

小特集 核融合炉のための高温超伝導体開発の現状

2. 高温超伝導テープ線材の開発の現状

2. Status of Research and Development of High Temperature Superconducting Tapes

山田 穰^{1,2)}

YAMADA Yutaka

¹⁾ 中部大学 薄膜研究センター, ²⁾ 上海超导科技股份有限公司

(原稿受付: 2024年6月13日)

高温超伝導の発見から38年経った今, 小型核融合応用で REBCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) 高温超伝導線の大規模な量産化が進みつつある. この高温超伝導核融合装置には20 Tにもなる高磁場の大型超伝導コイルが必要で, 1台当たりの線材必要量は2万 kmである. この装置を世界に1万台作ろうという勢いである. 現在, 線材各社は総力を挙げて量産化に取り組んでいる. 本章では, 現在主流となっている IBAD-PLD 法 REBCO 線を中心に, 線材の形状がテープ状である理由, その技術, 現在の開発進展状況, 今後の開発課題を述べる.

Keywords:

high temperature superconductor, REBaCuO, superconducting tape, ion beam assisted deposition, pulsed laser deposition, critical current

2.1 はじめに

1986年の高温超伝導の発見[1]から38年, REBCO 高温超伝導線の大量生産が世界的に始まった. 図1はその端緒となった MIT-CFS 社のトカマク型小型核融合装置の未来完成図である[2]. 小型にするために, 従来にない高磁場20 T (導体最大経験磁場) の超伝導コイルが必須であり, そのため多量の高温超伝導線を使用する. 図1の装置の次の商用炉 (ARC) では2万 kmもの線が必要となる. 将来はこれを世界中に1万台作ろうかとの発表もあった. 図2は図1のモデル試験高温超伝導コイルであり, 世界中のメーカーの REBCO 線, 270 kmが使われ, 2021年に20 K, 20 Tの高磁場, 高温での励磁試験に成功した[3]. 本章では, 現在主流の IBAD-PLD 法 REBCO 線について基本技

術と量産化の現状, 今後の課題を述べる.

2.2 高温超伝導線材の技術

2.2.1 基本構造と特性

2000年初期の REBCO 線開発から, 現在世界で数社において量産化が進んでいる (詳細は後述の第3節). その代表例として, 図3に Shanghai Superconductor Technology 社 (SST, 上海超伝導株) の IBAD-PLD 法 REBCO 線 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (RE: Rare Earth, Y, Gd, Eu など)) の構造を示す[4]. IBAD は, Ion Beam Assisted Deposition, PLD は Pulsed Laser Deposition の略でそれぞれ, 特殊なスパッタ蒸着, エキシマレーザーによる蒸着法である. ハステロイテープ金属基板上に各種酸化物

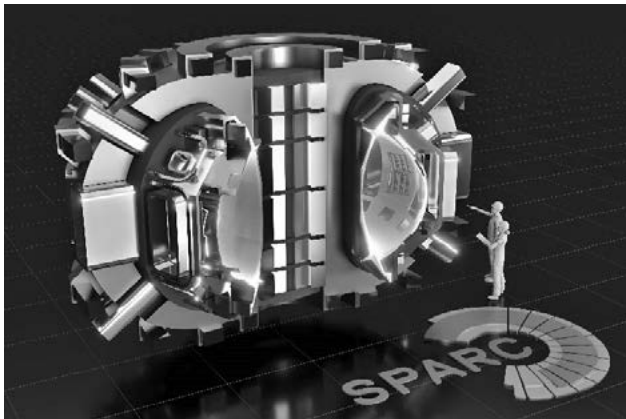


図1 MIT-CFS 社の小型核融合装置 SPARC の構想図. (著作権許可 Credit: T. Henderson, CFS/MIT-PSFC, 2020).

