

超電導が拓く夢の世界を目指して

— 希土類系超電導線材開発の現状と将来展望 —

和泉 輝郎

1986年に発見され、フィバーを巻き起こした高温超電導は今どんな状況に置かれているのか。この論文では、液体窒素中でも超電導を示す希土類系超電導体 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, RE:希土類元素) を用いた線材開発の開発経緯と現状、そして将来展望について解説する。同線材の開発の歴史として、重要な3つの課題を選択し、その解決の過程を紹介した。これらの成果により、数百A/cm幅 (77 K, 自己磁場) の臨界電流特性を持つ数百mを超す長さの線材が販売されるに至り、最近では各種の機器に対応した特殊性能 (磁場中特性等) についても大きな進歩を遂げている。さらに、これらの線材を用いた機器開発が始まっており、早期の実用化が期待される場所である。

キーワード: 超電導、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超電導体、臨界電流密度、人工ピン止め点、交流損失

Towards an ideal world with superconductivity

—Current status and prospects for rare-earth barium copper oxide superconducting tapes—

Teruo IZUMI

We review the history, current status, and prospects of research on rare-earth barium copper oxide ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) coated conductors. Three major issues were addressed to achieve critical current performance for long-coated conductors of several hundred meters. Special functional performances, e.g., in-field critical current, were greatly improved. Applications of coated conductors were also initiated. We expect applications to appear in the near future.

Keywords: Superconductivity, rare-earth barium copper oxide ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) coated conductors, critical current density, artificial pinning centers, AC loss

1 はじめに

1911年オランダのオネス卿によって水銀で発見された超電導現象は、液体ヘリウムの液化研究の過程で見出された^[1]。この超電導とは、電気抵抗がゼロであることから、損失がなく電気エネルギーを送ることができる夢の材料として期待されている。

超電導には、臨界温度 (T_c : 超電導を示す上限の温度)、臨界電流密度 (J_c : 超電導状態を維持できる単位断面積当たりの電流の限界値)、臨界磁場 (H_c : 超電導状態を維持できる磁場の限界値) の3つの臨界条件が存在する。この中で、 T_c および H_c は物性値であり、材料により決定される値である。また、超電導体には、第一種、第二種の二つの超電導体が存在する。第一種超電導体は H_c に到達すると、一気に超電導状態が壊れるのに対し、第二種超電導体では、二つの H_c を有し、下部臨界磁場 (H_{c1}) を超えた磁場で一部の磁束が超電導体内部に侵入するこ

とで比較的高い上部臨界磁場 (H_{c2}) まで超電導状態を維持できる。そこで、実用上は、第二種超電導体で高い T_c および H_{c2} を持つ材料を選択し、高い J_c を実現するための材料開発が進められてきた。結果的に、NbTi および Nb₃Sn 等が MRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴画像) やリニアモーターカー等に用いられている。しかし、 T_c は 20 K 以下であることから、いずれの応用も液体ヘリウム (沸点 4.2 K) の中で使用する形態を取らざるを得ない。液体ヘリウムは、天然ガスの副産物として得られるもので、日本ではほとんどが輸入で得られている。しかし、天然ガスからシェールガスにエネルギー源が移行する中、価格が高騰し、非常に高価であることに加えて、供給が不安定になってきているという問題が起きている。更には、極低温であることで、比熱が非常に小さいことも問題となっている。不測の熱擾乱等により発生、流入した熱により温度が容易に上昇することになり、温度が T_c を超えて超電

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東

Research Institute for Energy Conservation, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: teruo.izumi@aist.go.jp

Original manuscript received June 16, 2018, Revisions received August 27, 2018, Accepted August 29, 2018

導状態が急激に壊れるクエンチと呼ばれる現象を引き起こすことがもう一つの課題として挙げられている。いずれも、極低温が起因の課題であり、高い温度で超電導を発生する材料の発見が長い間望まれていた。

そんな中、1986年、独のベドノルツ博士とミュラー博士により高い T_c を有する新たな材料系の超電導体(高温超電導体)が発見された^[2]。上述の超電導体はいずれも金属材料であったが、彼らが見出したのは $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ という酸化物であった。もっとも、彼らは超電導体の探索が目的ではなく誘電体の開発の過程で、本材料を見出したのである。この材料は、ゼロ抵抗になる温度が10 K程度であり、金属系材料に比べてそれ程高いものではなかったため、当初は、あまり大きなニュースにはならなかった。しかし、東大の田中教授(当時)は、抵抗が落ち始める温度が30 Kを超えているところに注目し、この材料系の周辺の組成を有する材料を調査することで、従来理論(BCS理論)が予言した T_c の限界を超える新しい超電導体が発見したのである^[3]。その後、次々と新たな超電導体が見出され、中には、 T_c が液体窒素の沸点(77 K)を超える超電導体が発見^[4-6]、これまでの応用の限界を超えて大規模で広い応用への展開が期待された。これらの超電導体の中でも $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO, RE: Y等の希土類元素)($T_c \sim 95$ K)や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (BSCCO)($T_c \sim 110$ K)は、高 T_c で毒性を有した元素を含まないことから工業材料として開発の対象とされた。

これらの超電導体を工業材料として利用するには、機器を形成可能な形態である線材等に加工しなければならない。ここで課題となるのが、対象となる超電導体が酸化物である点である。従来の金属材料は、いわゆる、線引き加工技術を適用することにより容易に長尺で均一な線材を作製することが可能であるが、酸化物は延性が乏しく、同様の手法が適用できない。そこで、REBCOに先行してBSCCOにおいて線材化の開発が進められた。BSCCO材料は比較的結晶粒間の滑り特性に優れることから、従来の線引き加工技術を応用することにより線材形態を実現している。原料粉末を銀パイプに充填し、圧延と熱処理、集合化を繰り返す銀シース法と呼ばれる手法で、いち早く高特性を有する長尺線材の作製に成功している^{[7][8]}。一方で、同線材は比較的高温(~ 77 K)での磁場中 J_c 特性や機械的特性に課題を有していた。これらの課題の解消を期待して、本質的な特性として高温磁場中での J_c 特性に優れているREBCO線材の開発が始められた。具体的には、2000年前後からはほぼ同時期に日米の国プロが立ち上がり、本格的な開発が行われた。

REBCO線材の開発は、大別して3つの課題を解決する

ことにより進められた。第一課題としては、線材形態の中でREBCOが有する高い J_c 特性を実現するために必要な2軸配向組織(単結晶のようにすべての結晶軸が一様に配向した組織)の形成技術の開発であった。第二課題では、高 I_c (臨界電流:超電導状態を維持できる電流の限界値、 $J_c \times$ 断面積)特性を有する長尺薄膜を形成する技術による、本格的な長尺線材を目指した開発が行われた。高 I_c 化には、高 J_c 特性を維持した厚膜化の技術が必要である。ここでは、 $I_c \times L$ 積を指標として、いかに高い I_c 特性を長尺線材で実現するかを技術開発が行われた。 $I_c \times L$ 積は、長尺線材の必要要素である超電導特性(I_c)と長さ(L)を同時に示す指標であるだけでなく、コイル化した時の起磁力(アンペアターン)に相当する。その後、第二課題に対する成果を受けて、長尺線材を用いた機器開発が始まり、線材に対する要求は、各機器に対応した特殊な特性、機能へと移っていった。第三課題として現在では、磁場中 I_c 特性や低損失線材等の特殊性能向上技術開発に取り組んでいる。図1には、これらの開発課題を含めた実用化実現までの概念を、表1には、各課題における要素技術項目をまとめた。

この論文では、上述の各課題において、表1に示す要素技術の中で鍵となる技術を選択し、課題解決するために実施した研究開発を概説する。なお、ここでは著者が以前に所属していた国際超電導産業技術研究センター(International Superconductivity Technology Center: ISTEC)、および現在所属する産業技術総合研究所(AIST)が主体的に携わった開発成果を中心に紹介する。ISTECは、上述の高温超電導体の発見(1986年)を受けて1988年に設立され、高温超電導体に関わる研究開発および学会の開催等による普及啓発を目的とした財団法人である。ISTECでは、所属の研究員に加え、民間企業からの出向研究員、更には海外から外国人研究員により産学官共同の研究所として組織され、2016年に解散するまでの約30年の間、経済産業省、NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)等から多くの国家プロジェクトを受託し、多くの民間企業、大学、国研等と共に研究共同体を形成し、世界の高温超電導関連技術の開発をリードしてきた。図1に示した戦略もISTECが中心となり構築し、世界において共有されるようになったものである。

