

PLD法によるイットリウム系 薄膜高温超電導線材の開発

大松 一也*・阿比留 健志・山口 高史
新海 優樹・小西 昌也

Development of YBCO Coated Conductors by PLD Process for HTS Power Applications — by Kazuya Ohmatsu, Kenji Abiru, Takashi Yamaguchi, Yuki Shingai and Masaya Konishi — R&D efforts have been made for various applications of high temperature superconducting (HTS) conductors such as power cables, high field magnets and transformers. In Japan, a national project to develop materials and power applications using coated conductors was started in 2008. Since then, we have been fabricating pulsed laser deposition (PLD)-GdBCO tapes for the development of a 5 kA, 66 kV class 3-in-One HTS model cable system as a part of this project.

In order to construct the HTS cable, stable production of GdBCO tapes with high I_c is required. For this purpose, the deposition process of buffer and superconducting layers on the clad-type substrate is a key technology. We have recently installed a 300 W high power excimer laser to our PLD equipment to obtain a thick GdBCO layer. In addition, we improved the buffer layers to enhance the critical current density. Moreover, we used a wide tape of 30 mm to obtain a large throughput, and successfully obtained uniform superconducting characteristics across the tape width. As the I_c performance of over 300 A/cm was confirmed for a length of 100 m, metal-clad GdBCO tapes have become promising for AC applications, especially for HTS cables aimed at lowering AC losses.

In this study, we investigated the I_c values and stable manufacturing process of PLD-GdBCO tapes. Differences in characteristics depending on the length of the tape were also discussed.

Keywords: high temperature superconductors, coated conductors, power cable, AC loss

1. 緒言

高温超電導線材を用いた電力ケーブルやモータなどの電力・産業機器は、コンパクトな形状で大容量送電や大出力を可能にし、既存の電力ケーブルや産業機器に比べて交流損失^{*1}を低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることが期待されており、国内外において様々な検討・開発が行われている。

当社では、長尺化・高特性化の性能向上が著しく、高電流密度・低損失などの特性を有し、コンパクトで更なる大容量送電を可能とするイットリウム系薄膜高温超電導線材（以下Y系線材^{*2}）およびそれを用いた超電導電力ケーブルの研究開発を（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通じて、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト（以下Y系プロジェクト）で実施している⁽¹⁾。

本論文では、プロジェクトにおいて特に電力ケーブルに適用する目的で開発を実施している配向金属基板^{*3}とPLD法^{*4}を用いたY系薄膜超電導線材の開発成果を報告する。

2. 開発の概要

2-1 Y系プロジェクトの概要 Y系プロジェクトでは、当社は66kV/5kA級大電流ケーブルの開発とそれに適

用するY系線材の開発を行っている。線材開発では、Y系線材の高性能化や安定製造技術など実用化に重要な要素技術の研究開発を行うと共に、15mケーブルシステム検証に必要となる長尺線材の製造を行う。一方、大電流ケーブル開発では、三相66kV、5kAの電流を通電可能とする終端接続部を有する三心一括型超電導ケーブル開発及び15m長ケーブルシステムにて検証試験を行う。

表1にY系プロジェクトの開発目標を示す。4年間で1cm幅換算で総長10km以上の線材を開発・製造し、最終的には300A/cm以上の臨界電流 (I_c)^{*5}特性を有す単長20m以上のY系線材の安定製造技術を確立する。ケーブル総損失は2.1W/m-相@5kA以下、ケーブル外径は既存のケーブル用管路^{*6}に収納可能なサイズを想定して直径150mm以下、また電力系統に導入した場合の系統事故に対して耐え得る構造とし、31.5kAの過電流を2秒間通電しケーブルに損傷のないことを確認する。

2-2 Y系線材とケーブルの構造 大電流ケーブルに使用するY系線材およびケーブルの構造を図1に示す。Y系線材は、配向金属基板、中間層、超電導層、Ag保護層、Cu安定化層から構成される。配向金属基板には、機械強度向上および交流損失低減のため、従来用いていたNi合金基板と比べ機械強度が強く低磁性の基板として、高強度の

