

大強度陽子加速器のための標的上のプロファイルモニタの開発 DEVELOPMENT OF PROFILE MONITORS ON TARGET FOR HIGH-INTENSITY PROTON ACCELERATORS

明午 伸一郎^{*A)}、武井 早憲^{A)}、松田 洋樹^{A)}、百合 庸介^{B)}、湯山 貴裕^{B)}、
Shin-ichiro Meigo^{*A)}、Hayanori Takei^{A)}、Hiroki Matsuda^{A)}、Yosuke Yuri^{B)}、Takahiro Yuyama^{B)}

^{A)}J-PARC Center Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)}Takasaki Advanced Radiation Research Institute (QST)

Abstract

Accelerator-driven transmutation system (ADS) using a high-intensity proton accelerator such as beam power with 30 MW has been proposed in many countries. Although multi-wire profile monitors consisting of silicon carbide (SiC) multi-wires steadily observes so far, the damage to the wire becomes remarkable in the future high-power beam operation, so that it is important to quantitatively evaluate the damage of the wire. For the development of beam profile monitor, a beam test was conducted using the Ar beam to accelerate damage on the monitor. It was found that the SiC wire remained good status for the damage equivalent damage of proton for a half a year beam operation with 1 MW proton. In order to obtain a two-dimensional beam distribution, a fluorescent beam profile monitor was developed and examined with the Ar beam. Although the fluorescent light decreases remarkably with beam incidence in the long wavelength, the degradation can be improved by selecting the short wavelength with decreasing the doped Cr ions.

1. 諸語

日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、原子炉で生じるマイナーアクチノイドの廃棄物の有害度低減のために、運動エネルギー 1.5 GeV となる 30 MW の大強度陽子加速器を用いた核変換システム (Accelerator Driven System: ADS) [1] を開発しており、ベルギーや中国でも同様な施設が開発されている。ADS では鉛ビスマス共晶体 (LBE) を有力な候補の一つとしており、加速器の真空領域と LBE の境界となるビーム窓の損傷が重大な研究課題の 1 つとなる。J-PARC では、ビーム窓材などの損傷評価や ADS のための基礎研究のために核変換実験施設 (Transmutation Experimental Facility: TEF) [2] の建設が計画されている。LINAC の 400 MeV の負水素イオンビームの繰り返しを 25 Hz から 50 Hz にアップグレードし、25 Hz のビームを TEF 施設等に入射し ADS の材料開発に向けた実験を行う計画としている。ADS に用いられる材料の損傷評価のためには、年間に 20 DPA 程度の高いビーム照射が必要となり、 $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [3,4] と高い電流密度を持つビームを標的に入射する予定としている。

上記施設において、安定したビーム運転を行うためには、標的直前に設置したビームモニタが重要となる。J-PARC センター [5] の物質生命科学実験施設 (MLF) 内に設置した核破砕中性子源 [6] 及びミュオン源 [7] では、MLF では 500 kW 以上の大強度ビーム運転を開始しさらに 1 MW の安定したビーム運転試験を開始した。MLF では 2. 章に記載したように SiC ワイヤを複数用いたマルチワイヤ型プロファ

イルモニタを用いており、2018 年 7 月に実施した 1 MW ビーム試験においてピーク電流密度を $6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ とし、1 時間程度問題なく運転できることを確認した。MLF では、今後さらに 600 kW 以上の大強度ビーム運転の長期運転を予定しており、この運転のためにはビームモニタの長期間使用における損傷評価が重要となる。

また、J-PARC センターでは物質・生命科学のさらなる探求のために、中性子及びミュオンを供給する第 2 ターゲットステーション (TS2) の建設が計画されている。TS2 では MLF に比べ中性子等の生成輝度を 10 倍程度向上させることを狙い、ビーム径は MLF より小さくし電流密度を MLF の数倍とする計画となる。

J-PARC の将来施設や ADS において、MLF より大電流密度の使用が予定され、ビームモニタに用いられる SiC ワイヤの損傷評価が重要となる。また、SiC ワイヤを用いる場合には、ワイヤにおける投影プロファイルの情報を得ることができないため蛍光体を用いたプロファイルモニタの開発が望まれる。しかしながら、蛍光型モニタはビームによる蛍光量の著しい劣化が報じられているため、劣化の少ない材料開発が重要となる。本研究では 3 GeV 陽子の約 10^6 倍の損傷率を与えるアルゴンビームを用いて、プロファイルモニタの特性試験を行った。

