

令和元年5月13日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03667

研究課題名(和文)次世代加速器用高温超伝導磁石の開発

研究課題名(英文)Development of HTS magnets for next generation accelerators

研究代表者

土屋 清澄 (TSUCHIYA, Kiyosumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：20044787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：欧州原子核共同研究機構(CERN)で検討されている超大型加速器(FCC)や米国で検討されているミュオンコライダー用の高磁場磁石、わが国のSuperKEKB 加速器用特殊六極磁石などを目指して、REBCO線材を用いた超伝導磁石の開発を行った。具体的には、六極磁石を開発し、液体窒素温度と液体ヘリウム温度での通電試験、磁場測定を行った。開発した磁石では、冷却によるコイル特性の劣化や遮蔽電流による磁場の乱れも無く、加速器用磁石としての可能性を示した。また、将来の高磁場磁石開発のために、市販REBCO線材の低温、高磁場(4.2 K,  $B < 18$  T)下での臨界電流測定を行い、その特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、REBCO線材の特性を十分に活かした加速器用特殊磁石の実現可能性を示すことが出来た。この実現は、衝突型加速器のルミノシティ向上に大きく貢献し、高エネルギー物理学の進歩に大きな影響を与えるものと思われる。また、本研究で得られた低温(4.2 K)、高磁場( $B < 18$  T)下でのREBCO線材の特性データは、加速器用高磁場磁石の開発のみでなく他分野の高磁場磁石開発にも有益な情報であり、今後の各種REBCO線材や磁石の開発を活発化するトリガーとなるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：Development of superconducting magnet using REBCO conductor has been carried out for future accelerators such as FCC in CERN, muon collider in USA, and SuperKEKB in Japan. Through this study, we have developed a HTS sextupole magnet using REBCO conductor and tested it at 77 K and 4.2 K. The magnet was excited up to the designed current without quenching and it was confirmed that the field quality was in an acceptable level for accelerator magnet. In addition to this, we have developed a critical current measurement method of REBCO conductors in high fields ( $B < 18$  T) and at low temperature (4.2 K). And the critical currents of various commercial REBCO conductors were measured and compared as a first step of the high field magnet development.

研究分野：低温・超伝導工学、加速器工学

キーワード：超伝導磁石 高温超伝導線材 REBCO線材 加速器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導磁石は高エネルギー物理の進歩に非常に大きな影響を与える機器となっている。超伝導磁石(NbTi 線材@ 1.9 K)の進歩により Large Hadron Collider (LHC) が実現し、ヒッグスボソンが発見された。この発見は更なる疑問(質量の起源やヒッグスボソンの役割など)を呼び、TeV スケールでの新粒子探索も含めてより高エネルギーでの素粒子実験の要求が高まっている。このような状況の下、欧州原子核研究機構 CERN は次の計画として 100 TeV 級の超大型加速器 (FCC) の検討を開始した。このための磁石として、16 T 級の化合物超伝導磁石 (Nb<sub>3</sub>Sn) と 20 T 級の高温度超伝導磁石の 2 種類が考えられている。また、米国ではミュオン・コライダー (0.75 TeV x 0.75 TeV) の検討が進められており、その 2 極磁石には、高磁場で、且つミュオン崩壊による発熱に耐えることが要求される。これら次世代加速器用磁石を見ると、どの加速器においても 13~20 T 級の超伝導磁石で、かつ高放射線環境下(放射線の物質内エネルギー損失による発生熱量が 5mW/cm<sup>3</sup> オーダー)で運転可能な磁石が必要となっている。これらの実現には、高磁場で高い臨界電流密度を有する超伝導線材が不可欠である。次世代加速器用磁石の線材候補としては、化合物系線材(Nb<sub>3</sub>Sn)と高温超伝導線材(REBCO, Bi-2212)の 2 つが考えられる。現在、Nb<sub>3</sub>Sn を用いた磁石開発は欧米で進行中であり、今後数年以内に加速器用磁石としての実現可能性が明らかになると思われる。然し乍ら、もう一つの候補である高温超伝導線材(主に REBCO 線材)を用いた磁石開発は未だ初歩的段階にあり、その開発が望まれる。

