

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

近年、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) 線材を用いた超伝導応用機器の開発研究が精力的に進められており、特に強磁場発生マグネット等のコイル応用機器への適用に対する期待が高い。一方、磁場中臨界電流 J_c を更に向上させるための取り組みも進められている。これは、高 J_c 化により、各種超伝導機器の小型化や動作温度の向上に伴うコスト低減が実現できるためである。

現在、磁場中 J_c を向上させるための取り組みとして、人工ピンニングセンターの導入が進められおり、様々な手法及び材料が提案されている。パルスレーザー蒸着 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 法においては、ターゲット材料に不純物を添加し、超伝導マトリクス形成と同時に人工ピンニングセンターを導入する手法が多く検討されている。これは、手法そのものが簡便であり、かつ線材の作製速度を含めたコストの面から実用化に適していると考えられるためである。ターゲットに添加する材料には、主に BaMO₃ (BMO, M=Metal, Zr, Sn 等) が用いられている。BMO の中でも、近年、特に注目されているのが、BaHfO₃ (BHO) である。BHO の特徴は、BaZrO₃ と異なり、磁場中の臨界電流密度 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 J_c 値 (角度に対する最小 J_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[1]。また、低温度領域でも人工ピンニングセンターの寄与と思われる磁場中 J_c の向上が確認されている点も BHO の特徴である[2]。これらの成果は、固定基板上に形成した RE123 超伝導膜において得られたもので、同様の人工ピンニングセンターの長尺線材への適用が期待されている。しかしながら、リール式搬送システムを通じての連続成膜が要求される長尺線材作製プロセスへの適用については、まだ十分に行われていない。本研究では、長尺線材作製プロセスにて作製された BHO 導入 RE123 線材の臨界電流特性の温度、磁場依存性について詳細な実験を行い、固定基板成膜で得られた短尺 RE123 線材の特性に対する再現性について調べ

た。また、長尺線材の長手方向に対して複数個所のサンプリングを行い、臨界電流特性の空間均一性についても調べた。

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 2.0 μ m である。基板は、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 基板で、同基板を Reel-to-Reel 方式で搬送させながら超伝導層の成膜を行っている。

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、マイクロブリッジを形成し、実験用の試料としている。なお、長尺線材の空間的な均一性を確認するため、10m 長の線材のうち 3m、6m、8m の 3 地点においてサンプリングを行っている。

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ており、その結果から電界基準 1 μ V/cm における J_c を求めている。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、超伝導マグネットを用いて印加している。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。

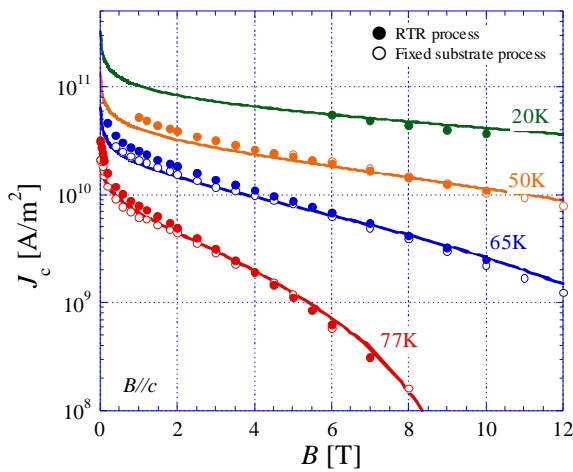
3. 実験結果及び考察

固定基板成膜で得られた BHO 導入 RE123 線材の磁場中 J_c 特性の再現性について調べた結果を Fig.1 に示す。Fig.1(a) に示す J_c の温度、磁場依存性 (●) を見てみると、固定基板成膜で得られた BHO 導入 RE123 線材の J_c - B - T 特性の実験結果 (○) 及び解析値 (実線) [2,3] に対して、低磁場側で若干の差が見られるものの、77K から 20K の幅広い温度領域にわたって J_c の磁場依存性が良く一致していることが確認できる。

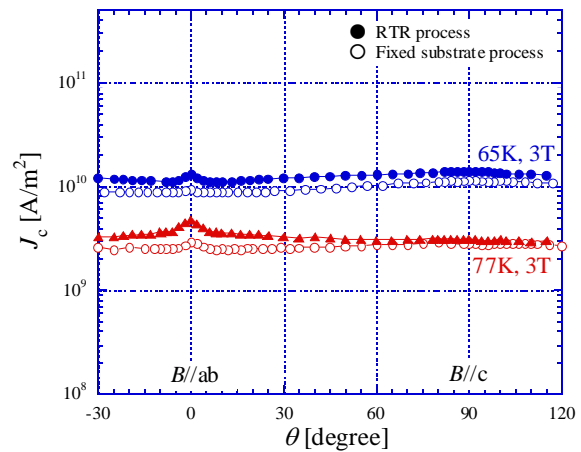
Fig.1(b)に、 J_c の磁場印加角度依存性を比較した結果を示す。人工ピンニングセンターの導入に伴い特徴的に観察される、 c 軸方向に対するブロードな J_c ピーク特性を良く再現していることが確認できる。以上の結果から、基板を連続的に搬送させつつ成膜する長尺線材作製プロセスにおいても、固定基板成膜で得られた短尺線材と同等の人工ピンニングセンターを導入することに成功していることが明らかとなった。

次に、長尺線材の空間的な均一性について調べた。その結果をFig.2に示す。まず、Fig.2(a)の J_c - B - T 特性について見てみると、3mと6mの特性は77Kから20Kまでの全ての実測領域でほぼ同一の J_c - B 特性を示していることが分かる。一方、8mの特性はそれらより高い磁場中 J_c 特性を示しているが、全ての温度、磁場領域に

わたって同程度(15%前後)の J_c 上昇であることから、温度、磁場に対する依存性そのものは良く再現していることが確認できる。 J_c の角度依存性について見てみると、Fig.2(b)に示すとおり、平行磁場近傍の比較的鋭いピーク特性と、垂直磁場方向のブロードなピーク特性といった全体的な振る舞いが良く一致していることが分かる。 J_c の絶対値に関しては、 J_c - B - T 特性同様、8mの特性が全体にわたって若干高くなっている。以上の結果は、マイクロスケールでの局所的な J_c 特性の分布が存在していることを示唆しているものの、温度、磁場、磁場印加角度依存性の全体的な振る舞いそのものは良く再現していることから、人工ピンニングセンターの導入効果については高い均一性が得られているものと考えられる。

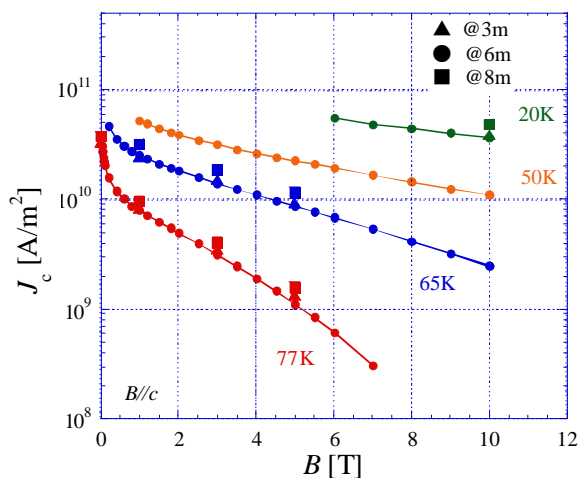


(a) J_c - B - T characteristics

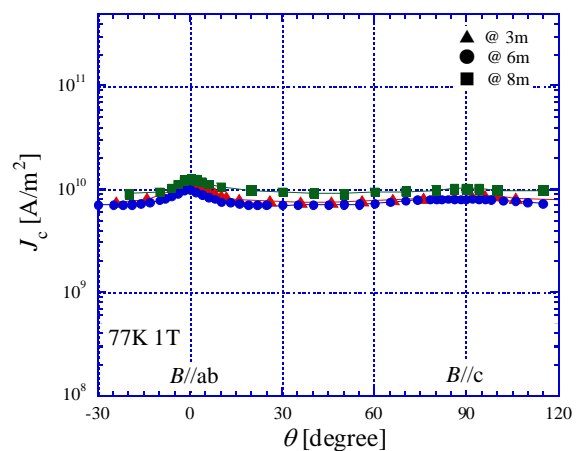


(b) J_c - θ characteristics

Fig. 1 J_c - B - T - θ characteristics of BHO doped RE123 CC fabricated by Reel-to-Reel process comparing with those fabricated by fixed substrate process



(a) J_c - B - T characteristics



(b) J_c - θ characteristics

Fig. 2 J_c - B - T - θ characteristics of 3 samples cut from same BHO doped RE123 CC fabricated by Reel-to-Reel process.

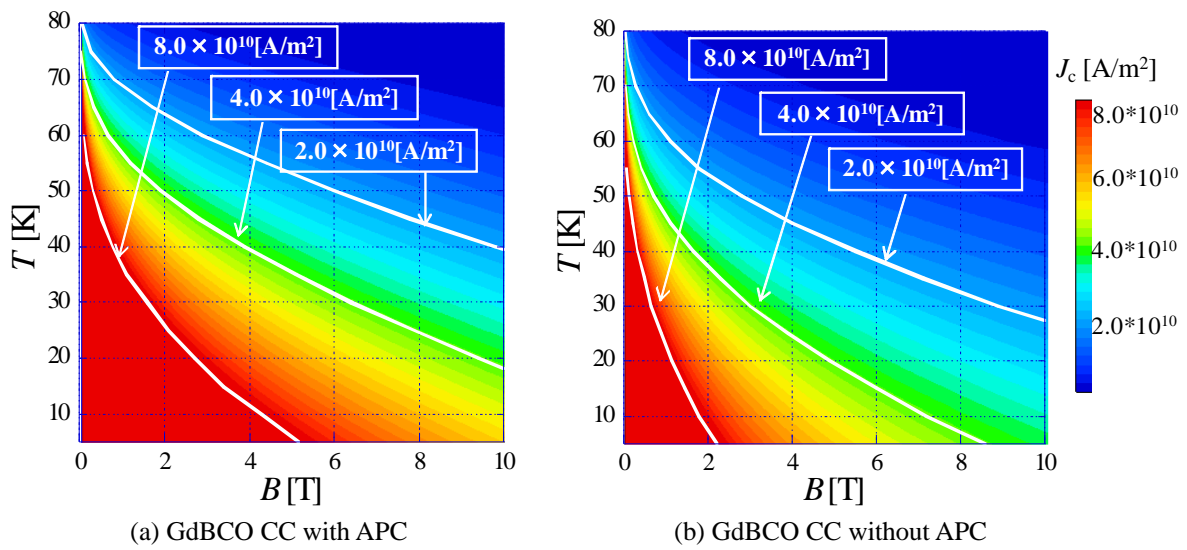


Fig. 3 Contour map of J_c in GdBCO coated conductors

最後に、人工ピンニングセンターの導入効果の可視化について検討を行った。Fig.3にBHO導入RE123線材及び人工ピンニングセンターを導入していないRE123線材[4]の、等 J_c マップを示す。両図とも、我々が提出している臨界電流密度の統計分布を考慮したパーコレーション転移モデル及び巨視的ピン力密度の温度スケール則等に基づき解析的に得たものである。両図の比較から、人工ピンニングセンターの導入に伴い、同一の J_c 値が得られる温度、磁場領域が広がっている様子が確認できる。このような J_c マップは、人工ピンニングセンターの導入効果を可視的に表すだけでなく、動作磁場や運転電流などを相互的に考慮した機器の設計にも有用である。

4. まとめ

長尺線材作製プロセスにて作製されたBHO導入RE123線材の臨界電流特性の、固定基板成膜で得られた短尺RE123線材の特性に対する再現性について調べたところ、広い温度領域にわたって磁場中 J_c 特性が良く再現していることが確認された。また、長尺線材の長手方向に対する臨界電流特性の空間均一性についても調べたところ、全体的な振る舞いが良く一致していることが明らかとなった。以上より、長尺線材作製プロセスにおいても、固定基板成膜で得られた短尺線材と同等の人工ピンニングセンターを長手方向にわたり均一に導入することに成功していることが明らかとなった。また、人工ピンニングセンターの導入効果の可視化として等 J_c マップを示し、その有用性を示した。

謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発(M-PACC)の一環として、ISTECを通じて、NEDOからの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費(24760235)の助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] H. Tobita et al., *SuST* **25** (2012) 062002
- [2] 井上他, 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23年度年次報告(2012) 32-34
- [3] M. Inoue et al, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **23** (2013) 8002304
- [4] 井上他, 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21年度年次報告(2010) 39-42