

RE123 薄膜超電導線材

材料技術研究所 五十嵐 光 則¹・田 下 千 晴¹・林 田 知 朗¹・花 田 康 一¹・羽 生 智¹
 富 士 広²・朽 網 寛³・柿 本 一 臣⁴・飯 島 康 裕⁵・齊 藤 隆⁶

RE123 Coated Conductors

M. Igarashi, C. Tashita, T. Hayashida, Y. Hanada, S. Hanyu,
 H. Fuji, H. Kutami, K. Kakimoto, Y. Iijima, and T. Saitoh

RE123 超電導体は、液体窒素温度 (77 K) でも超電導状態が発現し、磁場中でも優れた通電特性を示す物質である。このため様々な電力機器への応用が期待され、それらに向けた線材開発が世界中で活発に進められている。当社では高度に結晶が配向した薄膜の線材開発を行っている。装置の大型化と各工程での様々な工夫により、2008年2月には全工程で5 m/h以上の製造速度で500 m長において300 A以上通電可能な長尺線材の開発に成功した。特性は世界最高であり、実用レベルに達した。

RE123 superconductor is the unique material that exhibits superconductivity at the temperature of liquid nitrogen (77 K) and has excellent current property in magnetic fields. Therefore, it is expected to be applied to various electric applications, that is why R&D of the wire using RE123 superconductor is now actively promoted all over the world. We have been adopting and developing the wire of thin film type with crystal grain highly aligned in-plane, that is called RE123 coated conductor. We developed and introduced the large apparatus and made all improvements on each process that resulted in successful fabrication of the long wire of 500 m-length with critical current of over 300 A at the rate of over 5 m/h in February 2008. The achievement showed the world record performance and reached practical level.

1. ま え が き

超電導とは、物質によって異なる特定の温度 (臨界温度: T_c) 以下に冷却すると電気抵抗がゼロになる現象である。RE123 超電導体は $REBa_2Cu_3O_x$ (RE: 希土類元素) という化学式からなる物質群で RE123 と総称されている。1987年に発見され、 T_c がはじめて液体窒素温度 (77 K) を超えたため ($T_c \sim 90$ K), いわゆる高温超電導体の一大フィーバーを巻き起こした。RE123 超電導体は超電導状態で流すことができる最大の電流量 (臨界電流, critical current: I_c) が大きく、また一般的な高温超電導体に比べ磁場中でも高い臨界電流特性を示す。そのため電力ケーブルのみならず、変圧器, 限流器, モータなどの非常に多様な電力機器への応用が期待されており、それらに向けた線材開発が世界中で活発に進められている。

RE123 超電導体は図1に示すような結晶構造を有しており、超電導電流は Cu-O₂ の面内 (ab 面) に集中しているため、線材作製のためには通電方向に結晶粒の ab 面をそろえる必要がある。それに加え、さらに ab 面内でも結晶粒界で a, b 各軸方向がそろっていないければ通電特性が低下することが知られている¹⁾。すなわち数

表1 NEDO 開発目標値 (2003 ~ 2007)

Table 1. Goal of the NEDO project (2003 ~ 2007)

線 材	高性能線材	低コスト線材
線材長	500 m	500 m
臨界電流	300 A@77 K	200 A@77 K
線 速	5 m/h	5 m/h
コスト (円/A・m@77 K, 0 T)	12	8

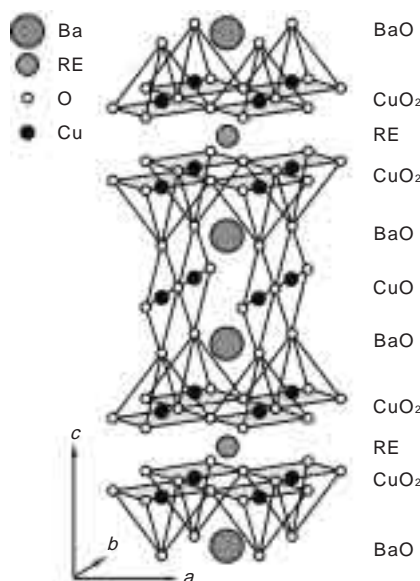


図1 RE123の結晶構造

Fig. 1. Crystal structure of RE123.

1 超電導研究室
 2 超電導研究室主査
 3 超電導研究室主査 (工学博士)
 4 超電導研究室主席研究員 (工学博士)
 5 超電導研究室室長 (工学博士)
 6 材料技術研究所上席研究員

百 m 長の線材でサブミクロンオーダの超電導の結晶粒を 3 次的に整列（配向という）させるといふ非常に高度な技術が必要となる。

当社では、1991 年に Ar^+ イオンを特定の角度で照射させながらスパッタ蒸着することで 3 次的に配向制御されたセラミックス薄膜を、無配向の金属テープ上に成膜するイオンビームアシスト蒸着（Ion Beam Assisted Deposition：IBAD）法を開発した。この IBAD 法により 3 次的に配向した中間層を作製し、その上にパルスレーザ蒸着（Pulsed Laser Deposition：PLD）法を用いて RE123 薄膜超電導層をエピタキシャルに成長させることで、臨界電流特性の優れた線材の開発に成功した。2003 ~ 2007 年にかけては、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託研究開発の一環として表 1 に示すプロジェクト目標をかかげ、機器応用に向けた高性能化、長尺化、低コスト化などの研究開発を行ってきた。2008 年 2 月には 500 m 長にわたって J_c が 300 A 以上の線材作製に成功し、超電導線材開発の指標値である J_c と線材の長さ L の積は $J_c \cdot L = 349.6 \text{ A/cm} \times 503.5 \text{ m} = 176,023 \text{ A} \cdot \text{m/cm}$ と世界最高の特性を示し実用レベルに達した。

2. RE123 薄膜超電導線材の開発

2.1 RE123 薄膜超電導線材の構造

当社で開発している超電導線材は図 2 に示すように、耐熱・高強度の Ni 合金テープ基板上（ハステロイ：幅 10 mm，厚さ 0.1 mm）に、IBAD 法により配向中間層、PLD 法により第二中間層（キャップ層）および RE123 超電導層という構造になっている。超電導層の上には、Ag 保護層を成膜してから酸素アニールをし、用途に応じた金属をラミネートして、最後にポリイミドテープによる絶縁加工を行っている。