代表的な国家プロジェクトとしては、時系列的に「超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト(第I期)」、「同(第II期)」、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」、「イットリウム系超電導電力機器技術開発(共通基盤技術開発)」等があり、経済産業省、NEDO、およびAMED

表1 各課題に対応する主要要素技術群

課題	要素技術	ブレークスルー技術
高 Jc 基盤技術開発 (第一課題)	<ul style="list-style-type: none"> 配向基板 / 中間層形成技術 イオンビームアシスト蒸着法 配向金属基板 超電導層 / 金属基板反応抑制技術 超電導層内不純物抑制技術 (単相化技術) 金属基板平坦化技術 (欠陥抑制技術) 電気的、化学的安定化技術 	<ul style="list-style-type: none"> 大面積成膜 自己配向化技術 高速配向材料
高性能 長尺線材開発 (第二課題)	<ul style="list-style-type: none"> 高 Ic 特性長尺超電導層形成技術 パルスレーザー蒸着 (PLD) 法 有機酸塩堆積 (MOD) 法 有機酸塩気相蒸着 (MOCVD) 法 特性均一化技術 (組成、膜厚、欠陥抑制等) 機械的高強度技術開発 低コスト技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> マルチブルームマルチターン 基板温度制御 反応機構解析 仕込み組成制御 ガス流制御
機器対応 特殊性能向上 技術開発 (第三課題)	<ul style="list-style-type: none"> 人工ピン止め点制御技術 (磁場中高 Jc 化技術) 高精度スクライビング技術 (細幅加工、ダメージレス、高速等) 高エンジニアリング臨界電流密度化 (金属基板薄肉化) 等方性線材 (低アスペクト比、丸線、等方 Jc(B) 化) 超電導 (低抵抗) 接続技術 	<ul style="list-style-type: none"> 微細人工ピン材料 UTOE-MOD 法 エキシマレーザー加工技術

(国立研究開発法人日本医療研究開発機構) 等からの受託事業であった。前半は線材開発が中心であり、後半に向かって機器開発のウエイトが大きくなっていった。いずれも ISTEK が中心となり企業、大学、国研等と研究共同体を形成し開発に当たってきた。現在も、AIST において、「高温超電導実用化促進技術開発」に参画し、線材の高度化の技術開発を続けている。

2 第一課題 (高 Jc 基盤技術開発)

REBCO は、ポテンシャルとして Jc 特性に優れているものの、結晶粒の配向性 (結晶方位の揃い方) に大きく依

存することが知られている。したがって、線材形態の中でいかに 2 軸配向を実現するかが、最初の大きな課題であり、これを実現するためにさまざまなアプローチが試みられた。当初は、BSCCO で成果を挙げた銀シース法による線材化が行われた。同法によって、線材の形態を実現することができたが、結晶粒の配向として 2 軸配向を得ることが困難であることに加え、クラックが発生するなどの理由で液体窒素中 (77 K) の自己磁場 (直線状に配置した線材に電流を流すことにより発生する磁場) 下において 10^3 A/cm² 程度の Jc 特性を得るのが精一杯であった^[9]。実用上は、少なくとも 10^5 A/cm² (77 K, 自己磁場) の Jc 特性

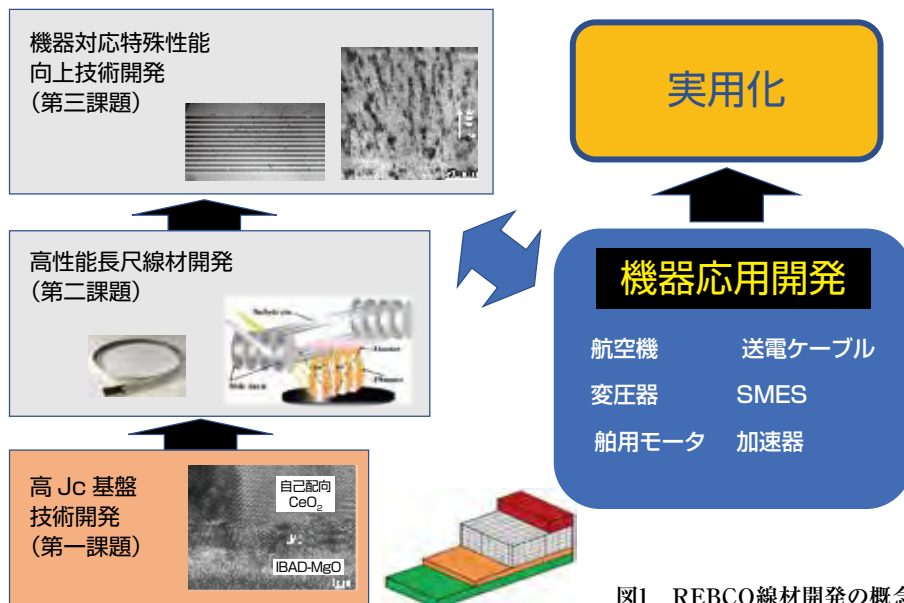


図1 REBCO線材開発の概念

が必要と考えられていることから大幅な改善が必要であった。その後、幾つかの2軸配向を実現可能な手法が開発され、一気に特性改善に繋がった。いずれも、金属基板上に複数の中間層を配した積層構造の形態(図2)の中で、特殊な処理を施した金属基板もしくは特殊な成膜法による中間層により2軸配向性を付与する方法である。本誌では、世界中でもっとも多く採用され、日本においても主流になっているイオンビームアシスト蒸着法 (Ion Beam Assisted Deposition法: IBAD法)^{[10][11]}を紹介する。基本は、ターゲットと呼ばれる対象物質のバルク体にイオンビームを照射することにより成膜蒸着子を金属基板に向かって叩き出し、基板上に堆積させることで成膜する手法である。IBAD法は、この成膜中に、金属基板に向かってもう一つのイオンビームを所定の角度で照射する手法である(図3)。角度は、材料により異なり、当初のZrO₂系の材料では法線方向から55°、最近用いられているMgOでは45°で、面内配向が得られる。この角度は、いずれも基板上の2軸配向組織に対し、材料の最密充填面に沿った角度で、配向化機構としては、イオンチャネリング機構(基板に向けたイオンビームで形成されるフレームにより通過できる方位を有した格子を限定して蒸着することで配向組織を形成する機構)

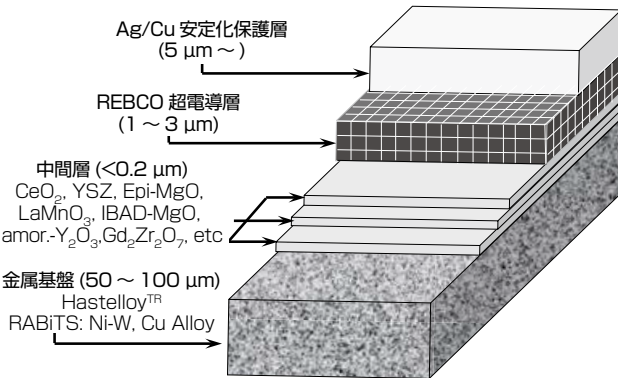


図2 REBCO線材構造の模式図

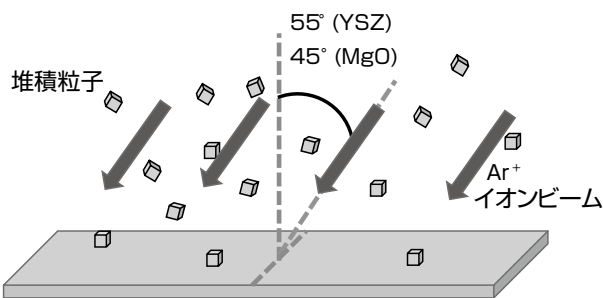


図3 IBAD法の概念図

やボンバリング機構(基板に向けたイオンビームにより特定の方位以外の結晶を弾き出すことで配向組織を形成する機構)が提案されている^[11]。本法は、配向性を有しない基板上においても、高度に2軸配向を実現する有効な手法であり、金属基板上におけるREBCO超電導線材で初めて77 K、自己磁場中での J_c 特性が1 MA/cm²を超えることになった。一方、成膜蒸着子を選択する手法であることから成膜速度が遅いことで線材の製造速度が遅い(当初:<1 m/h)ことが大きな課題であった。この課題に対し、ISTECにおいては、まず、以下に示す二つの手法により解決を図ってきた。

