



解説

イットリウム系薄膜高温超伝導線材開発の現状と展望

Status and Prospects on Development of Yttrium-Based High-Temperature Superconducting Coated Conductor

和泉輝郎, 柳 長門¹⁾

IZUMI Teruo and YANAGI Nagato¹⁾

産業技術総合研究所, ¹⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2017年4月3日)

核融合原型炉のマグネットのオプションとして適用することを視野に入れて、銅酸化物系の高温超伝導線材を用いた大型大電流導体の開発が世界で始まっている。これには、イットリウム系薄膜線材を用いることが有力候補である。日本では電力機器等への適用をめざして、この線材の開発を長年に渡り主導してきた。線材開発の経緯、基本的な超伝導特性と製造法、最新の成果について解説するとともに、核融合炉マグネットへの適用の実現性について展望する。

Keywords:

fusion reactor magnet, high-temperature superconductor (HTS), ReBCO

1. イットリウム系 HTS 線材の核融合応用に対する期待

磁場閉じ込め熱核融合発電の実現に向けて、原型炉の設計が鋭意進められている。原型炉のマグネットには、国際熱核融合実験炉 ITER のマグネットをさらに凌駕する性能が要求される。現状の設計では、ITER に用いられている低温超伝導線材 (Low-Temperature Superconductor, LTS) である Nb₃Sn を用いたケーブル・イン・コンジット (Cable-in-conduit) 導体を用いることが基本案である。CIC 導体は大型ヘリカル装置 (LHD) の垂直磁場コイルに実用コイルとして初めて用いられて以降、世界の超伝導核融合実験装置の標準仕様となり、現在建設中の ITER や JT-60SA 等にも用いられている。そこで、将来の原型炉では、Nb₃Sn 線材をさらに改良したものを採用することが基本案として設定されている。特に、Nb₃Sn の高強度化が有望となっている。また、ひずみに強い Nb₃Al 線材の適用も別案として検討が続いている。

一方、銅酸化物系高温超伝導体 (High-Temperature Superconductor, HTS) を用いた線材についても、近年の急速な線材性能の向上を受けて、大型導体の開発が一部で始まっている。HTS は LTS に比べて臨界磁場が高いため、20 T 以上の高磁場とすることでコンパクトな核融合炉を作るという設計思想で検討されることが多い。一方、HTS を用いる場合は、比較的高温で運転ができること (20 K 程度) や高い熱的安定性が得られる (クエンチリスクの低減) による信頼性向上も採用を検討する理由となっている。高温での運転により冷凍機に必要な電力が軽減できるため、逆に、遮蔽が薄い場合も大きな核発熱まで許容でき

ることや、多くの接続部があってもジュール発熱を許容できることで革新的なコイル巻線方法も選択可能となる。加えて、供給不足が懸念されるヘリウムの使用量を低減させることも期待できる。

HTS 線材には、現在の主要なものとしてビスマス系とイットリウム系があり、前者が第一世代、後者が第二世代とも呼ばれる。このうち、イットリウム系は、高温において高磁場までの臨界電流特性に優れること、ハステロイ等を基板に用いているために機械的剛性が高いこと、放射化しやすい銀の使用量が低いこと、等の理由によって、核融合炉マグネットへの適用に優れていると評価される。

イットリウム系線材を用いた大電流の大型導体の開発が一部で始まっている。そのうちのひとつは、核融合科学研究所と東北大学量子エネルギー工学専攻の共同研究で開発を進めている STARS 導体 (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure Conductor) である。これは、ヘリカル型核融合炉を対象としたものであり、直流の定常運転で良いため、テープ形状の線材を単純に積層して銅安定化材およびステンレス補強材に囲まれたものである [1]。長さ 3 m の短尺導体試験において外部磁場 5.3 T、温度 20 K において 100 kA の安定な通電に成功している。この導体は構造が単純であるため、導体を短尺で分割製造し、繋ぎ合わせて使用する「接続方式巻線」[2]が提案されている。また、将来的には、コイル全体を着脱可能とする提案もある [3]。

一方、欧米ではトカマク炉に用いることを対象としてパルス磁場運転にも対応する必要があるため、交流損失を低減するとともに導体内の電流を均一として交流運転においても安定性を高められるようテープ形状を複雑に組み合わせ

corresponding author's address: National Institute for Nuclear Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

corresponding author's e-mail: yanagi@lhd.nifs.ac.jp

せた導体構造が提案されている。いずれもテープ形状の線材を組み合わせて振りを入れたり、空間転位をかけたりする方式である。このうち、MITで提案されたTSTC導体については、欧米の各研究機関でもその発展型が考案されている。また、スイスのSPC研究所における試作導体により、温度4.2 K、磁場12 Tで、電流値60 kAの通電に成功している。

これら大型導体に応用する研究については、特に、ヘリカル炉、および、着脱可能方式のマグネットを対象としたものが当学会誌にも解説論文や小特集として掲載されてきた。しかしながら、線材自体の超伝導特性や製造法についてはあまり詳しく述べられていなかった。本解説では、イットリウム系薄膜線材の開発の経緯から始まり、基本的な超伝導特性と製造法、最新の成果について紹介し、核融合炉マグネットへの適用の実現性について展望する。

