

# J-PARC LINAC におけるビームパルス定義変更によるビームロス低減 BEAM LOSS MITIGATION BY THE MODIFICATION OF THE BEAM PULSE DEFINITION IN THE J-PARC LINAC.

澤邊祐希<sup>#, A)</sup>, 丸田朋史<sup>B)</sup>, Liu Yong<sup>B)</sup>, 三浦昭彦<sup>A)</sup>, 宮尾智章<sup>B)</sup>, 石山達也<sup>A)</sup>, 菊澤信宏<sup>A)</sup>, 林直樹<sup>A)</sup>  
Yuki Sawabe<sup>#, A)</sup>, Tomofumi Maruta<sup>B)</sup>, Yong Liu<sup>B)</sup>, Akihiko Miura<sup>A)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>B)</sup>,  
Tatsuya Ishiyama<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kikuzawa<sup>A)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>  
A) JAEA, B) KEK

## Abstract

The J-PARC linac supplies the beam of which pulse width and repetition are 500 usec and 25 Hz, respectively. During the first linac single beam study after the front-end replacement, we noticed that there is a beam loss immediately after a pulse. As a result of the beam study, the transient RF field in the RFQ causes the beam loss. Since the pulse end is determined by the decline of RFQ RF field, the transient RFQ RF accelerates significant amount of beam. This beam is different property and it cannot be scraped by the RF chopper system. As a countermeasure of the beam loss, we consider changing the timing of RFQ RF and definition of the pulse end. In this presentation, we report the modification of timing parameters, and the results of the verification associated with the modification of the pulse definition.

## 1. はじめに

J-PARC LINAC では、下流の 3GeV シンクロトロン (RCS) にマクロパルス幅 500 $\mu$ s のビームを 400MeV まで加速し、繰返し 25Hz で供給している。LINAC は、RF イオン源、高周波四重極リニアック (RFQ)、ドリフトチューブリニアック (DTL)、機能分離型ドリフトチューブリニアック (SDTL)、環結合型リニアック (ACS) 等で構成され、アークセクションに設置してある偏向電磁石でビームを偏向し、RCS に輸送している。Figure 1 に LINAC 構成の概略を示す。ビーム増強の一環として、2014 年夏季メンテナンス期間中に、フロントエンド部を換装<sup>1)</sup>し、最大ビーム電流を 30mA から 50mA へ向上させた。2014 年 10 月の交換後、最初の LINAC 単独試験において、マクロパルスの終わりに有意なビームロスを発見した。試験の結果、このロスは RFQ に印加している RF が立ち下がる過渡的なタイミングで発生していることが判明した。過渡的なタイミングで加速されたビームは、下流の加速空洞の RF で加速されず、途中でロスしていると推測した。LINAC ではマクロパルスの終

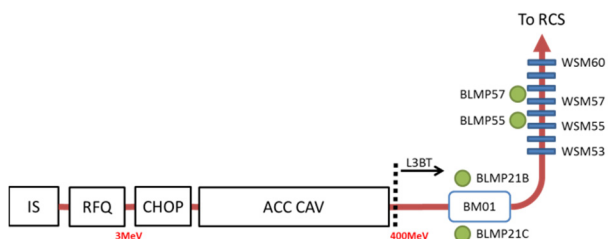


Figure 1: Machine layout at J-PARC LINAC.

わりの定義を、RFQ に印加する RF の立ち下がりとしているため、この定義のままでは、ロスを改善することが困難である。そこで現在、この代わりに、マクロパルスの定義を RFQ 下流のビーム輸送系に設置されたチョッパー空洞<sup>2)</sup>に印加する RF を用いたものへ変更を検討している。過渡的なタイミングで加速されたビームを RFQ の RF タイミング変更によって減らすとともに、チョッパー空洞の RF で偏向し、スクレーパで削り取る。このタイミングの定義を変更することで、ビームロスを完全に除去することに成功した。本発表では、マクロパルスの定義変更に伴うタイミングパラメータの変更、及び検証結果について報告する。

## 2. マクロパルス直後のビームロス

### 2.1 マクロパルス直後のビームロス検出

フロントエンド部換装後、マクロパルス幅 100 $\mu$ s のビームを 400MeV まで加速して試験を行った際、第一アークセクションの最初の偏向電磁石 (L3BT BM01) 両脇に設置してあるビームロスモニタ 2 台 (BLMP21B, BLMP21C) から、マクロパルス直後に高いビームロスがあることを発見した。Figure 2 に当該ビームロスモニタで観測したオシロスコープ波形を示す。Figure 2 の波形からマクロパルスの直後に約 1.5V の信号を生じていることが分かる。

Figure 2 はチョッパー空洞を使用しない条件 (No Chopped) で観測した波形である。利用運転では、マクロパルスの時間構造を RCS の RF 周期に合わせる為、RFQ 下流のビーム輸送系に設置された RF チョッパーシステムでビームを成形している。チョッパーを使用する場合、このビームロスの発生

<sup>#</sup> z-sawabe@post.j-parc.jp

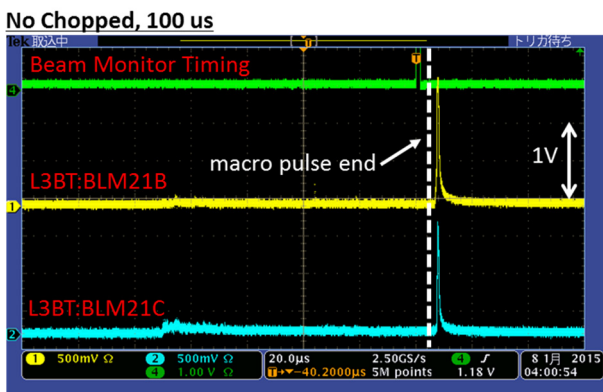


Figure 2: Beam loss at L3BT:BLMP21B and 21C.

するタイミングにチョッパー空洞の RF が印加されている為、このロスが発生しない可能性がある。この可能性を確認する為、次の試験を行った。

試験条件はマクロパルス幅 100µs、マクロパルスがある間はチョッパー空洞の RF を常に印加し、全ビームをスクレーパで除去するモード (All Chopped) で行った。またスクレーパで除去し損じた量がごく僅かな場合であっても、ビームロスモニタで検出できるように、第一アークセクションの下流に設置されたビームハロー検出用の炭素プレート 8 枚をビームラインに挿入し、その周囲のロスモニタ信号 (L3BT: BLMP55, BLMP57) を測定した。本試験で測定したビームロスモニタ波形を Figure 3 に示す。Figure 3 の波形からチョッパー空洞では削り切れない、すなわちチョッパー空洞の RF が印加していない時間帯に電流モニタで観測できないレベルのビームが実際に存在していることがわかった。このまま、J-PARC 利用運転を行うと、高い残留放射線が検出される可能性がある。我々は、このビームロスの発生原因を追究すると共に、対応策を検討した。

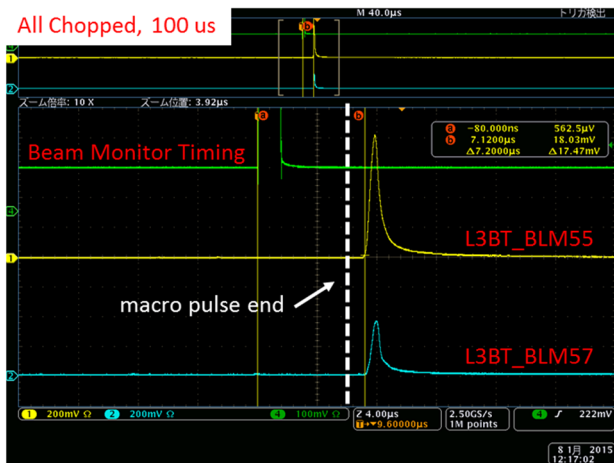


Figure 3: Beam loss at L3BT:BLMP55 and 57.

## 2.2 ビームロス発生原因追究

このビームの発生原因を特定する為、我々はマクロパルスの整形手法に着目した。これまで、マクロパルスは Figure 4 に示すとおり、イオン源の加速変調電源の立ち上がりで RFQ に印加している RF の立ち下がりによって定義してきた。イオン源の加速変調電源は、ビームラインに引き出したいパルス幅と同じ時間、加速変調電圧を印加することにより、負水素イオンビームを任意のパルス幅で引き出す為の電源である。しかし、加速変調電圧は緩やかに立ち下がる為、過渡的なビームがイオン源から引き出される。そこで、加速変調電圧よりも時定数の短い RFQ の RF を利用し、過渡的なビームは RFQ で加速させないことにより、下流に供給するビームを整形する手法を採用してきた。

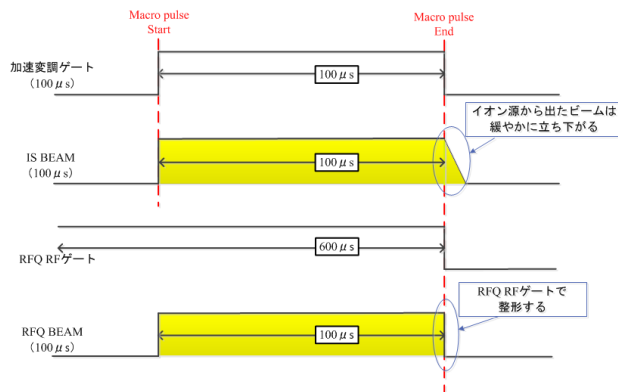


Figure 4: Original definition of macro pulse.

しかし、我々は RFQ の RF では整形しきれないビームが存在し、下流の空洞で正しく加速されず、ビームロスを引き起こしていると推測した。この仮説を検証する為、RFQ の RF を後ろにずらし、チョッパー空洞でマクロパルスを削り取る試験を行った。

RFQ やチョッパー空洞に印加している RF の立ち上がり、立ち下がりには J-PARC タイミングシステム<sup>[3]</sup>のスケジュールドタイミングで管理されている。スケジュールドタイミングとは基準となるトリガ信号からのディレイ値を予め LUT (Look Up Table) と呼ばれるメモリ空間に定義し、そのディレイ値に基づいてトリガ信号、またはゲート信号を出力させる。ビームロス原因検証試験を実施するにあたり、RFQ に印加する RF を 1、3、5µs 遅らせた 3 パターンの LUT 定義を用意した。RFQ RF の立ち下がりが遅くなるにしたがい、立ち下がり時のイオン源からの電流量が減少する為、ビームロスが減少するはずである。

ビームロス原因検証試験は、2.1 の試験と同様に、第一アークセクションを通過した先に設置してある全 8 台の炭素プレートをビームラインに挿入し、その周囲のロスモニタ信号 (L3BT: BLMP55, BLMP57) を測定した。ビーム条件はマクロパルス幅 100µs、チョッパー空洞でマクロパルスを全て偏向し、スク

レーパに照射する条件 (All Chopped) で、3 パターンの LUT 定義を各々設定した。Figure 5 に RFQ に印加する RF をそれぞれ 1, 3, 5 $\mu$ s 後ろにずらした際の波形を示す。1 $\mu$ s ずらした場合を Fig. 3 と比較すると、ロス信号の大きさはほぼ変わらないが、信号が約 1 $\mu$ s 遅くなっていることがわかる。このことから、このロスが RFQ の RF に起因したロスであると

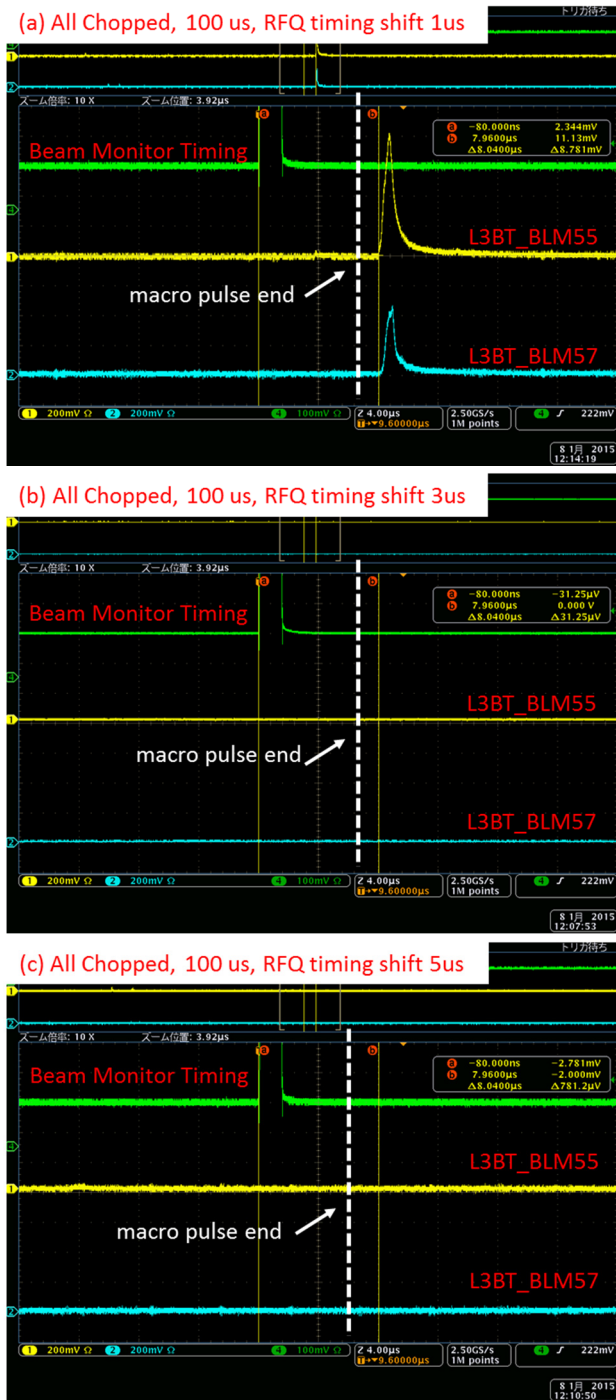


Figure 5: (a) Beam loss at L3BT RF 1us shift, (b) beam loss at L3BT RF 3us shift, (c) beam loss at L3BT RF 5us shift.

いう確証を得た。さらに RFQ に印加する RF を 3 $\mu$ s 以上後ろにずらすと、マクロパルスの後ろに現れるビームによるビームロスの低減に大きな効果があることがわかった。この結果、我々の推測通りマクロパルスの後ろに現れるビームロスは、RFQ の RF ではマクロパルスを完全に整形できていなかった為、発生していたことを実証した。

### 3. 新マクロパルス整形手法

前章の結果から、RFQ の RF ゲートを 3 $\mu$ s 以上、後ろにずらすことで、ビームロスが大きく軽減されることが分かった。しかし、これまでのマクロパルスはイオン源加速変調ゲートの立ち上がりで RFQ に印加している RF の立ち下がりによって定義してきた為、RFQ に印加している RF を 3 $\mu$ s 以上後ろへずらし、チョッパー空洞で削り取ると、実際のマクロパルス幅と計算上のマクロパルス幅に差が生じる。J-PARC で運用しているタイミングシステムでは、この定義を基にマクロパルス幅を計算し、全加速器施設に周知させている。その為、本手法を採用する際は、マクロパルス定義をチョッパー空洞に印加する RF の立ち上がりで立ち下がりに変更する方針とした。Figure 6 に新しいマクロパルス整形手法、Figure 7 にマクロパルス定義変更前後のマクロパルス幅の計算結果を示す。マクロパルス幅 100 $\mu$ s、RFQ の RF を 3 $\mu$ s 遅らせた場合について計算しており、定義変更後は正しく計算されていることがわかる。

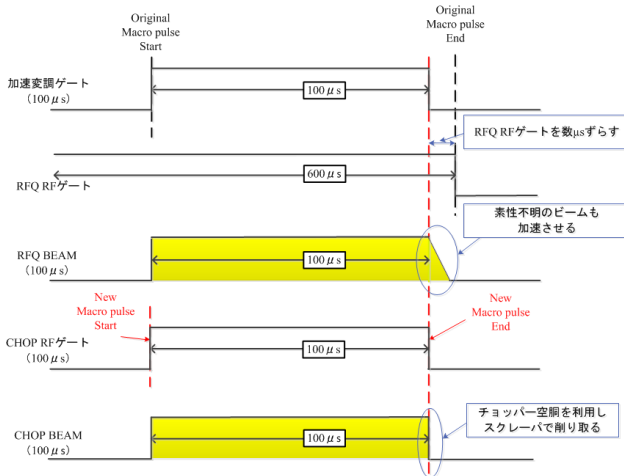


Figure 6: New definition of macro pulse.

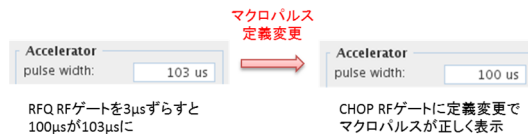


Figure 7: The result of changing calculation method of macro pulse width.

#### 4. まとめ

フロントエンド部換装後、初のビーム試験において発見されたマクロパルス直後のビームロス、イオン源の加速変調電圧が緩やかに立ち下がる際に引き出されたビームの一部が RFQ の過渡的な RF で加速され、下流の加速空洞で加速されずにロスしていたものである。今回、新しく考案したチョッパー空洞を利用したマクロパルス整形手法により、このロスを完全に取り除くことができた。

本手法を夏メンテナンス以降のビーム運転に採用し、J-PARC の大強度ビーム達成および安定したビーム供給の実現を目指していく。

#### 参考文献

- [1] T. Morishita, et al., “J-PARC リニアックのアップグレード”, 日本加速器学会誌 12(1), 22-30, 2015.
- [2] K. Hirano, et al., “DEVELOPMENT OF RF CHOPPER SYSTEM AT J-PARC LINAC”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [3] F. Tamura, et al., “J-PARC TIMING SYSTEM”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004.