### 2. 研究の目的

次世代加速器で必須となる高磁場 (16-20T) 超伝導磁石を目標に、REBCO 線材を用いた超伝導磁石の基礎開発を行う。具体的には、コイル製作技術の開発、小型六極磁石の開発・試作を通じて加速器用 REBCO 磁石の実現可能性を調べる。また、将来の高磁場磁石開発に備え、REBCO 線材の低温、高磁場下での臨界電流の測定法を開発し、臨界電流特性のデータ収集を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 矩形コイルの製作技術の開発

六極磁石のコイル作製に先立ち、コイル線材(REBCO 線材)が持つべき安定化銅厚、線材の許容曲げ半径、線材の接続方法などを調べると共に、寸法精度に注意を払ったコイル製作方法の開発を進めた。

#### ① REBCO コイルのクエンチ特性の調査

REBCO 線材を用いたコイルではクエンチ伝播速度が遅いため、線材の一部温度が高温になり焼損する恐れがある。このため線材の安定化銅量やクエンチ検出条件は非常に重要となる。安定化銅量の異なる線材を準備して電圧タップをつけた小型コイル(図-1 参照)を作成し、ヒータークエンチ実験を行った。各実験では、クエンチ検出条件を変えてクエンチ後の最高温度や常伝導伝播速度の計測を行った。

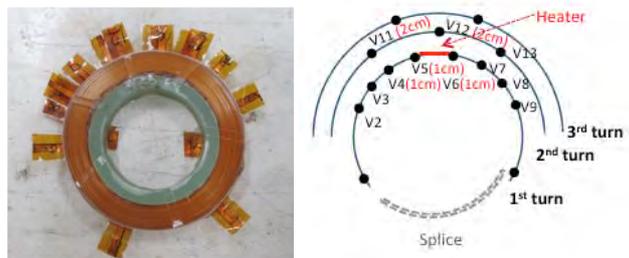


図-1 電圧タップをつけた小型コイルと電圧タップ位置

#### ② REBCO 線材の接続特性の調査

六極磁石の作製では 6 個のコイルを出来るだけ低抵抗で接続しなければならない。この接続方法、条件を調べるため、各種線材で接続部を模擬するサンプルを作製し、その抵抗値を常温、窒素温度、LHe 温度で測定を行った。

#### ③ コイル作製法の開発

線材特性の劣化を抑える巻線方法や設計寸法に近いコイルを製作する方法をコイル試作・冷却励磁試験を繰り返すことにより開発した。

#### (2) REBCO 六極磁石の試作と特性評価

##### ① 六極磁石の試作

200 T/m<sup>2</sup> の 6 極磁場を発生する磁石を目標に、最適コイル形状や磁石構造を 2D, 3D 磁場計算により求め、試作を進めた。製作コストを抑えるため、磁石長は 200 mm とした。

##### ② 六極磁石の試験

試作磁石の試験は、液体窒素の浸漬冷却および液体ヘリウムの浸漬冷却で行った。試験では、通電テストと磁場測定を行い、加速器磁石としての実現可能性を調べた。

#### (3) REBCO 線材の電磁特性の測定

16-20 T の高磁場磁石を開発するためには、REBCO 線材の 4.2 K, 高磁場下における臨界電流特性のデータが必須であるが、その公表データは少ない。そこで、臨界電流測定用のサンプルホルダーの開発と各種市販線材の臨界電流測定を進めた。

① サンプルホルダーの開発

市販の 4 mm 幅 REBCO 線材の臨界電流測定が 18 T ソレノイド(口径 5 cm) 中で出来、且つ 1000 A 程度までの通電が可能なサンプルホルダーの開発を行った。

② 臨界電流測定

上で開発したサンプルホルダーを用いて、市販の各種 REBCO 線材の 2-18 T 中での臨界電流測定を行った。ここでは、n-値や 77 K、自己磁場下での臨界電流値の測定も行った。

4. 研究成果

(1) 矩形コイルの製作技術の開発では以下の知見を得た。

① 20 μm 厚の安定化銅があれば、NbTi 超伝導コイルの時と同様のクエンチ検出-電流遮断方式で REBCO コイルの焼損を防ぐことができる。但し、クエンチ検出は従来よりも微小電圧(<100 mV)で行う必要がある。図-2 にヒータークエンチ実験で得られた代表的な結果(線材最高温度 vs. コイル電流の関係)を示す。