2. イットリウム系 HTS 線材の基本特性と開発の歴史

イットリウム系 HTS 材料 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) に代表される RE 系 HTS 材料 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, RE: Rare-Earth) は、1987年2月に米国で発見され[4]、90 Kの臨界温度を持つことが確認されたが、実用線材の開発までには長い年月に渡り、多くの努力が払われてきた。特に、2000年頃からは、米国と日本のそれぞれの国家プロジェクトにおいて熾烈な開発競争が進んだ。イットリウム系 HTS 材料は、三層のペロブスカイト構造を有し、結晶学的に大きな異方性を有している。この結晶構造における異方性を反映して、臨界電流 (I_c) 特性が結晶方位によって大きく異なることから、高い I_c 特性を実現するためには結晶方位を c 軸配向のみならず a-b 面内の配向 (二軸配向) 組織を実現する必要がある。そこで、イットリウム系 HTS 線材では、まず、薄膜形状とすることで c 軸配向を実現し、更に面内配向付与等を始めとする複数の中間層を配する積層構造を取っており、“薄膜線材 (Coated Conductor; CC)” とも呼ばれる。面内配向を実現するためには、主に二つの方法がある。一つは基板である金属テープを配向させる方法であり、もう一つは無配向の金属テープ上に配向中間層を成膜する方法である。いずれもまずテンプレートとなる配向組織を作り、その上に REBCO 層をエピタキシャル成長させるという方式をとる。イットリウム系 HTS 線材の模式図を図1 [5]に示

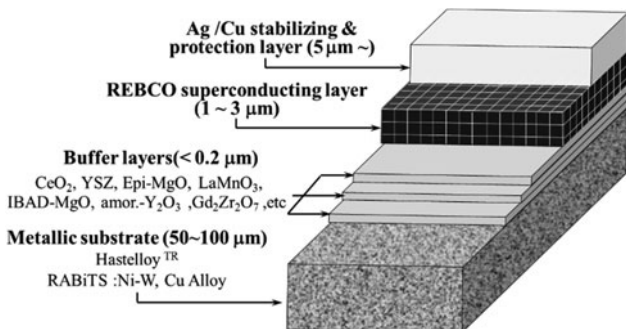


図1 イットリウム系 HTS 線材の模式図[5]。

す。前者ではニッケルや銀などの fcc 金属テープに90%以上の冷間強加工を施し、その後に適切な再結晶化 (粗大化) 熱処理を与えることで面内配向した RABiTS (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate) 基材が得られる [6]。ここでは、隣接する結晶粒の方位ずれに伴う界面エネルギーを低下させる方向で結晶が回転しながら粒成長することで結果的に面内配向が得られる機構である。後述するイオンビームアシスト蒸着法 IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) [7]の初期の技術に比べて安価であることを特徴としてアメリカンスーパーコンダクター (amsc) 社や住友電工などが採用している。

一方、セラミックス中間層を配向させる代表的な方法として、IBAD 法[7]が上げられる。この方法ではイオンビーム蒸着法によって成膜する際に基板に対して特定の角度からイオンビームを照射することにより、無配向基板の上に二軸配向した中間層を効率よく成膜することができる。これは、日本において開発され、現在、世界のスタンダードとなっている。配向原理は、アシストビームが結晶の最密面間を通る方位を向いた蒸着子が受けるエネルギーが最も小さく、この方位からずれた結晶が大きなエネルギーを受けて消失する現象を利用したものと理解されている。したがって、材料によって適正な照射角度が異なり、発見当初のイットリア安定化ジルコニア (YSZ) 及びその後に見出された MgO[8]ではテープ面法線方向からそれぞれ55°及び45°の角度での入射で有効な配向化が図られる。当初の、YSZ や GZO 等では、配向組織形成までの必要な時間が長く、課題であったが、IBAD 層上にセリアを成膜することで高速で配向化が進む自己配向化現象の発見[9]と高速 IBAD 材料である MgO の適用により著しい高速化が図られた。図2には、配向組織形成に関する技術進展による必要成膜時間短縮成果をまとめる。

上記の配向組織を付与した中間層付き基板上に超伝導層を形成する手法として、世界的にはいくつか異なるプロセスが採用されている。主な手法の特徴を以下にまとめる。PLD (Pulsed Laser Deposition) 法 [9-13]は、原料ターゲットにパルス状のエキシマレーザを照射し、対向した基板上に蒸着子を堆積させる手法で、真空中で成膜することで高品質膜の形成が可能である一方、チャンバーを含めた

