



2024年8月27日

鉄系超伝導体(Ba,K)Fe₂As₂における粒界特性の特異性を発見 ～多結晶でも高性能な高温超伝導体の創製に道～

【本研究のポイント】

- ・鉄系高温超伝導体^{注1)} (Ba,K)Fe₂As₂^{注2)}の人工の粒界^{注3)}を世界に先駆けて作製した。
- ・他の鉄系高温超伝導体に比べて、(Ba,K)Fe₂As₂の粒界をまたいで流れる超伝導電流^{注4)}(粒界電流)が一桁大きいことが分かった。
- ・外部磁場を印加しても、粒界電流が指数関数的に減衰を始める粒界角が、他の鉄系超伝導体と異なり、大きく変化しないことが分かった。
- ・このような良好な特性を示す理由として、粒界部位において小さな粒界角が積み重なった独特な粒界面を形成していることが考えられる。
- ・(Ba,K)Fe₂As₂が、低コストで作製可能な多結晶^{注5)}形態での応用に適した高性能超伝導材料であることを証明した。

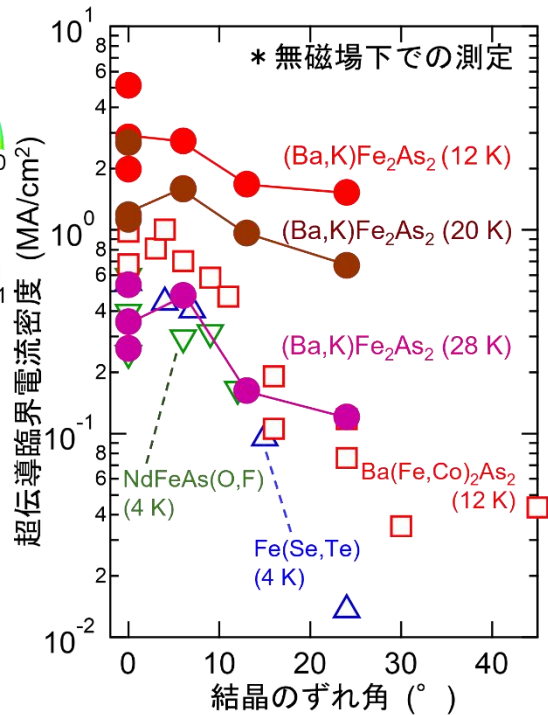
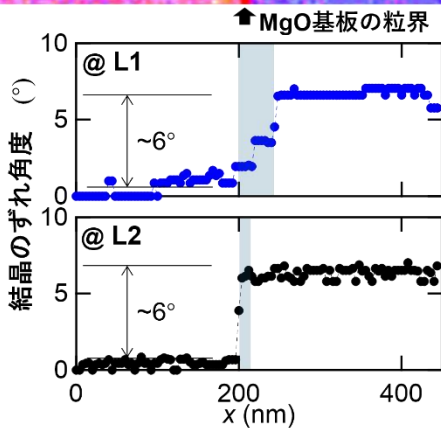
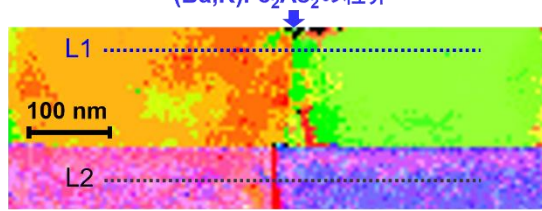
【研究概要】

名古屋大学の畑野 敬史 准教授、東京農工大学の秦 東益 博士後期課程学生、内藤方夫 シニアプロフェッサー、山本 明保 准教授、日本大学の飯田 和昌 教授、九州大学の郭 子萌 博士研究員(当時)、高 紅葉 博士研究員、斉藤 光 准教授、嶋田 雄介 准教授、波多 聰 教授との共同研究で、鉄系高温超伝導体のうち、最も実用化が期待されている物質である(Ba,K)Fe₂As₂で、粒界においても高い超伝導性能を有することを明らかにしました。

