

高放射線下における超高分解能薄膜観察装置の設計

武田 泰弘^{*1}, 入江 吉郎^{*1}, 菅井 勲^{*1}

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構

1. 概要

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[1]。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 μm 以下で詳細に観察できる観察装置の製作が必要である。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でなければならない。

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 80x80mm 角の範囲を 10m 離れた位置から 125 μm の分解能で観察するものである[2]。ビーム照射を受けて変化する炭素薄膜全体装置として、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、この技術をさらに発展させ、詳細観察が出来るシステムを設計した。その結果、過酷な高放射線環境下でも放射線劣化や画像劣化が少なく、分解能 10 μm 以下の超高分解能観察装置の設計に成功した。

2. 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。

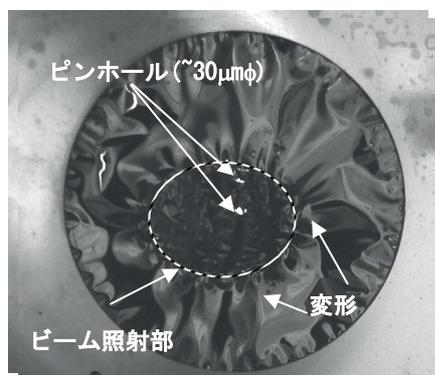


図 1 ビームにより変形、ピンホール形成した炭素薄膜

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。このピンホールの成長過程を緻密に測定するには10 μm 以下の分解能を持つ観察機器を設置する必要がある。

3. 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 μm 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、10m先で200 μm 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。製作した実機では、色収差がほとんどなく、分解能が設計以上の125 μm 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 μm 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 μm 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 μm 以下の極限の分解能が得られることになる。

10 μm 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。これより図2のような、拡大レンズを設計した。分解能は約8 μm 、色収差はほとんどなく、超高分解能を得るシステムの設計に成功した。しかし、図3に示すように透過率が約半分に落ちてしまう欠点があるため、レンズの選択など最適化を行う必要がある。

