

# 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 on RE123 Coated Conductor

九大・シス情 井上 昌睦, 東川 甲平, 今村 和孝, 木須 隆暢  
東北大・金研 淡路 智, 渡辺 和雄  
ISTEC・超電導工研 衣斐 顕, 吉積 正晃, 和泉 輝郎

M. Inoue<sup>1</sup>, K. Higashikawa<sup>1</sup>, K. Imamura<sup>1</sup>, T. Kiss<sup>1</sup>, S. Awaji<sup>2</sup>, K. Watanabe<sup>2</sup>, A. Ibi<sup>3</sup>, M. Yoshizumi<sup>3</sup> and T. Izumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

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

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

### 1. はじめに

トリフルオロ酢酸塩 (Trifluoroacetates, TFA) を用いた有機金属成膜 (Metal-Organic Deposition) 法 (TFA-MOD 法) は, 高い配向性を有する高温超伝導膜が比較的容易に得られるとともに, 成膜プロセスの低コスト化が望めることから, 希土類系高温超伝導 ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , REBCO, RE=Rare Earth) 線材の作製プロセスとして最も期待されている手法のひとつである. 強磁場マグネット応用に向けた高い臨界電流 ( $I_c$ ) 値を有する線材の開発も進んでおり,  $2\mu\text{m}$  強の膜厚で  $735\text{A/cm-width}$  の  $I_c$  ( $77\text{K}$ , 自己磁場) 値を有する線材の作製に成功している[1]. また, 人工ピンニングセンターの導入による磁場中  $I_c$  の向上も実現しており, Y と Sm の混晶に Zr を添加した  $\text{Y}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}+\text{Zr}$  線材において,  $77\text{K}$ ,  $1\text{T}$  で  $45\text{A/cm-width}$  を超える  $I_c$  値が得られている[2]. これらはいずれも, 数 cm 程度の短尺線材での性能であるが, Reel-to-Reel プロセスによる長尺線材作製技術についても進展しており,  $200\text{m}$  長に亘って均一に  $300\text{A/cm-width}$  の  $I_c$  値を有する TFA-MOD 法 REBCO 線材が得られるに至っている. 本研究では, 同線材の臨界電流特性を広範な温度, 磁場領域に亘り実験により明らかとする.

### 2. 実験

実験に用いた REBCO 線材は, Ion-Beam Assisted Deposition (IBAD) 法により作製された配向基板上に, TFA-MOD 法により超伝導層を形成したもので, 長さ  $200\text{m}$  に亘り  $300\text{A/cm-width}$  ( $77\text{K}$ , 自己磁場) の  $I_c$  値を有している.

上記線材を  $1\text{cm}$  程度切り出した後, フォトリソグラフィを適用したウェットエッチングプロセスにより, 幅  $75\mu\text{m}$ , 長さ  $500\mu\text{m}$  のマイクロブリッジを形成し, 実験用の試料とした. なお, 超伝導層上に形成された Ag 安定化層をマイクロブリッジ上に残している.

実験は, 直流四端子法による電界-電流密度 ( $E$ - $J$ ) 測定を, 温度及び磁場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,  $17\text{T}$  以下の磁場領域には超伝導マグネット ( $20\text{T-SM}$ ) を,  $18\text{T}$  以上の磁場領域にはハイブリッドマグネット ( $28\text{T-HM}$ ) を用いて印加しており, 最大印加磁場は  $26.5\text{T}$  である. 臨界電流特性の異方性について確認するため, 磁場の印加方向は, 膜面に対して平行な方向 ( $B//ab$ ) と垂直な方向 ( $B//c$ ) とにした.

### 3. 実験結果及び考察

Fig.1 及び Fig.2 に, 平行磁場中及び垂直磁場中の  $E$ - $J$  特性の温度, 磁場依存性を示す.  $E$ - $J$  特性の両対数プロットが上に凸から下に凸に変化する, いわゆる磁束 Glass-Liquid 転移の振る舞いが垂直磁場中の  $65\text{K}$  及び  $77\text{K}$  で観測されているが, 平行磁場中では  $77\text{K}$ ,  $17\text{T}$  でも磁束 Glass 状態を保持していることが分かる.  $J_c$  値及び  $n$  値の温度, 磁場依存性について見てみると, 磁場の印加方向に依らず, 各温度において, 磁場の上昇に伴い, 系統的に減少していることが確認できる.

