

高臨界電流値を有する希土類系高温超伝導線材の電流輸送特性 Current Transport Properties of RE123 Coated Conductor

井上 昌睦¹, 山口 仁正¹, 榊原 崇志¹, 今村 和孝¹, 東川 甲平¹, 木須 隆暢¹,
淡路 智², 渡辺 和雄², 飯島 康裕³, 斎藤 隆³, 飛田 浩史⁴, 吉積 正晃⁴, 和泉 輝郎⁴

¹九大・シス情, ²東北大・金研, ³フジクラ, ⁴ISTEC・超電導工研

M. Inoue¹, Y. Yamaguchi¹, T. Sakakibara¹, K. Imamura¹, K. Higashikawa¹, T. Kiss¹,
S. Awaji², K. Watanabe², Y. Iijima³, T. Saitoh³, H. Tobita⁴, M. Yoshizumi⁴ and T. Izumi⁴

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

²Institute for Materials Research, Tohoku University

³Fujikura Ltd.

⁴Superconductivity Research Laboratory, ISTEC

1. はじめに

優れた磁場中臨界電流特性を有する希土類系高温超伝導 (REBa₂Cu₃O_y, RE=Rare Earth, 以後 RE123 と略記) 線材の開発研究が国内外において精力的に進められている。現在、600A/cm-w (@77K、自己磁場中) を超える臨界電流 (I_c) 値を有する RE123 線材が 600m 長にわたって作製されるに至っており、高性能長尺線材の開発は着実に進展している[1]。上記線材と同程度の性能を有する GdBa₂Cu₃O_y (GdBCO) 線材の強磁場 (>20T) 中の臨界電流特性を調べたところ、実用上重要な工学的臨界電流密度 (J_c , I_c を線材全体の断面積で除したもの) が、20K の温度であっても、PIT 法によって作製された Nb₃Sn 線材を凌駕していることが確認されている[2]。このような優れた磁場中特性が確認される一方で、更なる高 I_c 化への取り組みも進められている。これは、高 I_c 化が、強磁場発生マグネットを中心とした各種コイル応用における高特性化のみならず、小型化や動作温度の向上に伴う低コスト化といった超伝導応用機器の普及にも資するからである。

高 I_c 化の方法としては、超伝導層の厚膜化及び人工ピンニングセンターの導入が挙げられる。超伝導層の厚膜化は現在開発されている RE123 線材のようなコート線材で有効な手法である。すなわち、線材全体の断面積に占める超伝導領域の割合が少ない (1/100~1/50 程度) ことから、膜厚の増大に伴う J_c の低下が小さくて済む利点がある。しかしながら、パルスレーザ蒸着 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 法においては、膜厚の増大とともに a 軸配向粒や異相が増加し、 I_c 値が飽和することが知られている。この振る舞いは磁場中 I_c に対しても同様である。一方、人工ピンニングセンターの導入は、磁場中 I_c を直接向上させられることから、様々な手法や材料が提案されている。PLD 法においては、ターゲット材に不純物を添加する手法が、簡便で線材作製速度を含めたコストの面からも有利であることから、最も積極的に取り組まれている。添加する材料には BaMO₃ (BMO, M=Metal, Zr, Sn 等) が用いられている。BMO の中でも、近年、国際超電導産業技術研究センターにより発見され注目されているのが、

BaHfO₃ (BHO) である。BHO の特徴は、BaZrO₃ と異なり、磁場中 J_c が膜厚の増加に対してほとんど低下しない点にある。これにより、77K、3T での I_c 値 (角度に対する最小 I_c 値) としては世界最高レベルの 84.8A/cm-w を、超伝導層膜厚 2.9 μ m にて達成している[3]。

上記のように、BHO の導入及びその厚膜化により、磁場中の臨界電流特性が大幅に向上することが確認されているが、低温、強磁場領域においても有効であるかは今のところ明らかとなっていない。そこで、本研究では、新たな人工ピンニングセンター導入法として注目されている BHO を添加した GdBCO 線材の臨界電流特性を広範な温度、磁場、磁場印加角度に亘り実験により明らかとし、人工ピンニングセンターの有効性を検証する。

