

## 重イオン照射を用いた高温超伝導薄膜の臨界電流密度制御

Tuning critical current density in high- $T_c$  superconducting thin films by using heavy-ion irradiation

末吉 哲郎<sup>1)</sup>, 尾崎 壽紀<sup>2)</sup>, 千星 聡<sup>3)</sup>, 坂根 仁<sup>4)</sup>, 西寄 照和<sup>1)</sup>, 石川 法人<sup>5)</sup>

Tetsuro SUEYOSHI, Satoshi SEMBOSHI, Toshinori OZAKI, Hitoshi SAKANE,  
Terukazu NISHIZAKI, Norito ISHIKAWA

<sup>1)</sup>九州産業大学 <sup>2)</sup>関西学院大学 <sup>3)</sup>島根大学 <sup>4)</sup>住重アテックス <sup>5)</sup>原子力機構

### (概要)

高温超伝導体  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  薄膜に対し、3種の重イオンビームを用いて試料を貫通する連続的な柱状欠陥から断続的な短尺化した柱状欠陥を導入し、 $J_c$ の絶対値に対するピン止め点の形状と体積分率の影響と磁束クリープ特性に対する柱状欠陥の長さの影響について調べた。柱状欠陥の長さを短尺にすると高密度導入により高磁場での絶対値の  $J_c$  の増加を促すことができた。これは、柱状欠陥の短尺化は、超伝導電流経路の抑制することなく、高密度のピン止め点を導入できることを示している。また、本研究でのイオンビームを用いた柱状欠陥の系統的な短尺化に対して、磁束クリープ特性の緩和率のピークは小さくなることを明らかにした。これは、柱状欠陥特有のダブルキック励起による磁束クリープが、柱状欠陥の短尺化によっても抑制されることを示している。

### キーワード:

高温超伝導線材, 臨界電流密度, 縦磁場効果, 磁束ピンニング, 照射欠陥

### 1. 目的

低炭素化かつ高効率なエネルギー利用を可能とする超伝導応用を促進していくためには、高い臨界電流密度  $J_c$  (電気抵抗零で流せる電流密度の最大値) を有する高機能な高温超伝導線材の開発が求められる。磁場中の  $J_c$  の改善には、超伝導体中に生じる量子化磁束の運動を阻止するピン止め点であるナノサイズの格子欠陥や不純物の人工的な導入が用いられる[1]。ここで、ピン止め点の形状や分散状態は高温超伝導体の磁場中の  $J_c$  特性に大きく影響を与えることが知られており、その最適化は  $J_c$  を理論的限界値である対破壊電流密度に近づける上で重要な課題の一つと考えられる。例えば、1次元形状のピンである柱状欠陥は特定の磁場方向でのみ強いピン力を示す一方で[2]、3次元ピンである球状欠陥はそのピン止め力は弱いが、全磁場方向で  $J_c$  増加に寄与する[3]。すなわち、形状の次元の違いによって両極的なピン止め特性を示す。また、非超伝導領域であるピン止め点導入は超伝導領域の体積分率を小さくするため、ピン止め点の形状は  $J_c$  の絶対値にも影響を及ぼす。ただし、ピン止め点の形状が1次元から3次元へと徐々に変化する過程において、ピン止め特性、特に  $J_c$  特性の絶対値がどのように変化していくかを追跡した報告はほとんどない。

本研究では、高温超伝導体  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  薄膜に対して、試料を貫通する連続的な柱状欠陥から断続的な短尺化した柱状欠陥を形成できる重イオン照射を用いて形状の異なる3種類のピン止め点を様々な照射量で導入することで、長さの異なる柱状欠陥のピン止め特性について系統的に調べた。

### 2. 方法

照射試料には、Ceraco社の  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  薄膜(仕様: 膜厚 400 nm, 超伝導転移温度  $T_c \sim 93.5$  K, 零磁界の臨界電流密度  $J_{c0}$  (77 K)  $\sim 4.5$  MA/cm<sup>2</sup>)を用いた。重イオン照射は、原子力機構のタンデム加速器において行った。ビーム種は、連続な柱状欠陥を形成可能な 200 MeV Xe, および断続的な短尺の柱状欠陥を形成する 80 MeV Xe, さらに短く、球状に近い形状の照射欠陥をイオンパスに沿って形成する 50 MeV Kr を用いた[4]。照射方向は、膜面に垂直すなわち試料の  $c$  軸方向に平行で、照射量は  $7.26 \times 10^{10} \sim 7.26 \times 10^{11}$  ions/cm<sup>2</sup> (マッチング磁場  $B_\phi = 1.5$  T  $\sim 15$  T) にて行った。 $J_c$  の磁場依存性と緩和特性の測定は、SQUID 磁束計を用いて  $c$  軸方向の磁場において評価した。