2.2 IBAD 工程

2.2.1 IBAD 法の緒言

RE123 薄膜超電導線材の場合、図 3 に示すように ab 面内で結晶粒が傾いて接すると臨界電流が低下することが知られている¹⁾。そこであらかじめ面内配向した基板上に超電導層をエピタキシャル成長させる必要がある。配向基板の作製方法として現在のところ主に 2 通りの手法が提唱されている。1 つは Ni や Ni-W 合金を圧延して熱処理することで面内配向させる手法で、Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate を略して RABiTS 法と呼ばれている。そしてもう 1 つが IBAD 法であり、1991 年に当社ではじめて超電導線材開発に適用された手法である²⁾。IBAD 法は、薄膜形成時に Ar 等の希ガスイオンを基材に対して特定の方向から照射しながら結晶成長させることで、結晶に何らかの秩序を与えることができるという手法である。図 4 に IBAD 法の概念図を示す。イオンビームによるスパッタ蒸着によって特定の酸化物を成膜する際に IBAD 法により結

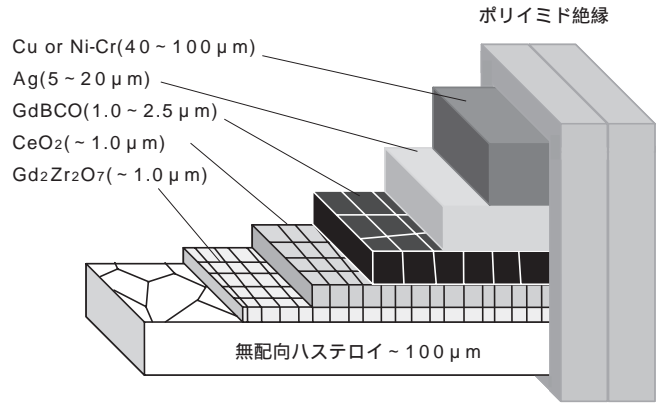


図 2 RE123 薄膜超電導線材の構造
Fig. 2. Schematic of the structure of RE123 coated conductor.

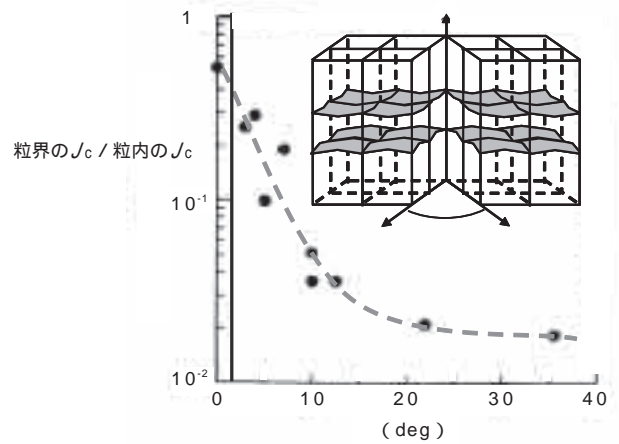


図 3 RE123 超電導体の結晶粒面内傾角と臨界電流密度 (J_c) の関係¹⁾
Fig. 3. Relationship between J_c of RE123 superconductor and tilt angle of its grains in-plane.¹⁾

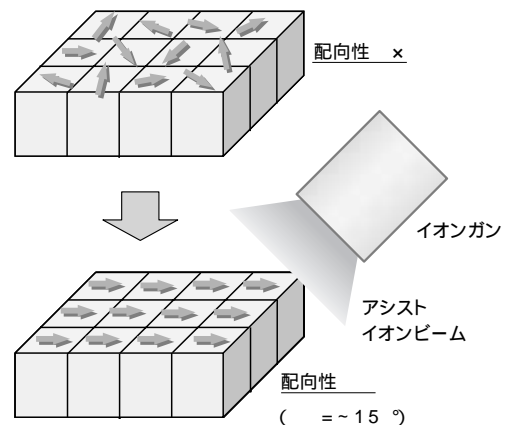


図 4 IBAD 法の概念図
Fig. 4. Schematic of IBAD technique.

晶成長制御を加えることで、無配向のハステロイ基板上に 3 次的に結晶が配向した中間層を形成することができる。

2.2.2 IBAD 法による配向中間層の作製

配向中間層の材料としては当初イットリア安定化ジルコニア (YSZ) によって良好な結晶粒の面内配向性が見

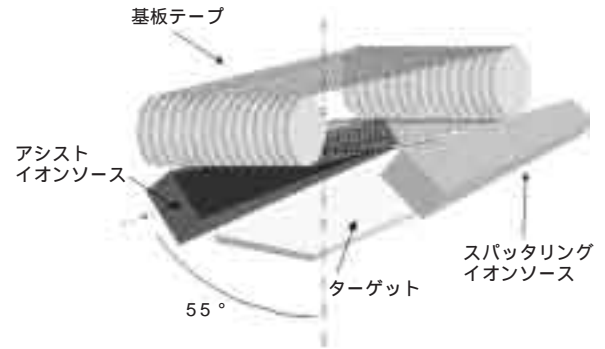


図5 大型IBAD装置の外観と模式図
Fig. 5. Photograph and schematic of large-scale IBAD system.