一つは、蒸着面積を拡大し、成膜ターン数を増やすことで移動速度を向上させる手法である。これは、国プロの中で装置の開発を行うことで実施した。二つ目は、配向度を向上させる新たな現象の発見である。IBAD法によりある程度の2軸配向性を与えた後に、アシストビームを用いない通常の物理蒸着法によりCeO₂を成膜すると急激に配向速度が向上する「自己配向化」という現象である^[12]。他の材料でも自己配向化は見られるが、下地にIBAD層が存在することは必要条件であり、その配向化機構についても最近明らかにされつつある^[13]。

加えて、米国において、IBAD法において高速化にMgOが適していることが見出された^[14]。ISTECは、日本でもいち早く、この成果を取り込み、上述の2手法と合わせることで、従来IBAD法で、面内配向度($\Delta\phi$)を10°以下にするのに3時間程度かかっていたものが、数分で $\Delta\phi \sim 5^\circ$ の面内配向度を得ることができるようになり(図4)、製造速度としても50 m/hを超え、律速プロセスではなくなった。また、配向度の向上により、 J_c 値も向上し、数 MA/cm²(77 K、自己磁場)を超えるようになり、1 μmの膜厚で数百 A/cm幅の臨界電流(I_c)を得ることができ

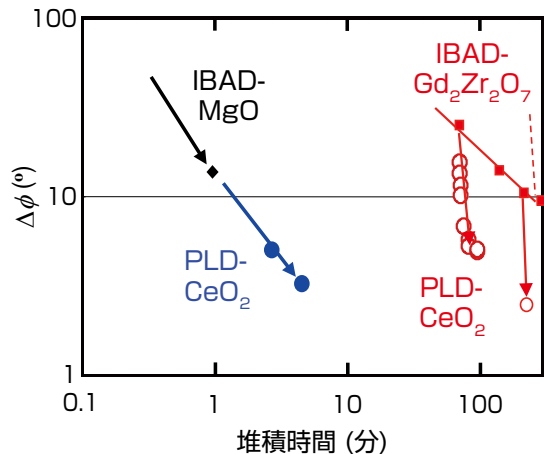


図4 IBAD層上における自己配向現象

るようになり、線材としての魅力を証明するステージに到達した。

3 第二課題 (高性能長尺線材開発)

上述の通り、第一課題の解決により、REBCO 線材において高 J_c を実現するために必要な2軸配向組織を実現した。本項では、この配向基板の上に形成する超電導層の成膜技術の開発に関して紹介する。

超電導層の形成技術としては、気相法と液相法に大別される。気相法としては、パルスレーザー蒸着 (Pulsed Laser Deposition: PLD) や有機酸塩気相蒸着法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD) 等があり、化学液相法では、有機酸塩堆積 (Metal Organic Deposition: MOD) 法が代表的な手法である。ISTEC (AIST) では、PLD 法とトリフルオロ酢酸塩 (TFA) を原料とした MOD 法を選択して開発を進めてきた。以下には、両法の特徴と主な成果を紹介する。

PLD 法は、ターゲット材に対して、エキシマレーザを照射し、励起させた蒸着子を基板材上に堆積させる方法で、真空中で成膜することから不純物が混入しにくく、高品質な膜を形成しやすい手法である。また、エキシマレーザのエネルギー密度が高いことからターゲットから膜への転写性が高く、複雑な組成を厳密に制御しなければならない材料には有効であり、今回対象としている RE 系超電導材料には適した手法と言える。実際、線材開発の初期から、比較的高品質な膜を形成することに成功しており、中間層の2軸配向性の向上に従って順調に J_c 特性が改善されてきた。一方で、装置が高価であることから、線材のコストが高くなる課題がある。この課題を解決するためには、特性向上とともに歩留まり向上、製造速度向上が必要とされてきた。このような背景の下、ISTEC において開発されたのがリール式成膜法におけるマルチプルーム・マルチターン法である。プルームとは、レーザで励起された蒸着子の塊で、ターゲットから炎の様に立ち上がっている。高速成膜を実現するために、大型レーザ (例えば 200 W) を導入し、大パワーで大量の励起蒸着子を基板に供給する。この場合、一つのプルームでは、過飽和度が大きくなりすぎて、配向中間層上でのエピタキシャル成長が維持できなくなり、2軸配向を有した超電導膜を実現できなくなる。そこで、パルス状のレーザ照射位置を分散させ、複数のプルームに分割し、それぞれのプルームによる供給量を制限するマルチプルーム法を開発した (図5)^[15]。これにより、過飽和度を制御することに成功し、配向膜で高 J_c を維持したまま高速化することに成功した。一方で、マルチターン法は、高速化と高収率化の方策である。上述のプルームは、ター

ゲットから広がりながら基板に向かって飛んでいく。この際のプルームの広がり、基板の幅 (~10 mm) よりも大きく、この中で基板を移動して成膜する場合、基板以外の領域の原料を無駄にしていることになる。そこで、テープをずらしながらターンさせるマルチターンシステムを導入した。これにより、広い領域の原料を回収し、同じ膜厚を成膜するための移動速度を得ることができた。

さらに、高 I_c 化にも課題があった。PLD 法は上述の通り、高 J_c に適した手法である。確かに、膜厚が薄い領域では高い J_c を得ることが可能であるが、膜厚が増加するに従って J_c が低下することが一般的で、高 I_c 化の障害となっていた。この課題に対し、我々は、原因として膜厚増加に伴って表面の平坦性の低下により輻射率が増加し、結果として表面温度が低下することであると推察した。我々の PLD 装置では、テープの背面から加熱しており、この入熱量と超電導膜表面からの放熱量とのバランスで膜の温度が決められる。したがって、膜表面の輻射率が増加することで放熱量が増加し、表面温度が低下すると考えた。対策として、膜厚増加に応じて基板制御温度を上昇させるパターンで制御した温度環境の下、成膜することで厚膜時においても高い J_c を維持することに成功した^[16]。これらの高速化、高特性化の結果として比較的早い段階で、500 m 長で 300 A/cm 幅の線材作製に成功した (図6)^{[17][18]}。

MOD 法は、原料溶液を塗布し、電気炉で焼成する工程により超電導膜を形成するプロセスで、高価な真空チャンバーや熱源が不要であることから低コストなプロセスとして知られている。ところが、一般的な MOD 法は、熱分解により反応が決定されることから膜内での温度に差異がない場合、エピタキシャル成長が困難な手法であり、今回の対象である REBCO 超電導膜には不向きな手法であった。ところが、原料に TFA を用い、中間生成物として BaF₂ を經由することでエピタキシャル成長が可能となり大きな進展を見せた^[19]。本系における超電導層の形成には式 (1)

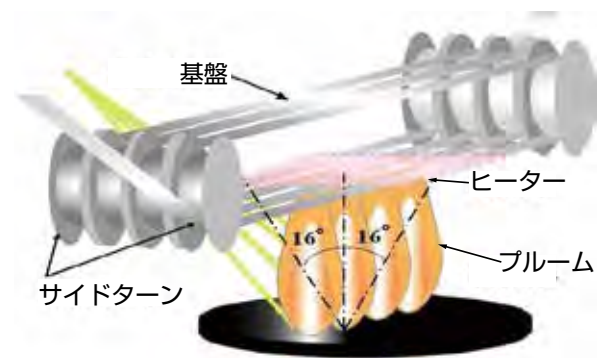
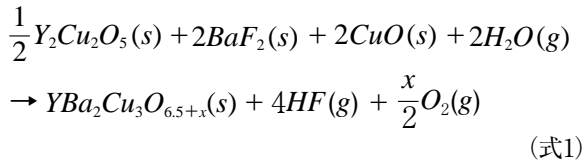


図5 マルチプルーム・マルチターンPLD法の概念図

に示す通り、BaF₂ に水を供給し BaF₂ と反応させることが必要になる。



その際、反応生成物として HF ガスが発生する (図7)。このコンバージョン反応がエピタキシャル成長を可能としているのである。我々は、まず、反応機構の解析を行い、HF ガスの排出速度 (V_g) や水蒸気分圧 (P_{H_2O})、全圧力 (P_t) 等により成長速度が決定されることを見出した^[20]。

$$R \propto \frac{\sqrt{V_g} \sqrt{P_{H_2O}}}{P_t} \quad (式2)$$

また、本法においても I_c 向上は重要な課題であり、そのための技術開発も精力的に進められた。代表的な手法としては、出発組成の制御による高特性化である。MOD 法では、当初、エピタキシャル成長する際に、完全な反応を実現するのは困難で、中間生成物 (Y₂Cu₂O₅、BaF₂、CuO 等) が超電導層内に取り込まれることが多かった。その場合、