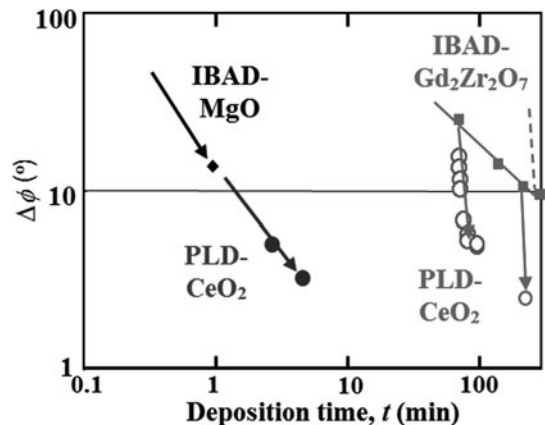


図2 IBAD 中間層及びセリア自己配向による配向化技術の進化。

装置費用が高い。この課題を克服するために、長尺線材作製においては Reel-to-Reel 式で成膜する際に、マルチターン方式を採用することで大面積成膜を実現し高速化、原料歩留まり向上を図っている。本手法は、フジクラ, Bruker, SuperOX, 住友電工などが採用しており、1 km で 500 A/cm 幅@77K, s.f.(自己磁場) の高い特性を実現している。次に、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法[14-17]は、気化させた原料をキャリアガスにより基板の上まで搬送し、そこで反応堆積させる手法である。液体原料を用いることで安定した成膜が可能となり PLD 法と同様に高い特性を得ることが可能であるが原料が高価である課題を有している。同法は、SuperPower 社で採用されており、いち早く 1 km 線材の作製に成功した手法である。TFA-MOD (Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition) 法[18-24]は、原料に三弗化酢酸塩を用いることを特徴とした化学液相法で装置費用が比較的安いことにより安価なプロセスである。また、中間生成物に BaF₂ というフッ化物が形成され、超伝導相形成時には、水蒸気を消費して HF ガスを排出する Conversion 機構を利用することにより成長することから一般的な熱分解 MOD 法に比べて配向膜を実現しやすい特徴を持つ。本法は、amsc 社、昭和電線ケーブルシステムなどが採用しており、上記の気相法と同等の線材作製に成功している。最後に、RCE-DR (Reactive Co-Evaporation by Deposition and Reaction) 法[25-31]を紹介する。本手法は、金属原料を基板上に堆積させ、その後に酸素雰囲気中で反応させることで超伝導相を形成する手法であり、超伝導相形成時に液相を介することにより高速成膜が可能となっている。最近では、成膜中の組成などをフィードバックするシステムを開発したことにより特性変化を抑制し、長尺高特性線材を実現している。本手法は、SuNAM 社が採用し、安価線材を特徴として販売している。

上記の配向付与技術及び超伝導層形成技術の組み合わせにより多くの会社、研究機関が長尺で高特性の線材作製技術の開発に取り組んできた。図 3 には、これまで線材開発

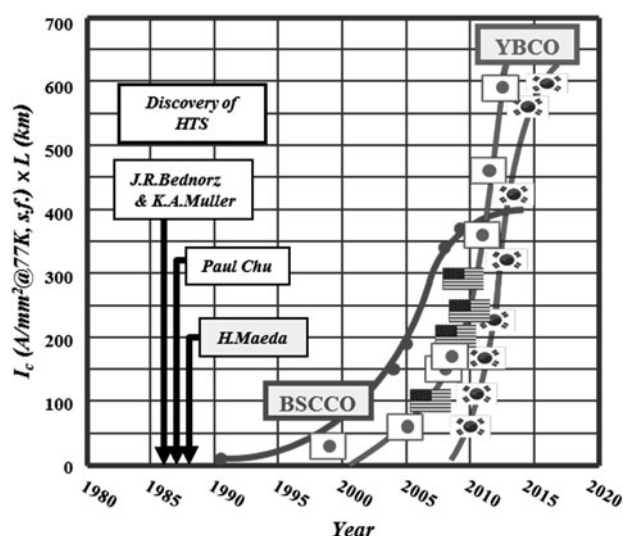


図 3 $I_c \cdot L$ 積を指標とした HTS 線材開発の年度展開。

の指針としてきた $I_c \cdot L$ 積の進展を示す。2000年頃から日米での国家プロジェクトにおける開発により大きな進歩が遂げられた。近年は韓国の SuNAM 社が急激に追随し、現在では最も大きな $I_c \cdot L$ 積を有した線材を報告している。これらの成果を受けて、多くのメーカーで線材の販売が始められている。

3. イットリウム系 HTS 線材の最近の開発現状

前項で説明した通り、これまでの開発により世界中で複数のメーカーにより長尺線材の販売が開始されたのを受けて、様々な機器の開発が始められている。ここでは、様々な環境下で使用する機器からの要望を受けて、線材開発の対象も液体窒素中自己磁場下の高 I_c 特性向上をめざした長尺線材から、各機器より求められる特殊な機能の向上に移ってきている。SMES, 核融合炉や NMR, 発電機やモータなどの強い磁場中で用いる応用においては、磁場中で高い臨界電流特性が求められる。また、これらの高磁場応用では強い機械的強度も同時に求められることが多い。一方、送電ケーブルや変圧器などの交流応用では、交流損失の小さな線材、システムが要求される。また、MRI や NMR 等の空間的・時間的に均一磁場を作り出す必要がある応用ではコイル自らが作り出す磁場により誘起される遮蔽電流の影響を低減させる必要がある。これらの要求に応えるイットリウム系超伝導線材の開発が大きなトレンドになっている。以下には、最近の線材開発の状況を紹介する。

3.1 磁場中高特性線材の開発

超伝導体は一般的に、外部磁場の増加に伴い、 I_c 、あるいは、 J_c (臨界電流密度) 特性は低下する。イットリウム系 HTS 材料は第二種超伝導材料であることから磁束が超伝導膜内に侵入し、超伝導と磁束の共存状態の中で使用される。これらの磁束の移動を抑制する磁束ピン止め点と呼ばれる微細な非超伝導相の制御により磁場中特性の改善が期待できる。実際、PLD 法などの気相法において Y₂BaCuO₅ [32], BaZrO₃ (BZO) [33, 34], Y₂O₃ [35] 等の非超伝導材料をターゲットの中に混入し、蒸着する手法で超伝導相中に微細に分散させることに成功している。人工ピンとして様々な材料が試されてきたが、特に、BZO 相の導入で大きな成果が挙げられている。気相法における BZO 相の特徴は、