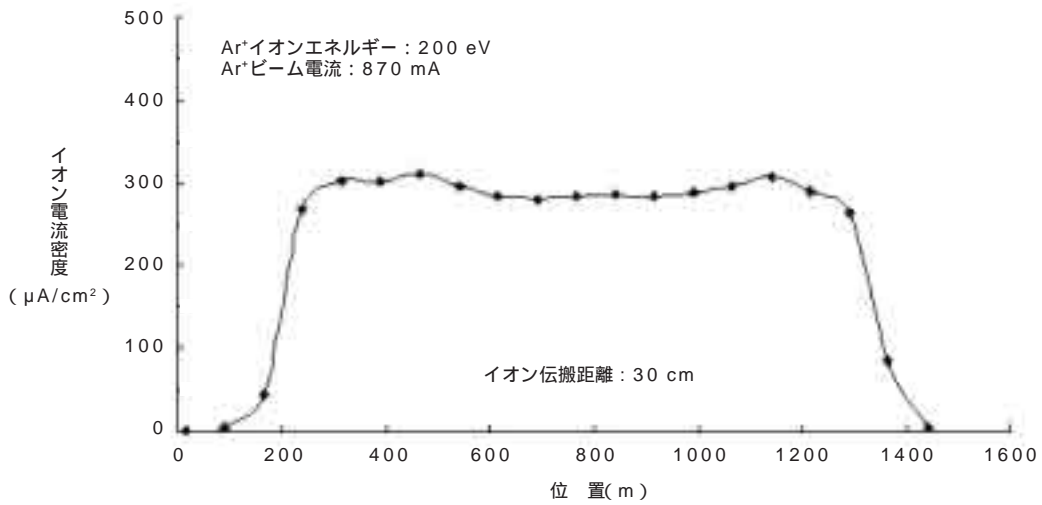


図6 成膜領域の長手方向のイオン電流密度分布
Fig. 6. Distribution of ion current density in the longitudinal direction of deposition area.

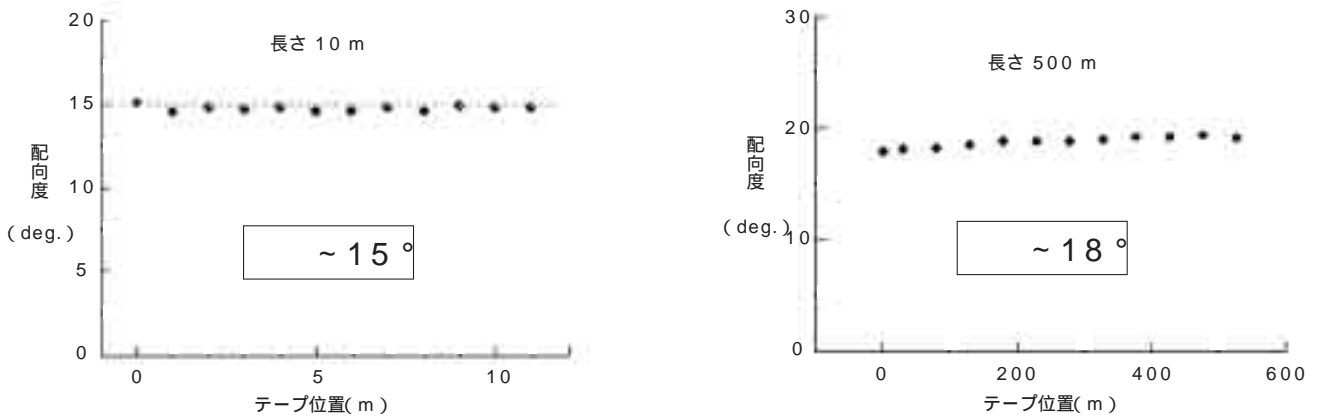


図7 5 m/hで成膜した10 mおよび500 m長のIBAD-GZOの配向度
Fig. 7. In-plane texture of the long IBAD-GZO films fabricated at the rate of 5 m/h.
10 m-length (left) and 500 m-length (right)

いだされ線材化が進められた。その後、同一の結晶構造を有する $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO) 等でも同様の効果が見いだされた。特に GZO では、YSZ の約半分の時間で配向の指標となる X 線極点図測定 の半値幅 $\sim 15^\circ$ と、IBAD 中間層として超電導線の高性能が期待できる良好な配向を示し、大幅な高速成膜化がはかれることがわかった³⁾。

さらに線材の長尺安定成膜と高速化に向けて図5に示すような大型 IBAD 法中間層作製装置を導入した。イオンソースを 1.1 m 長へ拡大して成膜領域が広がったことで高速化が期待できるが、その反面、大面積でアシストビームと蒸着粒子のバランスをとる必要があるため、条件調整が困難であった。そこでガス量等を厳密に

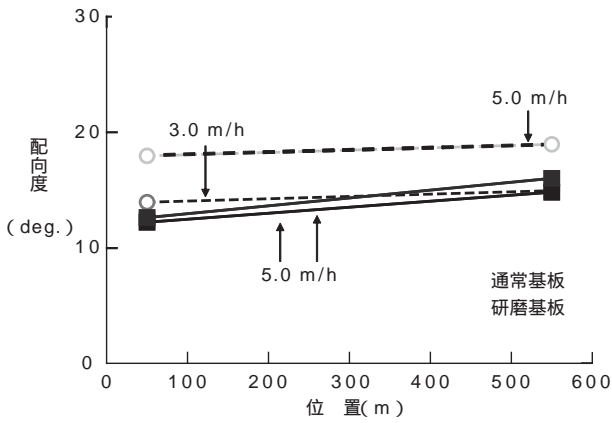


図8 通常基板と研磨基板を使用した500 m線材のGZOの配向度

Fig. 8. In-plane texture of the 500 m-length IBAD-GZO films fabricated on polished and non-polished Hastelloy tapes.

調整することにより、図6に示すように成膜領域の長手方向に均一なイオンビームを出すことに成功した。

長尺線材の作製は10 m長から開始し、最終的にはプロジェクト目標である500 m級の作製を行っていった。図7に10 m線材と500 m線材を5 m/hにて作製した結果を示す。10 m線材では $\theta = 15^\circ$ を達成したが、500 m線材では長時間成膜であるため $\theta \sim 18^\circ$ 程度と配向度が低下してしまった⁴⁾。実際500 m級の線材で $\theta = 15^\circ$ を達成するには製造速度を3 m/h程度まで遅くする必要があった。

そこでさらなる高速化、高品質化を目指して基板の研磨を試みた。従来はIBAD中間層の基板に圧延上がりハステロイテープを用いていたが、短尺試験から圧延上がりの基板に比べて研磨した基板では、膜厚に対する面内配向性が向上することがわかった。研磨によって表面粗さが改善され、同じ成膜時間でもより配向性の高い中間層を得られたと考えられる。そこで長尺研磨装置を用いて500 m級線材の基板を研磨してからIBAD成膜を行った。従来の基板を使用したIBAD中間層の配向度と研磨基板使用の結果を図8に示す。図からわかるように、従来は製造速度3 m/hで $\theta = 15^\circ$ であったものが製造速度5 m/hでも $\theta = 15^\circ$ となった。これによりIBAD中間層はプロジェクト目標である500 m級成膜にて製造速度5 m/hを達成した⁵⁾。

