

MOCVD-YBCO コート線材の J_c 特性

J_c Properties of MOCVD-YBCO coated conductors

東北大・金研 石原 亮輔, 難波 雅史, 淡路 智, 渡辺 和雄
 中部電力(株) 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫

R. Ishihara¹, M. Namba¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, K. Shikimachi², N. Hirano² and S. Nagaya²
¹ Institute for Materials Research, Tohoku University
² Chubu Electric Power Co. Inc

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO, RE:Y, 希土類)コート線材 (coated conductor)は高い磁場中臨界電流特性に加え、優れた機械特性を有するため、超伝導マグネットなどの強磁場下での応用が期待されている[1]。一方、REBCO は結晶構造に依存した異方性があるため磁場の印加方向によって臨界電流特性が大きく異なることが問題となっている[2]。このため REBCO 線材における強磁場臨界電流特性の異方性改善のために研究は重要である。さらに、これらの REBCO 線材のマグネット応用のためには低温の臨界電流密度特性の評価が必要であるが、低温の臨界電流密度特性の評価には発熱が伴い困難であることから十分なデータが少ないために、理解が不十分である。

本研究では中部電力株式会社より提供されたMOCVD-YBCO 長尺コート線材の強磁場臨界電流密度(J_c)特性を4.2 Kから77.3 Kの温度領域にわたって調べた。

2. 実験方法

試料は CeO₂/IBAD-Z + IBAD-GZO/Hastelloy 基板上に、MOCVD法によりYBCO薄膜を成膜し、その上に保護層として Ag を成膜した長尺コート線材である[3]。臨界温度 T_c は 90.6 K である。この長尺線材を 10 mm × 10 mm に切り出し、ブリッジ形状に加工した後、直流4端子法を用い、 J_c の温度、磁場、磁場印加角度依存性を測定した。温度範囲は4.2 K~77.3 K、磁場範囲は0~17 Tである。また、4.2 K、c軸と垂直方向($B \perp c$)の J_c の磁場依存性は発熱の問題から、パルス電流を用いて J_c を測定した。実験は東北大・金研 強磁場センターの高均一 20T-SM(Oxford 社製)を用いて行った。試料温度はヘリウムガスフローによって調整した。磁場印加角度は c 軸と平行方向($B // c$)をゼロ度として定義した。 J_c は電界基準 $E = 1 \mu\text{V/cm}$ で決定した。

3. 実験結果

3-1. J_c の磁場依存性

Fig.1 に $B // c$ 方向と $B \perp c$ 方向の J_c の磁場依存性を示す。この線材の 77.3 K、自己磁場下での J_c は 1.14 MA/cm² である。また、4.2 K、17 Tにおいて J_c は $B // c$ では 1.8 MA/cm²、 $B \perp c$ では 10.8 MA/cm² になる。70 K 以上では $B \perp c$ 方向に比べると、 $B // c$ 方向において磁場の増加に伴い、 J_c がより急激に減少している。これは、高温領域では $B // c$ の不可逆磁場が小さいために不可

