

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540320

研究課題名（和文） 高放射線環境下における10 $\mu$ m超高分解能薄膜観察装置の開発研究課題名（英文） Development of a 10 $\mu$ m over Ultra-high-resolution Observation System for Thin foil in High-radiation area

研究代表者

武田 泰弘 (YASUHIRO TAKEDA)

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・技師

研究者番号：70391745

研究成果の概要（和文）：

荷電変換薄膜はビーム照射時に発生する熱や放射線損傷によって、ピンホールや変形を引き起こす。このため、成長過程、破損過程の研究には10 $\mu$ m以下の超高分解能観察装置が必要である。そこで、我々は高放射線環境でも超高分解能で常時観察できる望遠鏡の原理を応用した観察システムを考案した。最良な方式を選択した結果、1MGy放射線環境下で約8m先の被写体を8.33 $\mu$ mの分解能で観察できる超高分解能観察装置の製作に成功した。

研究成果の概要（英文）：

The charge stripper foil is irradiated by a high-energy, high-current beam, which causes an outbreak of pinholes and shrinkage in the foil. High-resolution observation devices are necessary to the study the development of the damage and the growth of the pinholes in the foils. We devised an ultra-high-resolution observation system using the principle of the telescope within a high-radiation area. This system can withstand high radiation area, it has an ultra-high resolution of 8.33  $\mu$ m at a distance of 8 m.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高分解能、観察装置、高放射線環境、荷電変換膜、長寿命化

## 1. 研究開始当初の背景

加速器の荷電変換入射に使われる炭素薄膜は、入射ビームによるエネルギーロスによって局所的に発熱（約2000K）が起こる。その発熱による周辺との温度差により薄膜に

は収縮やピンホールが形成され、すぐに破損する。破損すれば、薄膜を交換しなければならず、交換時に要する運転時間の短縮と作業者の放射線被曝が避けられない。現在、熱損傷が少なく破損の起こりにくい炭素薄膜の

開発が行われているが、未だ満足のいく薄膜の開発には至っていない。

この熱損傷の少ない炭素薄膜の研究開発を進めるには、薄膜の損傷過程に至る変形メカニズムを詳細に研究しなければならない。数ミクロン程度のピンホールの生成、成長過程や薄膜の収縮過程を詳細に調べるには、真空中の薄膜表面を  $10\mu\text{m}$  以下で詳細に観察できる観察装置の製作が必要である。また、薄膜は高放射線環境下という非常に過酷な環境下に置かれるため、放射線照射に耐えられる機器を製作しなければならない。

現在、茨城県東海村の J-PARC の荷電変換部に高放射線環境下に対応した観察装置を設置している。この装置は、炭素薄膜を  $80\times 80\text{mm}$  角の範囲を約  $9\text{m}$  離れた位置から  $125\mu\text{m}$  の分解能で観察するものである。ビーム照射を受けて変化する炭素薄膜全体像を、常時、鮮明な画像を映し出し、有意義に使用されている。さらにピンホールなどの詳細な薄膜状態を観察するには、被写体の範囲を小さくし、解像度を上げる必要がある。そこで、分解能が  $10\mu\text{m}$  以下で将来的に J-PARC の荷電変換膜観察装置にも設置できる仕様の超高分解能薄膜観察装置の開発が行なう。

## 2. 研究の目的

シンクロトロン加速器への荷電変換入射、ビームモニターや原子核実験で使われる薄膜ターゲットは一般的に高温に耐えられ、ビーム散乱の少ない炭素薄膜が使われる。しかし、ビーム電流が強いと、炭素薄膜は熱による伸縮等著しい変形やピンホールが形成され、すぐに破損するため、加速器の運転や実験計画の妨げとなる(図1)。そのため、なるべく長寿命になるよう、長寿命炭素薄膜の開発を急ぐ必要がある。