② 線材の接続は、超伝導層が対面するような接続方法が望ましい、超伝導層に圧縮応力がかかる方向へ曲げるときの線材曲げ半径は 8 mm 以上が望ましい、コイルの仕上がり寸法の調節のためにスペーサーをコイル内に挟む方式では、誤差 1 mm 以下の高精度コイルの製作はかなり困難であることなどが明らかとなった。

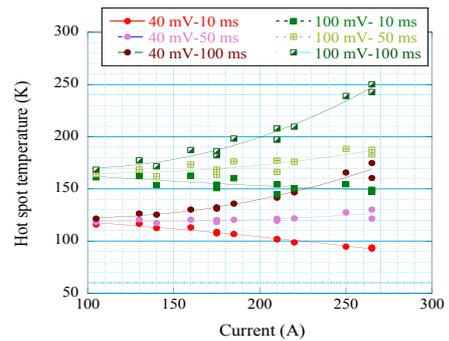


図-2 種々のクエンチ検出条件下における線材最高温度 vs. コイル電流

(2) REBCO 六極磁石の試作と特性評価の研究で以下の結果が得られた。

① 採用したコイル製作方法では寸法精度 1mm 程度のコイルしか製作できなかったが、定格電流まで通電が可能な REBCO 六極磁石を試作することが出来た(図-3)。

② 磁石試作の各段階でコイル健全性試験(液体窒素温度)を行ったが、劣化の兆候は見られなかった。このことから、使用した線材のパラメータやコイル巻線方法の選択が適切であったと言える。

