

# J-PARC 3MeV LINAC を用いた ビームスクレーパの負水素イオンビーム照射試験 NEGATIVE HYDROGEN ION BEAM IRRADIATION EXPERIMENTS OF BEAM SCRAPERS USING THE J-PARC 3MEV-LINAC

平野耕一郎<sup>#,A)</sup>, 石山達也<sup>A)</sup>, 栗原俊一<sup>B)</sup>, 杉村高志<sup>B)</sup>, 丸田朋史<sup>B)</sup>  
Koichiro Hirano<sup>#,A)</sup>, Tatsuya Ishiyama<sup>A)</sup>, Toshikazu Kurihara<sup>B)</sup>, Takashi Sugimura<sup>B)</sup>, Tomofumi Maruta<sup>B)</sup>,  
<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency  
<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

We have conducted the scraper irradiation test with the 3MeV linac. The test piece of the scraper was irradiated by the H- beam up to particle number of 1.2E20. We measured the surface temperature of more than 3000 deg C using a high-speed radiation thermometer and observed the irradiation damage on the scraper by using the laser microscope. When the surface temperature exceeded 2900 deg C, the ionic current of carbon and the irradiation damage on the surface of the test piece rapidly increased. This paper describes beam irradiation test results of the scraper.

## 1. はじめに

J-PARC リニアックでは、パルス幅  $500\mu\text{s}$  のマクロパルスビームが、RFQ 下流の MEBT 領域にある RF チョップ空洞の電界によって、その一部が蹴りだされ、パルス幅  $456\text{ns}$  の中間パルスが  $815\text{ns}$  の周期で並んだ構造を持つビームに整形される。蹴りだされたビームは、RF チョップ空洞から約  $70\text{cm}$  離れた場所にあるビームスクレーパに負荷される。これまで、炭素複合材を用いたビームスクレーパ[1]の表面最大温度は  $2500^\circ\text{C}$ 、損傷による深さは  $300\mu\text{m}$  であった。今後、ビーム電流が増強されるため、負水素イオンビーム照射による化学的な変化や昇華などにより、ビームスクレーパの損傷が増大することが懸念される。そこで、J-PARC リニアックとは別に、3MeV リニアック[2]を構築し、ビーム電流  $30\text{mA}$ 、最大パルス幅  $1\text{ms}$ 、最大繰り返し  $5\text{Hz}$  の運転条件で、ビームスクレーパの照射試験を実施している。今回は、ビームスクレーパの照射試験について報告する。

## 2. 3MeV リニアック

3MeV リニアックを用いたスクレーパの照射試験体系を Figure 1 に示す。3MeV リニアックは、セシウム添加高周波駆動型負水素イオン源、RFQ (1号機)、3台の Q 電磁石および照射チャンバで構成される。照射チャンバ内には、Figure 2 に示すスクレーパヘッドを設置した。Q 電磁石には、ステアリング電磁石およびビーム位置モニタが設置されている。試験では、ビームが Q 電磁石の中心に常に来るように、ステアリング電磁石の電流を調整した。照射チャンバの上方にゲートバルブを設置し、その上に ULVAC 製クライオポンプ (CRYO-U6H) を設置した。また、

四重極型質量分析器 (以下、QMS という) および真空ゲージを設置し、ビーム照射時の残留ガスのイオン電流を測定した。Table 1 に 3MeV リニアックの主なビームパラメータを示す。ビームエネルギー 3MeV の 1 時間当たりの最大粒子数は  $4\text{E}18$  である。また、ビーム幅は  $50\mu\text{s}$  から  $1\text{ms}$  まで変えることができる。

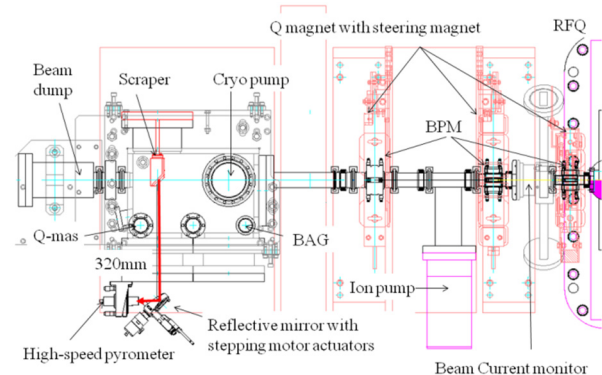


Figure 1: Layout of the MEBT line of the 3MeV linac.