2. MLF における標的近傍のビームモニタ

2.1 陽子ビーム窓に設置したビームモニタ

J-PARC の MLF のビーム運転において、中性子源の標的に入射する陽子ビームの状態を継続的に観察することは重要となる。このため、標的直前には常

* meigo.shinichiro@jaea.go.jp

時ビームを測定するビームモニタの設置が必要となる。標的に生成した中性子等によりモニタは高度に放射化するため、モニタは定期的に遠隔操作による交換が必要となる。また、核破砕中性子ターゲットで発生した中性子の遮蔽のため、モニタには遮蔽が必要となる。交換作業の煩雑さや遮蔽の減少を目指し、MLFではビームモニタは加速器の真空領域と中性子ターゲット周囲のヘリウム領域（ヘリウムベッセル）との間の物理的分離として機能する陽子ビーム窓（Proton Beam Window: PBW）[8]に設置した。陽子ビーム窓には、ピローシールと呼ばれる膨張可能な真空シールを有し、これにより遠隔操作により窓とモニタを一体で交換することが可能となる。陽子ビーム窓は標的中心から1.8 mとなる近傍に設置し、標的に入射するビーム状態を観測することが可能となる。なお、MLFと類似した陽子ビーム窓構造はTEFにおいても使用する予定である。

陽子ビーム窓の真空側には炭化ケイ素（SiC）のワイヤを用いたマルチワイヤプロファイルモニタ（Multi Wire Profile Monitor MWPM）[9,10]を設置した。MWPMの各ワイヤの感度を較正のため、狭い幅のビーム走査により校正を行った。この結果、個々のワイヤの感度のばらつきは最大でも6%以下であった。標的におけるピーク電流密度はMWPMの測定結果から導出し、MLFでは一定以上のピーク電流密度を持つ場合には、Machine Protection System（MPS）によりビームが自動的に停止する。

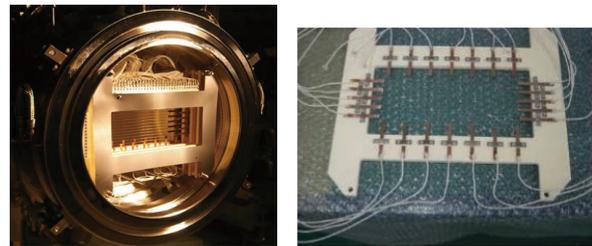
標的周辺部のビーム測定のため、ビームハロモニタも陽子ビーム窓に配置されている。ビームハロモニタの拡大をFig. 1に示す。ビーム運転において標的のピーク電流密度の低減が重要な一方で、標的周辺部の電流密度も低く抑える必要があるため、ビームハロモニタの測定は重要となる。標的周辺部には、冷却水により強制的に冷却を行わない遮蔽体などもあるために、許容できる発熱密度は 1 W/cm^3 以下となり、これを超えないビーム運転が必要となる。ビームハロの絶対強度を観測するために、陽子ビーム窓のビーム入射周辺部に配置した銅ストリップに熱電対を接合した熱電対型ハロモニタを設置した。25 Hzの5分程度のビーム運転に伴う温度上昇から周辺部の発熱密度が測定できるようにしており、標的周辺部のビーム強度の定量測定を可能としている。

ただし、熱電対で発熱密度を測定するためには、大強度ビームの約数分間の運転が必要となるため、ビーム調整時の即座な判断ができない。この判断を容易にするため、銅ストリップから生じる二次電子を測定する二次電子型ハロモニタも設置している。二次電子型ハロモニタから生じる電流は、既に熱電対型ハロモニタの測定結果により規格化されており、わずか数発のビームにより発熱密度の導出でき、これによってわずか数発のビームにより運転継続が可能か判断ができるようになっている。

上記ビームモニタシステムによりMLFの大強度ビーム運転が可能となり、これらのシステムはTEFや実機のADSにおいても使用されるものと考えられる。

大強度ビーム運転においてビームハロモニタは重

要な役割を担う。ハロモニタの熱電対により測定された温度に何らかの異常がある場合には、MPSによりビームが自動的に停止する。2018年5月27日にビーム輸送系に用いられる四極磁石において層間短絡が発生し、磁極1個の約30%の磁場が失われた。磁場喪失に伴う中心磁場変位のため、標的上のビームが水平および垂直方向ともに約20 mm変位した。これにより標的周辺の発熱が一時的に増大したものの、ビームハロモニタにより直ぐに異常を検知し問題なくビームを停止した。



(a) Beam monitors placed at the PBW

(b) Halo monitor

Figure 1: Multi-Wire Profile Monitor (MWPM) and beam halo monitors placed at the Proton Beam Window (PBW). (a) Whole view of the MWPM and halo monitors. (b) Close up of the thermocouple type of beam halo monitors.

