

令和元年6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04512

研究課題名(和文)高温超伝導線材における高ひずみ特性の観点から最適な人工ピンニングセンターの探索

研究課題名(英文) Exploring optimal artificial pinning centers for high- $T_c$  superconductors with high strain tolerance

研究代表者

菅野 未知央 (Sugano, Michinaka)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・研究機関講師

研究者番号：30402960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,750,000円

研究成果の概要(和文)：磁場中臨界電流( $I_c$ )を向上するために導入される人工ピンニングセンター(APC)を含む高温酸化物超伝導体 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (SmBCO)薄膜について、APC導入による $I_c$ のひずみ効果への影響に関する研究を行なった。APCの一種である $\text{BaHfO}_3$ (BHO)の添加有無により、自己磁場下で $I_c$ が最大値をとる線材軸方向ひずみ(ピークひずみ)の温度依存性に差異が観察された。77 K、磁場中では、無添加線材と比較してBHO添加線材でひずみにより $I_c$ が増加するピーク効果がより高磁場まで継続する振る舞いが観察された。以上のように、APC導入により $I_c$ のひずみ効果に影響があることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした希土類系高温超伝導体は、他の材料と比較して磁場中で高い臨界電流を有していることから、高磁場超伝導磁石への応用が期待されている。一方、高磁場磁石においては、コイルに対して強大な電磁力が作用するため、機械的特性の評価が重要になる。本研究で開発した、ひずみ効果測定用インサートは、同種の装置としては大電流である500 Aの通電が可能であり、液体ヘリウム温度、外部磁場15 Tという実使用環境での線材の臨界電流をひずみ負荷状態で評価することができる。本超伝導線材に限らず、今後様々な磁石候補線材の評価に使用できる。

研究成果の概要(英文)：The influence of artificial pinning center (APC) introduced into  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (SmBCO) film on strain effect of critical current ( $I_c$ ) was investigated. SmBCO films with and without  $\text{BaHfO}_3$  (BHO) as an APC exhibited different temperature dependence of a peak strain in self field, which is the axial strain to maximize  $I_c$ . It was also found that the increase in  $I_c$  with increasing applied strain (peak effect) for SmBCO with BHO continues up to higher magnetic field than that without APC. These results suggest that strain effect on  $I_c$  can be influenced by introducing APCs.

研究分野：超伝導材料、機械的特性、超伝導磁石

キーワード：高温超伝導体 人工ピンニングセンター ひずみ効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>（以下 REBCO と略す。RE は希土類元素。）は、磁場中で最も高い臨界電流密度を有する実用高温超伝導材料である。この超伝導体の磁場中臨界電流をさらに向上する目的で微細な常伝導物質を添加する人工ピンニング（Artificial pinning center, APC）が盛んに研究されてきた。一方、同材料は高磁場磁石応用が期待されていることから、電磁力による臨界電流の変化を詳細に把握しておく必要がある。全ての超伝導体にはひずみにより臨界電流が変化する「ひずみ効果」が存在し、さらに、APC の導入によりこれが影響を受ける可能性があることが示唆される結果が得られつつあった。さらに、磁石設計において応力限界値を決定する「不可逆ひずみ」も APC により変化する可能性がある。そこで、機械的特性の観点から望ましい APC を探索することが求められた。

### 2. 研究の目的

REBCO 超伝導体の一種である SmBCO 線材について、まず、APC 導入がひずみ効果に与える影響を明らかにすることを第一の目的とした。その上で、種々の APC を導入した SmBCO 線材について、機械的特性の観点から望ましい APC を探索することを最終目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、APC として BaHfO<sub>3</sub> (BHO) を選択した。Hastelloy 基板テープに超伝導薄膜を配向成長させるために二軸配向させた中間層を成長させ、これをテンプレートして、SmBCO 薄膜をパルスレーザー蒸着法 (PLD 法) で成長させた。SmBCO と BHO の二種類のターゲットを用意し、交互にレーザーでアブレーションすることにより、BHO の添加量を調整した SmBCO 膜を成長させた。

