

# J-PARC 遅い取り出し運転における高繰り返し化のための 縦方向ビームシミュレーション

## LONGITUDINAL BEAM SIMULATION FOR A HIGH REPETITION CYCLE J-PARC SLOW EXTRACTION

冨澤 正人<sup>\*,A)</sup>, 浅見 高史<sup>A)</sup>, 武藤 亮太郎<sup>A)</sup>, 清矢 紀世美<sup>A)</sup>, 杉山 泰之<sup>A)</sup>, 田村 文彦<sup>B)</sup>

Masahito Tomizawa<sup>\*,A)</sup>, Takashi Asami<sup>A)</sup>, Ryotaro Muto<sup>A)</sup>, Kiyomi Seiya<sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization/J-PARC Center

<sup>B)</sup> J-PARC Center/Japan Atomic Energy Agency

### Abstract

The J-PARC main ring was upgraded to ramp up beam power by shortening the acceleration times. The repetition time of the slow extraction operation was shortened from 5.20 s to 4.24 s. Suppression of the beam instability occurring during the debunch process is significant for the slow extraction operation. An RF voltage pattern for a 4.24 s cycle, considering beam instability suppression, was proposed based on tracking beam simulation. In the proposed pattern, the momentum spread at the beginning of the acceleration is similar to that of the 5.20 s cycle pattern. The proposed pattern has been adopted for the 4.24 s cycle slow-extracted user operation.

## 1. はじめに

J-PARC メインリングでは、加速、立ち下がり時間を短縮して単位時間あたりの繰り返し回数を増やすことにより、ビーム出力を増強する改造を実施した。ニュートリノ振動実験のための速い取り出し運転では、繰り返し時間が 2.48 秒から 1.36 秒に短縮されたパターンでの運転を開始した [1]。一方遅い取り出しを利用するハドロン実験においては、フラットトップ時間の変更はせず、速い取り出し運転と同じ加速立ち下げ時間により、繰り返しを 5.20 秒から 4.24 秒に短縮する方針を決めた。遅い取り出し運転においては、取り出し前のデバンチ過程で発生する横方向のビーム不安定性の抑制のために縦方向のエミッタンスを大きくする必要があり、このためにビーム入射時に RF 位相にオフセットをつけている (位相オフセット入射) [2]。ビーム不安定性の発生はデバンチ過程での位相空間でのビーム形状にも依存する。現在位相オフセット入射に加えて、フラットトップで RF 電圧を 2 段階でゼロにする操作を行なっている [3]。遅い取り出し運転での加速時間は速い取り出しと同じ 1.4 秒から 0.65 秒へ短縮されるが、必要な RF 電圧が高くなることによる位相空間でのビーム形状変化が、ビーム不安定性を悪化させることが懸念された。ビーム形状を繰り返し変更前と同じにするビーム操作のアイデアを、自作のシミュレーションコードにより評価した。また加速開始時の運動量広がりが増大することによる運動量口径起因ビームロスの観点から適切な加速電圧を選んだ。以上のシミュレーションの結果から提案された RF 電圧パターンは、現在の 30 GeV、80 kW での遅い取り出し運転 [4] で実用化された。今後のさらなる RF ビーム操作の可能性にも言及する。

## 2. 磁場パターン

MR のビームパワー増強のための遅い取り出し運転の繰り返し時間は、5.20 秒から 4.24 秒に短縮された。遅い取り出し運転における繰り返し時間変更前後の 4 極電磁石ファミリーである QFN の磁場パターンを Fig. 1 に示す。磁場の立ち上がり時間は速い取り出し運転と同じで 1.4 秒から 0.65 秒に短縮されており、磁場の立ち下がり時間もほぼ同じである。入射を行うフラットボトム、遅い取り出しを行うフラットトップ時間はアップグレード前後で変更はない。繰り返し時間変更前後のタイミング関係は Table 1 に示されている。

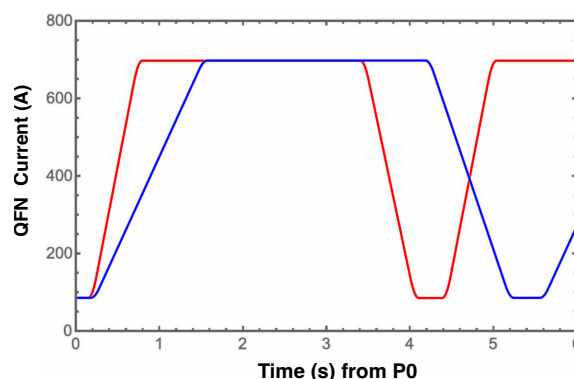


Figure 1: Quadrupole family QFN current patterns before (blue) and after (red) the upgrade.