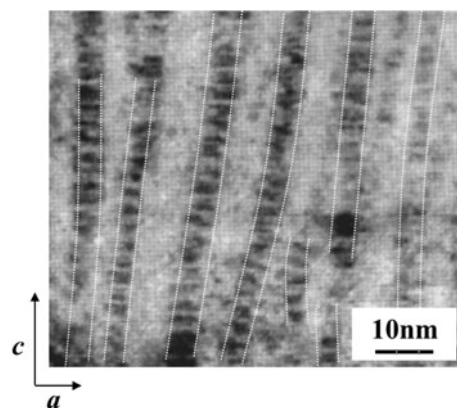


図 4 PLD 法により作製した BZO 添加 GdBCO 層の断面組織。点線で示したのが BZO 柱状組織 [36]。

膜/基板界面から表面に向けて柱形状 (図4 [36]) を呈していることである。

イットリウム系超伝導材料は前述の通り電磁氣的に大きな異方性を有しており、線材においてはテープ面に垂直な結晶のc軸方向に磁場が印加された状態で臨界電流特性が低くなる傾向がある。このc軸方向に沿って柱状成長しているBZO人工ピンを導入した膜では、超伝導相のc軸平行磁場条件での特性が劇的に改善している。ISTEC (現在は産総研が技術継承) では、PLD膜において、BZOと同じペロブスカイト系の材料で、より有効な人工ピン止め材料として、BaHfO₃ (BHO) が見いだされている。BHO添加系では少なくとも3μmまでの厚さまではJ_c特性の低下がみられず、I_c(B//c)で166 A/cm幅@77 K, 3 T, 569 A/cm幅@65 K, 3 Tが得られ、磁場の印加角度依存性での最低I_c値でも141 A/cm幅@77 K, 3 T, 411 A/cm幅@65 K, 3 Tの非常に高い特性が得られている[37-39] (図5)。組織観察の結果によれば、BZOなどに比べて柱状組織の長さが短く、その長軸のc軸からのばらつきが大きい傾向があり、この分布の膜厚依存性がBZOに比べて小さいことが確認されている。この材料は、低温高磁場においても優位性を失わず、多くの機器への応用が期待されるところである。最近では、フジクラにおいてBHO添加線材で比較的高いI_c値 (>200 A/cm幅@65 K, 3 T) が報告されている。

一方で、米国では、ヒューストン大学やSuperPower社を中心とするグループで、MOCVD法による線材における磁場中特性改善を目的としてREをYとGdの混晶(YGdBCO)としてここにBZOを導入する技術開発を行っている[40-42]。MOCVD線材におけるBZOの形態及び特性はPLD線材と類似した柱状形態をとり、磁場印加角度依存性においても膜面に垂直方向(超伝導相c軸に平行方向)に磁場を印加する角度でピーク特性を示している。彼らは、高濃度添加材により磁場特性の改善に注力しており、YGdBCO超伝導膜に25%のZrを添加することで、1810 A/cm幅@30 K, 3 T(B//c)の高い磁場中特性を報告

している。長尺線材としては、SuperPower社が、Zr添加材の開発をしており、Enhanced A.P wireとして、~250 A/cm幅@65 K, 3 T(B//c)の特性を報告している。

一方、安価なプロセスである特徴を有するも磁場中での特性に課題を有していたMOD法による超伝導膜にも人工ピン止め点の導入が施されている。ここでは、YGdBCO原料にZrを添加することで超伝導膜内にナノサイズのBZO粒を分散させることに成功している[43]。特筆すべきは、PLD法とMOD法による超伝導膜中のBZOの組織の差である。同じピン止め点材料であるにもかかわらず、上述のPLD膜内での柱状組織に対し、MOD膜内では粒状組織を呈している(図6 [36])。この組織の差は、それぞれの成膜手法における超伝導層の成長機構の違いに因るものである。

近年、最終熱処理の昇温過程で、500℃程度の比較的低温領域で等温保持熱処理工程を加える中間熱処理法の導入により、BZO粒子の微細化に成功し、磁場中特性の向上に成功している[44]。しかしながら、上述の気相法による線材に比べて依然としてJ_cは到達せず、劣勢は続いていた。そんな中、ごく最近、この分野にブレイクスルーがあった。日本におけるTFA-MOD法においては、溶液の塗布と低温での熱処理工程(仮焼)を繰り返すことにより厚膜を形成するが、その一回当たりの膜厚を薄膜化することによりBZO粒子を極微細化することに成功し、J_c特性で気相法と同等のレベルに達している[45,46]。さらに、その後、人工ピン止め点材料を変え、高濃度化することでさらにJ_cが倍増し、魅力的な特性を示すに至っている。