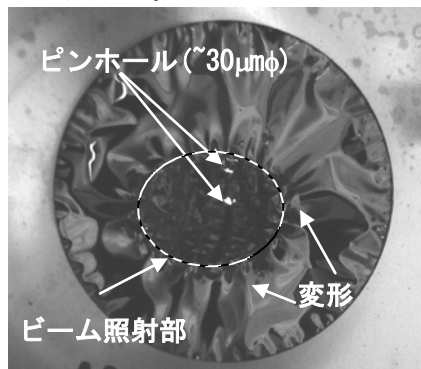


図1：ビームにより変形、ピンホール形成した炭素薄膜

薄膜の破損に到る変形メカニズムを明らかにすることは、長寿命薄膜の開発の最重要課題である。しかし、市販品の観察機器では、すぐに放射線劣化による画像劣化が起こり、観察できるものが存在しないため、その開発

研究は、進んでいない。そこで、放射線環境下で高耐久、画像劣化の少ない観察装置を早急に開発しなければならない。

薄膜のピンホールは数ミクロンから大きいものは数十ミクロンまで存在する。ビーム照射前の薄膜にはピンホールがほとんど存在せず、ビーム照射量と共にその数は増え、大きくなる。このピンホールの発生過程及び成長過程を緻密に測定するには  $10\mu\text{m}$  以下の分解能を持つ観察機器を開発する必要がある。

## 3. 研究の方法

数年前より我々は高放射線環境下でも使用できる観察方法の調査を行ってきた。しかし、いずれも短時間に放射線劣化が起こり、頻繁に部品を交換する必要が生じるため、現状では満足できる確立した技術はない。このため、放射線劣化の少ない観察方式の新しい手法が要求される。我々は集積線量  $1\text{MGy}$  以上の耐久性を持ち、被写体から  $10\text{m}$  離れた場所で  $250\mu\text{m}$  の分解能を持つ新しい観察系の製作と実現を図ることを目標に開発を始めた。そこで、放射線環境下において長時間観察の実現のために問題点を見直した結果、1) 放射線損傷が大きく、着色を起こすレンズ等のガラス材と 2) p n 反転を起こす CCD 素子などの半導体類を放射線環境下の光路上に置くべきでないという結論に達した。そこで、放射線損傷の起こしやすい材質を放射線環境下に全く入れない方法で設計を行うこととした。すなわち、光路には放射線に強い金属などのミラーのみを配置し、放射線防護壁の外に放射線の影響を受けやすいレンズや CCD カメラなど配置したシステムを考案した。これは、放射線環境下外でのみ画像を結像させる望遠鏡の原理を応用した全く新しいシステムである。これらの条件をもとに光路計算を行ったところ、約  $9\text{m}$  先で  $250\mu\text{m}$  の分解能が得られる十分な分解能を確認した(図2)。また、このシステムでは、望遠鏡の原理を応用しているため、ミラーの切り替えとピント調整のみで1つの観察部から多数の違った被写体(5被写体)を見ることが出来る特徴やズームングの機能も加えることに成功した。

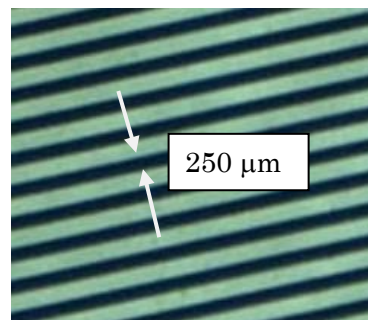


図2：荷電変換膜観察装置の分解能

分解能測定用グーチング（2本/1mm：分解能125 $\mu\text{m}$ ）が分離していることが確認出来る。

この設計を基に高放射線下で高分解能観察するために解決すべき問題点の解決を行った。まず、1) 光学部品における反射率の低下や材質表面の放射線劣化を比較し、最適材料を選択、そして2) ミラーと観察部のレンズの面精度を表面研磨法の改善を行い、レイリー限界まで達する設計を行った。上記の問題点の解決と技術革新をもとに、約9m先の80x80mm角被写体を高分解能で観察するシステムを実際に組み上げた。その結果、色収差がほとんどなく、分解能が設計以上の125 $\mu\text{m}$ に達成していることを確認した。