上記のような線材に実験の目的に応じて、種々のひずみ負荷方法を選択して、臨界電流のひずみ効果に関する実験を行なった。

自己磁場において、Fig. 1 に示す 4 点曲げ装置により引張、圧縮の両方向のひずみを負荷した。Cu-Be 板に線材の Hastelloy 面をエポキシ樹脂で接着した。当初は、ハンダ付けにより、線材の固定を試みたが、作業過程で臨界電流の劣化が多発した。その後、ニトフィックスによる接着に方針転換し、かつ、接着材硬化後により冷却速度を遅くする目的で炉冷することで、臨界電流の劣化を防ぎつつ、測定に必要な±0.4%の範囲でのひずみ負荷が可能な接着強度を実現した。臨界電流測定は、ヘリウムガス冷却方式のクライオスタットの中で行なった。ヘリウムガス温度と試料上のニクロムヒーターによる温度調節により、試料温度を 20~83 K に調整した。本実験により、自己磁場での臨界電流ひずみ効果の温度依存性を APC としての BHO 有無について比較した。

Spring-8 のビームライン (BL46XU) において、放射光を用いた SmBCO 薄膜の内部ひずみ測定を行なった。室温で線材に引張ひずみを負荷した状態で、SmBCO 薄膜の格子ひずみを測定した。小型の引張試験装置を回折計に設置し、線材長さ方向に段階的に引張ひずみを負荷し、各ひずみ条件で SmBCO 薄膜の a 軸に相当するブラッグピークの回折角を求めた。また、線材からはく離した薄膜粉末から無ひずみ状態での SmBCO の格子定数を求め、格子ひずみの計算に用いた。ビームエネルギーは 19.5 keV とし、透過配置を採用した。

磁場中での臨界電流測定には 2 種類のプローブを使用した。東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料センターで、既存のレバー-カム式のプローブを用いて、77 K、3 T 以下での臨界電流-引張ひずみ測定を行なった。一方、KEK では、より大電流で同種の測定を可能にするため、新たなプローブを設計、製作した。可動部分に市販の高温超伝導線材を積層した導体を電流リードとして用いることで、液体ヘリウム中 (4.2 K)、500 A まで電流を通電した状態で引張ひずみを負荷できる装置を開発した。

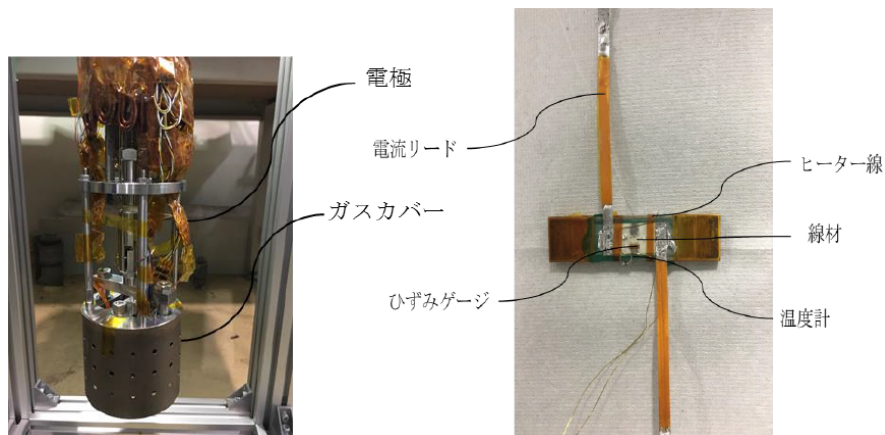


Fig. 1 4点曲げ試験装置と測定サンプル

#### 4. 研究成果

Fig. 2 に APC として BHO を添加した SmBCO 線材と無添加の SmBCO 線材の 4 点曲げ試験法で測定した臨界電流—ひずみ特性を示す。実線は測定データを 2 次関数のフィッティング曲線を示す。このフィッティング曲線から、臨界電流が最大となるひずみ値（ピークひずみ）を求めた。図中の矢印は各温度でのピークひずみを示す。Fig. 2(a) に示す無添加の SmBCO 線材では、ピークひずみが低温ほど圧縮ひずみ側にシフトしている様子が観察される。これは、過去に YBCO 線材でも報告されていると同様の振る舞いである [1]。これに対して、Fig. 2(b) に示す APC として BHO を 2vol% 添加した SmBCO 線材では、ピークひずみが温度によらずほぼ一定値となった。このように APC の有無によるピークひずみの温度依存性の違いは、本研究で初めて明らかになった。

