

## J-PARC3MeV リニアックを用いたビームスクレーパの開発

### DEVELOPMENT OF BEAM SCRAPERS USING A 3-MEV LINAC AT J-PARC

平野耕一郎<sup>#,A)</sup>, 浅野博之<sup>A)</sup>, 石山達也<sup>A)</sup>, 伊藤崇<sup>A)</sup>, 大越清紀<sup>A)</sup>, 小栗英知<sup>A)</sup>, 近藤恭弘<sup>A)</sup>, 川根祐輔<sup>A)</sup>, 菊澤信宏<sup>A)</sup>, 佐藤福克<sup>A)</sup>, 篠崎信一<sup>A)</sup>, 神藤勝啓<sup>A)</sup>, 武井早憲<sup>A)</sup>, 千代悦司<sup>A)</sup>, 根本康雄<sup>A)</sup>, 三浦昭彦<sup>A)</sup>, 溝端仁志<sup>A)</sup>, 明午伸一郎<sup>A)</sup>, 森下卓俊<sup>A)</sup>, 栗原俊一<sup>B)</sup>, 柴田崇統<sup>B)</sup>, 杉村高志<sup>B)</sup>, 高木昭<sup>B)</sup>, 南茂今朝雄<sup>B)</sup>, 福井佑治<sup>B)</sup>, ニツ川健太<sup>B)</sup>, 方志高<sup>B)</sup>, 丸田朋史<sup>B)</sup>, 宮尾智章<sup>B)</sup>, 堀利彦<sup>C)</sup>, 澤邊祐希<sup>D)</sup>, 真山実<sup>D)</sup>, Koichiro Hirano<sup>#,A)</sup>, Hiroyuki Asano<sup>A)</sup>, Tatsuya Ishiyama<sup>A)</sup>, Takashi Itou<sup>A)</sup>, Kiyonori Ohkoshi<sup>A)</sup>, Hidetomo Oguri<sup>A)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>A)</sup>, Yusuke Kawane<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kikuzawa<sup>A)</sup>, Yoshikatsu Sato<sup>A)</sup>, Shinichi Shinozaki<sup>A)</sup>, Katsuhiro Shinto<sup>A)</sup>, Hayanori Takei<sup>A)</sup>, Etsuji Chishiro<sup>A)</sup>, Yasuhiro Nemoto<sup>A)</sup>, Akihiko Miura<sup>A)</sup>, Satoshi Mizobata<sup>A)</sup>, Shin-ichiro Meigo<sup>A)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>A)</sup>, Toshikazu Kurihara<sup>B)</sup>, Takanori Shibata<sup>B)</sup>, Takashi Sugimura<sup>B)</sup>, Akira Takagi<sup>B)</sup>, Kesao Nanmo<sup>B)</sup>, Yuji Fukui<sup>B)</sup>, Kenta Futatsukawa<sup>B)</sup>, Zhigao Fang<sup>B)</sup>, Tomofumi Maruta<sup>B)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>B)</sup>, Toshihiko Hori<sup>C)</sup>, Yuki Sawabe<sup>C)</sup>, Minoru Mayama<sup>D)</sup>,

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>C)</sup> Nippon Advanced Technology Co.

<sup>D)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co.

#### Abstract

Beam scrapers with the incident angle of 65deg to reduce the beam power deposition density have been used in the MEBT between a 324MHz RFQ and a 50-MeV DTL of the J-PARC linac. The 65deg scraper was irradiated by the H-beam up to particle number of 1.47E22. We observed a lot of surface projections with several hundred micrometers high in the irradiation damage on the scraper by using the laser microscope. In order to study the limits of scrapers, we constructed a new 3MeV linac at J-PARC. We will conduct the scraper irradiation test at the end of this year.

#### 1. はじめに

パルス幅 500  $\mu$ s のマクロパルスビームは、RFQ 下流の MEBT 領域にある RF チョップ空洞の電界によって、その一部が蹴りだされ、パルス幅 456ns の中間パルスが 815ns 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 70cm 離れた場所にあるビームスクレーパ[1]に負荷される。2014年に使用したビームスクレーパの表面最大温度は 2500°C、損傷による深さは 300  $\mu$ m であった。ビーム電流を 50mA に増強するため、ビーム照射時のビームスクレーパの耐電力を知る必要がある。そこで、J-PARC リニアックとは別に、3MeV リニアックを構築し、ビームスクレーパの照射試験ができるように準備した。3MeV リニアックは、負水素イオン源、低エネルギービーム輸送系 (Low Energy Beam Transport、以下「LEBT」と記す。)、高周波四重極型リニアック (RFQ)、RFQ 下流の MEBT (Medium Energy Beam Transport)、及び、ビームダンプで構成される。最大ビーム条件は、ビームエネルギー 3MeV、ビーム電流 30mA、最大ビームパワー 540W、最大パルス幅 1ms を計画している。3MeV リニアックでは、まず、イオン源の動作確認試験、及び、RFQ のコンディショニングを行った後、レーザー荷電変換試験を行い、次に、ビームスクレーパの照射試験を実施する予定である。今回は、J-PARC リニアックのビームスクレーパの現状、及び、ビームスクレーパの照射試験に用いる 3MeV リニアックについて報告する。

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

#### 2. ビームスクレーパ

2015年6月まで、ビーム入射角が 45度のスクレーパヘッド(以下、45deg スクレーパ)へを用いていたが、ビームの照射面積を拡げて、スクレーパ表面のピーク温度を下げるため、ビーム入射角 67度を有するスクレーパヘッド[2](以下、67deg スクレーパという)を設置した。

2015年10月から2016年7月2日まで使用した 67deg スクレーパを Figure 1 に示す。

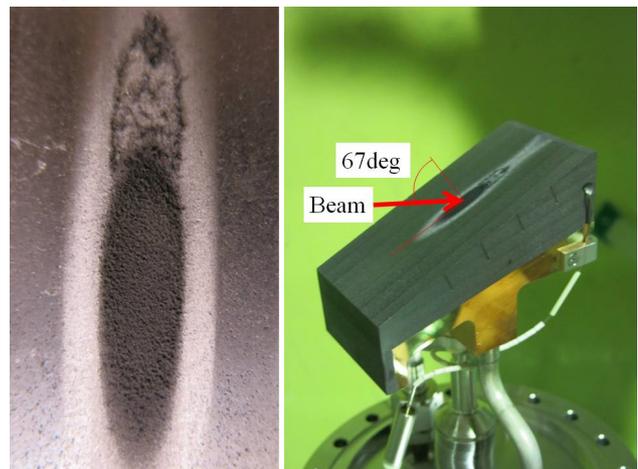


Figure 1: The photograph of damaged part on a beam scraper with beam incidence angle of 67deg.

## 2.1 スクレーパー表面温度測定

スクレーパーヘッド表面温度を測定する体系を Figure 2 に示す。スクレーパーヘッド表面温度の測定には、高速放射温度計 (IMPAC 社製、IGA740-LO) を用いた。この放射温度計は、350~3500°C の温度範囲で  $6\ \mu\text{s}$  の応答速度を有するため、パルス幅  $500\ \mu\text{s}$  内で、温度の過渡変化を測定できる。また、放射温度計から 320 mm 離れたスクレーパーヘッド表面での測定スポットサイズは  $\Phi 2\ \text{mm}$  であり、その領域内の平均温度を測定できる。

Figure 2 に示すステッピングモーターアクチュエータ付きミラーの回転軸、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、ヘッドの表面をスキャンできるようにした。これを用いて、ヘッドの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。

放射温度計の較正は 2 色温度計を用いた。2 色温度計は測定体と測定器の間にのぞき窓などの物質が介在してもその透過率の影響を受けずに温度測定ができる特徴を有する。C/C 材 ( $20 \times 20 \times 1\ \text{mm}$ )、サファイヤ窓、金平面ミラー、および、放射温度計を用いて、スクレーパーヘッド表面温度測定体系と同じ配置になるように設置して、放射温度計の較正を行った。ヒーター上に  $20 \times 20 \times 1\ \text{mm}$  の C/C 材を設置し、放射温度計と 2 色温度計の測定値を比較した。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。

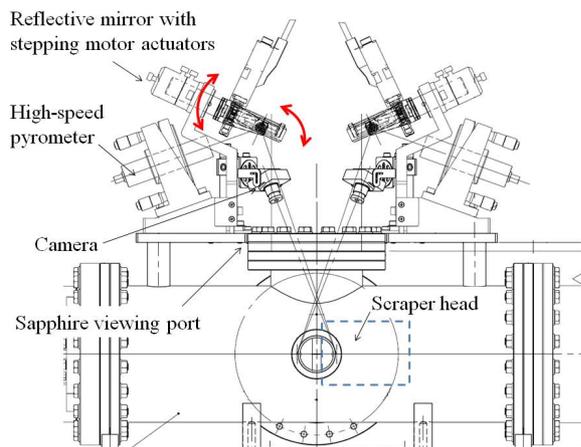


Figure 2: Measurement of the scraper surface temperature distribution.

パルス幅  $500\ \mu\text{s}$ 、繰り返し  $25\text{Hz}$  の条件で  $50\text{mA}$  ビーム運転を行ったとき、 $45$  度スクレーパーおよび  $65$  度スクレーパーの表面温度を測定した。温度波形を Figure 3 に示す。スクレーパー表面の損傷が少ない場合には、 $45$  度スクレーパーのピーク温度が  $1940^\circ\text{C}$  になったのに対して、 $65$  度スクレーパー表面のピーク温度は  $1000^\circ\text{C}$  となった。 $67$  度スクレーパーのピーク温度はビームの照射面積が広がったことによって、 $45$  度スクレーパーより低下した。

パルス幅  $500\ \mu\text{s}$ 、繰り返し  $25\text{Hz}$  の条件で  $40\text{mA}$  ビーム運転を行ったとき、 $65$  度スクレーパーの表面温度を測定した。2015 年 10 月の使用開始から約 3 ヶ月毎に同

条件で測定したときの温度波形を Figure 4 に示す。当初、ピーク温度の最大値は  $1000^\circ\text{C}$  であったが、照射粒子数が増加すると、表面の損傷が進み、表面の熱伝導が悪くなるとともに、ピーク温度は  $2100^\circ\text{C}$  まで増加した。その後、照射粒子数が増加してもピーク温度は変化しなかったが、粒子数が  $1.16\text{E}22$  個の時の温度の減衰は  $3\text{E}21$  個の場合よりわずかに早くなっていた。

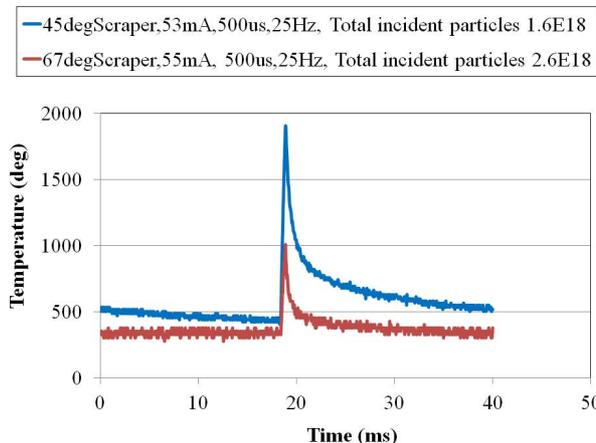


Figure 3: Waveform of the scraper surface temperature measured by the high-speed pyrometer.

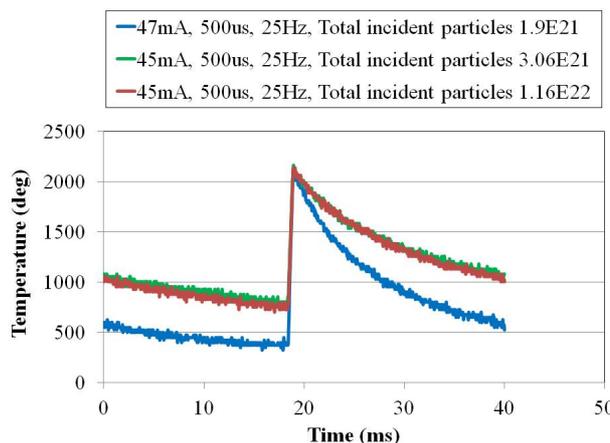


Figure 4: Temperature rise due to irradiation damage of 67deg scraper.

## 2.2 スクレーパー表面観察

$67$  度スクレーパーには、総粒子数  $1.47\text{E}22$  個のビームを照射した。ビーム照射後のスクレーパー表面の損傷状態を Figure 1 に示す。レーザーマイクロスコープを用いて、損傷部の観察を行った。Figure 5 に示すように、ビームが当たった場所の外周部は、幅  $100 \sim 220\ \mu\text{m}$  の突起物が表面から高さ  $350 \sim 500\ \mu\text{m}$  まで剣山のように突き出ていた。ビームが照射された中心部は表面から  $150\ \mu\text{m}$  深くなっていた。 $45$  度スクレーパーの損傷部は、 $300\ \mu\text{m}$  の深さまで脆くなっていたので、今回も同程度かそれ以上の深さまで損傷が及んでいると思われる。

Figure 4 に示す照射粒子数の増加に伴って、スクレーパ表面のピーク温度が増加したのは、剣山状の突起部分の発生によって、表面の熱伝導率が減少したことが原因である。また、照射粒子数が  $3.1 \times 10^{21}$  から  $1.2 \times 10^{22}$  へ増加したときに、温度の減衰がわずかながら早くなったことから、温度を測定している中心部の突起部の高さが低くなったことによって、表面の熱伝導率が変化したと推測される。この 67 度スクレーパは、後述する 3MeV リニアックを用いて、再度照射試験を実施し、今後の状態変化を観測する予定である。

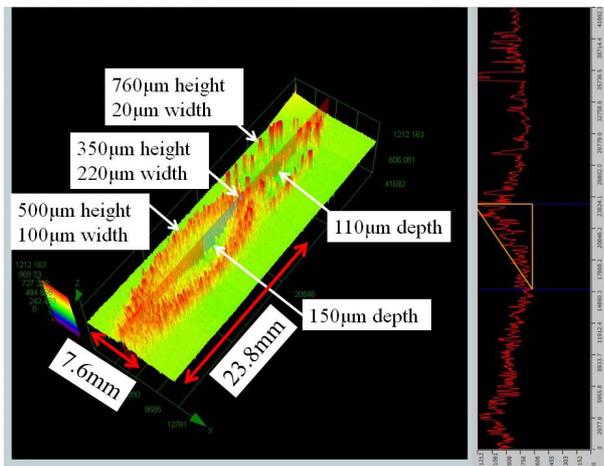


Figure 5: Observation of the 67deg scraper surface using the laser microscope.

### 3. 3MeV リニアック

J-PARC リニアック (以下、実機という) では、スクレーパヘッドを破壊するようなビーム照射試験を行うことはできない。そこで、スクレーパの耐電力を調べるため、スクレーパヘッドのビーム照射試験ができる 3MeV リニアックを J-PARC リニアック棟に構築した。3MeV リニアックを Figure 6 に示す。3MeV リニアックでは、スクレーパ照射試験のほか、ビームコンポーネントのビーム試験やレーザーを使用した荷電変換試験[3]も実施できる体系にした。また、ビーム加速試験を行わない場合は、RFQ のコンディショニング、イオン源の調整運転、および、レーザーの調整運転等を同時に実施できるインターロックシステム[4]を構築した。

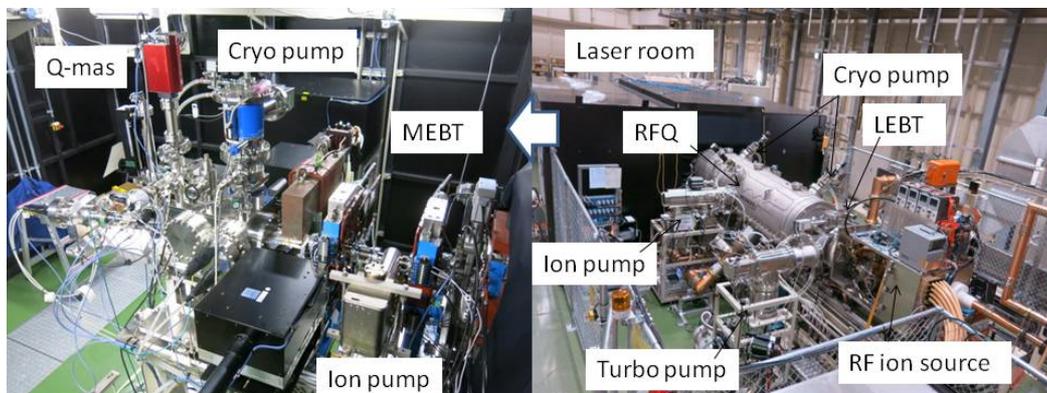


Figure 6: The photograph of the 3MeV linac.

#### 3.1 リニアック構成

3MeV リニアックの RFQ は 2015 年に実機のビームラインから撤去した I 号機[5]を再利用した。RFQ には、ULVAC 製クライオポンプ (CRYO-U10H)2 台、800L/s イオンポンプ、および、400L/s イオンポンプを接続した。イオン源は実機と同じセシウム添加高周波駆動型負水素イオン源[6]を使用しており、最大電流 60mA を得ることができる。イオン源の真空圧力は  $8 \times 10^{-3}$  Pa であり、イオン源に 1500L/s のターボ分子ポンプを 2 台、LEBT に 500L/s のターボ分子ポンプを 1 台設置して、真空排気を行っている。LEBT のゲートバルブが閉じられている場合は、イオン源の水素ガスが RFQ へ流れ込まないため、RFQ の圧力は  $7 \times 10^{-6}$  Pa となるが、LEBT のゲートバルブが開かれるビーム加速試験の場合には、 $2 \times 10^{-5}$  Pa となる。

Figure 7 に示す RFQ 下流の MEBT は、直線ビームライン、11 度ビームライン及び 23 度ビームラインから構成される。MEBT に使用されている Q 電磁石および BPM 等の各種モニタ[7]は実機で使用しているものと同じ性能を有する。

スクレーパ照射試験では、直線ビームラインを使用し、真空チャンバ内にスクレーパヘッドを設置してビーム照射試験を行う。真空チャンバには ULVAC 製クライオポンプ (CRYO-U6H)、Q-mas、真空ゲージ等を設置した。また、ビームのプロファイルを得るために、真空チャンバの下部に、垂直方向のエミッタンスモニタを設置した。また、側面には水平方向のエミッタンスモニタを設置できるようにポートを設けている。

レーザー荷電変換試験では、加速された粒子は偏向電磁石で曲げられ 23 度ビームライン最下流の 23 度ビームダンプで停止する。レーザー照射により偏向電磁石内で偏向中に中性化 (荷電変換) した一部の粒子は、11 度ビームライン下流の荷電変換膜を通過した後、11 度ビームダンプで停止する。高出力レーザーを加速器のビームラインで使用するため、黒色アルミ板で覆われたレーザー使用室を設置した。

そのほか、実機のオフラインのビーム試験として、2 台の Q 電磁石の 220 mm 間隔にビームコンポーネントを設置し、動作試験を行うことができる。

### 3.2 スクレーパー照射試験時の加速器運転条件

J-PARC リニアックの定格運転時、実機のスクレーパーに照射される1パルスの最大ビーム条件は、最大ビームパルス幅  $500 \mu\text{s}$ 、ビーム電流  $55\text{mA}$  である。これに対して、RFQ I 号機出口のビーム電流は、設計値で  $32\text{mA}$  である。スクレーパー照射試験では、1パルス内の温度上昇に対する評価を行いたいため、できるだけビーム電流を増加させたい。そこで、RFQ I 号機でビーム電流がどのくらい得られるか測定した。RFQ 空洞電力  $320\text{kW}$  (設計値) の状態で、イオン源出口のビーム電流を増加させ、RFQ 出口のビーム電流を測定した。RFQ のビーム透過率に対する RFQ 出口のビーム電流およびイオン源出口のビーム電流を Figure 8 に示す。ビーム透過率が  $80\%$  以下の条件では、イオン源のビーム電流を  $50\text{mA}$  以上増加させても、RFQ 出口のビーム電流は  $40\text{mA}$  程度しか得られないことがわかった。

そこで、ビーム幅を増加させて対応することにした。ビーム加速に必要な RF パルスが得られるように、クライストロン電源を改造し、現状のクライストロン電源のパルス幅  $700 \mu\text{s}$  を  $1.3\text{ms}$  に増加させる。これによって、スクレーパーに照射される1パルス当たりのビーム電流は、ビームパルス幅  $1\text{ms}$ 、ビーム電流  $30\text{mA}$ 、の試験条件で、実機の1パルス最大条件の  $1.09$  倍にすることができる。さらに、 $40\text{mA}$ 、 $800 \mu\text{s}$ 、のビーム条件では、 $1.16$  倍まで増加できる。

しかしながら、現状の  $3\text{MeV}$  リニアックは、運転を始めの間もないため、ビームを安定して加速できる状態になっていない。RFQ のビーム透過率試験を行った時の運転状況を Figure 9 に示す。RFQ 出口電流  $40\text{mA}$  が得られるイオン源出口電流が  $50\text{mA}$  の状態では、1回/分程度の割合でビームが停止した。今後、RFQ 空洞の RF コンディショニングを十分行うとともに、ビーム加速運転の安定度を高める必要がある。

## 4. まとめ

ビーム入射角  $67$  度のスクレーパーでは、従来の  $45\text{deg}$  スクレーパーよりビーム照射面積が広がるため、スクレーパー表面のピーク温度を低減させることができた。表面の照射損傷が進むと、無数の突起物の出現により、熱伝導率が悪くなり、表面温度が上昇した。

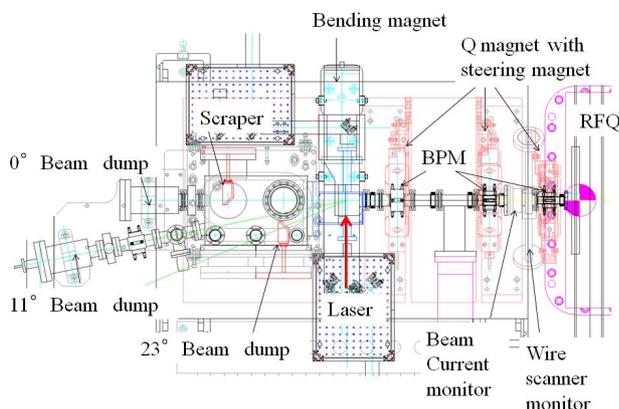


Figure 7: Layout of the MEBT line of the 3MeV linac.

スクレーパーの耐電力を評価するため、 $3\text{MeV}$  リニアックを構築した。スクレーパーの照射試験は、レーザー荷電変換試験を実施した後、2016 年年末からスクレーパー損傷に関する詳細な調査を実施する予定である。

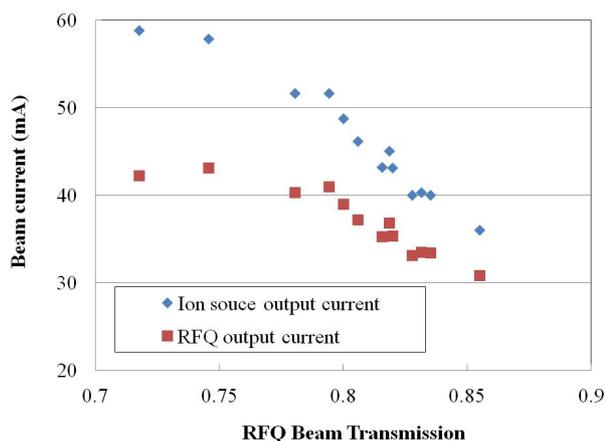


Figure 8: Beam current vs. RFQ beam transmission.

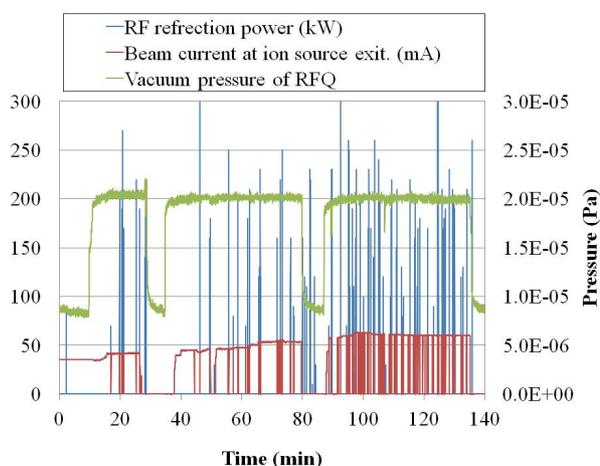


Figure 9: Trend of the RF reflection power and the beam current at the RFQ beam transmission test.

## 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] T. Sugimura, K. Hirano *et al.*, “The heat transfer analysis for a new large entry angled scraper for J-PARC linac”, 12<sup>th</sup> PASJ, 2015.
- [3] H. Takei *et al.*, “Preliminary results of the laser charge exchange test using the 3 MeV linac in J-PARC”, 13<sup>th</sup> PASJ, 2016.
- [4] Y. Sawabe *et al.*, “Development of a control system at a 3 MeV linac in J-PARC”, 13<sup>th</sup> PASJ, 2016.
- [5] Y. Kondo *et al.*, “Particle distributions at the exit of the J-PARC RFQ”, LINAC2004, MOP19.
- [6] K. Ohkoshi *et al.*, “Status of the J-PARC ion source”, 13<sup>th</sup> PASJ, 2016.
- [7] A. Miura *et al.*, “Progress of beam instrumentation in J-PARC”, IBIC2012, MOIA02.