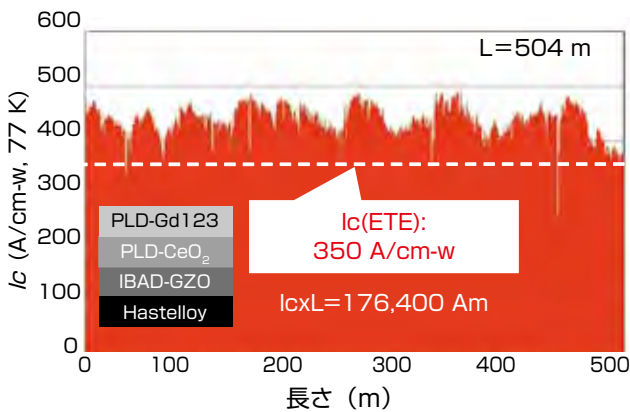


図6 IBAD-PLD線材における長尺線材^[18]

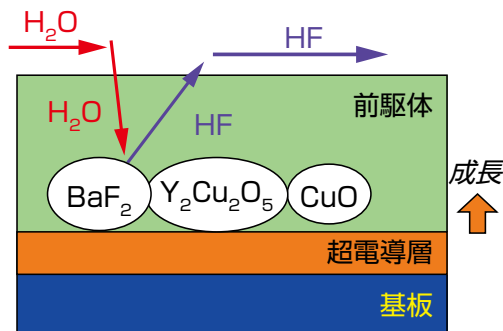


図7 TFA-MOD法における反応を示す概念図

Y₂Cu₂O₅ や CuO は、球状になり電流阻害因子とはなり難いのにに対し、Ba 化合物は粒界に存在しやすく、劣化しやすい性質を持つことから特性低下の原因となると考えられた。そこで、我々は、出発組成を Ba 不足に変更することにより安定して高特性を実現することに成功した^[21]。また、MOD 法においては、前駆体である仮焼膜の下部より反応が進むため表面の性状が大きく変わらないことから、PLD 膜で見られた厚さによる温度変化がなく、比較的膜厚に対する J_c の低下が発生し難い系であった。これにより、厚膜化による高 I_c 化を実現することができた^[22]。

長尺化に関しては、大きく二つのプロセスによる開発が進められた。一つは、リール (Reel-to-Reel: RTR) 式という手法で、電気炉内にリールから供給された前駆体膜付テープが移動しつつ熱処理を行うものである。本手法は、一旦定常状態を作り出せば安定して反応制御が可能であり、長尺特性の安定化に適した手法である一方、製造速度に課題がある。もう一つは、バッチ (Batch) 式である。これは、ドラムに前駆体膜を巻き付け大型炉内で一括して熱処理する手法であり、製造速度に優れる一方、成長環境 (温度、ガス流等) の場所依存性を小さくすることが課題となっていた。いずれの手法も上述の基礎検討に基づいて、温度パターンやガス流の制御の適正化を図り、図8に示す高特性長尺線材の作製に成功している^{[18][23]}。

いずれも、ISTEC と線材メーカーが共同で開発にあたり、長尺線材を実現してきた。PLD 法に関しては、主に (株) フジクラと、TFA-MOD 法に関しては昭和電線ケーブルシステム (株) との共同研究で、NEDO プロジェクトの中で目覚ましい成果を上げた。一方、同時期に米国においても線材開発の大規模な国家プロジェクトが実施され、結果的に世界の RE 系超電導線材の開発は、日米が牽引することに

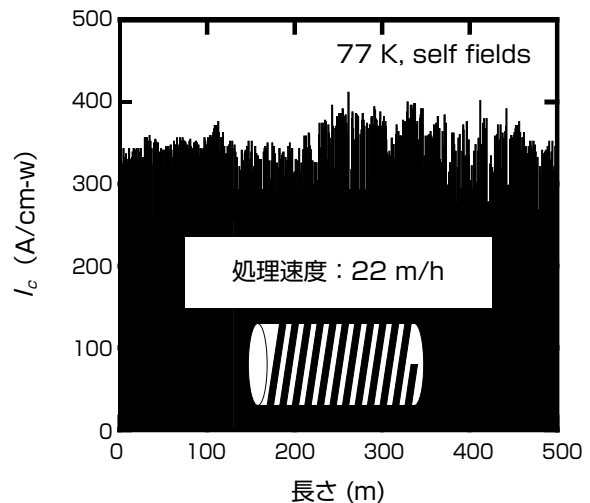


図8 IBAD-MOD線材における長尺線材^[18]

なった。ここでは、特性と長さを同時に示す $I_c \times L$ 積を指標に開発が行われた。図9には、 $I_c \times L$ 積の推移を示す^[24]。日米の大規模な国家プロジェクトが始められた2000年頃を境に急激に進展を遂げている。また、その担い手は、日米の研究者であったことが見て取れる。日米競争においては、国際会議等を通じたアカデミックな競争はもとより、年度開始時期のずれに伴う相互の予算獲得にも大きな影響を与えた。結果的には、大きな相乗効果を生み出し、劇的な進展を見せた。その後、韓国の SuNAM 社やロシア出資の SuperOX 社等が猛追しており、いずれも数百 m で数百 A の I_c を持つ線材を販売するまでに至っている。

4 第三課題 (機器対応特殊性能向上技術)

前項までの開発において一定の性能を持つ線材が百 m 以上の長さで製造可能になったことを受けて、機器の試作、開発が開始された。対象となる機器としては、送電ケーブル、変圧器、SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage: 超伝導磁気エネルギー貯蔵装置)、限流器等の電力応用機器、MRI や重粒子線加速器、NMR (Nuclear Magnetic Resonance: 核磁気共鳴) 等の医療応用機器、発電機、モータ等の移動機器応用等、さまざまな分野にわたっている。

これらの応用において、其々の運転環境の違いから線材に求められる仕様は必ずしも一様ではない。前項までの開発では、特性としては自己磁場中での I_c が指標となっていたが、付加的な必要機能として上述の機器対応機能があ

る。例えば、磁場を用いた応用である、モータ、発電機、MRI、加速器等においては、磁場中での高い I_c が必要であると共に多くの場合、磁場に伴って発生する機械的応力に耐えうる特性も求められる。また、ケーブル、変圧器等の交流を用いた応用においては、交流損失の低減が課題となる。交流損失とは、超電導体に対し交流を印加した際に移動する鎖交磁束によって生じる損失であり、 J_c と磁束の移動距離 (線材幅) に依存する。この特性は、モータの電機子コイルにおいても同様であり、さらに起源としては MRI 用コイルの遮蔽電流の影響を抑制するための方策としても同様である。以下には、磁場中での I_c (J_c) 特性向上技術と低損失線材の開発に関して解説する。

磁場中の J_c 特性の向上には、人工ピン止め点の導入が有効であることは知られている。量子化された磁束を捕捉することからコヒーレント長と同じオーダーの細かい非超電導層の分散が求められる。具体的には、REBCO 系材料においては、nm オーダーの人工ピンの分散が必要となる。REBCO 薄膜線材に対しては、主に気相法のプロセスで人工ピン導入技術の開発が始められた。Y₂BaCu₃ 相^[25]、BaZrO₃^{[26][27]}、Y₂O₃^[28] 等、さまざまな材料が対象となったが、ナノサイズに微細でかつ、REBCO の c 軸に配向したロッド状の人工ピン (ナノロッド) が導入可能な BaMO₃ (M=Zr, Ce 等) で大きな成果を挙げた。元来、REBCO 材料は、その構造を反映して、特性にも大きな異方性を有する。 J_c 特性の印可磁場角度依存性では、外部磁場が超電導結晶方位の a 軸あるいは b 軸に平行に印可された環