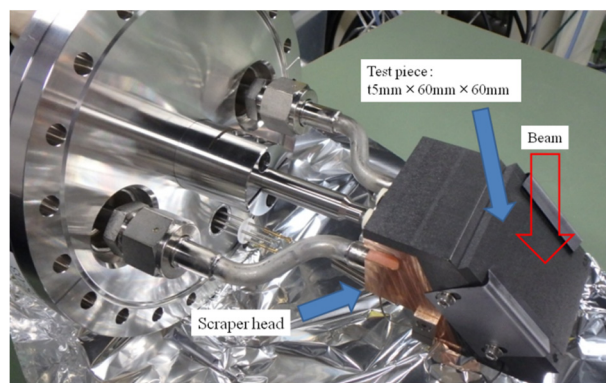


Figure 2: The photograph of the scraper head.

<sup>#</sup>hirano.koichiro@jaca.go.jp

Table 1: Main Beam Parameters

Beam energy (MeV)	3.0
Maximum number of particles (/h)	4.00E+18
Peak beam current of RFQ I (mA)	10-35.6
Beam pulse width ( $\mu$ s)	50-1000
Repetition rate (Hz)	5

### 2.1 スクレーパー

J-PARC リニアックのスクレーパーには、東洋炭素製炭素複合材 CX2002-U を用いている。照射試験では、これと同じ材質を使用し、 $60 \times 60 \times 5$  mmの大きさの試験片（以下、試験片という）を使用した。Figure 2 に示すようにビームに対して 45 度傾斜したスクレーパー面に、タンタルクリップで試験片を固定した。

### 2.2 スクレーパー表面温度測定

試験片の表面温度の測定体系を Figure 1 に示す。温度測定には、高速放射温度計（IMPAC 社製、IGA740-L0）を用いた。高速放射温度計は、 $6 \mu$ s の応答速度を有し、 $350 \sim 3500^\circ\text{C}$ の温度範囲を測定できる。放射温度計から試験片表面までの距離を 320 mm に設定し、 $\Phi 2$  mmの領域内の平均温度を測定した。ステッピングモータアクチュエータ付き金平面ミラーの回転軸、及び、あおり軸を 2 軸ステージコントローラ（シグマ光機製、SHOT-102）を用いて制御し、試験片の表面をスキャンした。これを用いて、試験片表面のピーク温度分布を測定し、最大温度を示す場所を特定し、その場所を連続的に測定した。放射温度計の放射率は、Figure 3 に示す体系で設定した。放射温度計の測定値が 2 色温度計の測定値  $398^\circ\text{C}$  と同じになるように、放射温度計の放射率を 0.65 に設定した。

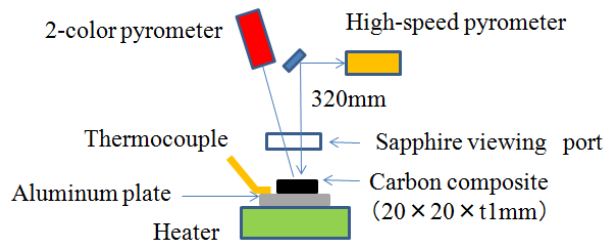


Figure 3: Setting of emissivity of the high-speed pyrometer.

### 2.3 ビーム電流

負水素 RF イオン源[3]から出力されるビーム電流は、RF イオン源に負荷される 2MHz 増幅器のパワによって調整される。ビーム電流は RFQ 入口のビーム電流モニタによって測定され、そのビーム電流が  $35.5 \text{ mA} \pm 1\%$  の範囲で一定になるように 2MHz 増幅器のパワが制御された。この時、RFQ 出口のビーム電流モニタによる電流値は  $31.3 \pm 0.3 \text{ mA}$  であった。

スクレーパーにバイアス 300V を印加し、スクレーパー

で検出されたビーム電流の信号は、積分回路で積分されて、粒子数コンパレータに入力される。粒子数コンパレータでは、ビーム電流の積分値を粒子数に換算し、スクレーパー照射粒子数[4]の数値データとした。