高い超伝導転移温度^{注6)}を示す銅酸化物高温超伝導体^{注7)}および鉄系高温超伝導体は、粒界において隣接する結晶同士のずれ角度が大きくなると、程度の差はあるものの粒界をまたいで流れる超伝導電流が強く抑制されてしまう「粒界弱結合」という問題があるため、多結晶形態での産業応用は難しいとされています。今回、(Ba,K)Fe₂As₂の単一人工粒界を世界に先駆けて作製し、粒界弱結合の影響を調べたところ、結晶のずれ角度が24°まで到達しても、超伝導電流の減衰が他の高温超伝導体^{注8)}と比べて緩やかであることが分かりました。本成果は、多結晶でも高い性能を発揮できる高温超伝導体材料の創製へと展開しうるものであり、医療用MRIや交通インフラなどで重要な役割を果たす高性能超伝導磁石の高性能化・低コスト化につながる成果です。

本研究成果は、2024年8月23日付ネイチャー・パブリッシング・グループの学術誌「NPG Asia Materials」に掲載されました。

(Ba,K)Fe₂As₂における粒界付近の結晶方位カラーマップ
(Ba,K)Fe₂As₂の粒界



左図) (Ba,K)Fe₂As₂における粒界付近の結晶ずれ角を色で表現した図。図中 L1, L2 線上での角度情報を取り出したのが下段で、(Ba,K)Fe₂As₂ においては 6°のずれ角がより小さいずれ角の積み重ねとして生じていることが分かる。

右図) 人工粒界を用いて測定した、各種鉄系超伝導体における超伝導臨界電流密度 J_c の結晶ずれ角依存性。(Ba,K)Fe₂As₂ では結晶のずれ角が 24°の場合でも 100 万 A/cm² を超える大きな超伝導電流を維持できることが分かった。

【研究背景と内容】

超伝導体を利用した強力磁石は、交通インフラ(高速鉄道、航空機)や高度医療機器(MRI)、核融合炉開発など、巨大市場分野や未来技術における重要な要素です。これらの市場価値を革新的に高めるためには、コンパクトサイズでも強力な磁場を発生し、かつ高い温度でも運用可能な超伝導磁石が求められています。そのための最も直接的な開発指針は、高い超伝導転移温度(T_c)と高い超伝導臨界電流密度^{注 9)}(J_c)を示す物質を用いることです。具体的には銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体のような高温超伝導体が重要となります。

ところが銅酸化物系および鉄系超伝導体は、両者ともに「粒界弱結合」という深刻な問題を抱えています。これは、超伝導体を構成する結晶粒の境界(粒界)において、結晶方位のずれ角(粒界角)がある臨界角度を超えると、超伝導電流が劇的に低下してしまう問題です。この問題を解決しなければ、多結晶形態での超伝導体の実用化は難しいとされています。材料中に粒界がない単結晶形態であればこの問題は発生しませんが、交通インフラや高度医療機器などの技術分野では大量生産が求められるため、単結晶形態材料の製造難易度と高コストが大きな障害となります。したがって、多結晶形態でも高い超伝導特性を維持できる材料の開発が喫緊の課題となっています。

鉄系超伝導体の一つである(Ba,K)Fe₂As₂(以下 Ba122:K)は、約 40 ケルビン(K)の高い T_c をもつだけでなく、多結晶形態での超伝導電流の劣化が他の高温超伝導体と比較して小さいことから、産業応用への大きな可能性を秘めた高温超伝導材料として注

目されています。しかし Ba122:K においては、多結晶形態での超伝導特性を決定づける粒界特性に関する情報(粒界における超伝導特性の劣化の程度)がほとんど分かっていませんでした。その理由は多結晶体中に自然形成される粒界は不規則であり、そのままでは粒界特性を正確に評価することは困難だからです。このため、人工的に単一の粒界を作製することで、粒界が超伝導特性に与える影響を系統的に調べる必要があります。

本研究グループは、この重要な課題に取り組むため、特殊な成膜手法を用いて Ba122:K の人工粒界の作製技術を世界に先駆けて確立し、様々な結晶ずれ角をもつ人工粒界を作製しました。図 1 に、代表的な銅酸化物系、鉄系超伝導体材料について、人工粒界で測定した無磁場下における J_c の結晶ずれ角依存性を示します。いずれも臨界角度を超えると超伝導電流が指数関数的に低下することが分かります。一方、今回作製した Ba122:K の人工粒界は、結晶のずれ角が 24°でも最大で 1 平方センチメートル当たり 100 万アンペア(A)もの超伝導電流を許容することが明らかになりました。鉄系超伝導体の臨界角度は 9°程度とされていますが、その倍以上の角度でも高い超伝導電流を流せることが示され、従来の常識を覆す重要な発見となりました。