## 3. ビームトラッキング計算

縦方向のビーム運動を計算する汎用性のあるコードは存在するが、今回は自作のコードで計算を行った。遅い取り出しの縦方向のビーム操作は特殊であり、使用者からすると自作のコードは柔軟に対応できる。コードは fortran 言語で書かれているが、openMP によりプロセッサの並列計算は可能性である。MR への入射ビー

\* masahito.tomizawa@kek.jp

Table 1: Time Relation in MR Cycles

time period	before upgrade	after upgrade
flat base (from P0)	0.14	0.14
parabola acceleration 1	0.1	0.1
linear acceleration	1.2	0.45
parabola acceleration 2	0.1	0.1
flat top	2.61	2.61
total cycle time	5.20	4.24

ムに対するトモグラフィーの測定結果からトラッキング計算のための初期分布を作成した。トモグラフィーデータは、バンチあたりの粒子数が  $7.5 \times 10^{12}$  ppb の条件で測定された。トモグラフィーデータは、運動量と位相の空間で  $149 \times 149$  のメッシュサイズなため 2 次元の補間をして初期ビームを作成した。Figure 2 は約 100 万粒子を発生させた場合の位相空間の粒子分布である。今回の計算は、便宜上空間電荷力やビームカップリングインピーダンスの効果を無視したため、粒子数は間引きを行い約 1 万個の粒子でトラッキング計算を行った。

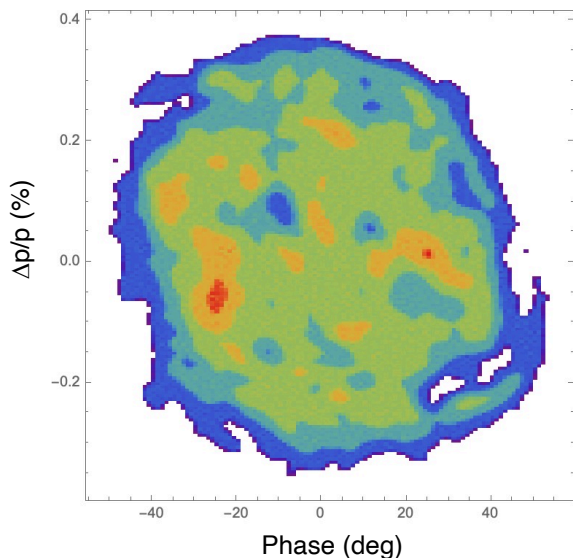


Figure 2: Initial beam distribution.

#### 4. RF 電圧パターンの検討

デバンチ時のビーム不安定性を抑制するために、RF バケットの中心からタイミングをずらしてビームを入射する位相シフト入射を行なっている。Figure 3 は RF 電圧 160 kV において位相のシフトを  $-55$  度にして入射した場合の位相空間のビーム運動を示す。入射されたビームはバケット内でダイポール振動をするが RF 電圧の非線形効果により渦巻き状の分布になる。渦巻き状の構造は時間経過と共に細くなる。その結果縦方向のビームエミッタンスが増大し、デバンチ時のビーム不安定性抑制に大きな効果を持つ。変更前の 5.20 秒繰り返し遅い取り出し運転での入射から加速終了まで

