

# 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<sup>\*A)</sup>、武井 早憲<sup>A)</sup>、松田 洋樹<sup>A)</sup>、百合 庸介<sup>B)</sup>、湯山 貴裕<sup>B)</sup>  
Shin-ichiro Meigo<sup>\*A)</sup>, Hayanori Takei<sup>A)</sup>, Hiroki Matsuda<sup>A)</sup>, Yosuke Yuri<sup>B)</sup>, Takahiro Yuyama<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup>J-PARC Center Japan Atomic Energy Agency (JAEA)  
<sup>B)</sup>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.

## 1. 頭語

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一つとなる。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の実現性のための実験施設の建設 [2] 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、2019 年 7 月に実施した 1 MW の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、10 時間程度問題なく 98% 以上の稼働率で運転

できることを示した。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、計画される大強度ビーム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の評価が重要となる。

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ものの、2次元の詳細な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 陽子に対し約  $10^6$  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 の物質・生命科学実験施設 (MLF) の核破砕中性子源におけるビーム運転では、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。標的で生成した中性子等によりモニタは高度に放射化

\* meigo.shinichiro@jaea.go.jp

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核変換の実験施設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校正のため、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。

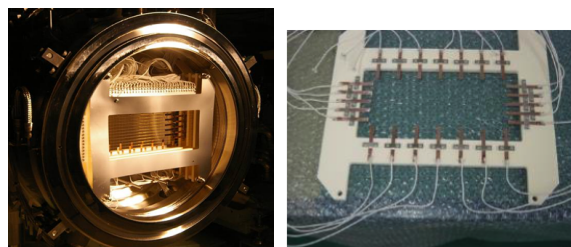
標的周辺部のビーム測定のため、ビームハローモニタも陽子ビーム窓に配置されている。ビームハローモニタをFig. 1に示す。ビーム運転において標的のピーク電流密度の低減が重要な一方で、標的周辺部の電流密度も低く抑える必要があるため、ビームハローモニタの測定は重要となる。標的周辺部には、冷却水により強制的に冷却を行わない遮蔽体などもあるために、許容できる発熱密度は $1 \text{ W/cm}^3$ 以下となり、これを超えないビーム運転が必要となる。ビームハローの絶対強度を観測するために、陽子ビーム窓のビーム入射周辺部に配置した銅ストリップに熱電対を接合した熱電対型ハローモニタを設置した。25 Hz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ーモニタも設置している。二次電子型ハローモニタから生じる電流は、既に熱電対型ハローモニタの測定結果により規格化されており、わずかに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に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く。

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ーモニタは重要な役割を担う。ハロー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、四極磁場の約30%が失われた。磁場喪失に伴う磁石における中心磁場がビームに対し変位したため、標的上のビームが水平および垂直位置が約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、ビームハローモニタにより直ちに異常を検知し問題なくビームを停止した。本事象が発生した後にビームに対する安全性強化のため、プロファイルモニタにおけるビーム位置の変異があった場合に、直ちにビームを停止するシステムを導入した。



(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)とタンゲ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、タンゲ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、2008年より1号機の使用を開始し、2013年秋に2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いて問題ないことが確認された。2017年秋に3号機に交換し、2019年の夏までに4.5 GWhの積分強度のビームが照射された。

## 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、タンゲ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る、次期のモニタには熱膨張を吸収するスプリングをワイヤの保持部に用い、伸びの防止を行う予定としている。

### 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、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 Ar ビーム照射試験

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。

初めにイメージングシステムのテストを実施した。試料には、厚さ 5 mm、DRZ-High ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ )、AF995R ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  99.5%  $\text{CrO}_3$  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。

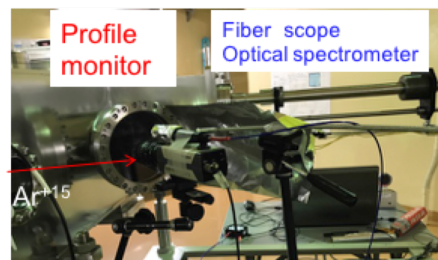


Figure 2: Experimental setup of beam profile imaging system for Ar beam irradiation.

#### 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。

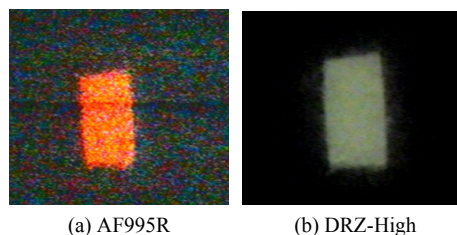


Figure 3: Beam profile obtained with fiber imaging system for (a) AF995R and (b) DRZ-High. Beam shape was uniformed by nonlinear focus.

### 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  $\text{Cr}^{3+}$  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 の波長における強度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。

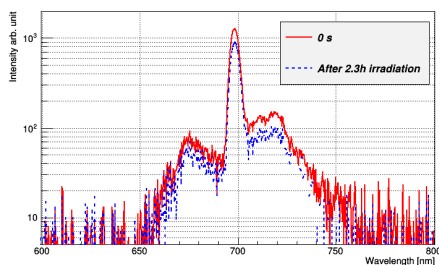


Figure 4: Luminescence spectra after irradiation of the Ar beam for 0 h and 2.3 h, respectively.

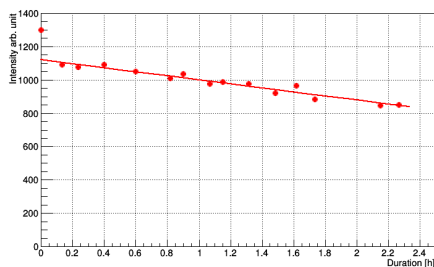


Figure 5: Peak intensity trend of AF995R for long time irradiation of the Ar beam with 75 nA. Line shows result by linear fitting after 0.2 h.

### 3.4 実際の使用状況を考慮したプロファイルモニタの開発

ADS、核変換実験施設、および MLF のような大強度加速器施設では、標的におけるビームプロファイル測定することが肝要となる。MLF では標的として水銀、核変換実験施設では鉛・ビスマス共晶体

が標的として用いられる予定となり、標的は液体金属となるため SUS316 等の容器に封入されるため、標的容器におけるビームプロファイル測定が重要となる。

標的容器に対する適用性考慮し、プロファイルモニタの試験片の制作を行い、Ar ビーム照射による試験を実施した。試験片には、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  をわずかに含有するアルミナを母材に溶射した試料と、母材に対する影響が少ないセラミックスの塗料（セラコート）も塗布した試料に、Ar ビームを照射し発光強度を測定した。本試験では、製作性の観点で母材として純アルミニウム（5000 番）を用いた。測定の前に、試料の剥離試験を実施した。試験では、メッキに対する固着性試験と同様に、試料に傷を設け、粘着性テープで剥離するかどうか確認した。塗料の場合には、わずかな剥離性が確認されたが、溶射した試料において剥離性は確認されなかった。

剥離試験とは別のサンプルに紫外線を照射し発光の確認が確認された試料に対し、Ar ビームを照射し発光スペクトル強度の振る舞いを測定した。セラコートを塗布した試料の発光強度の振る舞いを、Fig. 6 (a) に示す。セラコート塗布試料は発光強度が低く、700 nm 付近にピークが観測されたが、照射とともに著しい減少が観測された。この原因の一つとして、塗料のバインダーが放射線により分解などが考えられる。また、照射後 0.5 時間より 400 nm 付近の短波長領域で発光するようになったが、以前に実施した純アルミナでもこの領域の発光が確認された。この領域の発光は不純物に起因するものと考えられる。照射が進むにつれ、短波長領域の光量は照射とともに減衰した。なお、以前に短波長領域の発光が確認された純アルミナに対しても照射試験を実施したが、短波長領域の発光は確認されなかった。

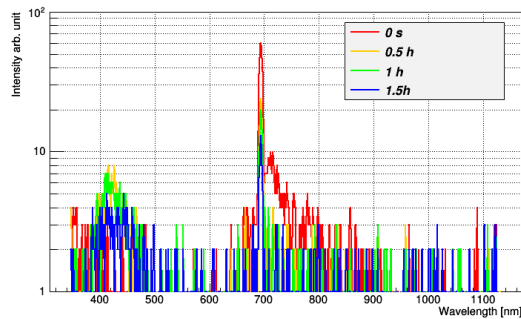
アルミナ溶射した試料の振る舞いを、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  が 0.65 および 0.38% 含まれる結果として、Fig. 6 (a) および (b) にそれぞれ示す。 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  を 0.38% 含む試料の方が、0.65%(wt) 含有する試料より発光強度が強いことが示された。700 nm 付近のピークの振る舞いは、ほぼ AF995R と同等な傾向となる。AF995R の場合には、ピークより短波長側となる 650 nm 付近ではあまり減衰は著しくなかったものの、溶射した試料では波長に関わらず一様に減衰することが確認された。