今回、さらなる高分解能（10 $\mu\text{m}$ 以下）システム構築を目標とする。そこで、我々は、光学計算をより詳細に行い、光学部品の材質や性能を見直しながら、10 $\mu\text{m}$ 以下の高分解能システムの設計を行った。現在の装置で使用する光学部品はレイリー限界まで達しているため、改善の余地はほとんどない。そこで、元の性能を維持し、色収差も補正でき、最大限の分解能を得る方法として、観察部の焦点にできる像を拡大レンズで拡大する方法が考えられる。焦点から下流に4倍の拡大レンズを取り付けた新しい観察部を設置する。この方式を用いることで、観察像は現状の最大2倍から8倍になり、10 $\mu\text{m}$ 以下の極限の分解能が得られることになる。

### (1) 設計

10 $\mu\text{m}$ の超高分解能を得るためには光学計算、光学設計、光学部品の全てを満足できなければならない。そこで、光学計算ソフトZEMAXを使用し、光学設計の限界（レイリー限界）を目指した設計を行う。また、設計コンセプトを次のように定め、開発を行っていった。1) 光学部品精度をレイリーリミット以下の高精度仕様とする、2) 硝材、反射コート膜に最適材を用いる。光学部品への負荷を最小にとどめる機構の採用、3) 外部からの熱などの画像への影響を除外するため、光路内は常温、常圧、気密仕様とする、4) 最先端技術を取り入れた光学設計、研磨法の採用、5) 残留放射線に強いチタン、SUSを使用する、6) 可能箇所の自動化、7) 設計変更にも柔軟に対応できる設計構造とした。

現在使っている荷電変換装置を改造せずに分解能を上げる手法の検討を始め、観察部で収束部に拡大レンズを取り付けて、一部のポイントの分解能を上げて観察する以下に示す3方法を考案した。

- ・エキスパンダーレンズ単独方式
- ・エキスパンダーレンズ+コリメート拡大方式
- ・オルソスコピックレンズ+コリメート拡大方式

この3案は一長一短あり、実際に各方式の像を観察することで最良の案の選択とすることにした

今回製作する超高分解能観察装置は、極限の分解能を目指して設計する。光の回折限界（エアリーディスク）がある。この値は、

$$\phi/2 = 1.22 \lambda F$$

(Fは使用している主レンズのF値)

$$\text{これより、} 1.22 \times 0.0006 \times 8 = 0.006\text{mm} = 6\mu\text{m}$$

即ち、両考察から6 $\mu\text{m}$ 程度が観察装置の極限の分解能となる。レイリー限界を目指した設計を行い、色収差の無い光学設計を目指した。

この設計をもとに、上述3方式の実像観察による比較検討を行った(図3)。拡大レンズのテレセントリック系のPowermate(x4)と4枚構成オルソスコピックレンズを準備し、実像を観察した。結果、エキスパンダーレンズは、拡大率の調整に不向きであることや像分解能がそれほど良くないことがわかった。一方、オルソスコピックレンズが像分解能に優れると評価し、オルソスコピックレンズ+コリメート拡大方式を採用することになった(図4)。この方式では、レンズから観察部までの距離を変えることで、無段階の拡大光学系の設計を行うことができる。

