

高性能 REBCO-HM 線材

High Performance REBCO-HM Tape

1. はじめに

地球温暖化抑制を発端としてカーボンニュートラル(脱炭素)に対する注目が日々高まっており、カーボンニュートラル社会を実現するために世界中で様々な技術開発が行われています。このような情勢において核融合技術が近年脚光を浴びており、各国の研究機関やベンチャー企業にて精力的に開発が進められています。核融合技術を用いる事で二酸化炭素が発生せず、かつ原子力発電で発生するような長寿命放射性廃棄物も発生しない発電技術を実現する事が可能となります。加えて核融合現象に必要な資源も海中に豊富に存在しているので、将来に渡って安定した電源となります。このような非常に魅力的な核融合発電を実現するためには、高密度・高温状態のプラズマを発電炉内で長時間保持する必要があるため、プラズマを制御する事が重要となります。プラズマの制御方法として超電導磁石を用いた高磁場技術により、プラズマを制御する核融合発電炉が世界中で設計・開発されています。超電導線材はある温度(臨界温度)以下にする事で電気抵抗がなくなり大電流を流す事が可能であるので、超電導線材を使用する事で高磁場を発生する電磁石が実現できます。近年では高温超電導線材の1種であるREBCO線材を用いた小型核融合炉が注目を集めています。REBCO線材は希土類元素(Rare-Earth)とバリウム(Ba)、銅(Cu)、酸素(O)の化合物を超電導層とするテープ線材です。我々のREBCO線材の構造を図1に示します。黒い層が超電導層(REBCO層)であり厚みは約1.6 μmと薄いが液体窒素温度(約-196℃)で、4 mm幅線材に100 A以上の大電流を流す事が可能です。我々はこれまで長年REBCO線材の高性能化の開発を継続してきており、近年開発した高性能REBCO-HM線材の特性がお客様に

認められ、核融合炉用超電導磁石に採用されました¹⁾。

核融合炉用途以外には理化学関係の分析や研究用途において磁石の高磁場化の開発が進んでおり、高性能REBCO線材の需要が高まっています。例えば分析機器のNMR用磁石においては高磁場運転にする事で検出信号強度が増大し、分析の分解能が飛躍的に向上するので物質の詳細な分析が可能となります。我々の高性能REBCO-HM線材は上記のような高磁場運転機器にも採用されています。

2. 高性能 REBCO-HM 線材設計

核融合炉用超電導磁石や高磁場発生用超電導磁石は磁場環境下で使用されるためREBCO線材には磁場環境下での高電流特性が求められます。磁場環境下で高電流特性を維持するためには超電導層内に侵入した磁場(厳密には磁束量子)の動きを止める必要があります。磁場が動いてしまうと電圧が発生して電気抵抗が生じてしまうので高電流特性を維持出来なくなってしまいます。磁場の動きを止めるために超電導層内に常電導の部分を形成する事で、磁場が常電導部分に捕らえられて動きを止める事が可能になります。この常電導の部分をピン止め点と呼び、我々のREBCO線材はZrを人工的に導入する事でBaZrO₃のピン止め点を形成させています。従来の我々のREBCO線材はZr濃度を原料比7.5%で導入していますが、高磁場環境下では超電導層内に侵入する磁場も多くなります。侵入してきた多数の磁場の動きを効果的に抑制して高電流特性を維持するためにZr濃度を2倍の15%に向上させてピン止め点の高密度化を目指しました。加えてピン止め点が効果的に形成されるようにREBCO組成比の最適化を実施しました。