Chubu University, Kasugai, AICHI 487-0027, Japan

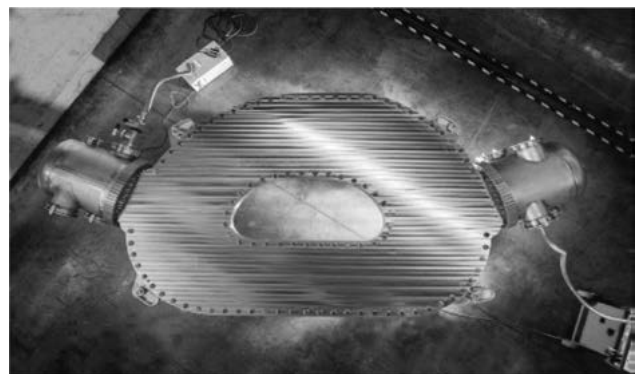


図2 MIT-CFS 社の20 T REBCO 線 TF (Toroidal Field) モデルコイル. 長直径3 m. (著作権許可 Gretchen Ertl, CFS/MIT-PSFC, 2021).

author's e-mail: yutakayamada@isc.chubu.ac.jp

のバッファ層 ($\text{Al}_2\text{O}_3\sim\text{CeO}_2$) をスパッタ、PLD 法などで蒸着する。MgO 層は、後述の IBAD 法により作製され、結晶が配向した組織になる。その上に他の酸化層と厚さ $1\sim 2\ \mu\text{m}$ の超伝導 REBCO 層をエピタキシャル成長させる。超伝導臨界電流 J_c は液体窒素温度 77 K で $100\sim 200\ \text{A}$ (幅 4 mm), $500\sim 600\ \text{A}$ (幅 12 mm) である。全体厚みは $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 程度である。

小型核融合には高磁場が必須である。そのために、線材はより高い超伝導電流密度 J_c が得られる $4\sim 20\ \text{K}$ で使う。CFS 社の装置は 20 T の高磁場を必要とする。図 4 は超伝導層のみの $4.2\ \text{K}$ の J_c 特性である [5]。REBCO 線 (図では YBCO) は、他の線材より 1 桁高い J_c を 20 T 以上でも示す。これが、小型核融合などの高磁場応用で REBCO 線が使われる理由である。この高い J_c のため、コンパクトで高磁場を発生できるコイルが可能となる。

2.2.2 材料科学技術：何故幅広テープ形状か？

弱結合と 2 軸配向：液体窒素温度を超える T_c を持つ YBCO が発見 [6] されるとすぐ、線材化のために Ag などの金属シース粉末法により最初の YBCO の丸線が作製された [7]。金属管に YBCO の超伝導粉末を入れて金属引き延ばし加工をし、熱処理する。しかし、その J_c (77 K,

0 T) は僅か $700\ \text{A}/\text{cm}^2$ 程度と今の薄膜テープ線より 4 桁小さかった。金属シース粉末法の YBCO は固相焼結法であり、内部に多数の大傾角の結晶粒界がある。超伝導電流は YBCO 結晶構造中の CuO_2 面 (ab 面方向) を 2 次元的に流れるが、コヒーレンス長が短く、結晶粒界の角度に J_c は敏感である (弱結合¹)。高い J_c を得るには、ab 面を揃え、結晶配向のずれを $3\sim 4^\circ$ 以内にしなければならない [8] (2 軸配向¹組織)。

ただし、Ag シース粉末法は弱結合性の弱い Bi 系線材に受け継がれ活用されている。また、REBCO 線でも図 2 のように、Ag 層として酸化超伝導層への酸素富化処理や熱的、電気的安定化のために必須である。

IBAD 法：上述の弱結合の問題を解決し、高い J_c を得るため結晶組織の方位を揃える方法が IBAD 法 [9] である。ジルコニア系酸化物 (YSZ, GZO) や MgO をスパッタ蒸着する際、別のイオンビームを同時に基板法線に対し特別な角度から照射する (図 5 [10, 11]) と、蒸着膜は高い 2 軸配向性を示す。特に、MgO [12, 13] は厚さが数 nm で数百 m/hr の高速製造が可能である。

この IBAD-MgO 層上に CeO_2 層 (図 6 [12]) や LaMnO_3 層を蒸着すると、より安定して高配向度が得られる [14]。

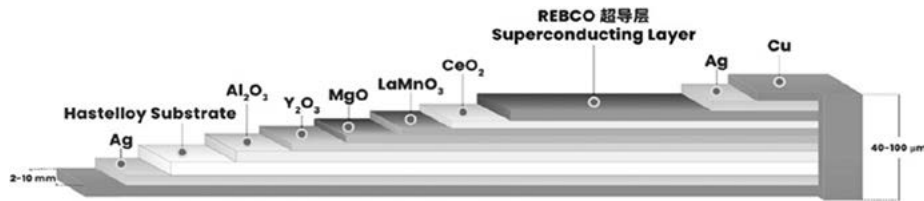


図 3 量産 REBCO 線の構造 (幅 $4\sim 12\ \text{mm}$, 厚さ $0.1\ \text{mm}$ 程度)。REBCO 層は $1\sim 2\ \mu\text{m}$ (SST 社 [4] より転載許可)。

