

対破壊電流密度とピンニング電流密度—REBCO と MgB₂— Depairing Current Density and Pinning Current Density —REBCO and MgB₂—

九工大情工 ○松下照男, 木内勝, 成蹊大理工 三浦正志

Kyushu Inst. Technol., ○Teruo Matsushita, Masaru Kiuchi, Seikei Univ., Masashi Miura

E-mail: matsushita.teruo391@mail.kyutech.jp

はじめに

実用的な超伝導体に無損失で流せる最大電流密度である臨界電流密度 J_c は磁束ピンニング機構で決まり、REBCO コート線材や MgB₂ 薄膜で高い値が報告されている。この値がどこまで改善できるかという点に多くの関心が集まっているが、その場合の指標として対破壊電流密度 j_d と比較されることが多い。しかし、これらは互いに機構が異なっており、一般的な比較は単純ではなく、超伝導体の固有の特性に大きく左右される。ここでは REBCO コート線材と MgB₂ 薄膜について、これらを比較し、これまでに観測された臨界電流密度と比較する。

それぞれの機構

簡単のために、対破壊電流密度として London の値 $j_d = H_c/\lambda$ を用いることにする (H_c は熱力学的臨界磁界、 λ は侵入深さ)。これは実際の理論値とほとんど同じだからである¹⁾。一方、臨界電流密度を決めるのは MgB₂ の場合は結晶界面による電子散乱機構であり、REBCO の場合はナノ・ロッドなどによる凝縮エネルギー相互作用の機構である。後者の場合、 $H_c^2\xi$ に比例することが多い。

まず、低温 (4.2 K) における対破壊電流密度を比較してみよう。まず、MgB₂ の場合、 $\mu_0 H_c = 0.60$ T であり²⁾、これと典型的なコヒーレンス長の値 $\xi = 5.00$ nm²⁾ と G-L パラメーター $\kappa = 23$ ³⁾ より、 $\lambda = 115$ nm および $j_d = 4.17 \times 10^{12}$ A/m² と見積もられる。一方、REBCO の場合、 $\mu_0 H_c = 2.50$ T であり、比較のために c 軸方向の磁界下を意識して $\lambda_{ab} = 121$ nm より、 $j_d = 1.64 \times 10^{13}$ A/m² を得る⁴⁾。このように、超伝導体の特性としては、 H_c が大きい REBCO の方が有利である。

一方、臨界電流密度の最大値は $0.6712H_c/\lambda$ で⁴⁾、MgB₂ と REBCO でそれぞれ、 2.80×10^{12} A/m²、 1.10×10^{13} A/m² と見積もられる。これに対して、MgB₂ の磁化電流密度として 5.0 K で 2.30×10^{12} A/m² の実測例⁵⁾がある。一方、REBCO では 4.2 K における輸送電流密度で 7.13×10^{11} A/m² が達成されている⁶⁾。

検討

それでは、MgB₂ の場合に理論的極限に近い臨界電流密度が観測されているのに対し、REBCO の場合にその極限から大きく離れている原因について考えてみよう。

MgB₂ の臨界電流密度について、Yetter ら⁷⁾ の理論結果と比較したところ、規格化磁界 $B/B_{c2} = 0.1$ における値は 4.2 K において

$$J_c = 1.32 \times 10^4 d_g^{-1}$$

となる²⁾。ただし、 d_g は結晶粒径である。この試料の B_{c2} は 4.2 K において 27.3 T と予想されることから、対応する磁界は 2.73 T になる。結晶界面による J_c の磁界依存性は $B^{-1/2}$ に比例しており、文献 5 における J_c は $B = 10$ mT あたりで得られていることから、 $d_g = 100$ nm として、 J_c は 2.18×10^{12} A/m² と見積もられる。正確な試料の諸元は分からないが、このようにピンニング機構で説明できる値である。

これに対して REBCO では、ナノ・ロッドによって、全ての磁束線が完全にピン止めされた場合を想定しても J_c の上限値は 3.39×10^{12} A/m² にしか達しない。これは J_c が ξ に比例することに起因する。しかも、ナノ粒子の場合は磁束線の全ての領域がピン止めされるわけではないので、それだけ、 J_c については不利となる。しかし、見方によればまだ改善の余地があると言える。

[文献]

1. T. Matsushita and M. Kiuchi: Appl. Phys. Express **12** (2019) 063003.
2. T. Matsushita *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 015008.
3. T. Matsushita: *Flux Pinning in Superconductors* (Springer, 2014) p. 377.
4. T. Matsushita and M. Kiuchi: Appl. Phys. Express **12** (2019) 023004.
5. C. G. Zhuang *et al.*: J. Appl. Phys. **104** (2008) 013924.
6. M. Miura *et al.*: NPG Asia Materials **9** (2017) e447.
7. W. E. Yetter *et al.*: Philos. Mag. B **46** (1982) 523.