



関西学院大学
KWANSEI GAKUIN UNIVERSITY

+

イオン照射で鉄系物質の超伝導特性を大幅アップ -超伝導線材応用に向けた新機軸-

報道各位

関西学院広報室

関西学院大学理工学部の尾崎壽紀専任講師は、米国ブルックヘブン国立研究所の Qiang Li(チャン・リー)グループリーダーらとの共同研究により、鉄系薄膜の超伝導特性を大幅に向上するイオン照射手法を見出しました。従来は磁場中における臨界電流密度 J_c ^{注1)}を向上させるために、高いエネルギーで重い元素のイオンを照射する手法が主流でした。尾崎らは逆転の発想により軽い水素イオン (H^+)を極めて低いエネルギーで、しかもアルミ箔で覆って散乱させながらソフトに照射することにより、結晶中に細い短冊状の欠陥とその周りに格子歪を生じさせ、臨界温度 T_c ^{注2)}と J_c の両方を向上させることに成功しました。鉄系超伝導体においてイオン照射による T_c の上昇は世界初であり、 J_c は 4.2 K(ケルビン)^{注3)}(液体ヘリウム温度)で 2 倍、12 K では、特に高磁場で 1 桁向上しました。超伝導体の J_c が上がり同じ断面積でも大電流が流せるようになります。この低エネルギーイオン照射は他の超伝導材料にも適用可能であり、装置も小型化しやすく産業応用に向けた新機軸となることが期待されます。

この研究成果は 10月6日発行の英国 Nature Publishing Group のオンライン科学雑誌「Nature Communications」に掲載されました。

ポイント

- ・ 低エネルギーで軽い水素イオンを照射することで、鉄系薄膜の臨界電流密度 J_c と臨界温度 T_c を同時に上昇させることに成功した。
- ・ この振る舞いの起源が、アルミニウム箔を介した水素イオンの照射により形成された欠陥とその周りに生じた格子歪みによるものであることを明らかにした。
- ・ 本研究手法は、鉄系超伝導体だけでなく他の超伝導材料へも適用可能な実用的な方法であるため、超伝導社会の実現に寄与することが期待される。

1. 研究の背景と経緯

超伝導とは、ある温度以下に冷却することで電気抵抗がゼロになる現象で、エネルギー損失なく

電気を流すことができます。そのため、超伝導体は低炭素社会における究極のエネルギー材料として精力的に研究が進められております。鉄系超伝導体^{注4)}は、銅酸化物超伝導体^{注5)}に次いで高い臨界温度 T_c を示し、高磁場まで超伝導状態を保つことのできるため、送電線や磁気共鳴イメージング装置(MRI)、電磁石など幅広い分野への応用が期待されております。超伝導材料技術を用いた産業応用の多くは、磁場中で超伝導を利用するため、高磁場環境で安定してより多くの(ゼロ抵抗)電流を流す必要があります。磁場中で多くの電流を流すためには、薄膜中に欠陥を導入することで、超伝導体内に侵入した磁束を”ピン止め”し、磁束の運動を抑える必要がありますが、欠陥を導入すると結晶格子が壊れ T_c が低下してしまいます。そのため、 T_c の低下を抑えつつ J_c を上昇させる欠陥をデザインすることは学術的な中心課題の一つであり、産業応用に向けて世界中で取り組まれている急務の課題です。

2. 研究の手法

本研究では、水素イオン(H^+)を 190 keV(電子ボルト)^{注6)}という極めて低いエネルギーで照射することによる欠陥導入に取り組みました。まず、パルスレーザー堆積法(PLD 法)^{注7)}と呼ばれる精密な薄膜作製技術を用いて、単結晶基板上に超伝導を示さない酸化セリウム CeO_2 薄膜を成長させ、その上に $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 鉄系超伝導体(図 1)の薄膜を作製しました。さらに、照射する水素イオンを散乱させ、より多くの欠陥を薄膜中で形成させるために、薄膜表面を 1.5 μm (マイクロメートル)のアルミニウム(Al)箔で覆い、このアルミニウム箔を介して水素イオンを薄膜に照射しました(図 2)。

3. 研究成果

低エネルギーで水素イオン照射した $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 薄膜は照射前と比較して液体ヘリウム温度(4.2 K)で約 2 倍の J_c 値を示し、12 K においては、特に高磁場で 1 桁以上 J_c が向上しました(図 3)。この J_c の大幅な上昇の原因を調べるために、薄膜の微細組織を電子顕微鏡で観察すると、図 4 に示すように $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 超伝導薄膜全体に細い短冊状の欠陥が観測され、その周りに格子歪みが存在していることがわかりました(図 4)。このことから、水素イオンの照射によって形成された欠陥及び格子歪みが、非常に効果的に磁束を”ピン止め”することで J_c の大幅な向上につながっていると考えられます。

また、水素イオン照射することでゼロ抵抗になる温度 T_c^{zero} が 0.5 K 上昇しました(図 5)。イオン照射で T_c が向上することは稀で、鉄系超伝導体で観測されたのはこれが初めてです。 $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 超伝導体のバルク結晶は、約 14 K でゼロ抵抗($T_c^{zero} \sim 14$ K)を示し、薄膜にすることで T_c が上昇することが知られています。本研究ではバルク結晶よりも約 1.3 倍高い 18 K でゼロ抵抗を示す $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 薄膜に水素イオンを照射することで、さらに T_c^{zero} が上昇し、18.5 K を示しました。これまでの研究からこの物質は格子に圧縮歪みが生じると T_c が上昇することが知られており、水素イオン照射に

よって形成された欠陥の周りの圧縮歪みが T_c の上昇の理由であると考えられます。

4. 今後の期待

今回の成果は、低エネルギーのイオン照射という産業応用可能な手法によって T_c を向上させるとともに J_c を大幅に上昇させることを可能にした画期的な成果です。今後は、照射エネルギーや照射量を変化させ、形成される欠陥及び格子歪みを制御することで、さらに T_c と J_c の向上が期待できます。またこの手法は、鉄系超伝導体だけでなく、他の超伝導材料にも適用可能な実用的な方法であり、超伝導材料の産業応用のための新機軸となりうるものです。

本研究は、米国エネルギー省科学局の資金を受けて実施されました。

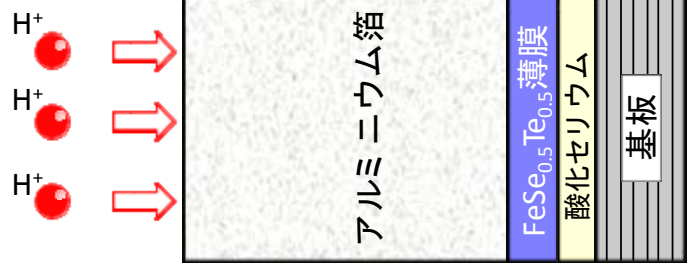
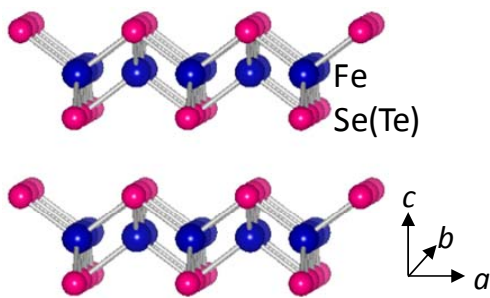


図 1. $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 超伝導体の結晶構造。

図 2. 水素イオン照射した $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜の模式図。

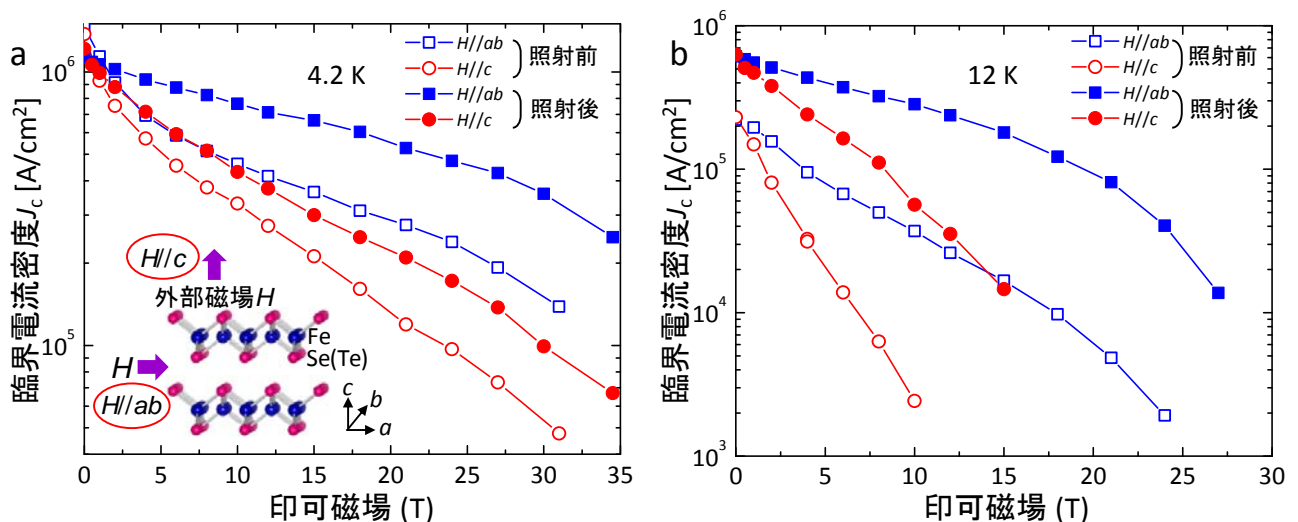


図 3. 水素イオン照射前後の(a)4.2 K 及び(b)12 K における臨界電流密 J_c の磁場依存性. $H//ab$ は図 1 において ab 面方向に磁場をかけた場合で、 $H//c$ は c 軸方向に磁場をかけた場合です。