2. 実験

実験に用いた RE123 線材の超伝導層は、3.5mol% の BHO を添加した GdBCO ターゲットを用いて PLD 法にて作製されており、膜厚は 3.2 μ m である。基板には Ion-Beam Assisted Deposition (IBAD) 法による配向中間層が形成されたいわゆる IBAD 基板を用いている。77K、自己磁場での I_c 値は約 690A/cm-w であった。

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、長さ 500 μ m、幅 60 μ m 程度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、超伝導マグネット (20T-SM) を用いて印加しており、最大印加磁場は 17T 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。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

実験によって得られた E - J 特性から、電界基準 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 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.1 である。また、同図には比較用の参照データとして、人工ピンニングセンターを導入していない $2.5\mu\text{m}$ 厚の超伝導層を有する 600A 級 GdBCO 線材の特性[2]を白抜きシンボルにて示している。77K や 65K の液体窒素利用領域では、自己磁場近傍を除く広い磁場領域に亘る I_c 値の向上が見られるとともに、不可逆磁場も向上していることが確認できる。例えば、77K、3T では $90\text{A}/\text{cm-w}$ の I_c 値が得られており、これは人工ピン未導入線材の約 3 倍である。低温領域でも人工ピンの寄与と思われる I_c 値の向上が見られており、20K、17T では、人工ピン未導入線材の $370\text{A}/\text{cm-w}$ に対して $700\text{A}/\text{cm-w}$ の I_c 値が得られることが確認された。

Fig.2 に巨視的ピン力密度の温度、磁場依存性を示す。BHO の導入に伴い、ピンニング特性そのものが大きく向上しており、例えば、77K では、 $9\text{GN}/\text{m}^3$ を超える巨視的ピン力密度が得られている。巨視的ピン力密度の最大値の温度依存性について見てみると、ピークが確認される 77K から 50K のいずれの温度においても BHO

未導入線材の 1.8~1.9 倍程度となっており、また、20K ではピーク値まで観察されていないものの、得られている点でのピン力密度は約 1.5 倍を示している。これらの結果より、広い温度領域に亘ってピンニング特性が向上していることが明らかとなった。

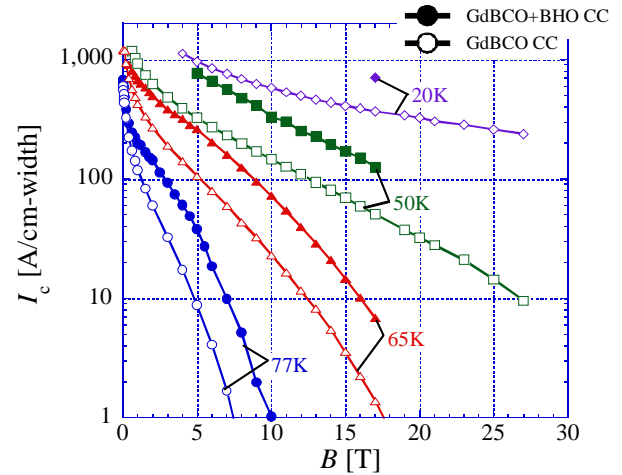


Fig.1 I_c - B - T characteristics of GdBCO coated conductors. Closed and opened symbols indicate the I_c for with artificial pinning centers and I_c for without one, respectively.