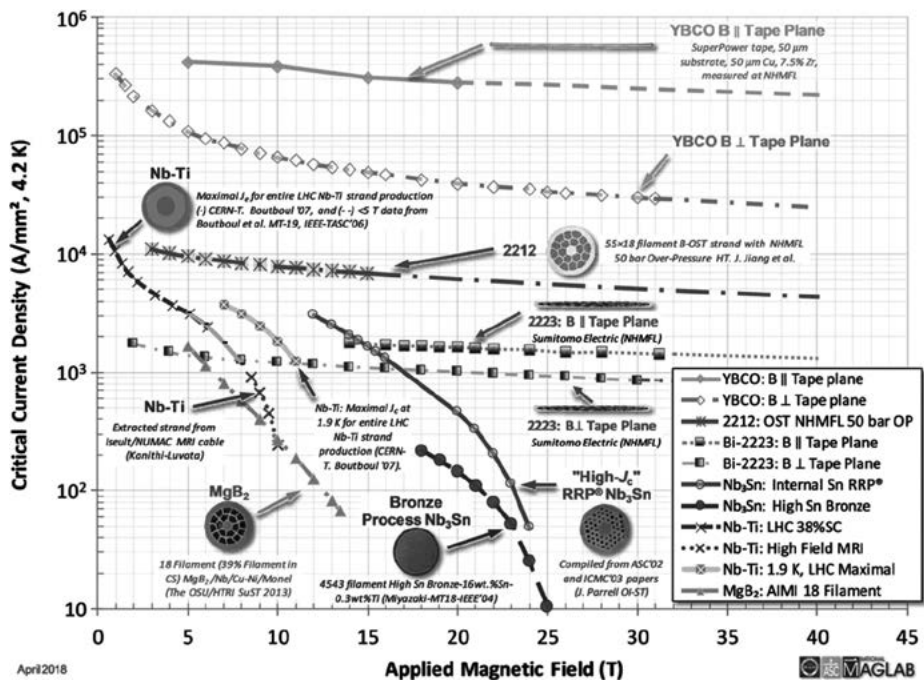


図 4 非銅あるいは超伝導層のみの臨界電流密度 J_c (文献 [5] の図。転載許可)。

1 弱結合と 2 軸配向：2 軸配向とは図 6 の緑色部分で超伝導層の REBCO 結晶の a 軸 [100] 方向, b 軸 [010] 方向を揃えることである。この際、隣り合う結晶の粒界の角度が大きくなると、超伝導電流が流れなくなる。これを弱結合と言う。本線材ではまず MgO 層で 2 軸配向組織をつくり、その上に超伝導層をエピタキシャル成長させて大きな超伝導電流が流れる 2 軸配向組織を実現している。

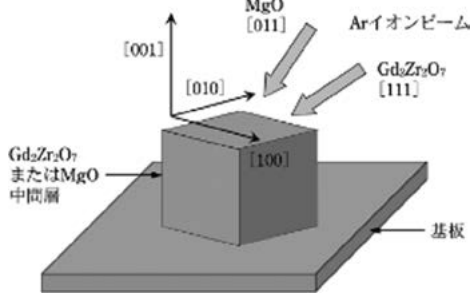
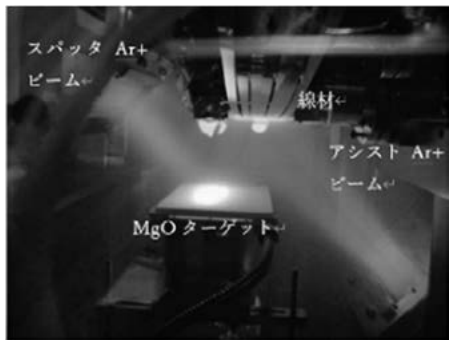


図5 IBAD 蒸着装置 (上) (文献[10]の図6. 転載許可) との原理図 (下) (文献[11]転載許可). Ar⁺アシストビームを蒸着面に照射し, 2軸配向組織を得る. 材料によりその照射角度は異なる.