3.2 低交流損失線材

もう一つの超伝導線材の大きな応用分野としてケーブル、変圧器などの交流応用が挙げられる。また、モータや発電機などの回転機応用においても電機子には交流成分が適用されるだけでなく、この変動磁場を感じる直流界磁コイルにも交流成分が重畳されることになる。超伝導線材は、電気抵抗に起因するジュール損失はなくなるものの、上記応用において生じる電流(磁場)の変動に対して線材内を磁束が移動することによる損失は実用に向けた課題であり、システムの小型軽量化とともに効率向上には不可欠な因子である。この交流損失の低減を図るにはその応用形

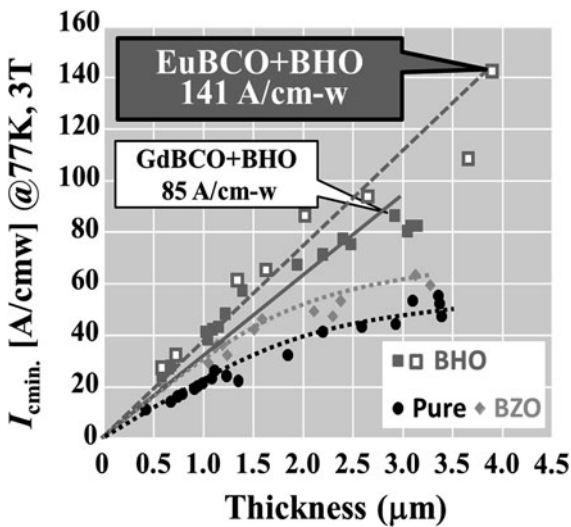


図5 BMO人工ピンを添加した線材の磁場中I_c特性の膜厚依存性[39]。

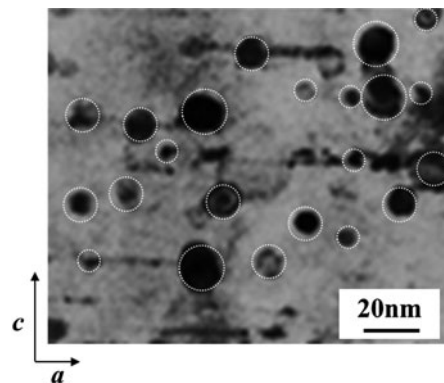


図6 MOD法により作製したBZO添加GdBCO層の断面組織。点線で示したのがBZO粒状組織[36]。

態、磁場環境等により対策が異なるがいずれも超伝導層を細線化する技術が有効である。また、直流応用ながら非常に高い精度で空間的かつ時間的に均一な磁場を要求されるNMRやMRI等の応用では、自らが作り出す磁場による遮蔽電流の減衰による磁場変動を抑制する必要がある。ここでも、遮蔽電流の大きさは線材の幅に依存することから、細線化により影響を低減させることが可能となる。

線材プロセスの観点からは特性の均一性の向上が求められる、更に特性低下を抑制した加工技術の開発が必要である。均一特性を有した線材を得るためには、まず中間層形成までの工程において大きな傷や欠陥の抑制とともに配向度の均一性が必要となる。この課題に対し、洗浄工程の導入により欠陥の低減が試みられている。まず、研磨基板に残存するごみ等の欠陥や成膜中に混入する異物粒の数を軽減するのに効果が確認されている。更に、超伝導層の成膜に関しては、PLD法でターゲット表面の形状変化の抑制やレーザー照射条件の時間変化の影響を平均化することで小さく抑えるために複数回に分けて成膜する手法を取り入れた。また、ターゲット表面のレーザーによる掘削状況の均一性を維持するために成膜時のターゲットの移動を改良することもブルームの定常状態確保に有効である。最近は、人工ピン止め点入り線材の均一性に関する解析も進んでいる。人工ピン止め点入り線材では、無添加線材に比べて特性の分布が大きい傾向が見出されておりその改善が必要となっている。対応として、人工ピン止め点入り線材でのプロセスウインドウの解析が始められており、最高特性を狙うよりパラメータに鈍感な条件で成膜するなどの対策が試みられている。一方、MOD法では、上述の中間熱処理法が空孔抑制にも効果があり、更に、塗布膜厚を極薄化する手法では、未反応の粒子を低減することに有効であり、結果的に均一性向上につながっている。

一方、加工技術としては、長手方向に平行に溝を形成するスクライビング技術が開発されている[47]。線材表面にマスキングテープを施し、このテープの溝となる部位をレーザーで熔融し、その後化学エッチングする手法を開発した。これらの工程の中で、レーザー照射形状、エッチング及びリンスの条件等の適正化により、当初数百 μm あった溝幅を100 μm 程度に制御することが可能となった。これらの、技術の統合により、100 m長線材に対し10分割加工に成功し、1/10の交流損失低減の確認に至っている(図7

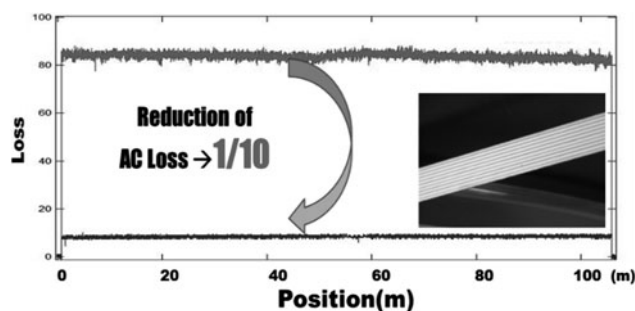


図7 10分割スクライビング加工により低交流損失化に成功した100 m長線材[38]。

[38])。加えて、日本の研究グループではスクライブ線材のコイル化においても特殊な巻線技術によって3分割200 m線材や5分割70 m線材(単長は数m)を用いたコイルで1/3, 1/5の交流損失低減を確認している[48]。この長尺線材における損失低減やコイル形状での交流損失低減確認を実現しているのは世界においても唯一である。