$E$ - $J$  特性から電界基準  $1\mu\text{V/cm}$  ( $=1\times 10^{-4}\text{V/m}$ ) の  $J_c$  値を求めた後,  $1\text{cm}$  幅あたりの  $I_c$  値に換算し, その温度, 磁場依存性としてまとめたのが Fig.3 である. 垂直磁場中の特性を見てみると, 比較的低い磁場において急激に  $I_c$  値が減少していることが分かる. 例えば,  $77\text{K}$ ,  $3\text{T}$  での  $I_c$  値と  $77\text{K}$ , 自己磁場の  $I_c$  値との比を求めると, 約  $1/41$  となっており, PLD 法にて作製された YBCO 線材にて観測されている  $1/20\sim 1/15$ [3,4] に比べて大きな減少率となっている. この傾向は我々の過去の報告や他のグループの報告[5,6]と良く一致しており, 作製プロセスの違いに伴う組成や組織の変化に起因していると考えられる.

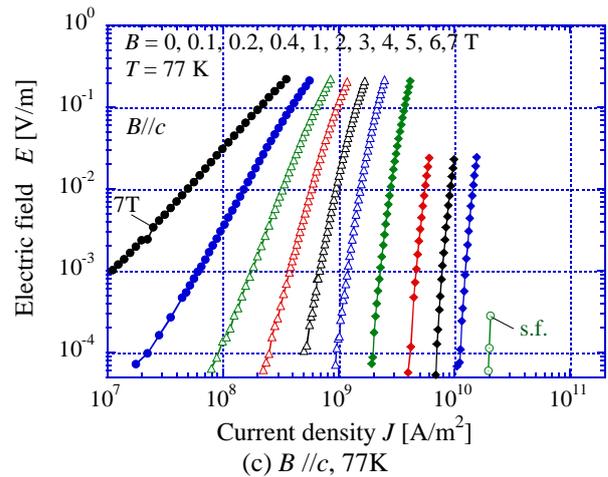
