

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 technique at high intensity accelerator facility

明午 伸一郎¹⁾ 松田 洋樹¹⁾ 武井 早憲¹⁾ 百合 庸介²⁾ 湯山 貴裕²⁾
Shin-ichiro MEIGO Hiroki MATSUDA Hayanori TAKEI Yousuke YURI Takanori YUYAMA

¹⁾原子力機構 J-PARC センター ²⁾量研 高崎

(概要)

大強度陽子加速器施設では、標的に入射するビームの幅をプロファイルモニタにより常時観測することは、施設を安定に運転する上で重要となる。このモニタの開発の一環として、サイクロトロンにおいて加速したされた 107 MeV の $^{40}\text{Ar}^{8+}$ ビームをアルミナ等の試料に入射し、試料からの発光スペクトルとその強度をスペクトロメータで測定した。また、J-PARC センターの大強度核破砕中性子源のモニタに用いられる炭化ケイ素 (SiC) 製のワイヤのビーム入射に伴う劣化も測定した。

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、30 MW の大強度陽子加速器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。また、J-PARC センターの核破砕中性子源(JSNS)では 0.5 MW の大強度陽子ビームの運転を開始しており、これらの大強度陽子ビームを用いる施設では、ビームが標的に入射する状態の確認のため、大強度陽子ビームに耐える陽子ビームの診断技術が重要となる。JSNS では炭化ケイ素(SiC)のワイヤを用いビーム診断を行っており、これまでの運転においては問題が無いものの、今後の更なる大強度ビーム運転(1 MW)では SiC の陽子に対する耐性が不明なため、新規のビーム診断技術の開発が必要となる。この候補として、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砕中性子源(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、この発光により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。本研究では、候補となる材料に対し LET の高い Ar ビームの照射を行い、光量の劣化を測定することにより、耐放射線性に優れた試料の開発を行う。更に、JSNS において使用される SiC ワイヤの劣化についても評価する。

2. 実施方法

サイクロトロンの LB2 ポートにおいて、107 MeV の $^{40}\text{Ar}^{8+}$ ビームを試料に入射し、試料から生成する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。実験のセットアップを図 1 に示す。試料にはレーザー光に対し高い耐久性を有するセラミック(フォスセラ:NTKセラテック)、及び物質・材料研究機構で開発された Si-Al-O-N を主成分とする耐久性に優れた蛍光体(サイアロン:サイアロン社)を、それぞれ 20 μm , 40 μm の厚さでアルミニウム基板(A5052)に成膜したものをを用いた。更に、アルミナ塗料(アルミニウムコート:オーデック)をアルミニウム基板に

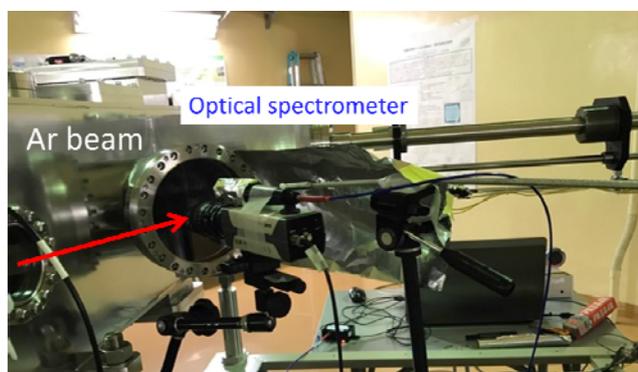


図 1: 実験体系図

塗布した試料、及び基盤に厚さ 0.1 mm のアルミナを溶射した試料を用いた。ビームを照射する前に、紫外線により試料の発行を確認した。Ar ビームの照射実験は、LB2 ポートで行い、ビーム位置に依存する発光感度を一樣にするために、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。