### 2.4 ビームサイズ

試験片に照射されるビームのサイズを測定する体系を Figure 4 に示す。幅 0.1 mmのスリット付きのファラデーカップが付いた真空導入機を用いて、水平方向および垂直方向のビームサイズを測定した。水平方向のビームサイズを測定する場合、放射温度計を一旦撤去した。また、スクレーパーを設置していたポートにのぞき窓を設置し、ビームラインに挿入される水平及び垂直ファラデーカップがお互いに干渉しないように監視した。

J-PARC リニアックのスクレーパーに照射されるビームサイズは、ビーム電流 40mA の時、水平方向  $\sigma_x$  は 3.3mm、垂直方向  $\sigma_y$  は 2.0 mmであった。照射するビームが実機と同じサイズになるように、Q 電磁石の電流を RFQ 出口から、204.5A、181A、60A に設定した。照射試験期間中、2MHz 増幅器のパワは最大パワ 72%(60kW)に対して、15%から 17.5%の範囲内で変化した。ただし、Figure 5 に示すように 2MHz 増幅器のパワがこの範囲で変化しても、ビームサイズは誤差範囲内で変わらないことを確認した。

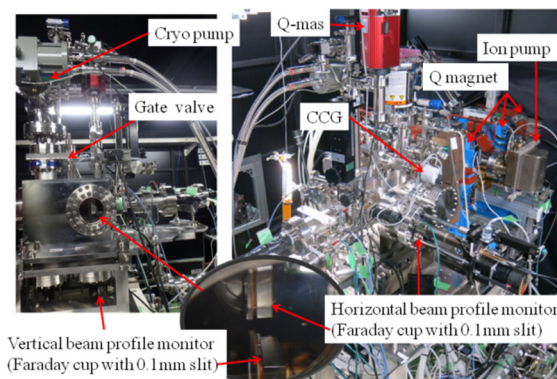


Figure 4: The photograph of horizontal and vertical beam profile monitor.

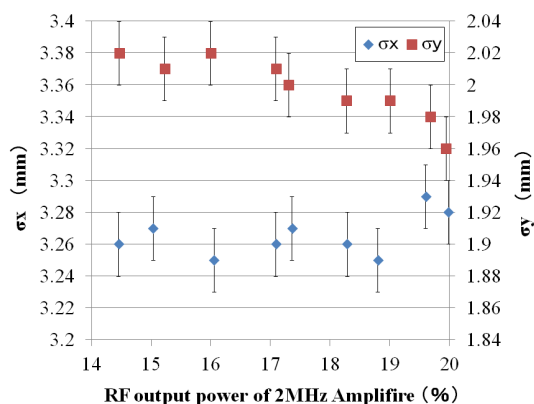


Figure 5: Beam size vs. 2MHz amplifier output power of the RF ion source.

### 3. ビーム照射試験

試験では、ビーム電流、ビーム繰り返し、ビームエネルギーおよびビームサイズを一定にして、ビームパルス幅だけを変化させた。これにより、試験片に照射される領域の電流密度を変えて、試験片の損傷具合を調べた。また、試験片表面のピーク温度および残留ガスのイオン電流の変化を測定した。

#### 3.1 ビーム照射による損傷部の観測

ビームパルス幅が  $600\ \mu\text{s}$ 、 $700\ \mu\text{s}$  および  $900\ \mu\text{s}$  の場合について、それぞれの照射時間を調整し、同じ粒子数  $1.2\text{E}20$  のビームを照射した。ビームパルス幅  $600\ \mu\text{s}$  と  $900\ \mu\text{s}$  の場合は、同じ試験片を使用し、照射場所を  $15\text{mm}$  ずらして照射した。ビームパルス幅  $700\ \mu\text{s}$  の場合は、別の試験片を使用した。ビームパルス幅に対する試験片表面のピーク温度の変化を Figure 6 に示す。Figure 6 に示すようにピーク温度の変化が同じであったことから、これらの試験片には素材による熱伝導率の違いがないことを確認した。

照射時間に対する試験片表面のピーク温度の変化を Figure 7 に示す。ビームパルス幅  $600\ \mu\text{s}$  および  $700\ \mu\text{s}$  の場合は、照射時間とともにピーク温度が上昇した。これは、試験片表面の損傷が進んだため、表面の熱伝導率が悪くなった影響と考えられる。一方、パルス幅  $900\ \mu\text{s}$  の場合は、ピーク温度が減少した。これは、昇華した炭素がのぞき窓の真空側に付着したことによって、赤外線の一部が遮られたことが原因であった。そこで、一旦、のぞき窓を取り外し、のぞき窓の真空側をアルコールで拭いて、炭素による黒ずみを取り除いた。その後、再測定を行った結果、表面温度は増加し、 $3220^\circ\text{C}$  となった。パルス幅  $900\ \mu\text{s}$  の場合について、照射時間①、②および③における放射温度計の出力波形を Figure 8 に示す。波形③の温度の減衰が波形①より早くなったことから、熱伝導率の悪い表面が一度むけたことにより、熱伝導率が良くなり、照射時間③の時の表面温度が照射時間①の表面温度よりも下がったと考えられる。

レーザーマイクロスコプを用いて、損傷部の観測を行った。ビームパルス幅  $600\ \mu\text{s}$ 、 $700\ \mu\text{s}$  および  $900\ \mu\text{s}$  の場合の観測結果を Figure 9、Figure 10 および Figure 11 に示す。また、この時の試験結果を Table 2 に示す。照射されていない試験片の表面には、深さ約  $100\ \mu\text{m}$  の穴が開いている。ビームパルス幅  $600\ \mu\text{s}$  の場合、照射された場所では既存の穴が広がったように見える。ビームパルス幅  $900\ \mu\text{s}$  の場合、 $1\ \sigma$  当たりの電流密度が  $4.2\text{A}/\text{m}^2$  になると、ピーク温度が  $3000^\circ\text{C}$  を確実に超える。電流密度が 3 割低いビームパルス幅  $700\ \mu\text{s}$  の場合と比べると、照射粒子数が同じであっても、損傷部の体積は 1 桁増加し、損傷が急激に進むことが分かった。ビームパルス幅  $900\ \mu\text{s}$  の場合について、試験片表面のピーク温度分布を Figure 12 に示す。ピーク温度分布を試験片表面の損傷部に重ね合わせたところ、約  $2500^\circ\text{C}$  を境に損傷が進んでいることが分かった。表面の白い変色部は  $1500\sim 2500^\circ\text{C}$  の温度範囲で生じた。

Table 2: Results of Irradiation Tests

Beam pulse width ( $\mu\text{s}$ )	600	700	900
Irradiation time (h)	60	52	41
Surface peak temperature (deg C)	2440- 2670	2740- 2950	3222
Current density of $1\ \sigma$ ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	2.9	3.3	4.2
Power density of $1\ \sigma$ ( $\text{MW}/\text{m}^2$ )	8.6	9.9	12.5
Damaged part ( $\text{mm}^3$ )	0.2	1.1	12

#### 3.2 ビーム照射時の残留ガスの測定

ビームパルス幅  $900\ \mu\text{s}$  の場合について、照射時間③の時に、ビームパルス幅を変化させながらピーク温度および残留ガスのイオン電流を測定した。ビーム照射時の経過時間に対する残留ガスのイオン電流の変化を Figure 13 に示す。Test1 では、ビームパルス幅を  $200\ \mu\text{s}$  から  $900\ \mu\text{s}$  まで 20 分間隔で  $100\ \mu\text{s}$  毎に増加させた。その後、20 分間、ビームを停止させた後、Test2 では、ビームパルス幅を  $900\ \mu\text{s}$  から  $200\ \mu\text{s}$  まで 20 分間隔で  $100\ \mu\text{s}$  毎に減少させた。Test1 において、質量数 2 の水素がビームパルス幅を増加させたタイミングで増加した。一方、Test2 では、この現象が見られなかったことから、炭素複合材に吸蔵された水素が温度上昇に伴って放出されたと考えられる。ピーク温度に対する質量数 12 の炭素のイオン電流の変化を Figure 14 に示す。同様に、質量数 28 の一酸化炭素を Figure 15 に、質量数 16 のメタンを Figure 16 に示す。いずれの場合も、 $2900^\circ\text{C}$  以上で、イオン電流が増加したことから、炭素の昇華とともに炭素複合材内に含まれたガス成分が放出されたか、高温時に炭素との化学的な反応によりガスが発生したと考えられる。このようなイオン電流が急激に増加する  $2900^\circ\text{C}$  以上の状態では、損傷が急激に進むと考えられる。

実機では、RFQ ビーム電流  $54\text{mA}$ 、繰り返し  $25\text{Hz}$ 、パルス幅  $500\ \mu\text{s}$  での運転が予定されており、 $500\ \mu\text{s}$  のうち 44% のビームがスクレーパに負荷される。ビームパルス幅  $900\ \mu\text{s}$  の場合の電流密度に相当するビーム ( $54\text{mA}$ 、 $500\ \mu\text{s}$ 、 $5\text{Hz}$ ) をスクレーパに負荷させると、 $3000^\circ\text{C}$  を超えると推測されるため、実機では、電流密度  $4.2\text{A}/\text{m}^2$  に相当するビームをスクレーパに負荷させることは避けるべきである。 $54\text{mA}$ 、 $500\ \mu\text{s}$ 、 $5\text{Hz}$  のビーム条件の 44% は、照射試験のビームパルス幅  $400\ \mu\text{s}$  の場合に相当する。この時のピーク温度は  $1800^\circ\text{C}$  であったが、損傷が進むと表面温度が上がるため、表面温度と損傷の関係、また、この時の損傷の進み具合を調べる必要がある。

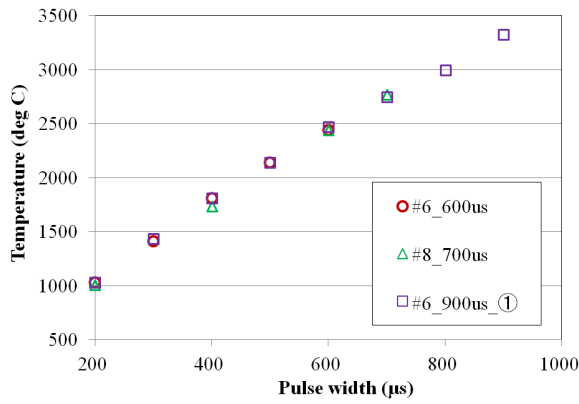


Figure 6: Beam pulse width vs. the peak temperature of test pieces.

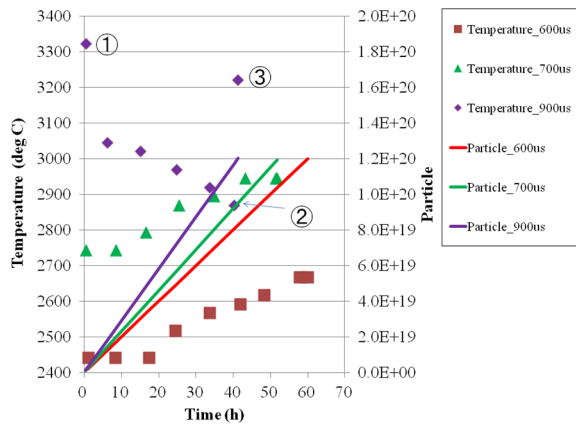


Figure 7: Trend of the peak temperature of test pieces

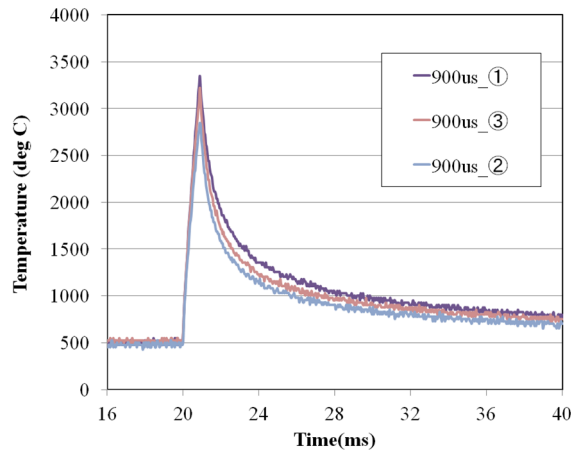


Figure 8: Waveforms of the surface temperature measured by the high-speed pyrometer. The beam pulse width is 900 μ s.

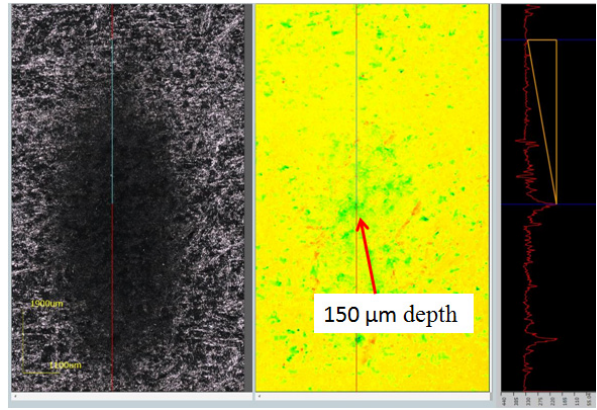


Figure 9: Observation of the test piece surface after beam irradiation using the laser microscope. The beam pulse width is 600 μ s. Total particle number is 1.2E20.

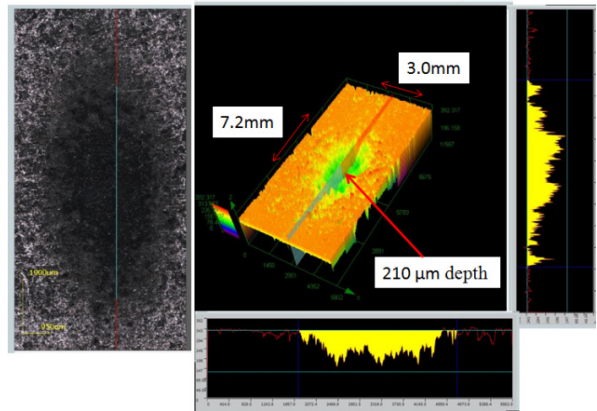


Figure 10: Observation of the test piece surface after beam irradiation using the laser microscope. The beam pulse width is 700 μ s. Total particle number is 1.2E20.

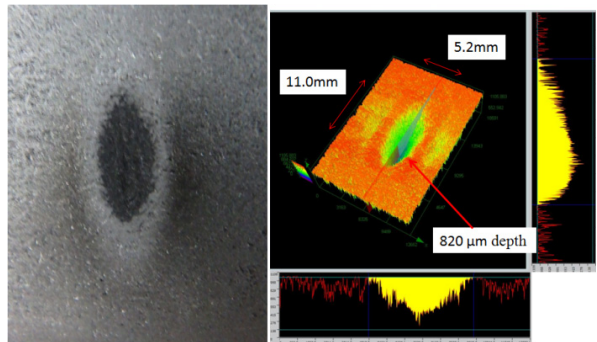


Figure 11: Observation of the test piece surface after beam irradiation using the laser microscope. The beam pulse width is 900 μ s. Total particle number is 1.2E20.

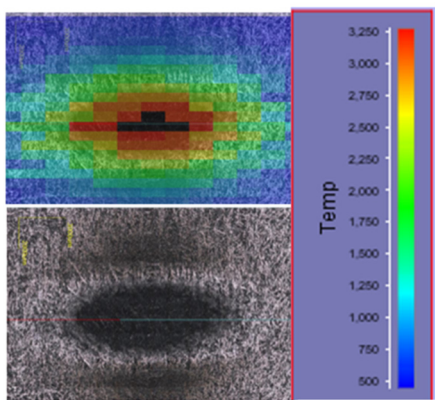


Figure 12: The surface peak temperature distribution of the damaged part.

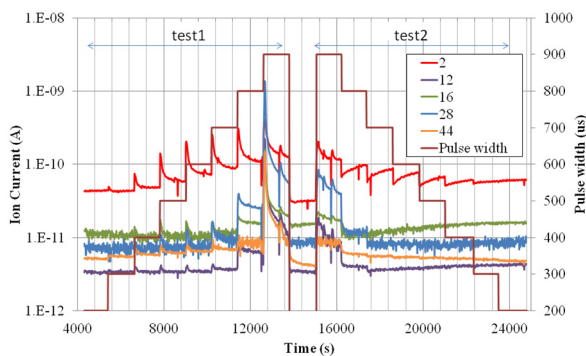


Figure 13: Trend of ion current of residual gas when the beam pulse width was changed.

