

# 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 of RE123 Coated Conductor for High Magnetic Field Applications

九州大学 大学院システム情報科学研究院

東北大学 金属材料研究所

超電導工学研究所 名古屋高温超電導線材開発センター

超電導工学研究所 線材研究開発部

井上昌睦, 木須隆暢

淡路 智, 渡辺和雄

福島弘之, 衣斐 顕, 宮田成紀, 山田 穰

和泉輝郎, 塩原 融

M. Inoue<sup>A</sup>, T. Kiss<sup>A</sup>, S. Awaji<sup>B</sup>, K. Watanabe<sup>B</sup>,  
H. Fukushima<sup>C</sup>, A. Ibi<sup>C</sup>, S. Miyata<sup>C</sup>, Y. Yamada<sup>C</sup>, T. Izumi<sup>D</sup>, Y. Shiohara<sup>D</sup>

<sup>A</sup> Graduate School of ISEE, Kyushu University

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

<sup>C</sup> Nagoya Coated Conductor Center, Superconductivity Research Laboratory

<sup>D</sup> Division of Superconducting Tapes & Wires, Superconductivity Research Laboratory

### 1. はじめに

希土類系高温超伝導体を用いた次世代高温超伝導線材の研究開発プロジェクトが国内外にて進められている<sup>1,2)</sup>。現在、長尺線材に用いられているのは、イットリウム系 ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , YBCO) およびガドリウム系 ( $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , GdBCO) 高温超伝導体の 2 種類である。GdBCO は、YBCO に比べて成膜時の温度条件が厳しくないことから、PLD 法において厚膜化が比較的容易になるとともに、長時間に亘る系統安定性が求められる長尺線材作製プロセスにおいて有利となる可能性があるため長尺線材への適用が期待されている。既に、60m 長に亘る GdBCO 高温超伝導線材が得られており、同線材を用いたソレノイドコイルの試験も行われている<sup>3,4)</sup>。

本研究では、GdBCO 線材を用いた強磁場マグネットの設計のための基礎データとして重要となる電流輸送特性を、広い温度、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 GdBCO 線材の構成を表 1 に示す。基板は、Hastelloy 上に形成した  $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  バッファ層および  $\text{CeO}_2$  キャップ層にて構成されており、それぞれ、Ion-Beam Assisted Deposition (IBAD) 法および Pulsed Laser Deposition (PLD) 法にて作製されて

いる。同基板上に、Multi-plume-multi-turn PLD (MPMT-PLD) 法<sup>5)</sup>と呼ばれる手法にて膜厚  $1.2\mu\text{m}$  の GdBCO 膜を成膜した後、保護・安定化層である Ag を RF スパッタ法にて形成している。なお、全ての工程にて reel-to-reel と呼ばれる長尺線材作製プロセスを経ている。臨界電流  $I_c$  は、1cm 幅の状態では約  $350\text{A/cm}$  (77K, 自己磁場) であった。

強磁場中にて電流輸送特性の詳細な実験を行うため、線材を 1cm 程度切り出した後、長さ 1mm、幅  $70\mu\text{m}$  程度のマイクロブリッジ形状に加工し、実験用の試料とした。加工方法はフォトリソグラフィ法を用いたウェットエッチングである。また、GdBCO 膜そのものの電流輸送特性を広い電界領域に亘って得るために、保護・安定化層の Ag をエッチングにて薄くしている。

実験は、直流四端子法による電流 - 電圧測定を、温度、磁界、磁界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およ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。磁界は、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、最大印加磁界は 27T である。磁界印加角度は、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。

Material	Fabrication technique	Thickness
Ag	RF sputter	$\cong 20 \mu\text{m}$
GdBCO	MPMT-PLD	1.2 $\mu\text{m}$
CeO <sub>2</sub>	PLD	$\cong 0.4 \mu\text{m}$
Gd <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	IBAD	$\cong 0.8 \mu\text{m}$
Hastelloy™	-	100 $\mu\text{m}$

表 1 GdBCO 線材の構成

### 3. 実験結果および考察

図 1 に膜面に垂直な磁界を印加した際 ( $\theta=90^\circ$ ,  $B//c\text{-axis}$ ) の電界 - 電流密度 ( $E$ - $J$ ) 特性を, 図 2 に膜面に平行な磁界を印加した際 ( $\theta=0^\circ$ ,  $B//ab\text{-plane}$ ) の  $E$ - $J$  特性を, それぞれ示す. 3 桁以上の広範な電界範囲に亘って  $E$ - $J$  特性が得られており, これらは, 各種コイル応用機器の電圧状態における動的特性を検討する際の基礎データとして有用である.

電界基準  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  にて求めた  $J_c$  の, 温度, 磁場依存性をまとめたのが図 3 である. 図 3(a)および(b)は, それぞれ  $\theta=90^\circ$  および  $\theta=0^\circ$  での特性に対応している.  $77\text{K}$ , 自己磁場中の  $J_c$  は, 約  $4 \times 10^{10} \text{A}/\text{m}^2$  となっており, この値は,  $1\text{cm}$  幅の状態では得られている  $J_c$  値に比べて若干高いが, これは自己磁場の影響と考えられる. 線材の臨界電流特性が分布することがあるが, 同線材の複数の箇所においてマイクロブリッジ加工を施し  $77\text{K}$ , 自己磁場中の  $J_c$  を調べたところ, ほぼ同程度の値が得られたことから, 線材内の均一性は高いものと考えられる.

垂直磁場中の特性を見てみると,  $20\text{K}$  程度まで冷却することにより, 強磁場中においても  $1 \times 10^{10} \text{A}/\text{m}^2$  を超える  $J_c$  が得られている.  $20\text{K}$ ,  $27\text{T}$  にて得られている  $1.8 \times 10^{10} \text{A}/\text{m}^2$  の  $J_c$  値は,  $1\text{cm}$  幅線材の  $I_c$  に換算すると  $210\text{A}$  程度に相当する.

一方, 平行磁場中においては, 液体窒素を利用可能な温度でも強磁場中にて比較的高い  $J_c$  特性が得られており,  $65\text{K}$ ,  $27\text{T}$  での  $J_c$  値は,  $6 \times 10^9 \text{A}/\text{m}^2$  を超えている.  $40\text{K}$  では,  $27\text{T}$  で約  $6 \times 10^{10} \text{A}/\text{m}^2$  の  $J_c$  値が得られており, これは  $1\text{cm}$  幅線材の  $I_c$  に換算すると  $720\text{A}$  に相当する.

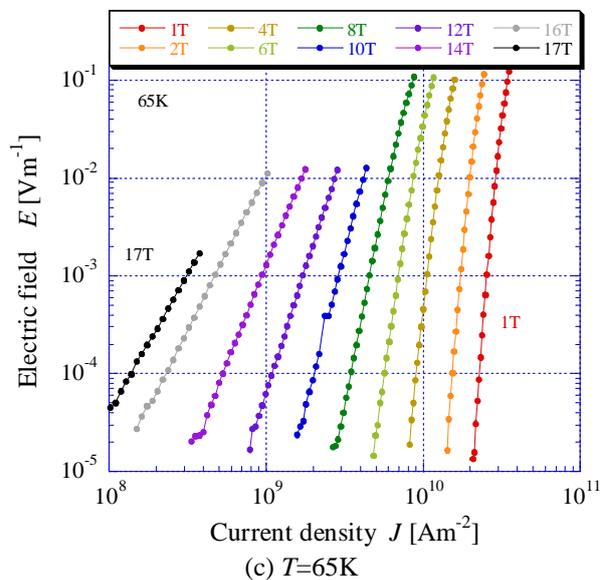
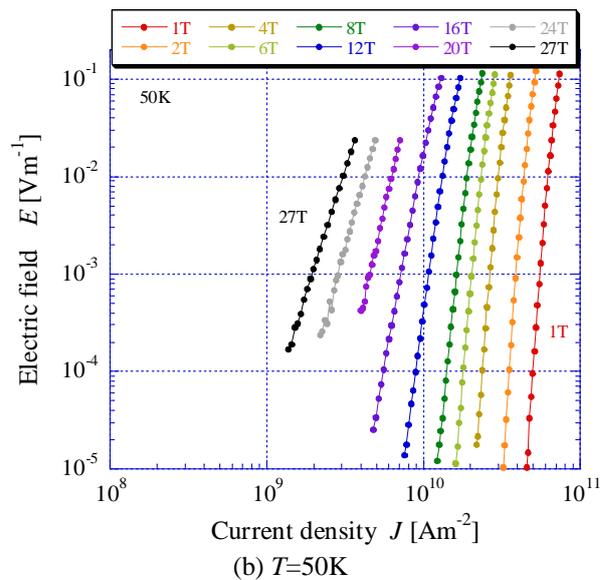
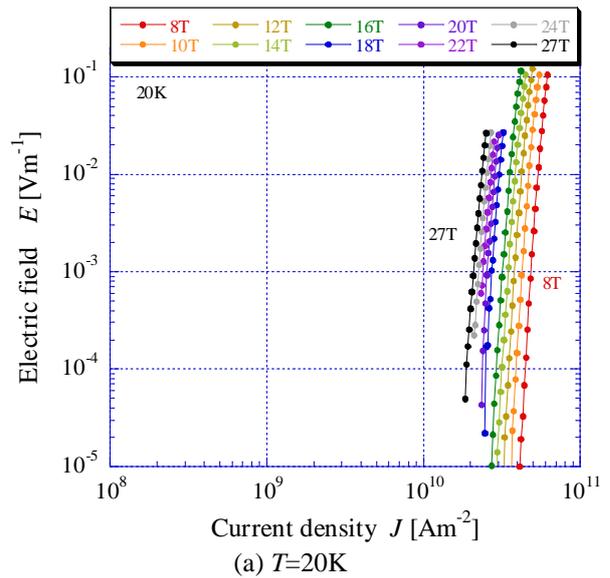


