

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820100

研究課題名(和文)高温超伝導磁石の高機械強度設計技術の開発

研究課題名(英文) Research on High Strength Design Technique for High Temperature Superconducting Magnet

研究代表者

王 旭東 (Wang, Xudong)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：20550346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：MRIやNMRなど高磁場下で使用する超伝導電磁石の高性能化には高温超伝導コイルの実用化が不可欠である。しかし、高磁場中で高電流密度を実現するためには、発生する電磁応力(磁束密度と電流密度の積に比例)に耐えられるように超伝導磁石の機械強度を高めることが必要であり、コイル化技術において最も重要な課題の一つとなっている。本研究は、YOROIコイル構造について実験と数値解析の両面からその補強性能を評価し、目標である機械強度1.2GPa(従来設計の2倍)、コイル電流密度200A/mm<sup>2</sup>(従来設計の2倍)を満足する高温超伝導コイルの設計に成功し、設計のためのYOROIコイル構造のツール開発を達成した。

研究成果の概要(英文)：It is very necessary to achieve the high temperature superconducting coil to upgrade the performance of high field superconducting magnet such as MRI and NMR. The upgrading of the mechanical property of the high temperature superconducting coil is a biggest technical problem because of the large Lorentz force induced by the high current density and high field. In this research, a series of experiments and simulations were performed on a YOROI coil structure. A reinforcing design for the high temperature superconducting coil with the hoop stress of 1.2 GPa and current density of 200 A/mm<sup>2</sup> was successfully achieved. The high strength design technique for the high temperature superconducting coil was also successfully developed.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導 超伝導電磁石 高磁場 電磁場解析 構造解析

1. 研究開始当初の背景

電力応用、回転機応用、医療・基礎科学応用に用いる電磁石を超伝導化することで、高効率で高性能な電気機器が実現できる。金属系線材を用いた超伝導機器の冷却には液体ヘリウム (4.2K) を用いる場合がほとんどであるが、そのヘリウムの輸出規制が 2007 年頃よりアメリカ (世界で約 7 割のシェアを有する) で開始され、まもなく輸出を停止する可能性も伝えられている。この問題は、例えば、医療用 MRI 等で特に深刻であり、高温超伝導線材を用いた高性能応用機器の実現だけでなく、液体ヘリウムを必要としない超伝導電磁石の開発・実用化が急務となっている。高温超伝導線材の中で特にイットリウム (Y) 系線材は、すでに超伝導リニアモータ、MRI、NMR や物理実験用加速器などで実用化されている低温金属系超伝導線材に比べて、高臨界温度 (92K)・高臨界電流密度 (超伝導層  $10^{10}\text{A/m}^2$ )・高機械強度 (単線の引張り降伏応力約 1GPa) の優位性を有することから、次世代の大容量・コンパクトな超伝導応用機器を実現する線材として期待され、世界的に開発競争が展開されている。超伝導線材の巻線・コイル化技術は、従来の電磁石を超伝導化するために必要不可欠なキーテクノロジーであり、特に大容量・コンパクトな機器設計を行うためには、高磁場環境で磁石の電流密度を高めることが必至となる。しかし、高磁場中で高電流密度を実現するためには、発生する電磁応力 (磁束密度と電流密度の積に比例) に耐えられるように超伝導磁石の機械強度を高めることが必要であり、コイル化技術において最も重要な課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

超伝導磁石の設計において、図 1 に示すように高磁場化・大容量化によって蓄積エネルギー (図 1 横軸) が大きくなると、発熱量や超伝導特性 (電界・電流密度) の設計上限値よりも電磁応力によって発生する機械的なフープ応力 (引張り応力) が制約条件 (設計上限 600MPa) となる。その結果、Y 系線材の有する高い臨界電流密度特性を最大限に活かすことができず、コイルに必要な線材長 (図 1 縦軸) が急激に増加して応用機器のコストに大きな影響を及ぼす。超伝導磁石に作用するフープ応力は、コイルが経験する磁束密度  $B$  と通電電流密度  $J$  およびコイル半径  $R$  の積 ( $B \times J \times R$ ) で表される。磁束密度とコイル半径は設計仕様で決定されるため、超伝導特性を最大限活かせるように電流密度 (従来設計ではフープ応力の制約で  $100\text{A/mm}^2$  程度) を高めた高効率・コンパクト・低コストな機器設計を行うには、Y 系超伝導磁石の高機械強度化が最も重要な鍵となる。図 2 に示すように従来のコイル構造は超伝導線自身の機械強度に依存するため、Y 系線材で 600MPa、金属系線材で 300MPa が実機設計の

