

J-PARC MR の高繰り返し化によるビーム強度増強のための 縦方向シミュレーション

BEAM LONGITUDINAL DYNAMICS SIMULATION FOR HIGH-POWER UPGRADE OF J-PARC MR

杉山泰之 ^{*,A)}, 清矢紀世美 ^{A)}, 吉井正人 ^{A)}, 大森千広 ^{A)}, 原圭吾 ^{A)}, 長谷川豪志 ^{A)},
田村文彦 ^{B)}, 山本昌亘 ^{B)}, 野村昌弘 ^{B)}, 島田太平 ^{B)}, 沖田英史 ^{B)}, 宮越亮輔 ^{B)}

Yasuyuki Sugiyama ^{*,A)}, Kiyomi Seiya ^{A)}, Masahito Yoshii ^{A)}, Chihiro Ohmori ^{A)}, Keigo Hara ^{A)}, Katsushi Hasegawa ^{A)},
Fumihiko Tamura ^{B)}, Masanobu Yamamoto ^{B)}, Masahiro Nomura ^{B)}, Taihei Shimada ^{B)}, Hidefumi Okita ^{B)},

Ryosuke Miyakoshi ^{B)}

^{A)} KEK/J-PARC

^{B)} JAEA/J-PARC

Abstract

Several upgrades are planned for the J-PARC MR to achieve higher beam intensity toward the future beam power of 1.3 MW. We aim to increase the beam intensity by increasing the number of protons per pulse and shortening the repetition cycle. Higher RF voltage is required to accelerate the beam in a shorter acceleration period. Coupled bunch instability can be more severe with more protons per pulse. To accelerate high-intensity beams stably in the shorter repetition cycle, we evaluated the RF voltage pattern using the beam longitudinal dynamics simulation. Based on the evaluated RF voltage pattern, we achieved the acceleration of the proton beam with a beam power of 750 kW in 2023.

1. はじめに

J-PARC の主リング (MR) シンクロトロンでは 30 GeV まで加速した陽子をニュートリノおよびハドロン の各実験施設へと供給している。Table 1 にニュートリノ実験に対する速い取り出し運転モードにおける 2021 年度時点での MR 及びその RF 加速システムの運転パラメータを示す。MR は 2021 年夏時点で、 2.66×10^{14} 個の陽子を 2.48 秒毎に加速することでビーム強度 515 kW を達成している。

Table 1: Parameters of the J-PARC MR and Its RF System for the FX as of 2021

parameter	value
circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
beam intensity	(achieved) 2.66×10^{14} ppp
beam power	(achieved) 515 kW
repetition cycle	2.48 s
accelerating period	1.4 s
accelerating frequency f_{RF}	1.67–1.72 MHz
revolution frequency f_{rev}	185–191 kHz
harmonic number h_{RF}	9
number of bunches N_b	8
maximum RF voltage	320 kV
No. of cavities	7 (h = 9), 2 (h = 18)
Q-value of RF cavity	22

MR では来るハイパーカミオカンデ実験で必要とされる 1.3 MW のビーム強度実現に向けて、二段階のアップグレードを計画している [1]。Table 2 に MR のアップグレード計画のパラメータを示す。

Table 2: Upgrade Scenario of the J-PARC MR

parameter	~ 2021	2023~	2028 ~
Repetition cycle[s]	2.48	1.36	1.16
Acceleration time [s]	1.4	0.65	0.58
# of protons [$\times 10^{14}$ ppp]	2.66	2.1	3.3
Beam Power [kW]	515	750	1300
RF cavity(for $h = 9$)	6~7	9	11
RF cavity(for $h = 18$)	2	2	2
Max V_{RF} [kV]	320	510	600

MR では、繰り返し周期の短縮 (高繰り返し化) と周回粒子数の増加によってビーム強度増加を目指す。2023 年からは繰り返し周期を 2.48 秒周期から 1.36 秒周期に短縮することで、それまでよりも少ない周回粒子数でも 750 kW を実現した。1.3 MW の実現には更なる繰り返し周期の短縮と周回粒子数の増加が求められる。

上記のアップグレードを実現するためには RF 加速システムの増強が求められる [2,3]。繰り返し時間の短縮に伴って少ない時間で加速する必要があるため、同じ大きさの RF バケツを作るためにより高い加速電圧が求められる。要求する加速電圧を発生させるため、新たに 4 台の加速空洞を追加することとした。新たな 4 空洞のうち、2 空洞が 2021 年の MR 長期シャットダウン中に追加され、1.36 秒周期に対応した電圧が発生可能となった。残りの 2 空洞は 2024 年から 2026 年にかけて設置予定である。

また、粒子数の増加に伴って加速空洞におけるウェイク電圧が増大する。このため、ビームを安定させるためのウェイク電圧補償の高度化が求められると共に、ウェイク電圧を補償するために必要な RF システムの電流量増加への対応も必要となる。ウェイク電圧保障の高度化を行うために Low Level RF(LLRF) システムを新型システムへと 2021 年に置きかえた [4]。また、電流増加に対応するため、RF システムの増幅器電源 (陽極

* yasuyuki.sugiyama@kek.jp

電源)の増強を進めている。陽極電源の増強に関してはビーム強度の増加にあわせて段階的に行っている。

これらのRFシステム増強のもとで、高繰り返し化後に大強度ビームを加速するために必要なRF加速電圧パターンをビームの縦方向運動シミュレーションを元に評価を行った。

2. 2.48秒周期のデータとシミュレーションの比較

2.48秒周期のデータを用いて縦方向シミュレーション環境の調整を行った。

ビームの縦方向運動シミュレーションにはCERNで開発された縦方向運動シミュレーションコードBLonD [5]を用いて、ビームローディング効果と空間電荷効果を考慮して行った。シミュレーションを行うビームのマクロ粒子数は1バンチにつき1万個とし、実運転同様に40ms毎に2バンチを4回入射して合計8バンチが入射するようにした。8バンチ入射後の $t=140$ msから加速が開始される。シミュレーションはMRへの1バンチ目のビーム入射直後から1秒後までを行った。

2.1 入力データ

電圧・位相パターンに関しては、LLRFシステムで設定に使用していたものと同じパターンを用いた。

入射ビームの初期分布としては、入射ビーム波形の測定値を元にトモグラフィで再構成した位相空間分布を用いている。トモグラフィ再構成に使ったデータには1バンチ辺り 4×10^{13} 個の強度で入射した場合のWall Current Monitor波形の測定値を用いた。トモグラフィ再構成には空間電荷効果を考慮していなかったため、再構成結果に対して空間電荷効果を考慮した補正

を行って初期分布として用いた。

ビームローディング効果の原因となるインピーダンス源のデータとしては、加速に用いていた基本波($h=9$)加速空洞のインピーダンスの測定値の和を用いた。このうち、 $h=8 \sim 10$ の周波数領域においては実運用ではLLRFシステムで空洞電圧フィードバック(FB)を行ってインピーダンス低減を行っており、シミュレーションにおいては $h=8 \sim 10$ の領域でインピーダンスを 0Ω とすることでその効果を模擬することとした。

空間電荷効果の計算の際には、ビーム径10.3mmに対して平均チェンバー半径65mmを仮定した。

2.2 測定データとシミュレーションの比較

Figure 1、Fig. 2に初めの二つのバンチ入射直後、入射期間全体のマウンテンプロットのシミュレーションと実測データとの比較を示す。ビームローディング効果を適用することで入射直後および後継バンチ入射時の電圧変動に伴う縦方向分布の変化が再現できていることがわかる。

Figure 3に入射直後25msまでのBunching Factorの比較を示す。Bunching Factor B はバケツ内のビーム電流の平均値 I_{avg} とピーク値 I_{peak} との比であり、 $B = I_{avg}/I_{peak}$ で定義される。細かな構造に違いはあるが、長期的な動きが再現できていることがわかる。Figure 4に入射後1秒後までのBunching Factorの比較を示す。加速が進むにつれてズレが広がるものの、概ね数%程度の範囲で再現できていることがわかる。Bunching Factorが再現できていれば、バンチ内のビームの分布がほぼ再現できていると考えられるので、こうして調整したシミュレーション環境を用いて高繰り返し化後のパターンの評価に用いることとした。

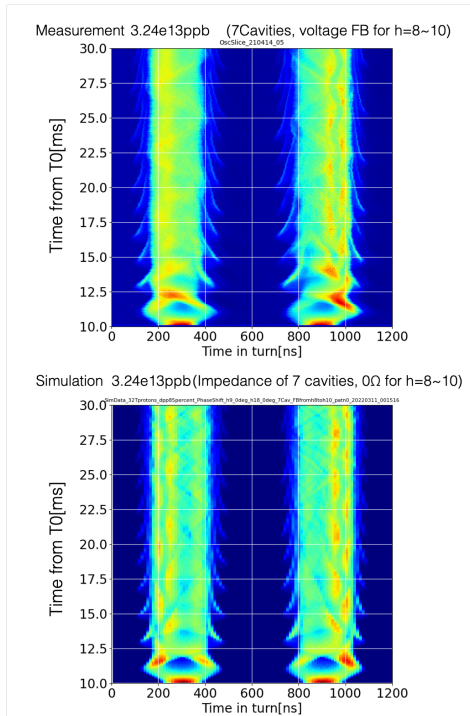


Figure 1: Comparison of the mountain range plot for 20ms from injection.

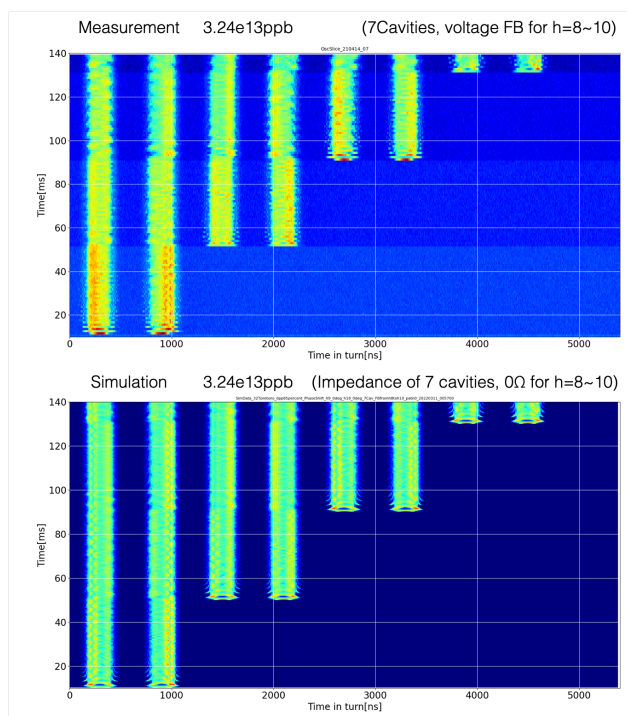


Figure 2: Comparison of the mountain range plot for the whole injection period.

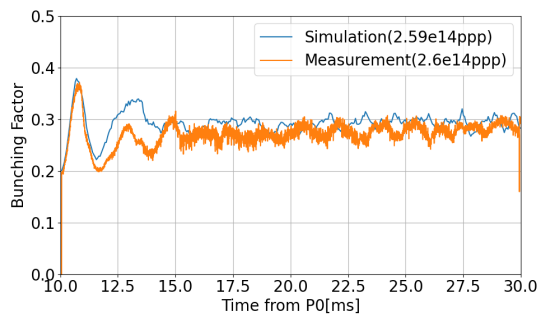


Figure 3: Bunching factor for 20 ms from injection.

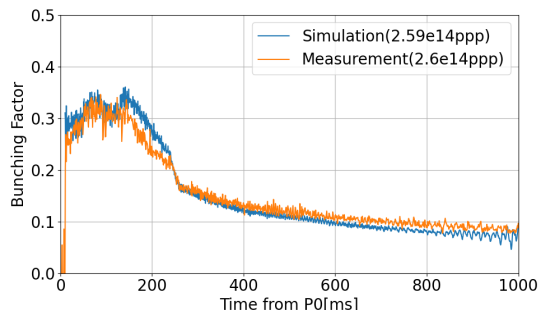


Figure 4: Bunching factor for 1 s from injection.