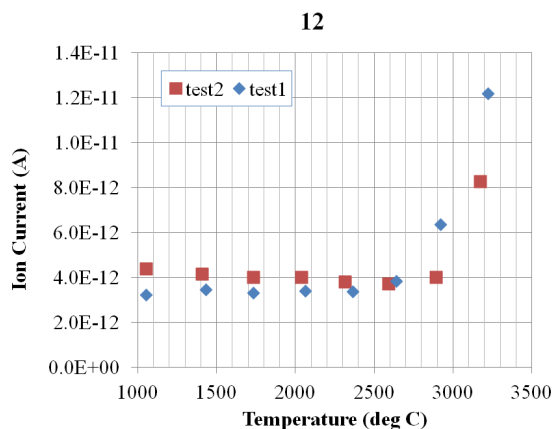


Figure 14: The peak temperature of test piece vs. ion current of carbon (C).

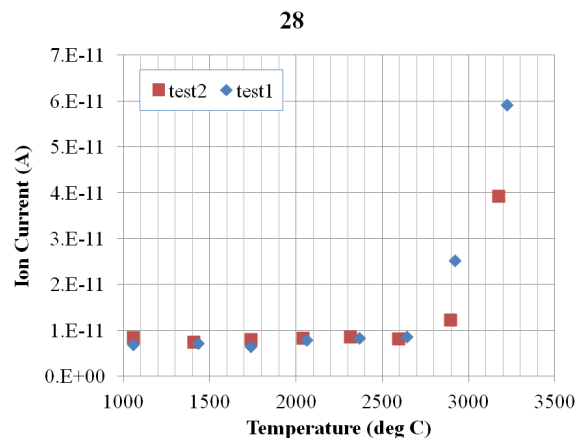


Figure 15: The peak temperature of test piece vs. ion current of carbon monoxide (CO).

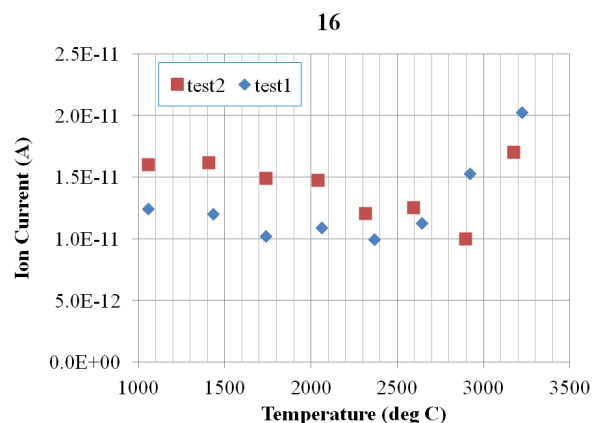


Figure 16: The peak temperature of test piece vs. ion current of methane (CH<sub>4</sub>).

#### 4. まとめ

試験片表面の照射電流密度を変化させ、ビーム照射時に発生したガスのイオン電流を測定した結果、2900°C以上で、イオン電流が急激に増加することが分かった。また、照射粒子数一定の条件で、損傷部を顕微鏡で観察した結果、3000°Cを超えるような電流密度では損傷が急激に進むことが分かった。今後、ビーム増強時の実機の電流密度で照射試験を行い、スクレーパの損傷について評価していく予定である。

#### 謝辞

ビーム電流の安定出力にご協力頂いたイオン源 Gr の皆様に感謝いたします。高周波電力の安定出力にご協力頂いた RFG<sub>r</sub> の皆様に感謝いたします。タイミング系の調整や機器安定制御にご協力頂いた制御 Gr の皆様に感謝いたします。ビーム計測にご協力頂いたモニター Gr の皆様に感謝いたします。試験の助勢や体系の組み

**PASJ2017 WEP020**

換え作業に協力頂いた空洞 Gr や三菱電機システムサービスの皆様に感謝いたします。

**参考文献**

- [1] K. Hirano *et al.*, “DEVELOPMENT of RF CHOPPER SYSTEM at J-PARC LINAC (2)”, 12<sup>th</sup> PASJ, 2015.
- [2] K. Hirano *et al.*, “DEVELOPMENT OF BEAM SCRAPERS USING A 3-MEV LINAC AT J-PARC”, 13<sup>th</sup> PASJ, 2016.
- [3] K. Ohkoshi *et al.*, “Status of the J-PARC ion source”, 13<sup>th</sup> PASJ, 2016.
- [4] Y. Kawane *et al.*, “Interlock System of Beam Line for Beam Current Upgrade”, 11<sup>th</sup> PASJ, 2014.