J-PARC の大強度核破砕中性子源のプロファイルモニタに用いられる SiC ワイヤ (直径 0.1 mm) の耐ビーム特性を評価するために、SiC ワイヤを照射試料の上流に配置し、ワイヤから放出される電子による電流をピコアンメータにより測定した。ワイヤの絶縁するために、カプトンテープにより真空チェンバの内部に固定した。定期的にファラデーカップをビーム位置に挿入しビーム電流を読み出し、SiC ワイヤの弾き出し電子の電流と比較することにより、SiC の電子放出効率の測定により SiC の劣化を評価した。

3. 結果及び考察、今後の展開等

実験では、107 MeV の $^{40}\text{Ar}^{8+}$ ビーム (電流 約 60 nA) を試料に照射し、発光スペクトルを定期的に測定した。ビーム入射による、フォスセラから発せられた光のスペクトルの測定結果を図 2 に示す。フォスセラへの照射は 100 分間行い、図 2 に 5 分~100 分間におけるスペクトルを示す。フォスセラの発光量は、本実験で使用した試料で最大となったものの、ビーム照射により発光量は著しく減衰し 100 分間の照射により約 25% に低下することが観測された。

サイアロンの発光スペクトルの測定結果を図 3 に示す。サイアロンのビームに伴う光の減衰は比較的少なく、2 時間の照射により 75% に留まった。これは昨年行ったクロム含有のアルミナ(AF995R)の結果[1] とほぼ同じ値となった。ただし、2 時間の Ar ビームが付与する発光体における損傷は、JSNS において数 10 時間にしか相当せず、JSNS は年間 5000 時間の運転が計画されているため、光量の減衰がさらに少ない材料が必要となる。

アルミナ塗料 (アルミナコート) の結果を図 4 に示す。アルミナコートの発光スペクトルには、700 nm に明確なピークが観測され、このピークは不純物として含まれるクロムによるものと考えられる。1 時間のビーム照射により 700 nm におけるピーク強度は 30% に低下することが観察されものの、図 4(b) に示す短波長領域では、ビーム入射に伴い発光が殆ど減衰しないことがわかった。昨年度実験を行った AF995R の結果においても、短波長の減衰は小さく同様な傾向が示された[1]。本結果から、短波長のみ選択する光学フィルタを設け、発光状態のイメージの観測により、ビームに伴う劣化が少ないプロファイルモニタが成立することが期待される。しかしながら、塗料を用いる場合には劣化による剥離が懸念される。アルミナ中には ^7Be 等の放射性物質が核破砕反応により生成するため[2]、剥離性のある塗料は放射線管理上望ましくない。今後の課題として、塗料の剥離性に関する検討を行う予定とする。なお、図 4 中に示した 6 分間のデータは他のデータよりサンプリング時間が短くしたため、スペクトル強度の統計的ばらつきが大きくなっている。

密着性のよい溶射成膜の場合には、塗料のような剥離の問題が少ないと考えられる。このため、溶射により成膜したアルミナの実験を行った。この結果を図 5 に示す。発光強度はアルミナコートの約半分となり、相対的にノイズが多くなった。このため、スペクトル形状はアルミナコートの測定結果より歪んだ結果となった。ノイズのため明確にわかりにくいものの、溶射成膜のアルミナの場合においても短波長領域の光量の減衰が観測されなかった。ノイズ低減のために、イメージインテンシファイヤ等を用い強度を増倍することにより、改善し明確なプロファイルを得ることが期待される。

SiC ワイヤの弾き出し電子の電流の測定結果を、時系列データとして図 6 に示す。上述の試料やワイヤに入射するビーム電流は、ファラデーカップをビーム位置に装荷し測定した。ビーム位置に装荷した場合、ファラデーカップによりビームが遮断されるため、SiC ワイヤの弾き出し電子の電流と厳密には同時に測定できないものの、ファラデーカップによるビーム測定時間にビーム電流の変動は無視できるほど小さいものとして評価した。ファラデーカップによるビーム電流と比較のため、図 6 には SiC ワイヤの電流を 92 倍に規格化し表示した。図のように、SiC ワイヤによるビーム電流の計測値は、約 10 時間の長期間において、ファラデーカップによる結果とよい一致を示した。これは、本実験に用いたビーム照射量において、SiC ワイヤの劣化が殆ど無い事を示している。Ar ビームが SiC に与えた放射線損傷は、JSNS に用いられる 3 GeV 陽子に換算し、ビーム出力積算出力において数 100 MWh に相当し、本実験においてこの積算出力においては問題が無い事が示された。また、SiC ワイヤによりファラデーカップによるビームを中絶せずにビーム電流の計測ができることが示された。