2.3 PLD工程

2.3.1 PLD法の緒言

RE123超電導体薄膜の成膜方法はパルスレーザー蒸着法(PLD法)、有機金属蒸着法(MOD法)、有機金属化学気相蒸着法(MOCVD法)などさまざまな方法が報告されている。これらの中で当社ではPLD法を採用している。PLD法とは、高エネルギーのパルスレーザー(主にエキシマレーザー)を固体ターゲットに照射することで発生する粒子群(ブルームと呼ばれる)を基板上に堆積させて成膜する方法である。気相法の中では格段に成膜速度が大きく、またターゲットの組成が成膜に反映され

るため組成制御が容易であるなどの特長がある。さらに、その他の成膜方法に比べて原料となるターゲットが目的物質を焼結させただけなので、原料コストが安いという魅力もある。当社ではPLD法によって、超電導層だけでなくIBAD-GZO層上の第二中間層も成膜している。

2.3.2 PLD法による第二中間層の成膜

IBAD-GZO中間層上には CeO_2 を第二中間層として成膜することで自己配向により配向度が劇的に向上することが示された。そこで CeO_2 中間層成膜に関して長尺化、高速化の検討を行った。図9にはレーザーパワーを変えて成膜した CeO_2 の配向度を示す。高パルスエネルギーで低周波数側において高配向の中間層が形成できることがわかった。そこで図10に示すような180 Wの大型レーザー、レーザースキャン機能を有した局所加熱式大面積型PLD装置を設計・導入した。レーザー強度600 mJの高エネルギーで成膜し、さらに線材長手方向にレーザーをスキャンしてブルームを複数たてることでレーザー周波数を大きくしても配向性を低下させることなく、高配向の CeO_2 膜を高速で長時間安定して作製できるようになった。さらに従来の1レーン成膜から、成膜エリアを複数回通過する複数レーンでの成膜によって収率が向上して高速化につながった。最終的には500 m長成膜で配向度 $\theta = 14^\circ$ のIBAD-GZO中間層上に実行線速10 m/hで CeO_2 を1 μm 成膜することができ、配向度も $\theta = 4^\circ$ と極めて高配向を示した。

2.3.3 PLD法による超電導層の成膜

RE123超電導体は、REの希土類元素によって超電導特性が異なる。当初は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)を採用していたが、近年ではガドリニウム(Gd)を使用した $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO)が無磁場でも磁場中でも高い臨界電流特性を示すことが報告されたため、GdBCOでの最適成膜条件を探索した。

PLD法によって成膜した超電導層の特性は、成膜時の温度と酸素分圧に大きく左右される。そこで酸素分圧に関して、通常の70 Paからさらに高い90 Paで実験したところ、図11に示すように広い温度領域で非常に高

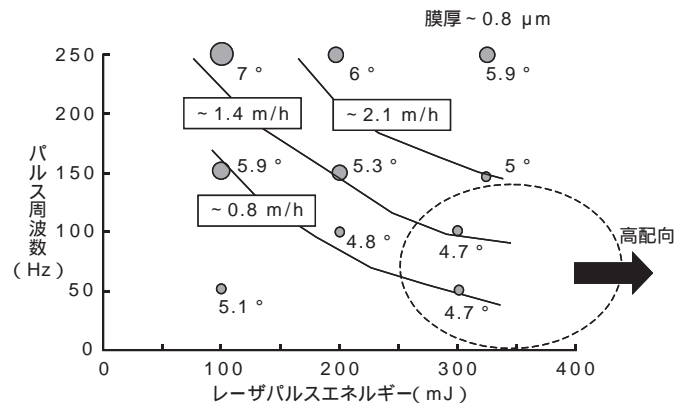


図9 PLD法による CeO_2 中間層成膜における配向度のレーザー出力依存性

Fig. 9. Dependence of laser power for in-plane texture of CeO_2 cap layers.

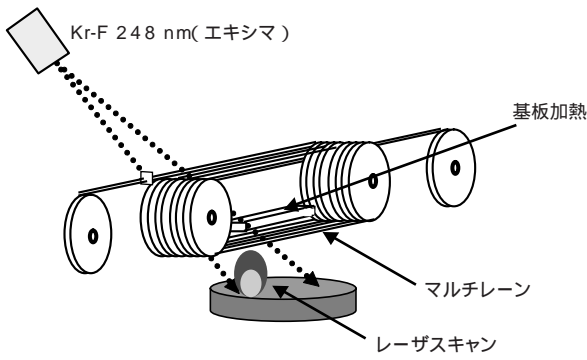


図 10 伝熱加熱型大面積 PLD 装置の模式図と外観
Fig. 10. Schematic and photograph of multi-lane type PLD system with contact heating.

い J_c 値が得られた。また長尺線材では、長手方向の電流特性の均一性が重要であるため、2 m ~ 5 m 長の成膜をして長手方向の臨界電流の均一性を確認した。その結果、ターゲット駆動による輻射での温度変化が臨界電流特性に影響していることがわかった。駆動幅の最適化をはかり温度変動を小さくすることで、図 12 に示すように臨界電流の変動幅を小さくすることができた⁶⁾。

また、磁場中での臨界電流特性の改善も試みた。一般的に強磁場中では磁束の運動が問題となるため、超電導層内に微細な非超電導相を導入し磁束をピン止めすることが有効とされている。そこで ZrO_2 を混入させた GdBCO ターゲットを使用することで人工的にピンニングセンタを導入する実験を行った。さらに人工ピン導入層を P 層、純粋な GdBCO 層を N 層とし、これらを混合積層する実験を行った。図 13 には、これら混合積層サンプルの無磁場と磁場中 3 T での単位長さあたりの J_c 値 (臨界電流密度, J_c) を示す。PPP のサンプルで磁場中での J_c が向上し人工ピンが導入されていることがわかった。また、NPN のサンプルでは P 層が 1 層にもかかわらず磁場中 J_c が大きく向上していることがわかり、この NPN の構造では人工ピン導入による無磁場での J_c の低下を防ぎつつ効果的に磁場中での J_c を向上させることができることがわかった。図 14 にはこの NPN サンプルの TEM 像と電子線回折写真を示すが、これらから P 層には $BaZrO_3$ の柱状結晶が析出しており、ピンニングセンタとなっていることがわかった。