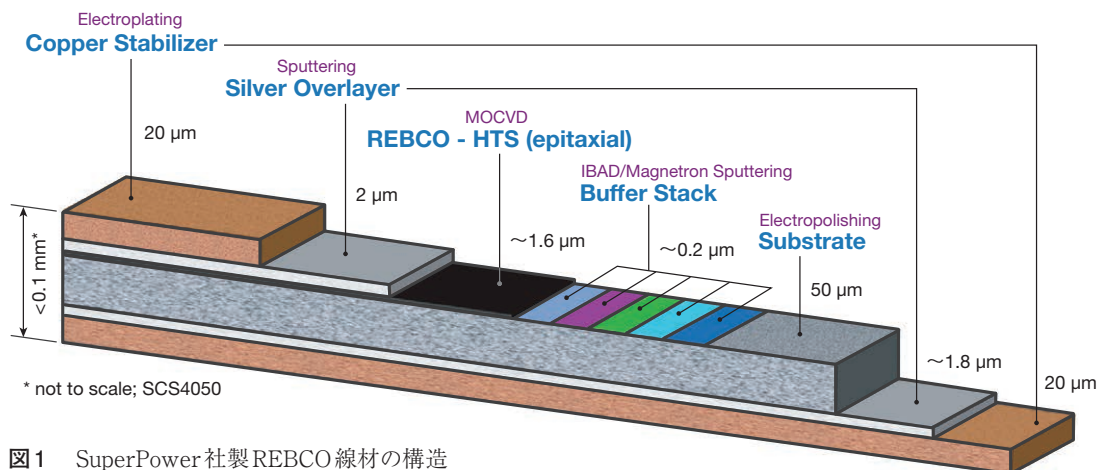


図1 SuperPower社製REBCO線材の構造
Structure of REBCO wire produced by SuperPower Inc.

3. 高性能REBCO-HM線材特性

REBCO組成比を最適化したZr15%導入線材とZr7.5%導入線材の平面TEM写真を図2, 図3に示します。図4にはREBCO組成比を最適化する前のZr15%導入線材の平面TEM写真を示します。黒い円形状に見える部分がBaZrO₃のピン止め点です。REBCO組成を適正化したZr15%導入線材が最も高密度で細い

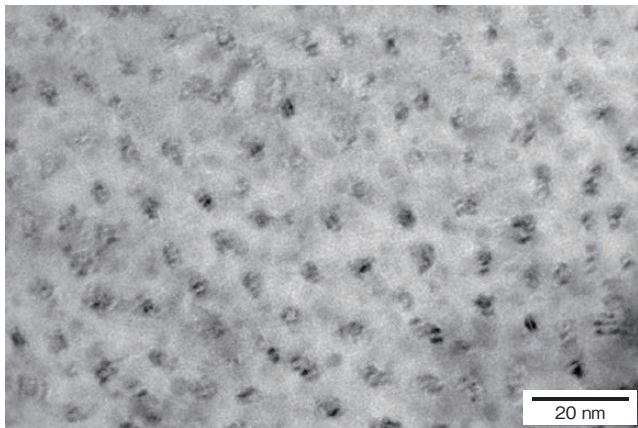


図2 Zr15%導入線材 (REBCO組成最適化後)の平面TEM写真
Plan view TEM image of REBCO wire with Zr15% after composition optimization.

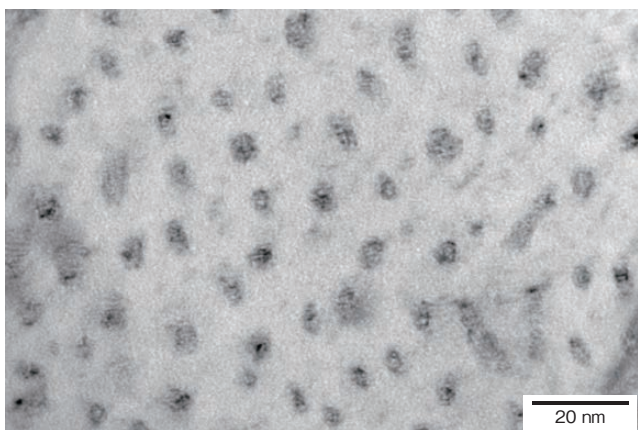


図3 Zr7.5%導入線材 (REBCO組成最適化後)の平面TEM写真
Plan view TEM image of REBCO wire with Zr7.5% after composition optimization.

