

大強度加速器施設におけるビームプロファイル診断技術の開発

Development of beam profile diagnostic for high-intensity accelerator facility

明午 伸一郎¹⁾ 松田 洋樹¹⁾ 中野 敬太¹⁾ 大久保 成彰²⁾ 湯山 貴裕³⁾

Shin-ichiro MEIGO Hiroki MATSUDA Keita NAKANO Takanori YUYAMA

¹⁾原子力機構 J-PARC センター ²⁾原子力機構 原子力基礎工学研究センター

³⁾量研 高崎

(概要)

大強度陽子加速器施設の標的に入射するビーム形状(プロファイル)を観測することは、施設を安全に運転する上で重要となる。プロファイルには、長期間の大強度陽子ビーム運転に耐えうることが要求される。モニタ開発の一環として、アルミナ等の蛍光試料にビームを入射し、蛍光スペクトルとその振舞いを測定した。J-PARC センターの大強度核破碎中性子源のプロファイルモニタに用いられる炭化ケイ素 (SiC) ワイヤにおける、ビーム入射時の二次電子放出の振舞いを測定した。

キーワード : 大強度陽子ビーム、プロファイルモニタ、蛍光、アルミナ、セラミック、SiC

1. 目的

原子力機構では、ビーム電流 20 mA の 1.5 GeV 陽子ビームを用いる大強度陽子加速器(ビーム出力 30 MW)により原子炉で生じたマイナーアクチノイド等の放射性廃棄物の有毒度を低減する核変換システムを提案している。J-PARC センターの核破碎中性子源 (JSNS) では、3 GeV 陽子を用い、短期間の 1 MW の大強度陽子ビームの運転を開始した。施設の安定した運転のために、大強度陽子加速施設では、標的に入射するビームプロファイルの測定が重要となり、長期間の大強度陽子ビームに耐えられるビームプロファイルモニタが重要となる。

モニタ候補として、アルミナ等の発光体を標的に塗布し、ビームに起因する発光によりビームプロファイルを得る方法が考えられる。米国のオークリッジ国立研空所の核破碎中性子源 (SNS) では、標的容器にクロムを含むアルミナを標的容器に塗付し、蛍光によるプロファイルの測定を行っているが、発光体の陽子ビームによる光量劣化が顕著となり明確なプロファイル測定が困難となっている。JSNS では、炭化ケイ素 (SiC) のワイヤから生じる二次電子電流の測定により、プロファイルを取得している[1]。長期間の大強度陽子に対し、二次電子の放出率が懸念されるため、定量的に測定することが必要となる。

耐放射線性に優れたプロファイルモニタに用いる試料の開発のため、陽子に比べ高い LET および原子あたりのはじき出し数 (dpa) を与える重イオンビーム(図 1)を用い、陽子入射を模擬した損傷加速試験を行った。候補となる蛍光型プロファイルモニタの材料に対し、Ar ビームを照射し、その蛍光劣化等を調査した。また JSNS においてビームプロファイルモニタに使用している、SiC ワイヤにビームを照射し、照射中における二次電子放出率の劣化に関して調査した。