### 3. 結果及び考察

図 1 に、異なるイオンビームを用いて照射した NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 薄膜の 65 K における  $J_c$  の磁場依存性を示す。どのイオンビームにおいても、照射量が多くなると低磁場の  $J_c$  が低くなり、高磁場の  $J_c$  が高くなる傾向がみられる。これは、高密度のピン止め点の導入は低磁場では侵入している量子化磁束に対して過剰の状態にあり、超伝導電流経路の有効断面積を阻害する因子として作用するが、高磁場では多量に侵入する量子化磁束を有効にピン止めできるためである。このような磁場に対する  $J_c$  の照射量依存性のクロスオーバーは、他のピン止め点の導入において見られる[5]。3 種のイオンビームの中で、小さな照射欠陥を形成する 50 MeV Kr 照射では、高密度の照射 ( $B_0 = 10$  T) においても低磁場での  $J_c$  の低下は抑えられ、かつ高磁場でも最も高い  $J_c$  を示している。これは、形状の小さなピン止め点の導入は高密度導入においても超伝導電流経路を確保しながら、ピン止め点として作用することを示しており、特に高磁場での  $J_c$  の絶対値の増加に有利なピン止め点であることを示している。

図 2 に、マッチング磁場  $B_0 = 4$  T の照射試料での磁化緩和特性から評価した磁化緩和率  $S = -d \ln M / d \ln t$  の温度依存性を示す。全ての試料において、20-30 K 付近でブロードピークが現れている。ただし、未照射試料では非常に小さく、温度に対して磁化緩和率は単調に増加する傾向になっている。一方、照射試料においては、柱状欠陥が短尺化するイオンビームほど、磁化緩和率のピーク値が減少し、またピークを示す温度が低温側にシフトする傾向を示している。この 20-30 K 付近に現れる磁化緩和率のピークは、柱状欠陥を含む試料において特徴的に現れる現象であり、ダブルキック励起による磁束クリープによるものと考えられている[6]。ピーク値は、連続的な柱状欠陥を形成する 200 MeV Xe 照射した試料において  $S = 0.04$  であるのに対し、50 MeV Kr においては  $S = 0.025$  であり、短いナノロッドを含む YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 薄膜での  $S$  値とほぼ同じ値である。これは、柱状欠陥が短尺化すると磁束クリープの抑制に有効に作用していることを示唆している。

本研究でのイオンビームによる系統的な柱状欠陥の短尺化の制御を用いることで、磁束クリープに対する柱状欠陥の短尺化の影響を、初めて明らかにした。

### 4. 引用(参照)文献等

- [1] K. Matsumoto and P. Mele, *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 014001.
- [2] L. Civale, A. D. Marwick, T. K. Worthington, M. A. Kirk, J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J. R. Clem, and F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* **67** (1991) 648.
- [3] M. Miura, B. Maiorov, S. A. Baily, N. Haberkorn, J. O. Willis, K. Marken, T. Izumi, Y. Shiohara, and L. Civale, *Phys. Rev. B*, **83** (2011) 184519.
- [4] T. Sueyoshi, S. Semboshi, T. Ozaki, H. Sakane, T. Nishizaki, and N. Ishikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **32** (2022) 8000704.
- [5] A. K. Jha, K. Matsumoto, T. Horide, S. Saini, P. Mele, A. Ichinose, Y. Yoshida, and S. Awaji, *J. Appl. Phys.* **122** (2017) 093905.
- [6] L. Krusin-Elbaum, L. Civale, J. R. Thompson, and C. Feild, *Phys. Rev. B* **53** (1996) 11744.

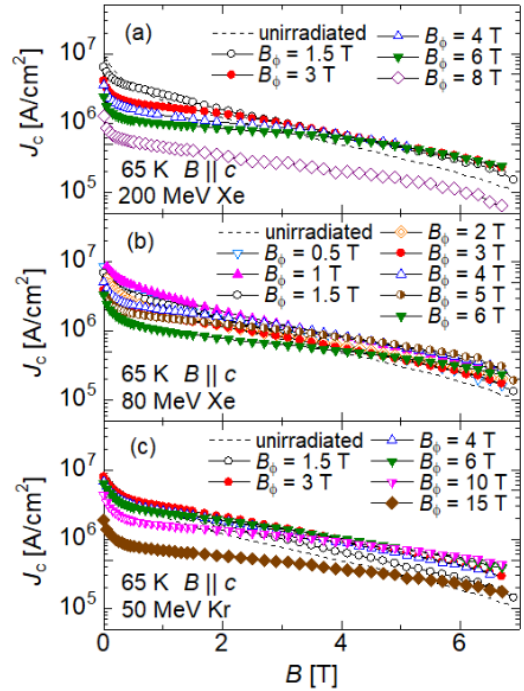


図 1 異なるイオンビームを照射した NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 薄膜の  $J_c$  の磁場依存性。

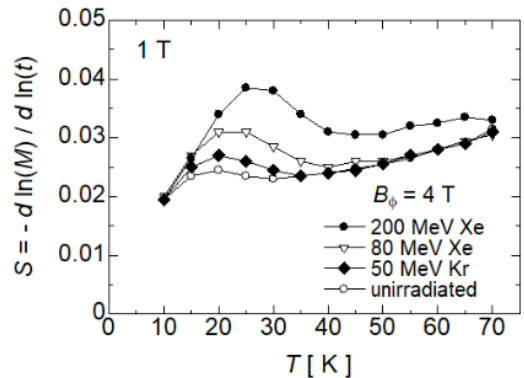


図 2 異なるイオンビームを照射した NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 薄膜の磁化緩和率  $S$  の温度依存性。