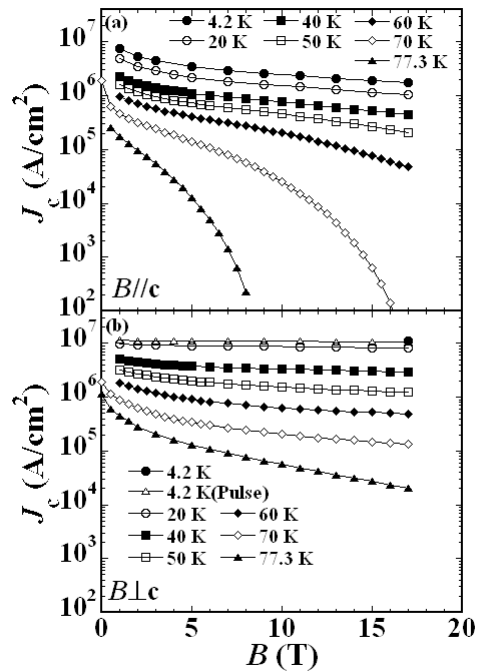


Fig.1 J_c の磁場依存性
 (a) $B // c$ 方向 (b) $B \perp c$ 方向

逆磁場近傍で J_c の磁場依存性が大きくなるためである。次に $B // c$ と $B \perp c$ の磁場依存性の相違について調べるために、各温度の J_c の磁場依存性をそれぞれの $B = 1$ T の J_c の値で規格化した結果を Fig.2 に示す。 $B // c$ では、規格化 J_c の磁場依存性は温度低下に伴い単調に減少するようになり、低磁場領域では、ほぼ同じ傾きを持った直線となるように見える。また、異なる温度の規格化 J_c がおおむね直線となる磁場領域が温度の低下に伴って広がっている。一方、 $B \perp c$ では温度低下に伴い、 J_c の磁場に対する減少率、すなわち直線部分の傾きは低下し続け、4.2 K では磁場にほとんど依存しなくなることが分かる。この J_c が磁場にほとんど依存しなくなる振る舞いはイントリジックピンニングによるものだと考えられる[4]。イントリジックピンニングは超伝導層に平行に磁場が印加されたとき、つまり $B \perp c$ で最も強く働くピンニングである。このピンニング機構は低温領域で強く働き、上部臨界磁場よりも十分小さい磁場では、 J_c は磁場に依存しないことが報告されている。ゆえに、温度低下に伴い $B \perp c$ ではイントリジックピンニングが支配的にな

るため、 $B//c$ と $B\perp c$ で磁場依存性の振る舞いが異なると考えられる。

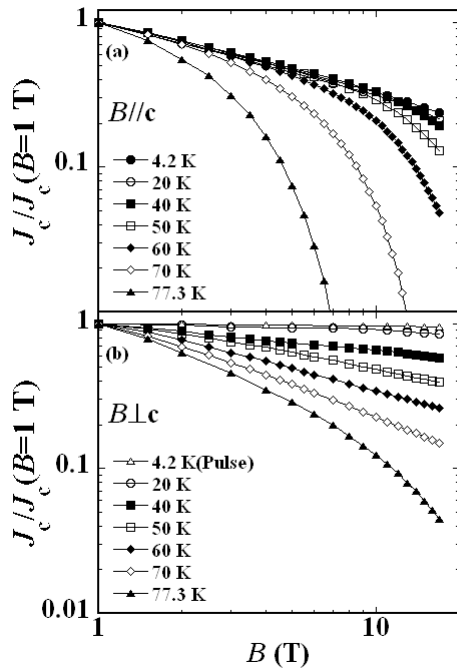


Fig.2 $B=1\text{T}$ の値で規格化した J_c の磁場依存性
(a) $B//c$ 方向 (b) $B\perp c$ 方向

二つの方向の臨界電流密度 J_c の振る舞いを調べるために、 $B\perp c$ の J_c と $B//c$ の J_c から J_c の異方性 $J_c^{B\perp c}/J_c^{B//c}$ を求めた。 J_c の異方性 $J_c^{B\perp c}/J_c^{B//c}$ の温度依存性を Fig.3 に示す。50 K 以上の高温領域においては、 $J_c^{B\perp c}/J_c^{B//c}$ は、温度の低下に伴って、急激な減少後、増加に転じる。しかし、さらに低温では、再び減少した。この $J_c^{B\perp c}/J_c^{B//c}$ の振る舞いは $B//c$ と $B\perp c$ のピンニング機構が異なるためだと考えられる。

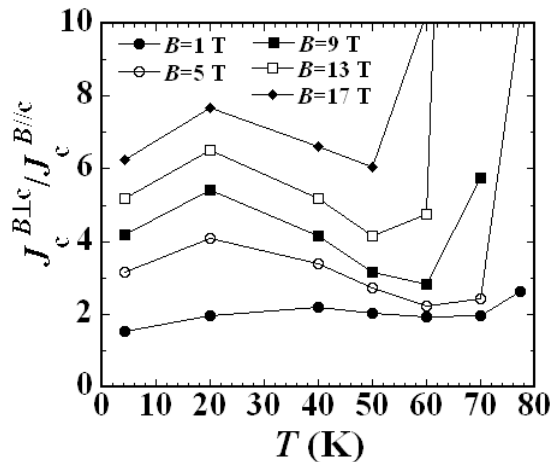


Fig.3 J_c の異方性 $J_c^{B\perp c}/J_c^{B//c}$ の温度依存性

3-2. J_c と n 値の磁場印加角度依存性

次に、 J_c の異方性の振る舞いを理解するため、その角度依存性について議論する。Fig.4 に $T=77.3\text{ K}$ の J_c と n 値の磁場印加角度依存性を示す。 $T=77.3\text{ K}$ の J_c の磁場印加角度依存性において、 $\theta=0^\circ$ にブロードで小さな、 $\theta=90^\circ$ 付近に鋭く大きな2つのピークが存在している。また、 n 値も $\theta=0^\circ$ と $\theta=90^\circ$ でピークを持ち、 J_c と正の相関がある。

Fig.5 に $T=50\text{ K}$ の J_c と n 値の磁場印加角度依存性を示す。 $T=50\text{ K}$ の磁場印加角度依存性は定性的に、77.3 K と同様な振る舞いを示しているが、 $\theta=90^\circ$ 付近の J_c のピークは、77.3 K よりも鋭くなっている。 n 値は、 $T=77.3\text{ K}$ の場合と異なり、 $\theta=90^\circ$ 付近にディップが現れ、 J_c のピークとは負の相関が現れている。これは、この温度において、イントリンジックピンニングが $B\perp c$ 方向で支配的となっていることを意味している。このような振る舞いは、PLD法を用いて SrTiO₃ 単結晶基板や IBAD 基板に作製された Y123 薄膜において報告されている[5]。イントリンジックピンニングが働いている場合量子化磁束にダブルキック励起が現れ、このキックによってポテンシャルエネルギーが小さくなるため n 値が小さくなる。ゆえに、イントリンジックピンニングが最も強く働く $\theta=90^\circ$ で n 値が最小となるディップが現れると考えられている。

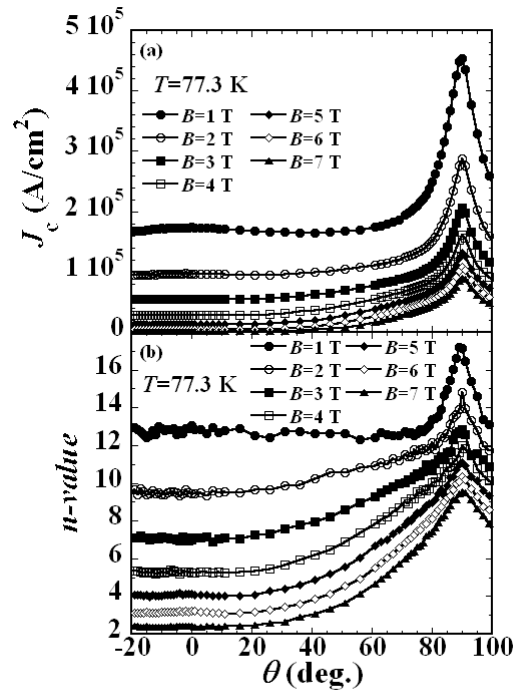


Fig.4 $T=77.3\text{ K}$ における磁場印加角度依存性
(a) J_c (b) n 値

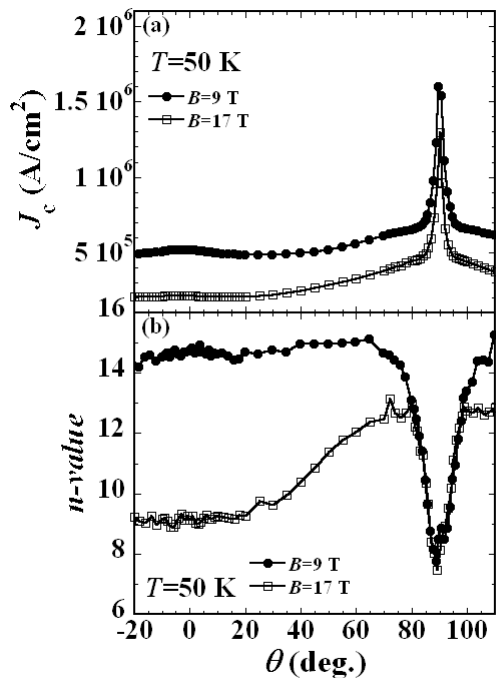


Fig.5 $T=50\text{ K}$ における磁場印加角度依存性
(a) J_c . (b) n 値

3-3. n 値の温度依存性

n 値の温度依存性を Fig.6 に示す。 $B_{\perp c}(\theta=90^\circ)$ 方向の 4.2 K の n 値はパルス測定の結果を用いており、高電場領域で n 値を決定したため通常の測定に比べ、低く見積もられている。 $B_{\parallel c}$ では、 n 値は温度低下に伴い単

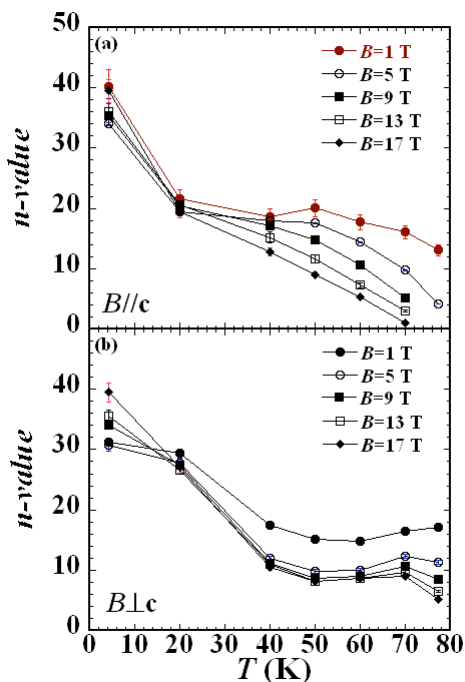


Fig.6 n 値の温度依存性
(a) $B_{\parallel c}$ 方向 (b) $B_{\perp c}$ 方向

調に増加している。しかし、 $B_{\perp c}$ では、 1 T の n 値は温度低下に伴い一旦減少したのち、増加に転じる振る舞いを、高磁場における n 値は温度低下に伴い一旦増加後減少し、再び増加に転じる振る舞いを示した。この振る舞いは、温度の低下によって外的ピンからイントリンジックピンへのクロスオーバーが起こり、 n 値の減少が見られると考えられる。このため、 50 K 以下では、主にイントリンジックピンが支配的となっていると考えられる。そして、温度低下に伴いダブルキック励起が起きにくくなることで、 n 値の増加が起こっていると考えられることができる。 4.2 K では両方向共に n 値は 30 以上である。パルス測定により、 $B_{\perp c}$ の 4.2 K の n 値は低く見積もられており、 $B_{\perp c}$ の 4.2 K の n 値はさらに大きくなると考えられる。このため、温度低下に伴う $B_{\perp c}$ の n 値の減少の問題は、 20 K 以下の低温では熱的に励起されるダブルキックが抑制されるため、低温強磁場応用では問題とならないと考えられる。

4. まとめ

MOCVD 法により開発された長尺 YBCO コート線材の強磁場臨界電流密度特性を調べた。低温で $B_{\perp c}$ の J_c は磁場依存しないこと、角度依存性で n 値のディップが現れることから、 $B_{\perp c}$ においてイントリンジックピンニングが働いていると考えられる。 $B_{\parallel c}$ と $B_{\perp c}$ のピンニング機構が異なるため、 J_c の異方性は温度低下に伴い低下し、増加に転じ再び減少するという複雑な振る舞いをした。この J_c の異方性の改善のためには、イントリンジックピンニング以外の欠陥や析出物による磁束ピンニングが支配的である $B_{\parallel c}$ で働く、有効なピンニングセンターの導入が必要であると考えられる。イントリンジックピンニングによる n 値低下の問題は、 20 K 近傍以下では、高温領域と比べて n 値が増大する傾向が見られるため、応用上問題にならない可能性がある。そして、この複雑な振る舞いのメカニズム解明が今後必要と考えられる。

高温超伝導材料を用いる強磁場マグネット用の内層コイルでは、線材に印加される磁場成分のほとんどが $B_{\perp c}$ 方向であるので、イントリンジックピンニングによる高い J_c を有効に利用できると考えられる。

参考文献

- [1] 淡路智, 渡辺和雄 : 応用物理 vol.77 (2008) 1303
- [2] K. Watanabe, S. Awaji and T. Fukase : Synthetic Metals 71 (1995) 1585
- [3] N. Kashima, T. Niwa, M. Mori, S. Nagaya, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.15, pp.2763-2766, 2005
- [4] 淡路智, 渡辺和雄, 小林典男:低温工学, vol.39, (1999),p.569
- [5] L. Civale, B. Moiorov, J. L. MacManus-Driscoll, H. Wang, T. G. Holesinger, S. R. Foltyn, A. Serquis and P. N. Arendt : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.15, pp.2808-2811s, 2005