

強磁場マグネット応用に向けた実用人工ピン導入 REBCO線材に関する研究

著者	夏原 真司
号	64
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5752号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00133675

氏名	なつはら (ふじた) しんじ 夏原 (藤田) 真司
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	令和2年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 応用物理学専攻
学位論文題目	強磁場マグネット応用に向けた実用人工ピン導入 REBCO 線材に関する研究
指導教員	東北大学教授 淡路 智
論文審査委員	主査 東北大学教授 淡路 智 東北大学教授 宮崎 譲 東北大学教授 津田 理 東北大学准教授 加藤 雅恒 東北大学准教授 木村 尚次郎

論文内容要旨

強磁場超伝導マグネットでは、超伝導線材の強磁場中での臨界電流特性と機械強度が最も重要であるため、高い臨界電流密度 (J_c) 特性と優れた機械特性を兼ね備える REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 線材は強磁場マグネット応用に最適な材料である。現在、東北大学 金属材料研究所では次世代の強磁場超伝導マグネットとして、REBCO 線材を用いた無冷媒型 30 T マグネット (30 T-CSM) の開発を行っているが、そのためには REBCO 線材の磁場中 J_c 特性をさらに向上させる必要がある。REBCO 線材の磁場中 J_c 特性向上を目的として、人工ピンと呼ばれるナノサイズの析出物を REBCO 層に導入する研究が行われており、顕著な特性向上効果が報告されている。しかしながら実用 REBCO 線材への人工ピン適用においては、その特性が安定せず大きくばらつく問題や、実用的な高速成膜の際に人工ピンがどのような形で導入され、どの程度の J_c 向上効果があるのか未知な点がある。また、強磁場マグネットでは電磁力により線材に大きな引張応力が作用するため、線材の機械特性も非常に重要である。そのため、人工ピン導入 REBCO 線材の、応力や歪に対する超伝導特性の挙動を明らかにする必要がある。さらに、REBCO 線材を強磁場マグネットに適用した際に、予期せぬ劣化が発生する事例が少なくなく、その適用には課題が残る。そのため、短尺の REBCO 線材の評価だけでは不十分であり、長尺線材を用いた REBCO コイルの強磁場中での特性評価が重要となる。本研究では、30 T-CSM への適用可能な実用人工ピン REBCO 線材を実現し、その強磁場中での超伝導特性を理解することを目的とした。

まず、人工ピン導入時に問題となる J_c 特性のばらつきを低減するため、独自に開発した Hot-wall PLD 装置を用いた REBCO 成膜を検討した。人工ピンとして BaHfO₃ (BHO) をドーブした EuBCO (BHO-EuBCO) を REBCO 層の材料に適用し、成膜条件を検討した結果、蒸着速度によって人工ピンの構造と J_c 特性が大きく変化することを見出した。低速蒸着膜では REBCO 膜中に導入された BHO が c 軸相関ナノロッドとして析出しており、著しく高い J_c 特性が得られた。しかしながら、生産速度が遅く、膜厚の増加に伴って特性が大きく低下する

ことから、量産には不利であることが分かった。高速蒸着膜では、BHO が短く切れたナノロッドとして析出しており、低速蒸着程ではないものの、従来の人工ピンなし GdBCO に比べ 4.2 K, 15 T において 2 倍程度の高い J_c 特性が得られた。さらに、生産速度が速く、膜厚による特性変動もほとんどないことが確認されたため、生産には有利な条件と言える。蒸着速度が増加すると REBCO 成膜時に基板上を拡散する蒸着粒子数が増加し、拡散距離が短くなることによって、ナノロッドの成長が阻害されるため、短いナノロッド形状となったと考えられる。高速蒸着条件を用いて長尺線材を作製したところ、線材の長手方向臨界電流分布におけるばらつき（標準偏差÷平均値）が 5%以下と、人工ピンなし GdBCO 線材と同じレベルの非常に均一な臨界電流特性が確認でき、特性の再現性も良好であった。これらの結果により、高速蒸着条件を用いることで実用人工ピン REBCO 線材の量産が可能となった。

開発した実用人工ピン REBCO 線材の強磁場中での J_c 特性評価を通じて磁束ピンニング特性の評価を行った。高速蒸着条件によって成膜された BHO-EuBCO 膜では、従来のナノロッド状の人工ピンが導入された REBCO 膜とは異なり、巨視的ピン力密度 (F_p) 特性が温度によってスケーリングされることが分かった。ランダムピンが支配的である人工ピンが導入されていない GdBCO においても、このようなスケーリング則が成り立つことから、高速蒸着によって導入された BHO はランダムピンのような振舞いであると言える。高速蒸着 BHO-EuBCO 膜のスケーリング則を用いることにより、コイル設計で必要となる任意の温度・磁場における J_c 特性の定式化が可能となった。できたため、これによりコイル設計が可能となった。また、高速蒸着では同じ成膜時間でより厚い膜を形成することができるため、厚膜化による高い J_c が得られ、30 T-CSM で必要となる J_c 特性を超える特性が得られた。