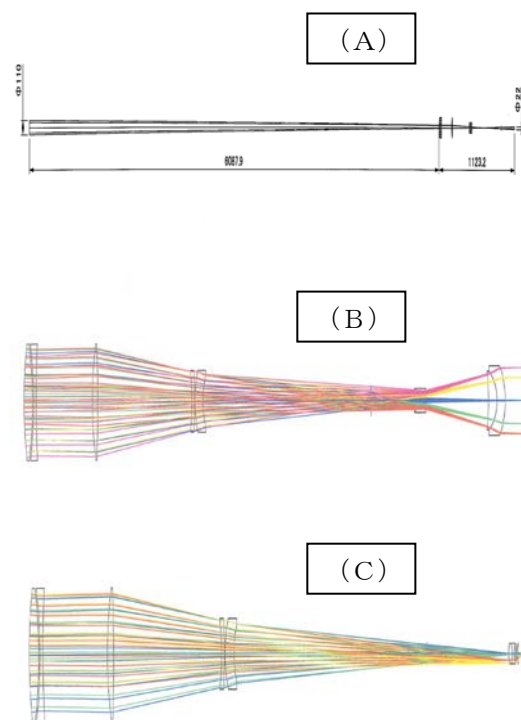


図3：各方式の光学設計

- (A) エキスパンダーレンズ単独方式
- (B) エキスパンダーレンズ+コリメート拡大方式
- (C) オルソスコピックレンズ+コリメート拡大方式の光学設計

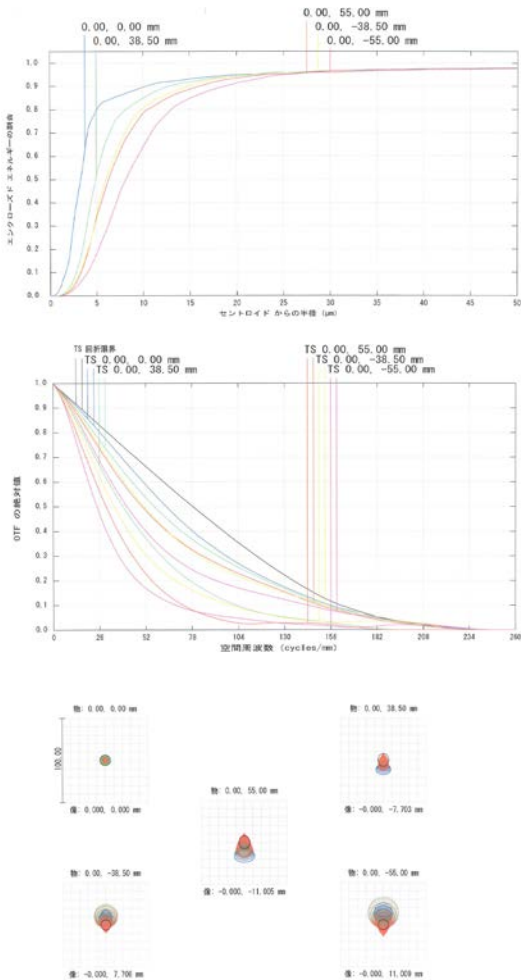


図4： 光学性能、分解能検討  
 (上) 幾何光学的エンサークルドエネルギー  
 (中) 多色解析  
 (下) スポットダイアグラム  
 この光学設計により、10mm以下の高分解能で色収差のほとんどない機器の製作が可能であることが示された。

(2) 製作

上述設計を基に、モータによるピント調整機構、ズーミング機構を設計し、実機の製作を行った。(図5)ピント調整機構はステップモーターによりオルソスコピックレンズを上下に移動させて、詳細なピント合わせも可能としている。また、ズーミング機構には小型DCモータを取り付け、オルソスコピックレンズと観察部(デジタルカメラ)間

の距離を変え、ズーミングを行う。この間隔は約30cmまで広げることが出来る。また、部品の選択は放射化の影響を考え、最適な選択を行った。

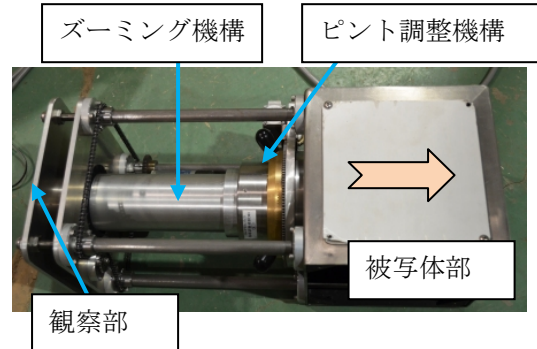


図5：製作した超高分解能観察装置

4. 研究成果

(1) 光学性能試験

製作した超高分解能観察装置が設計通りの性能を示すか、仮光路を製作し光学性能試験を行った。

① 仮光路の製作

光学性能試験のために、現在 J-PARC で使われている荷電変換膜観察装置に似せた仮光路を作り、試験を行う必要がある。図6, 7に示すように全長約9m(荷電変換膜観察装置と同等)の光路長を持つ、仮光路を製作した。光路には高性能APOレンズ、99.9%以上の反射率を持つ2枚の高精度大型ミラーを配置した。