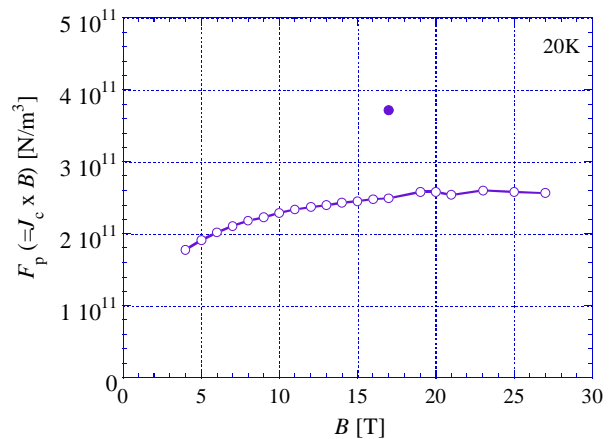
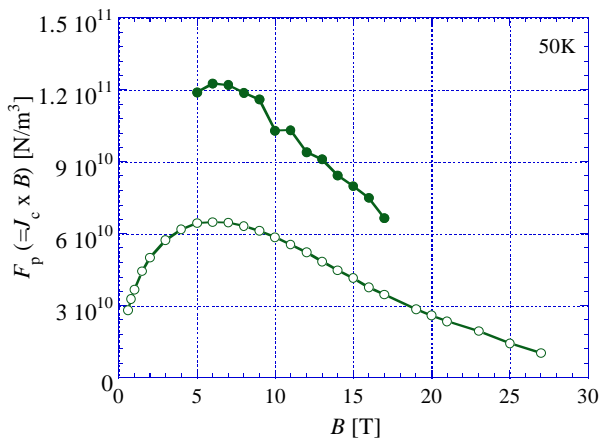
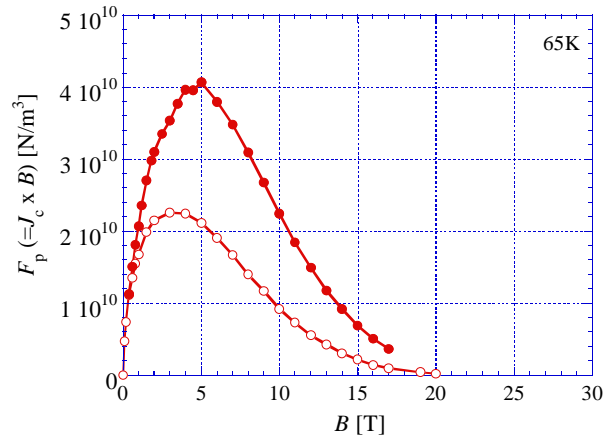
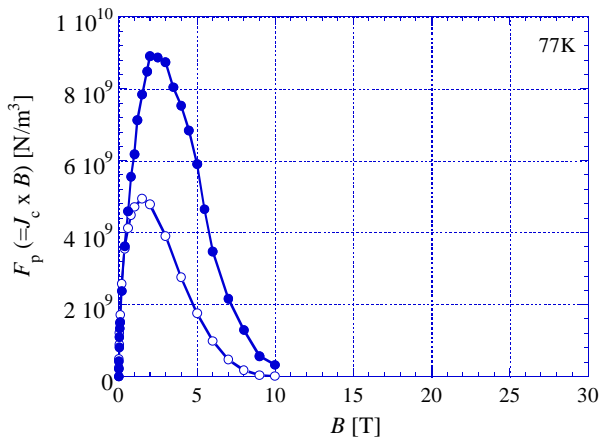


Fig. 2 Magnetic field dependence of global pinning force density, $F_p(=J_c \times B)$.