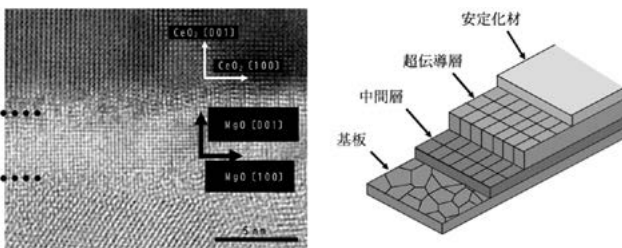


図6 IBAD-MgO上CeO₂層のエピタキシャル成長の様子(左) (文献[13]の図5. 転載許可). とIBAD法による幅広テープ超伝導線材の結晶構造模式図(右) (文献[11]の図5. 転載許可5).

最後にPLD法などによりREBCO超伝導層をエピタキシャル成長させ, 結晶粒界のずれが少ない高J_cのREBCO膜を作製する. 基板がハステロイテープなどの多結晶体でもIBAD法を用いれば, 膜を2軸配向させ超伝導材として実用に十分な電流が流せる.

すなわち, 幅広テープ形状になる理由は, 高いJ_cを得るために2軸配向膜が必要であり, その後結晶方位を受け継ぐエピタキシャル成長の薄膜形成が必要なためである.

MPMT (マルチプルーム, マルチターン) 法: PLD法線材の高速製造, 量産化のため, MPMT法[15]と呼ばれる方法が開発された. 図7のようにレーザー光を光路上の反射ミラーで高速に反復運動させ, レーザービームをターゲット上で動かし, 複数のプルーム (ターゲット材料がガス, イオン化したもの) を発生させる.

これによりIBAD基板上に大面積で高速にREBCO層を蒸着できるようになった. 当初は超伝導相としてYBCOが使われていたが, 長尺検討が進むにつれGdBCOが高速製造に有利であることも分かった[16]. 今は, 77 K, 低磁場応用ではGdBCOが, 高磁場応用では次節の

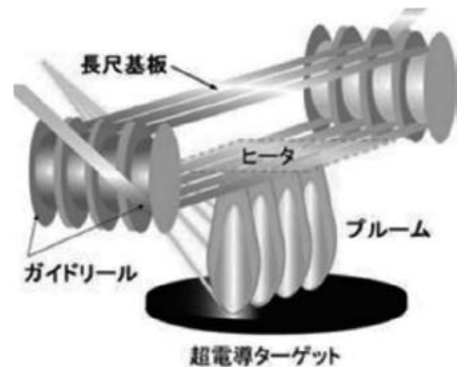


図7 MPMT (マルチプルーム, マルチターン) 法による線材作製 (文献[10]の図. 転載許可).

EuBCO+BaHfO₃の線材が多用されている.

以上のIBAD, MPMT-PLD法を組み合わせた製造一貫工程を図8に示す. ①から④の工程全て真空中の蒸着で幅広線材をReelで巻き取る方式である. なお, REBCO膜の作製法は, 他にCVD法, 真空蒸着法, MOD法があるが, 詳細は文献[17, 18]を参考願いたい.

人工ピン: 磁場中のI_c向上ため, 人工ピンと呼ばれる特異な製法がPLD法で開発された[19]. 超伝導体に抵抗ゼロの電流を流すためには, ピンニングセンター (ピン) と呼ばれる常伝導欠陥が必要である. これが量子化された磁束の動きを止め (ピン止め), 磁場中でのI_cを高める.

当初, 液体窒素中77 Kでは, 磁場を印加するとI_cは大きく減少した. しかし, PLD法で, 図7のターゲットにREBCO相と適量のBaZrO₃を混合して成膜すると, その組織は特異なコラムナー状 (柱状晶) の微細なBaZrO₃析出物となって (図9) 有効なピンとなり, 磁場中のI_cが大幅に向上した[20]. 現在, 最も特性が優れ, 多用されているのはEuBCOとBaHfO₃人工ピンの組み合わせである[21]. 詳しくは, 松本による解説[22]を参考願いたい.