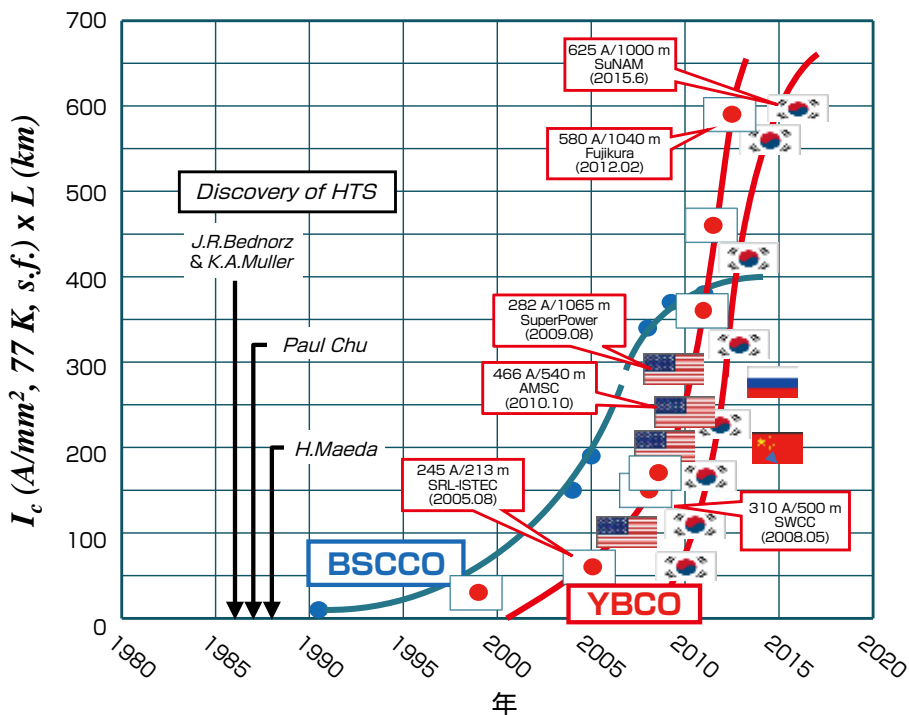


図9 IBAD法の概念図^[24]

境での J_c 特性である $J_c(B//ab)$ 値に対し、外部磁場が超電導結晶方位の c 軸に平行に印可された環境での J_c 特性である $J_c(B//c)$ 値が著しく低い挙動を示す。したがって、上述のナノロッドの導入により、本質的に J_c 特性が低い $J_c(B//c)$ が改善される効果が得られた。^{[25][26]}この分野では、高い結晶性を維持しながら、いかに細かい非超電導層を分散させるか、その組織制御技術が開発課題であった。この課題に対し、我々は最近、より効果的な人工ピン材料として、BaHfO₃を見出した^[29]。その際、超電導層としてもEuBCOとの組み合わせで厚膜領域まで $J_c(B)$ 特性を維持した線材の形成が可能となり、大きな磁場中 I_c 特性を実現することができた(図10)^{[30][31]}。上記の組み合わせでは、部分熔融成長することから、高い結晶性を実現すると共に、BaHfO₃の長さや分散状況が厚さに依存しない特徴が確認されており、これが厚膜超電導層においても高い $J_c(B)$ 特性を維持している原因であると考えられている。この組み合わせで、長尺化の検討も行われており、図11には、

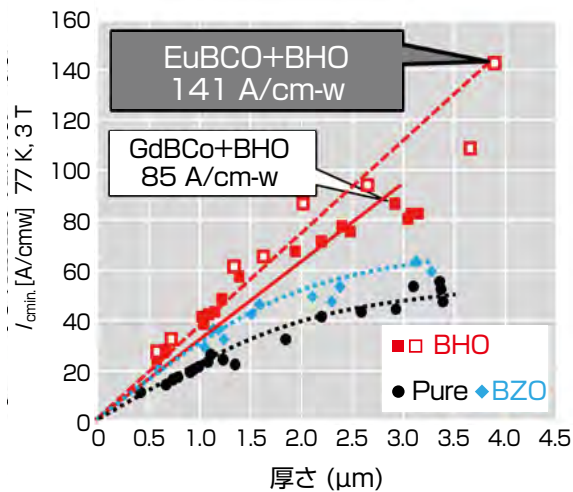


図10 PLD膜における磁場中 I_c 特性の膜厚依存性に対する人工ピン止め点材料の影響^[31]

EuBCO+BHOの厚膜(3.5 μm)条件で、ほぼ短尺試料と同様の特性を得ている。さらに、(株)フジクラでは、上記の組み合わせを採用して製造レベルの線材で高い特性を報告している。

一方、低コストプロセスとして期待の大きいTFA-MOD法においても上述の気相法と同様に人工ピンの導入プロセスの開発を行ってきた。代表的な材料としては、気相法と同様にBaZrO₃が有効であることが確認されている^[32]。ただし、その形態は、気相法のナノロッドとは全く異なり、球状(ナノ粒子)を呈している。これは、膜の成長機構に起因するものである。PLD法等の気相法では、蒸着子がターゲットから成長界面に供給され、ほぼ同じ界面上で超電導層と人工ピン止め点が成長するシステムであるのに対し、TFA-MOD法では、塗布膜を低温で焼成した仮焼膜が中間層上に存在し、この中で超電導層が生成する前に、人工ピン材料が核生成、成長することから中間層との方位関係を有していない。その後、中間層上から超電導層がエピタキシャル成長する際に前方に分散しているナノ粒子人工ピンが取り込まれながら成長している。したがって、ランダムで方位関係を持たないナノ粒子が、配向した超電導層内に分散する形態を取るようになる(図12)。この形態の違いを反映し、磁場の印加方位に対して等方的な向上効果を示す。しかし、微細化することが困難であり、気相法の J_c

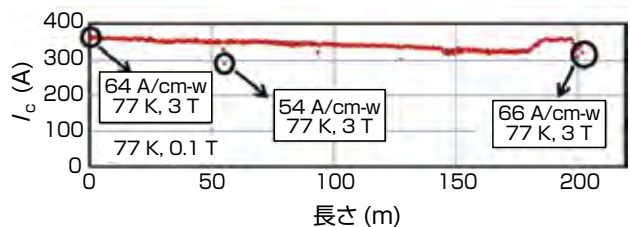


図11 人工ピン止め点を導入したPLD長尺線材^[31]

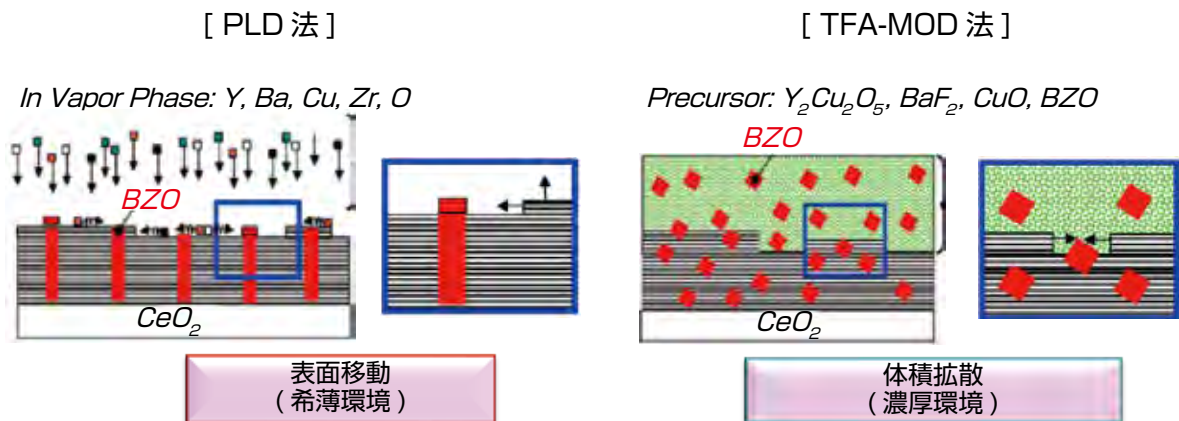


図12 PLD法及びTFA-MOD法における人工ピン止め点入り膜の異なる成長機構

(B) に比べて低い値となっていた。これに対し、我々は、まず、熱処理条件の適正化による微細化技術の開発を行った^[33]。この方法では、中間熱処理と呼ばれる仮焼と本焼の中間温度で一定時間熱処理をすることで、事前に必要な相変態を完了させ、人工ピン止め点をより低温で核生成・成長させる効果があると考えられている。この効果として、成長が抑制され、小さな人工ピン止め点を実現している。さらに、最近では、塗布膜厚を極薄化 (150 → 30 nm) することで、劇的に微細化することに成功した^{[34][35]}。この方法は、Ultra-Thin Once Coating (UTOC) MOD 法と呼ばれ、MOD 法の磁場中特性を大きく改善する。さらに、人工ピン材料を BaZrO₃ から BaHfO₃ に変更し、添加量を増加 (10 → 25 mol%) させることで、気相法による線材の磁場中 J_c 特性を超える 4 MA/cm² (65 K, 3 T) を実現した^[36]。