機械特性で重要となるのが、長手方向に引張応力 (歪) を印加した際に特性が不可逆的に劣化する不可逆応力 (歪) の値と、歪による J_c 特性の変化である。液体窒素中引張試験を行い、不可逆歪を評価したところ、量産人工ピン REBCO 線材の不可逆応力は 600~700 MPa 程度、不可逆歪は 0.45 %程度であり、30 T-CSM の設計値である 384 MPa を大きく超える特性が確認できた。さらに、不可逆歪は人工ピンの有無によらず REBCO 層の膜厚の 0.23 乗に比例して減少することが分かった。この膜厚依存性はセラミックスの破壊力学における体積効果によって説明できた。歪による J_c の変化を調べるため、引張・圧縮の両方の歪を印加できる液体窒素中曲げ試験を行った。その結果、人工ピン導入によって、歪による J_c の変化 (歪感受率) が増大し、 J_c が最大となる歪の値 (ピーク歪) が圧縮歪側へシフトすることが分かった。しかしながら、歪による J_c 変化は人工ピンを導入した場合でも 5%以下であり、実用上は問題にならないと考えられる。歪感受率の増加に関しては、人工ピン導入によって REBCO 膜に局所的な歪が印加され、 T_c が低下したことによると考えられる。ピーク歪のシフトに関しても、人工ピン導入による局所歪が関与していると考えられるが、現象が非常に複雑であり、その原因解明は今後の課題である。超伝導マグネットの実運用を考慮すると、繰返し応力印加による疲労特性も重要である。液体窒素中で繰返し引張試験を実施し、疲労特性を調べた結果、30 年程度のマグネット運転に相当する 1×10^5 回

までは疲労による強度低下は無いことが確認できた。これらのことから、実用人工ピン REBCO 線材は 30 T-CSM に適用し得る十分な機械強度を有していることが確認できた。

長尺線材を用いたコイルにおいても線材の高強度特性を維持するか実証するため、150 m 長の REBCO 線材を用いてコイルを作製し、強磁場 (11 T) 中で液体ヘリウム冷却したコイルに通電することで電磁力を印加する試験を実施した。人工ピンなし GdBCO 線材を用いて作製した最初のコイル試験では、250 A 通電時 (最大応力 474 MPa) においてコイル同士の接続箇所での応力集中による劣化が確認された。しかし、コイル巻線部分では特性劣化は無かった。コイル同士の接続箇所での劣化対策として、コイル外周で全周接続する構造を採用した。人工ピン線材を用いて作製した改良接続構造の二つめのコイルでは、コイル同士の接続箇所での劣化は見られなかったが、250 A 通電時 (最大応力 608 MPa) においてコイル部に特性劣化が見られた。劣化箇所を調査した結果、コイル巻線内部に設けられた線材同士の接続部で局所的に劣化しており、それ以外のコイル巻線部に劣化は無かった。線材同士の接続部での劣化は、接続構造に起因した応力集中が原因であり、構造を変更することで対策が可能である。したがって、接続部の除くコイル部分は、線材の不可逆応力に近い 608 MPa の電磁力まで耐え得ることが確認できた。このことは、長尺線材においても線材の高強度特性を維持していることを示しており、実用人工ピン REBCO 線材は 30 T-CSM に適用した際にも十分な強度を有することが実証できた。

本研究では、Hot-wall PLD 装置を用いた高速蒸着により、高い磁場中 J_c 特性と高い生産性を有し、特性の均一性および再現性に優れる実用人工ピン導入 REBCO 線材を実現した。高速蒸着で作製された人工ピン導入 REBCO 膜では、人工ピンが短いナノロッド状に析出し、巨視的ピン力密度のスケーリング則に従うランダムピンの振舞いとなることが分かった。その結果、スケーリング則を用いることで、コイル設計で必要となる J_c 特性の定式化が可能となった。また、実用人工ピン導入 REBCO 線材は 600 MPa を超える高強度特性を有しており、その強度は長尺線材においても維持されることが確認できた。これらのことから、実用人工ピン導入 REBCO 線材は 30 T-CSM へ適用し得る十分な臨界電流および機械特性を有するものであることが確かめられた。本研究で得られた結果は、REBCO 線材を応用した次世代強磁場マグネットの実現に大きく貢献するものである。

論文審査結果の要旨

すでに市販されている $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) 線材は、その高い磁場中臨界電流と優れた機械特性により、強磁場マグネットへの適用が期待されている。このため、人工ピンと呼ばれるナノサイズの析出物を REBCO 層に導入する研究が行われ、研究室レベルではその効果が多数報告されている。一方で、高速成膜による長尺化が求められる実用線材では、その高速成膜の影響や均一性が課題となっている。本研究は、30 T-CSM への適用可能な実用人工ピン REBCO 線材を実現し、その強磁場中での超伝導特性を理解することを目的とした。

新しく開発した Hot-wall PLD 装置を用い、人工ピンとして BaHfO_3 (BHO) をドーブした EuBCO (BHO-EuBCO) を高速作製することで、磁場中臨界電流特性の優れた長尺実用 REBCO 線材の開発に成功した。

臨界電流特性は、成膜速度を上げることにより人工ピンの分散や形状が大きく変化することを見出し、高速成膜した REBCO 線材では、広い温度磁場範囲で磁束ピンニング特性のスケールングが実現しており、人工ピン導入にもかかわらずランダムピンの振る舞いをするのが理解された。

機械特性を評価した結果、量産人工ピン REBCO 線材の不可逆応力は 600~700 MPa 程度、不可逆歪は 0.45 %程度であり、30 T-CSM の設計値である 384 MPa を大きく超える特性が確認できた。超伝導特性が不可逆的に劣化する歪は、REBCO 層の膜厚の-0.23 乗に比例して減少することを見出し、セラミックスの破壊力学における体積効果として理解できた。

これら長尺線から切り出した短尺試料での評価を踏まえ、長尺線での特性評価をするために、コイルを作製し強磁場中高電磁力下の超伝導特性及び機械特性を評価した。その結果、線材の許容応力に近い 580 MPa の電磁力まで、優れた特性を保持することが実証された。

以上のように、実用人工ピン REBCO 線材が実現し、強磁場マグネット応用に十分な臨界電流および機械特性を有することが確かめられた。本研究で得られた結果は、REBCO 線材の強磁場マグネット応用に有用なものであり、次世代強磁場マグネットの開発に大きく貢献するものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。