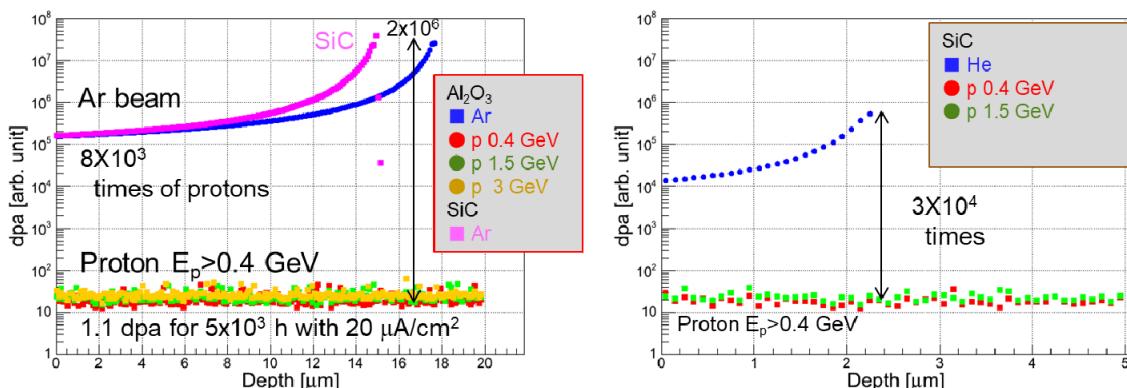


図 1: Ar および SiC における入射ビーム種に対する原子の弾き出し (dpa) の計算値

2. 実施方法

2.1 萤光型プロファイルモニタ試験

蛍光体となる試料に入射し、 107 MeV の $^{40}\text{Ar}^{8+}$ ビームを入射し、蛍光の発光スペクトルとその強度をスペクトロメータ (Flame-NIR: Ocean Photonics) により測定した。この実験の体系を、図 2 に示す。ビーム照射は LB2 ポートで行い、ビーム位置に対する受光感度を均一にするために、八極電磁石を用いた非線形ビーム光学による均一ビームを用いた。ビーム形状や発光状態の確認のため、カメラを用いて撮影を行った。試料には、アルミニウム基板に厚さ 0.1 mm 程度のアルミナを溶射したものを用いた。比較のため、 0.5% のクロムをドープしたアルミナ (AF995R) も用いた。ビーム照射する前の紫外線照射により、試料の発光状態やスペクトロメータの動作状況を確認した。バックグラウンドとなる迷光を防ぐため、真空ポートのビューポートは全て遮光した。

ビーム電流はファラデーカップにより測定した。照射中のビーム電流の変動を確認するため、2.2 項の SiC ワイヤを上流に設置し、照射中のビーム電流を二次電子電流により測定した。

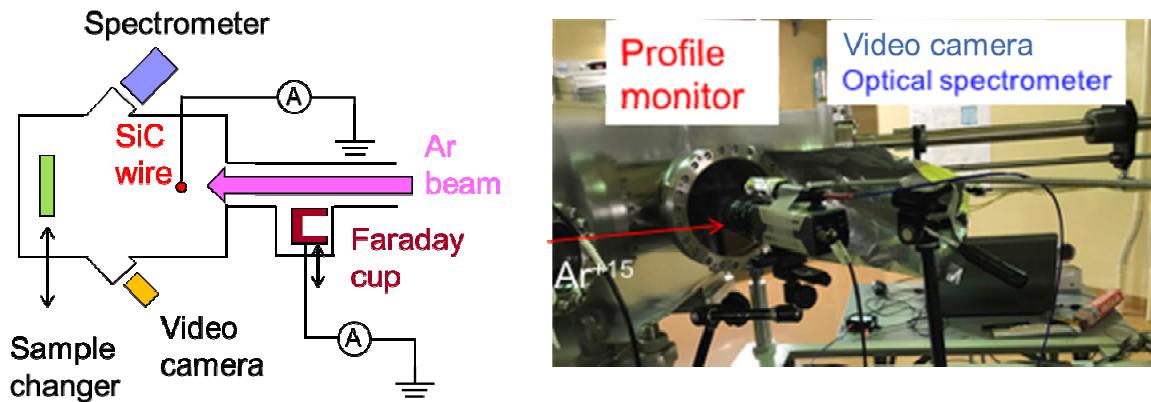


図 2 萤光型プロファイルモニタの実験体系

2.2 SiC ワイヤ試験

実験体系を図 3 に示す。実験は、タンデム加速器の MT2 ポートにおいて行った。ビーム電流が約 30 nA となる $^{4}\text{He}^{+}$ イオン (1 MeV) を SiC ワイヤに入射し、ワイヤから生成する二次電子の電流をピコアンメータで観測し、SiC ワイヤにおける二次電子の生成効率の劣化を測定した。試料となる SiC ワイヤには、JSNS で使用されるものを用いた。照射中のビーム電流の変動を観測するため、定期的にファラデーカップによりビーム電流の測定を行った。ワイヤの温度の測定のため、サーモビューワーを用いて温度を測定した。なお昨年度の測定では、SiC ワイヤがビーム停止部と隣接し設置したため、ビーム停止部の二次電子をワイヤで収集し想定とは異なる負の電流を観測した。今年度では、ワイヤを停止部と 26 mm の距離を設け設置し、ワイヤから正常となる正極の電流を観測できた。

