

J-PARC LINAC 3MeV ビームスクレーパの現状 STATUS OF 3MeV BEAM SCRAPERS FOR THE J-PARC LINAC

平野耕一郎^{#, A)}, 杉村高志^{B)}, 栗原俊一^{B)}

Koichiro Hirano^{#, A)}, Takashi Sugimura^{B)}, Toshikazu Kurihara^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We could use a 3MeV beam scraper without a problem for five months when the scraper received to 1.3 times as high as a normal average beam current of the scraper in 1MW beam operation. The peak temperature on the scraper surface was 1800 deg C. Irradiation damage caused by the 3 MeV beam with particle number of $3E22$ was 700 μ m depth. We study scraper materials which can withstand the current density higher than carbon composite used in the scraper because almost all beams can be irradiated to the scraper in 1MW beam operation. Beam irradiation tests have been performed about graphene and tungsten as scraper materials with high heat conductivity. This paper describes beam irradiation test of the 3MeV beam scraper and scraper materials.

1. はじめに

パルス幅 500 μ s のマクロパルスビームは、RFQ 下流の MEBT 領域にある RF チョップ空腔の電界によって、その一部が蹴りだされ、Fig. 1 に示すパルス幅 451 ns の中間パルスが 815 ns の周期で並んだ構造を持つビームに整形される。ビームエネルギー 3 MeV のビームは、チョップ空腔の電界によって蹴りだされ、約 70 cm 離れた場所にあるビームスクレーパ [1] に負荷される。これまで、スクレーパに使用されている炭素複合材のビーム照射試験 [2] をオフラインで実施した。その結果、スクレーパ表面温度が 2900 °C を超えるようなビーム電流密度では、熱分解ガスが急激に増加し、損傷が急激に進むことが分かった。2018 年 10 月以降に計画されている 1 MW ビーム利用運転では、ビーム電流が増加するため、ビームライン圧力の増加およびスクレーパ損傷の増大が懸念させる。そこで、2017 年度に実施したビーム利用運転の実績から 1 MW ビーム利用運転時のビームライン圧力およびスクレーパの損傷状態を推測した。また、高ビーム負荷時に増加する圧力を低減させるため、グラフェン及びイーターゲットタングステンなどの熱伝導率が高い材料について、オフライン [2,3] でビーム照射を行い、これらのスクレーパ材料が 1 MW ビーム利用運転時のスクレーパに使用できるか検討した。今回は、これらのビームスクレーパの現状について報告する。

2. 3 MeV ビームスクレーパ

J-PARC リニアックの 3 MeV 用スクレーパのヘッドを Fig. 2 に示す。スクレーパのビーム照射面は 60 mm $\times$ 84 mm の大きさであり、ビーム入射角は 67 度である。ビームは照射面の中心部に照射される。スクレーパヘッドの形状を Fig. 3 に示す。スクレーパヘッドの材料は、東洋炭素製炭素複合材 CX2002-U

である。炭素複合材は熱伝導率に異方性があるため、Fig. 3 に示すように熱伝導率が最も良い方向の面を銅ブロックにロー付接合している。銅ブロックは内部に冷却構造を有する。ビーム軸方向はすべて炭素複合材である。ビームが炭素複合材を貫通しないように、ビーム進行方向の炭素複合材の端部に熱電対を挿入し、その測定温度にビームを停止させるインターロックをかけている。

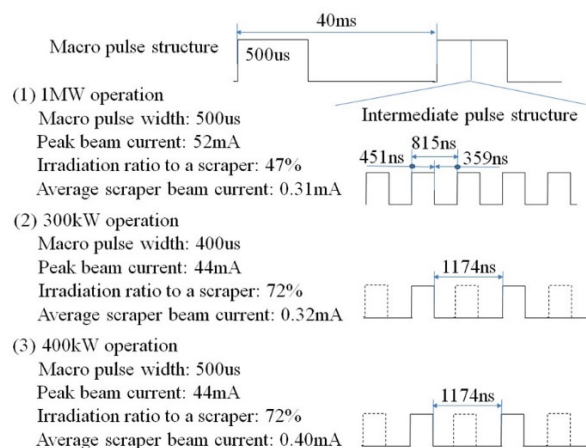


Figure 1: Beam pulse structure of the 3MeV linac.

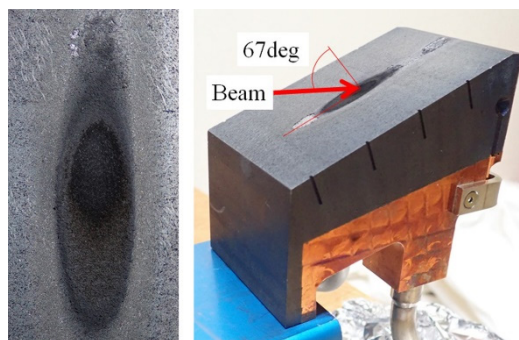


Figure 2: The photograph of the scraper head.

[#]hirano.koichiro@jaea.go.jp

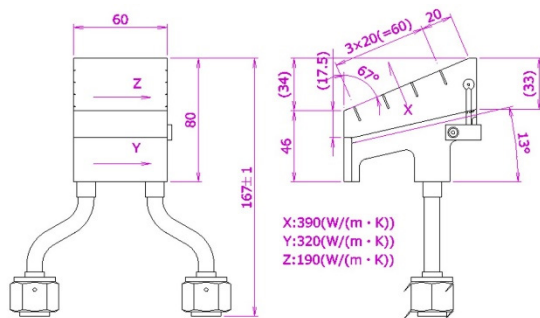


Figure 3: Geometry of the scraper head.

3. 3 MeV ビームスクレーパの運転実績

2017 年 11 月から 2 ケ月間、300 kW ビーム利用運転が実施され、2018 年 1 月から 3 ケ月間、400 kW ビーム利用運転が実施された。Fig. 1 に示すように、300 kW および 400 kW ビーム利用運転におけるビーム電流の中間パルスの周期構造は、1 MW ビーム利用運転のパルス構造と異なる。1 MW ビーム利用運転時のビーム電流 52 mA のスクレーパビーム照射率が 47 % であるのに対して、ビーム電流 44 mA の 300 kW および 400 kW ビーム利用運転時のスクレーパビーム照射率は 72 % と大きい。このため、300 kW ビーム利用運転の場合、スクレーパに負荷される平均ビーム電流は、1 MW ビーム利用運転の場合とほぼ同じ 0.32 mA になる。また、400 kW ビーム利用運転の場合は、1 MW ビーム利用運転の場合より 1.3 倍大きく、0.4 mA になる。つまり、300 kW および 400 kW ビーム利用運転を通して、1 MW ビーム利用運転条件以上のビーム負荷が 5 か月間スクレーパに負荷されたことになる。

Figure 4 に示すように、400 kW ビーム利用運転のスクレーパ表面ピーク温度は最大 1800 °C となった。また、ビームラインの圧力は、Fig. 5 に示すように 2×10^{-6} Pa となり、問題となる圧力にならなかった。

次に、ビーム電流 44 mA のビームをビーム照射率 100 % でスクレーパに照射して、スクレーパ表面温度を測定した。このフルビーム照射試験を 3 回実施した。ビーム電流 44 mA でのビーム条件は、パルス幅 500 us、繰り返し 25 Hz、スクレーパ平均電流 0.55 mA である。

Figure 6 に示すように、スクレーパ表面に損傷が無い状態(20171011)では、スクレーパ表面のピーク温度は 1400 °C になった。以前実施した同ビーム入射角スクレーパヘッドの伝熱解析[4]において、ビーム電流 50 mA、パルス幅 500 us、繰り返し 25 Hz の条件での解析値は 1500 °C であり、測定値と 1 割以内で一致した。

照射開始から 3 ケ月間経過した状態(20180107)では、ピーク温度は 2240 °C に増加した。表面の損傷が進んだことによって、表面の熱伝導率が悪くなり、ピーク温度が増加したと推測される。このとき、照射直後のビームライン圧力は 4×10^{-5} Pa に増加したが、10 分後には 8×10^{-6} Pa に落ち着いた。さらに、照射開始から 5 ケ月間(400 kW ビーム利用運転開始後 2 ケ月間)経過した状態(20180314)では、ピーク温度に増加がみられなかつ

た。

ビーム利用運転終了後、スクレーパを取り出し、レーザーマイクロスコプを用いて、Fig. 7 に示すように損傷部の観察を行った。照射された総粒子数[5]は 3.09×10^{22} 個である。ビームが当たった場所の外周部には、最大幅 440 μ m の突起物が表面から最大高さ 610 μ m まで剣山のように突き出ていた。損傷部の中心は表面から 700 μ m 深くなっていた。1 MW ビーム利用運転で、この損傷状態から 1.6 倍の時間照射されても、損傷深さは 1 mm 程度になると推測されるので、利用運転が 1 年実施されても問題にならないと思われる。

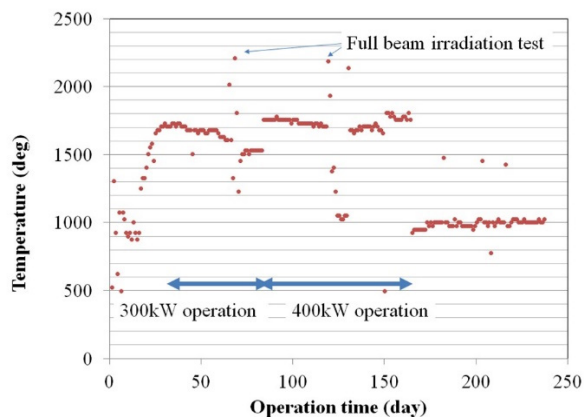


Figure 4: Trend of the peak temperature of the scraper.

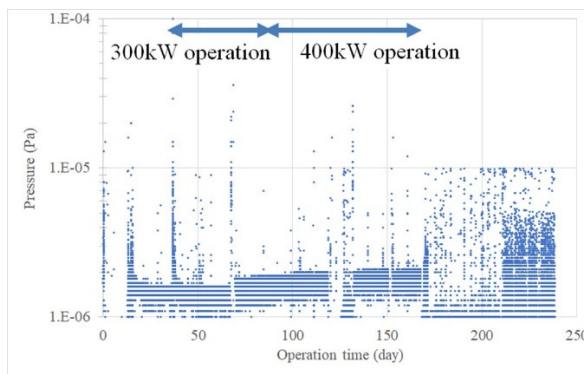


Figure 5: Trend of total pressure in the beam line.

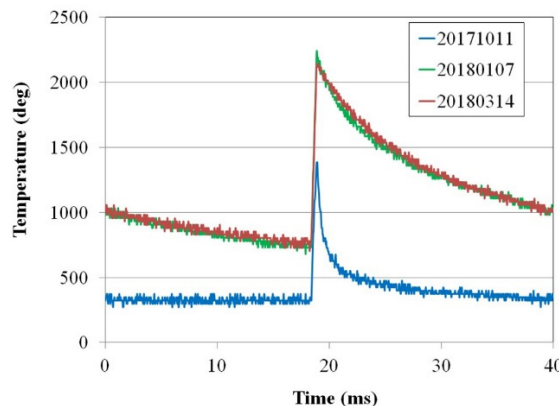


Figure 6: Waveforms of the surface temperature measured by the high-speed pyrometer.

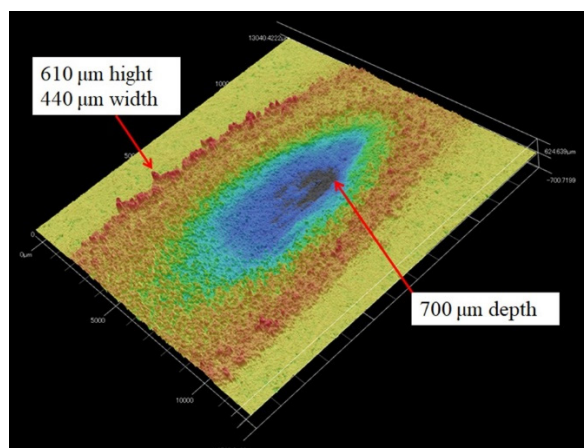


Figure 7: Observation of the 67deg scraper surface using the laser microscope.

4. 低ガス放出スクレーパ材料の検討

炭素複合材の場合[2]、スクレーパに照射されるビームの電流密度が高くなると、マクロパルス内の温度上昇により、熱分解ガスの発生や炭素の昇華が起こる。ビーム電流 50 mA で、スクレーパビーム照射率が 100 % に近いビーム条件では、熱分解ガス等の圧力が急激に増加するため、ビーム運転が停止すると予測される。このため、ビーム照射率 100 % のビームをスクレーパに照射しても、圧力が急激に増加しないスクレーパの材質を検討する必要がある。

ガス放出低減化の方法として、ピーク温度を現状より低減させる方法と、熱分解ガスが発生しない材質にする方法が考えられる。炭素複合材と同じ炭素系のグラフェン材料は、炭素複合材より熱伝導率が高い特性を持つ。このため、ピーク温度が低減することにより急激な真空悪化が起こらないことが期待される。タングステン材料は、熱伝導率が炭素複合材とほぼ同じ[6]であり、融点 3422 °C および沸点 5555 °C が炭素複合材より高い特性を持つ。このため、3000 °C を超えるビーム条件でも、炭素材のような急激な真空悪化は起こらないと期待される。今回、グラフェンとタングステンについて、オフラインでビーム照射試験を行い、スクレーパ材料としての可能性について検討した。

4.1 照射ビーム条件

オフラインでのビーム条件を Table 1 に示す。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、照射するビームの電流密度を変えて、試験片の損傷具合を調べた。ビーム電流 30 mA、ビームエネルギー 3 MeV、繰り返し 5 Hz、パルス幅 700 μs では、ビームサイズ 1σ の領域の電流密度は 3.5 A/m²、電力密度は 10.4 MW/m² になる。

試験片の表面温度の測定には、高速放射温度計（IMPAC 社製 IGA740-LO、応答速度 6 μs、測定サイズ φ2 mm、温度範囲 350~3500 °C）を用いた。放射温度計の放射率は、二色温度計（IMPAC 社製

IGAR12-LO、応答速度 2ms、測定サイズ φ2 mm、温度範囲 350~1300 °C）の測定値と放射温度計の測定値が同じになるように設定した。放射温度計の放射率は、グラフェンの場合は 0.65、タングステンの場合は 0.525 に設定した。

残留ガスのイオン電流の測定は、PFEIFFER 製 PrismaPlus QMG220 を使用した。

Table 1: Main Beam Parameters

Beam energy (MeV)	3.0
Repetition rate (Hz)	5
Peak beam current (mA)	30.4±0.3
Beam pulse width (μs)	100-900
Beam size σ _x (mm), σ _y (mm)	3.3, 2.0

4.2 照射結果

まず、グラフェンについて、4.1 項に示す試験条件でビーム照射試験を実施した。

グラフェンとは、炭素原子が六角形格子構造をなす原子 1 個の厚みを有するシート状の物質であり、グラフェンどうしは分子間力によって結合されている。グラフェンの熱伝導率には異方性があり、グラフェンの積層面方向の熱伝導率は 300 °C で 830 W/mK であり、炭素複合材の 300 °C で 240 W/mK に比べて 3.5 倍大きい。一方、グラフェンの積層面に垂直な方向（C 軸）の熱伝導率は 300 °C で 3 W/mK であり、極端に小さい。

株式会社サーモグラフィティクスのグラフェンをスクレーパヘッドの素材に用いた。高い熱伝導率を利用したいので、グラフェンの C 軸が銅材の面と平行になるように銀ロー付け接合をしたところ、線膨張率の違いから、グラフェンの積層方向に多数の割れが生じた。今回、割れないグラフェンにビームを照射させたいので、250 °C の低温で焼結可能なアルコール分子誘導体被膜のナノ銀ペースト[7]を接合材に用いた。冷却構造付き銅ボディ部の面がグラフェンの C 軸と平行になるように接合し、Fig. 8 に示すようなグラフェンスクレーパヘッドを製作した。スクレーパヘッドのグラフェン材に割れが無いことを確認した。

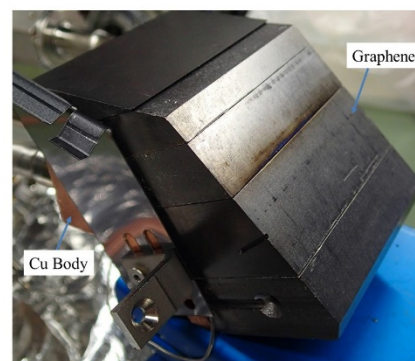


Figure 8: The photograph of the scraper head using graphene blocks

ビーム照射時の試験結果を Fig. 9 に示す。グラフ表面のピーク温度は、ビームサイズ 1σ の領域の電流密度 3.5 A/m^2 の時、炭素複合材の 2870°C に対して $2/3$ 倍の 1910°C になった。この時、ナノ銀ペーストの剥離およびグラフェンの亀裂が発生したことにより、圧力が $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ まで急激に増加し、グラフェンブロックが銅ブロックから脱落した。ナノ銀ペーストの強度不足が原因と推測される。ビーム照射時に発生した炭化水素系の熱分解ガスはグラフェン積層面間を通して抜けやすく、Fig. 10 に示す炭化水素系のイオン電流は炭素複合材より 1 桁程度多かった。

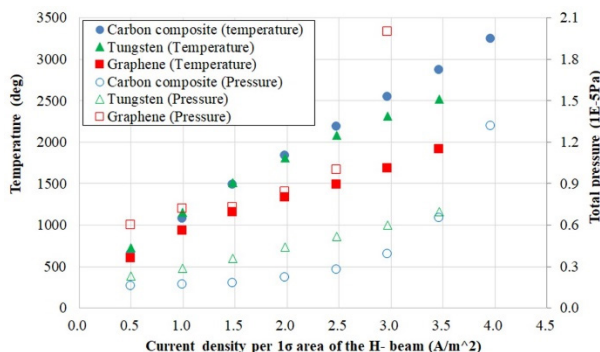


Figure 9: Current density per 1σ area of the beam vs. the peak temperature and the total pressure.

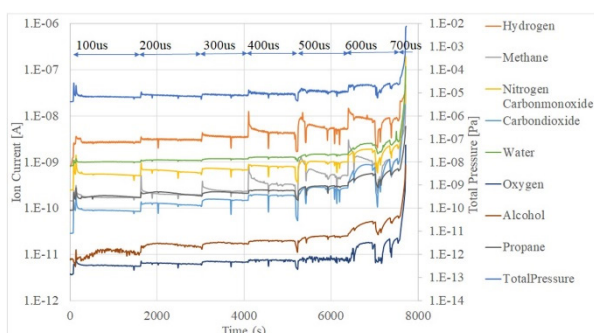


Figure 10: Trend of ion current of residual gas in the graphene irradiation test.

次に、タングステンについて、同試験条件でビーム照射試験を実施した。

アライドマテリアル製イーターグレードタングステンを試験片として使用した。この試験片 ($W13 \text{ mm} \times L60 \text{ mm} \times t5 \text{ mm}$) を、Fig. 11 に示す炭素複合材製スクレーパ上にタンタル製クリップで固定した。Figure 9 に示すように、タングステン表面のピーク温度は高温になるほど炭素複合材より低くなっており、電流密度が 3.5 A/m^2 のときに 1 割程度低くなった。

その後、電流密度 3.5 A/m^2 の条件で、Fig. 12 に示すように 14 時間照射した。このとき、総粒子数は 4.5×10^{19} 個であった。全圧力は、経過時間と共に低下した。ピーク温度波形を Fig. 13 に示す。また、ピーク温度も 2470°C から 2270°C に低下した。照射後の試験片の表面を Fig. 14 に示す。表面には、多数のヒビ割れがあり、一部の割れの先端は溶けて盛り上がり滑らかになっていた。割れが幅 $100\sim 300 \mu\text{m}$ の間隔で拡がり、試験片表面から深さ方向 $200\sim 300 \mu\text{m}$ のと

ころに底が見えた。底にも $50\sim 100 \mu\text{m}$ の間隔で幅 $30 \mu\text{m}$ 程度の亀裂があった。表面の凹凸が増えたことにより、照射部の表面積が増加したため、ピーク温度が下がったと思われる。

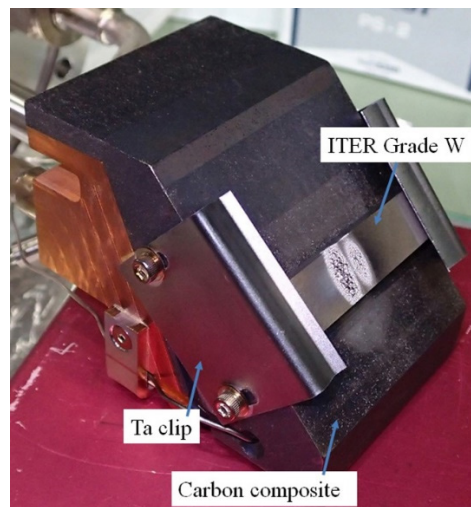


Figure 11: The photograph of the tungsten test pies on the scraper head.

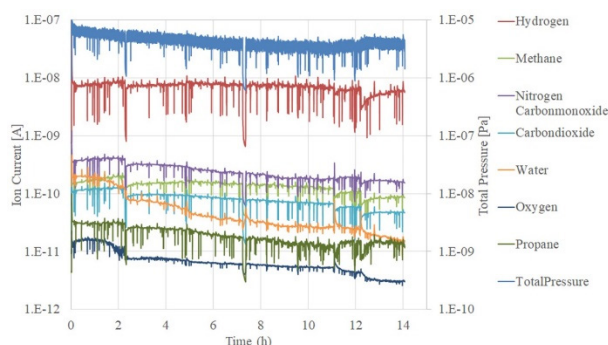


Figure 12: Trend of ion current of residual gas in the tungsten irradiation test. Current density per 1σ area of the beam is 3.5 A/m^2 .

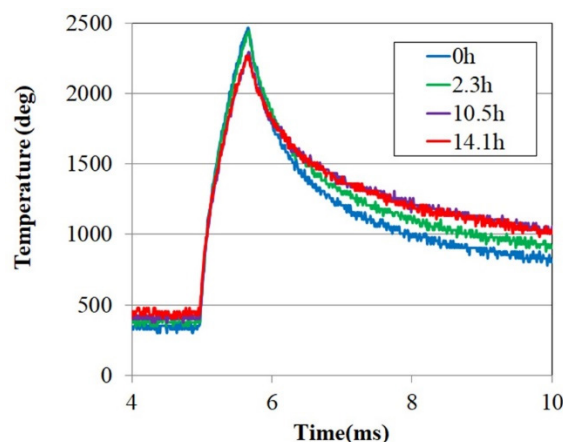


Figure 13: Waveforms of the surface temperature of the tungsten test pies. Current density per 1σ area of the beam is 3.5 A/m^2 .

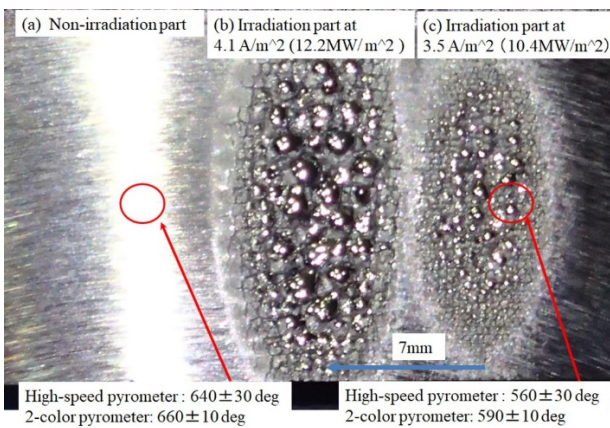


Figure 14: Tungsten test pies after beam irradiation.

表面状態がビーム照射により変化したため、再度、放射温度計の放射率を確認した。2色温度計は応答速度が2msであるため、放射温度計のようにパルス幅1ms以下のパルス温度波形を測定できない。そこで、照射部から離れた場所では、パルスのピーク温度がベース温度と同じになることから、その場所の温度を利用して、2台の温度計の測定値を比較した。まず、ステアリング電磁石を用いて、ビームをFig. 10に示す(c)の照射部中心から(b)に示す場所へ7mm移動させた。次に、パルス幅を増加させ、ビームサイズ1 σ 当たりの電流密度4.1 A/m²のビームを(b)の場所に照射し、全体温度を増加させた。そして、(b)の位置から両側に約8mm離れた(a)未照射部および(c)照射部の丸印の領域について、放射温度計でパルス波形が見えないことを確認した後に、放射温度計と2色温度計でそれらの温度を測定した。2つの温度計による測定値が誤差範囲で一致したことから、表面の割れによる放射率の変化は少ないと推測される。

このとき、Fig. 15に示すように総粒子数 1.63×10^{19} 個のビームをのべ4.5時間照射した。電流密度4.1 A/m²は、1 MW ビーム利用運転時の繰り返し5 Hz、スクレーパビーム照射率100%のビームにほぼ匹敵する。全圧力は炭素複合材のように急激に増加すること無く、 2×10^{-2} Paまで減少した。

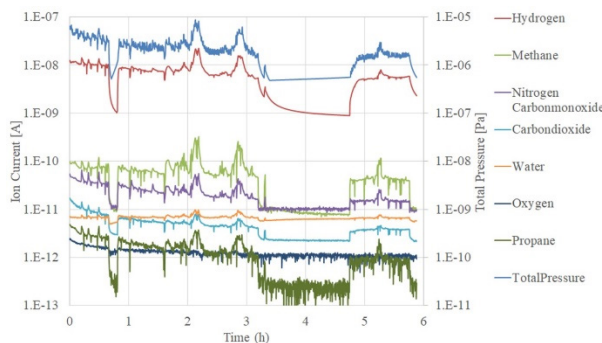


Figure 15: Trend of ion current of residual gas in the tungsten irradiation test. Current density per 1 σ area of the beam is 4.1 A/m².

5. まとめ

1 MW ビーム利用運転時のスクレーパ負荷以上の負荷をスクレーパへ5ヶ月間加えた結果、スクレーパ表面温度は1800℃となり、ビームラインの圧力およびスクレーパの損傷状態は、加速器運転に問題がないことが分かった。

スクレーパ素材として、グラフェンとタングステンについて、オフラインでビーム照射試験を行った。グラフェンについては、ピーク温度は炭素複合材の2/3に低減したが、炭化水素系の熱分解ガスが炭素複合材の場合より多くなることが分かった。また、銅との線膨張率の違いから、銅との接合に難しい問題がある。タングステンについては、ビームサイズ1 σ 当たりの電流密度3.5 A/m²のビームを照射したとき、ピーク温度は炭素複合材より1割程度低い2500℃になった。また、1 MW ビーム利用運転時の繰り返し5 Hzに相当する電流密度のビームをタングステンに照射しても、照射時に発生するガスは問題にならないことがわかった。亀裂が発生してもスクレーパとして機能するのであれば、タングstenはスクレーパ材料として利用できる可能性がある。そのほか、炭化水素系ガスの増加に伴い、スクレーパ周囲のイオンポンプの性能劣化や、RFQの放電発生割合の増加などが懸念されるため、発生ガスは少ない方がよい。今後、低ガス放出用スクレーパの可能性を検討するため、タングstenの亀裂が長時間照射によってどのように変化するか調べる必要がある。

謝辞

真空作業にご協力頂いたアルバックヒューマンリレーションズ(株)の小林史憲氏に感謝いたします。ビーム電流の安定出力にご協力頂いたイオン源グループ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RFグループ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グループ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グループの皆様に感謝いたします。試験の助勢や体系の組み換え作業にご協力頂いた空洞グループや三菱電機システムサービスの皆様に感謝いたします。熱伝導率の測定では、株式会社ベテル殿にご協力頂きました。

参考文献

- [1] K. Hirano *et al.*, "Development of RF chopper system at J-PARC LINAC (2)", 12th PASJ, 2015, pp. 944-947.
- [2] K. Hirano *et al.*, "Negative hydrogen ion beam irradiation experiments of beam scrapers using the J-PARC 3MeV-linac", 14th PASJ, 2017, pp. 847-852.
- [3] K. Hirano *et al.*, "Development of beam scrapers using a 3-MeV LINAC at J-PARC", 13th PASJ, 2016, pp. 310-313.
- [4] T. Sugimura *et al.*, "The heat transfer analysis for a new large entry angled scraper for J-PARC Linac", 12th PASJ, 2015, pp. 954-957.
- [5] Y. Kawane *et al.*, "Interlock System of Beam Line for Beam Current Upgrade", 11th PASJ, 2014, pp. 1288-1291.
- [6] T. Sugimura *et al.*, "Development of a 3MeV beam scraper for the J-PARC LINAC", 10th PASJ, 2013, pp. 862-866.
- [7] <http://www.thermo-graphitics.com/service.html>