以上の知見をもとに、2008 年 2 月に 500 m 長の成膜を行った。使用基板は、研磨ハステロイテープ上に IBAD-GZO を 1 μ m、第 2 中間層として CeO_2 を 1 μ m 成膜した基板で、 CeO_2 の 配向度は全長で 4 程度と良好な配向度であった。GdBCO 層の成膜では使用レーンを 3 レーンにして高速化を試み、40 m/h、6 層成膜 (実効線速 6.7 m/h) による厚膜化で高 J_c 化を目指した。さらに人工ピンに関する知見から 6 層成膜の中央 2 層を人工ピン導入層とした。こうして作製した 500 m 長線材を連続 J_c 測定装置によって 70 cm 間隔で測定した結果を図 15 に示す。ただ 1 点を除き J_c はすべて 300 A 以上となり、平均 J_c は 440 A、最高 J_c は 495 A と非常に高い

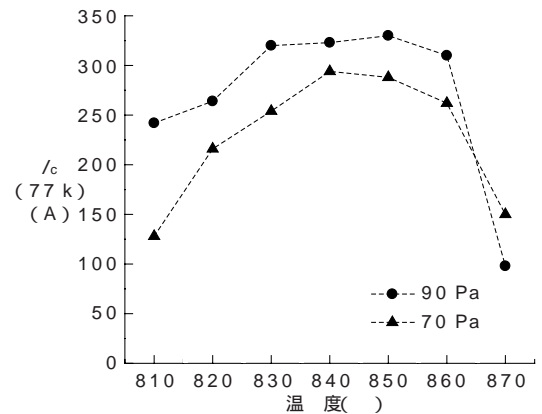


図 11 GdBCO 超電導層の J_c の成膜時における温度と酸素分圧依存性
Fig. 11. Dependence of temperature and oxygen partial pressure for J_c of GdBCO superconducting layers.

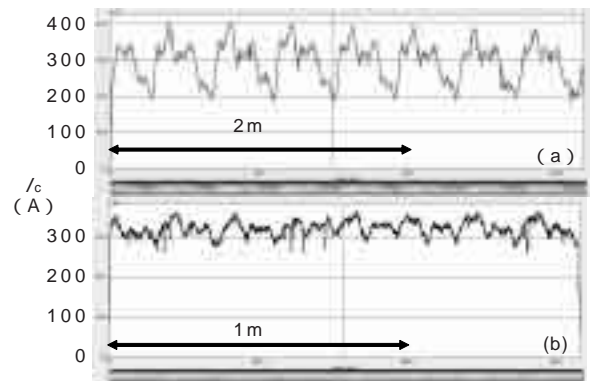


図 12 J_c の線材長手方向の分布
ターゲット公転スイング改善前 (上), 改善後 (下)
Fig. 12. J_c distribution of GdBCO in the longitudinal direction. (a) is before improvements on swing of revolution of target and (b) is after improvements.

臨界電流特性を示した⁷⁾。この線材を 5 mm 幅に裁断し、銅テープを貼り合わせてから絶縁して実用構造に加工した。それから線材に磁場がかからないように無誘導巻にして End-to-end の測定を行った結果を図 16 に示す。全長の J_c は 174.8 A で、10 mm 換算すると $J_c = 349.6$

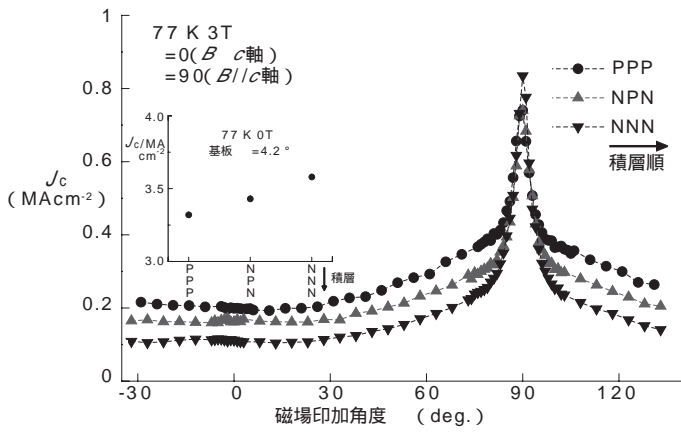


図 13 人工ピン導入層 (P) と純 GdBCO 層 (N) を 3 層混合積層したサンプルの 3 T における J_c の磁場印加角度依存性と無磁場での J_c (中)
 Fig. 13. Dependence of magnetic field angle (3 T) for J_c of short samples with 3 GdBCO layers.
 N is the pure GdBCO layer and P is the GdBCO layer with ZrO_2 . Inset is J_c in 0 T.

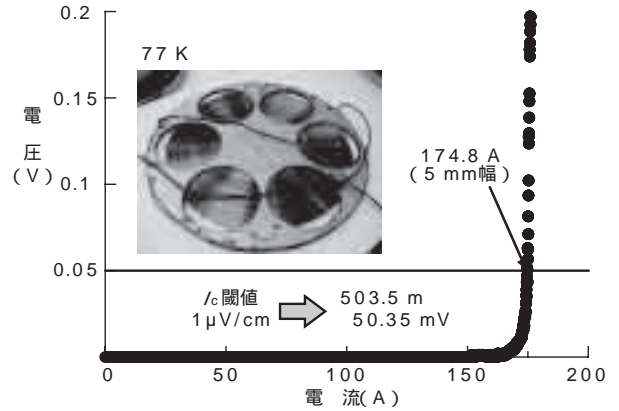


図 16 2008 年 2 月に作製した 500 m 長 GdBCO 線材の全長 End-to-end の J_c 値 (5 mm 幅)
 Fig. 16. End-to-end J_c of the GdBCO coated conductor (5 mm-width) with the length of over 500 m fabricated on 2008.2.

