

## BaHf0\_3添加EuBa\_2Cu\_30\_<7- δ>, 高温超伝導線材の 磁場中臨界電流特性

井上, 昌睦  
九州大学大学院システム情報科学研究院

小野寺, 優太  
九州大学大学院システム情報科学研究院

今村, 和孝  
九州大学大学院システム情報科学研究院

鈴木, 匠  
九州大学大学院システム情報科学研究院

他

<https://doi.org/10.15017/1866704>

---

出版情報：九州大学低温センターだより. 11, pp.9-13, 2017-03. Kyushu University Low Temperature Center

バージョン：  
権利関係：

## BaHfO<sub>3</sub> 添加 EuBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 高温超伝導線材の磁場中臨界電流特性

井上 昌睦<sup>1,2</sup>, 小野寺 優太<sup>1</sup>, 今村 和孝<sup>1</sup>, 鈴木 匠<sup>1</sup>, 東川 甲平<sup>1</sup>,  
淡路 智<sup>3</sup>, 衣斐 顕<sup>4</sup>, 吉田 朋<sup>4</sup>, 和泉 輝郎<sup>4</sup>, 木須 隆暢<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院システム情報科学研究院

<sup>2</sup>九州大学 超伝導システム科学研究所センター

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>産業技術総合研究所

### 1. はじめに

優れた磁場中臨界電流密度 ( $J_c$ ) 特性を有する希土類系高温超伝導 (REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, RE=rare earth, REBCO と略) 線材が国内外で市販されるに至った近年では、同線材を用いたコイル化に関する技術開発が精力的に進められている。しかし、同線材を用いた超伝導マグネット応用の進展のためには、臨界電流 ( $I_c$ ) を線材断面積で除した工学的臨界電流密度 ( $J_E$ ) の更なる向上が求められている。磁場中  $J_E$  を向上させる方法としては、人工ピニングセンター (Artificial Pinning Center, APC) を導入し  $J_c$  を向上させる手法と、超伝導層を厚膜化させる手法とがあり、それぞれ精力的に取り組まれている。パルスレーザ蒸着 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 法による超伝導層の成膜においては、BaMO<sub>3</sub> (M=metal, BMO) を添加したターゲットを用いることにより、超伝導マトリクス内に BMO ナノロッドが形成され、人工ピニングセンターとして作用することが知られている。なかでも、BaHfO<sub>3</sub> (BHO) は、厚膜形成時にも磁場中の高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) を保持できることから、優れた実用性能を有する REBCO 線材の実現に有効な人工ピンとして期待されている[1]。また、BHO の導入効果を超伝導層の母材を変えて調べたところ、現在市販されている GdBCO よりも EuBCO の方が、厚膜化時の  $J_c$  の減少率が小さいとの報告がなされている[2]。以上より、BHO 人工ピニングセンターを導入した EuBCO 線材が、将来の実用線材として期待されているが、低温・強磁場中での人工ピニングセンターの効果については明らかとなっていない。

本研究は、超伝導層の膜厚を 3.3 μm まで厚くした BHO 導入 EuBCO 線材の電流輸送特性を広い温度、磁場、磁場印加角度に亘って系統的に測定し信頼性の高いデータを得ることにより、低温・強磁場中での人工ピニングセンターの効果を明らかとするとともに、申請者らが提案している物理モデル (パーコレーション転移モデル) によって強磁場中での電流輸送特性を解析的に表し、マグネット設計のための基礎を確立しようとするものである。

### 2. 実験

#### 2-1. 試料

IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition)-MgO 基板上に、PLD 法により EuBCO 超伝導層を形成した。その際、3.5 mol% の BHO を混入したターゲットを使用することにより、人工ピニングセンターの導入を図っている。超伝導層の膜厚は 3.3 μm であった。

同線材の電流輸送特性を広範な温度、磁場領域に亘って計測するため、長さ 1 cm 程度を切り出した後、フォトリソグラフィ法を用いたウェットエッキングプロセスにより幅約 70 μm のマイクロブリッジを形成した。マイ

クロプリッジ形成後の 77 K、自己磁場での  $J_c$  値は、 $2.3 \text{ MA/cm}^2$  であった。加工前の 1 cm 幅で得られている値とほぼ一致しており、加工による特性の劣化はないことを確認している。

本試料の磁場中電流輸送特性の性能評価のために、BHO 導入 GdBCO 線材ならびに市販相当の人工ピン未導入 GdBCO 線材[3,4]との比較を行った。それぞれの試料の諸元は Table 1 のとおりである。いずれも IBAD 基板上に PLD 法により超伝導層を成膜している。

Table 1 Sample specification

Superconducting layer	Amount of BHO	thickness	$J_c@77\text{K,s.f}$
$\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + \text{BaHfO}_3$	3.5mol%	3.3μm	$2.3\text{MA/cm}^2$
$\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + \text{BaHfO}_3$	3.5mol%	3.2μm	$2.1\text{MA/cm}^2$
$\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	—	2.5μm	$2.3\text{MA/cm}^2$

## 2-2. 実験方法

電界-電流密度 ( $E-J$ ) 特性を直流四端子法により測定した。その際、温度と磁場を系統的に変化させている。温度は、液体ヘリウムの気化ガスの流量と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。 $E-J$  特性測定時の温度変化は、 $\pm 0.1 \text{ K}$  以内であった。磁場は、超伝導マグネットおよびハイブリッドマグネットを用いて印加した。最大印加磁場は 25 T、磁場の印加方向は膜面に垂直方向である。

## 3. 実験結果及び考察

実験により得られた  $E-J$  特性から、 $1 \mu\text{V/cm}$  の電界基準で  $J_c$  を求めた。Fig.1 に、 $J_c$  の温度、磁場依存性を示す。同図より、BHO 人工ピンを導入した線材はいずれも、人工ピン未導入線材に比べて磁場中  $J_c$  が、大きく向上していることが分かる。また、BHO 導入線材間の比較では、EuBCO 線材の方が全ての温度領域で GdBCO 線材よりも高い磁場中  $J_c$  を有していることが確認できる。

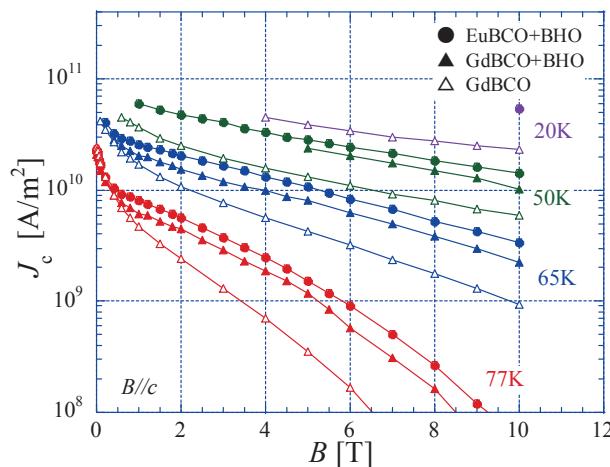


Fig. 1  $J_c$ - $B$ - $T$  characteristics for BHO doped EuBCO CC, BHO doped GdBCO CC and non-doped GdBCO

Fig.2に、BHO導入EuBCO線材の $J_c$ の温度、磁場依存性を示す。同図には、線材の実用性能を示す意図で縦軸の第2軸に1cm幅あたりの臨界電流( $I_c$ )値を記している。高い磁場中 $J_c$ を保持しつつ膜厚3.3μmを実現したことにより、臨界電流値そのものが大きく向上していることが確認できる。77Kでの目安として用いられる3Tでの $I_c$ 値は124A/cm-w、4.2Kでは25Tの強磁場中で1,500A/cm-wを超える $I_c$ 値が得られている。線材の高 $J_c$ 化は、すなわち線材の実用性能を示す工学的臨界電流密度( $J_E$ )の向上を意味している。本線材においては、ハステロイ基板からAg安定化層までの全体の厚みが110μm程度であるため、1,100A/cm-wが実用線材の目安となる10<sup>9</sup>A/m<sup>2</sup>の $J_E$ 値に相当することとなる。従って、例えば4.2K、15Tで10<sup>9</sup>A/m<sup>2</sup>の $J_E$ 値を示すNb<sub>3</sub>Snと比較すると、その特性を凌駕する性能がBHO導入EuBCO線材では20Kで実現できていることが分かる。一方、同線材の液体窒素温度域での特性を、4.2K、5Tで10<sup>9</sup>A/m<sup>2</sup>強の $J_E$ 値を示すNbTi線材と比較すると、65Kのサブクール窒素温度にて1/4程度にまで達していることが確認できる。基板の厚みを半分の50μmとすることでNbTi線材の $J_E$ の半分程度まで実現できることとなる。これらの結果は、同線材が従来線材と同等の性能を、液体ヘリウムフリー、あるいは液体窒素環境下において実現できるに至りつつあることを示すものである。

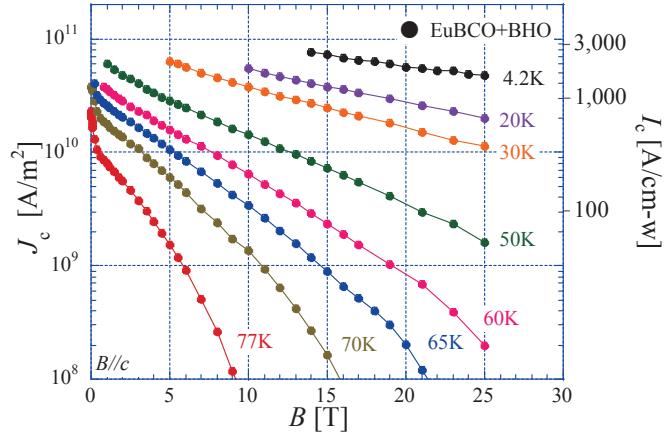


Fig. 2  $J_c(I_c)$ - $B$ - $T$  characteristics for BHO doped EuBCO CC.

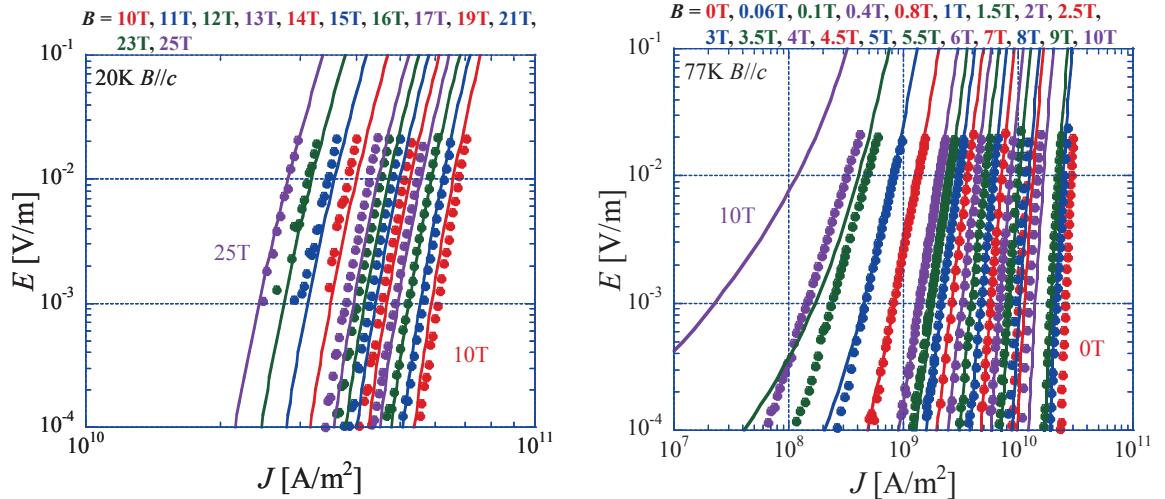


Fig. 3  $E$ - $J$  characteristics in various magnetic fields at 20K and 70K for BHO doped EuBCO CC.