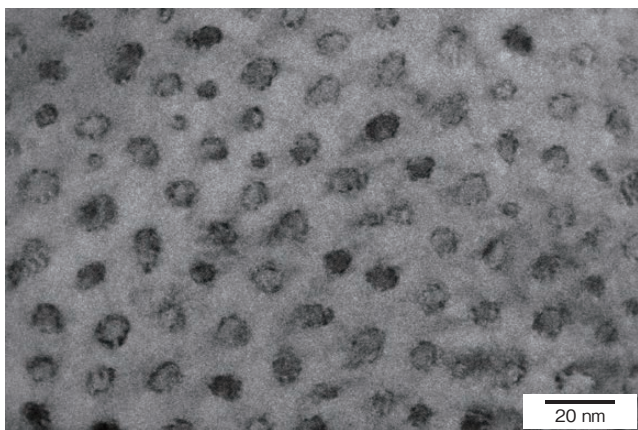


図4 Zr15%導入線材 (REBCO組成最適化前)の平面TEM写真
Plan view TEM image of REBCO wire with Zr15% before composition optimization.

BaZrO₃を形成している事が分かります(表1参照)。図5, 図6にZr15%導入線材とZr7.5%導入線材の断面TEM写真を示します。BaZrO₃は超電導層面に垂直方向に柱状で形成されており, 上下方向に薄い灰色の柱のように見える部分がBaZrO₃のピン止め点です。Zr15%導入線材ではBaZrO₃が超電導層全域に渡って柱状に繋がっている事が分かります。これに対してZr7.5%導入線材では図6中の赤い破線で囲まれた領域に不連続な部分がある事が確認されました。ピン止め点が効率的に磁場を捕らえるのは, ピン止め点の大きさと侵入して来た磁場の大きさが同程度の時です。超電導層内に侵入する磁場の大きさは半径数nm (1.4 ~ 4 nmという報告あり^{2), 3)})とされており, TEM

表1 各種線材のピン構造
Pinning center configuration of each REBCO wire.

線材仕様	ピン直径 (平均) (nm)	ピン密度 (平均) (rods/cm ²)	ピン間隔 (平均) (nm)
Zr15%導入線材 (REBCO組成適正化後)	3.3	7.5×10^{11}	7.6
Zr7.5%導入線材 (REBCO組成適正化後)	5.2	4.7×10^{11}	9.8
Zr15%導入線材 (REBCO組成適正化前)	5.4	4.2×10^{11}	12.3

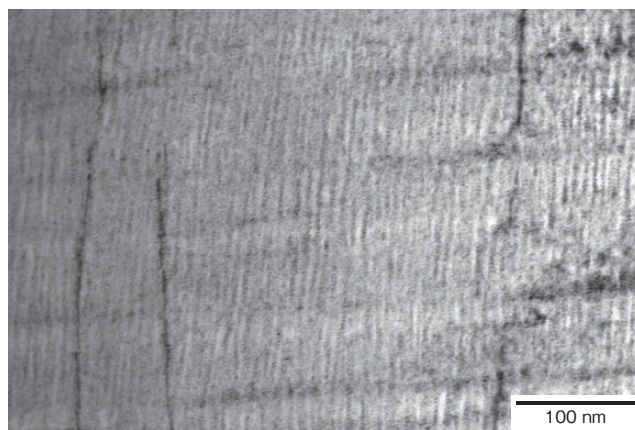


図5 Zr15%導入線材 (REBCO組成最適化後)の断面TEM写真
Cross section TEM image of REBCO wire with Zr15% after composition optimization.

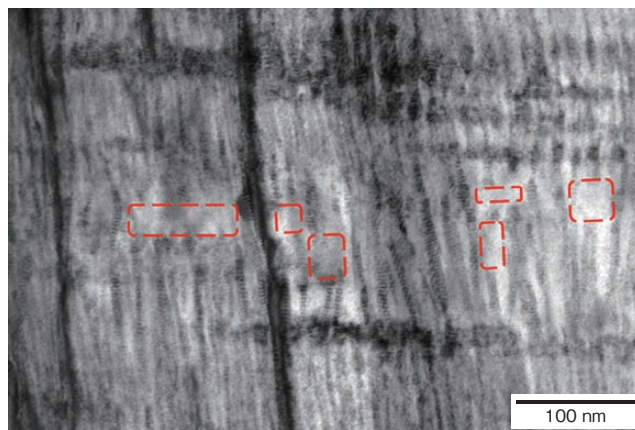


図6 Zr7.5%導入線材 (REBCO組成最適化後)の断面TEM写真
Cross section TEM image of REBCO wire with Zr7.5% after composition optimization.

分析により確認されたピン形状・構造から、開発したZr15%導入線材は高磁場環境下でも磁場の動きを効果的に止める事が可能であり、高電流特性を有している事が推定されます。図7にZr7.5%と15%を導入した線材の、超電導層面に垂直方向に磁場を印加した際の、各磁場中における電流特性の結果を示します。縦軸の I_c とは超電導状態を維持したまま流す事の出来る電流の最大値です。開発したZr15%導入線材は4.2 K ~ 30 K (約-270℃ ~ 約-240℃)の温度領域中で、10 T以上の高磁場下において従来のZr7.5%導入線材に比べて2倍以上の電流特性を有している事が確認されました。

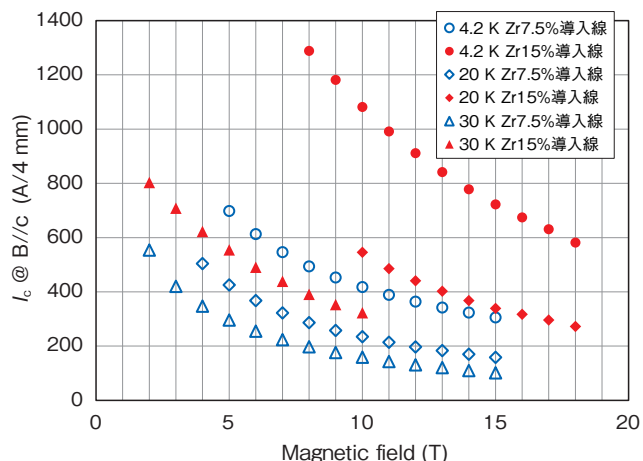


図7 Zr7.5%導入線材とZr15%導入線材の磁場中特性
In-field performance of REBCO wire with Zr7.5% and Zr15%.

4. おわりに

核融合炉用超電導磁石や高磁場発生用超電導磁石向けに高性能REBCO-HM線材を開発しました。ピン止め点の材料であるZr濃度の向上とREBCO組成比の最適化を実施する事で、従来のREBCO線材に比べてピン止め点の高密度化を達成して磁場中特性を飛躍的に向上する事ができました。開発した高性能REBCO-HM線材は様々なお客様の要求特性を満たし、核融合炉用超電導磁石や高磁場発生用超電導磁石に採用されています。我々は更なる開発を進め、より高性能なREBCO線を供給する事で高磁場技術により社会インフラを支えていきます。

参考文献

- 1) 古河電工HP > ニュースリリース > トカマクエネジー社と古河電気工業 核融合エネルギーの推進に向け両社の関係を強化 (2023年1月12日) (参照日: 2024年2月20日)
https://www.furukawa.co.jp/release/2023/kenkai_20230112.html
- 2) D.C.Larbalestier, A.Gurevich, D.M.Feldmann and A.Polyanskii: "High-Tc superconducting materials for electric power applications", Nature 414 (2001), 368-377.
- 3) S.Nawaz, R.Arpaia, T.Bauch and F.Lombardi: "Approaching the theoretical depairing current in YBa₂Cu₃O_{7-δ}", Physica C 495 (2013), 33-38.

<製品お問い合わせ先>

研究開発本部 超電導製品部 営業技術課

TEL : 0288-54-0504

お問合せフォーム

<https://inquiry-fec-form.spiral-site.com/rd>

古河産業株式会社 電装エレクトロニクス事業部

エレクトロニクス部

FAX : 03-5405-7615

E-Mail : MO_5403_54030207025100@furukawaelectric.com