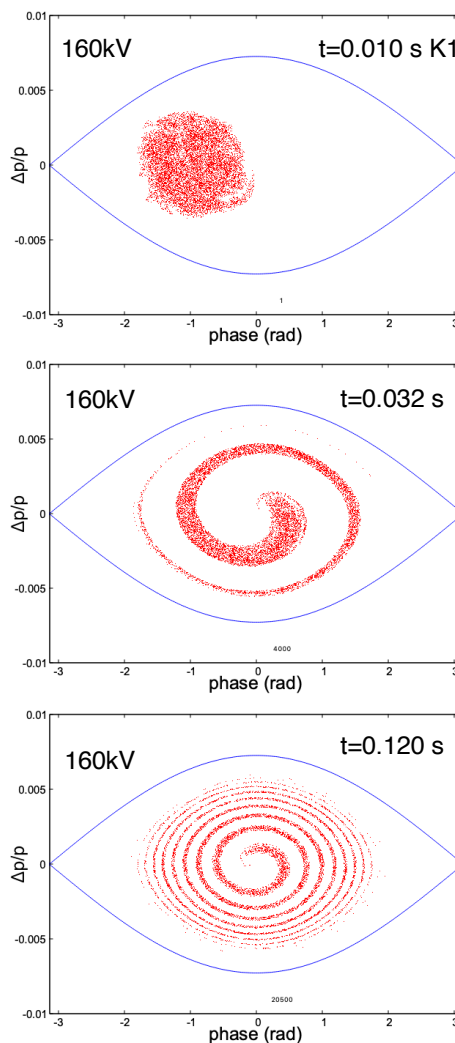


Figure 3: Beam motion for the phase offset of  $-55$  deg.

Table 2: Summary of Simulation Results

index	(a)	(b)	(c)	(d)
cycle time (s)	5.20	4.24	4.24	4.24
2nd harmonics	w/o	w/o	w/o	w/
phase offset (deg.)	$-55$	0	$-55$	0
rms- $\epsilon_L$ (eV·s)	0.77	0.23	0.77	0.43
full- $\epsilon_L$ (eV·s)	12.2	4.3	11.6	7.6
max. $\Delta p/p$ (%)	+0.69	+0.45	+0.72	+0.54
min. $\Delta p/p$ (%)	-0.69	-0.45	-0.71	-0.53

の運動量 ( $P$ )、同期位相 ( $\phi_s$ )、基本波 RF 電圧 ( $V_1$ )、bunching factor ( $Bf$ )、運動量の広がり ( $\Delta p/p$ ) のパターンを Fig. 4 に示す。RCS からの 3 GeV ビームは 40 ms ごとに 4 バッチが MR に入射されるが、最初のバッチ (K1 タイミング) の 10 ms 前 (P0 タイミング) が横軸のゼロになっている。入射を行うフラットボトムでの RF 電圧は 160 kV、加速開始時には 280 kV、その後加速終了までは 256 kV に設定されている。タイミング  $t=0.2$

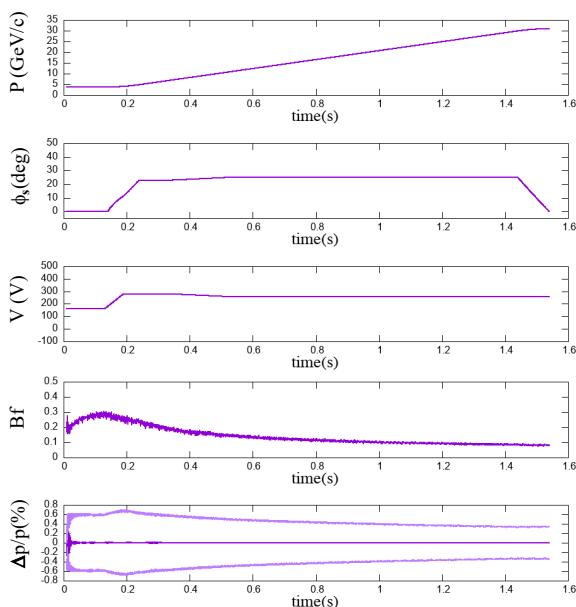


Figure 4: Patterns for 5.20 s cycle.

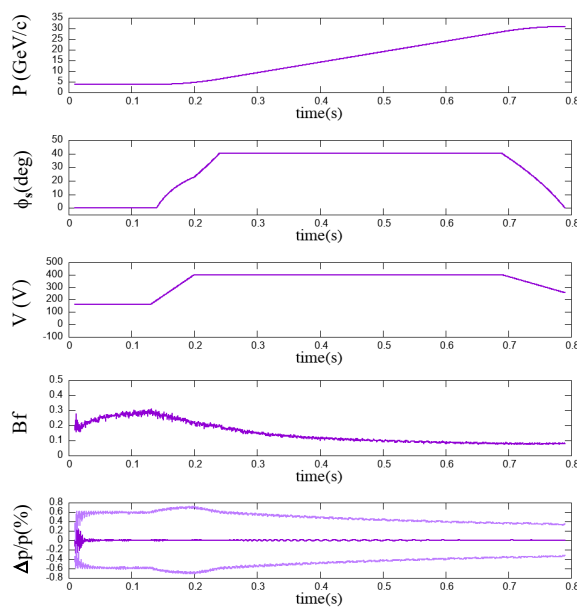


Figure 6: Patterns for 4.24 s cycle.

秒付近で運動量広がり最大となり、大きさは $\pm 0.69\%$ である。Figure 5(左)は加速終了(P3)タイミングでの位相空間のビーム分布である。rms エミッタンスは 0.77 eV、フルエミッタンスは 12.2 eV·s である (Table 2(a))。4 バッチ目 (K4) の入射の場合は 10 ms 後に加速開始となるが、計算結果は K1 入射の場合と同程度であることを確認している。またこのプロットでは渦巻き状の分布は残っているが、空間電荷力を入れた計算ではこの構造は見えなくなることがわかっている。

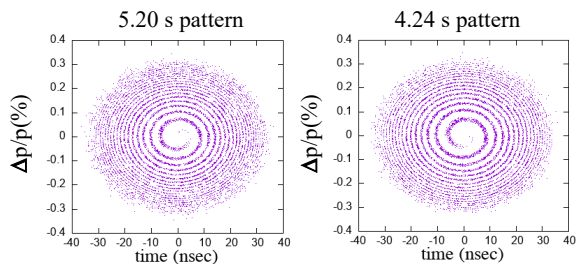


Figure 5: Phase space distributions at the end of acceleration for 5.20 and 4.24 s patterns.

変更後の遅い取り出し運転の繰り返し時間は 4.24 秒に短縮される。1.4 秒から 0.65 秒への加速時間短縮は速い取り出し運転と同じ時間で、先行して開始した速い取り出し運転では加速電圧は 450 kV を選択していた。遅い取り出し運転においては、運動量口径起因によるビームロスを抑える観点から、 $t=0.2$  秒付近で最大になる運動量の広がりを 5.20 秒の時と同程度にするため 400 kV という低い電圧を選択した。ただし計算では、400 kV の加速電圧の場合、60 度以上の位相オフセットでは RF バケットからビームがこぼれてしまう。一方 450 kV の加速電圧の場合は 80 度の位相オフセットでもバケットからこぼれることはない。

加速時間短縮で必要となった高い RF 電圧のままデ

バンチ操作を行う場合、ビームバンチ幅が短くなるため、リングに存在するウエークの影響が強くなることによるデバンチ時のビーム不安定性への悪影響が懸念された。4.24 秒繰り返しでのデバンチ操作開始時の縦方向の位相空間ビーム分布が 5.20 秒繰り返し運転での分布と同じにできれば、変更前後で同等なビーム不安定性抑制状態にできるはずである。そこで、加速終了時の 0.1 秒のパラボラ領域で加速電圧を 5.20 秒繰り返しと同じ 256 kV に下げるアイデアを計算で確かめた。Figure 6 は各種パターン、Fig. 5 (右) は加速終了時の位相空間分布である。両者はほぼ同じ位相空間分布を持っており、加速手前の 0.1 秒のパラボラ領域で電圧を 400 kV から 256 kV に下げる断熱操作は有望であることが示された。加速終了 P3 タイミングでのビームパラメータは Table 2 (c) に示されている。一方、位相オフセットをつけない場合の計算では、rms エミッタンスは 0.23 eV、フルエミッタンスは 4.3 eV·s であり、 $-55$  度の位相オフセット入射を行うことにより約 3 倍のエミッタンス増大ができています (Table 2(b))。

## 5. デバンチ操作

ビームパワーが 50 kW ( $5.4 \times 10^{13}$  ppp) までの以前の運転においては、加速終了直後に 256 kV の RF 電圧を短時間でゼロにするデバンチ操作を行っていた (one step debunch)。Figure 7 は加速終了直後 (P3) と P3+60 ms 後のビーム分布である。この 60 ms タイミング付近でビーム不安定性が発生していた。ただこれ以上にビーム粒子数を増やそうとするとビーム不安定性抑制が困難となった。試行錯誤の結果、現在では加速終了直後に 256 kV の RF 電圧を 22 kV まで下げシンクロトロン振動の半周期である 60 ms 後に RF 電圧をゼロにする 2 step debunch という操作を行なっている [3]。22 kV の RF バケット内で回転する半周期後 (60 ms) のビーム分布は、加速終了直後のビーム分布と違う分布となり、