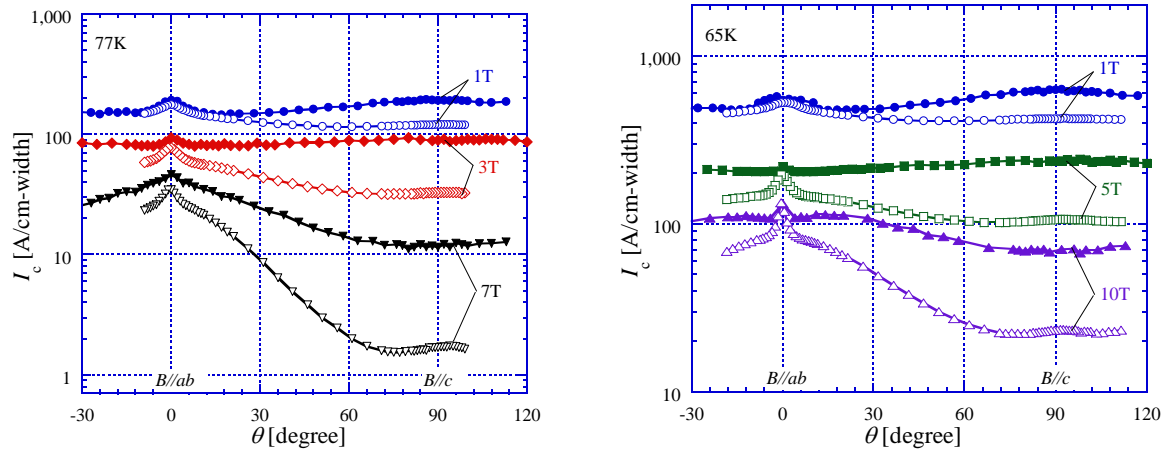


Fig. 3 I_c - θ - B characteristics of GdBCO coated conductors at 77K and 65K. Closed and opened symbols indicate the I_c for with artificial pinning centers and I_c for without one, respectively.

Table 1 Minimum I_c at 77K and 65K

	$I_{c-min}@77K$					$I_{c-min}@65K$		
	1T	3T	5T	7T	10T	1T	5T	10T
GdBCO+BHO	145A	80A	32A	11A	1A	475A	204A	67A
GdBCO	116A	32A	9A	2A	0.05A	410A	102A	22A

Table 2 Anisotropic ratio of I_c ($\cong I_{c-max}/I_{c-min}$) at 77K and 65K

	$I_{c-max}/I_{c-min}@77K$					$I_{c-max}/I_{c-min}@65K$		
	1T	3T	5T	7T	10T	1T	5T	10T
GdBCO+BHO	1.34	1.17	1.83	4.17	32.9	1.40	1.19	1.97
GdBCO	1.52	2.43	5.76	22.7	642	1.29	1.92	6.01

Fig.3 に 77K 及び 65K における I_c の角度依存性を示す。PLD 線材への BMO 添加では、一般に c 軸に強い相関を有するピンニングセンターが導入されることが知られており、 I_c の角度依存性においては、 c 軸方向に大きなピークを示す。しかしながら、BHO を導入した GdBCO 線材においては、 c 軸方向のみならず、幅広い角度領域に亘って I_c 値が上昇している。このことは、(1) 角度依存性における最小の I_c 値を底上げし、(2) I_c の異方性を低減させることに寄与することを意味している。角度依存性における I_c の最小値と、 I_c の異方性の比 (I_c の最大値と最小値の比) とをまとめた Table 1 及び Table 2 を見てみると、両者とも BHO の導入により大きく改善していることが分かる。特に基板面に平行方向の角度近傍 ($10^\circ \sim 20^\circ$) の I_c 値が向上している点は、同線材を超強磁場マグネットのインサートコイルとして用いる際に、重要である。今後は、低温、強磁場における I_c の角度依存性についても明らかとしていく予定である。

4. まとめ

本研究では、新たなピンニング材料である BaHfO₃ を添加した GdBa₂Cu₃O_y 線材の臨界電流特性を広い温度、磁場、磁場印加角度領域に亘って実験により明らかとした。その結果、導入された人工ピンニングセンターは、液体窒素温度領域から 20K の低温領域に至るまで有効に作用し、磁場中 I_c の向上が得られることが明らかとなった。線材の高 I_c 化は、強磁場発生マグネットを中心とした各種コイル応用における高性能化に強く資することから、同線材の更なる特性解明及び高 I_c 化が期待される。

参考文献

- [1] K. Kakimoto et al., *Physica C* 471 (2011) 929-931
- [2] 井上他, 東北大金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 22 年度年次報告(2011) 37-39
- [3] H. Tobita et al., presented at 24th ISS