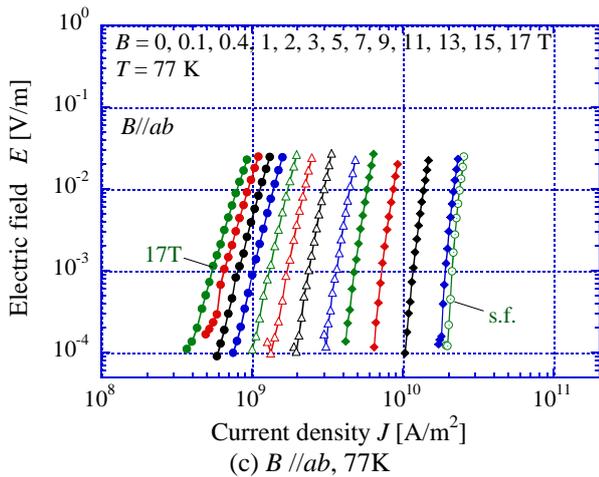
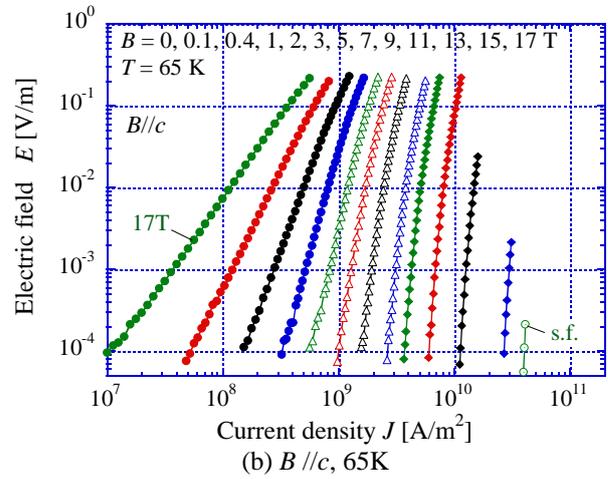
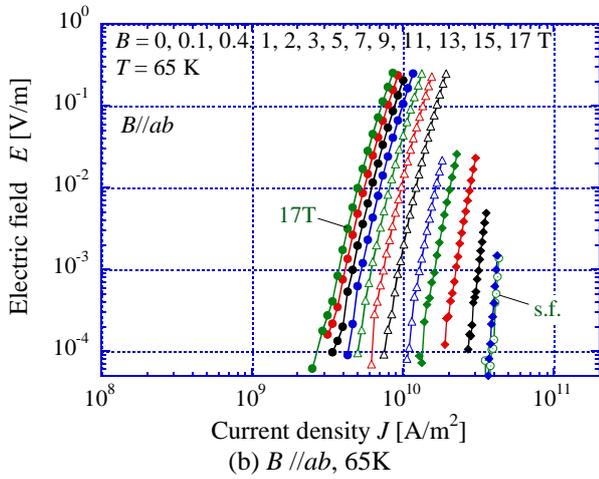
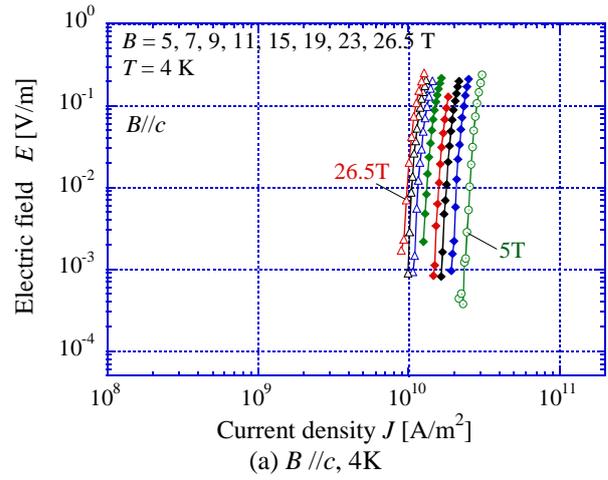
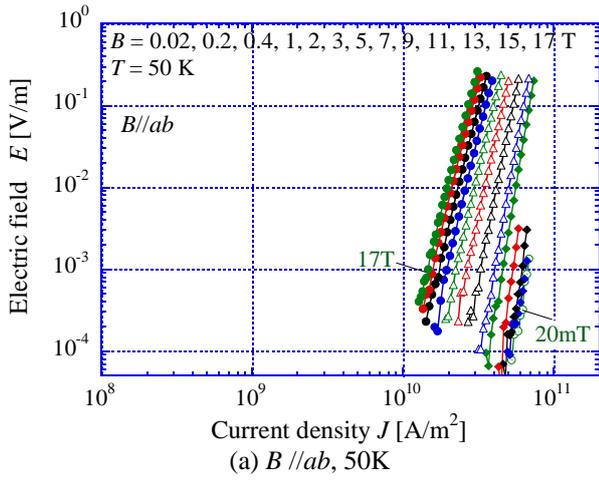


Fig.1 Temperature and magnetic field dependence of  $E$ - $J$  characteristics at (a) 50K, (b) 65K, (c) 77K. The magnetic fields are applied parallel to the  $ab$ -plane.

Fig.2 Temperature and magnetic field dependence of  $E$ - $J$  characteristics at (a) 4K, (b) 65K, (c) 77K. The magnetic fields are applied parallel to the  $c$ -axis.