陽子ビーム窓に配置したMWPMは固定式であり常時ビームを受けるため、ワイヤには長寿命が要求される。1号機の陽子ビーム窓のプロファイルモニタは、冗長性を持たせるために、SiC(直径0.1mm)とタングステンワイヤを用いた2種類のワイヤによるモニタを用いた。陽子ビーム窓1号機の使用中に、タングステンワイヤから信号を発しない事象があったため、2号機以降はSiCワイヤのみの使用となった。陽子ビーム窓は、2013年秋に2号機に交換し、2017年夏に3号機に交換した。2号機のビーム窓やモニタは2 GWhの積分ビーム強度が照射され、外観検査において後述のワイヤの緩みを除き問題ないことが確認された。

2.2 SiC ワイヤ

高感度線の材料としては、通常、電子の放出量が大きく、高温融点を有するため、タングステン線が選択される。本システムでは、炭化ケイ素（SiC）が放射線の高抵抗のために選択され、SiCは約80 DPA [11]までの損傷に耐えうると考えられる。なお、SiCワイヤの弾き出し損傷の実験データ取得のため、弾き出し損傷断面積の実験を開始した。

大強度加速器施設においてモニタに用いられるワイヤと陽子との相互作用によるビーム損失が重要な問題となるため、ワイヤ材にはビーム損失が少ないものが望まれる。特にクーロン散乱が支配的となり、この角度微分断面積はワイヤの原子番号の2乗に比例するため、プロファイル計測に一般的に用いられるタングステンの原子番号は74となるのに対し、SiCの平均原子番号は約10と低くSiCの散乱断面積はタングステンの約2%となる。したがって、原子

番号の低い SiC は、ビーム損失およびビーム散乱の影響に対して有利となる。

陽子ビーム窓 2 号機に設置したモニタは、2 GWh の積算出力を受けたものの応答出力には異常はなく、照射後の目視検査では深刻な損傷は見られなかった。使用後のワイヤにおいて僅な伸び観察されたものの、ビーム入射及び停止の繰り返しに伴うワイヤの周期的な熱膨張によって引き起こされたものと思われ、次期のモニタにはワイヤの保持部に熱膨張を吸収するスプリングにより緩和される。

3. プロファイルモニタの開発

MLF において、SiC を用いたプロファイルモニタのワイヤは最大で 2 GWh までの照射量において問題ないことが確認されたが、今後長時間継続する 1 MW の大強度ビーム運転において損傷劣化が生じる可能性がある。陽子ビーム自身の寿命は、積算陽子線束 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ まで健全性が保たれることが予想され [8]、これは積分強度に 10 GWh に相当し約 2 年間の時間に相当する。SiC の MWPM では詳細な二次元分布を得ることができず照射後にイメージングプレートにより二次元プロファイルの測定を行ってものの、ビーム調整中にオンライン型となる二次元プロファイルタイプの測定が望まれる。このため、蛍光体の発光に基づく新しいビームプロファイルモニタの開発に着手した。

3.1 アルゴンビーム試験

米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) の核破砕中性子源 (SNS) では、ターゲット上の二次元プロファイルを得るために、水銀ターゲットの容器に塗装された蛍光体モニタを用いている。しかしながら、ビーム照射に伴う劣化により著しい発光の劣化が観測されており、発光減衰の少ない材料の開発が必要となる。

そこで我々は、量子科学技術研究開発機構 (QST) 高崎量子応用研究所のイオン照射施設 (TIARA) のサイクロトロン施設において、さまざまな蛍光体にビームを入射する試験を行った。入射粒子には、全運動エネルギー 150 MeV となる $^{40}\text{Ar}^{15+}$ ビームを用いて試験を行った、これにより単位粒子束あたりで 0.4 及び 3 GeV 陽子に対し、約 10^6 倍の損傷を試料に与え、モニタ材料のビームに起因する損傷の加速試験を行った。

