

人工ピンを導入した PLD-Gd123 コート線材における低温 J_c 特性 J_c property of PLD-Gd123 coated conductors with APC at low temperature

東北大学・金研
 ISTEK-SRL

鈴木 匠¹, 淡路 智¹, 渡辺 和雄¹,
 吉積 正晃², 衣斐 顕², 和泉 輝郎², 塩原 融²

T. Suzuki¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, M. Yoshizumi², A. Ibi², T. Izumi², Y. Shiohara²

¹Institute for Materials Research, Tohoku University

²Superconductivity Research Laboratory, International Superconductivity Technology Center

1. はじめに

希土類高温酸化物超伝導体 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE123, RE は Y を含む希土類元素)) のテープ線材は強磁場中で高い臨界電流密度特性 J_c を示すことや、機械特性に優れた基板を用いていることなどから、低温強磁場応用への適用も期待されている。しかし、一方で依然大きな異方性の克服が重要な問題の一つとして認識され、磁場を c 軸方向に印加した時の低い磁場中 J_c を向上させる c 軸相関ピンとしての人工ピンの導入などがなされ一定の成功を収めている。 c 軸相関ピンとは、RE123 の c 軸と平行方向に揃った柱状の磁束ピンニングセンターのことであり、ランダムに分散する欠陥や析出物をランダムピンと呼び区別される。特に磁束線と c 軸相関ピンの方向が揃った場合には、非常に強く働くことから、高い J_c が得られる。しかし、マグネット応用に利用される低温での c 軸相関ピンのデータは、高い J_c のため測定が非常に難しいことからほとんどなく、低温強磁場の人工ピンを導入した試料の J_c 特性は、その応用が期待されながらほとんど理解されていない。また、人工ピンのサイズが 10nm 程度に対し、低温では面内方向で数 nm、面直方向で 1nm 以下のコヒーレンス長により高温とは異なるピンニング状態が現れると予想できる。

本研究では、 c 軸相関ピンとして働く人工ピンの BaZrO_3 (BZO) ナノロッドを導入した長尺 Gd123 テープ線材における低温でのピンニング機構を解明することを目的として、臨界電流密度の低温・強磁場特性の評価を行った。

2. 試料緒元および実験方法

試料線材の緒元を Table 1 に示す。PLD(Pulse Laser Deposition)法によって作製した Gd123 テープ線材であり、基板は IBAD(Ion-Beam Assisted Deposition)法により作製された MgO バッファ層を持つ Hastelloy 基板である。また、最表面には保護層として 10 μm の Ag を用いた。この試料に対して、フォトリソグラフィ及びウェットエッチング技術を用いて、幅 約 100 μm 、長さ 約 1 mm のブリッジ形状に加工した。

測定は四端子法を用いて臨界電流密度を通電法にて測定した。試料温度は、ヘリウムガスフローと試料ホルダー上のヒーターにより、精密にコントロールし、臨界電流決定の電界基準は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

3. 実験結果と考察

3-1 臨界電流密度の磁場印加角度依存性

Fig.1 に人工ピンとして BaZrO_3 (BZO) を 5% 添加した PLD-Gd123 コート線材の 40 K における臨界電流密度 J_c の磁場印加角度依存性を示す。 J_c は 0、90° 方向にピークを持つ。90° ($B \perp c$) 方向のピークは超伝導体の本質的に持つ層状構造によるイントリンジックピンの ab 面相関ピンによるピークである。低磁場では $\theta = 0^\circ$ ($B \parallel c$) で c 軸相関ピンに起因したピークが存在するが、高磁場ではピークが確認できなかった。この振る舞いは液体窒素温度等の高温での振る舞いと定性的に一致している。

Table 1 Specification of Gd123 coated conductor with APC

| | Material | Thickness |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| Stabilizer | Ag | 10 μm |
| Superconducting layer | PLD-Gd123 | 1.2 μm |
| Buffer | CeO ₂ | 0.5 μm |
| | LaMnO ₃ | 19 nm |
| | IBAD-MgO | 4.0 nm |
| | Gd-Zr-O | 110 nm |
| Substrate | Hastelloy | 100 μm |

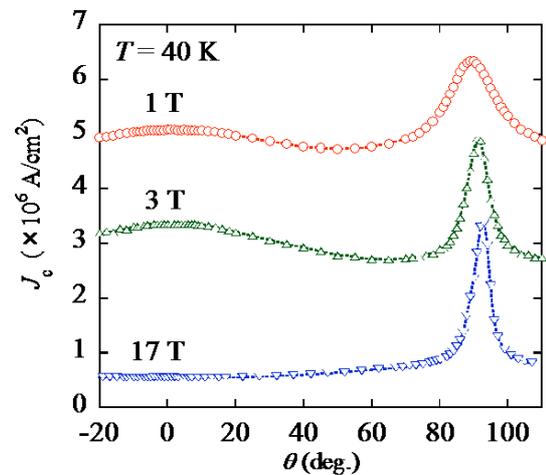


Fig.1 Magnetic field angle dependence of J_c in a PLD-Gd123 coated conductors with APC at 40.0 K.

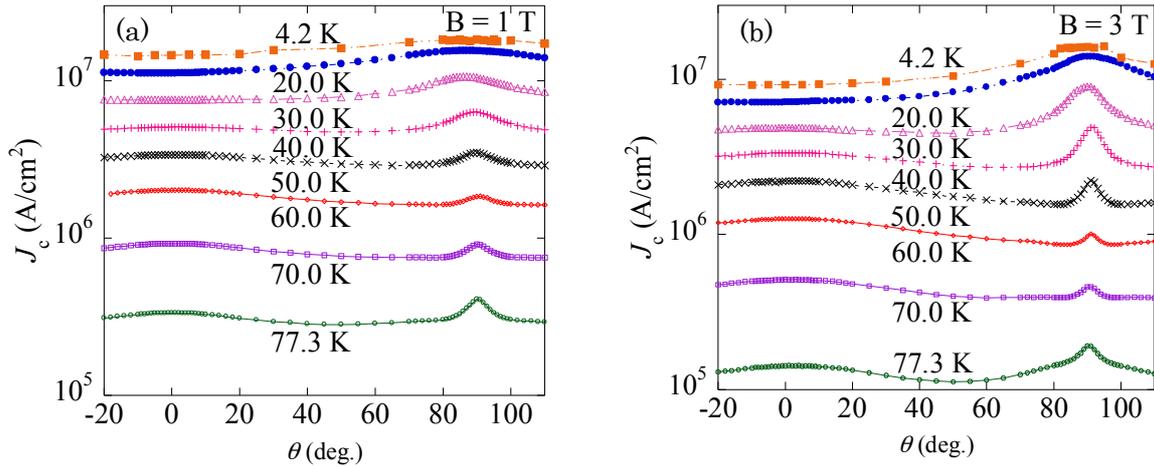


Fig.2 Magnetic field angle dependence of J_c in a PLD-Gd123 coated conductors with APC at 4.2-77.3 K. (a) $B = 1$ T (b) $B = 3$ T

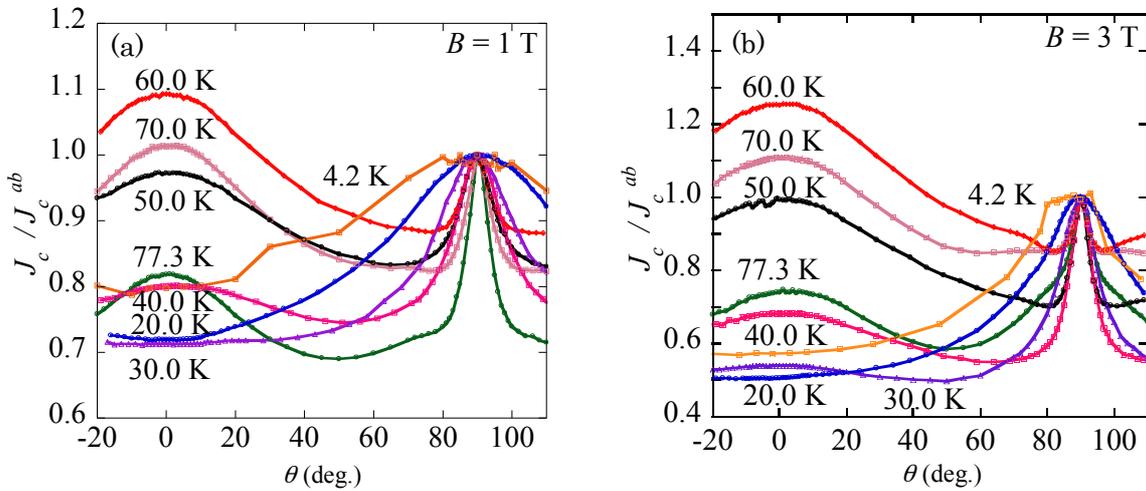


Fig.3 Normalized magnetic field angle dependence of J_c in a PLD-Gd123 coated conductors with APC at 4.2-77.3 K. (a) $B = 1$ T (b) $B = 3$ T

Fig.2に4.2-77.3 Kにおける1 Tと3 Tの J_c の磁場印加角度依存性を示す。温度の低下に伴って J_c はすべての角度で向上するが 0° 方向のピークは低温になるにつれて徐々に小さくなっている。詳細に比較するために 90° の J_c の値で規格化した J_c の角度依存性をFig.3に示す。高温領域では、人工ピンに起因した大きなピークが 0° 方向に現れているが、60 K以下で減少をはじめ、20 K以下では消失している。 $T_c = 90$ Kの場合面内方向の磁束ピンニングに寄与するコヒーレンス長 2ξ は60 K程度で7 nmとなり、BZOの直径7nm[1]とほぼ一致する。したがって、コヒーレンス長とピンニングセンターのサイズが強く関係しており、コヒーレンス長が短くなる低温では高温とは大きく異なることが示唆された。

3-2 臨界電流密度の磁場依存性

Fig.4に20, 40 Kにおける J_c の磁場依存性を示す。 $B \perp c$ 軸方向の J_c は、人工ピンの有無にかかわらず、ほとんど磁場に依存しない。しかし、 $B // c$ 軸方向の J_c は人工ピンを導入することによりその磁場依存性が大きく

なっている。次にこの変化率を議論するために、近年ナノロッド導入薄膜においてしばしば議論される α 値について考える。 α 値とは低磁場領域の J_c の磁場依存性をあらわす指数パラメータであり、 $J_c(B) \propto B^\alpha$ で与えられる。 α 値を決定するためにFig.5に両対数グラフプロットにした J_c の磁場依存性を示す。

人工ピンなし試料の場合は10 T近傍以下の広い範囲でほぼ直線となっており、その傾きから $\alpha = -0.56$ の値が得られる。一方で、人工ピン入り試料では直線部分が少ないが、数 T以下の低磁場で α を決めると約-0.47となる。 α 値が小さいので磁場依存性が小さいということになり、低磁場では人工ピン入りの試料の方が磁場依存性が小さくなる。しかし、この直線からずれる磁場が人工ピンの有無で大きく変化しており、人工ピン入りの試料のマッチング磁場 $B = 3-5$ T程度の磁場で直線からずれるのに対し人工ピンなしの試料では10 T程度まで直線にフィッティングできている。この結果は人工ピン入りの試料ではマッチング磁場以上で急激にピン力が減少することを示唆している。

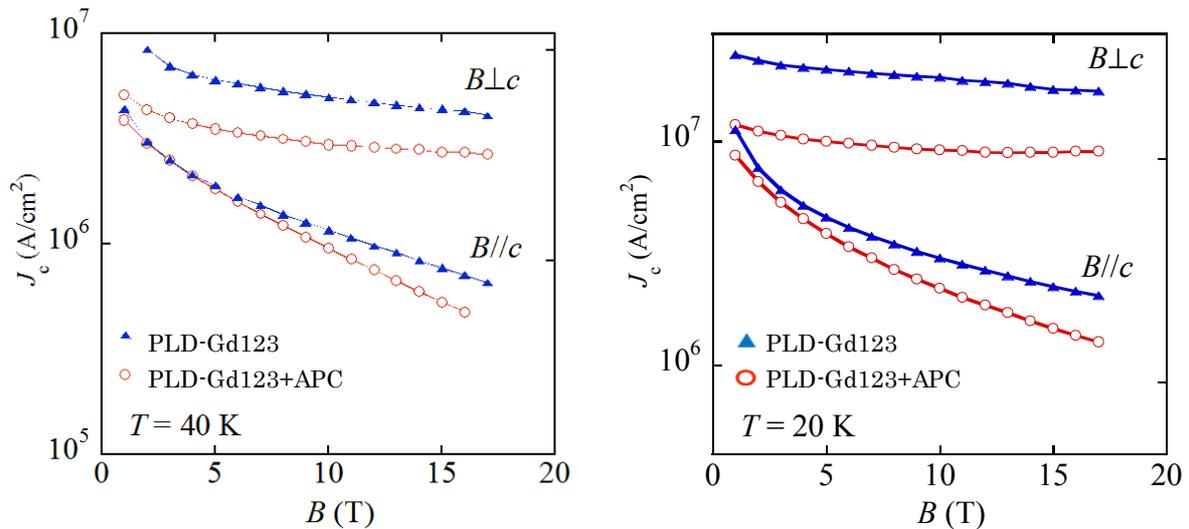


Fig.4 Magnetic field dependence of J_c at 40 K and 20 K for $B//c$ and $B \perp c$.

3-3 臨界電流密度の異方性

Fig.6に、 J_c の異方性 J_c^{ab}/J_c^c の温度依存性を示す。 J_c^{ab}/J_c^c は温度の減少と共に一旦急激に減少し最小となった後、さらに低温では増加する。この振る舞いは低温でイントリンジックピンによるピン力が増大するためと理解されている。人工ピンの有無で比較すると、ナノロッドの導入により、 J_c の異方性が低温でも減少していることが分かる。これらの結果から、低温ではナノロッドによりピン力が角度依存性には現れないものの、 J_c にはわずかに効いていると考えられる。すなわち、ナノロッドがブロードに効いていると考える。

4. まとめ

PLD法によって作製したBZOのナノロッドを導入したGd123コート線材に対し、臨界電流密度特性を4.2 Kの低温まで測定した。その結果、 $B//c$ 軸方向のナノロッドに起因したピークは60 Kで最大となり、20 K以下で消失した。また、低温では人工ピン入りの試料は人工ピンなしの試料に比べて磁場依存性が大きくなった。しかし、 J_c の異方性は低温でも減少していることから、ナノロッドが低温でも臨界電流密度特性に影響を与えると共にコヒーレンス長が短くなる低温では高温とは大きく異なる磁束ピンニング状態になることが示唆された。

5. 謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

[1] M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, S. Ito, E. Aoyagi, H. Kai, M. Mukaida, R. Kita: Applied Physics Express 2 (2009) 073001

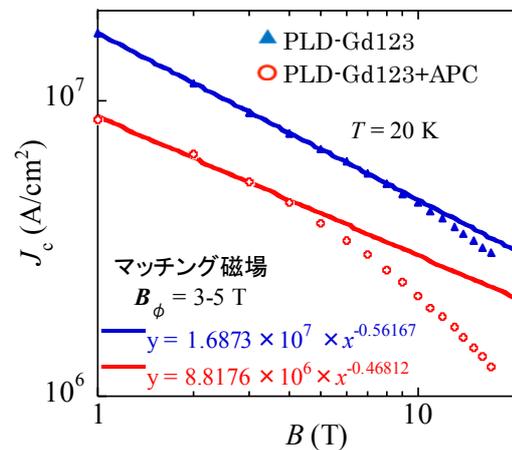


Fig.5 Double logarithmic plot of magnetic field dependence of J_c at 20 K for $B//c$

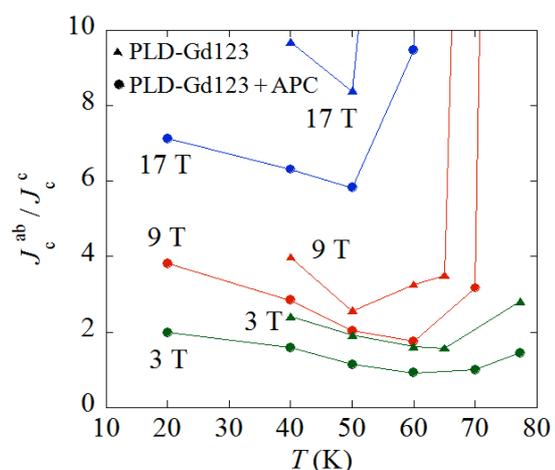


Fig.6 Temperature dependence of the J_c anisotropy, J_c^{ab}/J_c^c , at 3 T, 9 T and 17 T.