上限である。これに対して、先行研究で代表者らが開発を行ってきた Y-based Oxide superconductor and Reinforcing Outer Integrated (YOROI) コイル構造 (文献①) は、コイルと密着していない上下蓋がフープ応力を分担するため、線材固有の強度以上のコイル設計が可能となる。本研究は、YOROI コイル構造について実験と数値解析の両面からその補強性能を評価し、1.2GPa ( $B \times J \times R$  計算、従来設計の 2 倍以上) の高機械強度と  $200\text{A/mm}^2$  (従来設計の 2 倍以上) の高電流密度を両立できる高温超伝導磁石の高機械強度設計技術の開発を行う。

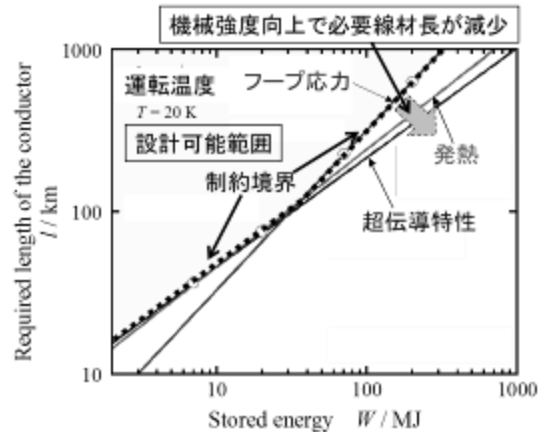


図 1 蓄積エネルギーと必要線材長

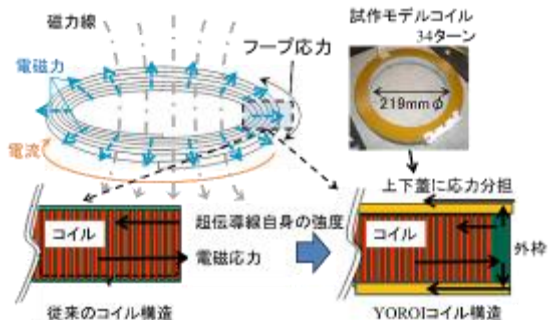


図 2 従来のコイル構造と YOROI コイル構造

3. 研究の方法

図 3 に示す内径 45mm 外径 54mm の YOROI モデルコイルを設計・作製し、ローレンツ力印加時のひずみ評価試験および数値解析モデルの構築と解析評価を行い、実験と数値解析の両面から YOROI コイル構造の補強効果を検証し、実験との比較により解析モデルの妥当性を確認した。そして、YOROI コイル構造の

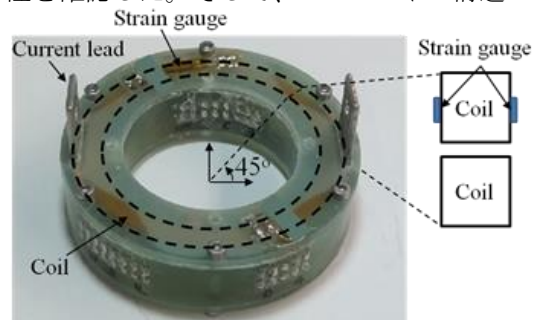


図 3 YOROI モデルコイル

補強部である上下蓋の厚みをパラメータとして、高温超伝導電磁石の高機械強度設計技術の開発に向けて応力分担効果の実験と解析評価を行った。また YOROI モデルコイル冷却時の熱応力とひずみについても実験と数値解析により評価した。ひずみ評価試験では、図 4 に示す真空断熱のクライオスタット内に YOROI モデルコイルを設置し、40K まで冷却した後、高磁場応用を想定して 10T の外部磁場を印加した状態でモデルコイルを 20A まで励磁してコイル内外層および補強部である上下蓋のひずみを測定した。YOROI モデルコイルの数値解析モデル構築および解析は、まず外部磁場印加状態を想定したローレンツ力解析のための電磁場解析モデル (図 5) を作成し、コイル内に発生するローレンツ力分布を詳細解析した。そして、応力ひずみ評価のための構造解析モデル (図 6) を作成し、電磁界解析で得られたローレンツ力分布を代入して、コイル内部の詳細な応力ひずみ分布を解析した。