3. 1.36 秒周期での電圧パターンの評価

2.48 秒周期のデータで調整したシミュレーション環境を用いて 1.36 秒周期の電圧パターンの評価を行った。

3.1 電圧位相パターン

Figure 5 に、シミュレーションに用いる加速電圧の振幅と位相パターンを示す。基本波 ($h=9$) は 1 バンチ目の入射 ($t=10$ ms) から 8 バンチ目の入射 ($t=130$ ms) まで 155kV とし、8 バンチ目の入射終了後から $t=200$ ms までかけて最大電圧 V_{top} まで昇圧して、最大電圧 V_{top} を取り出しタイミング ($t=790$ ms) まで維持する。昇圧タイミングをできるだけ早くすることで加速に伴う RF バケツの縮小の効果の低減を狙っている。二倍高調波 ($h=18$) は 1 バンチ目の入射 ($t=10$ ms) から $t=230$ ms まで 110 kV を維持し、その後 $t=250$ ms までかけて降圧する。この際のビーム同期位相 ϕ_s は $V_{top}=450$ kV の際で 35 度、 $V_{top}=510$ kV の際で 30 度であった。加速空洞の電圧位相はビーム同期位相 ϕ_s に追従するように設定することで、加速開始/終了時の ϕ_s の急激な変化に伴うビーム位相の振動の抑制を狙った。

3.2 シミュレーション条件

入射ビームの初期分布および空間電荷効果の条件は 2.48 秒周期のシミュレーションと同様のものを用いた。

ビームローディング効果の原因となるインピーダンス源のデータには、加速に用いていた基本波 ($h=9$) 加速空洞 7 台分のインピーダンスの測定値の和を、11 台分にスケールして用いた。このうち、空洞電圧 FB を行ってインピーダンス低減を行う周波数領域は、シミュレーションにおいてはインピーダンスを 0Ω とすることで

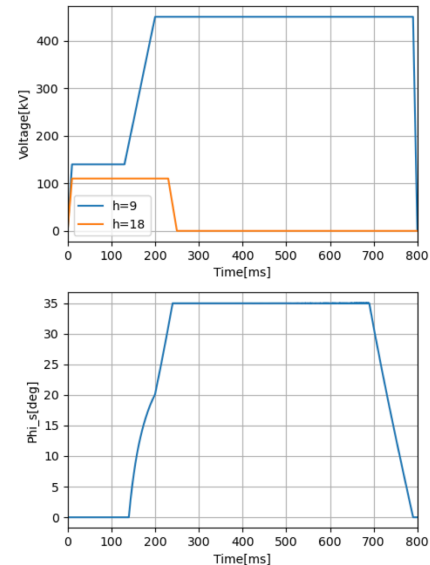


Figure 5: RF voltage and phase pattern for 1.36 s cycle acceleration.

その効果を模擬することとした。

シミュレーションは MR への 1 バンチ目のビーム入射直後から 0.4 秒後までを行った。これは同じ加速電圧でも RF バケツが小さくなるのが加速開始時 $t=240$ ms 付近であり、それ以降はビームに対して RF バケツに余裕が出来るからである。シミュレーションで用いるマクロ粒子数は 2.48 秒サイクルの際と同様に 1 バンチ辺り 1 万個とし、実運転同様に 2 バンチを 40 ms 毎に 4 回入射させた。

3.3 バンチ結合振動

$V_{top}=510$ kV, 周回粒子数 $N_p = 2.0 \times 10^{14}$ ppp の場合に空洞電圧 FB を $h = 8 \sim 10$ の範囲で適用した際のマウンテンプロットを Fig. 6 に示す。加速開始後にバンチ結合振動が顕著になっていることがわかる。この条件で $V_{top}=450$ kV に変更すると $t=240$ ms 辺りで RF バケツから溢れる粒子が現れた。

空洞電圧 FB 制御対象外の周波数域の空洞インピーダンスがバンチ結合振動の原因と考え、空洞電圧 FB 制御対象の周波数範囲を広げることとした。 $V_{top}=510$ kV, 周回粒子数 $N_p = 2.0 \times 10^{14}$ ppp の場合に空洞電圧 FB を $h = 6 \sim 12$ の範囲で適用した際のマウンテンプロットを Fig. 7 に示す。バンチ結合振動がほぼ抑制されていることがわかる。

高繰り返し化後の大強度ビーム加速においては空洞電圧 FB を $h = 6 \sim 12$ の範囲で適用することが必須と考えられたので、以降の電圧パターンの評価においては $h = 6 \sim 12$ での空洞電圧 FB を仮定している。

3.4 ビーム強度毎の評価

電圧パターンの評価には、Bunching Factor に加えて、Momentum filling factor を用いる。Momentum filling factor は RF バケツに対してビーム粒子が占める割合であり、今回は簡単のために、RF バケツの高さの最大値と各粒子の運動量の最大振幅の比を Momentum filling factor として用いた。電圧パターンの評価の際には、加速開始

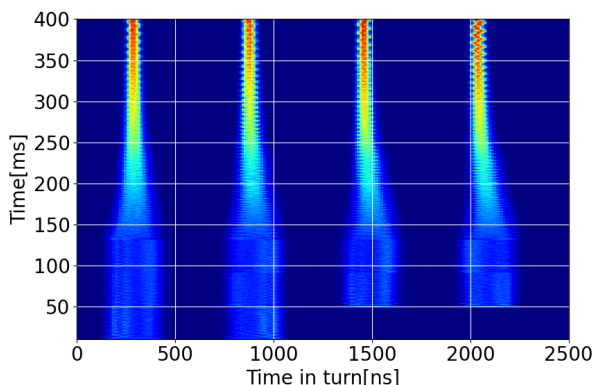


Figure 6: Mountain range plot in the case of 1.36 s cycle acceleration with the impedance of 11 RF cavities (0Ω for $h=8\sim 10$) for $V_{top}=510 \text{ kV}$, $N_p = 2.0 \times 10^{14} \text{ ppp}$.

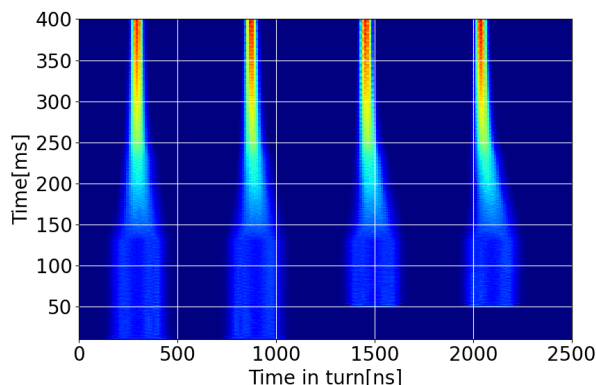


Figure 7: Mountain range plot in the case of 1.36 s cycle acceleration with the impedance of 11 RF cavities (0Ω for $h=6\sim 12$) for $V_{top}=510 \text{ kV}$, $N_p = 2.0 \times 10^{14} \text{ ppp}$.

直前 ($t=130 \text{ ms}$) での Bunching factor が 0.3 以上、加速全体を通して Momentum filling factor が 0.9 以下であることを条件とした。

Figure 8 に、1.36 秒周期での様々な V_{top} と N_p の場合の Bunching factor と Momentum filling factor の比較を示す。同じ N_p でも V_{top} の変化で Bunching Factor はほぼ変わらないが Momentum filling factor に大きな違いが現れることがわかる。この図から、 $V_{top}=510 \text{ kV}$ であれば $3.3 \times 10^{14} \text{ ppp}$ (1.1MW 相当) であっても十分加速可能であり、 $V_{top}=450 \text{ kV}$ であっても $2.1 \times 10^{14} \text{ ppp}$ (750kW 相当) の加速が出来ることが分かる。

以上のことから、検討した空胴電圧・位相パターンを用いて V_{top} が 450kV 以上あれば 750kW 相当のビームの安定な加速が出来ることがわかった。

4. 1.36 秒周期での実データとの比較

上記の評価を元に、 $V_{top} = 450 \text{ kV}$ の電圧パターンをもちいて 2022 年から 1.36 秒周期でのビーム加速を開始し、2023 年には $2.1 \times 10^{14} \text{ ppp}$ (750 kW) の加速に成功した。この際、最大電圧を 450 kV に抑えることで、9 台の加速空胴の合計加速ギャップ数の調整とそれによるビームローディング補償に伴う陽極電流の低減が可能となり、2024 年 6 月には更なる大強度である $2.26 \times 10^{14} \text{ ppp}$ (800 kW) の加速運転の実現へと繋がった。

Figure 9 に $2.0 \times 10^{14} \text{ ppp}$ (700kW 相当) のビーム測定とシミュレーションとの Bunching factor の比較を示す。2023 年時点では基本波空胴が 9 台であったため、シミュレーションにおいても 9 台分のインピーダンスで

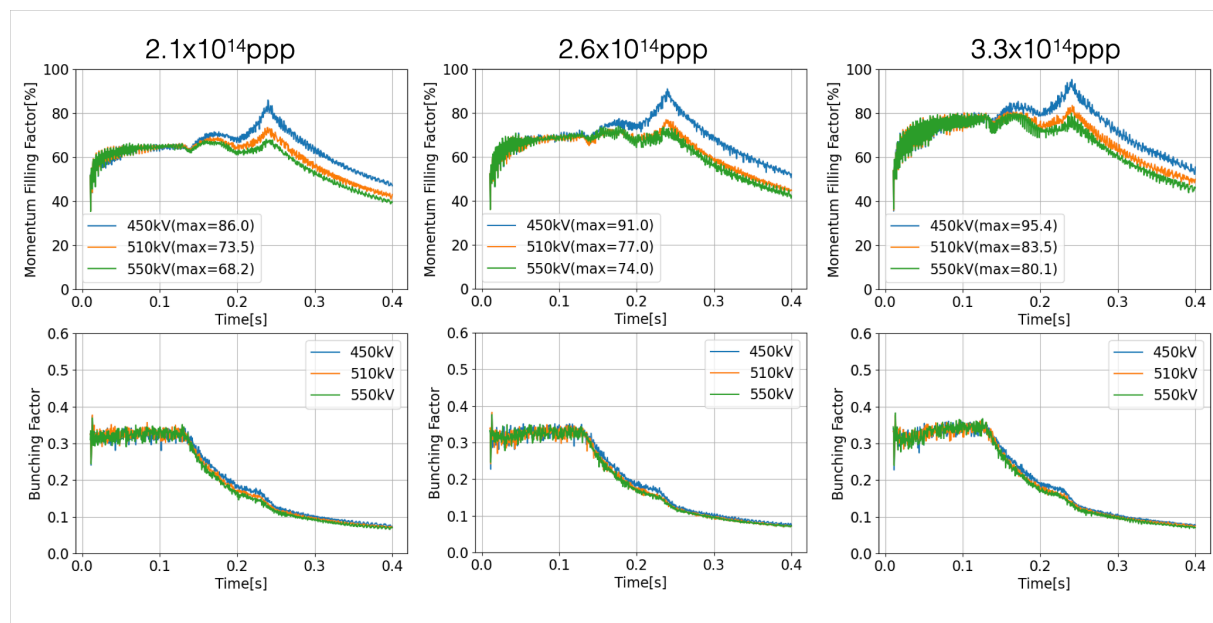


Figure 8: Momentum filling factor and bunching factor for various V_{top} and N_p in the case of 1.36 s cycle acceleration with the impedance of 11 RF cavities (0Ω for $h=6\sim 12$).

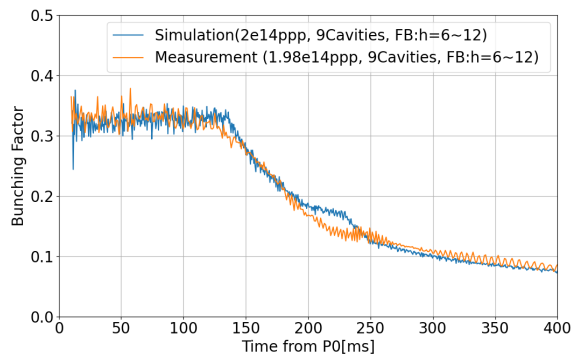


Figure 9: Comparison of bunching factor between the simulation and the beam measurement. $V_{top}=450$ kV was achieved by 9 RF cavities for $h=9$ with cavity voltage FB controlled for $h=6\sim 12$.

計算を行った。入射から加速途中までよく一致していることがわかる。 $t=180$ ms から $t=240$ ms までは数%ほどずれが見られるが、この期間は LLRF システムのビーム位相フィードバックの適用が開始されてゲインが変化している期間であり、ビーム位相フィードバックの効果がシミュレーションに入っていないために乖離が生じているものと考えられる。

5. 1.16 秒周期でのパターンの評価

1.36 秒周期でのシミュレーション結果と測定データが概ね一致したので、同じ条件で繰り返し周期を 1.16 秒に変更して電圧パターンの評価を行った。電圧パターンは 1.36 秒周期のパターンの取り出しタイミングのみ変更している。

Figure 10 に、1.16 秒周期での様々な V_{top} と N_p の場合の Bunching factor と Momentum filling factor の比較を示す。 $V_{top}=450$ kV では 2.6×10^{14} ppp (1.0 MW 相当) を加速すると RF バケツから溢れる粒子が存在することがわかる。 $V_{top}=510$ kV であれば 2.6×10^{14} ppp (1.0 MW 相当) の加速が十分可能であり、 3.3×10^{14} ppp の加速も可能である。 $V_{top}=550$ kV であれば 3.3×10^{14} ppp (1.3 MW 相当) でも余裕を持って加速できることがわかる。

以上のことから、現在のアップグレード計画で想定している $V_{top}=600$ kV の構成であれば 1.16 秒周期で 1.3 MW の加速が実現できると考えられる。

6. まとめ

J-PARC MR では 1.3 MW のビーム強度実現に向けて、高繰り返し化と周回粒子数の増加を組み合わせた二段階のアップグレードを計画している。2023 年からの 1.36 秒周期での加速にもちいる加速電圧パターンの評価を縦方向シミュレーションを用いて行った。

縦方向シミュレーションの調整には 2.48 秒周期でのデータを用いた。空胴インピーダンスの効果を取り入れることでウェイク電圧によるバンチ内の分布の変化や Bunching Factor がデータを再現できるようになった。

調整したシミュレーション環境を用いて、1.36 秒周期での加速にもちいる加速電圧パターンの評価を行った。シミュレーションの結果、バンチ結合振動の抑制

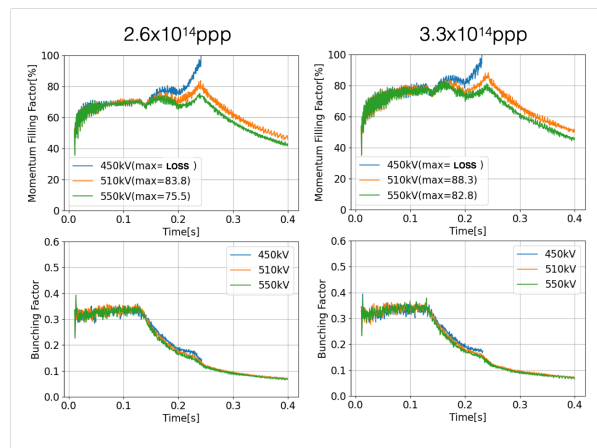


Figure 10: Momentum filling factor and bunching factor for various V_{top} and N_p in the case of 1.16 s cycle acceleration with the impedance of 11 RF cavities (0Ω for $h=6\sim 12$).

のためには、 $h = 6 \sim 12$ の範囲での空胴電圧 FB が不可欠であることがわかった。評価の結果、最大電圧が 450 kV 以上あれば 750 kW 相当の安定な加速が出来ること、最大電圧が 510 kV 以上あれば 1.1 MW 相当の加速も有望であることがわかった。

シミュレーションで評価した電圧パターンを用いて 2023 年に 750 kW 加速に成功し、その際の Bunching Factor はシミュレーションとよく一致していた。

1.36 秒周期においてもシミュレーションとビーム測定がよく一致したため、シミュレーションを用いて将来の 1.16 秒周期の場合の電圧パターンの評価を行った。評価の結果最大電圧が 510 kV 以上あれば 1.3 MW での加速が可能であるとわかった。

今後は、入射初期分布作成に空間電荷効果を加味したトモグラフィ再構成手法を用いることや、ビーム位相フィードバックの影響を加えた縦方向シミュレーションを行うことを検討している。また、今回は比較的簡単な直線的な電圧パターンを用いたが、将来的にはシミュレーションや計算を元により最適な電圧パターンの作成・評価を行うことを検討している。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring,” *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2021, no. 3, pp. 33–34, mar 2021.
- [2] K. Seiya *et al.*, “RF system upgrade for 1.3 MW operation of J-PARC main ring,” in *Proc. IPAC’24*, Nashville, TN: JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, may 2024, pp. 1017–1020.
- [3] K. Hasegawa *et al.*, “Preparation status 2024 of RF system for J-PARC MR upgrade,” in *Proc. 21st Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Japan*, Yamagata, next 2024.
- [4] Y. Sugiyama *et al.*, “NEXT GENERATION LLRF CONTROL SYSTEM FOR J-PARC MR,” in *Proc. 19th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Japan*, oct 2022, pp. 92–96.
- [5] H. Timko *et al.*, “Beam longitudinal dynamics simulation studies,” *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 26, no. 11, p. 114602, nov 2023.