非磁性金属の表面を薄い配向性金属で覆ったクラッドタイプの配向金属基板を用いている。中間層は、30mm幅で厚さ100 μ m程度のクラッドタイプ配向金属基板上にRFスパッタリング法、もしくは電子ビーム蒸着（EB）法でCeO₂/YSZ/CeO₂の3層構造の中間層を成膜する。この中間層上に、パルスレーザー蒸着（PLD）法で超電導層GdBa₂Cu₃O_yを成膜し、安定化層AgをDCスパッタリング法で成膜する。保護層まで作製した後、酸素アニールを行ない、30mm幅から4mm幅6本または2mm幅12本に切断して、電気めっき法により厚さ20 μ mの銅安定化層を周囲に形成する⁽²⁾。

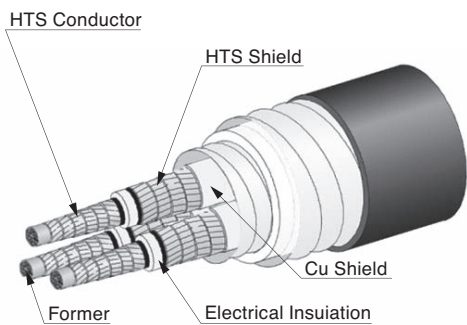
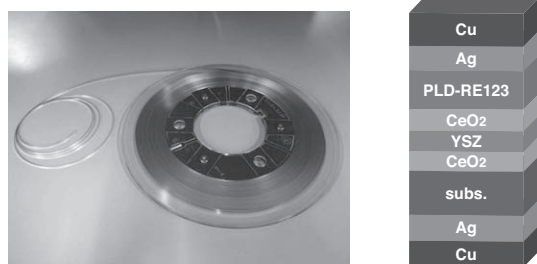


図1 Y系線材と大電流ケーブルの構造

表1 Y系プロジェクトの目標

| | | |
|------|-----|---------------------------|
| 線材 | 特性 | $I_c > 300A/cm$ 、単長20m |
| | 製作量 | 総長10km以上（1cm幅換算） |
| ケーブル | 容量 | 5kA-66kV、3相 |
| | 損失 | 2.1W/phase/m@5kA以下 |
| | サイズ | 15m長、150mm ϕ 管路に収納可能 |

ケーブル構造は、ケーブルの中心に銅より線のフォーマを用いる。フォーマは、ケーブルの機械的強度と系統事故などにより発生した過電流を通電するバイパスの役割を担う。このフォーマの周りにY系線材をスパイラル状に配置し超電導層を形成する。その外側に電気的な絶縁材料、

さらにその外側にY系線材と銅によるシールド層で1相分のケーブルコアを形成する。このコアを3本より合わせた後、三心一括として真空の二重構造となったコルゲートステンレス製の断熱管に収納する。液体窒素は、ケーブルとステンレス管の隙間を循環し冷却する。

3. 要素技術開発

3-1 線材開発の進め方 Y系プロジェクトでは、大電流ケーブルシステムへの適用を目指して、表2に示すように配向金属基板とPLD法を用いたY系線材を安定に作製可能な技術確立を目指した。この目標値を満たすためには、まず高I_c線材作製技術開発を行い、その後に30mm幅基板上の長尺線材作製プロセス開発によるスループットの向上を行うことにより高いI_cを持つ超電導線材を大量に製造する技術開発を行い、大電流ケーブル用線材を安定的に製造することのできるプロセスの確立を行った。また、PLD装置に用いるレーザー発振装置を更新することにより超電導層の歩留りを向上させ、更なる製造能力の向上を図った。実施内容を以下に示す。

- ・低磁性クラッド配向金属基板を用いた高I_c線材開発
- ・幅広化とスループット向上、安定製造技術開発
- ・レーザー装置更新による超電導層の高I_c化と歩留向上

表2 配向基板-PLD線材の諸元と要求特性

| 構成 | 材料 | 作製プロセス | 諸元 |
|-----------------------------------|------------------|--|--------------------------|
| 配向基板 | クラッド基板 | クラッド加工 配向化熱処理 | 厚さ120ミクロン |
| | | | 幅30mm |
| 中間層 | CeO ₂ | RFスパッタ法 または 電子ビーム法 | 膜厚100nm |
| | YSZ | | 膜厚200nm |
| | CeO ₂ | | 膜厚70nm |
| 超電導層 | GdBCO | PLD法 | 膜厚2~3ミクロン |
| 保護層 | Ag | DCスパッタ法 | 膜厚2~8ミクロン |
| 細径加工 | — | スリット加工 | 30mm幅→2mm幅 30mm幅→4mm幅 |
| 安定化層 | Cu | 電界メッキ法 | 20ミクロン |
| 要求I _c 特性 (77K、自己磁界) | | I _{c2} (2mm幅線材のI _c 値) = 60~80A I _{c4} (4mm幅線材のI _c 値) = 120~160A | |

3-2 中間層 配向基板-PLD線材に関する均一性の向上には、まず中間層の平坦性、均一性の向上、その形成条件の安定化が求められる。中間層はRFスパッタで成膜し、CeO₂/YSZ/CeO₂の三層構造を有しており、中間層形成条件の安定化は成膜時のプラズマ、雰囲気、温度等の最適化と長時間成膜プロセスの安定性向上により行った。現在では、30mm幅の配向クラッド基板上に成膜したCeO₂やYSZ層のピーク強度比I(200)/[I(200)+I(111)]

の評価から、線材幅30mm、約80mの全長に亘って95%以上の強度比を維持し、均一な結晶性と配向度が得られることを確認している(図2)⁽³⁾。

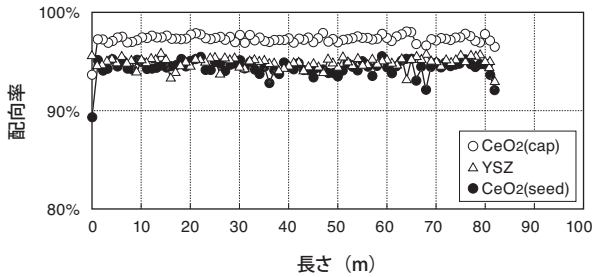


図2 中間層CeO₂/YSZ/CeO₂の長手方向結晶配向度分布

さらに中間層の表面形態が超電導特性の向上に大きく影響することを、電子ビーム蒸着法による成膜で把握した。図3にRFスパッタ法と電子ビーム蒸着法で成膜したCeO₂種層およびCeO₂キャップ層の表面SEM写真を比較して示す。電子ビーム蒸着法による種膜の平滑化が中間層の平坦化改善やクラックフリー化を可能とし、結果として高Ic化に寄与することを明らかにした。

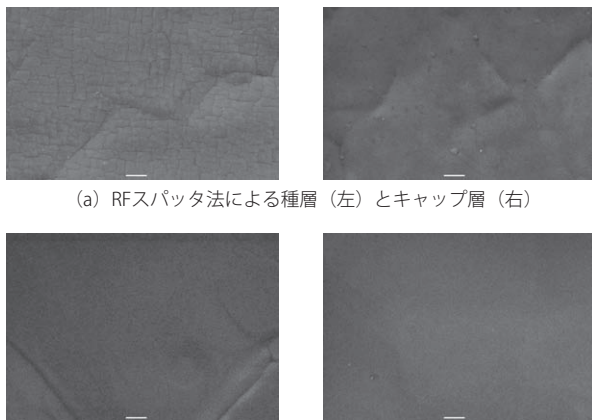


図3 電子ビーム蒸着法による中間層の表面形態の改善

3-3 超電導層 PLD法による超電導層形成に関しては、中間層と同様に成膜条件の安定性(温度、雰囲気、プラズム)の向上を図ることで均一化を達成すると共に、従来の1.5倍(200W→300W)の高出力を有するPLD用エキシマレーザーの導入によりIc特性の向上を図った。図4に示すように、新レーザーによるレーザー出力向上とプラズムサイズの増大により、超電導層の単位膜厚当たりの成膜速度が旧レーザーに比べ1.75倍に向上し、より短い成膜時間

で線材全体のIcが向上する結果が得られた。

図5に旧レーザー(200W)から新レーザー(300W)を使用し成膜した30mm幅線材の幅方向Ic分布の開発経緯を示す。レーザー出力とプラズムサイズが増大したことで一層成膜当たりの膜厚が増加し、同時に進めてきた中間層の平滑化やクラックフリー化の成果を盛り込んだ結果、線材全体のIcが飛躍的に向上した。また、新レーザーによるレーザーエネルギーの安定性向上とヒータ周辺の温度分布の改善により幅方向Ic分布も改善され、30mm線材の全領域で250A/cm以上のIc、中央部で最大500A/cm級のIcを得た。

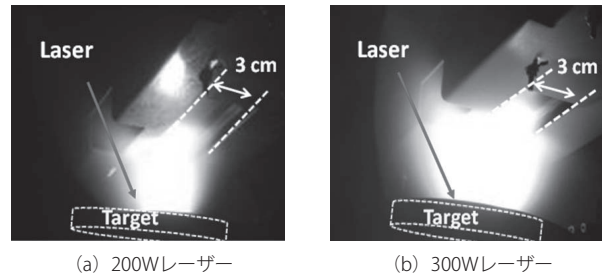


図4 レーザ装置の大型化によるプラズマブルーム比較

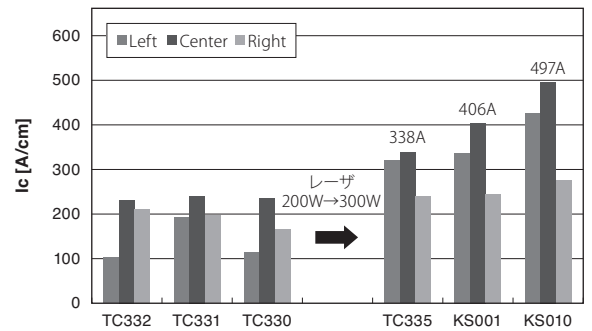


図5 30mm幅線材のIc分布の向上推移

3-4 長尺化 超電導層製作工程の30mm幅化プロセスを確立した後、30mm幅中間層上にGdBa₂Cu₃O_xを製作し、その幅方向Icを評価したところ、図5に示す短尺線材の特性を受けて50m~100m級の長尺線材では基板の中央2cmで300~350A/cmのIc値が得られた。これにより、超電導層作製工程のスループットが向上したことを確認した。次に、更なるスループット向上を行うために、幅方向端部の低Ic原因の調査・解決を試みた。調査の結果、幅方向端部は成膜時の温度が低いため、Icが低下していることが判明した。そこで、PLDの成膜ヒータを30mm幅全域に亘り、均熱が得られるヒータに更新した。狙い通り幅方向端部のIcが改善していることが確認できた。

図6に、300Wレーザーで製作した30mm幅線材を4mm幅にスリットした場合の15m長線材のIc分布の典型例を示す。15m長の4mm幅線材では最大Ic = 178~

190A ($I_c = 445 \sim 475 \text{ A/cm}$) の I_c 特性が得られた。一方、2mm 幅線材の試作結果を図7に示す。試作した結果、図7に示す通り、2mm 幅 - 285 ~ 310A/cm (2mm 幅線材の $I_c = 57 \sim 62 \text{ A}$) - 長さ 28m が得られた。2mm 幅線材では機械式スリット加工における細線加工で最大 8% 程度 I_c が低下することが判明しているため、300W レーザで製作した高 I_c 特性を有す 30mm 幅線材をスリット加工することで、ケーブルシステムに適用する長尺線材の 300A/cm を超える I_c 目標値達成の目途を得た。

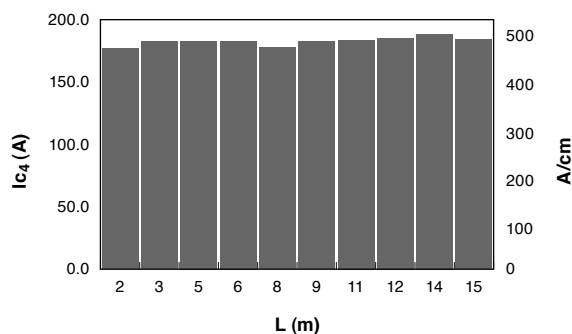


図6 4mm 幅線材の I_c 分布

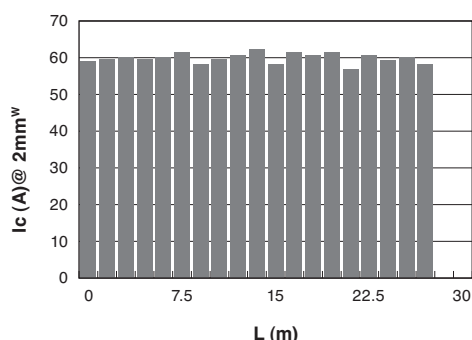


図7 2mm 幅線材の I_c 分布

4. 安定製造技術開発と実用特性

4-1 長尺線材の安定製造 成膜速度が向上したことにより、基板が受ける熱履歴が低下し、さらに、新レーザによるレーザエネルギーの安定性向上と、ヒータ周辺の温度分布の改善により、幅方向の I_c 分布も改善され、図5に示したように線材の左側と中央部で 400A/cm 以上の I_c を得た。このように、膜厚増加による I_c 向上と線材幅方向の I_c 分布改善により、ケーブル開発用線材として提供できる線材量の増加が見込める結果が得られ、超電導線材の月当たりの製造量は 30mm 幅化により 1cm 幅線材換算で 1km を超える製造能力に向上した。