交流損失低減技術に関しては、原理的に、フィラメント化することで損失低減が可能であることが分かっていた。金属系超電導では極細線化した線材を束ねて撚ることによる低損失化が図られているが、積層構造を持つテープ線材では極細線化後のハンドリングが容易ではなく、異なる技術の開発が必要であった。この課題に対し、まずは、積層構造の中で基板を切り離すことなく、超電導層を細線化するスクライビング技術の開発を行った。世界的にも幾つかの異なる手法が提案されているが、我々は、線材の表面に樹脂系のテープを貼付し、溝を作るところのみを熱レーザーで細く融かし、その後、化学的にエッチングする手法を開発した^[37]。この手法により、長尺のスクライビング加工が可能になり、100 m 級の分割加工処理を実現した (図 13)^{[31][38]}。ところが、この手法においては、溝幅が不均一であると共に、オーバーエッチ部が存在するとそこから剥離が発生してしまう課題を有していた。そこで、液体を使用することなく、エキシマレーザーを用いて微細加工するスクライビング技術の開発を行った^[39]。この手法では、溝幅が

一定であるだけでなくより細い幅 (100 → 30 μm) での加工が可能となった。加えて、重要なことは、このスクライビング線材は、線材レベルでの交流損失低減は可能でも、応用に供する巻き線コイル形状ではその効果が失われてしまう。これに対し、特殊な巻き線技術によってこの損失低減効果を、コイル形状でも実現することに成功し、変圧器や全超電導モータの電機子に適用し、その原理検証を実施するまでに至っている^{[40][41]}。

5 今後の展開

上記の通り、REBCO 超電導線材は、当初、その製作性の難易度の高さから高特性で長尺の線材を実現することが困難であったが、高度に配向した中間層組織の実現や超電導層形成技術の開発、人工ピン止め点導入、更には細線加工技術の開発等により飛躍的な進歩を遂げている。これを受けて、送電ケーブル、変圧器、限流器、SMES、船用モータ、MRI、加速器等の開発が始められている。いずれも、超電導線材による機器を製作し、所定の性能を確認する等の成果は上げているものの残念ながら、これまで実用化に至った機器はないのが現状である。

その主な理由として、以下の3点が考えられる。まず、線材コストの高さである。作製方法が複雑でコスト高になりやすい REBCO 線材においては、特性向上によって使用線材量を減らせることによるコスト低減が期待できるが、エネルギー回収・保護の観点から1本の線材に流せる電流量には限界がある。一般的に、運転電流としては700～800 A/cm 幅が限界で、負荷率を考えると臨界電流としては1300～1500 A/cm 幅が上限となる。したがって、各機器の運転温度、運転磁場の環境下でこの臨界電流まで到達してなければ、運転電流を向上させることで実質的な低コストが図られる。現状では、50 K 以下で外部磁場が1～2 T の条件下ではすでに上記特性を満たしているが、期待される高温 (例えば液体窒素温度: 65～77 K) で中

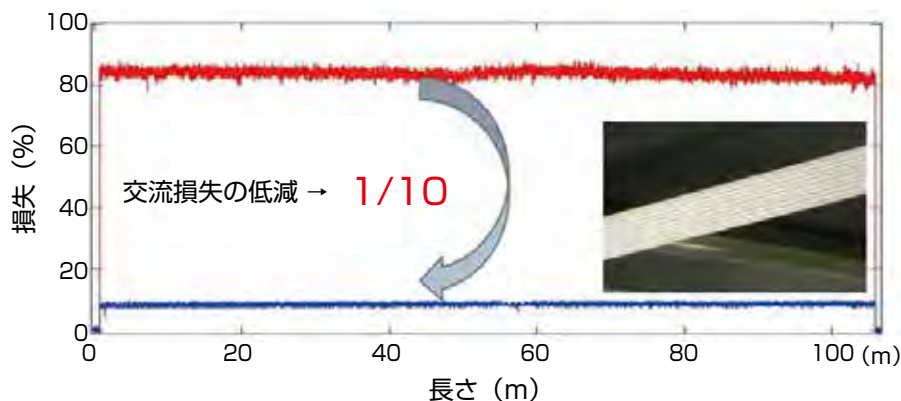


図13 スクライビング技術による100 m級線材の低交流損失化^[31]

高磁場 (3 T 以上) では、依然として開発が必要である。

もう一つのコスト高の原因は、歩留まりの低さである。根本的に歩留まりを向上させるには、均一性の向上が必要であるが、km オーダーの線材において細幅線材でか所も特性低下部を持たずに作製することは容易ではない。そこで、リペア技術等のリカバリーが可能で、安定性を向上させる技術が望まれるところである。

超電導機器が実用化に至っていない二つ目の理由は、既存技術に対する圧倒的な優位性を確保できていないことである。すでに、機能が検証できている機器は多いものの、それが絶対的でなければ、ユーザーは実績のある既存技術を選択する。したがって、例えば、超電導機器でなければ実現できないこと、もしくは、その機器部位だけでは大きな優位性は見いだせないが、超電導機器の導入により建築物が大幅に小さくて済み、その費用メリットが圧倒的であるなどの明らかな優位性が、少なくとも初期の技術導入時には必要であると考えられる。

三つ目の重要な要素は、エンドユーザーの本気度である。もちろん、これは二つ目の理由との連動で、圧倒的な優位性があつた上で、ユーザーが現状もしくは近未来に必要な技術で、自らが参画して開発する本気度が必要である。この論文で対象としている、REBCO 超電導線材は、多くの利点による大きな魅力を持っているが、同時に幾つかの難点も抱えている。代表的な項目としては、テープ線材に起因した製作性の低さである。丸線に比べて加工性が劣ることから複雑な形状のコイル化等の加工に難点があることは事実である。一つの方策として、丸線化する技術も試みられているものの均一性の確保と連動して容易ではない。したがって、ある制約の下での機器開発を行う中で、単なる金属線材の置き換えではなく、超電導線材ならではの構造、運転方法等を検討する必要があると考えられる。

世界中で多くの技術者により開発が進められているが、現状では、容易に進まない中、著者はこれを打破する可能性のある応用として電気推進航空機への応用展開に期待している。航空機業界では、CO₂ 削減要求に応えるためにジェットエンジンによる推進から、電気推進への移行が求められている。しかし、常電導 (鉄と銅) で電動化を進めると、特に中大型機では、著しく重くなることから、航空機として不利であることが分かっている。そこで期待されているのが超電導技術を用いた電気推進システムである。全超電導発電機やモータ、ケーブル等をすべて超電導化し、軽量・高出力推進システムを構築するアイデアである。航空機全体が高価であることから、線材のコスト比が小さくなり、線材コストが大きな問題にならない可能性がある。優位性としても超電導化以外に大型航空機は難しいとされ

ていることからユーザーの意思が伴えば、有力な候補となり得ると期待される場所である。

いずれにしても、現状を俯瞰すると高温超電導技術は、新技術が通る「死の谷」を迎えていると考えられる。この状況を打破するためには、上記の課題解決による最初の実用化実績を達成し、実用上での有効性を世に示すことが本当の意味で超電導技術の広い展開に重要であると考えられる。