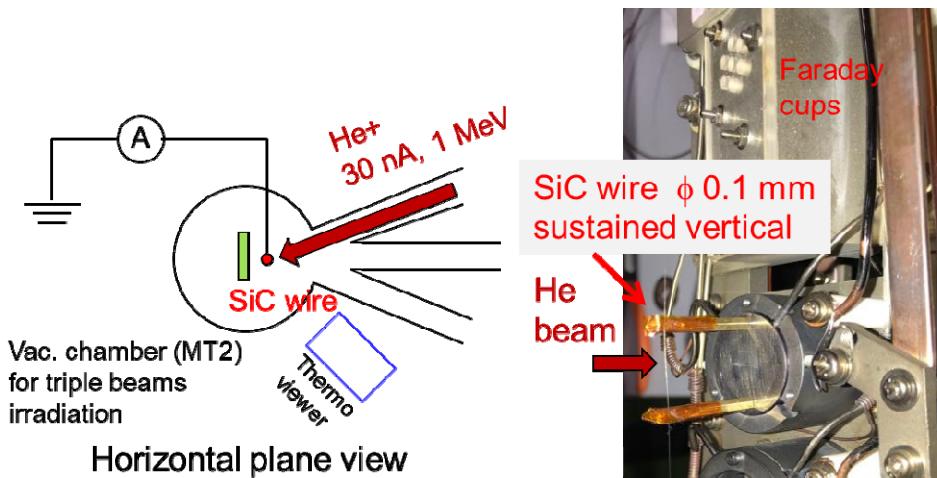


図 3 SiC ワイヤの二次電子の生成効率測定における実験体系

3. 結果及び考察、今後の展開等

3.1 蛍光プロファイルモニタ試験

$^{40}\text{Ar}^{8+}$ ビーム（電流 約 30 nA）の照射中における、発光スペクトルの強度を定期的に測定した。ビームの初期照射時における、カメラで観測した蛍光状態を図 4 に示す。AF995R およびアルミナ溶射の試料において明確な蛍光を確認した。発光スペクトルを図 5 に示す。AF995R には、クロムに起因する 700 nm 付近に明確なピークが観測された。一方、アルミナ溶射の場合には、ピークが観測されず広い波長における白色となるスペクトルを観測した。

照射に伴う蛍光量の減少の振舞いを図 5 に示す。図では、AF995R 試料の 700 nm 付近のピーク強度とアルミナ溶射試料の 500 nm 以下の短波長領域の強度の振舞いを示す。図では指數関数によりフィッティングを赤線として示し、減衰時間を算出した。この結果、両試料とも減衰時間はほぼ等しくなり、どちらかというとアルミナ溶射試料の方が長い減衰時間をもつようになつた。両試料において照射時間は 2~3 時間となり、dpa で換算すると ADS の約 100 時間程度の運転に相当するものとなつた。蛍光量の減衰はあるものの、溶射により容易にプロファイルモニタは成立できるため、一つの候補となるものを取得できた。今後、さらに減衰の少ない材料や製作手法を探索する予定である。

