

J-PARC リニアックチョップパシステムの開発

DEVELOPMENT OF RF CHOPPER SYSTEM AT J-PARC LINAC

平野耕一郎^{#,A)}, 伊藤崇^{A)}, 近藤恭弘^{A)}, 篠崎信一^{A)}, 千代悦司^{A)}, 三浦昭彦^{A)}, 森下卓俊^{A)},
池上雅紀^{B)}, 久保田親^{B)}, 杉村高志^{B)}, 内藤富士雄^{B)}, 南茂今朝雄^{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)}, Takashi Itou^{A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}, Shinichi Shinozaki^{A)}, Etsuji Chishiro^{A)}, Akihiko Miura^{A)},
Takatoshi Morishita^{A)}, Masanori Ikegami^{B)}, Chikashi Kubota^{B)}, Takashi Sugimura^{B)}, Fujio Naito^{B)}, Kesao Nanmo^{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 MEBT between a 324MHz RFQ and a 50-MeV DTL of the J-PARC Linac. We plan to increase a peak beam current up to 50mA by replacing an ion source and a RFQ after the summer shutdown in 2014. Beam loss occurs in the RF chopper for the 50mA operation. Moreover, the beam scraper cannot fully stand the beam load with 50mA, 500 μ s, 3MeV, and 25Hz. We have studied the new RF chopper cavity by using HFSS code and the tandem scraper system with two scrapers.

1. はじめに

J-PARC リニアックの運転パラメータは、ピーク電流 17mA、マクロパルス幅 500 μ s、繰り返し 25Hz、ビームエネルギー181MeV である。マクロパルスビームは、RFQ 下流の MEBT 領域にある RF チョップパ^[1]の (RF Deflector、以下、RFD という。)空洞の電極間電界によって、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 600ns の中間パルスが 1066ns 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 RF チョップパ空腔から約 70cm 離れた場所にあるスクレーパに負荷される。チョップパを含む現行のリニアックの全システムは、J-PARC の前身の一つである JHF 計画の 30mA リニアックに対応して設計されている。しかし、J-PARC は、今後、イオン源、及び、RFQ の改造、並びに、加速管の増設を行い、ビーム電流を 50mA、ビームエネルギーを 400MeV に増強する計画である。その際に、DTL-SDTL は対応できるが、RF チョップパ空腔では、ビーム電流 50mA のビームシミュレーション^[2]によると、ビームが現状の電極 (間隔 10mm) や内径 14mm のビームパイプに当たる結果が得られている。また、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る。そこで、ビーム電流 50mA に対応した MEBT ビームラインに改造する計画である。今回は、RF チョップパ空腔やスクレーパ等に関するチョップパシステムの改造について報告する。

2. RF チョップパ (RFD)

既設 RF チョップパ空腔の電極間電界の設計値は、空腔電力 22kW の時、1.6kV/m である。しかし、ビームの蹴り残しに起因したビームロスが RCS で観測されたので、チョップパンプのパワを 35kW に増加させ、ビームの蹴り角を大きくしてビームロスを低減させた運転を行っている。ビデオスコープで電極を観察したところ、ビームの一部が電極に当たったことによる変色があった。

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^[3]の範囲にビームが存在すると推測される。十分な蹴り角を得るには、電極間電界が 2.6MV/m 以上必要である。このため、RFD 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、ビームが当たらないように、電極間隔 14mm、ビームパイプの内径 24mm の RF チョップパ空腔を製作する。

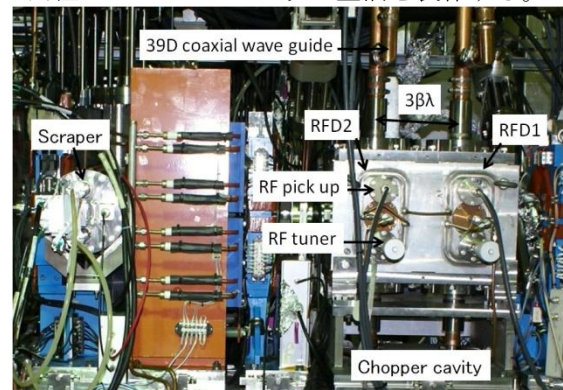


Figure 1: Layout of a chopper cavity and a scraper in the MEBT.

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

電磁場解析コード HFSS を用い、新しい RF チョップカ空洞の詳細設計を実施中である。現在検討中の RFD 空洞を Figure 2 に示す。この空洞の基本構成は、Figure 1 に示す既設の空洞と同様であり、2 台の RFD を有し、その間隔は、 $3\beta\lambda$ である。RFD 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。また、上流側の RFD1 と下流側の RFD2 は、 $2\beta\lambda$ の長さを有する同軸管で直列に接続する。RFD 空洞のビーム軸上の電界分布の計算結果を Figure 3 に示す。空洞電力が 103kW の時、電極間の最大電界が 2.6MV/m となった。既設空洞には 39D 同軸管を使用していたが、新規空洞では、ピーク電力が増加したため、EIA フランジ付き 77D 同軸管を採用した。また、77D 同軸管と空洞の間の同軸管は、外径、及び、内径を変えてマッチングを取った。

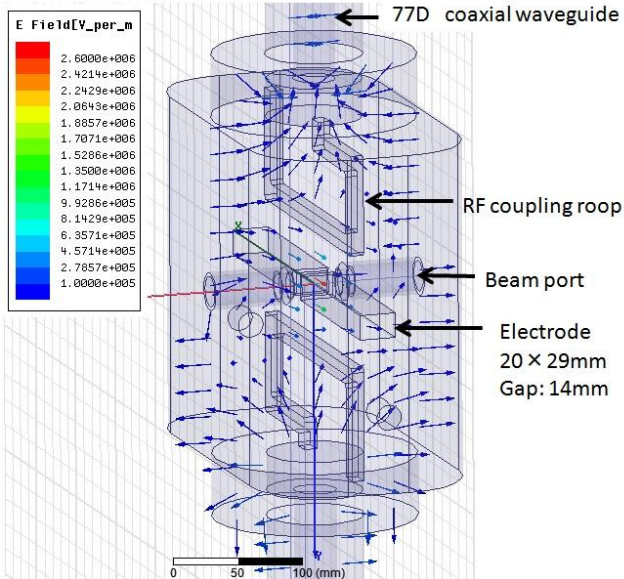


Figure 2: Electric field distribution in the RFD cavity with large coupling loops.

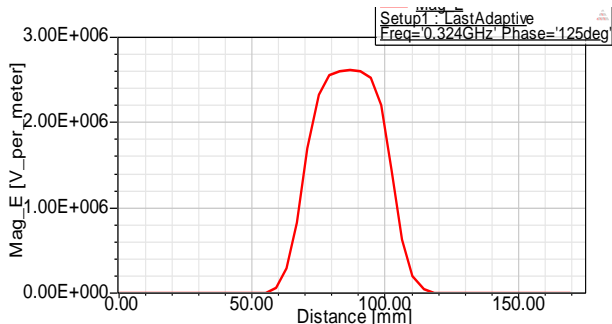


Figure 3: Deflecting electric field distribution on the beam axis from the HFSS code.

周波数に対する S21 を Figure 4 に示す。324MHz の Q 値は、-3dB の周波数幅から求めると、3.7 である。周波数幅は、高次モードの影響で広がっていると考えられるため、Figure 5 に示す入力波形を用い

て過渡期の解析を行い、Q 値を求めた。その結果、電極間電圧の立ち上がり時間は 24ns となり、旧 RFD 空洞の計算値と同程度であることがわかった。この時の Q 値は 12 となった。

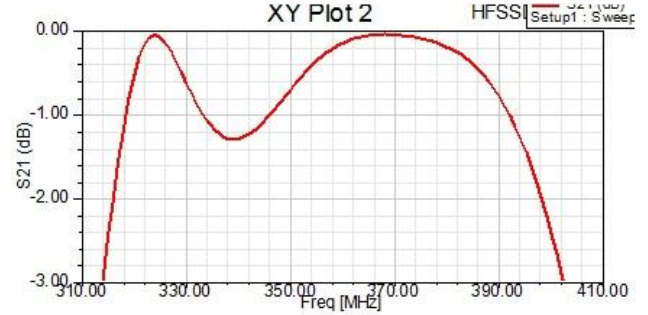


Figure 4: Scattering parameter vs. frequency from HFSS code.

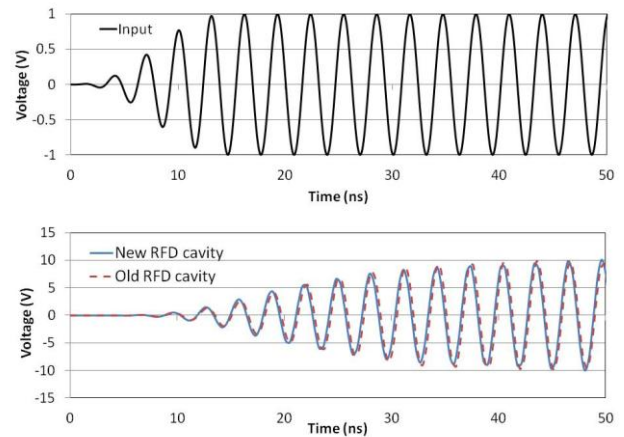


Figure 5: Calculated RF-signal at the deflecting gap of the New RFD cavity and the old RFD cavity during the rise time by using the HFSS transient solver.

旧空洞内の圧力はビーム運転時、 $1E-4$ Pa である。圧力改善のため、旧空洞の $\Phi 34$ 排気ポートを、新空洞では、 $\Phi 60$ のスリット付き排気ポートに換えて、コンダクタンスを 3 倍を増やす。

新空洞の共振周波数は、空洞の製作時にビームラインと水平方向の空洞壁を加工することで粗調整し、最終的には、RF ループの寸法を変えることによって微調整して、324MHz に合わせることを検討している。

旧空洞に使用している RF カップリングループは、幅 10mm、厚さ 3mm である。ループ部のパワロスを低減させるため、ループ形状を検討している。空洞電力 103kW の時に電極間電界が 2.6MV/m になるようにループ寸法を変更した。また、空洞の水平方向の寸法を調整して、共振周波数が 323.9MHz になった時のパワロスを計算した。表皮効果を考慮し、壁厚は 0.1mm に設定した。空洞内表面ロス密度分布を Figure 6 に示す。ループ形状が厚さ 3mm、幅 10mm、及び、対向するループとの間隔 100mm である場合、

空洞電力 103kW、デューティ 3%の空洞全体のパワロスは 42W、ループ部のパワロスは 7.1W となった。一方、ループ部の幅は同じで、厚さを 15mm に増やし、対向するループとの間隔を 90mm にすると、ループ部の表面ロス密度が全体的に下がった。この時、全体のパワロスは 36W、ループ部のパワロスは 4.0W となった。

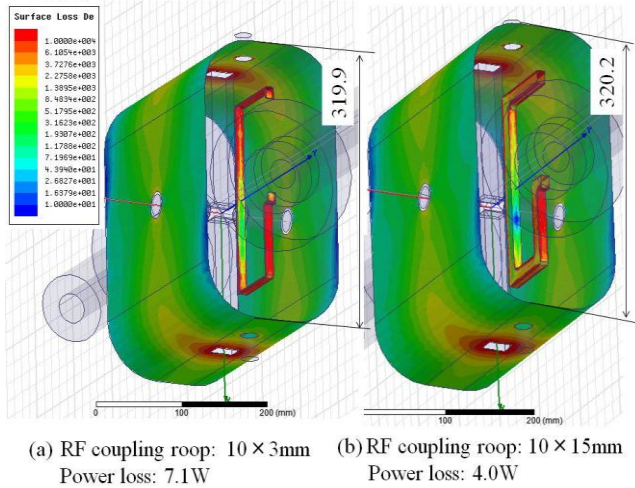


Figure 6: Surface loss density distribution in the RFD cavity.

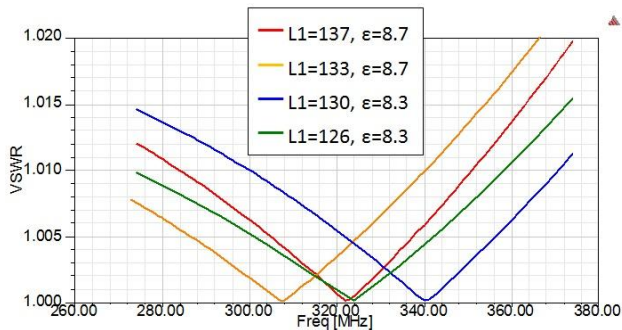


Figure 7: Calculated VSWR for the ceramic window.

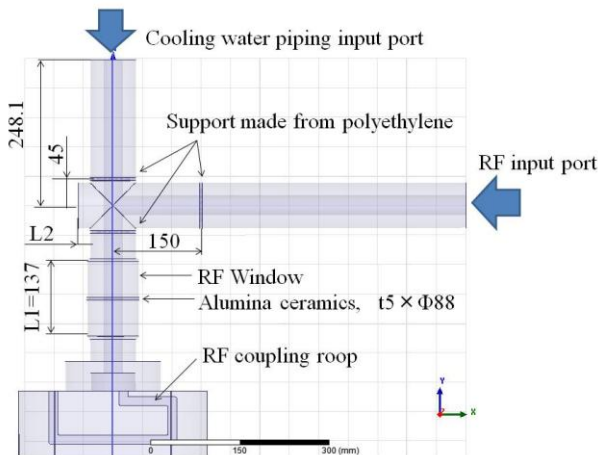


Figure 8: Schematic view of the RFD cavity with the T-stub and the RF window.

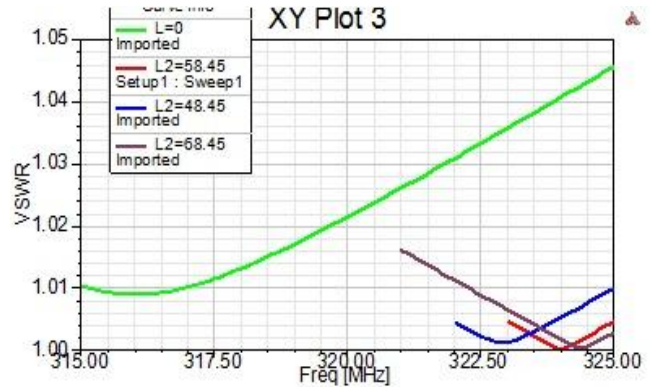


Figure 9: Calculated VSWR for the T-stub.

RF 窓には、日本特殊陶業製 HA95 のアルミナを使用する。VSWR が最小となる周波数は、セラミックスの誘電率によって Figure 7 に示すように変化する。VSWR が 324MHz で最少となる窓の円筒部の長さ L_1 を決めるため、RF 窓の製作前に使用するセラミックスの誘電率を確認する必要がある。

RF 窓のパワロスは入力電力 103kW、デューティ 3%の時、0.42W であった。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冷却するため、Figure 8 に示すような T スタブを採用する。矢印が示す T スタブ端部の方向から冷却管を内軸に通して冷却する。T スタブの形状は、VSWR が 324MHz で最小になるように、スタブ端面、同軸管内軸をサポートするポリエチレンの位置、及び、Figure 8 に示す L_2 の長さを調整して求めた。T スタブの VSWR の計算値を Figure 9 に示す。

RF 源として、ピーク電力が 120kW の半導体アンプを製作中である。このアンプの RF パルス出力波形の立ち上がり、及び、立ち下がり目標時間を 15ns としている。H25 年度に、半導体アンプ、及び、EIA フランジ付きの 77D 同軸管を準備し、H26 年度に、新規チョッパ空洞をビームラインに設置する計画である。

3. タンデムスクレーパ

2012 年に交換した使用済みのスクレーパヘッドを Figure 10 に示す。スクレーパヘッドのビームが当たる場所に厚さ 5mm の炭素複合材である C/C コンポジット (以下、C/C 材という) を使用している。C/C 材の熱伝導率は 390W/mK であり、銅とほぼ同じ熱伝導率を有する。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 度傾けて設置している。

ビームエネルギー 3MeV、ピーク電流 17mA、繰り返し 25Hz、パルス幅 500 μ s の全ビームのうち、設計上、加速されるビームは 56%、スクレーパに負荷されるビームは 44% である。通常の加速器運転では、スクレーパの負荷は 47% であり、このときのビーム 1σ (2.2mm \times 3mm) 内の単位面積当たりの熱負荷は、10MW/m² 程度になる。ビームが当たる中心部は深

さ 1mm の損傷があった。損傷の原因として、水素が隙間に入り込んで膨らむブリストリング、熱疲労、スパッタリング、及び、高温における励起水素と反応^[4]によるガス化などが考えられる。

H26 年度に、ビームのピーク電流を 50mA に増加する予定であるため、スクレーパの損傷がさらにひどくなるのが考えられる。そこで、Figure 11 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）にビームを照射させる体系を検討している。ビームエネルギー400MeV の加速器運転時のビームは、Figure 11 の③に示すようにパルス幅 456ns の中間パルスが 815ns 周期で並んだ構造を持つ。また、RF 電力がチョップ空洞に無い時、DTL 空洞へ入射する。そこで、ローレベル RF システムのモジュールを使用して、RF 電力がチョップ空洞内に無いタイミングで、RF の位相を 180 度反転させる。これにより、中間パルス毎に、電極間電界の位相が 180 度反転するため、Figure 11 の①及び②に示すように、ビームは 2 台のスクレーパへ交互に照射される。

このシステムにより、スクレーパに当たるビームのパルス幅 500 μ s 内の熱負荷を半減させることができるため、パルス内のピーク温度の上昇を半減させて、スクレーパが耐えられる条件を作り出す。

ピーク電流 50mA、パルス幅 500 μ s、繰り返し 25Hz の加速器運転において、ビームパルス幅内の熱負荷を半減させることを行った場合について、ANSYS コードを用いて伝熱解析^[5]を行った。解析の詳細については、リファレンスを参照して頂きたい。解析の結果、C/C 材を用いたスクレーパ表面の定常状態の最大温度は 120°C、また、過渡状態の最大温度は 480°C となった。ピーク電流 50mA、パルス幅 500 μ s、繰り返し 25Hz の加速器運転条件において、タンデムスクレーパは耐えられるのではないかと考えている。

新規チョップ空洞を H26 年度に設置するタイミングに合わせて、タンデムスクレーパの体系に変更する予定である。また、ビーム増強に伴い、スクレーパチャンバ内の圧力増加が懸念されるため、コンダクタンス 300L/s の排気ポート付きのスクレーパチャンバに交換して、真空強化を行う。

4. まとめ

スクレーパへビームを蹴るために必要な電極電界 2.6MV/m を有するチョップ空洞の電磁場解析を行った。ピーク電流 50mA、繰り返し 25Hz の運転では、タンデムスクレーパを使用することにより、スクレーパの熱負荷を低減できると期待される。今後、新規チョップ空洞の詳細設計を進め、製作を行う予定である。また、位相を反転させるローレベル RF システムを準備するとともに、タンデムスクレーパをビームラインへ設置する準備を進める予定である。

参考文献

[1] K. Hirano, et al., “J-PRAC リニアックチョップ空洞の検討”, Proceedings of the 8th Particle Accelerator Society of

Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011

- [2] T. Maruta, M. Ikegami., “Beam dynamics design of 3MeV medium energy beam transport for beam intensity upgrade of J-PARC linac”, IPAC13, 2012.
 [3] T. Maruta, M. Ikegami., Nucl. Instr. Meth. A728 (2013) 126.
 [4] 真田雄三., “励起された原子種と炭素の反応”, 炭素学会会誌, Vol.1968, No.55 (1968).
 [5] T. Sugimura, K. Hirano, et al., “Development of a 3MeV beam scraper for the J-PARC Linac”, 10th PASJ, 2013.

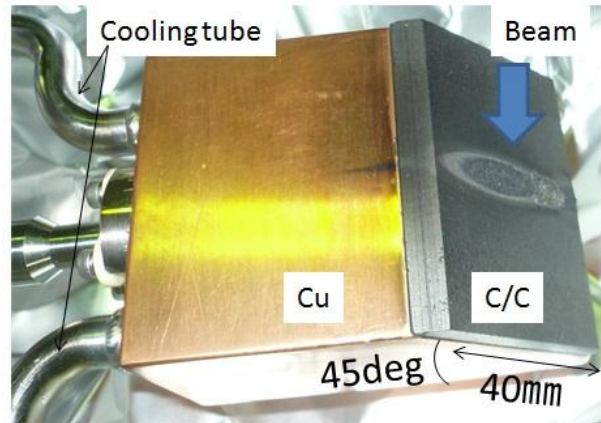


Figure 10: The photograph of a scraper head.

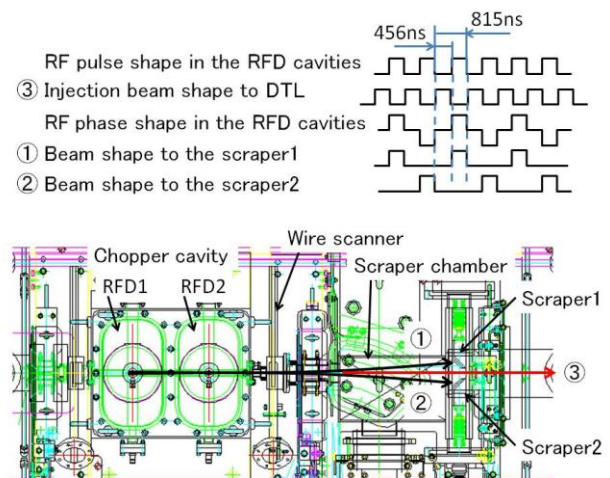


Figure 11: Deflecting scheme and layout of the MEBT line with ‘Tandem’ scraper