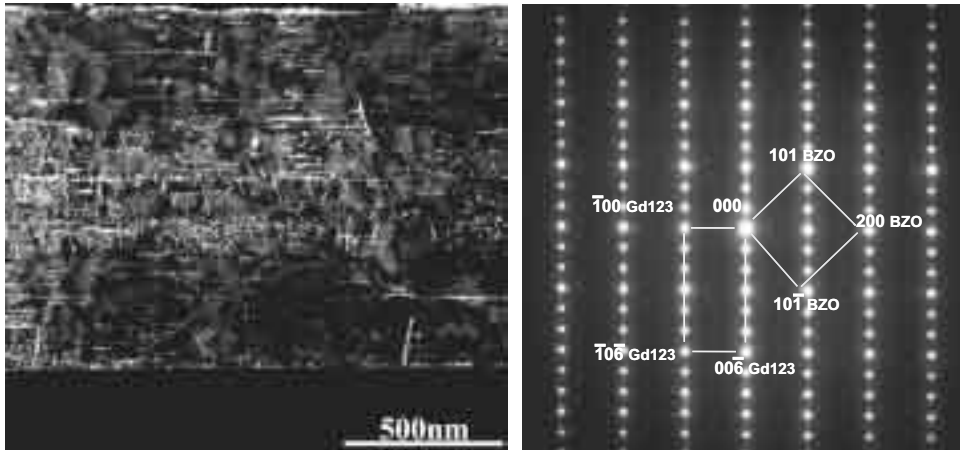


図 14 NPN と積層した超電導層の TEM 暗視野像 (左) と電子線回折像 (右)
 Fig. 14. TEM dark field image (left) and electron diffraction pattern (right) of the GdBCO layer with laminating NPN.

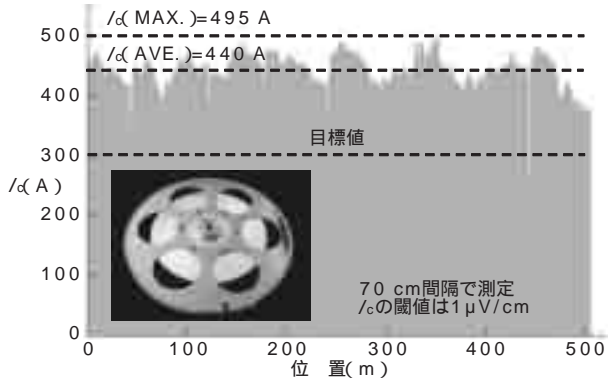


図 15 2008 年 2 月に作製した 500 m 長 GdBCO 線材の J_c 分布
 Fig. 15. J_c distribution of the GdBCO coated conductor with the length of over 500 m fabricated on 2008.2.

A/cm となり、500 m 長で 300 A 以上のプロジェクト目標を達成した。超電導線材開発の指標値である J_c と線材の長さ L の積は $J_c \cdot L = 349.6 \text{ A/cm} \times 503.5 \text{ m} = 176,023 \text{ A} \cdot \text{m/cm}$ となり世界最高の特性であった。

表 2 には 2007 年から 2008 年にかけての GdBCO 成膜の進展を示す。線速、特性などすべての面で総合的に製造能力が向上しているのがわかる。この 5 年の開発で機器応用に向けた実用レベルの長尺線材の製造スキルが固まったといえる。

3. 応用機器へ向けた線材提供の実績

電力機器で使用するためには、安定化と絶縁をほどこして超電導線材を導体化する必要がある。安定化の方法はスパッタ蒸着で銀 (Ag) 層を 10 μm 程度成膜してアニールした後、連続安定化層複合装置を用いて、金属テープを Sn はんだによりラミネートする。ラミネートの線

表2 PLD法によるGdBCO成膜の進展
Table 2. Progress in laminating GdBCO layers by PLD technique last 1 year.

	2007.1	2007.8	2008.1
巻回ターン数	1	2	3
成膜速度(m/h)	20	40	40
実効線速(m/h)	3.3	6.6	6.6
膜厚(μm)	1.8	2.0	2.3
基板研磨	無し	無し	有り
人工ヒビ	無し	無し	中央2層
1/φ Max.φ A / cm)	374	432	495
長さ(m)	200 m級	500 m級	500 m級
1/φ L(Am / cm)	64,077	112,166	176,023

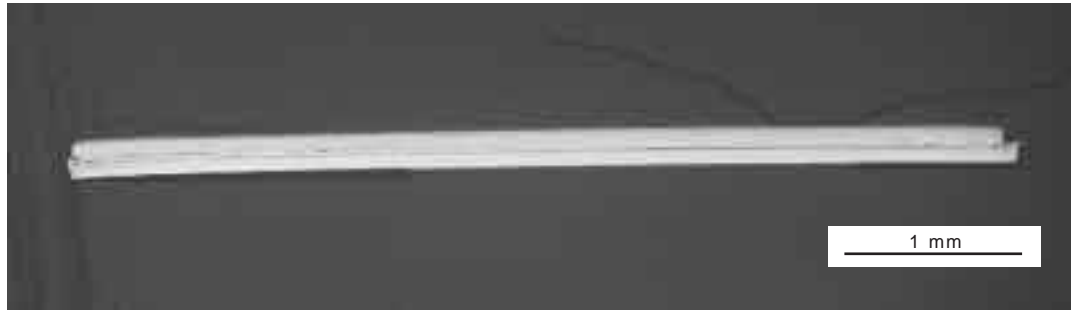


図17 銅を貼り合わせたRE123超電導線材の幅方向の断面写真

Fig. 17. Cross-sectional image of RE123 coated conductor in the across-the width direction after laminating Cu.

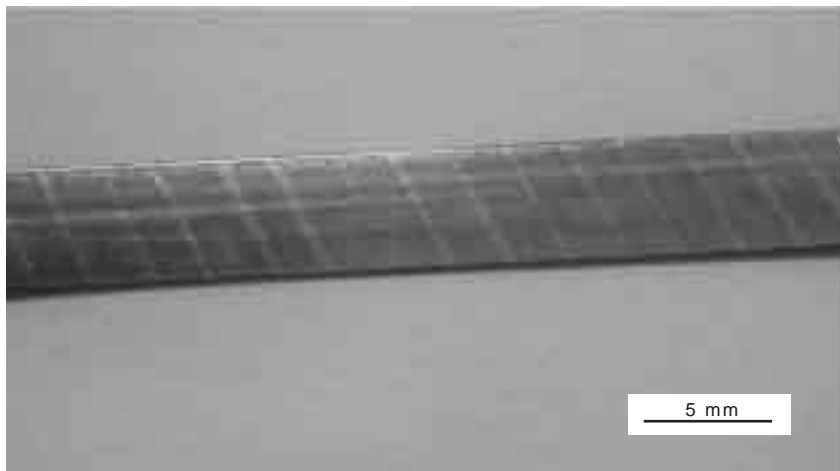


図18 絶縁加工まで行ったRE123超電導線材の外観

Fig. 18. Photograph of RE123 coated conductor after final insulating.

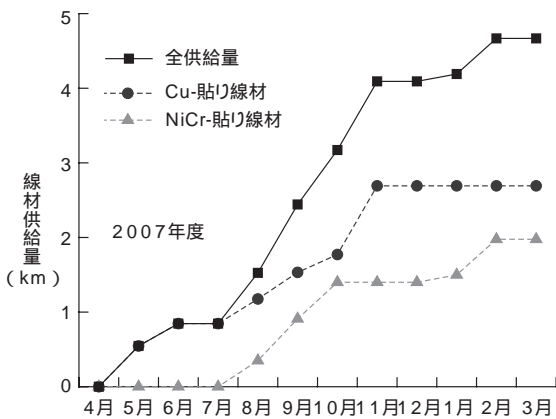


図19 2007年度のRE123超電導線材供給実績

Fig. 19. Supply of RE123 coated conductors in fiscal 2007.

速は 100 m/h が可能である．図 17 に銅 (Cu) テープを複合した断面図を示す．複合する材質としては，モータ，変圧器向けの供給線材にはさらなる安定化のために銅テープを用いる．限流器向けには，超電導状態から常電導状態への転移 (SN 転移) 時の抵抗の差を利用するため，高抵抗な Ni 合金を用いている．図 18 に絶縁したテープ線材の外観写真を示す．絶縁はポリイミドテープをラップ巻きして行っている．

図 19 に 2007 年度における IBAD/PLD 線材の応用機器への提供状況を示す．応用機器開発に向け累計で約 4.8 km の超電導線材を実用導体化加工し，機器開発へ提供した⁸⁾．

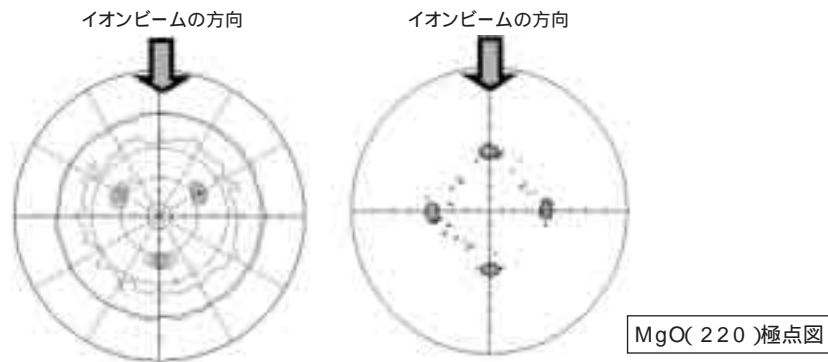


図 20 IBAD-MgO で得られる 2 種類の配向膜の極点図

Fig. 20. Pole figures of 2 type IBAD-MgO layer. Left one shows 3 fold symmetry and right one shows 4 fold symmetry.

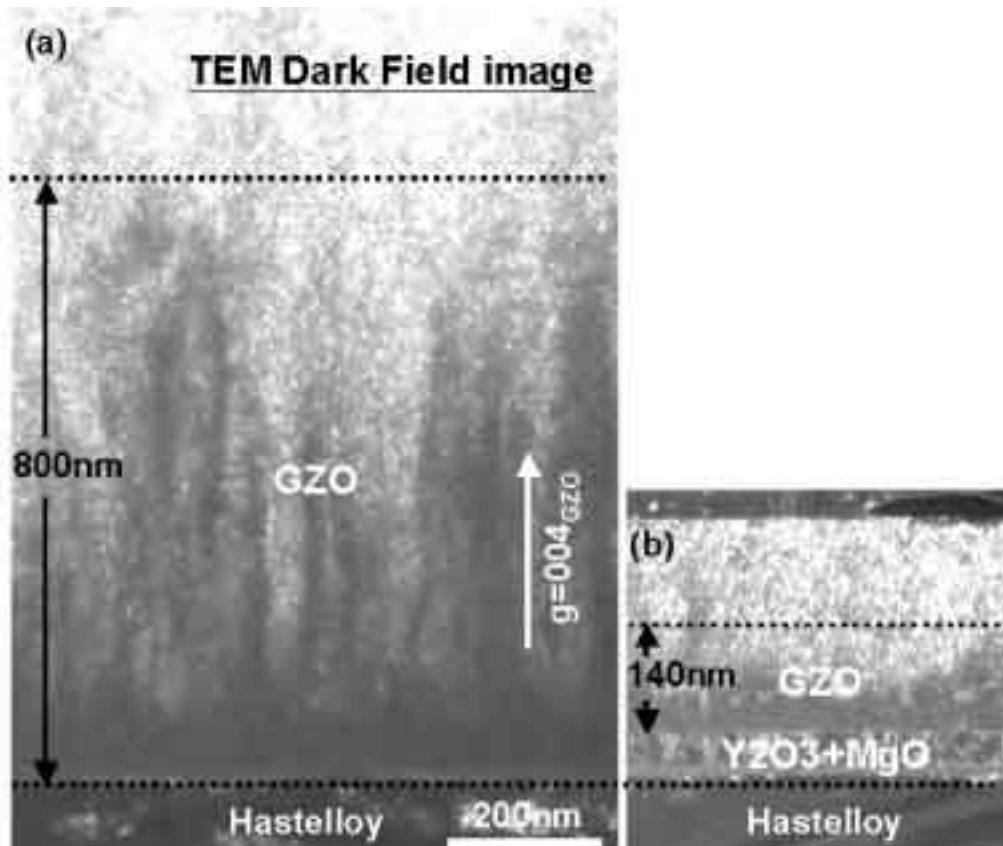


図 21 IBAD-GZO 層の TEM 写真 (a) 従来構造, (b) IBAD-MgO (3 回対称) 上の IBAD-GZO
Fig. 21. TEM dark field images of IBAD-GZO layer. (a) is the conventional type and (b) is on IBAD-MgO (3 fold symmetry)

4. さらなる高速化への展望

4.1 IBAD 工程での高速化

IBAD/PLD 法においては、コスト試算において IBAD-GZO 中間層が全体の 50% 程度と大きな部分を占めている。IBAD 中間層の低コスト化には高速化が必要であることから、数～数十 nm の極めて薄い膜厚で鋭い配向性を示すことが報告されている MgO を用いた中間層の開発を行っている。

ハステロイ金属基板上に、MgO の配向を支援する効果がある Y_2O_3 を成膜し、その上に IBAD 法で MgO を成膜した。するとアシストビームの電流密度と蒸着粒子のレートによって、異なる結晶軸が基板法線方向を向いた MgO 層が成膜されることがわかった。図 20 に、得

られた 2 種類の X 線の MgO (220) 極点測定結果を示すが、1 つは $MgO\langle 111 \rangle$ が基板法線方向を向き、もう 1 つは $MgO\langle 100 \rangle$ が基板法線方向を向いていることがわかった。

まず $\langle 111 \rangle$ が基板法線方向を向いた MgO に関しては、RE123 超電導結晶とマッチングさせるために $\langle 111 \rangle$ の 3 回対称性から 4 回対称性に変換する必要があった。そこで MgO 層上に IBAD 法で従来の GZO を積層したところ 4 回対称性に変換された。図 21 にはそれぞれ従来通り金属基板上に IBAD-GZO 成膜を行った中間層と、IBAD-MgO 上に IBAD-GZO 成膜を行った中間層の断面の TEM 写真を示す。コントラストが白くなっている部分が配向の終わっている部分に相当する。

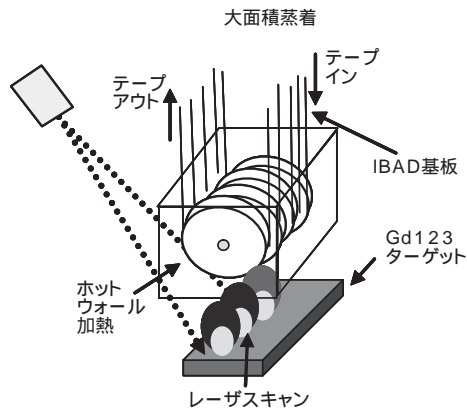


図 22 均熱加熱型大面積 PLD 装置の模式図と外観

Fig. 22. Schematic and photograph of multi-lane type PLD system with hot-wall heating.

その結果、MgO 上の IBAD-GZO は従来の 5 分の 1 の膜厚で配向が進んでいることがわかる。つまり従来は製造速度 5 m/h 程度であったものが、25 m/h 以上を見込める結果となった。これは当社独自の中間層の構造である。そこで 1.5 m 程度の線材を作製したところ、IBAD-GZO で両端 $\theta = 13^\circ$ の結果を得た。従来通り PLD 法で CeO_2 を成膜したところ $\theta = 4^\circ$ となり、GdBCO 超電導層まで成膜したところ $J_c = 200$ A 程度を得ている。

$\langle 100 \rangle$ が基板法線方向を向いた MgO に関しては、上記 3 回対称 MgO よりもさらに高速化が期待できるが、生成条件が非常に狭いという難点があった。現在、大型の IBAD 装置にて成膜条件の検討を行っており、100 m/h という高速で $\theta = 10 \sim 20^\circ$ と良好な配向を示す MgO が成膜できるようになってきた。今後長尺化において 1 レーンを使用するだけでも製造速度が 100 m/h、複数レーンを使用すればそれ以上の製造速度が得られることとなり従来に比べ大幅な低コストにつながる結果となった。

4.2 PLD 工程での高速化

PLD 法での CeO_2 成膜では、レーザーキャンなどの工夫により発振周波数を最大の 300 Hz にしても配向を低下させることなく成膜できるようになった。最近では長尺でも安定して 30 ~ 60 m/h の高速で成膜可能となっている。

GdBCO 成膜においてもレーザ出力を高くした成膜で高速化に成功している。図 22 に示す当社独自の構造を持つ均熱加熱型大面積 PLD 装置で GdBCO 成膜の最適条件を探索した結果、線速 20 m/h で J_c が 300 A 以上の長尺線材を成膜することができるようになった。今後は、単位厚さあたりの J_c 値である J_c を高くすることでさらなる高速化を目指す。

5. む す び

IBAD/PLD 法による RE123 薄膜超電導線材の開発は着実に進展しており、当社では 2008 年 2 月に 500 m 長で $J_c = 300$ A という NEDO の開発目標値を達成した。 $J_c \cdot L$ 値では世界最高の特性を示し、実用レベルに達した。また線材開発の進展にともない、これらの線材を使用した各種電力機器でも実証試験がはじまり、超電導線材の適用が見通せる段階にきている。今後は、量産化に向けて製造速度を高速化するとともに、装置運用費用を下げることでさらなる低コスト化に向けて開発を進める。

本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発 (II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)」からの受託により実施された。

参 考 文 献

- 1) D. Dimos, et al. : Phys. Rev. B., Vol.41, p.4038, 1990
- 2) Y. Iijima, et al. : Appl. Phys. Lett., Vol.60, p.769, 1992
- 3) 飯島康裕ほか：第 66 回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.13, 2002
- 4) 羽生智ほか：第 74 回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.2, 2006
- 5) 羽生智ほか：第 78 回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.167, 2008
- 6) 富士広ほか：第 76 回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.23, 2007
- 7) 五十嵐光則ほか：第 78 回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.113, 2008
- 8) 柿本一臣ほか：第 78 回 低温工学・超電導学会講演概要集, p.164, 2008