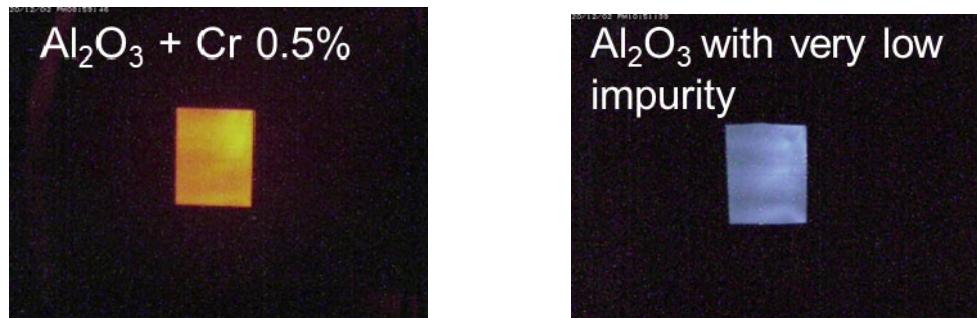


図 4: 蛍光型プロファイルモニタ試料のカメラによる蛍光状態の観測（左 : AF995R, 右 : アルミナ溶射試料）

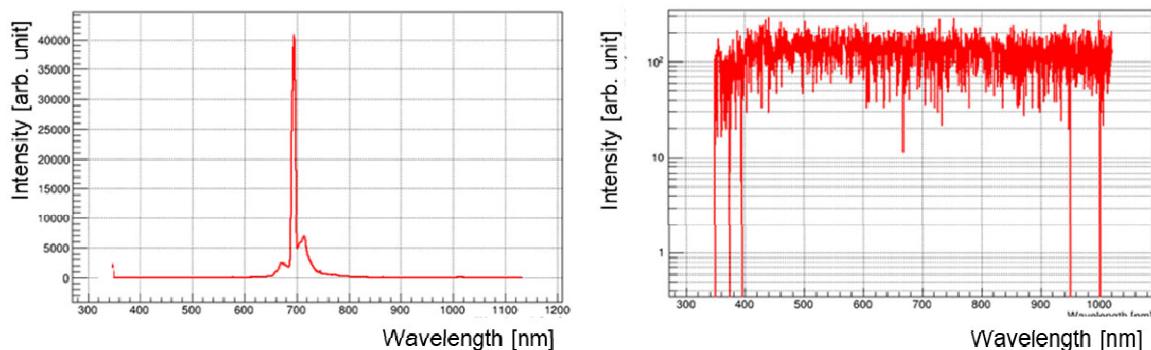


図 5: AF995R (左) とアルミナ溶射試料 (右) のビーム照射初期における蛍光スペクトル。

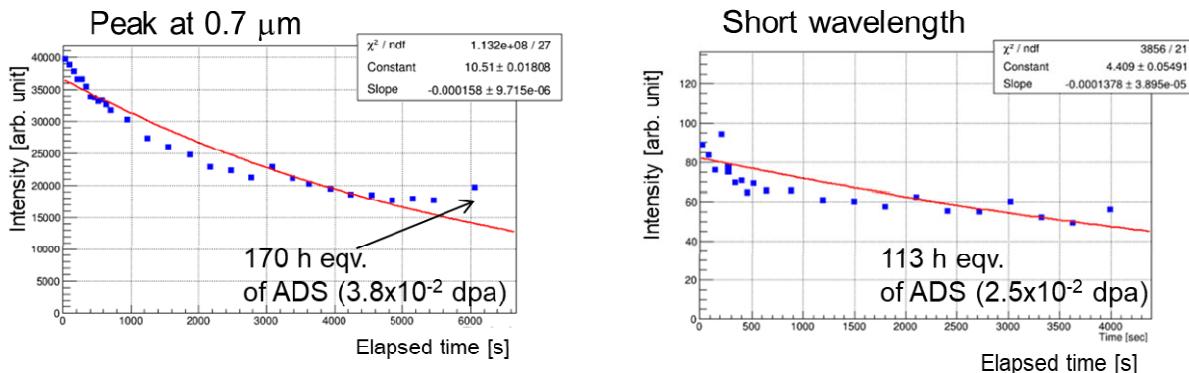


図 6: 照射中の蛍光量の挙動（左 : AF995R, 右 : アルミナ溶射試料）

3.2 SiC ワイヤ試験

He ビーム照射中の SiC ワイヤにおける二次電子の電流の履歴を図 7 に示す。18 時以後の二次電子の電流低下が観測された。図 7 の縦軸の電流は、イオンビームで規格化はしておらず、二次電子電流の低下には、He イオンビーム電流の低下によるものと考えられる。実験の都合のため、18 時以後のビーム電流は観測していなかった。イオンビーム電流の影響を明確にするために、ビーム照射中の二次電子の電流と SiC ワイヤの温度の関係を図 8 に示す。図 8 の赤色の破線に示されるように、二次電子の電流は SiC ワイヤの温度と良好な比例直線性を有するため、18 時以後の二次電子電流の低下は、イオンビーム電流の低下と考えられる。以上より、本測定における He イオンの照射量において、二次電子発生効率の低下は無視できる程小さいと結論づけられる。

SiC におけるビーム電流照射量の dpa 評価より、0.6 dpa 以下において二次電子生成率の低下はない。この dpa は、ADS において 3,000 時間に相当するものとなる。長期間の大強度陽子ビーム運転において SiC の放射線劣化に起因する、プロファイルモニタとして性能を有することとなる。今後、更に SiC ワイヤの二次電子生成率に関して検討を進める予定となる。