図 1  $E$ - $J$  特性の磁界依存性 ( $\theta=90^\circ$ ,  $B//c$ )

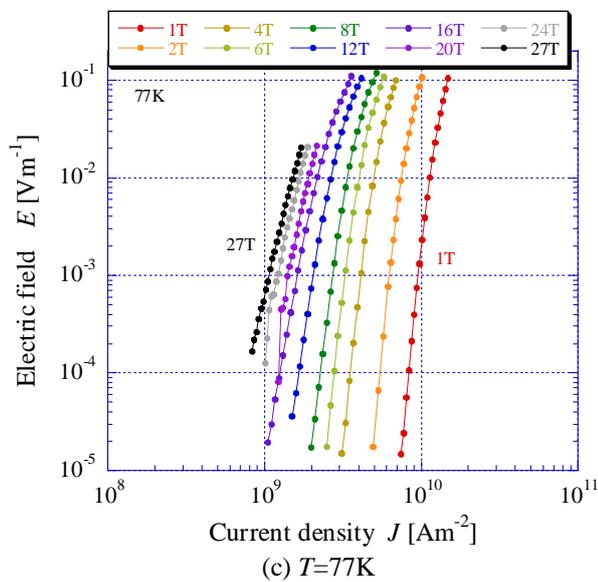
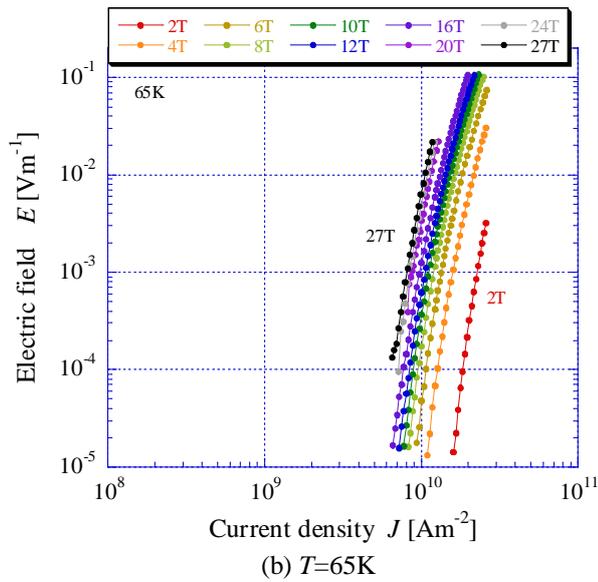
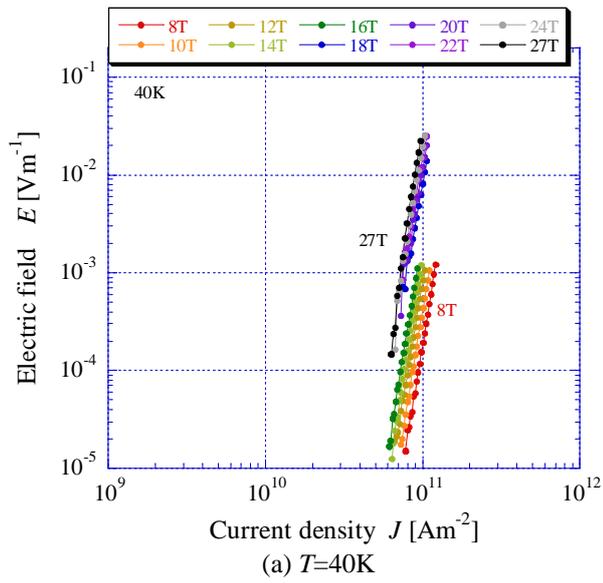


