mu\text{m}$
CeO_2	PLD	$0.5\ \mu\text{m}$
$\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	IBAD	$1.1\ \mu\text{m}$
Hastelloy TM	-	$100\ \mu\text{m}$

Table 1 Sample specifications

電流輸送特性の詳細な実験を行うため、上記線材を 1cm 長程度切り出した後、フォトリソグラフ法を用いたウェットエッチングプロセスにより、幅 $100\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ のマイクロブリッジ形状に加工し、実験用の試料としている。

実験は、直流四端子法による電界—電流密度 (E - J) 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及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ピングモータで回転させることにより変化させている。なお、磁場の印加角度は、膜面に平行な方向 ($B//ab$) を 0° 、膜面に垂直な方向 ($B//c$) を 90° と定義している。

3. 実験結果及び考察

3-1. J_c 及び I_c の磁場印加角度依存性

Fig.1 に 65K 及び 77K での J_c 及び I_c の角度依存性を示す。平行磁場方向で比較的シャープなピークを示し、垂直磁場方向でブロードなピーク特性を示す、典型的な IBAD 基板上的 PLD-GdBCO 線材と同様の振る舞いが得られている。これまでに報告している $1.2\mu\text{m}$ 厚の超伝導層を有する GdBCO 線材と比べると、 J_c 値自体は若干減少しているものの、厚膜化による全体的な I_c の向上が得られていることが分かる。例えば、磁場中特性評価の指標に用いられている 77K での 3T 及び 1T の I_c 値を見てみると、それぞれ全ての角度領域に亘って 30A/cm, 100A/cm 以上が得られている。従来はこれらの値を達成するために人工ピンの導入が図られていたが、厚膜化による高 I_c 化により実現できていることが明らかとなった。

3-2. 垂直磁場中の E - J 特性の温度、磁場依存性

3桁程度の電界領域に亘る垂直磁場中の E - J 特性を、20K から 77K の温度範囲、自己磁場から 27T までの磁場範囲に亘って詳細に調べた。その結果を Fig.2 に示す。各温度において、磁場の上昇に伴い J_c 値及び n 値が系統的に減少していくことが分かる。一方、温度の低下に伴う J_c 及び n 値の上昇は顕著で、20K においては 27T での強磁場中においても 10^{10}A/m^2 程度の J_c 及び 19 程度の n 値が得られている。これらの結果は、冷凍機冷却を用いた強磁場コイル応用にける基礎データとして有用かつ重要である。

3-3. 垂直磁場中の I_c - B - T 特性

Fig.2 で示した E - J 特性から、電界基準 $1\mu\text{V/cm}$ にて J_c を求めた後、1cm 幅あたりの I_c 値に換算し、その温度、磁場依存性をまとめたのが Fig.3 である。また、同図には比較用の参照データとして、 $1.2\mu\text{m}$ 厚の超伝導層を有する GdBCO 線材の特性[10]を破線にて示している。両者を比較して分かるように、厚膜化による I_c 値の向上は、液体窒素温度付近のみでなく、20K までの低温領域においても得られており、例えば、20K, 27T の I_c 値は、約 240A/cm に達している。このことは、本作製プロセスにより、膜質を保持しつつ厚膜化することに成功していることを意味しており重要な成果である。厚膜化は線材の作製速度を低下させるため単純に膜厚を増加させ続けるわけにはいかないが、低温、強磁場で有効な人工ピンの導入と合わせて検討することにより、強磁場マグネット応用に向けた次世代高温超伝導線材の作製プロセスの最適化が図れるものと考えられる。