この 2 種類の線材について、室温で放射光を利用した線材内部の SmBCO 薄膜の格子ひずみ測定を行なった。Fig. 3 は線材長手方向に負荷し、伸び計で測定したマクロなひずみと、SmBCO の  $a$  軸のブラッグピークから求めた格子ひずみの関係を示している。いずれも低ひずみ領域では、両者に線形関係がみられるが、一定ひずみ以上になると格子ひずみが線形関係で予測される値よりも小さくなる。これは、膜の破断によりひずみが解放されるためである。線形部分の傾きは、薄膜のひずみ応答を示しており、それぞれ 0.94、0.89 であった。この結果は、BHO の添加によって、SmBCO のひずみ応答性にはほとんど差異がないことを示している。つまり、臨界電流のひずみ特性が、BHO の有無による格子ひずみの違いに起因するものではないことを示している。

Nb<sub>3</sub>Sn などの低温超伝導体では、ピークひずみが超伝導体のゼロひずみ状態とほぼ一致していることが報告されている。したがって、線材ごとの熱残留ひずみの違いが、ピークひずみに現れる。一方、REBCO では、超伝導体のゼロひずみとピークひずみが一致しないことが報告されており、より複雑な原因が関係していると考えられる。

無添加線材でのひずみ特性は、本材料における電流輸送特性と微細組織との関係に関連していると考えられる。REBCO では、成膜段階で結晶を 2 軸配向させ、粒界傾角を小さくすることで高い臨界電流を実現している。これは、粒界部分での臨界電流密度 ( $J_{gb}$ ) が粒内の臨界電流密度 ( $J_g$ ) よりもかなり低く、かつ、 $J_{gb}$  が粒界傾角に対して指数関数的に低下することによる。 $J_g$  と  $J_{gb}$  は異なる温度依存性を示し、低温ほど  $J_{gb}$  が支配的になり、ひずみ依存性も  $J_{gb}$  のそれが顕

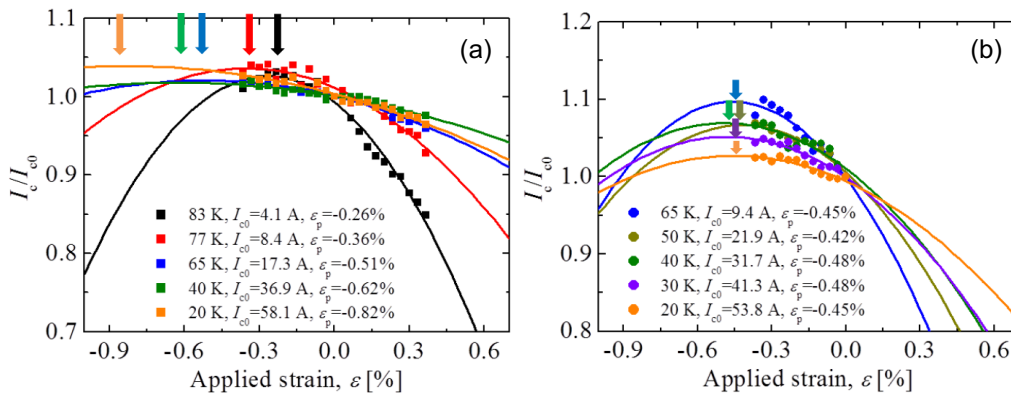


Fig. 2 4 点曲げ試験法で測定した SmBCO 線材の臨界電流—ひずみ特性. (a) BHO 無添加の SmBCO 線材, (b) BHO を 2 vol% 添加した SmBCO 線材.

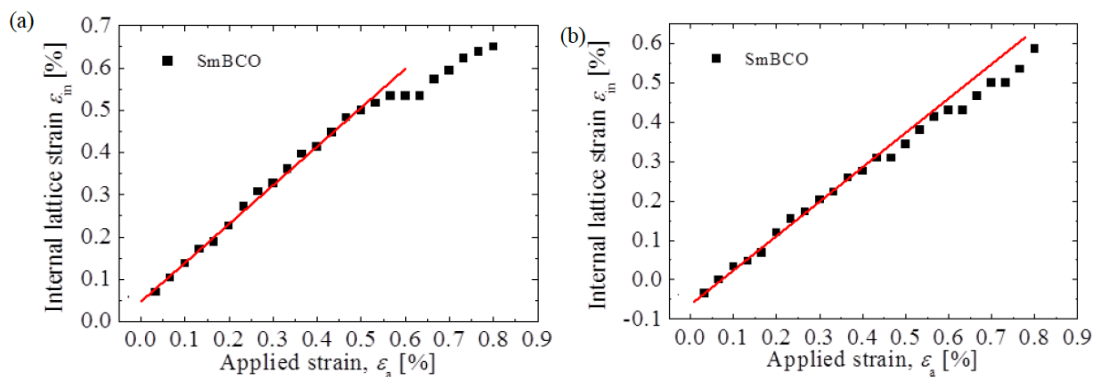


Fig. 3 放射光により測定した SmBCO 膜の格子ひずみの負荷ひずみ依存性. (a) BHO 無添加の SmBCO 線材, (b) BHO を 2 vol% 添加した SmBCO 線材.



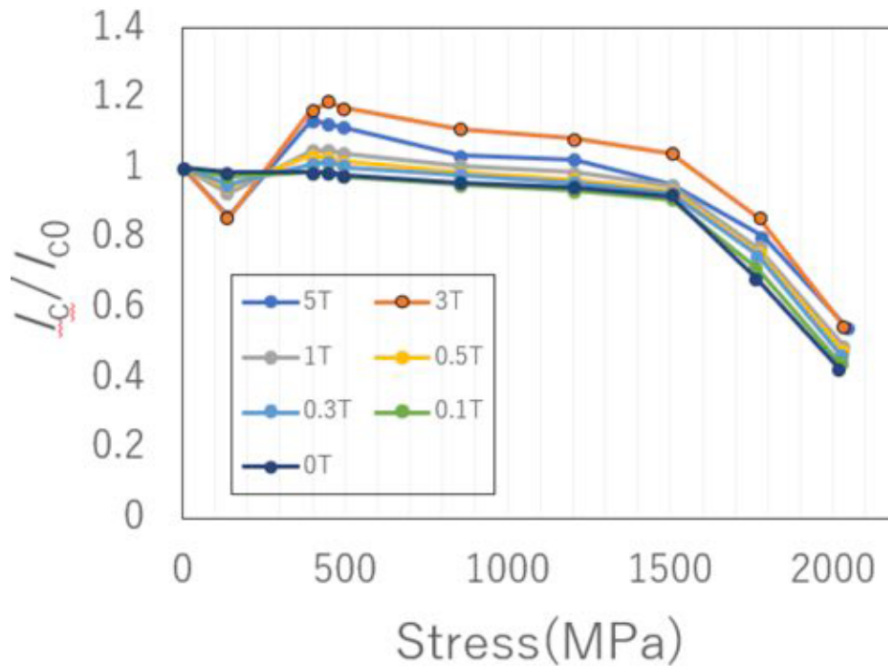


Fig. 4 77 K, 外部磁場印可状態で測定した BHO 添加 SmBCO 線材の臨界電流の引張応力依存性.

在化すると考えられる。バイクリスタルでの  $J_{gb}$  のひずみ依存性の報告から [2]、 $J_{gb}$  は圧縮ひずみ側にピークひずみが存在するとされており、Fig. 2(a)の結果は、線材全体の臨界電流密度が  $J_g$  支配から  $J_{gb}$  支配に移行していることを示唆している。

一方、BHO 添加線材でピークひずみが温度に依存しない結果は、以下のように説明される。BHO を添加することで  $J_{gb}$  がより低下することが報告されている [3]。これにより、全ての温度領域で  $J_{gb}$  が支配的になり、ピークひずみが温度の影響を受けなかったと考えられる。このように、APC の導入はひずみ特性に影響を与えることが明らかになった。

BHO を添加した SmBCO 線材について、77 K、外部磁場印可状態で臨界電流の引張応力依存性を測定した。Fig. 4 に 77 K で測定した磁場中での臨界電流—応力特性を示す。縦軸は、無負荷状態での臨界電流の初期値 ( $I_{c0}$ ) で規格化した臨界電流を示している。横軸は、負荷した荷重と線材断面積から求めた応力値である。1500 MPa 以上で観察される臨界電流の低下は SmBCO 膜の破断による劣化であるが、それ以下の応力における臨界電流の変化は可逆的なひずみ効果によるものである。磁場を自己磁場から 3 T まで変化させると、規格化臨界電流が 500 MPa 付近で最大値をとる。このとき、規格化臨界電流の最大値は磁場の増加とともに増加する。このようなピーク効果は APC を含まない YBCO 線材などで報告されているが [1]、このときは 0.2 T で規格化臨界電流のピーク値が最大であった。今回の結果は、APC の導入によってピーク効果を制御

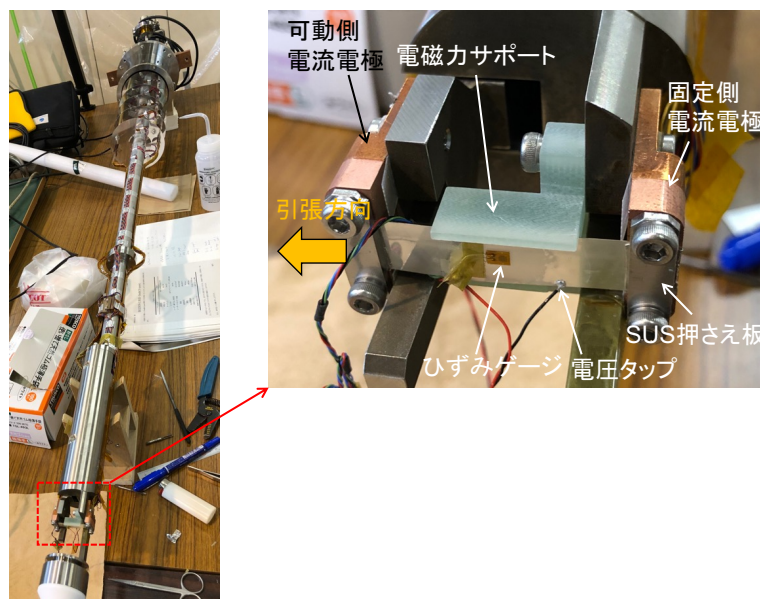


Fig. 5 新たに開発した液体ヘリウム中での臨界電流—引張ひずみ評価装置

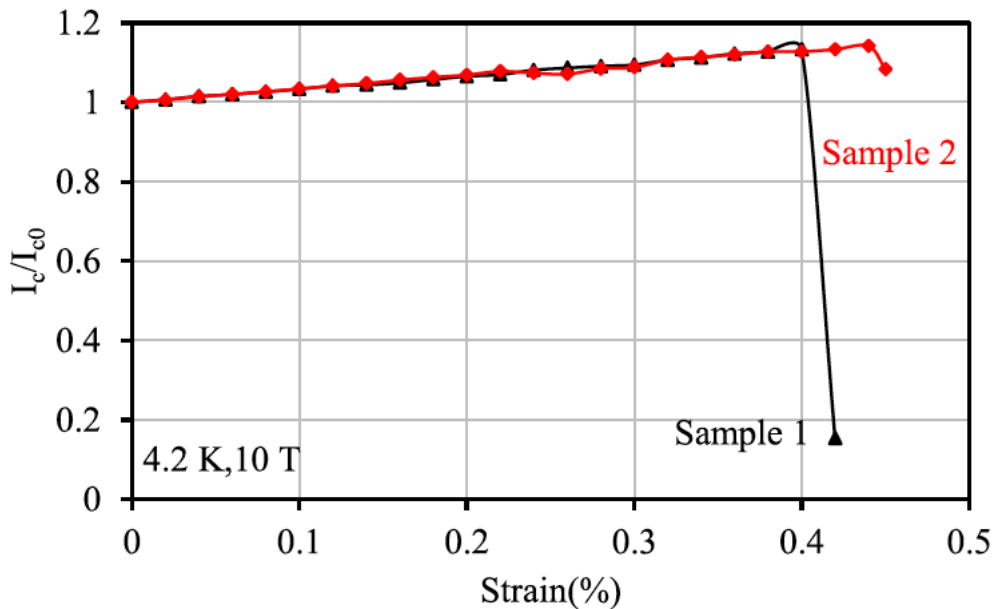


Fig. 6 臨界電流の引張ひずみ依存性

できる可能性を示唆している。

磁石応用を考えると、4.2 K、大電流での臨界電流のひずみ特性を評価する必要がある。そこで、Fig. 5 に示すような KEK の 15 T ソレノイド磁石と組み合わせて使用する新たなプローブを開発した。線材テープ面に垂直、SmBCO 薄膜の  $c$  軸に平行に磁場を印可した状態で、レバーを回転することで、レバー下端に固定された可動側電流電極を移動させ、線材に引張ひずみを負荷する仕組みになっている。

動作確認は線材準備の都合上、MgB<sub>2</sub> 線材を用いた。現段階で最大通電電流は約 500 A である。この電流値で、電流リードとして使用している 2 本の高温超伝導リードの温度が 43 K、57 K と上昇したため、ここで通電を停止した。

Fig. 6 に 4.2 K で測定した MgB<sub>2</sub> 線材の臨界電流—ひずみ特性を示す。この線材の初期の臨界電流は 10 T で約 60 A であった。引張ひずみとともに臨界電流は線形に増加し、除荷すると元の値に戻る可逆的な振る舞いを示した。0.4~0.45% で MgB<sub>2</sub> フィラメントの破断による臨界電流の大幅な低下が観察された。このように、4.2 K、磁場中で臨界電流の引張ひずみ依存性を測定するシステムを構築することができた。

以上のように、APC を導入することにより REBCO 線材の臨界電流のひずみ特性に影響が現れることを示す結果を得ることができた。同時に、線材の磁場中でのひずみ効果評価システムの構築にも成功した。しかし、異なる APC を比較して、機械的特性の観点から優れた APC を選択するところまでには至らなかった。この原因の一つが、SmBCO 線材の臨界電流の経事変化である。種々の線材を作製し、線材作製直後の検査では一定の臨界電流を有しているものの、同一バッチのサンプルで使用しようとするると臨界電流がゼロに近い値を示す事象が頻発した。実用上、線材特性の信頼性は非常に重要であり、今後その原因を明らかにする必要がある。

#### <引用文献>

- [1] M. Sugano et al, Superconductor Science and Technology, Vol. 23, 2010, 085013.
- [2] D. C. van der Laan et al, Physical Review Letters, Vol. 103, 2009, 027005.
- [3] T. Usami et al, Superconductor Science and Technology, Vol. 29, 2016, 075003.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

M. Dhakarwal, T. Ogitsu, M. Sugano, H. Tanaka and H. Watanabe, “Electromechanical Characterization of the MgB<sub>2</sub> Wire for Transmission Line Magnet System”, Vol. 29, 2019, 4802404.

〔学会発表〕 (計 1 件)

M. Dhakarwal, T. Ogitsu, M. Sugano, H. Tanaka and H. Watanabe, “Electromechanical Characterization of the MgB<sub>2</sub> Wire for Transmission Line Magnet System”, Applied Superconductivity Conference, 2018.10.28~11.2, Seattle, USA.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：吉田隆

ローマ字氏名：Yutaka Yoshida

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：20314049

研究分担者氏名：町屋修太郎

ローマ字氏名：Shutaro Machiya

所属研究機関名：大同大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40377841

研究分担者氏名：菖蒲敬久

ローマ字氏名：Takahisa Shobu

所属研究機関名：日本原子力研究機構

部局名：原子力科学研究部門 物質科学研究センター

職名：サブリーダー

研究者番号（8桁）：20314049

研究分担者氏名：小黒英俊

ローマ字氏名：Hidetoshi Oguro

所属研究機関名：東海大学

部局名：工学部

職名：講師

研究者番号（8桁）：90567471

### (2)研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。