なお、この研究において dpa 評価が重要となるため、当グループは J-PARC センターにおいて dpa 評価で重要な弾き出し断面積の実験的な研究[2]を進めた。この結果、信頼における dpa の評価が様々なイオン種に対し適用可能[3]となり、本実験結果の数 GeV 陽子に対する適用性を向上させた。

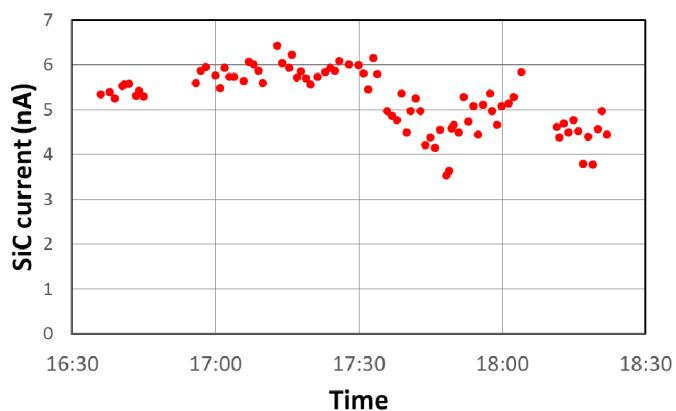


図 7: ビーム照射期間における SiC ワイヤの二次電子電流の挙動

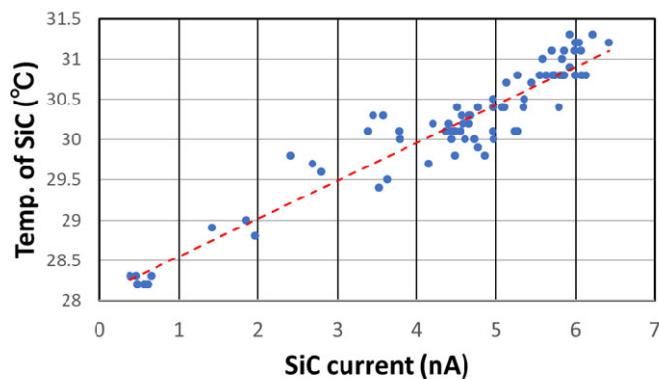


図 8: SiC ワイヤの二次電子電流とワイヤ温度の関係

4. 引用(参照)文献等

- [1] S. Meigo, et al., “Profile Monitor on Target for Spallation Neutron Source”, Proc. 6th Int. Beam Instr. Conf., IBIC 2017, Grand Rapid USA, pp. 373–375 , (2017).
- [2] H. Matsuda, S. Meigo, Y. Iwamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol. 57 1141 - 1151 (2020).
- [3] Y. Iwamoto, S. Meigo, S. Hashimoto, J. Nucl. Mater. 538 152261 (2020).