試料には、厚さ 5 mm、DRZ-High ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$)、AF995R (Al_2O_3 99.5% CrO_3 0.5% Demarquest)、及びアルミナをアルミ板に溶射した試料を用いた。試料から発せられる蛍光を、Fig. 2 に示すように 2 MGy の高い耐放射線性を持つイメージングファイバ (Fujikura FISR-20) に取り付け CCD カメラで測定した。実験に用いたファイバの画素数は 2 万となり、長さは TEF で使用する状態を考慮し 5 m の長尺のものを用いた。試料の蛍光の劣化を測定するため、蛍光スペクトルを分光計 (Flame-NIR : Ocean Photonics) で観測し、試料から放出された光子のスペクトルを測定した。劣化の位置依存性を無くすために、八重極場

による非線形収束光学 [12] を入射ビームに適用し、試料におけるビーム強度分布を均一にした。

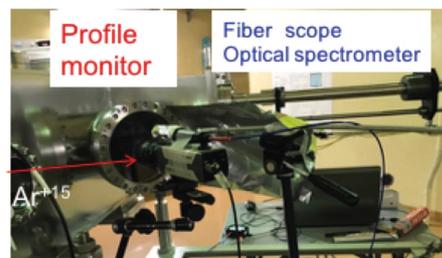


Figure 2: Experimental setup of beam profile imaging system for Ar beam irradiation.

3.2 ファイバースコープを用いた蛍光体によるビームプロファイルモニタ測定

AF995R と DRZ-High に $^{40}\text{Ar}^{15+}$ ビームを入射し、この蛍光をファイバースコープにより測定した。この結果を Fig. 3 に示す。このようにビーム形状が明確に測定することができ、ファイバを用いた本システムにより、ビームプロファイルの鮮明な画像が得られることが確認できた。

DRZ-High のプロファイル測定イメージは、短波長での光子放出率が高く画像が鮮明で高輝度となるものの、ビーム入射にともなう光収量の低下は AF995R よりも速いことが判明した。AF995R から発せられた赤色光は DRZ-High よりも低い強度となったが、これは実験に用いたカメラが一般的な CCD カメラで長波長領域の赤色光に対して感度が低いためである。今後は波長依存性の感度低下が少ない 3CCD カメラを用い改善する予定とする。

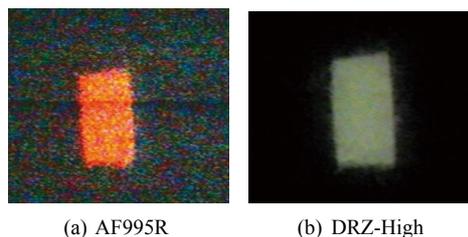


Figure 3: Beam profile obtained with fiber imaging system for (a) AF995R and (b) DRZ-High. Beam shape was uniformed by nonlinear focus.

3.3 長時間ビーム入射に伴う蛍光スペクトル及び強度の測定

DRZ-High より劣化の少ない AF995R に対し、ビーム劣化を分光器により測定した。入射ビームには $^{40}\text{Ar}^{15+}$ を用い 75 nA の電流を 2.3 時間入射した。

AF995R にビームを入射した際の発光スペクトルとその強度を Fig. 4 の実線に示す。スペクトルは 694 nm に顕著なピークを有し、これは Cr^{3+} の励起状態によって生じ、上記ピーク付近において様々なスペクトルも生じているのが観測された。Ar ビームを

2.3 時間照射した蛍光スペクトルも Fig. 4 に示す。この結果、694 nm は著しく劣化するものの、650 ~ 670 nm の短波長領域では相対的に劣化が進行しないことが観測された。照射時間における 694 nm のピーク強度の振る舞いを Fig. 5 に示す。2.3 時間照射後にピーク強度は 35% 低下することが観測された。ビーム入射後の 0.2 時間において、特に強度が著しく減少するのが観測された。ビーム入射の 0.2 時間以後において、蛍光強度は単調に減少するのが観測され、Fig. 5 の実線で示すような一次関数の振舞いが観察できた。

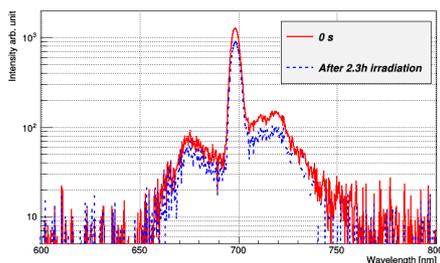


Figure 4: Luminescence spectra after irradiation of the Ar beam for 0 h and 2.3 h, respectively.