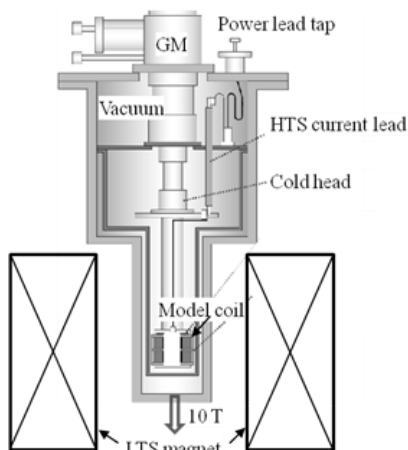


図 4 実験装置概略図

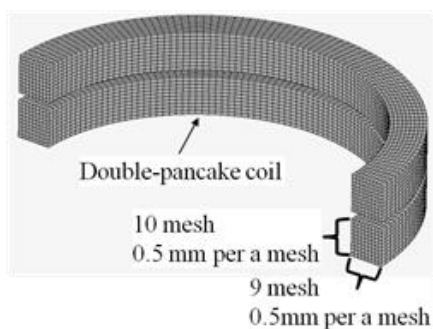


図 5 電磁場解析モデル

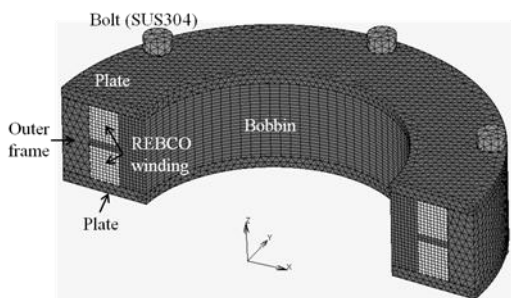


図 6 構造解析モデル

#### 4. 研究成果

##### (1) 小型モデルコイルひずみ評価試験

モデルコイルはダブルパンケーキ構造で作製し、コイルを囲む補強部の材料には GFRP を用いた。コイル巻線に用いた Y 系高温超伝導線材はフジクラ社製のもので、幅 5mm、厚さ 0.21mm (超伝導層 2.6 $\mu$ m、基板 75 $\mu$ m、銅安定化層 75 $\mu$ m、絶縁層 25 $\mu$ m) である。コイル巻線は内径 45mm 外径 54mm であり、YOROI コイル構造全体は内径 37mm 外径 62mm である。モデルコイルを室温から 40K まで冷却した際に、コイル内外層と補強部である上下蓋に加わる圧縮ひずみはそれぞれコイル内層で  $-5.9 \times 10^3$ 、コイル外層で  $-6.5 \times 10^3$ 、補強蓋が  $-3.1 \times 10^3$  である。また補強蓋の厚みを 1.0mm と 1.5mm をとして、10T の外部磁場を印加した状態でモデルコイルを 20A まで励磁してコイル内外層および補強蓋のひずみ測定結果を図 7 に示す。コイル内外層と補強蓋のひずみは励磁電流の上昇とともに線形的に上昇する。よって、コイルで発生したローレンツ力は補強蓋へ連続的に伝わっている。コイル外層では補強蓋の厚みによるひずみの大きさに差異がないものの、コイル内層は 1.0mm より 1.5mm の補強蓋のひずみが約 30% 小さくなっている。また補強蓋が厚くなるほど蓋自身のひずみも減少した。