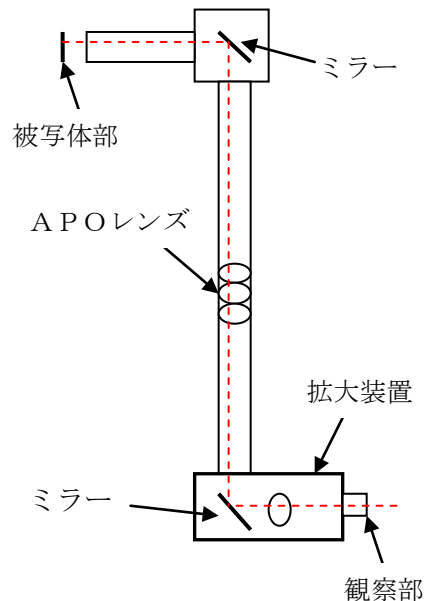




図6： 仮光路概略

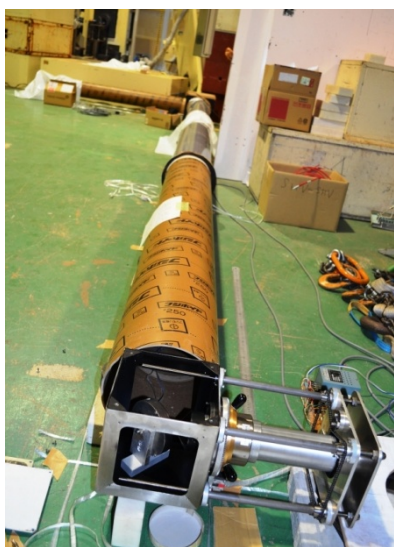


図7： 仮光路写真  
(APOレンズ、ミラー2枚配置、全長約9m)

### ②分解能測定

製作した拡大装置の分解能を被写体部に置いたスタンダード分解能測定テストパターン(グレーティング)を用いて行った。テストパターンの画像を観察部のデジタルカメラで観察、撮影し、得られたパターンが分解して見えるかどうかで判断する。テストパターンは1mmあたり20本から60本の物を使用し、カメラは、16.9メガピクセルの23.6x15.6mmサイズCMOSセンサーを内蔵するNIKON・D5100を使用した。図8に得られたテストパターンの画像を示す。この画像より、この拡大装置の分解能は、8.33 $\mu\text{m}$ であると確認できた。これは、目標値を大きく上回るものである。

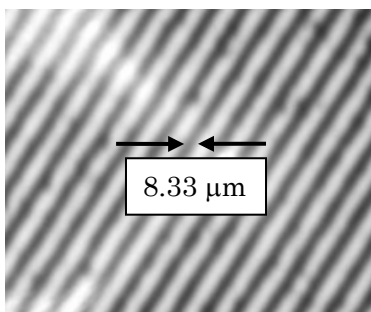


図8： 分解能測定結果  
分解能測定用グレーティング(60本/1mm：分解能8.33 $\mu\text{m}$ )  
線が完全に分離していることが確認出来る

### ③色収差測定

拡大装置はカラー画像で観察を行う。そのため、色の変化は非常に重要な情報源となる。そこで、24色カラーチェッカーを用いた色収差測定の測定を行った。カラーチェッカーを被写体部に設置し、観察部に設置したカメラでそれぞれのカラーを撮影、色変化を測定することで、色収差がどの程度あるのか判断できる。図9に拡大装置なしのカラーパターンと拡大装置を通して撮影によって得られたカラーパターンの一部を示す。この画像より、色収差は、ほとんど確認できない。

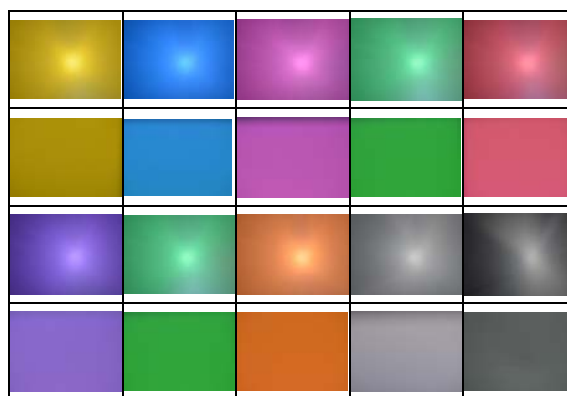


図9： 拡大装置なしと拡大装置を通して撮影によって得られたカラーパターン

(上：拡大装置を通して撮影、下：拡大装置なしで撮影)