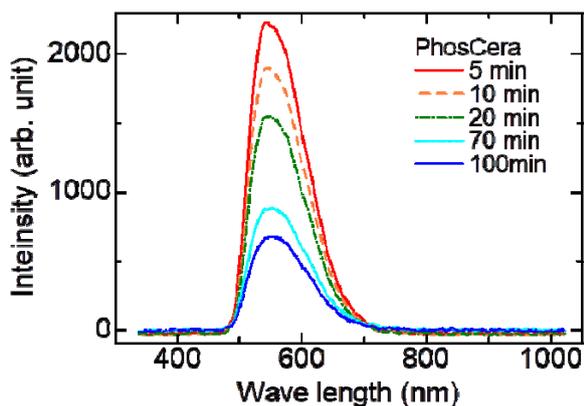


図2: フォスセラの各照射時間における発光スペクトル

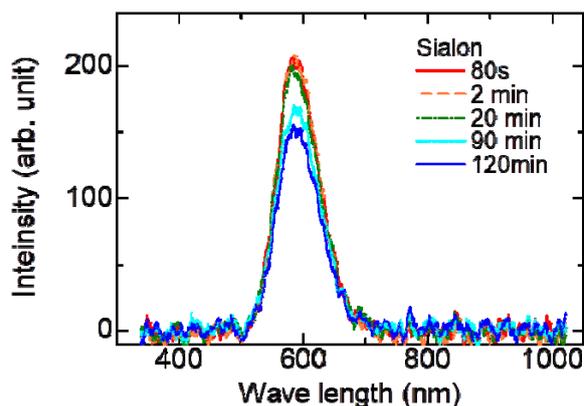
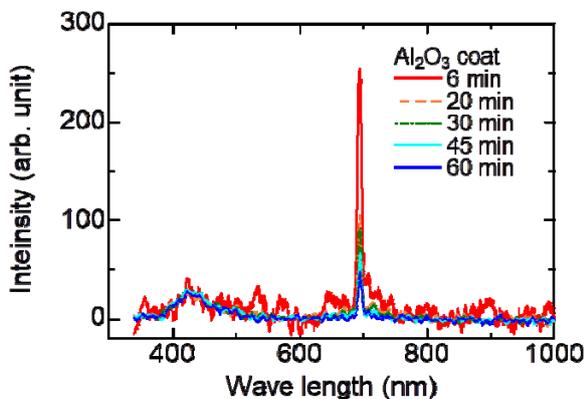
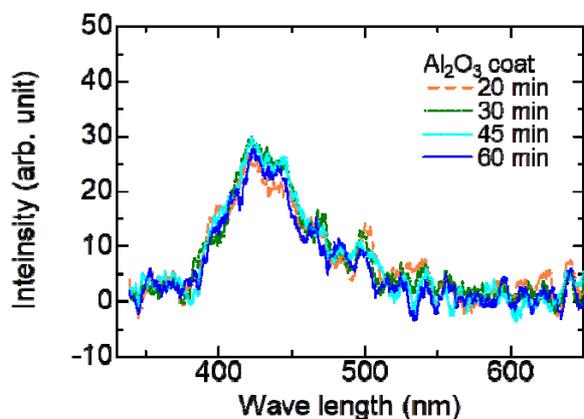


図3: サイアロンの各照射時間における発光スペクトル



(a)



(b)