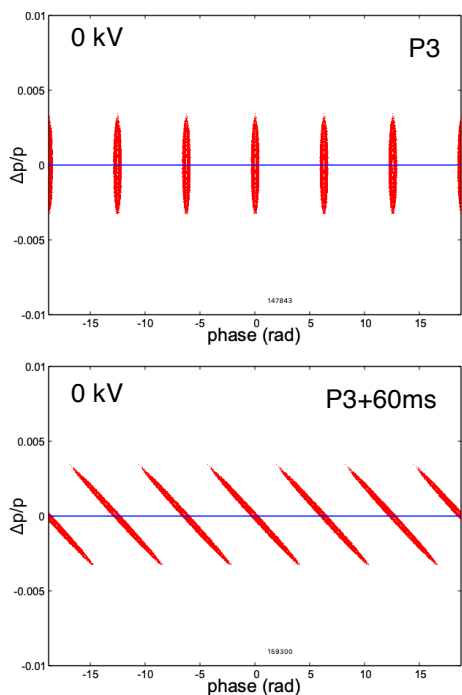


Figure 7: Beam debunched turning off the RF voltage by one step.

その結果ビーム不安定性の抑制に効果があると考えている。2 step debunch 操作過程でのビーム分布の進展を Fig. 8 に示す。ビーム不安定性が発生するタイミングは P3+120 ms 付近に移っている。

## 6. ビーム運転

2024 年 3 月に実施された 4.24 秒繰り返しで 30 GeV ビームを遅い取り出しをやらすフラットトップ終了時にビームダンプに捨てるビーム試験において、RF 加速電圧を 450 kV と 400 kV に下げる場合の比較を位相オフセット 60 度にセットして比較した。t=0.2 秒付近でのビームロス は 400 kV の方が少ない結果となり 400 kV 電圧選択の正当性を示した。加速終了のパラボラ内で電圧を 256kV に下げる場合と下げない場合においてビーム不安定性の起きやすさを比較したところ、256 kV に下げた場合の方が明確にビーム不安定性を抑制できていた。これらの試験結果から Fig. 6 のパターンを採用して遅い取り出し利用運転を行った。バケットごぼれと思われる若干のビームロス増加が観測されたため位相オフセットは 60 度から 55 度に変更した。5.20 秒繰り返し運転でのビームパワー 65 kW ( $7.0 \times 10^{13}$  ppp) は、4.24 秒繰り返し後の運転では 83 kW ( $7.3 \times 10^{13}$  ppp) に増強された [4]。

## 7. 今後の検討予定項目

今後の遅い取り出しビーム強度増強に向けて、さらなる RF ビーム操作の可能性について簡単に述べる。

- 現在の運転において採用されている RF 加速電圧パターンの最適化を行う。特に加速終わりのパラボラ領域で立ち下げた電圧 256 kV をさらに下げら

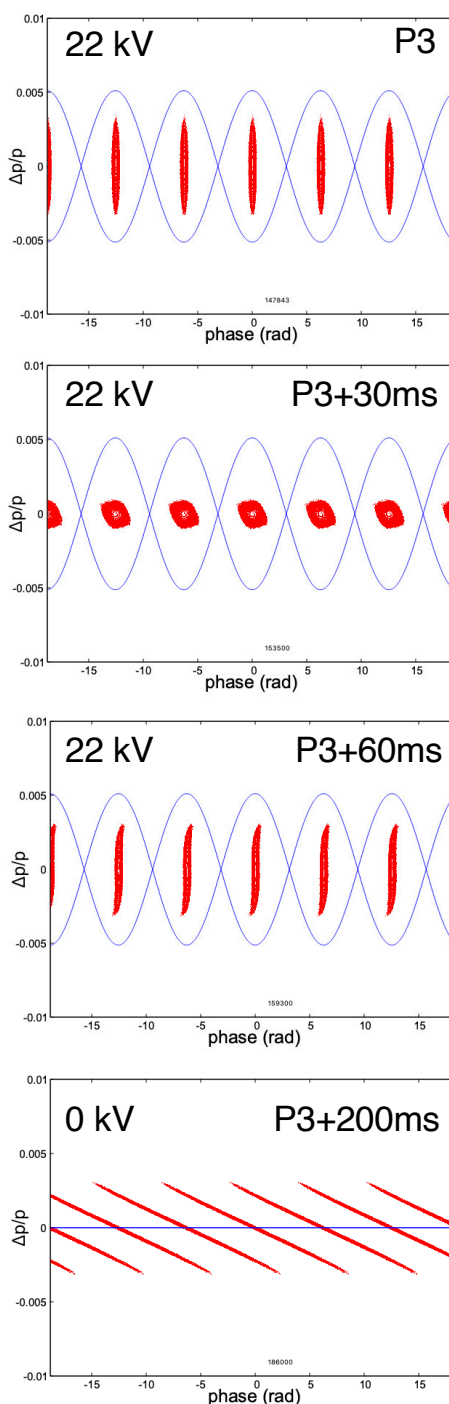


Figure 8: Beam debunched turning off the RF voltage by one step.

れるかを検討する。

- 現在行なっている 2 step debunch 方法の最適化を行う。例えば、現在 22 kV 電圧においてシンクロトロン半周期後電圧をゼロにしているが、1 周期後に電圧をゼロにする検討を行う。
- 加速終了直後に加速電圧と同じ電圧で、位相を 180 度ずらす位相ジャンプ手法のビーム試験では不安定性抑制に関して良好な結果が得られなかった。



現在行なっている 2 step debunch 過程と位相ジャンプ手法を組み合わせる。

- 加速終了直後に断熱的に電圧を立ち下げ、その後非断熱的に電圧をゼロにする。
- 速い取り出し運転ですでに導入されている 2 倍高調波空胴を利用する。ただし速い取り出し運転と同じ使い方でのビーム試験では、不安定性抑制に関して良好な結果が得られなかった。Table 2(d) に示すように、速い取り出しと同じ操作によるシミュレーションでは rms エミッタンスは 0.43 eV·s 程度にしかならずエミッタンス増加が不十分な可能性がある。したがって、位相オフセットや運動量オフセットの操作を併用する等の工夫が必要となるであろう。

## 8. まとめ

J-PARC メインリングのビームパワー増強のための高繰り返し化改造により、遅い取り出し運転の繰り返し時間は 5.20 秒から 4.24 秒に変更された。遅い取り出しのためのデバンチ過程で発生するビーム不安定性の対策は遅い取り出しビーム強度を増やすために最も重要な課題となっている。現在、不安定性を抑制するために MR への入射ビームの RF 位相をずらしエミッタンスを増加させている。さらにフラットトップで 2 段階で RF 電圧を下げる位相空間のビーム分布形状の操作を行なっている。4.24 秒繰り返しで必要となる高い RF 加速電圧のため加速終了時のビームバンチ幅は 5.20 秒繰り返しの場合と比較して狭くなる。この違いにより

4.24 秒繰り返しのビーム不安定性が起きやすくなることが懸念された。ビーム不安定性の起きやすさを 5.20 秒繰り返しと同程度にする目的で、加速終了時の 0.1 秒のパラボラ領域で加速電圧を 5.20 秒の場合と同じ 256 kV に下げるアイデアをシミュレーションにより確かめた。運動量口径によるビームロスの観点から、加速開始時に最大となる運動量広がりを 5.20 秒の場合と同程度になる加速電圧をシミュレーションにより求めた。ビーム試験において、提案された RF 電圧パターンは、不安定性抑制、ビームロスに関して良好な結果が得られたため、その後の遅い取り出し利用運転で採用された。ビーム不安定性抑制を主な目的とした今後の RF ビーム操作の可能性を提示した。

## 参考文献

- [1] Y. Sugiyama *et al.*, “Beam longitudinal dynamics simulation for high-power upgrade of J-PARC MR”, The 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Aug. 2024, FROT08, this meeting.
- [2] M. Tomizawa, “J-PARC Slow Extraction Project”, FNAL Accelerator Seminar, Aug. 27, 2015.
- [3] M. Tomizawa, “Present and Future of 30 GeV Slow Extraction”, 2nd International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (J-PARC HEF-ex WS), Feb., 2022.
- [4] R. Muto, “Status and outlook on slow extraction operation at J-PARC main ring”, in *Proc. IPAC’24*, Nashville, TN, May 2024, pp. 1905-1910. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEYD1