

重イオンビーム照射による SiC センサーワイヤー試験 SiC SENSOR WIRE TEST BY HEAVY ION BEAM IRRADIATION

明午 伸一郎^{*,A)}, 山口 雄司^{A)}

Shin-ichiro Meigo^{*,A)}, Yuji Yamaguchi^{A)}

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

Abstract

Many countries have proposed an accelerator-driven transmutation system (ADS) using a high-intensity proton accelerator such as beam power with 30 MW. Also, multi-mega W facilities exceeding 1 MW, such as European Spallation Neutron (ESS), have been constructed worldwide. To deliver the beam safely, a profile monitor to observe the beam correctly introduced to the target plays an important role. Although the beam profile monitor consisting of multi-wires of silicon carbide (SiC) steadily observes at J-PARC MLF, the damage to the wire is expected to be remarkable in the future high-power beam operation. Therefore it is essential to evaluate the damage to the wire quantitatively. For the development of the profile monitor, a beam test was conducted using heavy ion irradiation to accelerate damage on the sensor wires of SiC.

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 (Np, Am など) 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 では液体金属となる鉛ビスマス共晶体 (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 のビームを新規の陽子ビーム照射施設に入射し ADS や様々な材料開発に向けた試験を行う計画としている。材料の損傷指標として、原子あたりのはじき出し (dpa: displacement per atom) で表記される。ADS に用いられる材料は、年間に 20 dpa 程度と高い損傷を受ける。このため、ADS の材料開発には約 20 dpa 程度となるビーム照射施設が必要となり、J-PARC の核変換ディビジョンでは陽子ビーム照射施設 [3] の建設計画を進めている。本施設では、 $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [4, 5] と ADS で用いられる高い電流密度を持つビームを標的に入射する予定である。

大強度陽子を用いた施設において、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な役割を果たす。J-PARC センター [6] 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 [7] 及びミュオン源 [8] では、MLF では 800 kW 以上の大強度ビーム運転を開始し、短期間の 1 MW のビーム運転試験に成功した。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。本研究では数 GeV 陽子に対し約 10^6 倍の損傷率を与える重イオンビームを用いて、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) [9] 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

* meigo.shinichiro@jaea.go.jp

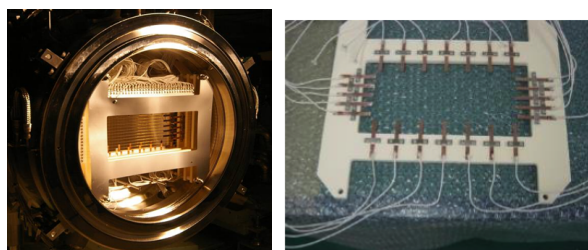
を用いたマルチワイヤプロフィールモニタ (Multi Wire Profile Monitor: MWPM) [10, 11] を設置した。MWPM の各ワイヤの感度を校正のため、狭い幅のビーム走査により校正を行った。この結果、個々のワイヤの感度のばらつきは最大でも 6% 以下であった。標的におけるピーク電流密度は MWPM の測定結果から導出し、MLF では一定以上のピーク電流密度を持つ場合には、Machine Protection System (MPS) によりビームが自動的に停止する。

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、冷却システムが十分でない反射体や遮蔽体などの標的周辺部の電流密度も低く抑える必要があるため、ビームハロー強度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断熱近似により直接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が導出可能となり、これによってわずかに数発のビーム調整により運転の継続が可能か判断している。この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、本システムは J-PARC の新施設や実機の ADS においても利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。実際に 2018 年 5 月に、RCS から水銀標的へのビーム輸送系 (3NBT) に用いる四極磁石において、一つのコイルに層間短絡が発生し四極磁場の約 30% が喪失した。また中心磁場が変位したため、標的でのビームの水平および垂直位置が約 20 mm 変位した。ビーム位置変異に伴い、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異常が直ちに検知されビームを問題なく停止できた。ビーム異常時におけるさらなる安全性強化のため、プロフィールモニタによるビーム位置の変異が観測された場合に、直ちにビームを停止するシステムを導入した。本システムにより、さらに安心できるビーム運転が可能となった。

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、ビーム位置とその幅を常時観測するため、ワイヤには長期間の耐久性が要求される。1 号機



(a) Beam monitors placed at the PBW

(b) Halo monitor

Figure 1: Mult-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.

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 (W) ワイヤ (直径 $30 \mu\text{m}$) 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、W 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した。2008 年より陽子ビーム窓とモニタ 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、2017 年の夏まで使用し積分強度で 2 GWh のビームが照射した。2017 年秋に 3 号機に交換し、2019 年の夏まで 4.5 GWh の積分強度のビームを照射した。さらに 2019 年夏に 4 号機に交換し、今年の夏まで 10 GWh の積分強度のビームが照射された。陽子ビーム窓に設置したモニタは、これまで 10 GWh の積算出力を受けたものの、応答出力には特に異常はなく、照射後の目視検査では特に深刻な損傷は見られなかった。なお、2 号機の使用後のワイヤにおいて僅な伸び観察され、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。このため、3 号機のモニタには熱膨張を吸収するスプリングをワイヤ支持部に用い、伸びの防止を行った結果、ワイヤの伸びは特に観測されず、伸びの問題は解決できたと考えられる。

2.2 SiC ワイヤ

二次電子を放出する高感度のワイヤの材料としては、通常の場合に電子の放出量が大きく、高温融点を有する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) が放射線の高耐性のために選択され、SiC は約 80 dpa [12] までの損傷に耐えうるデータもある。

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。本プロフィールモニタのように、ビームに直接照射される材料の場合には、クーロン散乱による影響が支配的となる。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、プロフィー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 の陽子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。ただし、SiCの数 GeV 陽子に対する劣化の影響は未知となるため、照射に伴う影響を定量的に測定することが必要となる。理想的にはこの試験はこの施設は数 GeV 陽子を照射する施設は [3]J-PARC で検討しているものの、まだ建設されていない。そこで、重イオンビームを用いた試験を実施した。

3. ビーム照射による SiC の損傷評価

MLF において、SiC (密度 3.4 g/cm³) を用いたプロファイルモニタのワイヤは最大で 10 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こと可能性がある。また、複合的な連鎖反応により時間とともにこの劣化が加速する可能性もある。陽子ビーム自身の寿命は、これまで行われた照射後試験により、積算の陽子線束が $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ まで健全性が保たれることが予想される [9]。これは積分強度に約 20 GWh に相当し約 3 年間の時間に相当する。

一方、SiC ワイヤの重イオンビーム照射は高エネルギー陽子に比べ、高い阻止能を持つため、放射線損傷を効率的に与えることができる。SiC ワイヤの耐放射線性を確認するためには、重イオンビームによる試験を行うことが効果的に損傷に起因する影響を評価できる。さまざまなイオン種のビーム照射により、SiC が受けるはじき出し損傷率 (dpa 断面積) を PHITS コードを用いて計算した。この結果を Fig. 2 に示す。図では横軸に SiC ワイヤ中での深さ、縦軸に dpa を生成する断面積を示す。J-PARC における実験 [13–15] により、数 GeV 付近の陽子による dpa 断面積は、妥当なものであることが確認されている。400 MeV から 3 GeV までの運動エネルギーを有する陽子に対し、10.5 MeV の Ni ビームはブラックピーク付近で約 10^6 倍の損傷を試料に与えることができる。本手法は効率的に損傷を材料に付与することができるため、核融合や原子炉における材料研究でも同様な手法を用いて進められている。本研究でもこの手法を用い、SiC ワイヤの二次電子放出率の低下を測定し、放射線損傷に対する SiC のワイヤの耐久性を調べた。

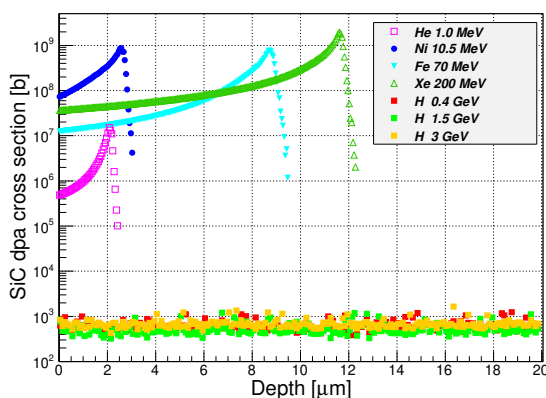


Figure 2: Calculation result of dpa induced on SiC wire for various beam conditions.

はじき出し損傷は SiC 内で異なるため、どの深部で生じた損傷を指標とすべきか検討が必要となり、特にブラックピークの位置と二次電子の放出過程を考慮する必要がある。SiC の電離は入射イオンビームが停止するブラックピーク周辺における深さ (2 ~ 12 μm) で最大となる。一方、はじき出し損傷は Fig. 2 のように表面とピークで約 10 倍異なり、どの深さによる影響が支配的か明確にするため、パラメータを変えた測定が必要となる。そこで、本研究では入射イオン種および線エネルギー付与 (LET) に対する影響を明確にするため、Ni および Xe イオンビームを用いて試験を実施した。

3.1 TIARA における Ni ビーム照射試験

SiC ワイヤの耐放射線性を確認するため、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) のタンデム加速器を用いて、SiC ワイヤへの重イオン入射試験を行った。入射粒子には、全運動エネルギー 10.5 MeV となる ⁵⁸Ni³⁺ 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数 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。ビーム照射は約 4 時間程度行い、入射 Ni イオンの電流は、直径 2 mm の開口を持つファラデーにより測定し、照射において 22 pA となった。ワイヤに入射するビーム電流密度の均一性を保つため、1 kHz の周波数を持つビームスキャナーにより水平方向に約 2 mm 掃引した。

実験で用いたセットアップの概念図を Fig. 3 に示す。SiC ワイヤはカプトンテープにより電氣的に絶縁した状態で垂直方向に張り、これに Ni イオンビームを入射した。SiC ワイヤにピコアンメータ (Keithley 6487J および 6514) を接続し電流を測定した。また、照射中の相対的なビーム電流測定のため SiC ワイヤ下流には、絶縁したステンレス板 (SS304) を設置し、照射のイオンビームの相対的な値もピコアンメータにより測定した。照射中の温度を観測するため、サーモビューワで温度を測定した。ステンレス板で生じた電子の SiC ワイヤへの流入を防ぐために、ワイヤはステンレス板から 26 mm 程度離し、カプトンテープにより端部を絶縁し垂直方向に張った。なお、試験的に He イオンビーム (1 MeV) の照射も行ったが、この際にワイヤとステンレス板の距離を十分に設けなかったため、二次電子の計測が正しくできなかった。

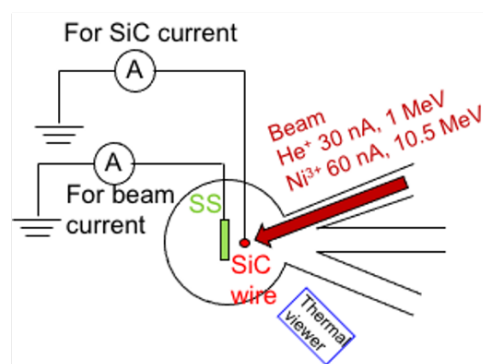


Figure 3: Experimental setup.

実験で用いた試料周辺の様子を Fig. 4(a) に示す。MLF と同様に、Goodfellow 製のタングステン直径 $\phi 10 \mu\text{m}$ に化学気相成長法 (CVD) によりコーティングした SiC ワイヤ (直径 0.1 mm) を用いた。照射装置は遠隔操作により垂直駆動できるようになっており、SiC 上部には直径 2 mm の複数のファラデーカップ群を装備しており、この測定値より絶対的なビーム電流を決定した。ファラデーカップの前面には、アクリル板を設置しており、ビームによる発光分布によりプロファイルを測定した。上流には AC でビームをスイープするスキャナーが装備されており、ビーム直径が約 3 mm になるように調整した。なお、スイープなしの場合には直径は 1 mm 程度となり、全ての電流はファラデーカップにより測定することができた。スイープしたビーム面積で除することによりワイヤに入射する電流密度を得た。実験で用いたサーモビューワーを Fig. 4(b) に示す。ビーム照射中の SiC の温度をサーモビューワーで測定した。照射中の温度は約 100°C 程度と MLF で想定される $\sim 1000^\circ\text{C}$ に比べ十分に低い温度であった。

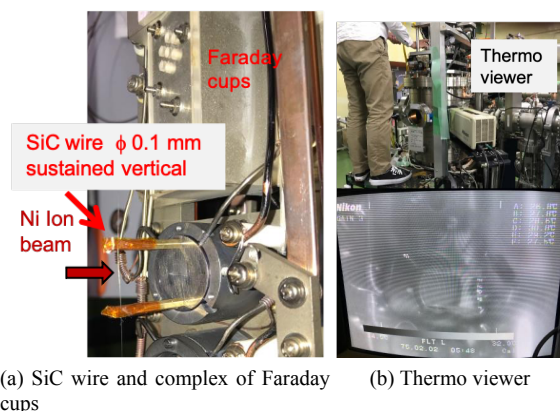


Figure 4: Photo of the experimental setup at TIARA, (a) SiC wire and Faraday cup to observe the beam current, (b) Thermo viewer to observe the temperature of sample.

3.2 JAEA タンデムにおける Xe ビーム照射試験

JAEA のタンデム加速器を用いて TIARA と同様な試験を行った。実験では、 $^{136}\text{Xe}^{+14}$ イオンビーム (200 MeV, 22 p nA) を用いて試験を行った。TIARA のタンデムと同様にビームスキャナーを用いて、照射位置でのビームを均一にした。実験に用いたセットアップを Fig. 5 に示す。紙面の都合上、図では上下方向を左右方向として表示している。図の中心に SiC ワイヤを窒化アルミニウム製のフレーム上に設置し、ピコアンメータで SiC ワイヤに生じる二次電流を観測した。本照射装置も遠隔操作による駆動機構により、ビーム照射位置を変更できる。図の右側にアルミナからなる発光体を設置し、ビーム調整時には発光によりビーム位置とプロファイルを調整した。詳細なビーム形状取得のため、図には見えないさらに右側にカプトンテープを設置し、短時間のビーム照射によりカプトンテープにビームの跡を焼き付け、ビームの形状を測定した。本実験でも SiC ワイヤ下流に絶縁したアルミニウム板を設置し、入射す

る相対的なビーム電流を同時に測定した。

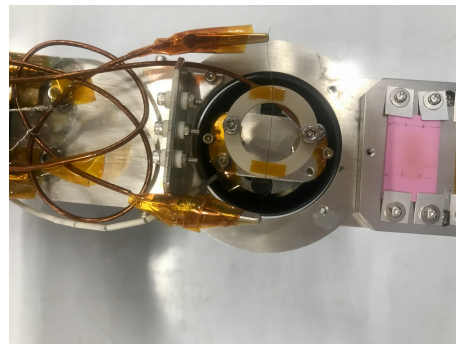


Figure 5: Setup of beam irradiation at JAEA Tokai Tandem.

