

J-PARC リニアックチョッパシステムの開発 (2)

DEVELOPMENT OF RF CHOPPER SYSTEM AT J-PARC LINAC (2)

平野耕一郎^{#, A)}, 近藤恭弘^{A)}, 川根祐輔^{A)}, 篠崎信一^{A)}, 三浦昭彦^{A)}, 森下卓俊^{A)},
澤邊祐希^{A)}, 杉村高志^{B)}, 内藤富士雄^{B)}, 方志高^{B)}, 福井佑治^{B)}, ニツ川健太^{B)}, 丸田朋史^{B)}, 宮尾智章^{B)}
Koichiro Hirano^{#, A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}, Yusuke Kawane^{A)}, Shinichi Shinozaki^{A)}, Akihiko Miura^{A)},
Takatoshi Morishita^{A)}, Yuki Sawabe^{A)}, Takashi Sugimura^{B)}, Fujio Naito^{B)},
Zhigao Fang^{B)}, Yuji Fukui^{B)}, Kenta Futatsukawa^{B)}, Tomofumi Maruta^{B)}, Tomoaki Miyao^{B)},
^{A)} Japan Atomic Energy Agency
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Two RF-deflecting cavities as a chopper and a beam scraper have been used in the MEBT1 between a 324MHz RFQ and a 50-MeV DTL of the J-PARC Linac. We replaced with a newly fabricated RF chopper to decrease beam loss for the operation with 50mA. We installed two new scrapers to absorb the higher power of the deflected beam by the RF chopper. This paper describes the RF chopper system and beam irradiation test results of the scraper.

1. はじめに

2014年にイオン源、RFQ、及び、MEBT1の改造を行い、ビーム電流を50mAに増強した。現在のJ-PARC リニアックの運転パラメータは、ピーク電流33mA、マクロパルス幅500 μ s、繰り返し25Hz、ビームエネルギー400MeVである。マクロパルスビームは、RFQ下流のMEBT1領域にあるRFチョッパ(RF Deflector、以下、RFDという。)空洞の電極電界によって、その一部が蹴りだされ、楕円構造を持つビームに整形される。この整形されたビームは、パルス幅456nsの中間パルスが815nsの周期で並んだ構造である。一方、蹴りだされたビームは、Figure 1に示すRFD空洞から約70cm離れた場所にあるスクレーパに負荷される。ビーム電流50mAのビームがRFD空洞内部でロスしないように、電極の間隔やビームパイプの内径を上げたRFD空洞を製作した。スクレーパでは、ビーム負荷の増加に伴う損傷が懸念されている。マクロパルス内で上昇するスクレーパ表面温度を低減させるため、RFD空洞の電極電界の位相を180度反転させ、Figure 1のように、対向した2台のスクレーパ(以下、タンデムスクレーパという。)に、パルス幅500 μ s内のビームを振り分けて照射させる体系を構築した。今回は、2014年にMEBT1ビームラインに設置した新RFチョッパ空洞、及び、タンデムスクレーパに関するチョッパシステムの改造、及び、MEBT1で使用したスクレーパのビーム照射試験について報告する。

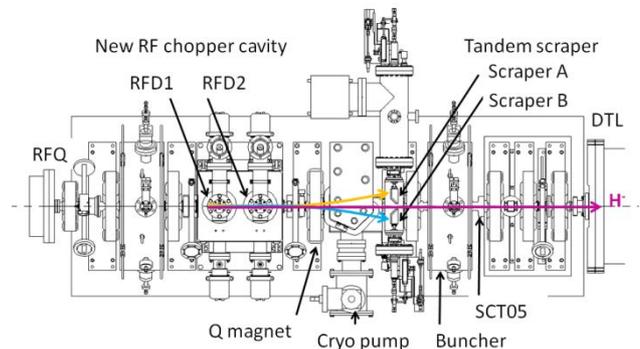


Figure 1: Layout of a new RF chopper cavity and a tandem scraper in the MEBT.

2. RF チョッパ (RFD)

今回製作した新チョッパ空洞(三菱重工三原製作所製)をFigure 2に示す。RFD空洞は、大きなカップリング係数を持つ入出力用の2本の高周波ループを持つ。この空洞は、電磁場解析コードHFSSを用いて電気設計^[1]を行い、最終的に、高周波ループの形状を変えて、周波数調整を行った。

ビームハローを含めたビーム位相方向の全幅測定を行った結果、ビーム電流50mAでは、位相長150degの範囲にビームが存在すると推測された。十分な蹴り角を得るには、空洞電力103kWの時に電極電界が2.6MV/m以上必要である。このため、ビームが当たらないように、RFD空洞の電極間隔、及び、その両端部のビームパイプの内径を広げて、電極間隔を14mm、ビームパイプの内径を24mmとした。

上流側のRFD1空洞は下流側のRFD2空洞と同軸管で直列に連結している。2空洞を連結した体系の電磁場分布をFigure 3に示す。これらの空洞の電極

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

電界の位相が一致するように、連結管の長さを計算で求めた。ビーム軸上にある空洞の間隔は、 $3\beta\lambda$ であるため、2空洞の位相が一致すると、ビームは各空洞の電極電界によって最大限蹴られる。

RFD 空洞を連結した時の S11 の真空状態の測定値を Figure 4、S21 を Figure 5 に示す。324MHz で VSWR は 1.02、Q 値は 12 となった。

RF 窓は、フェローテック製 AM997Q を使用した。T スタブの内軸部に 2 重冷却管を通し、RF ループが接続される同軸管の内軸部分と RF 窓のセラミックス部を水冷した。各 RFD 空洞に、45L/s のイオンポンプを 2 台設置した。ビーム運転時の空洞の圧力は、 $1.5E-5$ Pa となった。

RF 源として、ピーク電力が 120kW の半導体アンプ^[2] (R&D 製) を製作した。このアンプの RF パルス出力波形の立ち上がり、及び、立ち下がるの時間は 16ns である。半導体アンプを設置し、EIA フランジ付きの 77D 同軸管(日本高周波製)を RFD 空洞の入力側に接続した。また、RFD2 空洞の出力側に水冷式ダミーロード (日本高周波製、ピーク電力 150kW、3%デューティ) を接続した。

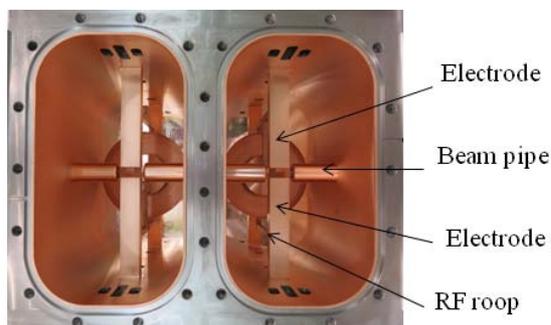


Figure 2: Top view inside the RFD cavities.

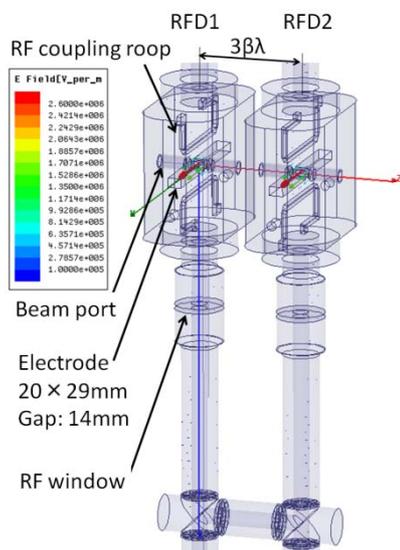


Figure 3: Electric field distribution in two RFD cavities connected with a coaxial waveguide.

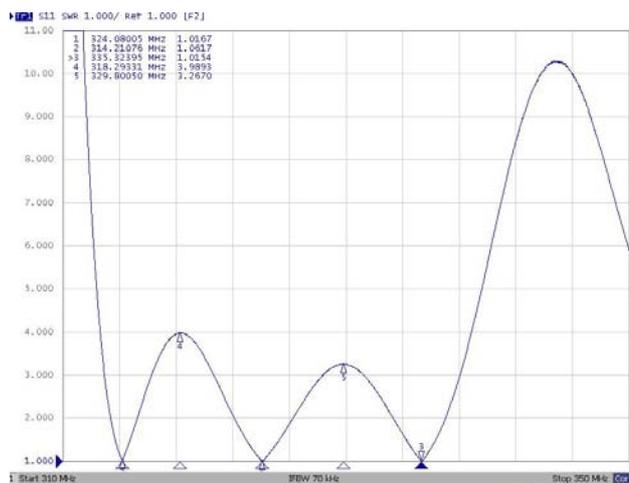


Figure 4: Measured S11 spectrum of two RFD cavities connected with a coaxial waveguide.

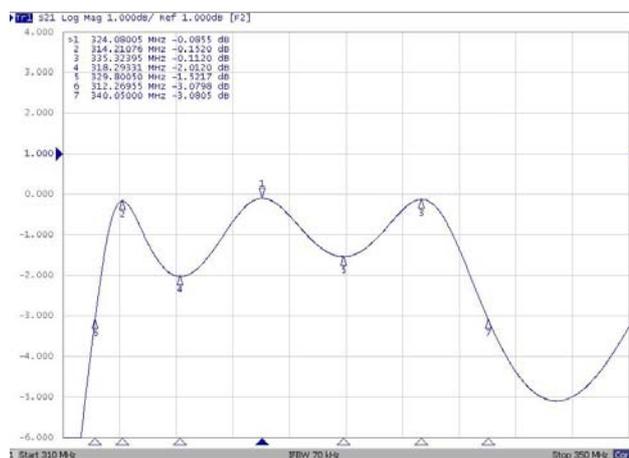


Figure 5: Measured S21 spectrum of two RFD cavities connected with a coaxial waveguide. It shows the resonant frequency $f_0=324$ MHz and the bandwidth $\Delta f=28$ MHz. The loaded $Q=12$.

3. タンデムスクレーパ

スクレーパヘッドには、厚さ 5mm の炭素複合材である C/C コンポジット、東洋炭素製 CX2002-U (以下、C/C 材という) を使用した。C/C 材は水冷した銅ブロック上にロウ付けし、ビームに対して 45 度傾けて設置した。パルス幅 $500\mu s$ の過渡状態の伝熱解析^[3]を行った結果、スクレーパヘッド表面のピーク温度は $2200^\circ C$ となった。ビーム負荷の増加に伴う損傷が懸念される。そこで、スクレーパへのビーム負荷軽減のため、対向した 2 台のスクレーパに、パルス幅 $500\mu s$ 内のビームを振り分けて照射させる体系を構築した。Figure 1 のように、2 台のスクレーパは、ビーム軸上流側から見て左側をスクレーパ A、右側をスクレーパ B とした。

スクレーパヘッドは、照射時のビーム電流を測定できるように絶縁されている。スクレーパヘッドのビーム電流を粒子数カウンタに入力し、スクレーパに照射された粒子数の総量^[4]を得ている。

RF 電力が RFD 空洞内に無いタイミングで、中間パルスが作られる。スクレーパ下流に設置している電流モニタ SCT05 で、ビーム電流 50mA の中間パルスのビーム電流波形 (ch3) を測定した。その波形を Figure 6 に示す。ローレベル RF システム^[5]のモジュールを使用して、RF 電力が RFD 空洞内に無いタイミングで、RF の位相を 180 度反転させた。この結果、Figure 6 に示すように、スクレーパ A の電流波形 (ch1)、及び、スクレーパ B の電流波形 (ch2) が交互に観測された。電極電界の位相が中間パルス毎に 180 度反転されることによって、ビームは 2 台のスクレーパへ交互に照射された。

このシステムは、スクレーパへのビーム負荷を半減できるため、50mA のビーム利用運転において、本格的な運用を計画している。

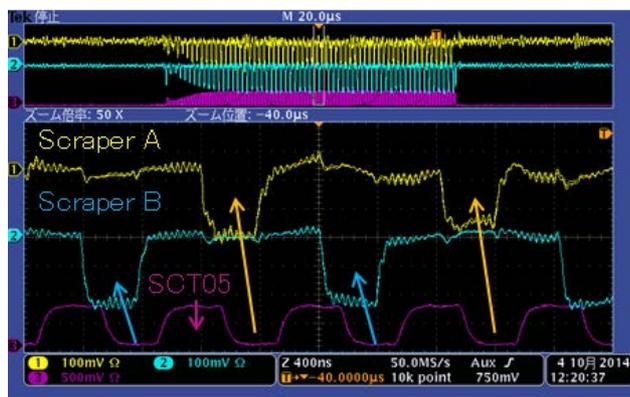


Figure 6: Waveforms of scraper beam current and intermediate pulse with a peak beam current of 50mA.

4. スクレーパビーム照射試験

スクレーパヘッド表面の温度を測定する体系を Figure 7 に示す。スクレーパヘッド表面温度は、高速放射温度計 (IMPAC 社製、IGA740-LO) を用いて測定した。この放射温度計は、300~2300°C の温度範囲で 6 μ s の応答速度を有するため、パルス幅 500 μ 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 離れた位置での測定スポットサイズは Φ 2 mm であり、その領域内の平均温度を測定できる。サファイヤ窓を通して、真空内の温度を測定するため、放射温度計の較正が必要である。そこで、C/C 材 (20 \times 20 \times 1 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 mm の C/C 材を設置し、その表面に K 熱電対を取り付け、K 熱電対と放射温度計の測定値を比較した。放射温度計の測定値が K 熱電対の測定値 424°C と同じになるように、放射温度計の放射率を 0.3 に設定した。

Figure 7 に示すステッピングモータ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

度分布を測定した。

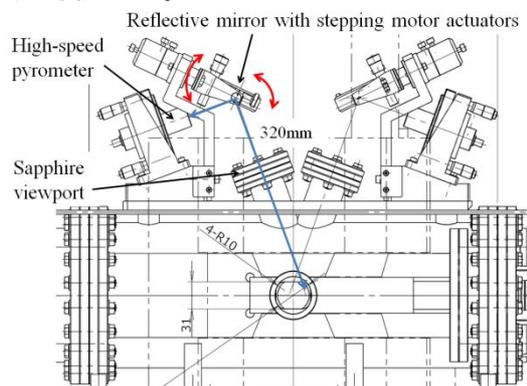


Figure 7: Measurement of the scraper surface temperature distribution.

4.1 ビーム照射位置

RFD 空洞電力 114kW、繰り返し 5Hz、パルス幅 500 μ s、ビーム電流 34mA、の運転条件で、スクレーパ B にビームを照射した。ビームがスクレーパヘッドに当たった場所は、Figure 8 に示すように高温になり、発光した。この付近のピーク温度分布を Figure 9 に示す。ピーク温度分布の中の最大温度 1310°C の場所は、Figure 10 に示す測定スポットが示す位置であり、ビーム軸から 27mm 離れていた。ビームが当たるスクレーパ上の設計位置は 26mm であり、ほぼ設計通り、ビームを振ることができた。

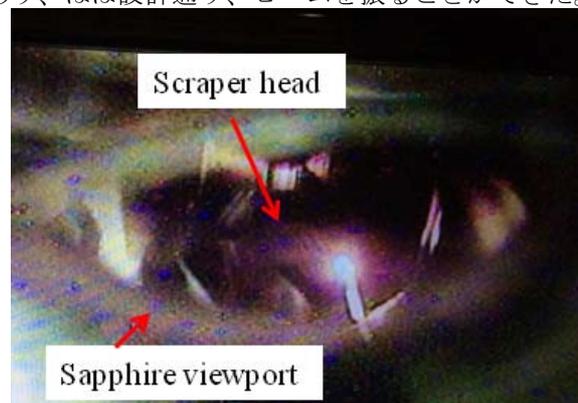


Figure 8: Black body radiation of the scraper head.

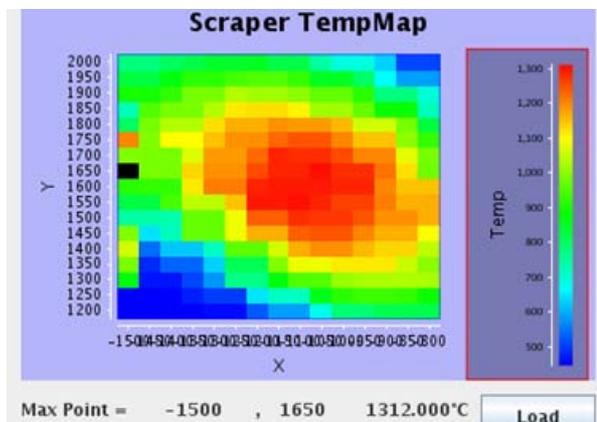


Figure 9: the scraper surface temperature distribution.

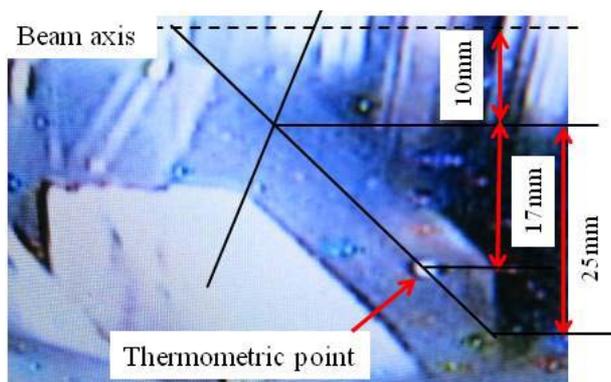


Figure 10: Photograph of thermometric point on the scraper head.

4.2 スクレーパー表面観察

スクレーパー B に、ピーク電流 33mA、マクロパルス繰り返し 25Hz、粒子数 $5.1E21$ 個のビームを約 3 ヶ月間照射した。この期間、最大ピーク温度が得られる場所の温度波形を連続的に測定した。Figure 11 に示すように、時間経過とともに、温度波形のピーク温度は、増加した。また、温度は次のパルスまでに下がりきらなくなった。放射温度計は 2300°C 以上測定できないため、測定終盤のピーク温度は測定できていないが、温度の減衰曲線から推測すると、2500°C に達したと思われる。ヘッドの損傷具合を確認するため、2014 年 12 月にヘッドを取り出し、レーザマイクロスコプを用いて、表面観察を行った。Figure 12 に示すように、ビームが当たって損傷した部分は、幅 $100\mu\text{m}$ の突起物が表面から $200\mu\text{m}$ の高さまで剣山のように突き出ていた。また、ピンセットで深さ $300\mu\text{m}$ まで簡単に取り除くことができた。剣山部分によって、表面の熱伝導率が悪化し、ピーク温度が増加したと思われる。剣山のような損傷部は昇華した炭素が再結晶化し、成長したように思われるが、正確なことは分かっていない。

4. まとめ

電極電界 2.7MV/m を有するチョップア空洞を製作し、この空洞の電極電界によって、ビームがスクレーパーへ設計通り蹴られることを確認した。空洞の RF 位相を 180 度反転させ、タンデムスクレーパーにビームを照射し、ビームが中間パルス毎に振り分けられることを確認した。スクレーパーに粒子数 $5.1E21$ 個を照射することによって、 $300\mu\text{m}$ 程度損傷することが分かった。今後、50mA ビーム利用運転に向けて、位相を反転させるローレベル RF システムを準備する。さらに、ヘッドの表面温度を低減させるため、ビームの入射角が 67 度のスクレーパーヘッド^[6]を製作し、ビームラインへ設置する予定である。

謝辞

スクレーパー温度測定、ミラー制御に関して、三菱電機システムサービスの石山達也氏に多大なるご協力を頂きました。

参考文献

- [1] K. Hirano, et al., "Development of RF chopper system at J-PRAC Linac", 10th PASJ, 2013.
- [2] K. Futatsukawa, et al., "Chopper Operation for the Tandem Scrapers at the J-PARC Linac", LINAC2014, TUPP067
- [3] T. Sugimura, K. Hirano, et al., "Development of a 3MeV beam scraper for the J-PARC Linac", 10th PASJ, 2013.
- [4] Y. Kawane, et al., "Interlock system of beam line for beam current upgrade", 11th PASJ, 2014.
- [5] Z. Fang, et al., "Low Level RF Systems for J-PARC Linac 50-mA Operation", IPAC 2015, USA, May 2015.
- [6] T. Sugimura, et al., "The heat transfer analysis for a new large entry angled scraper for J-PARC Linac", 12th PASJ, 2015.

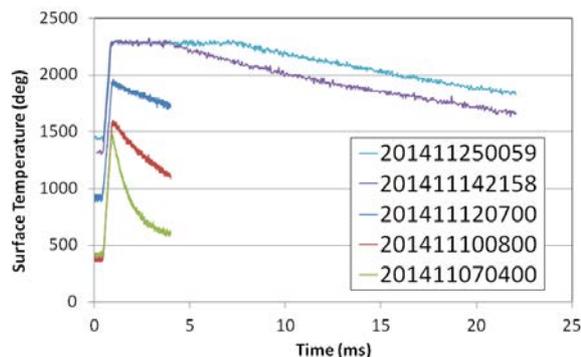


Figure 11: Waveforms of the scraper surface temperature measured by the high-speed pyrometer.

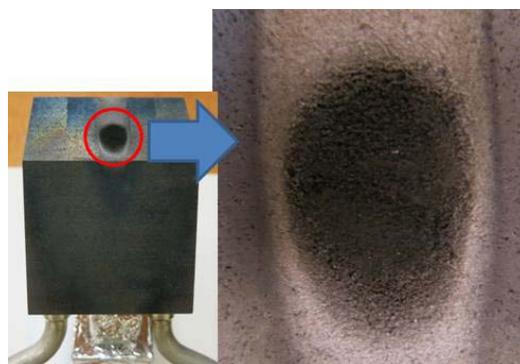


Figure 12: The photograph of damaged part on a scraper head.

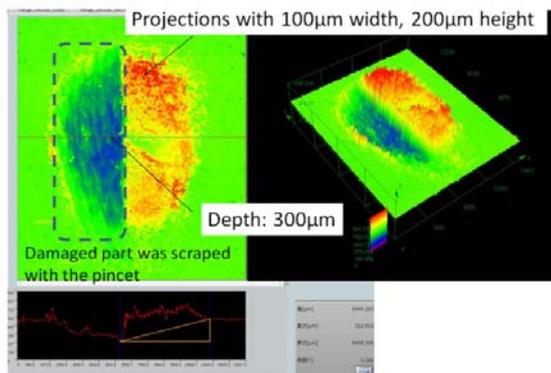


Figure 13: Observation of the scraper surface using the laser microscope.