図4: アルミナコートの各照射時間における発光スペクトル (a) 全波長領域、及び(b) 650 nm 以下の波長領域のスペクトル

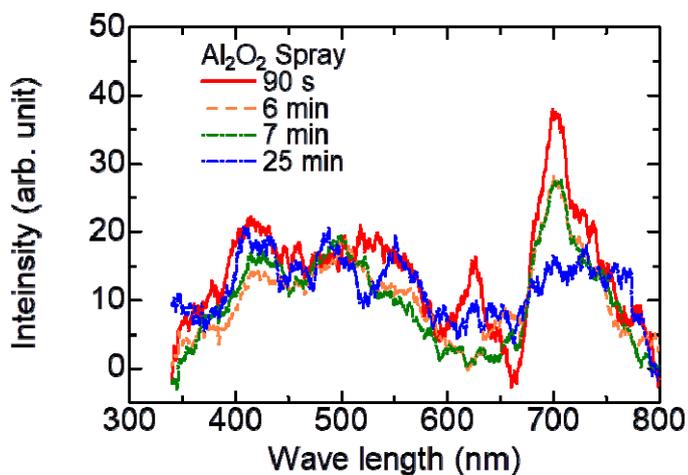


図5: アルミナを溶射により成膜した試料の各照射時間における発光スペクトル

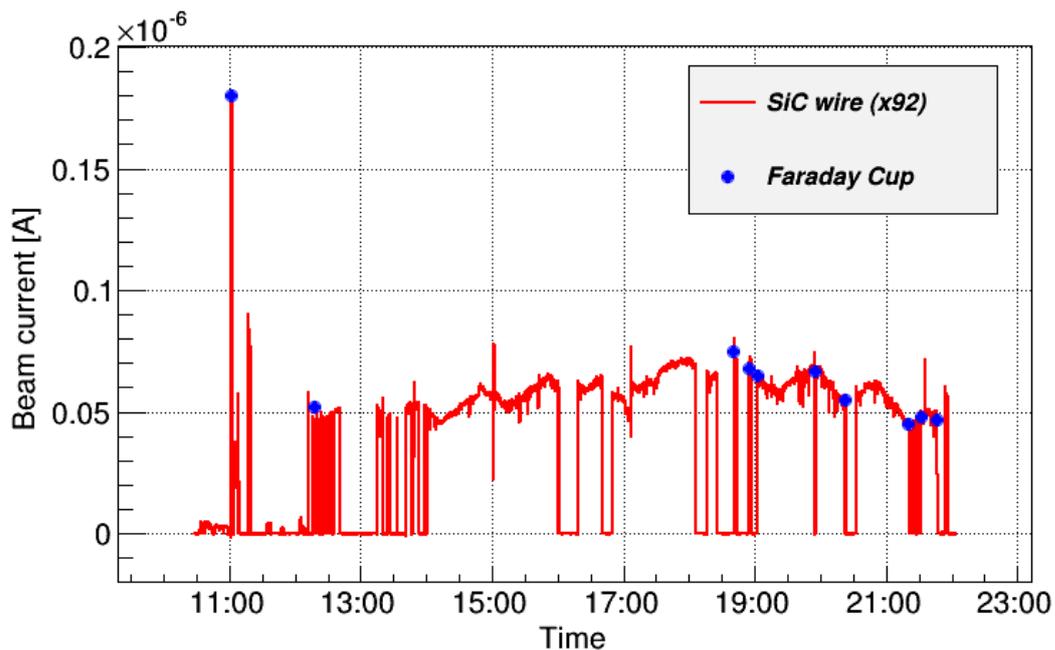


図 6: 炭化ケイ素(SiC)ワイヤにおける放出電子電流とファラデーカップによるビーム電流の比較。SiC ワイヤの電流は比較のため 92 倍にしファラデーカップによるビーム電流に規格化している。

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, et al., "Proton-induced activation cross section measurement for aluminum with proton energy range from 0.4 to 3 GeV at J-PARC", J. Nucl. Sci. and Tech., DOI: 10.1080/00223131.2018.1461694, (2018).