謝辞

この論文で解説した成果の一部は、経済産業省、NEDO、AMED からの支援を受けて実施したものです。

参考文献

- [1] H. K. Onnes: The superconductivity of mercury, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 122, 124 (1911).
- [2] J. G. Bednorz and K. A. Müller: Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, *Z. Phys. B*, 64, 189–193 (1986).
- [3] H. Takagi, S. Uchida, H. Obara, K. Kishio, K. Kitazawa, K. Fueki and S. Tanaka: Magnetic susceptibility of high- T_c superconducting oxides (La, A)₂CuO₄ (A=Ba, Sr), *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26 (4), L434–L436 (1987).
- [4] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang and C. W. Chu: Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure, *Phys. Rev. Lett.*, 58 (9), 908–910 (1987).
- [5] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: A new high- T_c oxide superconductor without a rare earth element, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27, L209–L210 (1988).
- [6] L. Gao, Z. J. Huang, R. L. Meng, P. H. Hor, J. Bechtold, Y. Y. Sun, C. W. Chu, Z. Z. Sheng and A. M. Hermann: Bulk superconductivity in $Tl_2CaBa_2Cu_2O_{8+\delta}$ up to 120 K, *Nature*, 332, 623–624 (1988).
- [7] S. Kobayashi, T. Kaneko, M. Umeyama, K. Hayashi and K. Sato: Transport critical current density of Bi-2223 tape, TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan), 32 (9), 415–421 (1997).
- [8] S. Kobayashi, T. Kaneko, N. Ayai, K. Hayashi, H. Takei and R. Hata: Development of Bi-2223 superconducting wires, *Physica C*, 357–360, 1115–1118 (2001).
- [9] M. Nagata, K. Ohmatsu, H. Mukai, T. Hikata, Y. Hosoda, N. Shibuta, K. Sato, H. Hitotsuyanagi and M. Kawashima: Development of high T_c superconducting wire by powder method, *Advances in Superconductivity*, 377–380 (1989).
- [10] Y. Iijima, N. Tanabe, Y. Ikemoto and O. Kohno: Biaxially aligned YBa₂Cu₃O_{7-x} thin film tapes, *Phys. C*, 185–189, 1959–1960 (1991).
- [11] Y. Iijima, K. Kakimoto, K. Takeda and T. Saitoh: Long length IBAD process of fluorite type for Y-123 coated conductors, *Proc. Int. Workshop on Superconductivity*, Honolulu, HI, 47 (2001).
- [12] T. Muroga, H. Iwai, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saito, T. Kato, Y. Sugawara and T. Hirayama: Pulsed laser deposition method-CeO₂ buffer layer for YBCO coated conductor, *Physica C*, 392–396, 796–800 (2003).
- [13] T. Taneda, M. Yoshizumi, T. Takahashi, R. Kuriki, T. Shinozaki, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saitoh, R.

- Yoshida, T. Kato, T. Hirayama and T. Kiss: Mechanism of self-epitaxy in buffer layer for coated conductors, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 23, 6601005 (2013).
- [14] C. P. Wang, K. B. Do, M. R. Beasley, T. H. Geballe and R. H. Hammond: Deposition of in-plane textured MgO on amorphous Si_3N_4 substrates by ion-beam-assisted deposition and comparisons with ion-beam-assisted deposited yttria-stabilized-zirconia, *Appl. Phys. Lett.*, 71, 2955–2957 (1997).
- [15] A. Ibi, H. Fukushima, Y. Yamada, S. Miyata, R. Kuriki, K. Takahashi and Y. Shiohara: Development of long GdBCO coated conductor using the IBAD/MPMT-PLD method, *Supercond. Sci. Technol.*, 19 (12), 1229–1232 (2006).
- [16] A. Ibi, H. Iwai, K. Takahashi, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada and Y. Shiohara: Investigations of thick YBCO coated conductor with high critical current using IBAD-PLD method, *Physica C*, 426–431, 910–914 (2005).
- [17] K. Kakimoto, M. Igarashi, S. Hanyu, Y. Sutoh, T. Takemoto, T. Hayashida, Y. Hanada, N. Nakamura, R. Kikutake, H. Kutami, Y. Iijima and T. Saitoh: Long RE123 coated conductors with high critical current over 500 A/cm by IBAD/PLD technique, *Physica C*, 471 (21–22), 929–931 (2011).
- [18] T. Izumi and Y. Shiohara: R&D of coated conductors for applications in Japan, *Physica C*, 470 (20), 967–970 (2010).
- [19] A. Gupta, R. Jagannathan, E. I. Cooper, E. A. Giess, J. I. Landman and B. W. Hussey: Superconducting oxide films with high transition temperature prepared from metal trifluoroacetate precursors, *Appl. Phys. Lett.*, 52 (24), 2077–2079 (1988).
- [20] T. Honjo, Y. Nakamura, R. Teranishi, Y. Tokunaga, H. Fuji, J. Shibata, S. Asada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saitoh, A. Kaneko and K. Murata: Fabrication and growth mechanism of YBCO coated conductors by TFA-MOD process, *Physica C*, 392–396, 873–881 (2003).
- [21] T. Izumi, M. Yoshizumi, J. Matsuda, K. Nakaoka, Y. Kitoh, Y. Sutoh, T. Nakanishi, A. Nakai, K. Suzuki, Y. Yamada, A. Yajima, T. Saitoh and Y. Shiohara: Progress in development of advanced TFA-MOD process for coated conductors, *Physica C*, 463–465, 510–514 (2007).
- [22] T. Izumi, M. Yoshizumi, M. Miura, K. Nakaoka, Y. Ichikawa, Y. Sutoh, S. Miyata, H. Fukushima, Y. Yamada and Y. Shiohara: Present status and strategy of reel-to-reel TFA-MOD process for coated conductors, *Physica C*, 469 (15–20), 1322–1325 (2009).
- [23] T. Izumi, M. Yoshizumi, M. Miura, K. Nakaoka, Y. Sutoh, Y. Ichikawa, S. Miyata, A. Ibi, H. Fukushima, T. Itoh, T. Takahashi, Y. Aoki, T. Koizumi, A. Kaneko, T. Hasegawa, Y. Yamada and Y. Shiohara: Development of TFA-MOD process for coated conductors in Japan, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19 (3), 3119–3122 (2009).
- [24] T. Izumi and N. Yanagi: Status and prospects on development of yttrium-based high-temperature superconducting coated conductor, *J. Plasma Fusion Res.*, 93 (5), 222–229 (2017).
- [25] T. Haugan, P. N. Barnes, R. Wheeler, F. Meisenkothen and M. Sumpston: Addition of nanoparticle dispersions to enhance flux pinning of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductor, *Nature*, 430 (7002), 867–870 (2004).
- [26] J. L. Macmanus Driscoll, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, H. Wang, A. Serquis, L. Civale, B. Maiorov, M. E. Hawley, M. P. Maley and D. E. Peterson: Strongly enhanced current densities in superconducting coated conductors of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ + BaZrO_3 , *Nat. Mater.*, 3 (7), 439–443 (2004).
- [27] Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Kato, T. Hirayama and Y. Shiohara: Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in $\text{Y}(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coated conductors, *Appl. Phys. Lett.*, 87 (13), 132502 (2005).
- [28] D. M. Feldmann, T. G. Holesinger, B. Maiorov, H. Zhou, S. R. Foltyn, J. Y. Coulter and I. Apodoca: 1000 A cm^{-1} in a 2 μm thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ film with BaZrO_3 and Y_2O_3 additions, *Supercond. Sci. Technol.*, 23 (11), 115016 (2010).
- [29] H. Tobita, K. Notoh, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, T. Kato, T. Hirayama, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara: Fabrication of BaHfO_3 doped $\text{Gd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors with the high I_c of 85 A/cm-w under 3 T at liquid nitrogen temperature (77 K), *Supercond. Sci. Technol.*, 25 (6), 062002 (2012).
- [30] A. Ibi, T. Yoshida, T. Izumi, Y. Shiohara, D. Yokoe, T. Kato and T. Hirayama: Development of long coated conductors with high in-field I_c Performance by PLD method at high production rate, *Phys. Procedia*, 81, 97–100 (2016).
- [31] T. Izumi: Achievements in M-PACC project and future prospects on R&D of coated conductors in Japan, *Physics Procedia*, 58, 6–9 (2014).
- [32] M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama and Y. Shiohara: Rare earth substitution effects and magnetic field dependence of critical current in $\text{Y}_{1-x}\text{RE}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors with nanoparticles (RE=Sm, Gd), *Appl. Phys. Express*, 2 (2), 023002 (2009).
- [33] K. Nakaoka, K. Kimura, T. Kato, R. Yoshida, Y. Usui, M. Nakamura, T. Izumi and Y. Shiohara: Enhancement of J_c properties in magnetic fields of BaZrO_3 doped $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ coated conductors by a newly modified TFA-MOD process, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (3), 8000304 (2016).
- [34] T. Izumi, K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, M. Miura and Y. Shiohara: Refining process of BaZrO_3 particles in coated conductors by TFA-MOD method, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 27 (4), 6601604 (2017).
- [35] K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, Y. Usui, T. Izumi and Y. Shiohara: Another approach for controlling size and distribution of nanoparticles in coated conductors fabricated by the TFA-MOD method, *Supercond. Sci. Technol.*, 30 (5), 055008 (2017).
- [36] M. Miura, B. Maiorov, M. Sato, M. Kanai, T. Kato, T. Kato, T. Izumi, S. Awaji, P. Mele, M. Kiuchi and T. Matsushita: Tuning nanoparticle size for enhanced functionality in perovskite thin films deposited by metal organic deposition, *NPG Asia Materials*, 9, e447 (2017).
- [37] T. Machi, K. Nakao, T. Kato, T. Hirayama and K. Tanabe: Reliable fabrication process for long-length multi-filamentary coated conductors by a laser scribing method for reduction of AC loss, *Supercond. Sci. Technol.*, 26 (10), 105016 (2013).
- [38] H. Okamoto, H. Hayashi, M. Iwakuma, A. Tomioka, T. Saito, Y. Goshō, K. Tanabe and Y. Shiohara: Over-current characteristics of model coil using Y-based multi-filament wire for superconducting power transformers, *Physica C*, 471 (21–22), 1379–1380 (2011).
- [39] K. Katayama, T. Machi, T. Nakamura, Y. Takagi, K. Nakaoka, M. Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara: Development of low AC loss TFA-MOD coated conductors, *Physics Procedia*, 58, 142–145 (2014).
- [40] M. Iwakuma, K. Sakaki, A. Tomioka, T. Miyayama, M. Konno, H. Hayashi, H. Okamoto, Y. Goshō, T. Eguchi, S. Yoshida, Y. Suzuki, H. Hirai, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Izumi and Y. Shiohara: Development of a 3 ϕ -66/6.9 kV-2 MVA REBCO superconducting transformer, *IEEE Transactions*