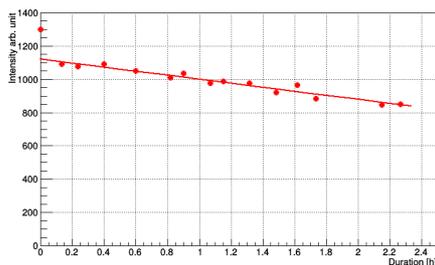


Figure 5: Peak intensity trend of AF995R for long time irradiation of the Ar beam with 75 nA. Line shows result by linear fitting after 0.2 h.

3.4 蛍光の劣化を抑えたプロファイルモニタの開発

複数の候補物質を用いて発光劣化を観察を行った。最初に、レーザーに対し高い耐久性を持つフォスセラ [13] やサイアロン [14] に対し実験を行ったが、Fig. 6 のように著しい蛍光の劣化が確認された。これらの劣化の原因は若干の有機材を含むと考えられたため、無機セラミックとなるアルミナに関し詳細な調査を行った。

不純物として存在する少量の Cr を含む AlO_2 塗料について検討した。この蛍光スペクトルの測定結果を、Fig. 7 に示す。 AlO_2 塗料における Cr イオンに起因する 694 nm 付近のピーク強度は、Fig. 5 と同様にビーム量とともに急激に減少するのが観測された。 AlO_2 塗料の場合には、AF995R に存在しない約 450 nm の短波長領域の蛍光を発生しており、この光量は積算ビーム入射量によらずほぼ一定となった。本結果により、短波長のみをフィルタにより観測すること

によりビーム入射による劣化を防止したプロファイル測定の可能性を示すことができた。

また、 AlO_2 をアルミ基板に溶射した結果を、Fig. 8 に示す。この場合も、 AlO_2 塗料と同様な結果となり、短波長のみを観測することによりビームによる劣化が防げることを示した。なお、この短波長領域の蛍光は試料に含まれる微量の不純物により生じている可能性があるため、今後詳細に不純物に関し調査する予定である。

短波長の光強度は Cr イオンによるピークよりも小さく、さらに陽子による蛍光強度はアルゴンよりも小さくなるため、今後 3NBT において数 GeV 陽子に対する蛍光強度を測定する予定とする。

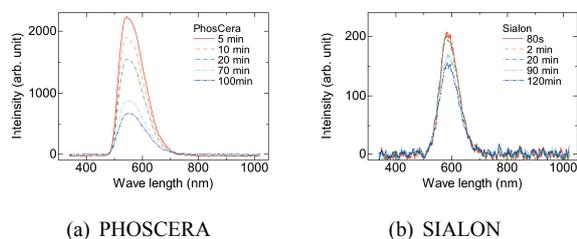
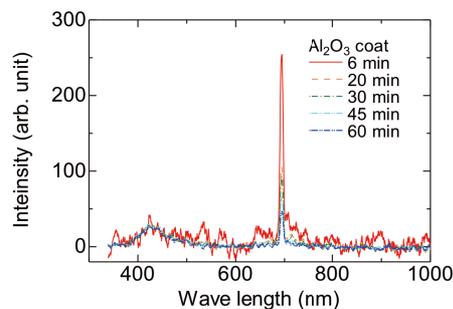
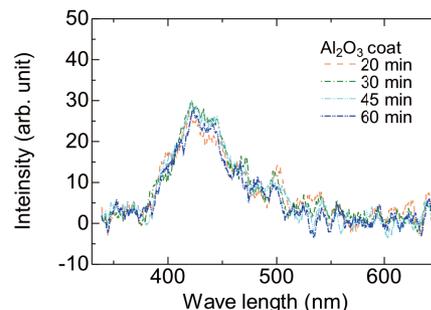


Figure 6: Spectral intensity of PHOSCERA and SIALON for various irradiation time of the Ar beam.



(a) Total wavelength



(b) Close up in short wavelength for (a)

Figure 7: Spectral intensity of AlO_2 paint for (a) total wavelength and (b) short wavelength for various irradiation time of the Ar beam.

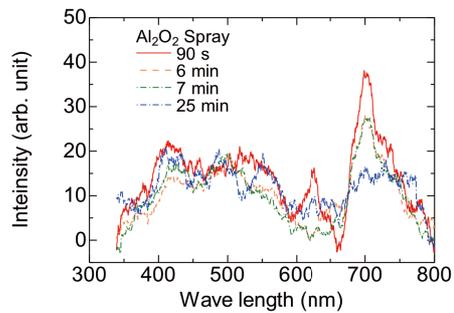


Figure 8: Spectral intensity of Al_2O_2 spray for various irradiation time of the Ar beam.