最近、スクライビング技術の開発にも進展があった。上述の化学エッチングによる手法により長尺加工を実現したものの、加工部位でオーバーエッチングが発生し、剥離の起点になることに加えて更なる微細加工が困難である課題を有していた。この課題に対し、エキシマレーザーのみで加工する手法の開発に成功している[49,50]。この手法では、化学反応を用いずレーザーによる叩き出しで加工する手法であるためより微細な加工が可能となり、溝加工幅が100 μm から10 μm まで細溝化に成功している(図8)。この手法を適用した長尺線材でコイルを作製し、遮蔽電流の抑制効果を確認できている[51,52]。分割線材を用いることで、MRI等において効果的に時間均一性を向上させることができることを示している。

世界的にみると、同様のスクライブ技術の開発が他の幾つかの機関でも行われている。SuperPower社では、機械的にスクライブする手法やインクジェットにより絶縁層を線状に形成する手法、銀層上にフォトリソをパターンニングする手法など複数のプロセスでの加工技術開発が進められ短尺線材において1/15の損失低減が報告されている[53]。また、カールスルーエ工科大学においても同様の結果を得ており、最近ではRoebel導体との組み合わせも検討されているが長尺線材の実証には至っていないのが実情である。

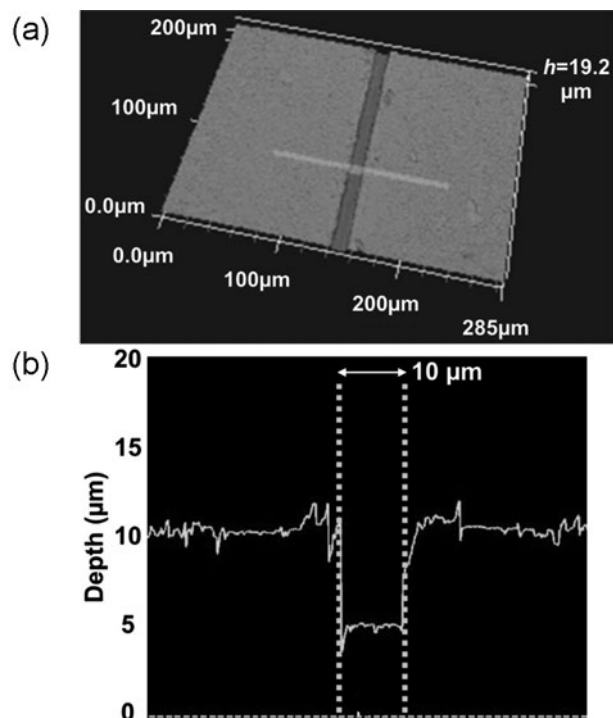


図8 エキシマレーザースクライビング技術による極細加工溝のプロファイル。(a) レーザー顕微鏡三次元像、(b) 三次元像から得たラインプロファイル。

4. イットリウム系 HTS 線材の今後の開発展望と課題

上述の通り、日米の国家プロジェクトを基軸に、最近では韓国も加えて急激な進歩を遂げたイットリウム系 HTS 線材は、機器開発の開始とともにその開発テーマを機器対応の特殊仕様の高度化に移し、発展を遂げてきた。すでに、送電ケーブル、超伝導変圧器、限流器、モータなどの回転機などの応用において精力的に開発が進められており、近い将来イットリウム系超伝導線材を用いた応用が実現するものと期待されている。これらの機器実証により超伝導機器としての有効性を証明することは可能であると考えられるが、超伝導機器が広く普及する超伝導ワールド実現には、十分であるとは言いがたいのが実情である。

上記の状況を打破するための課題として指摘されているのがコストである。このコストを考えるにあたって考慮しなければならないのが機器毎の運転条件である。例えば、送電ケーブルに関しては、液体窒素中の低磁場運転になるが、この条件における特性としては必要な特性を既に実現できていることから、純粋に製造コストを下げる必要がある。このコスト低減には、まず量産効果が必要と言われている。また、歩留まりを向上させることも効果的である。この歩留まり向上にはプロセスの安定化技術開発が必要と考えられるが、材料学的には中間層の層数低減も大きな効果をもたらすと考えられる。現在は、IBAD 系の中間層で 4~5 層の中間層を配しているが、それぞれに歩留まりが発生することから層数が総括歩留まりを低下させている要因ともいえる。それぞれの役割を兼ねる材料の開発等が求められるところである。さらに、今後リペア技術が開発できれば、局所的な特性劣化部を救済し、歩留まりの向上を期待できるものと期待される。一方、磁場中応用に関しては、開発戦略にも依るがコンパクト性を期待した強磁場運転、冷却コスト軽減等を期待した高温運転等で最終的な希望環境（高温高磁場）で必要な特性が得られていない場合は、特性向上の開発も低コスト化に寄与することになる。つまり、必要な磁場を発生するための線材量を減らすことが可能となるからである。したがって、これらの機器応用に関しては、上述の磁場中特性向上技術も低コストに貢献できることになる。そもそも、超伝導機器の普及には、競合機器に対して絶対的な優位性が必要であると考えられる。超伝導機器のメリットである軽量、コンパクト、高効率をより強調するとともに、冷却負荷の軽減と低コスト化を推し進める必要があり、これらを担う超高性能線材の開発も必要である。

加えて、機器利用の分野を広げるための冷却負荷低減には超長尺線材実現か低抵抗接続が必要となる。また、MRI、NMR 等の安定磁場を利用する応用やリニアモーターカー等の切り離された応用では永久電流モードが望まれている。低抵抗接続技術としては、ナノ粒子を用いた低温接合技術が開発された。これは、ナノ粒子表面の活性状態を利用して接合温度を低温化（ $\sim 150^\circ\text{C}$ ）するもので、後酸素熱処理も不要にもかかわらず、超伝導特性を維持しつつ $n\Omega$ の接合抵抗を実現している [54]。超伝導接合に関しては、

これまで難しいとされてきたが最近になっていくつか成功例が報告されている。韓国大学では、超伝導膜表面同士を突き合わせ溶融接合させたのちに熱処理を施す手法で超伝導接合を実現している [55, 56]。さらに、詳細はまだ明らかにされていないが、ごく最近、古河電工、住友電工でも超伝導接合に成功したとの報告がある。超伝導特性とともに機械的強度、加工性等の課題を克服し永久電流モード実現を期待したい。

最後に、更なる将来のタスクとなるかもしれないが、イットリウム系 HTS 線材の根源的課題として抱える異方性の改善が挙げられる。この異方性には、機械的異方性と電磁特性的異方性である。機械的異方性とは、同線材の形状に起因したもので、アスペクト比が非常に大きいテープ形状をしていることにより従来の金属丸線等に比べて加工性を著しく失っている点である。これは、本稿の序盤で説明した 2 軸配向組織を得るための必要性から発したものである。従って、ファセット性の強い本材料の線材としては本質的な丸線は困難と考えられる。しかしながら、疑似的な丸線、つまりアスペクト比を小さく維持した線材は可能であり、これにより加工性は格段に改善するものと考えられる。但し、この低アスペクト比線材には $200\ \mu\text{m}$ 以下の線幅で特性を維持しなければならず高度な均一性と加工技術が求められるところである。次に、電磁気的な異方性に関しては、イットリウム系超伝導材料は本質的に $B//ab$ で J_c が高く、 $B//c$ で低くなる傾向を持つ。これまで、上述の磁場中特性向上で人工ピン止め点の導入技術が開発されてきたが、その過程で、様々なサイズ、形態の人工ピンの導入が可能であることが見出されている。使用する温度、磁場において等方的なふるまいを示す線材は電磁気学的な解析とともに人工ピン組織の精密な制御により可能であると考えられる。

HTS 線材を核融合炉マグネットに適用する観点からは、中性子照射に対する影響や放射化に対する問題なども極めて重要な課題である。中性子照射による臨界電流密度の劣化の問題については、オーストリアのグループによる実験結果が出てきている。現状、YBCO 線材では Nb_3Sn 線材と遜色ない性能と確認されており、フルエンス $2\sim 3 \times 10^{22}\ \text{m}^{-2}$ から臨界電流の低下が観測されている [57]。また、GdBCO 線材の場合は Gd が中性子吸収材であることより当初はより低いフルエンスから臨界電流が低下する観測結果が得られていたが、中性子のエネルギースペクトルが問題であり、吸収断面積の大きい熱中性子領域を低減して照射を行うと YBCO と遜色ない結果も出ている。一方、中性子照射による線材の放射化についても十分な検討が必要である。ここで問題となるのは銀の含有量である。HTS 線材の他方のピスマス系では、母材自体に銀合金を用いるため放射化が大きな問題となり、余分に遮蔽が要求され、核融合炉用マグネットへの採用が一般に難しいとされる。イットリウム系 HTS 線材は銀の使用量が圧倒的に少なく、この観点からも有望である。

古代より用いられてきた鉄であっても、新しい材料の開発は依然として続けられている。発見されて 30 年、本格的

な線材開発が始まってからまだ20年の材料であるイットリウム系 HTS 線材は、高付加価値、高耐久、低コスト等でまだまだ開発の力を緩めてはいけないものと考え。まずは、当面の超伝導機器の実用化をめざし、これを普及すべく機器サイドとの連携を深めていく必要がある。その延長上において HTS 線材を適用した究極の機器として核融合炉のマグネットが位置する。これに十分な性能を持った線材を大量にかつ低コストで供給することが HTS 線材開発のターゲットとなる。

謝 辞

日本におけるイットリウム系線材の研究成果の多くは、経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) から委託を受けて行った研究開発プロジェクトの成果である。