図2  $E$ - $J$ 特性の磁界依存性 ( $\theta=0^\circ$ ,  $B//ab$ )

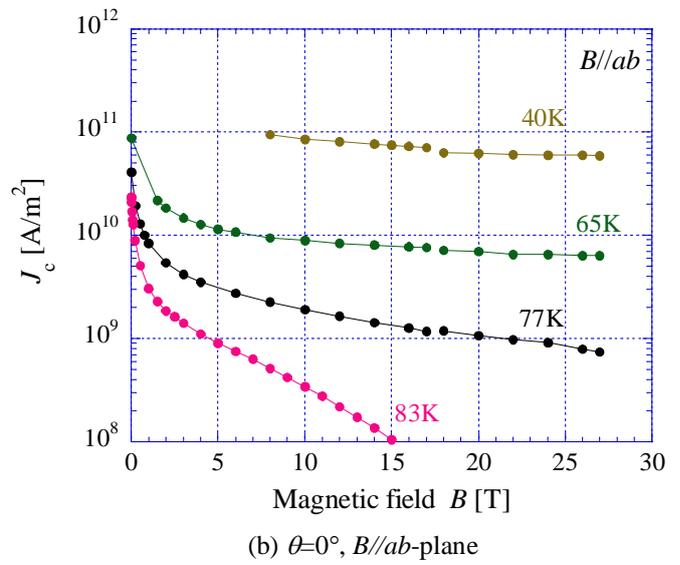
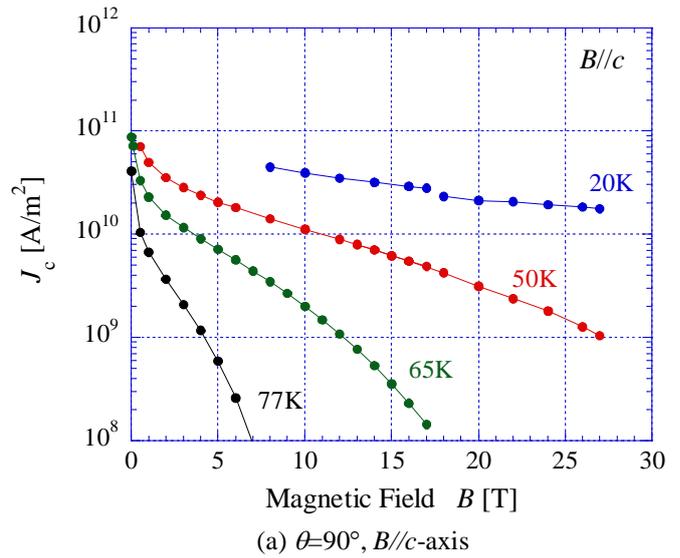