これら均一線材作製技術開発においては、中間層および PLD 超電導層の成膜プロセス条件と XRD による結晶性評

価および SEM・AFM 観察から得られる各層の最表面組織の関係を調べ、成膜プロセスへ反映したことも開発加速の要因である。本技術開発結果を基に、1cm 幅あたり約 3km の超電導線材を 30mm 幅プロセスにて製造した。本工程において作製した 4mm 幅線材の I_c 度数分布を図8に示す。 $I_c = 200 \text{ A/cm-w}$ 以上の超電導線材の歩留りは図8より 34% と算出され、ケーブルシステム構築用に適用可能な特性と長さを有す線材を安定に製造できるプロセスの基礎を確立した。

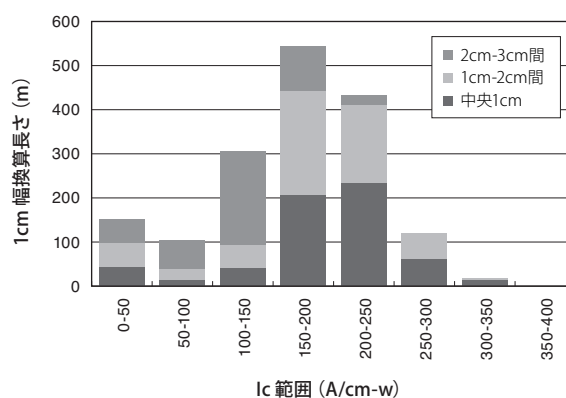


図8 超電導線材の I_c 度数分布

4-2 経時経年変化特性 配向基板-PLD 線材に対して経時経年特性を把握する目的で、66kV 大電流ケーブルの製造環境および運転環境の把握を行い、想定された環境に対応した配向基板-PLD 線材線材の試験方法の調査を行った。表3に 66kV 大電流ケーブル用線材の保存・環境条件の典型例を示す。

上記内容を基にすると、線材レベルにおいて配向基板-PLD 線材の経時経年変化を評価するための基本的な超電導特性試験内容は、主に以下の4項目にまとめられる。

- 1) 湿度、温度、真空による超電導特性 (T_c , J_c , I_c 等)
- 2) I_c の熱サイクル特性 (液体窒素温度 ~ 100°C)
- 3) I_c の歪依存性 (圧縮: 0.15%, 引張: 0.3%, スパイラル等)
- 4) I_c の過電流特性

上記4項目に対応する環境下での経時特性評価を行い、経時変化主要因となる環境影響を調査した。 I_c の湿度、温度、真空による特性調査を実施した結果を図9と図10に示す。真空下の加熱による I_c 特性は3種の条件 (100°C、150°C、100°Cで 30mmφ 曲げ) のいずれにおいても特性変化はなかった。一方、湿度下 (67mbar の H_2O) の加熱による I_c 特性調査では、室温から 80°C までは 600 時間経過後においても著しい I_c 値の変化はなかったが、115°C 以上の温度条件では温度の増加と共に時間経過に伴って I_c 値の低下が観測された。しかしながら、今回 I_c 低下が観測された条件は、表3に示す線材の保存・環境条件を大きく超

えており、ケーブル用線材の想定された湿度、温度、真空下においては、経時経年変化は生じないと考えられる⁽⁴⁾。

表3 66kV大電流ケーブル用線材の保存・環境条件

| 環境 | 項目 | 条件 |
|--------|--------|---------------------|
| 線材保存 | 温度 | 室温 |
| | 湿度 | 40～100% |
| | 保存期間 | 1年間 |
| | Ic測定 | 熱サイクル(常温～77K) |
| | 線材巻替 | 曲げ径100mm |
| ケーブル製造 | 温度 | 室温(-10℃～50℃程度) |
| | 湿度 | 40～100% |
| | 曲げ | 直径45～50mm |
| | 巻き線時曲げ | 直径45mm相当(引張り張力1kgf) |
| | 断熱管真空引 | 真空、最大100℃-10日間程度 |
| | 側圧 | 最大15kg/m程度 |
| 布設 | 温度 | 室温～65K |
| | 長期線材歪み | 最大0.3%(引張り) |
| 運転 | 熱サイクル | 室温～液体窒素温度 |
| | 圧力 | 0.2～1MPaG(液体窒素加圧) |
| | 過電流 | 31.5kA-2sec |

次に、線材Icの熱サイクル特性について調査した。試験は、線材保存および運転条件を模擬して、室温と液体窒素温度の間を多数回の熱サイクル履歴を印加させながらIcの変化を調査した。試験結果を図11に示すが、30回までの熱サイクル試験では、Icの大きな変化はなく、また安定化Cuの有無に対する影響もなかった。運転開始時以降は、室温から液体窒素温度までの熱サイクルはケーブルメンテナンス時の昇温に対応するが、ケーブル敷設後の運転開始以降の熱サイクルは30回より少ないと考えられることから、本試験結果により配向基板-PLD線材の基本的な熱サイクル耐性が確認された。

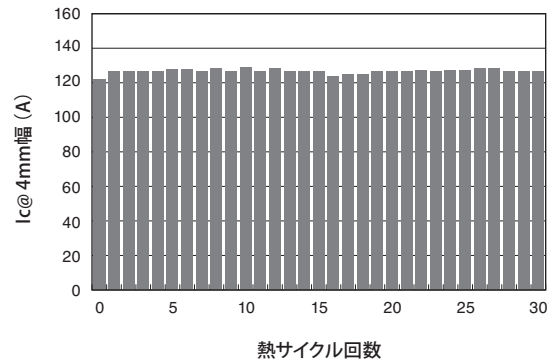


図11 Icの熱サイクル特性(室温～液体窒素温度)

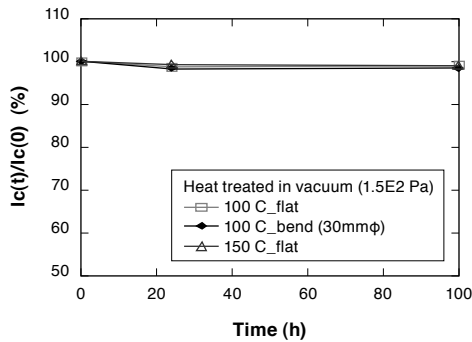


図9 真空下の加熱によるIc特性

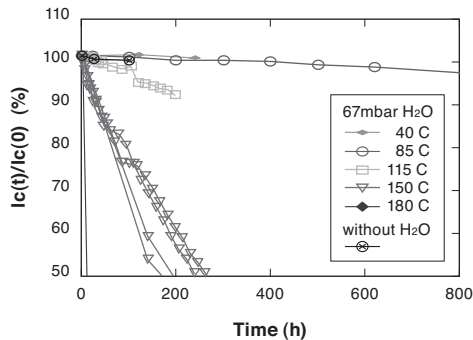


図10 湿度下の加熱によるIc特性

4-3 機械的特性 Icの歪依存性は複数の評価法により実施した。まず基本的な線材のIc-機械的特性は、室温で線材に単純曲げ、引っ張り張力およびスパイラル歪を印加し、その後Icを測定する手順で、これらの歪および張力を増加させIcが低下する領域まで試験を実施した(図12、図13)。

これらより曲げ強度限界は20mmφ、引っ張り強度限界は300MPaであることを把握すると共に、実際のケーブル製造条件と比較して線材単体としては十分な裕度を有していることが確認された。一方、スパイラル曲げ歪特性については、大電流ケーブル構造を模擬したフォーマ径(16mmφ)を用いてIcが低下し始める最少スパイラルピッチが100mmであることを把握した。ケーブル製造ではこれら限界値レベルで製造することは考えられず、一定の裕度を維持することで経時経年変化に備える必要がある。

4-4 その他の諸特性 Icの過電流特性は、31.5kA、2秒の過電流が流れた場合に対応した評価が必要となる。本評価では、大学との連携で安定化Cuの厚みを10ミクロン及び20ミクロンの2水準にて、超電導線材1本に流れる電流波形を解析で求め、線材に印加する交流電流のピーク値を徐々に大きくし、Ic劣化が開始するIpeakを調査した。さらにこのIpeak未達で最大30回までの繰り返し過電流を流してIc低下がないことを確認した。一方、

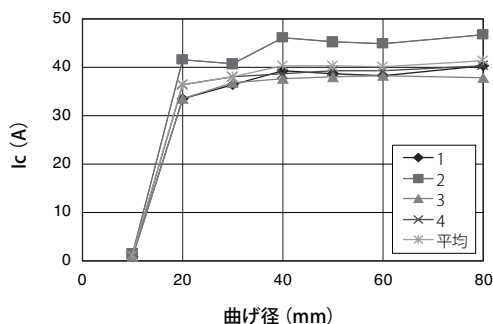


図12 Icの単純曲げ歪特性

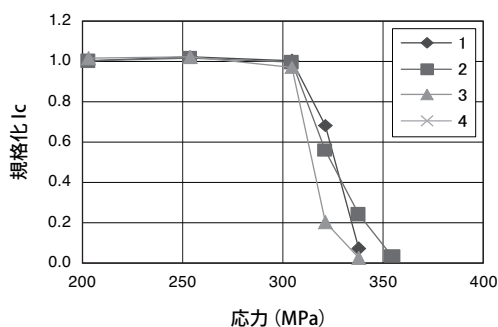


図13 Icの単純引っ張り特性

ナイフエッジ法やホール素子顕微鏡法を用いた線材の特性分布評価や電磁気挙動評価も大学との連携で実施し、配向金属基板に起因した結晶粒の電流分布への影響 (図14) や、機械式スリット加工によるエッジ部のIc劣化領域が150~200 μ m程度であること (図15) 等の有用な情報を得た^{(5)~(8)}。

5. 結 言

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの配向基板とPLD法を用いたY系線材の製造技術開発を実施した。ケーブル化に必要な性能および製造速度等を満足する要素技術を基に、高Icかつ長手方向に均一な特性を有する配向基板-PLD法による長尺線材の安定製造プロセスを確立した。同時に、機械式スリット加工法による細線化技術やCuメッキ技術、更には種々の実用特性を把握した。今後はY系プロジェクトの最終目標に向けて、100m~200m級の長尺プロセスの確立を図ると共に、Ic向上の要因となる中間層の結晶性や平滑性の改善と、PLDプロセスにおける超電導膜の組成コントロール等によりIcの向上と幅方向の均一化を図っていく。

将来的には、高い特性ポテンシャルと低コストの潜在性を秘めた配向基板上のPLD法によるY系線材のさらなる高Ic開発と低コスト長尺線材の安定製造技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供できるメーカーの位置を構築していく。応用展開については、Y系長尺線材の段階的開発状況に応じて、ケーブルや超電導モータ等の応用開拓や実証にも供給していきたい。

6. 謝 辞

本研究の一部は、経済産業省の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの一環として、(独)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したものである。

本研究開発にあたり種々の御指導を頂いた財団法人国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、および各種線材の特性評価を実施頂いた(財)ファインセラミックセンター (JFCC) や各大学 (京都大学、早稲田大学、九州大学) に感謝致します。

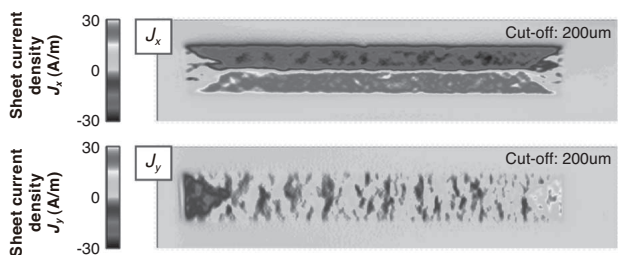


図14 ホール素子顕微鏡法による電磁気特性分布評価

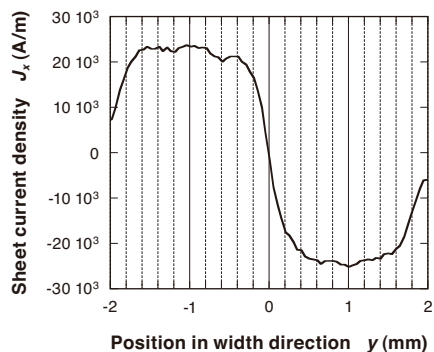


図15 切断加工を施した細径線材のJc分布特性

用語集

※1 交流損失

超電導線材・導体に発生するエネルギー損失。直流電流・磁界に対してエネルギー損失は発生しないが、交流電流・磁界に対しては、ヒステリシス損失、結合損失、渦電流損失などが発生する。これらのエネルギー損失をまとめて交流損失と呼ぶ。

※2 Y系線材

イットリウム系薄膜高温超電導線材の略称。イットリウムや希土類元素からなる高温超電導体をテープ基板上に結晶成長させたもの。臨界温度は約93Kで液体窒素温度(77.3K)で超電導状態を示す。実用化が進むビスマス系超電導線材(Bi系線材)に対して、第二世代(Second Generation)の高温超電導線材(2G線材)とも呼ばれる。特に、臨界電流の磁場特性に優れるため、大容量ケーブルやモータなどへの応用が期待されている。