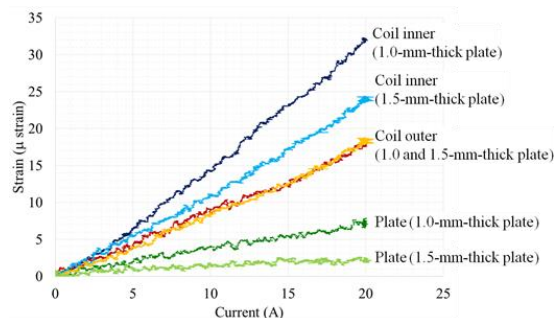


図 7 ひずみ測定結果

##### (2) 小型モデルコイル数値解析モデル

電磁場解析モデル (図 5) により 10T の外部磁場を印加した状態でコイルに加わるローレンツ力を評価した。支配方程式にはビオ・サバールの法則を用いた。

構造解析モデル (図 6) は冷却時およびコイル励磁時についてそれぞれ構成し、冷却時は実験条件を考慮した温度境界を与え、励磁時はローレンツ力の解析結果を節点加重として組み込んだ。コイルと補強部の接触部分は実構造から接触境界としている。ボルト材料は SUS304 であり、補強部の上下蓋と外周リング間を固定している。コイル部分は Y 系高温超伝導線材の各構成材料の混合モデルとして複合側により材料値を決定した。コイルのヤング率・ポアソン比・線膨張率はそれぞれ c 軸が  $17.76\text{GPa} \cdot 0.055 \cdot 19 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、ab 面が  $117.5\text{GPa} \cdot 0.364 \cdot 14 \times 10^{-6}/\text{K}$  である。GFRP と SUS304 のヤング率・ポアソン比・線膨張率はそれぞれ  $35.4\text{GPa} \cdot 0.21 \cdot 30 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $193\text{GPa} \cdot 0.3 \cdot 17 \times 10^{-6}/\text{K}$  を用いた。



(3) 小型モデルコイル数値解析結果

冷却後のコイルと補強蓋の応力・ひずみ分布を図8に示す。室温から40Kまで冷却した際に、コイル内外層と補強部である上下蓋に加わる圧縮ひずみはそれぞれコイル内層で $-4.75 \times 10^3$ 、コイル外層で $-4.85 \times 10^3$ 、補強蓋が $-5.0 \times 10^3$ である。実験値と誤差が少しあるものの傾向はとく一致している。またGFRPの線膨張率が大きいので、冷却によってコイルはGFRP外周リングから圧縮され、150-250MPaのプリストレスを受ける。なお、コイル径方向の剥離方向応力は20MPa未満であり、本設計のコイル内外径比では薄利による劣化の可能性は極めて低い。

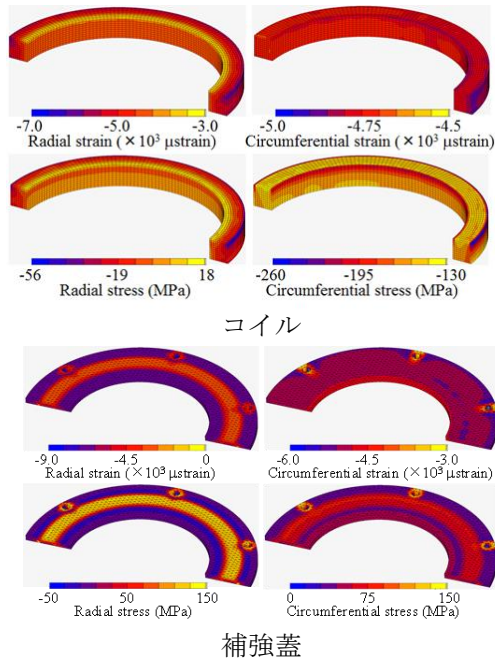


図8 冷却後の応力・ひずみ分布

10Tの外部磁場を印加した状態で20A励磁時にコイル内部で生じるローレンツ力の解析結果を図9に示す。併せてコイル内部の磁場分布と補強なしのフープ応力理論値を図9示す。ローレンツ力はコイル内層で最大となり外層に向かうほど減少する。同様に補強なしのフープ応力は理論計算から最内層で5.0MPa、最外層で3.9MPaである。