図3  $J_c$ - $B$ - $T$ 特性

図4に  $J_c$ の角度依存性を示す．平行磁場 ( $\theta=0^\circ$ ) にて最大ピークを示す典型的な特性が得られているが、それほど急峻なピークとはなっていないことが分かる．垂直磁界方向のピーク特性も存在しているものの顕著には観測されていない．以前報告したYBCO線材<sup>6)</sup>と比較すると、ランダムポイントピンが支配的な $\theta$ -数度 $\sim 80^\circ$ 程度までの角度領域の  $J_c$ 特性が高くなっている．また、図4(a)においては、 $12^\circ$ 前後で一旦  $J_c$ が上昇する振る舞いも観測されている．このことから、本線材においては、ランダムポイントピンが相対的に強く働いているものと考えられる．

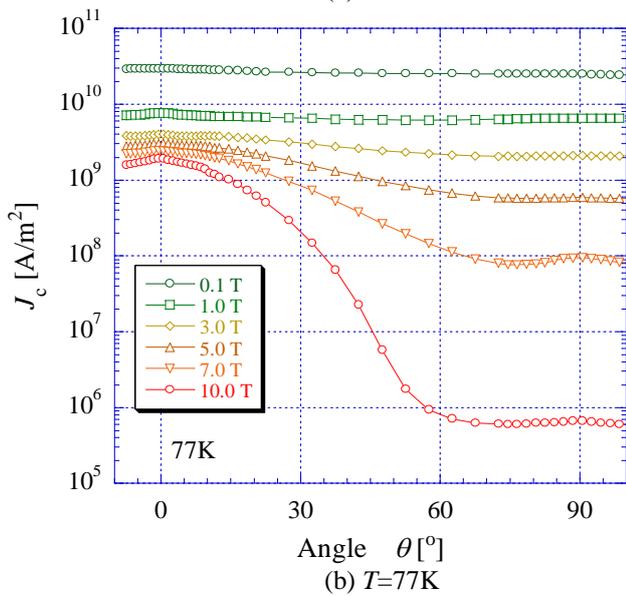
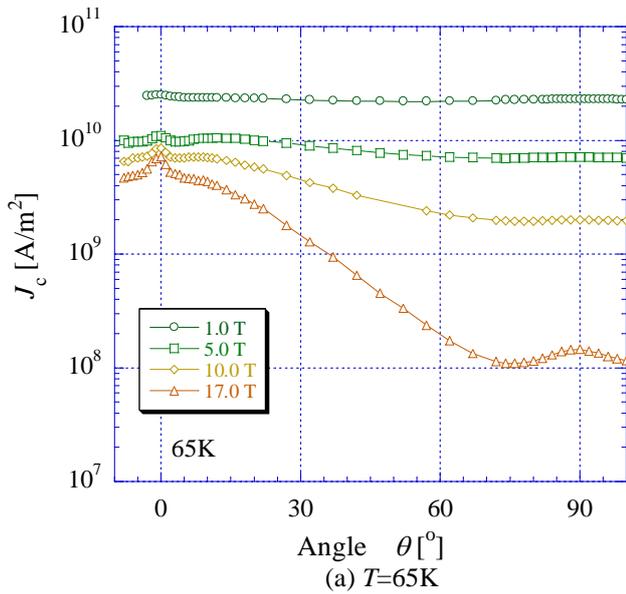


図4  $J_c$ - $\theta$ 特性

#### 4. まとめ

本研究では, reel-to-reel 法にて作製された GdBCO 線材の電流輸送特性を, 広範な温度, 磁界, 磁界印加角度領域に亘って実験により調べた. その結果, 平行磁場中では, 40K, 27T の磁場中で約  $6 \times 10^{10} \text{A/m}^2$  の  $J_c$  が得られることが明らかとなった. また, 垂直磁場中でも 20K 程度まで冷却することにより, 27T で  $1.8 \times 10^{10} \text{A/m}^2$  の  $J_c$  が得られている. これらの実験結果は, 同線材を用いた強磁場マグネット等の要素設計や試験のための基礎データとして有用である.

#### 参考文献

- 1) V. Selvamanickam et al., I Physica C **463** (2007) 482
- 2) H. Fuji et al., Physica C **463** (2007) 751
- 3) Y. Yamada et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 3371
- 4) H. Fukushima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 501
- 5) 衣斐顕 他, 低温工学 **40**, (2005) 585
- 6) 井上昌睦 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 16 年度年次報告書 (2005) 20