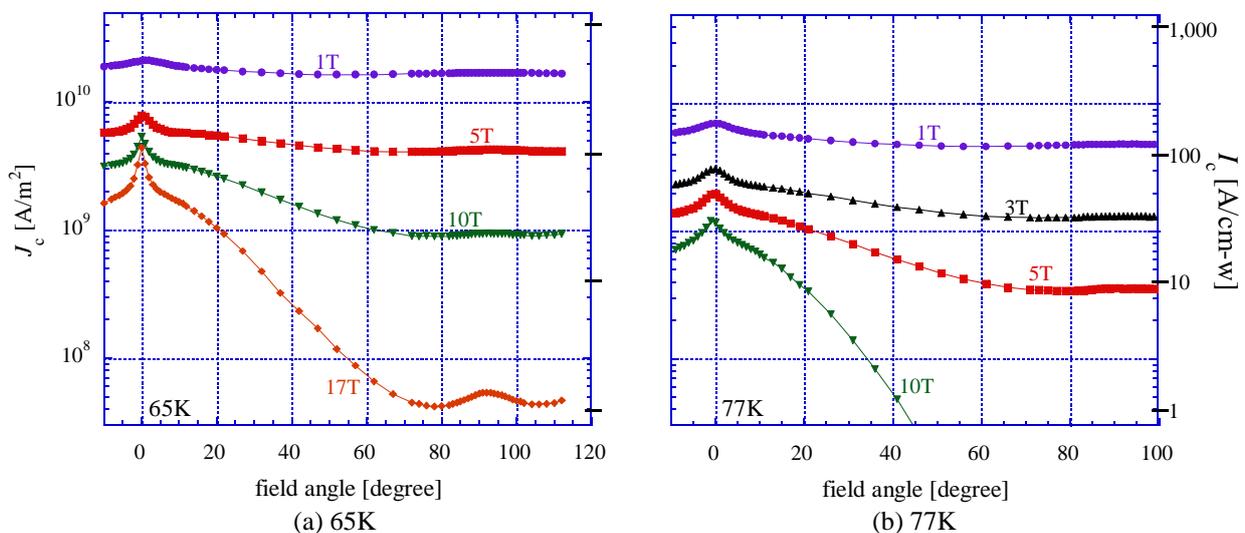


Fig. 1 Field angle dependence of J_c/I_c at (a) 65K and (b) 77K

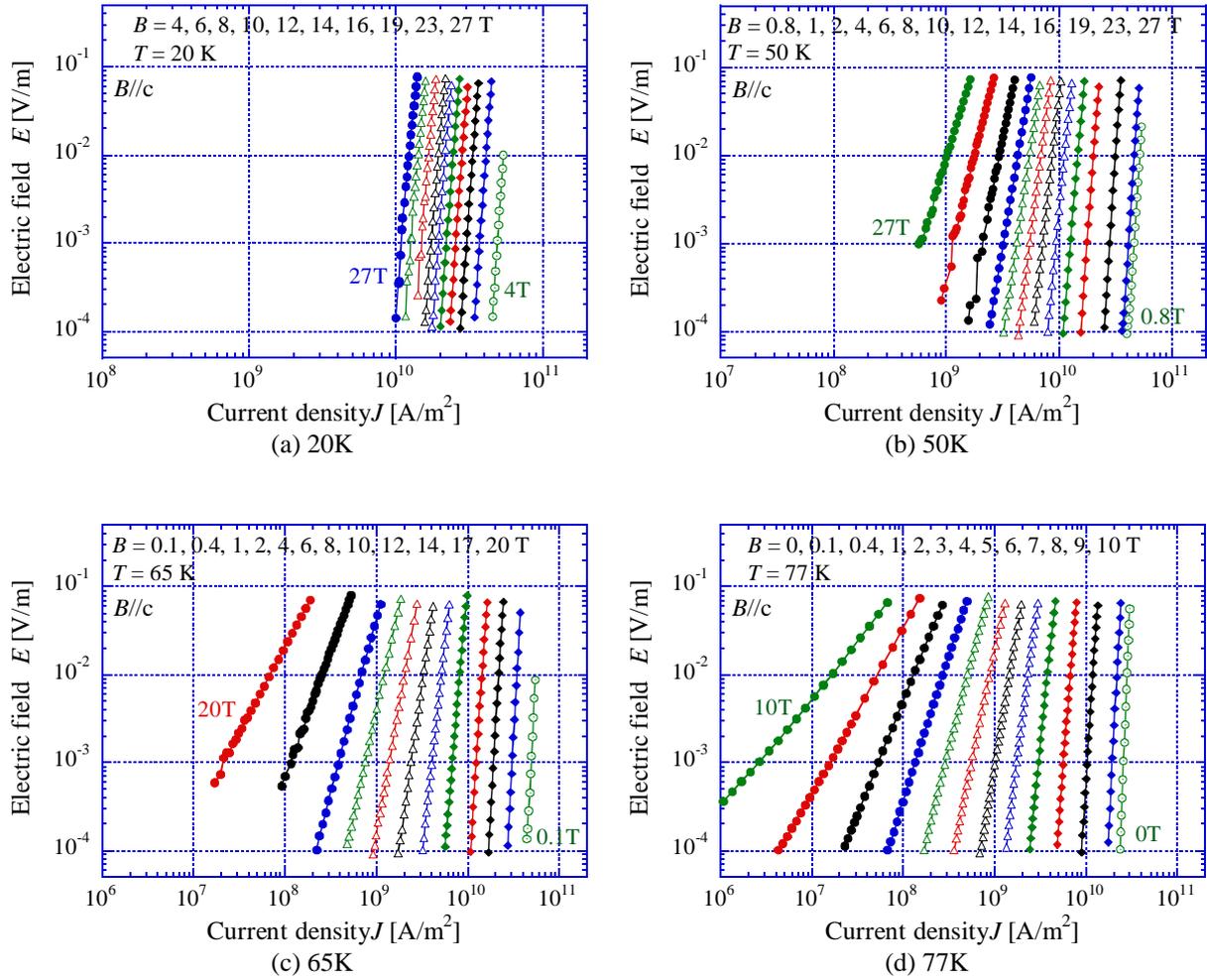


Fig. 2 External magnetic field dependences of E - J curve at (a) 20K, (b) 50K, (c) 65K and (d) 77K

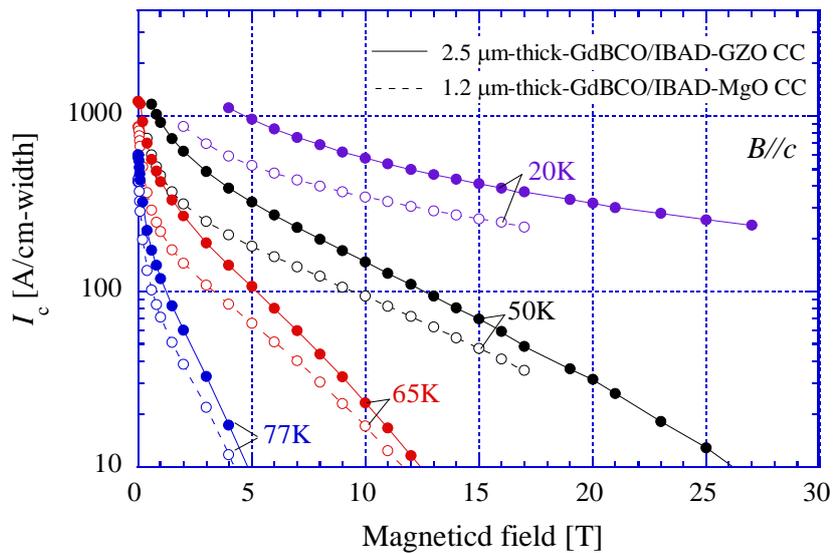


Fig. 3 I_c - B - T property at $B//c$. Solid lines and dashed lines are correspond to 2.5 μ m-thick GdBCO CC for this study and typical 1.2 μ m-thick GdBCO CC based on IBAD-MgO substrate[10], respectively.

4. まとめ

本研究では、620A/cm の I_c を有する $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 線材の電流輸送特性を広い温度、磁場領域に亘って実験により明らかとした。その結果、厚膜化による高 I_c 特性は、液体窒素温度、自己磁場中のみならず、20K までの低温領域、27T までの強磁場領域においても得られていることが明らかとなった。これらの結果は、超伝導層の膜質を保持しつつ厚膜化することに成功していることを意味しており、重要である。今後は、長尺線材の更なる厚膜化や人工ピンの導入により、磁場中での高 I_c 化が進められていくことが期待される。

参考文献

- [1] Y. Shiohara, et al., *Physica C* 469 (2009) 863-867
- [2] V. Selvamanickam, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 (2007) 3231-3234
- [3] Y. Yamada, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19 (2009) 3236-3239
- [4] Y. Sutoh, et al., *Physica C* 469 (2009) 1307-1310
- [5] J.L. MacManus-Driscoll, et al., *Supercond. Sci. & Technol.* 23 (2010) 034009
- [6] S.R. Foltyn, et al., *Appl. Phys. Lett.* 82 (2003) 4519-4521
- [7] T. Kato, et al., *Physica C* 426-431 (2005) 1033-1042
- [8] フジクラ技報 No.116, 2009年7月, 51頁
- [9] K. Kakimoto et al., *Abst. of CSJ Conf.*, 81 (2009) 124
- [10] 井上他, 第70回応用物理学会学術講演会 9p-R-13