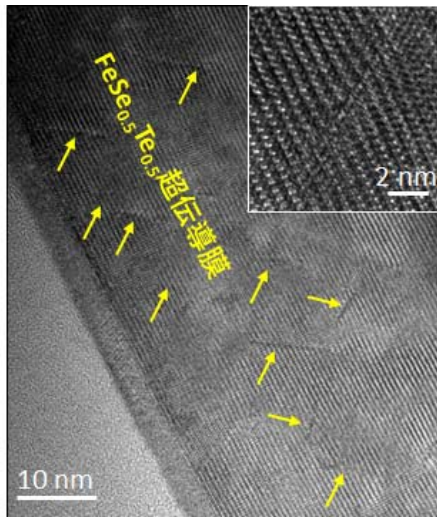


図 4. 水素イオン照射した $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜の電子顕微鏡像.

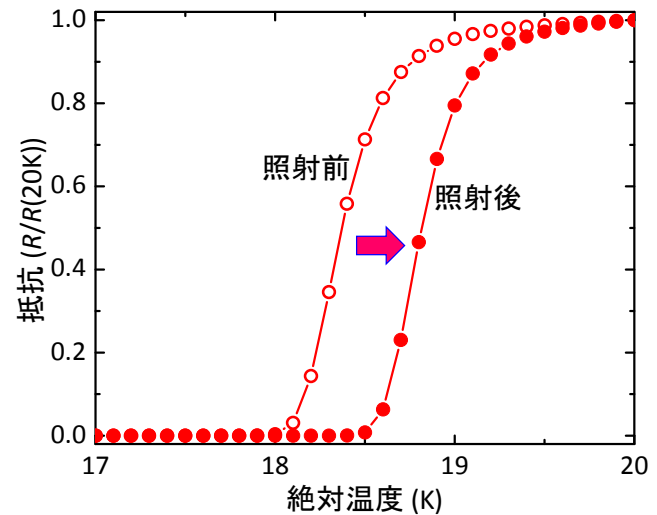


図 5. 水素イオン照射前後の電気抵抗(20 K で規格化)の温度依存性.

【論文タイトル】

原題: A route for a strong increase of critical current in nano strained iron-based superconductors

【タイトル和訳】: ナノ歪みを導入した鉄系超伝導体における臨界電流の向上の方法

【著者名】

Toshinori Ozaki, Lijun Wu, Cheng Zhang, Jan Jaroszynski, Weidong Si, Juan Zhou, Yimei Zhu, and Qiang Li

【用語解説】

注1) 臨界電流密度 J_c

超伝導体に電気抵抗ゼロで流すことのできる単位断面積当たりの最大の電流値。臨界温度 T_c 、臨界磁場 H_c と並んで超伝導の基本特性を示す 3 要素の一つで、実用上重要な値。超伝導体の J_c が高ければ、同じ断面積の超伝導線材でも大電流が流せることを意味する。

注2) 臨界温度(超伝導転移温度) T_c

超伝導体において、ゼロ抵抗や完全反磁性などの性質が現れる温度。

注3) K(ケルビン)

絶対零度(-273.15°C)をゼロ度と定義した温度の単位。(液体ヘリウム温度は約 4.2 K、液体窒素温度は約 77 K、室温は約 300 K)

注4) 鉄系超伝導体 :

鉄系超伝導体とは、FeAs、FeSe、FeTe 伝導層を有する一連の超伝導体の総称。2008 年に東京工業大学の細野秀雄教授のグループが発見した。

注5) 銅酸化物高温超伝導体

1986年にJ. Bednorz と K. Müllerにより発見された銅(Cu)と酸素(O)を含む超伝導体の総称。結晶中の CuO₂ 面が超伝導の発現の舞台となっており、中には超伝導転移温度 T_c が液体窒素温度(約-196°C)を超える物質も存在する。

注6) eV(電子ボルト)

物質に電氣的な手法でエネルギーを与える際に用いられるエネルギーの単位。電位差 V (ボルト)×電荷として eV (電子ボルト)で表す。例えば、電子や水素イオンなどの単位電荷をもつ荷電粒子を 200 kV (200,000 V) で加速すると、その荷電粒子は 200keV のエネルギーを得る。国際単位系のエネルギーでは 1 eV は、 1.60×10^{-19} J (ジュール) に等しい。

注7) パルスレーザー堆積(PLD)法

薄膜作製の代表的な手法の一つで、酸化物・非酸化物を問わず様々な材料の薄膜作製に適用されている。ターゲット材料に高出力のパルスレーザーを照射することで材料をプラズマ化し、そのプラズマを基板上で再び固体に変化させて堆積させることで薄膜を作製する。

問い合わせ先

■TEL 0798-54-6017 (広報室)

■関西学院大学 理工学部 先進エネルギーナノ工学科

尾崎 壽紀 専任講師

Email: tozaki@kwansei.ac.jp

TEL: 079-565-9741