3.3 照射試験の結果

SiC ワイヤに Ni および Xe ビームを照射しワイヤから生ずる二次電子電流の放出率とその時間的振る舞いを測定した。入射ビームに対する SiC ワイヤの二次電子電流の測定結果を、Fig. 6 に示す。図では、SiC ワイヤの電流測定を下流の金属板で測定した相対的なビーム強度で割った値を縦軸に示している。SiC ワイヤによるビーム電流の計測値は、照射に伴い 6% の減少を示すものの長期間において安定した結果となった。

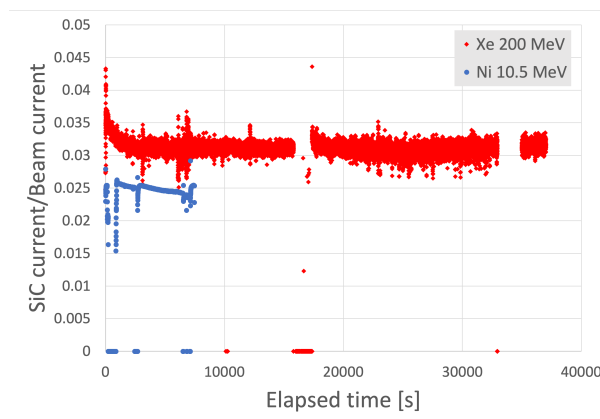


Figure 6: SiC wire electron emission with beam irradiation of Ni 10.5 MeV and Xe 200 MeV.

3.4 二次電子放出率に関する考察

二次電子放出率の減衰をはじき出し損傷 (dpa) の関数として考察した。dpa は、はじき出し断面積に積算粒子束の積分で評価した。ビームにより電離で生じた二次電子は、数十 eV 程度のエネルギーとなることが考えられ、電子の飛程は十分長くないと考えられる。その一方、二次電子の殆どはブラックピーク周辺で生じ、これが SiC 媒質内の移動後に放出されることも考えられる。Ni および Xe の SiC の深さ方向における dpa の振る舞いは、Fig. 2 に示すようにビーム種とそのエネルギーにより異なる。Xe の場合には表面に対しブラックピーク部の dpa は約 50 倍となるのに対し、Ni の場合には約 10 倍程度となるため、損傷評価をどの深さで評価

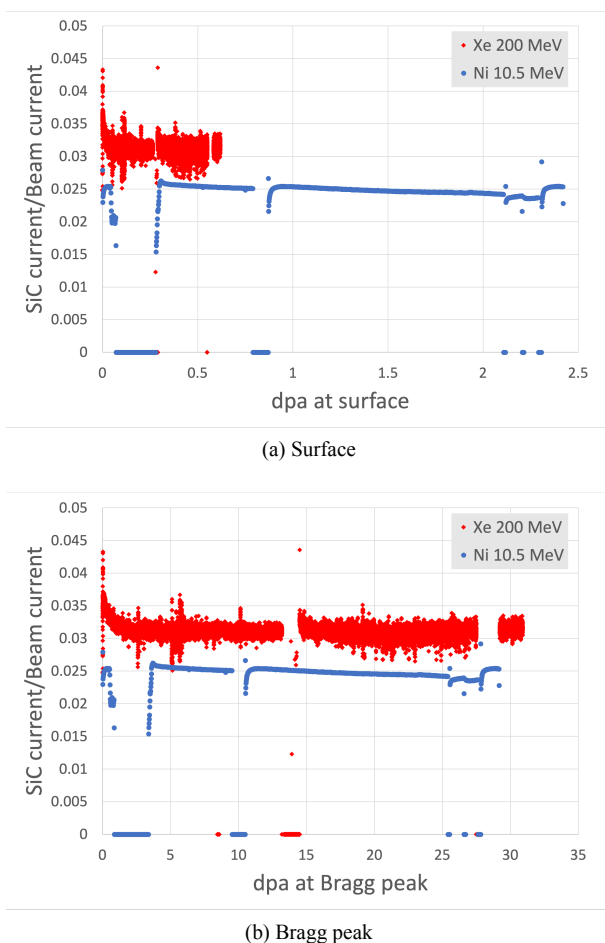


Figure 7: Electron emissivity of SiC due to beam irradiation as a function of dpa, (a) dpa at the surface of SiC, (b) dpa at the Bragg peak.