※3 配向金属基板

金属材料を強加工した後に熱処理を施すことで単結晶的にテープ面を2軸結晶配向した金属テープ基板。NiやCu等の金属、NiW合金等がこの特性を示すことが知られている。クラッドタイプでは、高強度金属母材上に配向層を薄く配置し、低磁性化と高強度を実現した。

※4 PLD法

レーザー蒸着(Pulsed Laser Deposition)法の略称。蒸着させる原料ターゲットに強輝度のエキシマレーザー光などを照射させ、原料を活性なプラズマ状態にして、基板上に結晶成長を実現する成膜法。最近では高出力のレーザー機器の発展で、有力な量産プロセスとして注目されている。

※5 臨界電流(Ic)

超電導状態で抵抗を生じさせずに流せる最大の電流値。イットリウム系材料を用いた薄膜高温超電導線材では、1cm幅当たりの電流値:A/cmの単位で表わすことが多い。一般的に臨界電流は、温度が下がると増加し、磁界が印加されると減少する。

※6 管路

主に地中に埋設されて活用される、ケーブルを収容するための管状の部材。ケーブルの引き入れや引き抜きを容易にし、布設後は外傷防止の役目を果たす。高温超電導ケーブルは、大都市地下における既存管路に布設されているケーブルの増容量を主目的の一つとして、開発が進められている。

参考文献

- (1) N. Fujiwara, H. Hayashi, S. Nagaya, Y. Shiohara, "Development of YBCO power devices in Japan", Physica C 470, 980-985 (2010)
- (2) T. Nagaishi, Y. Shingai, M. Konishi, T. Taneda, H. Ota, G. Honda, T. Kato, K. Ohmatsu, "Development of REBCO coated conductors on textured metallic substrates", Physica C 469, 1311-1315 (2009)
- (3) T. Yamaguchi, H. Ota, K. Ohki, M. Konishi, K. Ohmatsu, "Development of buffer layers on 30 mm wide textured metal substrates for REBCO coated conductors", Physica C 470, 1271-1274 (2010)
- (4) N. Sakai, X. Wang, A. Ishiyama, K. Ohmatsu et al, "Understanding of deterioration phenomenon for RE123 coated conductors (2) Study on deterioration limit against various environmental stresses", Abstracts of CSJ Conference 83 (2010) p.1-37 (in Japanese)
坂井直道、王旭東、石山敦士、大松一也 他、「RE123線材の特性把握(2)各種環境ストレスに対する劣化限界の検討」、第83回2010年秋季低温工学・超電導学会講演概要集、p.1-37
- (5) N. Amemiya, Z. Jiang, M. Nakahata, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Shiohara, "AC loss reduction of superconducting power transmission cables composed of coated conductors", IEEE Trans. on Appl. Supercond. 17, 1712-1717 (2007)
- (6) Ohya Masayoshi, Yumura Hiroyasu, Masuda Takato, "Development of 66kV/5kA class "3-in-One" HTS Cable with RE123 Wires", Abstracts of CSJ Conference 83(2010) 3C-a07 (in Japanese)
大屋正義、湯村洋康、増田孝人「66kV/5kA級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発」、第83回2010年秋季低温工学・超電導学会講演概要集、3C-a07
- (7) X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, M. Ohya, H. Yumura, N. Fujiwara, "Numerical simulation on fault current condition in 66 kV class RE-123 superconducting cable", Physica C 470, 1580-1583 (2010)
- (8) K. Higashikawa, T. Kawaguchi, K. Shiohara, M. Inoue, T. Kiss et al, "Investigation of Critical Current Density Distribution in RE-123 Coated Conductors Processed for AC Power Applications", Abstracts of CSJ Conference 83 (2010) 1A-a02 (in Japanese)
東川甲平、川口鉄平、塩原敬、井上昌睦、木須隆暢 他、「交流電力機器用RE-123加工線材の臨界電流密度分布評価」、第83回2010年秋季低温工学・超電導学会講演概要集、1A-a02

執筆者

大松 一也*: パワーシステム研究所 グループ長
薄膜高温超電導線と応用の開発に従事



阿比留健志 : パワーシステム研究所
山口 高史 : パワーシステム研究所
新海 優樹 : パワーシステム研究所 工学博士
小西 昌也 : パワーシステム研究所 主席

*主執筆者