参考文献

- [1] 橋爪秀利 他：プラズマ・核融合学会誌 **91**, 87 (2015).
- [2] 柳 長門 他：プラズマ・核融合学会誌 **89**, 374 (2013).
- [3] 伊藤 悟 他：プラズマ・核融合学会誌 **92**, 623 (2016).
- [4] C.W. Chu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **58**, 405 (1987).
- [5] 塩原 融 他：日本金属学会誌 **80**, 406 (2016).
- [6] A. Goyal *et al.*, Appl. Phys. Lett. **69**, 1795 (1996).
- [7] Y. Iijima *et al.*, Proc. Int. Workshop on Superconductivity, Honolulu, HI, **47** (2001).
- [8] C.P. Wang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **71**, 2955 (1997).
- [9] T. Muroga *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **13**, 2532 (2003).
- [10] M. Igarashi *et al.*, J. Phys. (Conf. Series, EUCAS 09), **234**, 022016 (2010).
- [11] X.D. Wu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **67**, 2397 (1995).
- [12] A. Usoskin *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **13**, 2452 (2003).
- [13] A. Ibi *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **19**, 1229 (2006).
- [14] Y.-Y. Xie *et al.*, Physica C **426-431**, 849 (2005).
- [15] V. Selvamanickam *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 3225 (2009).
- [16] T. Aytug *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **22**, 1 (2009).
- [17] V. Selvamanickam *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **27**, 055010 (2014).
- [18] X. Obradors *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **17**, 1055 (2004).
- [19] A. Gupta *et al.*, Appl. Phys. Lett. **52**, 2077 (1988).
- [20] P.C. McIntyre *et al.*, J. Appl. Phys. **68**, 4183 (1990).
- [21] T. Honjo *et al.*, J. Japan Inst. Metals. **66**, 151 (2002).
- [22] J. Gutiérrez *et al.*, Nat. Mater. **6**, 367 (2007).
- [23] M. Miura *et al.*, Phys. C **469**, 1336 (2009).
- [24] A.P. Malozemoff *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **21**, 034005 (2008).
- [25] P. Chaudhari *et al.*, Phys. Rev. Lett. **58**, 2684 (1987).
- [26] V.F. Solovyov *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 2939 (2001).
- [27] M. Bauer *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**, 1502 (1999).
- [28] M. Durrschnabel *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25**, 105007 (2012).
- [29] H.S. Ha *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **20**, 1545 (2010).
- [30] S.I. Yoo, Presentation in 2012 MRS spring meeting, Apr. 9-13, San Francisco, USA (2012).
- [31] S.H. Moon, Presentation in the 86th Workshop on HTS conductors, The Society of New-Traditional Technology, Tokyo, Japan, 27th Jul (2015).
- [32] T. Haugan *et al.*, Nature **430**, 867 (2004).
- [33] A. Goyal *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **18**, 1533 (2005).
- [34] Y. Yamada *et al.*, Appl. Phys. Lett. **87**, 32502 (2005).
- [35] V.F. Solovyov *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **20**, 20 (2007).
- [36] M. Miura *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 3275 (2009).
- [37] H. Tobita *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25**, 062002 (2012).
- [38] T. Yoshida *et al.*, Physica C **504**, 42 (2014).
- [39] T. Izumi, Physics Procedia **58**, 6 (2014).
- [40] V. Selvamanickam *et al.*, Proc. High Temperature Superconductivity Program Peer Review, Alexandria, VA, August 4-6, 2009 [Online]
- [41] V. Selvamanickam *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **26**, 035006 (2013).
- [42] V. Selvamanickam *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **28**, 072002 (2015).
- [43] M. Miura *et al.*, Appl. Phys. Express **2**, 023002 (2009).
- [44] K. Nakahata *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 8000304 (2016).
- [45] T. Izumi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 6601604 (2017).
- [46] K. Nakaoka *et al.*, to be published in Supercond. Sci. Technol.
- [47] K. Suzuki *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **20**, 822 (2007).
- [48] M. Iwakuma *et al.*, Physica C **469**, 1726 (2009).
- [49] T. Machi *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **26**, 105016 (2013).
- [50] K. Katayama *et al.*, Physics Procedia **58**, 142 (2014).
- [51] M. Iwakuma *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 4401505 (2016).
- [52] M. Iwakuma *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 4700806 (2017).
- [53] Y. Zhang *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**, 3301 (2011).
- [54] T. Nakanishi *et al.*, Physics Procedia **81**, 105 (2016).
- [55] Y. Park *et al.*, NPG Asia Materials **6**, e98 (2014).
- [56] Y.J. Park *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **27**, 085008 (2014).
- [57] R. Prokopec *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **28**, 014005 (2015).



いずみ てる お
和泉 輝 郎

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 主任研究員。九州大学大学院 客員教授。東北大学工学部応用物理学科卒。住友金属工業(株)，(公財)国際超電導産業技術研究センターを経て現職。1993年に東京大学工学部にて博士号取得。工学博士。主な研究分野は、超電導線材プロセス開発，材料学，結晶成長等。趣味はサッカーで，FC バルセロナと鹿島アントラーズを愛し，週末は小学生の指導で汗を流しています。



やなぎ なが と
柳 長 門

自然科学研究機構 核融合科学研究所 装置工学・応用物理研究系教授。核融合工学研究プロジェクト研究統括主幹。LHD建設完了の後，東大 Mini-RT プロジェクトで高温超電導線材に初めて触った際，その魅力に打ちのめされ，以来，核融合炉マグネットへの高温超電導 (HTS) 導体の適用実現に執念を燃やす。HTS 磁気浮上列車を使った大道芸？は，仕事と趣味を兼ねる。