3.5 SiC ワイヤの長時間アルゴンビーム入射試験

MLF の MWPM として用いられる SiC ワイヤに対し、アルゴンビームを照射しワイヤから生ずる信号の劣化を測定した。SiC ワイヤは、プロファイル測定に用いた試料の上流に設置し、ワイヤから生ずる信号をピコアンメータで直接測定した。

SiC ワイヤの弾き出し電子による電流の測定結果を、時系列データとして Fig. 9 に示す。上述の蛍光試料の照射試験において、ワイヤに入射するビーム電流を測定した。ビーム電流を正しく計測するために、ファラデーカップをビーム位置に移動しビーム電流を測定した。ファラデーカップによるビーム電流測定中には、ビームがファラデーカップにより遮断される。このため、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が、ファラデーカップが挿入される時間は数秒程度の短時間となり、この間のビーム電流変動は無視できるほど小さいと考えられる。ファラデーカップによるビーム電流と比較のため、図中の SiC ワイヤの電流は、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、照射による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、MLF に用いられる 3 GeV 陽子に対し数 100 MWh のビーム積算出力に相当し、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 ワイヤによるビーム電流読み出しにより、ファラデーカップ挿入に伴うビーム中断なしに、継続的なビーム電流の計測ができることが示された。

4. 結語

ADS や J-PARC で計画される施設における安定したビーム運転のため、標的付近に設置するビームプロファイルモニタの開発を TIARA の Ar ビームを用いて行った。優れた耐放射線性を有するファイバイメージングスコープにより良好なビームプロファイル測定が可能であった。 Al_2O_3 に Cr をドーピングした蛍光体 (AF995R) は、694 nm に Cr の明確なピークを持

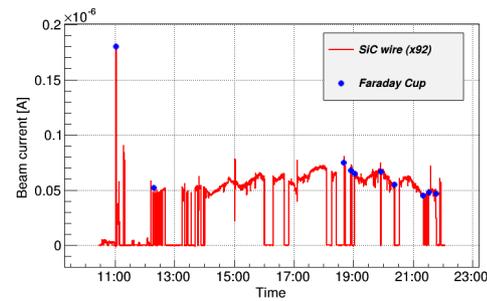


Figure 9: Trend of current on SiC wire during Ar beam test.

つものの、ビーム入射に伴い著し劣化し 2.3 時間の照射で 35% 低下した。塗料や溶射による Al_2O_3 を用いて試験も行い、500 nm 以下の波長領域で高い耐久性を示した。

J-PARC の MLF のビームプロファイルモニタに用いられる SiC ワイヤに長時間の Ar ビームを照射したところ、3 GeV 陽子の数 100 MWh に相当する運転時間では劣化は確認されなかった。長時間の Ar ビーム試験において SiC ワイヤによりファラデーカップによるビーム電流計測の中断なしにビーム電流の計測可能となった。

謝辞

本研究は、核変換技術研究開発補助事業によって得られた成果を含む。

参考文献

- [1] T. Mukaiyama *et al.*, “Review of Research and Development of Accelerator-Driven System in Japan for Transmutation of Long-Lived Nuclides”, *Prog. in Nucl. Energy*, **38** 1-2, 107 (2001).
- [2] H. Oigawa *et al.*, “Conceptual Design of Transmutation Experimental Facility”, *Proc. Global2001, Paris, France* (2001).
- [3] 核変換ディビジョン, “J-PARC 核変換実験施設 技術設計書”, *JAEA-Tech. 2017-003* (2017).
- [4] S. Meigo, *J. Nucl. Mater.*, vol. 450, pp. 8–15 (2014).
- [5] The Joint Project Team of JAERI and KEK, *JAERI-Tech 99-56*, 1999.
- [6] Y. Ikeda, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 600, pp. 1–4 (2009).
- [7] Y. Miyake *et al.*, *Physica B*, vol. 404, pp. 957–961, (2009).
- [8] S. Meigo *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, vol. 450, pp. 141–146 (2014).
- [9] S. Meigo *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 562, pp. 569–572 (2006).
- [10] S. Meigo *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 600, pp. 41–49, (2009).
- [11] G.E. Youngblood *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, vol. 258–263, pp. 1551–1556, (1998).
- [12] Y. Yuri *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 10, 10401, (2007).
- [13] <http://www.ceratech.co.jp/product/phoscera/>
- [14] http://www.nims.go.jp/research/practical_case/sialon.html