

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420273

研究課題名(和文)高温超伝導薄膜線材のナノ欠陥最適化のための磁場中臨界電流特性精密評価

研究課題名(英文) Investigation of in-field critical current on high-temperature coated conductor for optimal design of nano-scale defect

研究代表者

井上 昌睦 (Inoue, Masayoshi)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：80346824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：希土類系高温超伝導線材の電流輸送特性を広範な温度(4.2K～77K)と磁場(自己磁場～27テスラ)に亘り精密且つ系統的な実験により明らかとするともに、物理モデルに基づく定式化を図り、その適用性と有用性を確認した。更に、技術的・コスト的に計測が容易な液体窒素温度域の特性から、計測が困難な低温域の特性を推測する評価指針について明らかとした。これらの成果は、同線材を用いた機器の最適設計において不可欠となるばかりでなく、線材作製のフィードバック技術にも資するものである。

研究成果の概要(英文)：We have investigated current transport property of REBCO coated conductors over a wide range of temperature (4.2K to 77K) & external magnetic field (self-field to 27T) and expressed it by using our proposed model based on a percolation transition model and scaling law of macroscopic pinning force density. Moreover, we confirmed in-field critical current at low temperature can be predicted from that at liquid nitrogen temperature by choosing certain conditions of magnetic field. These results are useful and effective not only for optimal design of electric power devices but also for feed-back to production of REBCO coated conductors.

研究分野：超伝導工学、計測・制御工学

キーワード：高温超伝導 超伝導線材 臨界電流 電流電圧特性 強磁場 X線CT

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導線材の開発において最も重要な材料パラメータのひとつが、ゼロ抵抗状態で印加可能な最大の電流値を表す「臨界電流」である。臨界電流は温度や磁場といった環境に強く依存していることから、超伝導線材の実用領域は温度、磁場、電流の3つで制限されることとなる。高温超伝導線材は、従来の金属系超伝導線材に比べて格段に広い実用領域を有していることから、多岐に亘る応用が期待されている。従って、同線材の臨界電流特性を広範な温度、磁場領域に亘って明らかとすることが各種応用機器の設計において必要不可欠である。そこで、臨界電流の温度、磁場依存性の詳細かつ系統的な計測が不可欠となるが、関連研究の進展とともに、いくつかの問題が顕在化してきた。ひとつは、臨界電流だけでなく、電界—電流密度特性そのものの特性が機器の設計において不可欠であること。2つめは、線材の性能向上に伴い電界—電流密度特性の計測そのものが困難となりつつあること。この他、ヘリウムの使用が不可欠な低温領域の性能検査には多大なコストがかかることも、特にプロセス開発において問題となりつつある。これに対し申請者は、高温超伝導線材の電界—電流密度特性の温度、磁場依存性を詳細かつ系統的に実験により明らかとするとともに、臨界電流密度の統計分布を考慮した物理モデルを提出し、臨界電流特性の定式化を実現してきた。また、物理モデルに基づいて、臨界電流密度の統計分布の差異を可視化することにより、臨界電流密度の起源となるピンニングの差異を明らかとする手法を示してきた。これらの手法は、人工ピンニングセンターを導入することにより磁場中性能の向上を目指した、先進の高温超伝導線材の評価にも適用可能であり、また、各種応用機器の設計にも資することが期待できる。

2. 研究の目的

先進高温超伝導線材の電流輸送特性を、精密かつ系統的な実験により明らかとするとともに、我々の提案している物理モデルに基づく電流輸送特性の定式化を行い、任意の温度、磁場における特性推定を実現する。

また、物理モデルから得られる臨界電流密度の統計分布解析を行うとともに、比較的实验の容易な液体窒素温度域(65Kから77K)での臨界電流と、各種超伝導応用機器の運用が検討されている液体ヘリウムフリーの低温域(20Kから30K程度)の磁場中臨界電流特性との相関について検証を行うことにより、線材作製プロセスへのフィードバック技術の確立を図る。

3. 研究の方法

本研究では、2つの手法で作製された希土類系高温超伝導線材の電気的特性を詳細かつ精密に計測するとともに、物理モデルに基

づく電流輸送特性の定式化ならびにX線マイクロCTによる線材内部の非破壊観察を実施し、線材性能の比較と性能欠陥因子の解明を図った。具体的な方法は以下のとおりである。