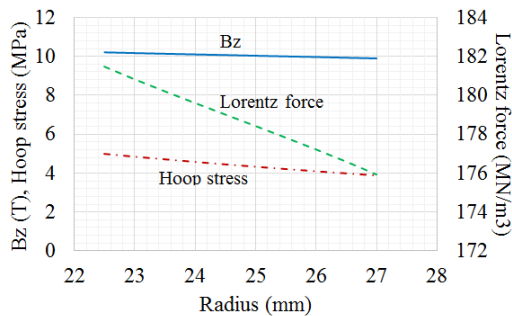


図9 ローレンツ力の解析結果

10Tの外部磁場を印加した状態でモデルコイルを20Aまで励磁してコイルおよび補強蓋の応力・ひずみ解析結果を図10に示す。補強蓋1.0mmの場合、コイル内外層および補強蓋のひずみの実験結果が $32 \times 10^{-6}$ 、 $18.5 \times 10^{-6}$ 、

$7 \times 10^{-6}$ に対して解析結果は $33 \times 10^{-6}$ 、 $25 \times 10^{-6}$ 、 $9 \times 10^{-6}$ である。また補強蓋1.5mmの場合、コイル内外層および補強蓋のひずみの実験結果が $24 \times 10^{-6}$ 、 $18.5 \times 10^{-6}$ 、 $2.5 \times 10^{-6}$ に対して解析結果は $30 \times 10^{-6}$ 、 $25 \times 10^{-6}$ 、 $7 \times 10^{-6}$ である。解析結果は定性的かつ定量的に実験結果を再現しており、解析モデルの妥当性は実証された。また、解析結果からコイル内外層の応力がそれぞれ4.5MPaと3MPaであり、図9に示す補強なしの理論計算より内層で10%、外層で23%軽減され、補強効果が発揮されている。

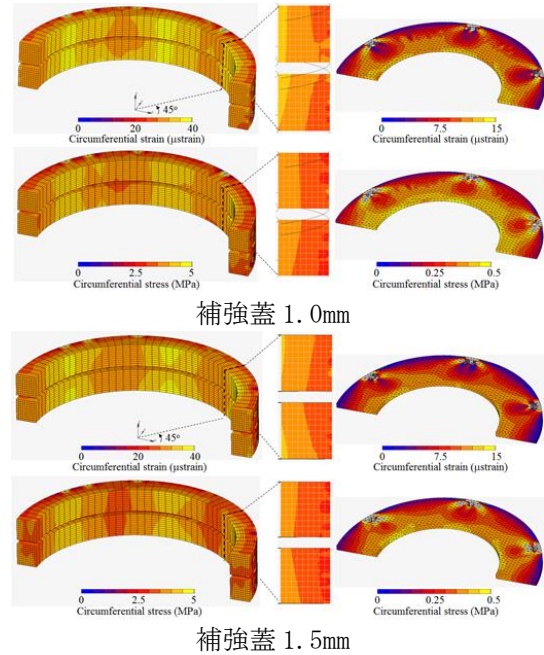


図10 応力・ひずみ解析結果

(4) 実規模サイズコイル数値解析結果

(1-3)の結果と開発した計算ツールを用いて、高磁場用高温超伝導電磁石を想定して、実機サイズレベルの内径1m・外径1.2mのコイルについてYOROIコイル構造の設計を行った。設計条件として、研究目標である機械強度1.2GPa(理論計算、従来設計の2倍)、コイル電流密度 $200\text{A}/\text{mm}^2$ (従来設計の2倍)を満足するコイルとした。コイル内部のローレンツ力分布と補強なしのフープ応力分布を図11に示す。なお、コイルの経験磁場は径方向で一様に10Tとした。

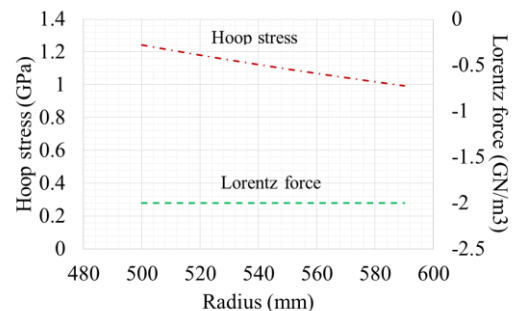


図11 実規模コイルの補強無フープ応力  
フープ応力は最内層で1.24GPaとなっている。補強部の構造は最適化の結果、上下蓋の軸方

向厚みを 2.5mm、外周リングの径方向厚みを 10mm とした。補強部の材料は機械強度と冷却時の伝熱性能を考慮して SUS 材とした。コイルおよび補強蓋の応力・ひずみ解析結果を図 12 に示す。本設計の結果、補強無でコイル最内層に生じた 1.24GPa は 0.64GPa まで低減することに成功した。そして、コイルの最大ひずみは  $5.5 \times 10^{-3}$  であり、Y 系高温超電導線材の許容ひずみ  $6.0 \times 10^{-3}$  未満である。補強蓋の最大ひずみと応力はそれぞれ  $4.45 \times 10^{-3}$  と 0.86GPa であり、SUS 材の弾性変形範囲である。以上の結果から、本研究の目標である機械強度 1.2GPa (理論計算、従来設計の 2 倍)、コイル電流密度  $200\text{A}/\text{mm}^2$  (従来設計の 2 倍) を満足する高温超伝導コイルの設計に成功し、設計のための YOROI コイル構造のツール開発を達成できたと考える。

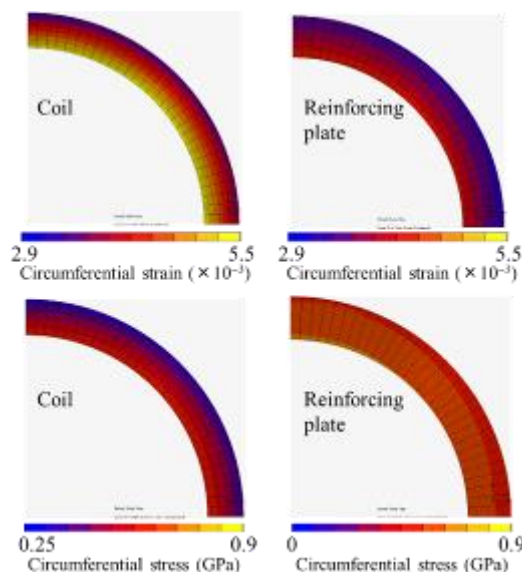


図 12 実規模コイルの応力・ひずみ解析結果

#### <引用文献>

- ① X. Wang, A. Ishiyama, T. Tsujimura, H. Yamakawa, H. Ueda, T. Watanabe, and S. Nagaya, “Numerical Structural Analysis on a New Stress Control Structure for High Strength REBCO Pancake Coil,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 24, 2014, 4601605  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2288294

#### 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 1 件)

- ① Xudong Wang, Yoshiaki Tsuji, Atsushi Ishiyama, Hiroshi Yamakawa, Tomonori Watanabe, and Shigeo Nagaya, “Experiment and Numerical Analysis on the YOROI Structure for High-Strength REBCO Coil,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 26, 2016, 15851465,

DOI:10.1109/TASC.2016.2524038

[学会発表] (計 2 件)

- ① Atsushi Ishiyama, Yoshiaki Tsuji, Masaki Tashiro, Hiroshi Yamakawa, Xudong Wang, Tomonori Watanabe, and Shigeo Nagaya, “Experiment and Numerical Analysis on a New Reinforcing Structure for High-Strength REBCO Coil,” International conference on magnet technology 24, 2PoBG\_15, 20/10/2015, Soul (Korea)
- ② 王旭東, 辻義明, 梅田大貴, 田代真樹, 山川宏, 石山敦士, 渡部智則, 長屋重夫, “ローレンツ力による YOROI モデルコイルの応力ひずみ評価実験と数値解析,” 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, 2014 年 11 月 5 日, コラッセふくしま (福島県福島市)

[その他]

- ① 王旭東, 辻義明, 梅田大貴, 田代真樹, 山川宏, 石山敦士, 渡部智則, 長屋重夫, “ローレンツ力による YOROI モデルコイルの応力ひずみ評価実験と数値解析,” 2014 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 査読無, vol. 90, 2014, p84

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

王旭東 (WANG Xudong)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構, 加速器研究施設, 助教

研究者番号: 20550346

##### (2) 研究協力者

石山敦士 (ISHIYAMA Atsushi)

早稲田大学, 理工学術院, 教授

研究者番号: 00130865