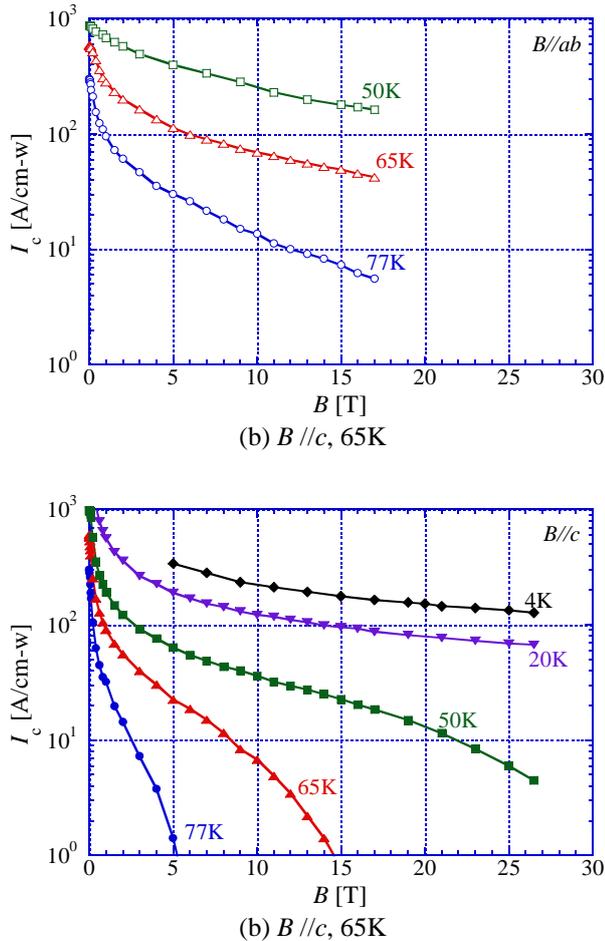


Fig.3  $I_c$ - $B$ - $T$  characteristics at (a)  $B//ab$  and (b)  $B//c$ .

次に、低温・強磁場中の特性について見てみると、垂直磁場中でも低温側では高い臨界電流特性を保持していることが分かる。例えば、4K では 26.5T もの強磁場で 100A/cm-w を超える  $I_c$  値が得られている。TFA-MOD 法による短尺線材では作製条件の最適化と厚膜化により、735A/cm-width の高  $I_c$  線材が得られていることから、同技術の長尺線材作製プロセスへの導入に伴う高  $I_c$  化が期待される。

平行磁場中と垂直磁場中の特性を比較すると、平行磁場中の  $I_c$  値が垂直磁場中の  $I_c$  値より常に高くなっている。これは人工ピンニングセンターを導入していない場合の典型的な振る舞いであり、過去の報告とも良く一致している[5]。Zr を添加して作製した  $Y_{1-x}Sm_xBa_2Cu_3O_y$  線材においては、プロセス条件を調整することにより  $BaZrO_3$  の微粒子が人工ピンニングセンターとして作用し、77K での  $J_c$  の異方性を大きく低減させるとともに、条件によっては垂直磁場中の  $I_c$  値が平行磁場中の  $I_c$  値を超えることが報告されている[2,7]。従って、これらの技術

を長尺線材作製プロセスへ導入するための技術開発が今後期待される。

#### 4. まとめ

本研究では、200m 長に亘り 300A/cm-width の  $I_c$  値を有する TFA-MOD 法 REBCO 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、短尺線材で得られていた特性をよく再現していることが確認できた。TFA-MOD 法 REBCO 線材では、短尺試料において、高均一・厚膜化による高  $I_c$  化や、人工ピンニングセンターの導入による磁場中  $I_c$  の向上といった高  $I_c$  化技術が進展していることから、今後これらの技術の導入に伴う高  $I_c$  長尺線材の開発が期待される。本研究の成果は、今後開発される高  $I_c$  長尺線材の性能評価の際の基礎データとしても有用である。

#### 謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、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 (20360143) の助成を得て行ったものである。

#### 参考文献

- [1] T. Izumi, et al., *Physica C* 463-465 (2007) 510-514
- [2] T. Izumi, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19 (2009) 3119-3122
- [3] 衣斐他, *低温工学* 40 (2005) 585-590
- [4] M. Inoue et al., *Physica C* 392-396 (2003) 1078-1082
- [5] 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 18 年度年次報告(2007)* 29-32
- [6] M. Rupich et al., *presented at Supercond. For Electric Systems 2006 Annual Peer Review* (2006)
- [7] M. Miura, et al., *Supercond. Sci. & Technol.* 23 (2010) 014013