③ 液体窒素温度での励磁試験では、クエンチすることなく 75 A まで通電することができ、コイルや線材接続部に異常がないことを確認した。

④ 液体ヘリウム温度での励磁試験では、クエンチすることなく 250 A まで通電することができた。また、サーマルサイクルにより性能が劣化することもなかった。

⑤ 液体窒素および液体ヘリウム温度での磁場測定を行い磁場特性を調べた。以下に測定時の励磁パターンと代表的磁場特性を示す。



図-3 完成した六極磁石

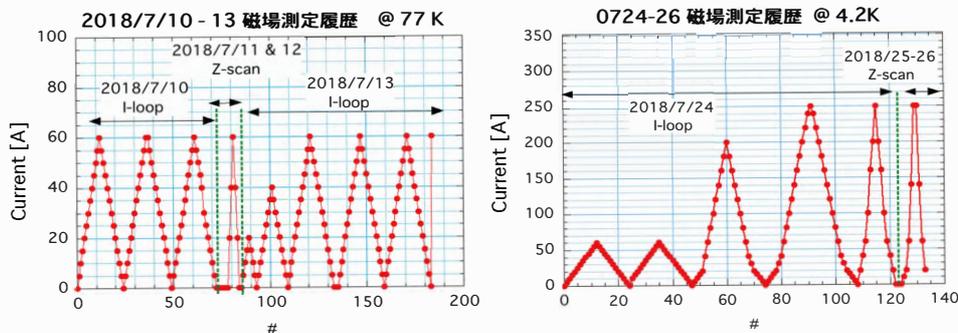


図-4 77 K および 4.2 K における磁場測定時の励磁履歴

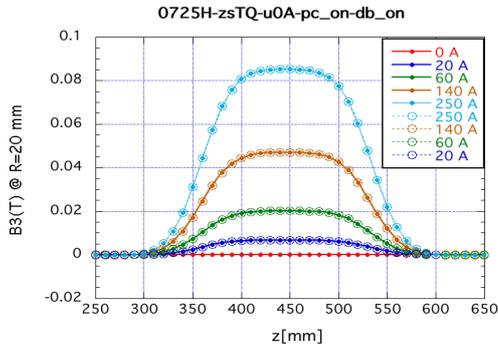


図-5 各電流値における6極磁場分布

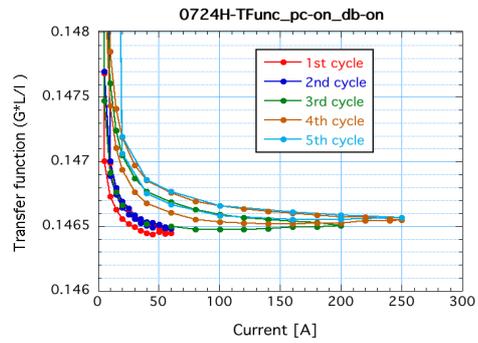


図-6 4.2 Kにおける Transfer function

以上より、本 REBCO 六極磁石ではサーマルサイクルによる劣化もなく、定格電流値までクエンチすることなく通電ができ、遮蔽電流による磁場の乱れもほとんどないことが明らかとなった。このことから、REBCO 加速器磁石の実現可能性は高いと言える。然し乍ら、実際の加速器で使用できる REBCO 磁石とするには、より高精度のコイル製作技術の開発が必要なことも明らかとなった。

3) REBCO 線材の電磁特性の測定では以下の結を得た。

① 図-7 に示すような 1000 A 級の臨界電流測定が可能なサンプルホルダーを開発し、4 mm 幅市販 REBCO 線材の測定を行った。

② 各種市販 REBCO 線材の臨界電流および n 値を明らかにし、LTS 超伝導線材 (NbTi, Nb3Sn) の特性と比較した。以下にその主要結果を示す。

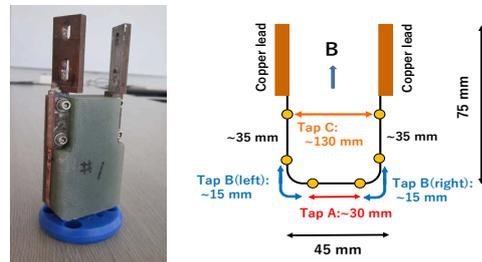


図-7 開発したサンプルホルダーとその電圧タップ

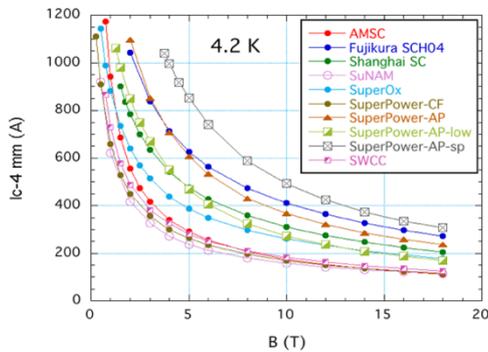


図-8 市販 REBCO 線材の Ic vs. B 曲線

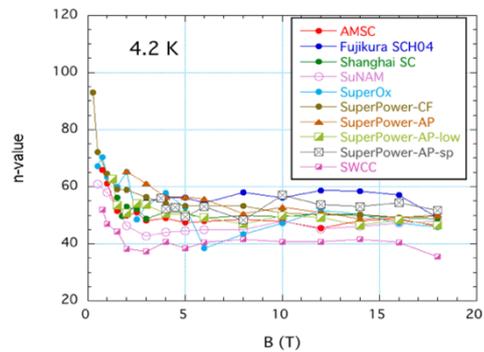


図-9 市販 REBCO 線材の n 値 vs. B 曲線

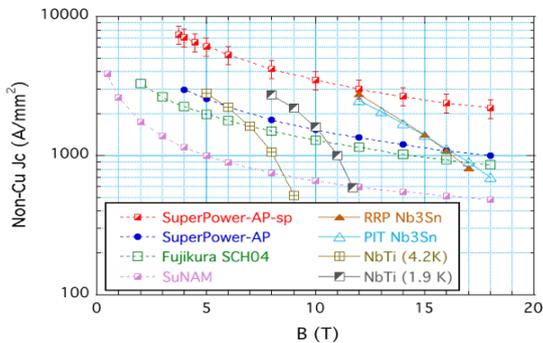


図-10 代表的 REBCO 線材と NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn 線材の non-Cu Jc 値比較

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

① K. Tsuchiya, S. Fujita, A. Terashima, X. Wang, Y. Arimoto, M. Masuzawa, N. Ohuchi, M. Tawada, A. Kikuchi, M. Daibo, Y. Iijima, "Prototype HTS sextupole magnet for SyperKEKB interaction region," *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **29**(5) (2019) 4002604.