2.3 線材量産化の現状: IBAD-PLD法

小型核融合開発の活発化を受け, REBCO線の量産化が盛んである. 高磁場J_c特性と長尺実績に優れるIBAD-PLD法 (SST社, FFJ (Faraday Factory Japan) 社, フジクラ他) やCVD法 (Superpower/古河社) で年産100 km以上を公表している[23]. 図10は, その代表的な例で



図8 IBAD-PLD法REBCO線材の一貫作製工程 (ISTEC資料から) (ISTEC転載許可. <http://www.istec.or.jp/istec/map&contact.html>).

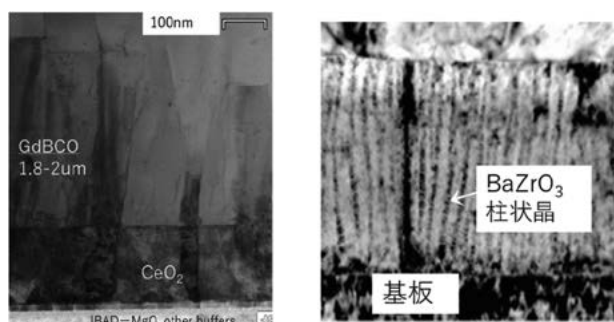


図9 REBCO線材断面の透過電子顕微鏡による組織（文献[10]の図、転載許可）。



図10 (a) SST社(上)と(b)FFJ社(下)の新しい量産新工場(2024年)(SST, FFJ社より転載許可)。

SST社とFFJ社の最近できた大型量産工場である。規模は、年産1000 km以上になる。図11はSST社の典型的な長尺線の特徴の一例である[4]。幅12 mmで500–600 Aの I_c (77 K, 自己磁場下)を持つ。

2.4 課題

REBCO線は上述のように順調に量産化が進んでいるが、大型マグネット応用の検討はまだ始まったばかりであり、特に、高磁場、大電磁力環境下の商用応用では、さらに以下の課題がある[24]。

セラミックスの強度：REBCO線はハステロイとREBCO相の複合体であり、全体としては他の超伝導線以上の高引張強度を持つ。そのため、すでに20–40 Tの高磁場小型

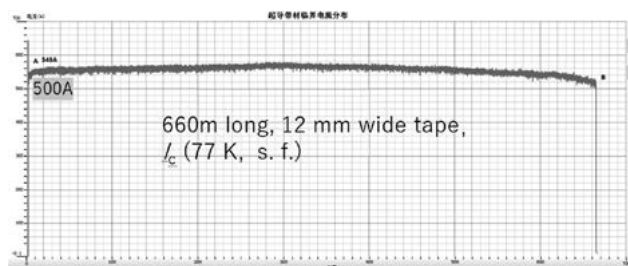


図11 図12 SSTの長尺線の I_c 特性例(SST社[4]より転載許可)。

コイル、超高磁場NMRなどに多数作製されている。

しかしながら、商用核融合用大型マグネットなどでは、より複雑なねじり、ツイストなどの力もかかき、また、その膨大な励磁回数から今後、疲労破壊などの検討も必要になる。

REBCO層は脆いセラミックスであり、長時間運転で信頼性を保つには、本質的強度、靱性改善が必要であるが、そうした研究はまだ少ない。線形破壊力学によれば、脆性材料の破壊に必要な応力(σ_f)は臨界応力拡大係数または破壊靱性値と呼ばれる K_{Ic} に比例し、 K_{Ic} が大きいほど材料中のクラックの進展は進まず壊れにくい。強化の例として、YSZや分散強化型ガラスは良く知られており、後者の例ではマグネシアの添加で K_{Ic} が2–3倍になる[25]。また、最近では第3元素添加型のジルコニアで金属に近い K_{Ic} が得られている[26]。

REBCO層中にこうした“クラックや転位の動きを止める機械的ピン”と I_c を高める“超伝導の人工ピン”(図9)が導入できれば、一石二鳥である。

低温、高磁場での J_c の向上： J_c 向上に有効なピンは、使用する温度、磁場により異なる。従来の研究では77 K、低磁場での J_c 向上が主体であった。今後は、小型核融合が使われる低温、高磁場での再検討が必要である。さらに、最近、低温酸素アニールでREBCO層のキャリア濃度を上げ、4–20 Kの J_c を大幅に向上できるとの報告がある[27]。 J_c を高くできれば超伝導層の膜厚は薄くて済み製造速度は上がり、線材の低コスト化に大きく寄与する。