すべきか疑問となる。数 GeV 陽子に対する影響に換算するためには、この dpa 評価を明確にする必要がある。

Ni および Xe ビーム照射における SiC の二次電子放出率の振舞いを、表面およびブラックピークにおける dpa の関数として Fig. 7 に示す。表面近傍の dpa に基づく評価 (Fig. 7(a)) は、dpa に対する Ni と Xe ビームによる二次電子放出率の減衰傾向が一致せず、この損傷評価は適切でないと考えられる。一方、Fig. 7(b) に示すブラックピークの dpa に基づく評価では、両者ビームの減衰傾向が概ね良い一致を示している。このため、ブラックピークでの dpa に基づく電子放出率の評価のほうが適切と思われる。この結果、約 30 dpa の照射に対し SiC の二次電子放出率は約 6% 程度の減衰することとなる。重イオンと陽子ビームの照射に伴う効果はまだ未知のファクターがあるため、今後 MLF の SiC ワイヤに対しビームスキャンを施し詳細な二次電子放出率を評価することにより明確になると考えられる。

3.5 ワイヤ断面観察および分析

照射効果を明確にするため、未照射および TIARA で照射した SiC ワイヤに対し、走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型分光分析器 (EDS) により、ワ

イヤ断面の観察および元素分析を実施した。SiC ワイヤは、中心に W 芯部およびその周辺に SiC 部で構成されていることが明確に確認できた。放射線照射と未照射のワイヤの比較により寸法の変化は観測されず、また照射部の粗化等は観測されなかった。さらに元素分析の結果、放射線照射に伴う特に有意な違いは観測されなかった。

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 Si ワイヤを用いたビームプロファイルモニタの開発を TIARA タンデム加速器および JAEA タンデム加速器を用いた重イオンビーム照射試験を行った。表面において 2.5 dpa およびブラックピークにおいて 30 dpa の損傷に対し、約 6% の二次電子放出率の低下にとどまった。控え目な値となる SiC 表面における損傷量 (2.5 dpa) は、MLF および ADS で使用されるモニターに対し、それぞれ 3 年および 1 年における照射量に相当し、少なくともこの期間の使用において問題ないものと考えられる。

謝辞

数々の助言およびご協力をいただきました JAEA の大久保成彰氏、石川法人氏、および井岡郁夫氏、また TIARA および JAEA のタンデム加速器のオペレータに深く感謝いたします。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] J-PARC センター核変換ディビジョン, “J-PARC 陽子照射施設検討に関する研究会”, 2023 年 7 月 27 日. <https://kds.kek.jp/event/46735>
- [4] J-PARC センター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.
- [5] S. Meigo, *J. Nucl. Mater.*, vol. 450, pp. 8–15, 2014.
- [6] The Joint Project Team of JAERI and KEK, *JAERI-Tech* 99-56, 1999.
- [7] Y. Ikeda, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 600, pp. 1–4, 2009.
- [8] Y. Miyake *et al.*, *Physica B*, vol. 404, pp. 957–961, 2009.
- [9] S. Meigo *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, vol. 450, pp. 141–146, 2014.
- [10] S. Meigo *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 562, pp. 569–572, 2006.
- [11] S. Meigo *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 600, pp. 41–49, 2009.
- [12] G.E. Youngblood *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, vol. 258–263, pp. 1551–1556, 1998.
- [13] H. Matsuda *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 57, pp. 1141–1151, 2020.
- [14] S. Meigo *et al.*, *EPJ Web Conf.*, vol. 239, 06006, 2020.
- [15] S. Meigo *et al.*, *EPJ Web Conf.*, vol. 284, 05001, 2023.