(1) 電流輸送特性の精密計測

将来の低コスト線材作製法として期待されているトリフルオロ酢酸塩を用いた塗布熱分解法と、現在世界的にも優れた磁場中臨界電流特性を得ているパルスレーザ蒸着法とによる高温超伝導線材の電界—電流密度特性を、広範な温度(4.2Kから77K)と磁場(自己磁場から27テスラ)に亘り系統的に計測した。通電電流による端子部での発熱の影響を抑えるためパルス測定を行っている。試料温度はヘリウムガス・フローによって制御しており、その精度は ± 0.1 K程度である。

(2) 物理モデルに基づく電流輸送特性の定式化

我々が提出している物理モデルでは、臨界電流密度の統計分布ならびに巨視的ピンク密度の温度スケール則を用いることにより、電界—電流密度特性の温度、磁場依存性を定式化することが可能となる。本研究では、精密計測により得られた実験結果から、統計分布パラメータおよびスケールパラメータを抽出することで、未測定領域を含めた任意の温度、磁場における電界—電流密度特性の記述を試みる。また、電界—電流密度特性を元に、電界基準で定められる臨界電流密度や、べき乗近似の際のべきの指数である n 値といった、線材の性能指針となる値についても評価した。

(3) X線マイクロCTによる線材の内部構造観察

長尺線材において、局所的な低臨界電流を示す部位を抽出し、X線マイクロCTによる内部構造観察を実施した。希土類系高温超伝導線材においては、超伝導層の膜厚が数マイクロメートル程度であるため、空間分解能が1マイクロメートル以下となるマイクロCT(Bruker社のSkyscan1972)を用いた。

4. 研究成果

(1) 塗布熱分解法において原料溶液の高純度化と結晶配向性制御により均一性の高いナノ粒子分散を得た高温超伝導膜の作製に成功した。また、2段階熱処理の導入等の熱処理条件の調整により、従来法では実現できなかった2マイクロメートルの厚さを超えるクラックフリーな超伝導厚膜が作製できるようになった。イットリウムとガドリニウムの混晶系高温超伝導線材の臨界電流特性を調べたところ、ナノ粒子分散が磁場中の臨界電流特性を向上させるための人工ピンニングセンターとして機能していることがあきらかとなった。具体的には、例えば、窒素の蒸気圧沸点である77Kでの性能指標に用いられる3テスラでの臨界電流値は、ナノ粒子を導入していない線材に比べて約2.8倍に向

上していることが確認された。我々の提出している物理モデルに基づいて、電流密度 - 電界特性から臨界電流密度の統計分布を抽出し、比較したところ、ナノ粒子分散を施した高温超伝導線材においては、分布の最小値が上昇するとともに分布の幅が狭まっていることが明らかとなった。これは、超伝導マトリクス内に揃ったピンが導入されていることを示唆するものである。

(2) 塗布熱分解法において人工ピンニングセンターとして導入する BaHfO₃ ナノパーティクルの形状を更に微細化するために一層の膜厚を薄くした混晶系高温超伝導線材の電流輸送特性を広範な温度、磁場にわたり計測したところ、4.2 K から 77 K の全ての温度領域において磁場中臨界電流特性が向上していることが確認された。臨界電流密度の統計分布は全体的に高臨界電流密度側にシフトしているものの分布の形状そのものは変化していないことを明らかとした。

(3) パルスレーザ蒸着法により作製された人工ピン導入高温超伝導線材の電流電圧特性の精密計測を実施した。超伝導層の厚みを 0.5 マイクロメートルから 3 マイクロメートル程度まで厚膜化することにより高い実用性能を実現した線材を対象とした測定では、以下の成果を得た。人工ピンニングセンターとして BaHfO₃ をドーピングし、希土類元素にユウロピウムを適用した線材が、他の人工ピン未導入線材や人工ピン導入ガドリニウム系線材に比べ、全ての温度領域に亘って優れた磁場中臨界電流特性を有することを明らかとした。また、同線材の工業的臨界電流密度（臨界電流を線材全体の断面積で除したもので、線材の実用性能を表す）は、金属系の実用超伝導線材が 4.2 K で示す値を、20 K から 30 K の温度域で凌駕するものであった。

(4) パルスレーザ蒸着法により作製された長尺の線材における低特性部の内部構造を X 線マイクロ CT により観察したところ、数十マイクロメートル程度の欠陥が線材面内に局在していること、それらが基板起因で発生していると思われることを明らかとした。これらの欠陥を、線材の有効断面積を低減させる電流障害因子として考え、その統計分布を求めて電流電圧特性の変化を推定したところ、類似の部位をトリミングして得られた実験結果を良く再現する結果が得られた。この成果は、局在する欠陥が線材全体の性能に与える影響を定量的に評価するための指針を与えるものである。