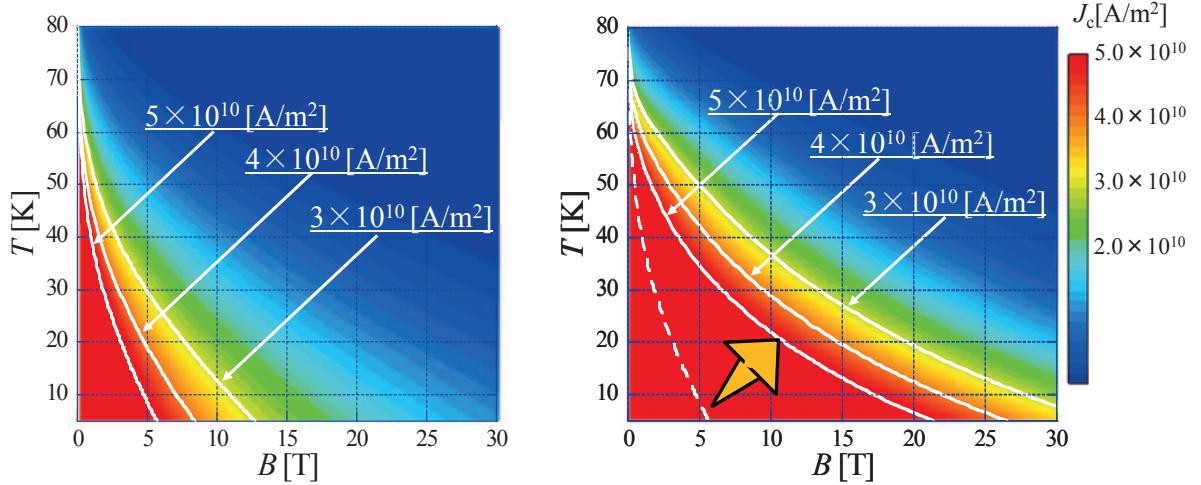


Fig. 4 Contour map of  $J_c$  in  $B$ - $T$  plane for a standard commercial GdBCO CC without APC and BHO doped EuBCO CC.

得られた実験結果を基に、 $E$ - $J$  特性の温度、磁場依存性の解析的記述について検討した。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[5,6]に基づき解析を行ったところ、今回実験により得られた広範な温度、磁場領域に亘り、当該モデルで良好記述できることが確認できた。例として、Fig. 3 に 20 K および 70 K における  $E$ - $J$  特性の磁場依存性の結果を示す。実験結果(シンボル)と解析解(実線)とが、2 枠以上の電界範囲に亘って良好一致していることが確認できる。また、Fig. 3 に示すように、本解析手法を用いることで、実験での計測が困難な強磁場中の  $E$ - $J$  特性を推定することも可能となる。

$E$ - $J$  特性を解析的に記述できることから、実験では変数として与えることが困難な  $J_c$  値をパラメータとした、等  $J_c$  マップを得ることができる。Fig. 4 に、現在市販されている人工ピン未導入 GdBCO 線材と、BHO 導入 EuBCO 線材の等  $J_c$  マップを示す。BHO 導入 EuBCO 線材の等  $J_c$  ラインが、より高温、強磁場側へと広がっていることが確認できる。等  $J_c$  マップは、線材の性能比較のみならず、機器設計における動作温度の向上や通電電流の負荷率の低減などを定量的に可視化できるものであり、使用目的に応じた温度、磁場の選択や巻線構造ならびに低温発生の最適化、運転特性の評価といった工学設計に有用である。

#### 4. まとめ

超伝導層の膜厚を 3.3  $\mu\text{m}$  まで向上させた BHO 人工ピンニングセンター導入 EuBCO 線材の臨界電流特性を広範な温度、磁場領域に亘り実験的に明らかとした。同線材は、これまで報告している高特性線材と比べて更に高い磁場中臨界電流を有していること、従来線材では 4.2K で得られる磁場中特性を、20K~30K で実現できるに至っていることを明らかとした。

また、我々の提案している電輸送特性の物理モデルを用いた  $E$ - $J$  特性の解析的記述について検討を行った。その結果、同手法により 4.2 K から 77 K の広範な温度領域に亘って  $E$ - $J$  特性を定量的に記述できることが明らかとなった。さらに、各種機器の設計に必要であるにも関わらず、実験パラメータとしての設定が困難な  $J_c$  値の温度、磁場依存性を定量的に把握するのに有効な等  $J_c$  マップを作成した。

以上の成果は、強磁場マグネットを含めた各種超伝導マグネットの開発に向けた基礎データとして有用である。

## 謝辞

本研究の一部は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省及び AMED の委託により実施するとともに、日本学術振興会の科研費(26420273, 16H02334)の助成を得て行ったものである。

## 参考文献

- [1] H. Tobita *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **25** (2012) 062002
- [2] T. Yoshida *et al.*, Physica C, **504** (2014) 42-46
- [3] M. Inoue *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **23** (2013) 8002304
- [4] M. Inoue *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **21** (2011) 3206-3209
- [5] T. Kiss *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **13** (2003) 2607-2610
- [6] M. Inoue *et al.*, Physica C, **392-396** (2003) 1078-1082