AF995R も溶射した試料も同じクロミアを含む ~0.5% 程度含むアルミナとなるがスペクトルや減衰特性において違いを生じている。この原因は、AF995R に含まれる Fe 等の不純物による効果と思われる。本試験において、AF995R と同等な溶射試料の作製を目指し、AF995R の粉末から溶射により試料を作成したが、紫外線や Ar ビームに対し発光はほとんどしなかった。

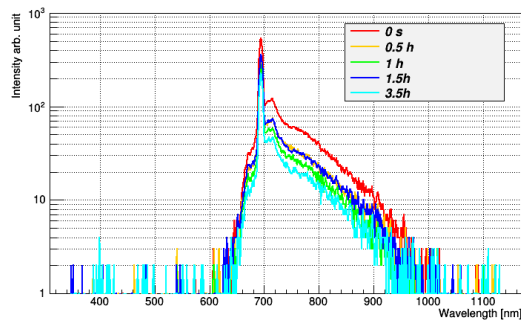
なお、Fig. 6 に示す値は、露光時間を 1 s に規格化して表示している。 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  0.38% の試料の照射初期のデータにおいて値が離散しているが、本測定は本試料の照射から開始した。データ収集系の表示では、平均化により実数表示となっていたが、記録では整数化されていたためである。実験の途中から整数での記録に気づき、露光時間を 20 ms から 1 s に変え対

応した。

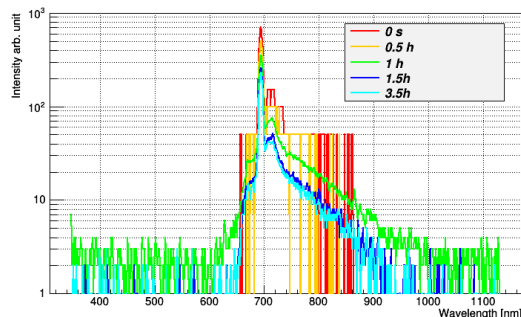
照射時間の終了の頃の、アルミナを溶射した試料における発光によるビームプロファイルの像を Fig. 7 にイメージを示す。本測定では、CCD カメラを用いて測定したが、発光強度の劣化はあるものの、明確なビームプロファイル測定が可能であることを示した。今後、絶対的な発光量の確認のため、J-PARC のビーム輸送ライン等において数 GeV 陽子に対する蛍光強度の測定を行う予定とする。



(a) Paint



(b) Alumina spray Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wt 0.65%

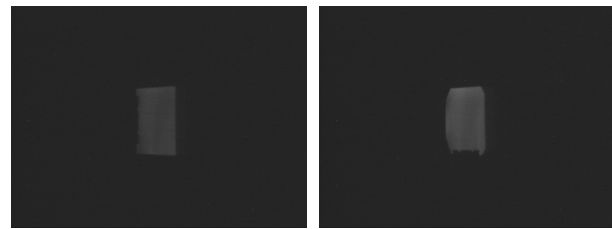


(c) Alumina spray Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wt 0.38%

Figure 6: Trend of spectral intensity during irradiation of Ar beam for ceramic paint (a) and alumina spray (b) and (c).

#### 4. 結語

ADS や J-PARC で計画される大強度加速器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



(a) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wt 0.65%

(b) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wt 0.38%

Figure 7: View of image of Ar beam observed by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sprayed samples for various containment of the Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, which was obtained almost end of the irradiation.

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を行うことができ、本システムによりプロファイルを測定できることが期待される。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に Cr をドープした蛍光体 (AF995R) は、波長 694 nm に Cr による明確なピークを持つものの、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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて試験も行った。塗料の場合には、発光量が少なく、照射とともに短波長領域の発光が確認された。溶射による試料は、AF995R と異なるスペクトルを示した。溶射した試料において発光強度の減少は観測されたものの、剥離性はほとんどなく、大強度加速器施設で使用可能な見通しを得た。

#### 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).