(5) 塗布熱分解法およびパルスレーザ蒸着法による高温超伝導線材の磁場中臨界電流密度特性を比較すると、弱磁場中では塗布熱分解法の方が、強磁場中ではパルスレーザ蒸着法の方が高い臨界電流密度を有していることが明らかとなった。この傾向は、計測した全ての温度磁場領域で確認された。

(6) 塗布熱分解法およびパルスレーザ蒸着法による高温超伝導線材の電界 - 電流密度特性の温度磁場依存性を我々の提出している物理モデルに基づき定式化したところ、広い温度磁場領域に亘り定量的に一致することが確認できた。温度、磁場によって複雑に変化する非線形な電界 - 電流密度特性の定式化は、臨界電流や n 値の推定をも可能にすることから超伝導応用機器の最適設計に大きく資するものである。

(7) 本研究の成果と過去の成果を整理し、液体窒素温度領域 (65 K から 77 K) の臨界電流と、各種超伝導応用機器の運用が検討されている液体ヘリウムフリーの低温度域 (20 K から 30 K 程度) の磁場中臨界電流との相関について調べた。その結果、パルスレーザ蒸着法による線材においては、低温の実用域に相当するコレクティブ・ピンが支配的な領域を指標とすると良い相関が得られることを見出した。例えば、77 K、1 テスラの臨界電流密度は低温磁場中の臨界電流密度の評価基準として有用である。この知見は、性能向上とともに経済的、技術的に計測が困難になりつつある低温磁場中の臨界電流値を容易に比較する手法として、特に線材開発に対して有用なものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計4件)

H. Horita, R. Teranishi, K. Yamada, K. Kaneko, Y. Sato, K. Otaguro, T. Nishiyama, T. Izumi and S. Awaji, Miniaturization of BaHfO₃ nanoparticles in YBa₂Cu₃O_y-coated conductors using two-step heating process in the TFA-MOD method, Supercond. Sci. and Tech., 査読有, Vol. 30, 2017, 25022

DOI:10.1088/1361-6668/30/2/025022

M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K. Higashikawa, S. Awaji, K. Watanabe, T. Taneda, M. Yoshizumi, T. Izumi and T. Kiss, Enhancement of In-field J_c in Gd₁Ba₂Cu₃O_{7- δ} Coated Conductor by Using Highly Oriented IBAD Substrate, Physics Procedia, 査読有, Vol. 67, 2015, 903-907

DOI:10.1016/j.phpro.2015.06.152

M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K. Higashikawa, K. Kimura, Y. Takahashi, T. Koizumi, T. Hasegawa, S. Awaji, K. Watanabe, M. Yoshizumi, T. Izumi and T. Kiss, Current Transport Properties of TFA-MOD Processed Long-length Y_xGd_{1-x}Ba₂Cu₃O_y Coated Conductor Doped with BaZrO₃ Artificial Pinning Centers, IEEE Trans. Appl. Supercond.,

査読有, Vol. 25, 2015, 6602504
DOI:10.1109/TASC.2014.2387054
K. Kimura, R. Hironaga, T. Nakamura,
Y. Takahashi, T. Koizumi, T. Hasegawa,
K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, M.
Yoshizumi, T. Izumi and Y. Shiohara,
Development of REBCO Coated
Conductors by TFA-MOD Method with
High Properties in Magnetic Fields,
IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有,
Vol. 25, 2015, 6604204
DOI:10.1109/TASC.2014.2380773

[学会発表](計17件)

井上昌睦, 鈴木匠, 今村和孝, 東川甲平,
淡路智, 木須隆暢, REBCO 線材の 77K
磁場中 J_c と低温磁場中 J_c の相関に関する
考察, 第 64 回応用物理学会春季学術講演
会, 2017 年 3 月 16 日, パシフィコ横浜
(神奈川県・横浜市)

鈴木匠, 福崎貴裕, 辻野大樹, 東川甲平,
井上昌睦, 木須隆暢, 長尺 REBCO 線材
の局所臨界電流分布を考慮した大域的電
流密度-電界特性のモデル化, 第 64 回応用
物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 16
日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
M. Inoue, K. Imamura, T. Suzuki, S.
Ichimura, T. Fukuzaki, K. Higashikawa,
T. Izumi, T. Kiss, Correlated Study
between Critical Current Density at
77 K and That of Low Temperature
In-Field Conditions of Various REBCO
Coated Conductors, 29th Int. Sym. Of
Supercond. (ISS 2016), 2016 年 12 月 14
日, 東京国際フォーラム(東京都・千代田
区)

M. Inoue, K. Takasaki, K. Imamura, T.
Suzuki, K. Higashikawa, A. Ibi, T.
Yoshida, T. Izumi, T. Kiss, Current
transport property of BaHfO₃ doped
EuBCO coated conductor over a wide
range of temperature and magnetic
field up to 25T, 2016 Applied Supercond.
Conf. (ASC 2016), 2016 年 9 月 5 日,
Colorado (米国)

井上昌睦, 高崎建, 今村和孝, 鈴木匠,
東川甲平, 衣斐顕, 吉田朋, 和泉輝郎, 木
須隆暢, BaHfO₃ 導入 EuBCO 線材の広範
な実用環境下における電流輸送特性, 第
63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016
年 3 月 20 日, 東京工業大学(東京都・目
黒区)

M. Inoue, K. Takasaki, K. Imamura, K.
Higashikawa, T. Kiss, T. Izumi,
Investigation on Current Limiting
Mechanism of REBCO Coated
Conductor by Magnetic Microscopy and
X-ray micro-Tomography, JSAP Kyushu
Chapter Annual Meeting, 2015 年 12 月 5
日, 琉球大学(沖縄県・中頭郡西原町)

M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K.
Higashikawa, T. Kiss, S. Awaji, K.
Watanabe, M. Yoshizumi, T. Izumi,
Current Limiting Mechanism in
Long-Length RE123 Coated Conductor,
Coated Conductor for Applications (CCA
2014), 2014 年 12 月 2 日, Jeju (Korea)
M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K.
Higashikawa, T. Yoshida, M. Yoshizumi,
T. Izumi, T. Kiss, In-field Critical
Current Density of BaHfO₃ doped
PLD-REBCO Coated Conductors, 27th
Int. Sym. Of Supercond. (ISS 2014),
2014 年 11 月 27 日, タワーホール船堀(東
京都・江東区)

田中健太, 井上昌睦, 今村和孝, 鈴木匠,
東川甲平, 吉田朋, 吉積正晃, 和泉輝郎,
木須隆暢, BaHfO₃ 人工ピンを導入した
PLD-REBCO 線材の磁場中臨界電流特性,
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会,
2014 年 9 月 17 日, 北海道大学(北海道・
札幌市)

K. Tanaka, M. Inoue, T. Yokomizo, K.
Imamura, K. Higashikawa, T. Kiss, S.
Awaji, K. Watanabe, T. Taneda, M.
Yoshizumi, T. Izumi, In-field Critical
Current Property of PLD-GdBa₂Cu₃O_{7- δ}
Coated Conductor Deposited on Highly
Oriented IBAD Substrate, Int. Union of
Materials Research Societies – Int. Conf.
in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014), 2014
年 8 月 26 日, 福岡大学(福岡県・福岡市)
M. Inoue, T. Yokomizo, K. Tanaka, K.
Imamura, K. Higashikawa, T. Kiss, K.
Kimura, Y. Takahashi, T. Koizumi, T.
Hasegawa, S. Awaji, K. Watanabe, M.
Yoshizumi, T. Izumi, Current Transport
Property of TFA-MOD Processed
Long-length Y_xGd_{1-x}Ba₂Cu₃O_y Coated
Conductor Doped with BaZrO₃
Artificial Pinning Centers, 2014 Applied
Supercond. Conf. (ASC 2014), 2014 年
8 月 14 日, Charlotte (米国)

K. Kimura, K. Takahashi, R. Hironaga,
Y. Takahashi, Y. Hikichi, M. Minowa, T.
Koizumi, T. Hasegawa, K. Higashikawa,
M. Inoue, T. Kiss, T. Nakamura, M.
Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara,
Development of REBCO coated
conductors by TFA-MOD method with
high properties in magnetic fields, 2014
Applied Supercond. Conf. (ASC 2014),
2014 年 8 月 14 日, Charlotte (米国)

M. Inoue, K. Tanaka, K. Imamura, K.
Higashikawa, T. Kiss, S. Awaji, K.
Watanabe, T. Taneda, M. Yoshizumi, T.
Izumi, Enhancement of In-field J_c in
GdBa₂Cu₃O_{7- δ} Coated Conductor by
Using Highly Oriented IBAD Substrate,
25th Int. Cryogenic Engineering Conf. &

Int. Cryogenic Materials Conf. 2014
(ICEC 25-ICMC 2014), 2014年7月8日,
Twente (オランダ)

〔その他〕

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K000241/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 昌睦 (INOUE, Masayoshi)
九州大学・システム情報科学研究院・准教授
研究者番号：80346824

(2) 研究分担者

寺西 亮 (TERANISHI, Ryo)
九州大学・工学研究院・准教授
研究者番号：80346824

(3) 研究協力者

木村 一成 (KIMURA, Kazunari)