- on *Applied Superconductivity*, 25, 5500206 (2015).
 [41] S. Fukuda, K. Yun, M. Iwakuma, S. Miura, S. Sato, K. Yoshida, A. Tomioka, M. Konno and T. Izumi: Design study of 2-MW fully superconducting synchronous motors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28 (4), 5207806 (2018).

執筆者略歴

和泉 輝郎 (いずみ てるお)

1987年3月東北大学工学部卒。博士(工学)。住友金属工業株式会社入社し、1989～1993年に公益財団法人国際超電導産業技術研究センターに出向。1998年同センターに入所、同センター解散に伴い、2016年産総研に入所。一貫して、磁性材料、酸化物超電導材料、シリコン単結晶などの材料開発に従事。1998年からは、RE系超電導線材のプロセス及びその応用に関する開発に従事し、多くの国家プロジェクトに関与。プロジェクトリーダーも歴任。この論文では、この経験に基づいてRE系超電導線材に関する開発を紹介した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント(金山 敏彦:産業技術総合研究所)

1986年の酸化物高温超電導体の発見以来、この材料を用いた線材の開発と実用化は、大きな期待を集めながら、いまだ実現していない夢の技術である。この論文は、著者自身の開発成果を中心に、材料や合成法の選択、長尺線材の実用的な作製技術、特性向上技術等、一連の開発の課題と経緯を紹介している。この過程で、企業も関わる国家プロジェクト研究が有効であったことも述べている。新物質の発見を実用製品につなげるには、多様な要素技術を統合せねばならず、多数の研究者の多年に亘る継続的な開発が必要であることの、好例として意義が高い。

コメント(池上 敬一:産業技術総合研究所)

この論文では、線材としてほぼ実用化がなされ、今後部材として機器に組み込まれていくことが期待される希土類系超電導線材の開発について、その契機から現状に至るまでが丁寧に分かりやすく述べられており、史観を持った技術的解説として読み応えのあるものとなっている。

議論2 研究開発シナリオについて

コメント1(池上 敬一)

シンセシオロジー誌で重要視している「シナリオ」は、ある主体によって設定されるものであるのに対し、この論文では客観性を重視するあまり、シナリオを設定しそれに沿って開発を推し進めた主体の存在感が希薄になっているように感じられます。シンセシオロジー誌掲載論文としてこの論文が分析の対象とすべきは、超電導線材ではなく、その開発事例であるので、その事例の主体をより明確にすべく加筆が行われるべきであると考えます。

シナリオとして図1が提示されていますが、この論文を読むと、三つの課題に対してそれぞれシナリオを持って研究開発が遂行されてきたことが分かります。一方、シンセシオロジー誌では、「研究目標を実現するために選択した要素技術(群)を記述する。また、それらの要素技術(群)を選択した理由を記述する。選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。」とされています。したがって、図1に加えて、各課題に対して、どのような要素技術(群)を選択しそれらをどのように構成・統合して研究目

標を実現していったかを端的に示す、いわば「詳細シナリオの図」があると分かりやすいと思います。

コメント2(金山 敏彦)

この論文は、酸化物超電導線材の開発経緯の一般的な解説としては、ポイントを押さえた内容となっています。しかし、本誌が主眼とする、著者あるいは著者が所属する組織が、主体的にどのような選択をして、開発成果に至ったのかが、明確ではありません。

この明確化のために、要素技術の一覧表を追加してはいかがでしょうか。図1の3課題のそれぞれに対応して、どのような要素技術の候補があり、その中から著者および著者の所属組織が選択したのは、どれであったかが一瞥できれば、この論文の意義は、より明確になると考えます。

回答(和泉 輝郎)

表1に各課題に対する要素技術群をまとめました。

コメント3(金山 敏彦)

表1の追加で、全体構成に対する見通しが良くなりました。しかし、多くの要素技術が、目標とする技術課題の列挙に留まっています。例えば「ブレイクスルー技術」等のタイトルの第3列を設け、できれば第2列の要素技術と対応づけて、この論文で記述されている、各々の要素技術課題に対して開発のポイントとなった解決手段を記載すれば、この論文の流れが一覧できると考えます。

回答(和泉 輝郎)

上記のご指摘に従い、表を修正いたしました。

議論3 研究開発の主体について

コメント1(池上 敬一)

シナリオとして図1が提示されていますが、これは誰が設定したシナリオなのでしょう。希土類系超電導線材の開発に関わる世界の研究者コミュニティで共有されていたもののように思えますし、著者自身が所属するISTEC(～AIST)の研究グループの戦略であるようにも思えます。論文の冒頭で、分析対象とする開発事例の主体を明確にすべきと考えます。

回答(和泉 輝郎)

図1のシナリオは、ISTEC(AIST)の戦略であるといってもよろしいかと思しますので文中に記載しました。

開発事例の主体に関しましては、「1 はじめに」の後半で明記いたしました。

コメント2(金山 敏彦)

この論文の記述を、開発の世界的トレンドであった箇所と、著者および著者の所属組織が推進した部分を書き分ける工夫をしてください。

回答(和泉 輝郎)

ISTEC(AIST)が実施した内容は、それを明確化すべく、文頭に「ISTECは、」や「我々は、」との表記を加えました。

議論4 研究開発組織および国家プロジェクトについて

コメント1(池上 敬一)

この論文が分析を加えている事例では、ISTECという組織が極めて重要な役割を演じていたことが伺えます。ISTECという組織の成り立ち、ミッション、国家戦略における位置づけ、組織におけるリーダーシップのあり方、どのような研究者がどのようにして集められたか、彼らがどのように融合・連携・分担して研究開発にあたったか、概説していただけると良いと思います。

コメント2（金山 敏彦）

この論文では、国家プロジェクト研究が有効であったことが紹介されていますが、その組織体制や内容には、触れられていません。ISTEC および NEDO プロジェクトについて、簡単な解説を加えてください。

回答（和泉 輝郎）

ISTEC に関する記載を、「1 はじめに」の後半に加えました。

議論5 国際的な競争について

コメント（池上 敬一）

海外、特に米国のチームとの間で熾烈な開発競争がなされたと思いますが、それがシナリオの設定や遂行にどのような影響を与えたか興味を持たれます。加筆いただけないでしょうか。

回答（和泉 輝郎）

ご指摘の日米の開発競争の影響については、「3 第二課題」の末部に記載しました。

議論6 研究開発課題とその要求値について

コメント1（金山 敏彦）

「今後の展開」で述べられている、実用化への課題、特に、電流値の要求値と現状での達成値の関係が明確ではありません。この点を加筆いただくと共に、上記 1) の表に、残された実用化への課題と、できればその解決手段の候補を加えていただくと、この論文の位置づけが明確になります。

回答（和泉 輝郎）

「今後の展開」に書き加えました。

コメント2（池上 敬一）

「2 第一課題」で、「 10^3 A/cm² (77 K, 自己磁場) 程度の J_c 特性を得るのが精いっぱい」とありますが、実用化にはどの程度の J_c 特性が求められるものなのか、あるいは、他の材料系による線材ではどの程度の J_c 特性が実現されていたのかといった、比較の対象が提示されていないと、この数字の意味が読者には分からないと思います。

回答（和泉 輝郎）

上記に対する説明を加えました。