この発見の背景には、粒界近傍に現れる特異な微細構造が関与していると考えられます。単一粒界部分を特殊な電子顕微鏡で構造観察した結果、局所的に小角度の結晶ずれが積み重なることで粒界が形成されていることが明らかになりました(図2参照)。これにより粒界弱結合の影響が限定的となり、24°という大きな結晶ずれ角においても高い超伝導性能が維持されることが可能となったと考えられます。このような自己組織的な粒界の緩和が、Ba122:K 多結晶において他の材料を凌駕する高い超伝導特性が得られる一つの要因と考えられます。

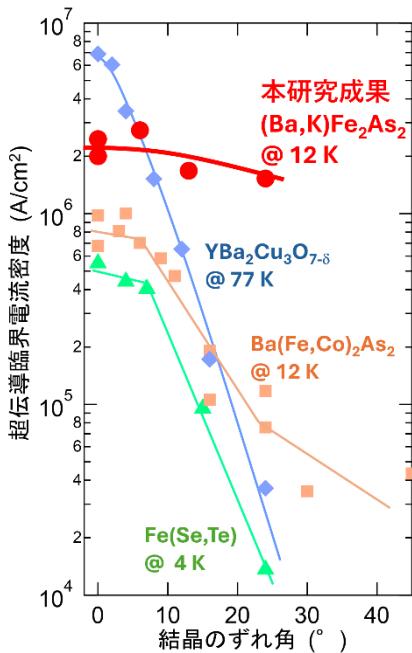


図1. 人工粒界を用いて測定した、各種高温超伝導体における超伝導臨界電流密度の結晶ずれ角依存性。(Ba,K)Fe₂As₂ では結晶のずれ角が 24°の場合でも 100 万 A/cm² を超える大きな超伝導電流を維持できることが分かった。

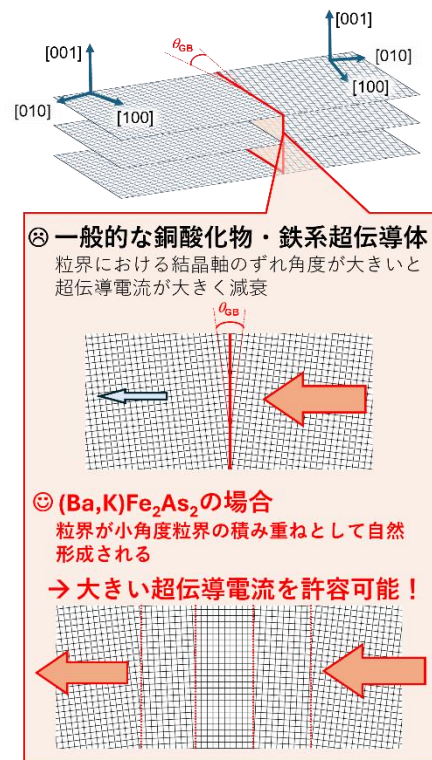


図 2. (Ba,K)Fe₂As₂ の人工粒界に現れる特徴の説明。粒界の近くには小さな角度ずれの積み重ねによる粒界緩和構造が自然に形成されており、高い超伝導性能が維持されていることが示唆された。

【成果の意義】

本研究成果は、Ba122:K の高い超伝導性能を理解する上での重要な特徴を明らかにしただけでなく、粒界弱結合問題を抱える他の高温超伝導体に対して、新たな解決策を提供する可能性があります。我々は、この研究を基に超伝導材料の産業応用に向けた更なる研究を進め、社会に貢献する技術の開発に取り組んでいきます。

本研究は、2018 年度から始まった科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST「超伝導インフォマティクスに基づく多結晶型超伝導材料・磁石の開発」(研究代表者: 山本 明保、JPMJCR18J4)の一環で実施されました。また、日本学術振興会科学研究費補助金の助成、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ(ARIM)の支援も受けて行われたものです。

【用語説明】

注 1)鉄系高温超伝導体:

2008 年に細野らにより発見された鉄を含む超伝導体物質群で、超伝導転移温度は最高で 55 K(摂氏マイナス 218℃)に達する。

注 2) (Ba,K)Fe₂As₂:

鉄系高温超伝導体のひとつで、 $AeFe_2As_2$ (Ae はアルカリ土類金属で Ca, Sr, Ba) が基になる。 Ae , Fe, As サイトに元素置換することで超伝導を示す。その中でも比較的高い超伝導転移温度と合成のしやすさを両立しているのは、Ba サイトを K で部分置換した本系である。その最高転移温度は約 38 K(摂氏マイナス 235℃)に達する。

注 3)粒界:

多結晶体の内部に存在する、結晶粒と結晶粒の境界のこと。

注 4)超伝導電流:

超伝導体は電気抵抗ゼロで電流を流すことができる材料であり、ゼロ抵抗で流れる電流を超伝導電流という。

注 5)多結晶:

結晶方位が、試料全体にわたってきれいに揃っているものを単結晶という。これに対し、多結晶とは小さな単結晶がランダムな方位で凝集した材料形態を指す。一般に、単結晶形態は作製が難しく、高コストである場合が多いため、産業応用を考慮すると多結晶形態でも十分な性能を発揮できる材料が望まれる。

注 6)超伝導転移温度:

常伝導相から超伝導相へ相転移する超伝導が発現する温度。

注 7)銅酸化物高温超伝導体:

1986 年にベドノルツとミュラーにより発見された銅を含む超伝導体物質群で、超伝導転移温度は常圧下において最高で 134 K(摂氏マイナス 139℃)に達する。

注 8)高温超伝導体:

超伝導体の多くは超伝導転移温度が低く、常圧においては極低温まで冷却しなければ超伝導にならない。しかし、銅酸化物および鉄系超伝導体では、30 K を超えるような高い温度でも超伝導化するものがいくつも知られている。これらを総称して高温超伝導体という。

注 9)超伝導臨界電流密度:

超伝導体が単位面積あたりに流せる超伝導電流には限界値がある。これを超伝導臨界電流密度という。これを超える電流を超伝導体に流すと、ゼロ抵抗ではなくなってしまう。超伝導電流密度が大きい方が、強力磁石を作製するのに有利となる。

【論文情報】

雑誌名: NPG Asia Materials

論文タイトル: High tolerance of the superconducting current to large grain boundary angles in potassium-doped BaFe₂As₂

著者: Takafumi Hatano*, Dongyi Qin, Kazumasa Iida, Hongye Gao, Zimeng Guo, Hikaru Saito, Satoshi Hata, Yusuke Shimada, Michio Naito, Akiyasu Yamamoto (*責任著者)

DOI: 10.1038/s41427-024-00561-9

URL: <https://www.nature.com/articles/s41427-024-00561-9>

【研究者連絡先】

東海国立大学機構 名古屋大学 大学院工学研究科

准教授 畑野 敬史(はたの たかふみ)

TEL:052-780-4461

E-mail:hatano[at]mp.pse.nagoya-u.ac.jp

東京農工大学 大学院工学研究院 先端物理工学部門

准教授 山本 明保(やまもと あきやす)

TEL:042-388-7235

E-mail:akiyasu[at]cc.tuat.ac.jp

日本大学 生産工学部電気電子工学科

教授 飯田 和昌(いいだ かずまさ)

TEL:047-474-2367

E-mail:iida.kazumasa[at]nihon-u.ac.jp

九州大学 大学院総合理工学研究院

教授 波多 聡(はた さとし)

TEL:092-583-7580 FAX:092-583-7580

E-mail:hata.satoshi.207[at]m.kyushu-u.ac.jp

Press Release

【報道連絡先】

東海国立大学機構 名古屋大学広報課

TEL:052-558-9735 FAX:052-788-6272

E-mail:nu_research[at]t.mail.nagoya-u.ac.jp

東京農工大学 総務課広報室

TEL:042-367-5930

E-mail:koho2[at]cc.tuat.ac.jp

日本大学 生産工学部研究事務課

TEL:047-474-2280

E-mail:cit.research[at]nihon-u.ac.jp

九州大学 広報課

TEL:092-802-2130

E-mail:koho[at]jimu.kyushu-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432

E-mail:jstkoho[at]jst.go.jp

【JST 事業に関する問い合わせ】

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔(あんどう ゆうすけ)

TEL:03-3512-3531 FAX:03-3222-2066

E-mail:crest[at]jst.go.jp