- ② X. Wang, M. Uchida, K. Tsuchiya, A. Tera-shima, T. Takao, A. Kikuchi, “Splice resistance measurements of REBCO tapes for a REBCO sextupole magnet,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **29**(5) (2019) 8800905.
- ③ K. Tsuchiya, A. Kikuchi, A. Terashima, K. Norimoto, M. Uchida, M. Tawada, M. Masuzawa, N. Ohuchi, X. Wang, T. Takao, S. Fujita, “Critical current measurement of commercial REBCO conductors at 4.2 K,” *Cryogenics* 査読有 **85** (2017) pp.1-7.
- ④ K. Tsuchiya, A. Kikuchi, A. Terashima, K. Suzuki, K. Norimoto, M. Tawada, M. Masuzawa, N. Ohuchi, X. Wang, Y. Iijima, T. Takao, S. Fujita, M. Daibo, Y. Iijima, “Critical current characterization of commercial REBCO coated conductors at 4.2 K and 77 K,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **27**(4) (2017) 6600205.
- ⑤ X. Wang, K. Tsuchiya, S. Fujita, S. Muto, Y. Iijima, “Experiment and numerical simulation on quench characteristics of REBCO impregnated coil,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **27**(4) (2017) 4700105.
- ⑥ K. Tsuchiya, M. Tawada, M. Masuzawa, A. Terashima, N. Ohuchi, M. Sugano, X. Wang, A. Kikuchi, Y. Arimoto, Z. Zong, S. Fujita, M. Daibo, Y. Iijima, “Development of HTS sextupole magnet for SuperKEKB interaction region,” *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 査読有 **26**(4) 4100904 (2016).
- ⑦ M. Daibo, S. Fujita, M. Haraguchi, Y. Iijima, K. Tsuchiya, N. Ohuchi, “Study of quench behavior of REBCO impregnated pancake coil with a 75- $\mu$ m-thick copper stabilizer under conduction-cooled conditions,” *Physics Procedia* 査読無 **67** (2015) 750-755

〔学会発表〕 (計 2 1 件)

- ① 一瀬 中、土屋清澄、菊池章弘、小黒英俊、高 Ic 化に向けた Coated Conductors の微細組織、2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会、2019 年 3 月 9-12 日、東京工業大学 大岡山キャンパス
- ② 王 旭東 他、加速器用 HTS マグネットの開発 (7-1)-77 K と 4.2 K における六極モデルマグネットの励磁試験-、2018 年度秋季 低温工学・超伝導学会(2018) 11 月 19-21 日 山形 山形テレサ
- ③ 有本 靖 他、加速器用 HTS マグネットの開発 (7-2)-77 K と 4.2 K での磁場測定-、2018 年度秋季 低温工学・超伝導学会(2018) 11 月 19-21 日 山形 山形テレサ
- ④ K. Tsuchiya, S. Fujita et al., Prototype HTS Sextupole Magnet for SuperKEKB Interaction Region, 2018 Applied Superconductivity Conference, Seattle (2018).
- ⑤ K. Tsuchiya, A. Kikuchi et al., Critical current measurement at 4.2 K in parallel field on various commercial REBCO conductors, 2018 Applied Superconductivity Conference, Seattle (2018).
- ⑥ X. Wang et al., Splice Resistance Characteristics of REBCO Coated Conductor at 77 K and 4.2 K, 2018 Applied Superconductivity Conference, Seattle (2018).
- ⑦ 土屋清澄、寺島昭男 他、加速器用 HTS マグネットの開発 (6-1)-全体概要、2018 年度春季 低温工学・超伝導学会(2018) 5 月 28-30 日東京 タワーホール船堀
- ⑧ 藤田真司 他、加速器用 HTS マグネットの開発 (6-2)-SuperKEKB 用 REBCO 六極マグネットの試作一、2018 年度春季 低温工学・超伝導学会(2018) 5 月 28-30 日東京 タワーホール船堀
- ⑨ 王 旭東 他、加速器用 HTS マグネットの開発 (6-3)-77K と 4.2K 高磁場下における REBCO 線材の接続抵抗特性一、2018 年度春季 低温工学・超伝導学会(2018) 5 月 28-30 日東京 タワーホール船堀
- ⑩ 西岡美紀、土屋清澄、菊池章弘 他、市販 REBCO 線材の臨界温度の比較、2018 年度春季 低温工学・超伝導学会(2018) 5 月 28-30 日東京 タワーホール船堀
- ⑪ 西岡美紀、土屋清澄 他、REBCO 線材の 4.2 K、垂直および平行磁場下における臨界電流測定、平成 30 年電気学会全国大会 2018 年 3 月 14-16 日 九州大学 伊都キャンパス
- ⑫ 則本知哉、土屋清澄 他、REBCO 線材の 4.2 K における臨界電流の測定、電気学会 超伝導機器研究会 (2018) 1 月 17-18 日 名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリー
- ⑬ 土屋清澄、寺島昭男 他、4.2K、平行磁場下における REBCO 線材の臨界電流測定、2017 年度秋季 低温工学・超伝導学会(2017) 11 月 21-23 日 高知 高知市文化プラザかるぼーと
- ⑭ 藤田真司、大内徳人 他、加速器用 HTS マグネットの開発 (5)-SuperKEKB 衝突点用六極マグネットのコイル試作-、2017 年度秋季 低温工学・超伝導学会(2017) 11 月 21-23 日 高知 高知市文化プラザかるぼーと
- ⑮ 内田 聖、土屋清澄、寺島昭男 他、市販 REBCO 線材の 4.2 K における臨界電流測定、平成 29 年電気学会全国大会 2017 年 3 月 15-17 日 富山大学 五福キャンパス
- ⑯ K. Tsuchiya, A. Kikuchi, A. Terashima, K. Norimoto et al., Critical-current measurement of commercial REBCO conductors at 4.2 K, 1<sup>st</sup> Asian ICMC and CSSJ 50<sup>th</sup> Anniversary Conference, Nov. 7-10 (2016), Kanazawa
- ⑰ 則本知哉、土屋清澄、寺島昭男 他、REBCO 導体の 4.2 K における臨界電流特性の測定、平成

