

# DEVELOPMENT OF ULTRA-HIGH RESOLUTION OBSERVATION DEVICE

Yasuhiro Takeda<sup>#A)</sup>, Yoshiro Irie<sup>A)</sup>, Isao Sugai<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

## Abstract

The charge exchange foil causes a pinhole and transformation by heat and radiation injury generated during the beam irradiation. 10 $\mu$ m or less ultrahigh resolution observation device are necessary for the study of the growth process and the damage process of the pinhole on this charge exchange foils, but there is no device which met the condition that we can observe for a long time, because of the very poor usage environment of the observer which is observed in high radiation and vacuum. Therefore we devised the observation system which applied the principle of the telescope that can always observe at ultrahigh resolution even with high radiation environment. As a result of comparison of various optical systems to enable high-resolution and materials can be used in radiation environments, and having chosen the best method, we have succeeded in producing the ultrahigh resolution observation device which could observe a subject of approximately 8m ahead at resolution of 8.3 $\mu$ m. In this article, we describe the development process, production, and the optics performance test of the ultrahigh resolution observation device.

## 超高分解能観察装置の開発

### 1. はじめに

現在、世界で製作や稼働している陽子ビーム大強度大型加速器では、直線リニアックからシンクロトロンへの入射に荷電入射法を用いている。この荷電変換入射では、負水素ビーム ( $H^-$ ビーム) を入射時に陽子ビーム ( $H^+$ ビーム) に変換する必要がある。このため、入射部に荷電変換フォイルを設置し、フォイルを透過させることで  $H^+$ ビームの電子を剥ぎ取り、荷電変換を行っている。

茨城県東海村で稼働している大強度陽子加速器施設 (J-PARC) では、180-MeV 線形加速器により加速された  $H^-$ ビームを 3-GeV シンクロトロンに入射部に設置する炭素荷電変換フォイルで  $H^+$ ビームに荷電変換する。ここで使われる荷電変換フォイルは入射ビームのみならず周回ビームにさらされるため、ビームによるエネルギーロスによって局所的に高温に発熱 (約 2000K) する (図 1)[1]。その発熱部と非発熱部との温度差により炭素フォイルは収縮したり、ピンホールが形成され、すぐに破損する。破損すれば、フォイルを交換しなければならず、交換時の作業員への放射線被曝が避けられないため、長時間破損の起こりにくいフォイルの開発が待たれている。現在、熱損傷が少なく破損の起こりにくい炭素フォイルの開発が行われているが、未だ満足いくフォイルの開発には至っていない。

熱損傷の少ない長寿命炭素フォイルの研究開発を進めるには、フォイル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、成長過程やフォイルの収縮過程を詳細に調べるには、真空中に設置するフォイル表面を 10 $\mu$ m 以下で詳細に観察できる超高分解

能観察装置の製作が必要である。フォイル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、かつ成長過程の観察のために常時観察できる機器の製作が待たれる。

そこで、我々は望遠鏡の原理を応用した新しい観察法を開発した。放射線環境で使用できる材料や高分解能を可能とする様々な光学系を比較検討し、最適な方式を選択した結果、約 8m 先の被写体を 8.3 $\mu$ 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。この開発状況と光学性能試験の結果について報告を行う。

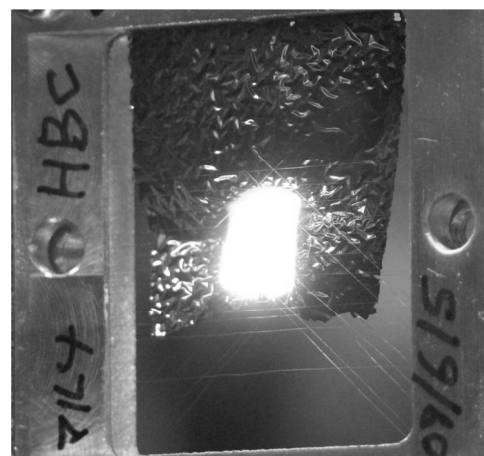


図 1: 照射中のカーボンフォイル

## 2. 開発目的

シンクロトロン加速器への荷電変換入射、ビームモニタや原子核実験で使われるフィルターターゲットは一般的に高融点で、高温に耐えられ、ビーム散乱の少ない炭素が使われる。しかし、ビーム電流が強いと、炭素フォイル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2)。そのため、長寿命炭素フォイルの開発を急ぐ必要がある。

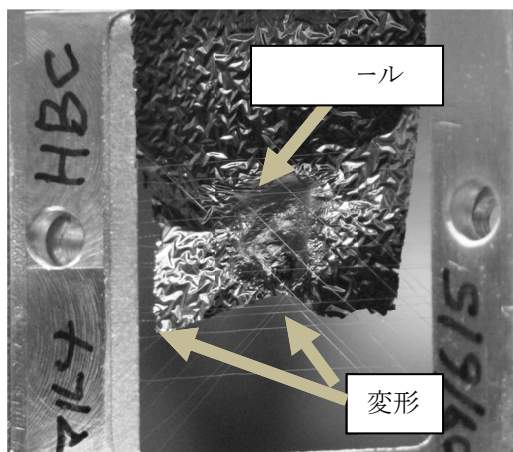


図2: ビームにより変形、ピンホール形成した炭素フォイル

フォイルの破損に到る変形メカニズムを明らかにすることは、長寿命フォイルの開発の最重要課題である。この変形メカニズムを明らかにするには、ビーム照射中のフォイル表面の変化を常時観測することが、非常に有用である。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。

ビーム照射前のフォイル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。フォイル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。そのため、このピンホールの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高分解能観察機器を設置する必要がある。

## 3. 光学設計

我々は、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1MGy以上の耐久性を持ち、被写体から10m離れた場所で200 $\mu\text{m}$ 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)pn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、10m先で200 $\mu\text{m}$ の分解能が得られる十分な分解能を確認した。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の機能も加えることに成功した。

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、10m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[2]。

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、焦点の像を最大限拡大し、10 $\mu\text{m}$ 以下の極限の分解能が得られることになる。

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った。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を目標とした。現在、J-PARC・RCSに設置されている観測装置は、約8m離れた真空チャンバー内（放射線領域）の80 x 80mm角の被写体（荷電変換炭素フォイル）をφ200mmの光路導管を通し、階下（サブトンネル）の観測装置（CCDカメラ）にて受光している。この像径はφ22.5mmで、このときの倍率は1/5である。像の分解能は、被写体面に設置した100本/1 inchのグレーチングをきれいに分解できることから125μmであることが確認されている。

今回製作する超高分解能観測装置は、極限の分解能を目指して設計する。CCDカメラの1ピクセルは約5μmの大きさであるので、これが一つの分解能の限界となる。一方、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は使用している主鏡のF値）

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6μm程度が観測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、以下に示す3案の設計が完成した。

- ・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。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、比較検討を行った。結果、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。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。

この設計をもとに、モータによるピント調整機構、ズーミング機構を加え、実機の製作を行った。（図3）

#### 4. 光学特性試験

光学性能試験では、分解能・色収差・拡大率の確認を行う。評価には、RCSの観測装置と同様な観察光路での試験が望ましい。そこで、RCSの観測装置と同様な模擬光学系光路を新規に制作し、光学性能試験を行った。模擬光路の仕様は以下のとおりである。

- ・L型光路（L部にミラー配置）、  
光路長：約8m、光路径：φ150mm、  
APOレンズを配置し収束する

観察部には、デジタルカメラ（Nikon D5000 1260万画素）を設置し、モニターで像を見ながら、各種測定を行った。



図3：製作した超高分解能観測装置

##### 4.1 分解能試験：

被写体部にグレーチングを設置し、その画像を観察することで、分解能を確認した。すなわち、グレーチングの線が分解できていれば、その線の間隔の分解能を得られるということである。グレーチングは、20本/mmの間隔の荒いものから数種類用意し、最高60本/mm（分解能8.33μm）まで測定を行った。照明は蛍光灯で行い、調光しながら試験を行った。

結果は、図4に示すように8.3μm間隔の線が完全に分解できることを確認できた。

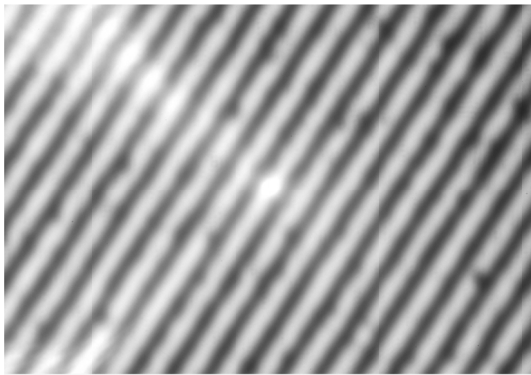


図4：観察したグレーチング（60本/1mm）  
8.3 $\mu$ mの線が完全に分解できていることが確認出来る。

#### 4.2 色収差試験：

色収差は観察像の白色部の変化で確認する。色収差があれば、元の白色部が色収差の起こることで変色する。

図4で示すように黒線の間に見る白色部分は変色していない。色収差は目で見ることかぎり全く見られなかった。

#### 4.3 拡大率試験：

グレーチングの線間隔をモニター上で測定し、C/D上の拡大率に換算することで拡大率を求める。

光学倍率としては、ズームの拡大機能が最小な場合は5倍、最大の場合は7.9倍であることが確認できた。モニター上では、11.6倍から18.5倍まで拡大しても問題ないことを確認した。

### 5. 結論

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る。通常、望遠鏡は無限遠光学系で使用するものあり、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。顕微鏡でしか見られない詳細な像が望遠鏡で得られた画期的な手法である。

製作した観測装置は、光学性能試験により、8.4 $\mu$ mと高分解能、かつ色収差もほとんど見られない非常に高性能な光学機器であることが証明された。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 $\mu$ m以下）に十分達成している。

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。

当研究は、平成21年度-23年度科学研究費補助金（基盤研究C）代表者：武田泰弘の助成により行われています。厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] Development of Hybrid Type Carbon Stripper Foils with High Durability at  $>1800\text{K}$  for RCS of J-PARC  
I.Sugai 他、Proc. Particle Accelerator Conference PAC 2007
- [2] Exchange and observation system for charge stripper foils at the J-PARC 3GeV-RCS  
Y.Takeda 他、Nucl. Instr. and Meth.A590 p.213-220