低コスト化：Hiwatariらによる将来の商用核融合炉(ITER, DEMO炉のあと)のコスト内訳[28]によると、超伝導部分は総額の19%で、そのうち、線材は5%である。他方、CFS社は40万kWの小型核融合機にはREBCO線2万kmが必要という[29]。そこから、CO₂の出ない原子力発電を小型核融合発電の競合として、線材値段を割り出した[24]。その計算では、REBCO線のコストは現在のNb₃Sn線並み[30]、すなわち、現在の数分の1から1桁の低コスト化が必要である。

2.5 まとめ

REBCO線の製造は量産化が数社で始まったばかりである。まだ、改良の余地は大きい。さらに需要が高まれば、将来は、鉄鋼業、自動車産業のようなより進んだ量産、自動化ラインになり、低コスト化も大幅に進む。

これまでの単発的な需要でなく、小型核融合やMRI、マグレブなど定常的需要のあるマーケットを作るため、有益な技術が途絶えないよう需要創出、材料から機器への産業循環システムを育てなくてはならない。

さらに、政策的補助も重要である。Li電池、EVなどのCO₂削減、気候変動抑制による世論、政策援助、今は、九州などでの半導体への投資がその例である。そのおかげもあり、いずれの技術も急速な発展を見ている。

今回の小型核融合の世界的投資と政策的補助により高温超伝導機器の産業化が進展するのは確実である。

謝 辞

本章の執筆では、上海超電導(株)、中部大学の各関係者の協力に感謝いたします。また、筆者の関わった技術の多くは当時のISTEC（財国際超電導産業技術研究センター2016年に閉所）と（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、経済産業省の関係者のおかげであり、各位にこの場で深く感謝いたします。

参考文献

- [1] J.G. Bednorz and K.A. Muller, *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986).
- [2] <https://news.mit.edu/2021/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-energy-0908>
- [3] D.G. White *et al.*, *IEE Trans. Appl. Supercond.* **34**, 0600218(2024).
- [4] <http://shsctec.com/index.php?m=list&a=index&classid=51>
- [5] <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots/>
- [6] M.K. Wu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 908 (1987).
- [7] Y. Yamada *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**, L865 (1987).
- [8] D. Dimos *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 219 (1988).
- [9] Y. Iijima *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 769(1992).
- [10] <http://www.istec.or.jp/tape-wire/labo-tape-wire.html>. IBADのイオンビームは2005年当時のISTEC名古屋研の装置で撮影したもの。
- [11] 熊倉浩明：応用物理 **8**, 392 (2011).
- [12] C.P. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2955 (1997).
- [13] 羽生 智 他：フジクラ技法 **116**, 38 (2009).
- [14] T. Muroga *et al.*, *Physica C* **392-396**, 796 (2003).
- [15] 渡部智則 他：低温工学 **39**, 553 (2004).
- [16] 衣斐顕他：低温工学 **42**, 42 (2007).
- [17] A.P. Malozemoff and Y. Yamada:100 Years of Superconductivity, Chapter 11 “Second Generation HTS Wire”, p689 (CRC press, 2011). 及び和泉輝郎, 柳 長門：プラズマ・核融合学会誌 **93**, 222 (2017). RABiTS法基板, MOD法（化学溶液法）, 真空蒸着法など多数の製法.
- [18] <http://www.istec.or.jp/tape-wire/labo-tape-wire.html> 特に, PLD法, MOD法（化学溶液法）線材の高特性化.
- [19] T. Haugan *et al.*, *Nature* **430**, 867 (2004).
- [20] Y. Yamada *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 132502 (2005).
- [21] H. Tobita *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 062002 (2012).
- [22] 松本 要：応用物理 **77**, 19 (2008).
- [23] 山田 穰：応用物理 **93**, 206 (2024).
- [24] Y. Yamada, The 36th International Symposium on Superconductivity (ISS2023), Takina, Wellington, New Zealand, Nov 28-30, 2023.
- [25] 宮田 昇：材料 **37**, 361 (1988).
- [26] <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-06-28-001>
- [27] A. Stangl *et al.*, *Sci. Rep.* **11**, 8176 (2021).
- [28] R. Hiwatari *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **14**, 1305047 (2019).
- [29] Brandon Sorbom Presentation at International Coated Conductor for Applications 2023, Houston University, US, (2023).
- [30] D. Uglietti, *Supercond. Sci. Technol.* **32**, 053001 (2019).