28年電気学会全国大会 2016年3月15-17日 東北大学 川内北キャンパス

⑮ 土屋清澄、多和田正文 他、加速器用 HTS マグネットの開発(4-1)-SuperKEKB 衝突点色収差補正用 HTS 六極マグネットの設計-, 2015年度秋季 超伝導学会(2015) 12月2-4日 姫路 姫路商工会議所

⑯ 藤田真司、土屋清澄、大内徳人 他、加速器用 HTS マグネットの開発(4-2)-REBCO 含浸コイルのクエンチ特性の測定-, 2015年度秋季 超伝導学会(2015) 12月2-4日 姫路 姫路商工会議所

⑰ 王 旭東、土屋清澄、藤田真司 他、加速器用 HTS マグネットの開発(4-3)-REBCO 含浸コイルのクエンチ特性の数値解析-, 2015年度秋季 超伝導学会(2015) 12月2-4日 姫路 姫路商工会議所

⑱ 鈴木恵子、土屋清澄、寺島昭男 他、加速器用 HTS マグネットの開発(4-4)-REBCO 導体の4.2 Kにおける臨界電流の測定-, 2015年度秋季 超伝導学会(2015) 12月2-4日 姫路 姫路商工会議所

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：大内 徳人

ローマ字氏名： OHUCHI Norihito

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名： 加速器研究施設

職名： 教授

研究者番号(8桁)：50194080

研究分担者氏名：増澤 美佳

ローマ字氏名： MASUZAWA Mika

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名： 加速器研究施設

職名： 教授

研究者番号(8桁)：10290850

研究分担者氏名：多和田 正文

ローマ字氏名： TAWADA Masafumi

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名： 加速器研究施設

職名： 准教授

研究者番号(8桁)：30300677

研究分担者氏名：菊池 章弘

ローマ字氏名： KIKUCHI Akitoro

所属研究機関名：物質・材料研究機構

部局名： 機能性材料研究拠点

職名： グループリーダー

研究者番号(8桁)：50343877

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：寺島 昭男

ローマ字氏名： TERASHIMA Akio

研究協力者氏名：有本 靖

ローマ字氏名： ARIMOTO Yasushi

研究協力者氏名：王 旭東

ローマ字氏名： WANG Xudong