光学性能試験により、8.33 $\mu\text{m}$ もの高分解能で色収差もほとんど見られないことが確認された。非常に高性能な光学機器であることが証明されたことになる。この分解能は炭素フォイルのピンホール形成過程の観察するために必要な高分解能(10 $\mu\text{m}$ 以下)に十分達成しており、今後は、製作した超高分解能観察装置を使用して、ビーム照射による荷電変換炭素フォイルの変形やピンホールの成長過程を詳細に観察することで、破損にいたるメカニズムを解明していくことが期待される。

遠くの真空内の被写体を望遠鏡の原理を使い、超高分解能を長時間維持しながら観察する装置は、世界で初めての試みであった。通常望遠鏡は無限遠光学系で使用されるものあり、本研究のような有限遠には使用しない。我々はレンズ配置など詳細に光学系を検討し、有限遠光学系でも高分解能で観察できることを見出した。顕微鏡で得られる像が望遠鏡で得られた画期的な手法である。この望遠鏡の原理を用いることで、1) 1つの観察部からミラーの切り替えを行うことで複数の被写体を観察できる、2) ズーミングシステムにより、その用途に合わせ拡大縮小ができ

るというユニークな特徴を持つ。本研究ではレンズにより収束された像を高分解能レンズで拡大することで、さらにピンホール形成過程の観察できる高分解能(10 $\mu$ m以下)を目指し、今までにない極限の観察装置を開発できた。

本研究の高放射線環境下監視技術開発の成功により、加速器施設内での1)荷電変換フォイルのビーム照射中の表面状態監視、2)ビームモニタとしての使用、3)加速器機器の健全性の確認、4)定期的点検、5)保守作業時の状態監視の他、原子炉など放射線に関わる施設の他分野にも利用できる。特に従来、常時監視が困難であった高放射線環境下の機器を詳細に監視できることで、放射線や加速器イオンビームのダメージによる物質や機器の変化を常に観察でき、放射線環境下に強い新しい機器の開発に道筋をつけることができた。また、常時観察できることで、薄膜や機器などが破損する前に交換が出来ることになり、安全面でも寄与する。

現在、過酷な放射線環境とされる国際熱核融合実験炉ITER計画では、炉内観察システムの開発にペリスコープ方式とファイバー方式が検討されている。しかし、放射線環境下にレンズやファイバーを組み込む必要があり、上述したように放射線劣化による光学部品のブラウニングが大問題となり、結果として画像の鮮明度が劣化する。他にも様々な放射線環境での観察法は検討されているが、どの方法も技術的には確立されていない。本研究では、“望遠鏡の原理”を最大限生かすことで長時間、超高分解能を維持することにより、画像変化のない安定な、高耐久薄膜観察システムを開発実現した。この開発により、高放射線環境という過酷な環境下での常時高分解能観察を可能にしたことで、加速器分野以外の多分野でのさらなる応用が期待される。

#### 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)

YASUHIRO TAKEDA、ULTEA-HIGH RESOLUTION OBSERVATION DEVICE FOR CARBON STRIPPER FOIL、IPAC2011 proceeding、査読無、1、2011、TUPS086

武田泰弘、高放射線環境下における分解能10 $\mu$ m以下超高分解能薄膜観察装置の開発、技術研究会報告集、査読無、1、2011、5-18

Yasuhro Takea、Development of an Ultra-high-resolution Observation System

for Carbon Charge Stripper Foil、Proceedings of ICEAST-2012、査読有、1、2012、36

武田泰弘、長寿命荷電変換フォイルの開発状況と今後の展望、技術研究会報告集、1、2013、46-52

[学会発表] (計2件)

YASUHIRO TAKEDA、ULTEA-HIGH RESOLUTION OBSERVATION DEVICE FOR CARBON STRIPPER FOIL、the International Particle Accelerator Conference (IPAC2011)、2011.9.6、スペイン・サンセバスチャン

Yasuhiro Takeda、Development of an Ultra-high-resolution Observation System for Carbon Charge Stripper Foil、International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST-2012)、2012.11.22、タイ、バンコク

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

武田泰弘 (YASUHIRO TAKEDA)

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・技師  
研究者番号：70391745

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし