

J-PARC RCS の縦方向ビーム操作の現状 CURRENT STATUS OF LONGITUDINAL BEAM MANIPULATION IN J-PARC RCS

沖田英史^{*,A)}, 田村文彦^{A)}, 足立恭介^{A)}, 野村昌弘^{A)}, 島田太平^{A)},
吉井正人^{A)}, 大森千広^{A)}, 清矢紀世美^{A)}, 原圭吾^{A)}, 長谷川豪志^{A)}, 杉山泰之^{A)}
Hidefumi Okita^{*,A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Kyosuke Adachi^{A)}, Masahiro Nomura^{A)}, Taihei Shimada^{A)},
Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Kiyomi Seiya^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Yasuyuki Sugiyama^{A)}
^{A)} J-PARC center, JAEA & KEK

Abstract

In recent years, the J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) has implemented single-ended RF cavities to enable high-intensity beam acceleration exceeding 1 MW. Alongside this hardware upgrade, longitudinal beam parameters such as debuncher settings and phase feedback gain patterns in the LLRF system have been optimized to further reduce beam losses. The expanded debuncher operating range allows injection of beam pulses with a broader momentum spread, contributing to improved bunching factor. The adjustment of phase feedback gain patterns also contribute to the reduction of the beam loss. This study evaluates the longitudinal beam behavior during recent 1 MW operations using detailed beam simulations incorporating recent machine parameters. Simulation results for a 1.5 MW beam acceleration test conducted this year are also presented.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) は設計ビーム強度 1 MW の大強度陽子加速器である。RCS は 2015 年に 1 MW でのビーム加速に初めて成功し [1]、その後、装置更新やビームコミッショニングを経て、現在は高い稼働率と極めて低いビームロスで 1 MW ビーム連続運転を達成している [2,3]。こうした成果を受けて、1 MW を超える大強度ビームの実現に向けた検討も進められている [4]。

近年、1 MW を超える大強度ビーム加速のためのシングルエンド型の RF 空洞の実装に加えて、ビームロス低減のための縦方向ビーム操作に関わるパラメータ調整を実施している。RCS では、RF 電源への負荷を低減でき、より大強度ビームを加速可能なシングルエンド型の RF 空洞の実装を 2021 年から進めている。また、入射ビームラインにあるデバンチャのパラメータ操作範囲を広げ、従来よりも運動量方向に幅広い分布の中間パルスビームを RCS に入射できるようになった。加えて、近年では、LLRF システムに実装されている位相フィードバックのゲインパターンの調整も実施した。本発表では、現在の 1 MW ビーム加速時の縦方向ビーム操作および加速中の縦方向ビーム挙動を縦方向ビームシミュレーションで評価した結果について報告する。また、シングルエンド型 RF 空洞の実装や、近年の縦方向ビーム操作パラメータの調整が縦方向ビーム挙動に与える影響について、縦方向ビームシミュレーションを用いて考察する。最後に、今年実施した 1.5 MW ビーム加速試験における縦方向ビーム挙動についても、縦方向ビームシミュレーションで評価した結果を報告する。

2. 現在の 1 MW 加速時の縦方向ビーム挙動

本章では、現在の 1 MW ビーム加速時における縦方向ビーム挙動についてまとめる。現在の 1 MW ビーム

加速の基準となっている装置パラメータを Table 1 に示す。Figure 1, 2 は Table 1 の条件で 1MW ビーム加速を実施したときに観測されたバンチングファクタ (BF) と全ての RF 空洞に発生した RF 電圧のベクトル合成結果である。現在の 1 MW 運転における BF は、多重入射後で 0.45 と高い値を実現している。参考までに、2020 年頃と比べ現在の BF は 10% 高い [5]。加えて、入射後の BF の振動についても 2020 年頃よりも抑えられている。これは、中間パルスビームの運動量方向の分布の拡大および位相フィードバック調整の効果によるものであり、詳細は 4、5 章で説明する。

現在の 1 MW 加速時の縦方向ビーム挙動を評価するため、Table 1 の装置パラメータを反映した縦方向ビームトラッキングシミュレーションを実施した。縦方向ビームトラッキングシミュレーションには BLoND [6,7] で構築したコード [8] を使用した。縦方向の空間電荷効果は計算に含まれており、計算に用いる RF 電圧には Fig. 2 に示す 1 MW 加速時に観測された電圧を採用し、高調波の影響も正確に計算に反映されている。BLoND で計算した BF は Fig. 1 で示すように、現在の 1 MW ビーム加速時のビーム挙動を精度良く再現できている。BLoND でモーメントムフィリングファクタ (MF) を計算した結果が、Fig. 3 である。現在の 1 MW 加速時の MF は 0.90 程度であり、実際に 1 MW ビーム加速時には縦方向でのビームロスは観測されていない。以降の章では、現在置き換えを進めているシングルエンド型の RF 空洞、近年調整した縦方向ビーム操作パラメータが、縦方向ビーム挙動に与えている影響について考察する。

3. シングルエンド空洞の運用状況

RCS には 12 台の RF 空洞がある。RCS 建設当初から稼働していた RF 空洞はプッシュアップ型 (PP) である。PP 空洞は 2 本の四極管を使用し、それぞれが加速ギャップの上流側電極と下流側電極を個別に駆動する方式である。ビーム強度が 1 MW に近づくにつれて、ビームローディングを補償するために必要な四極管への負荷

* hidefumi.okita@j-parc.jp

Table 1: Parameters at the Recent 1 MW Beam Acceleration

Macro pulse	
width	500 μ s
peak current	50 mA
Intermediate pulse	
dp/p offset	-0.15%
width	440 ns
momentum spread	0.65% (FWHM) (DB1/2 4000/6000)
RF parameters of RCS	
RF cavity	SE : No. 1, 4, 5, 7, 9, 11 PP : No. 2, 3, 6, 8, 10, 12
RF frequency dp/p offset	-0.05%
h4 phase sweep	-100 deg.
phase feedback pattern	Pattern C in Fig. 8

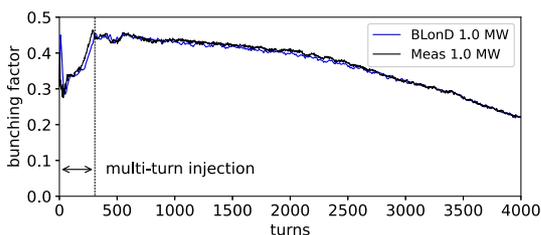


Figure 1: Measured and simulated BF of 1 MW beam.

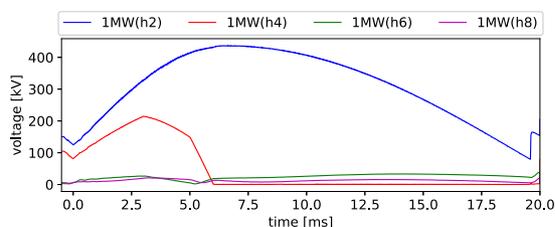


Figure 2: The vector-sum RF voltage measured at 1 MW beam.

が増加し、2本の四極管の動作にアンバランスが生じることが問題となった [9,10]。さらに、四極管の陽極電流が増加し、1 MW ビームの加速に必要な陽極電流は電源の出力上限に達した。

そこで開発されたのがシングルエンド型 (SE) の RF 空胴である。開発された SE 空胴では、2本の四極管がいずれも加速ギャップの下流側電極のみを駆動する方式を採用しており、四極管動作のアンバランスは解消された。加えて、空胴の構成や磁性体コアによりシャントインピーダンスの高い材質のものを採用することで、SE 空胴は 1 MW 加速時に必要な陽極電流を PP 空胴と比較して約 40% 低減できることが確認されており、計算上は現在の陽極電源のままで 2 MW 加速まで対応可能であることが示されている。このような背景から、RCS では PP 空胴から SE 空胴への置き換えを始めている。

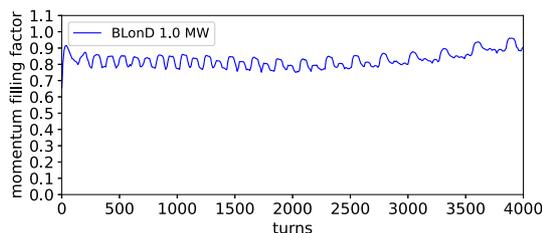


Figure 3: MF simulated using the latest machine parameters of 1 MW beam.

RCS に SE 空胴の初号機が実装されたのは 2021 年である。その後、2023 年に 2 台、2024 年に 3 台実装され、2025 年現在、全 RF 空胴のうち 6 台が SE 空胴に置き換わっている。今後、2028 年度までに 12 台全ての PP 空胴を SE 空胴に置き換える予定である。

PP 空胴および SE 空胴それぞれについて、1 MW 加速時における空胴 1 台あたりのギャップ電圧を測定した結果を Fig. 4 に示す。RCS は基本波電圧 (h2) と二倍高調波電圧 (h4) を用いたデュアルハーモニック運転を採用しており、h2、h4 については PP 空胴、SE 空胴ともにプログラム通りの電圧を印加できている。ウェイク等により発生する三倍高調波電圧 (h6) についても、SE 空胴は概ね電圧をゼロに制御できている。PP 空胴については、消費電力の都合で h6 電圧を補正するフィードバック設定をオフにしている。そのため、PP 空胴では最大で 5 kV 程度の h6 電圧が発生している。四倍高調波電圧 (h8) については、RF 電源の性能を考慮し、PP、SE ともに電圧補正フィードバック設定をオフにした運用をしている [11]。そのため、PP、SE 空胴ともに h8 電圧が発生しており、特に、SE 空胴で加速前半で PP 空胴よりも高い h8 電圧が発生しており、Fig. 2 に示す合成電圧で確認できる程度である。SE 空胴で主に発生している h8 電圧は、BF を最大で 5%、MF を約 1% 増加させる程度にとどまり、縦方向の安定したビーム加速に大きく影響していないことが BLonD 計算から示されている。

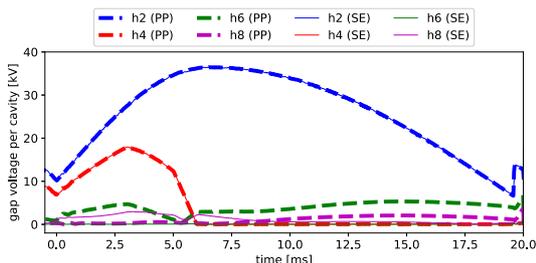


Figure 4: The measured gap voltage per cavity at 1 MW beam acceleration. Solid and dashed lines are SE and PP cavity, respectively.

4. 入射ビームの運動量広がりへの拡張

RCS の入射ビームラインには、中間パルスビームの運動量方向の分布を調整する 2 台のデバンチャ (DB1,

DB2)が設置されている。近年、デバンチャのパラメータ操作範囲が広がり、中間パルスビームの運動量方向の分布の調整可能範囲が拡張された。

Figure 5は、各デバンチャの操作値での中間パルスビームの運動量方向の分布をトムグラフィ [12] で測定した結果である。2023年頃まで1 MW 運転で使われていたデバンチャ操作値はDB1/2が4000/2400で、このときの運動量方向の分布の広がり半値幅(FWHM)で0.38%であった。ここで、デバンチャ操作値はデバンチャに印加する電圧振幅に関係するパラメータである。

近年、DB2の操作値が6000まで拡張された。これにより、DB1/2が4000/6000のときで運動量分布の幅の半値幅は0.65%まで広がり、現在の1 MW 運転ではこの操作値が採用されている。また、ビーム試験でDB1/2が0/6000での運動量分布の広がり測定した結果は半値幅で0.87%であった。装置運用上の理由により、現在はDB1の操作値0を利用運転に適用できないが、以前採用していた操作値(DB1/2が4000/2400)と比較し運動量広がり約2倍に拡張されており、将来的に利用運転への適用も検討されている。

中間パルスビームの運動量方向の分布の幅の拡張が、RCSの縦方向ビーム挙動に与える影響の調査のため、デバンチャ操作値を変えて1 MW ビーム加速試験を実施し、BFを測定した結果がFig. 6である。ここで、装置パラメータはデバンチャ操作値とRF frequency dp/p offsetが-0.10%であることを除いて、Table 1と同じである。デバンチャで中間パルスビームの運動量分布を広げるほどBFは増加し、以前のDB1/2が4000/2400のと比較して、DB1/2が0/6000ではBFが20%向上している。また、特筆すべきは多重入射中のBFも向上していることである。運動量方向に幅の狭い分布の中間パルスビームでも、RF バケツ中心に対して中間パルスビームの中心運動量にオフセットをつけて入射することで、シンクロトロン振動を利用して、RF バケツ内に広くビームを分布させ、多重入射後のBFを増加させることができる。この手法は縦方向ペイントにおける運動量オフセット入射と呼ばれるが、一方で一方でこの手法では、シンクロトロン振動の過程でビーム分布が一時的に縦方向に偏る。そのため、運動量オフセットを増やすと、多重入射後のBFの増加と引き換えに、多重入射中のBFは悪化する。運動量広がりを拡張したことで、運動量オフセットを増やすことなくRF バケツ内に広くビームを分布させることができるため、多重入射中を含めてBFが増加している。

各デバンチャ操作値での縦方向ビーム挙動を考察するため、BLonDで各デバンチャ操作値に対応する中間パルスビーム分布を考慮した計算を実施した。Figure 6に、BLonDで用いた各デバンチャ操作値を模擬した中間パルスビームの位相空間中の分布を示している。RF位相方向は一様分布とし、運動量方向は各デバンチャ操作値のトムグラフィ測定結果に従う分布とした。BLonDで使用したRF電圧は1 MW 加速時に観測されたGap電圧を用い、縦方向の空間電荷効果は計算に含まれている。また、以前のデバンチャ操作値との比較のために、測定していないDB1/2が4000/2400についても計算を実施した。

BLonDで計算した各デバンチャ操作値のBFは測定

値と重なり、各デバンチャ操作値での縦方向ビーム挙動を精度良く計算できている。これを踏まえ、各デバンチャ操作値でのMFを計算した結果がFig. 7である。DB1/2が4000/2400、4000/6000、0/6000でのMFの最大値はそれぞれ、0.90、0.95、1.00となっており、中間パルスビームの運動量方向の分布が広いほど順当にMFが増加している。本実験では、RFバケツ中心を基準とした運動量オフセットは0.05%に設定したが、MFを評価した結果、DB1/2が0/6000のときには、0.05%の運動量オフセット量でも過剰であることが判明した。これは、これまで採用してきた縦方向ペイント(運動量オフセットと二倍高調波位相の掃引)の程度を軽減でき、よりシンプルな入射方式の導入、そして、多重入射中のBFをさらに向上させるための新たな選択肢となるものである。

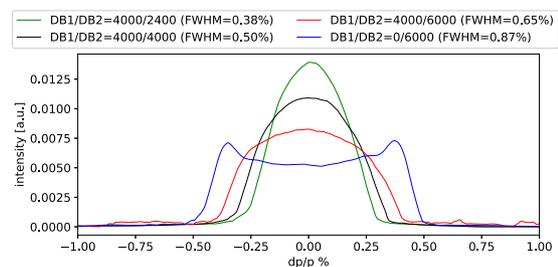


Figure 5: Momentum spread distributions of intermediate pulses with varying debuncher parameters.

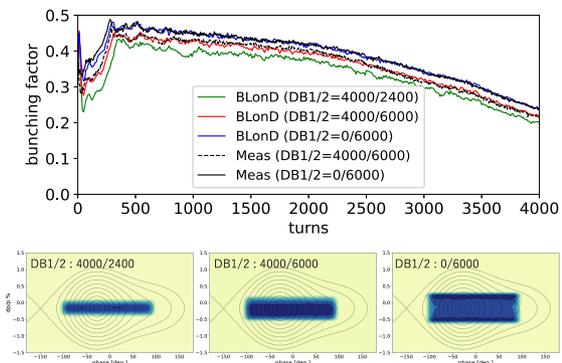


Figure 6: Measured and simulated BF with varying debuncher parameters at 1 MW beam.

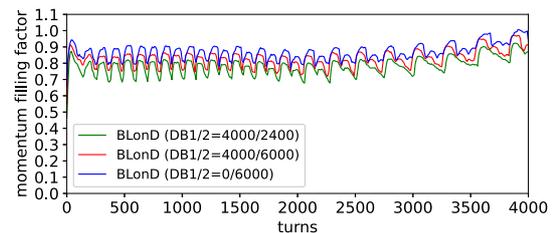


Figure 7: Simulated MF for each debuncher parameter setting.

5. 位相フィードバック調整

RCS の LLRF システム [13] には縦方向のダイポール振動を抑制することが目的で位相フィードバック (PFB) [11] が実装されている。2024 年まで採用していた PFB のゲインパターンは Fig. 8 のパターン A である。パターン A は運動量オフセット入射により発生させたシンクロトロン振動を利用した縦方向ペイントを阻害しないよう、多重入射が終了する 0.25 ms より後の 1 ms から PFB ゲインを立ち上げ始め、3 ms で最大値に達するというものである。

近年のビーム調整で、RF 電圧を下げた運用や 1.5 MW 調整など、縦方向のビームロスに対する裕度が低下し、ビームロスが実際に観測された条件において、PFB ゲインパターンを調整することで、ビームロスを低減できる場合があることが分かった。ビーム試験では、Fig. 8 のパターン B, C のように、PFB ゲインを 0 ms から立ち上げるパターンに変更することでビームロスが低減した。

PFB 設定が縦方向ビーム挙動に与える影響を評価するために、PFB 設定以外の条件を揃えて 1 MW ビーム加速を実施した。装置パラメータは、RF frequency dp/p offset が -0.10% であることを除いて、Table 1 と同じである。各 PFB 設定での BF の測定結果が Fig. 9 である。PFB ゲインを立ち上げるタイミングを早めても縦方向ペイントのシンクロトロン振動を阻害することなく、多重入射直後の BF は変わらないことが確認された。さらに、PFB ゲインが最大値に達するタイミングが早いほど多重入射後の BF の振動が抑えられていることが観測された。

ここで、各 PFB での縦方向ビーム挙動を前章までと同様に BLonD で評価した。BLonD で計算された各 PFB パターンでの MF が、Fig. 10 である。PFB ゲインが最大値に達するタイミングが早いほど MF は低下しており、特に、パターン C はこれまで採用していた PFB パターン A と比べ MF が 10% 低くなっており、ビームロスに対する裕度が大幅に向上している。Figure 11 は PFB パターン A, C での 4000 turn における位相空間分布である。PFB パターン A で発生しているフィラメンテーションが PFB パターン C の分布にはなく、これにより MF が低下していることが確認された。このように、PFB ゲインの立ち上げのタイミングを早めることで、フィラメンテーションの発生を防ぐことができ、PFB 調整が縦方向でのビームロス低減に有効である。

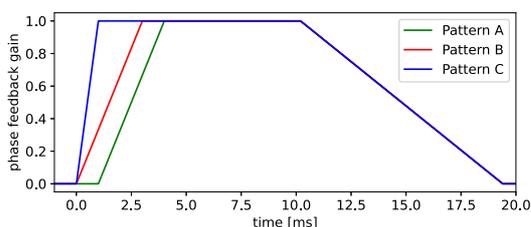


Figure 8: Phase feedback gain patterns.

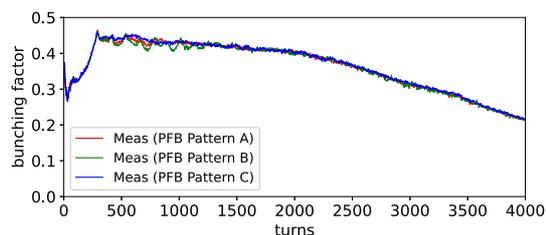


Figure 9: Measured BF with varying the phase feedback gain pattern at 1 MW beam.

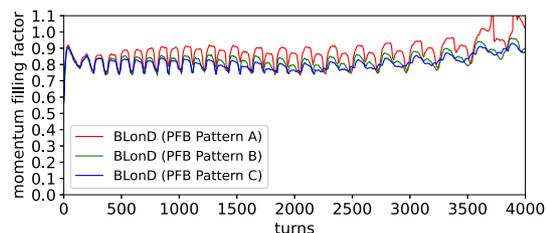


Figure 10: Simulated MF for phase feedback gain pattern.

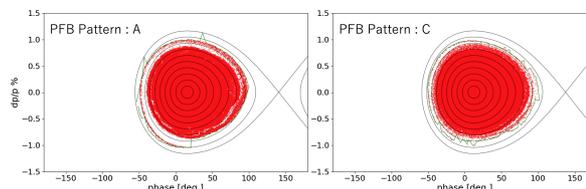


Figure 11: Simulated phase space distributions at 4000 turn for phase feedback patterns A (left) and C (right), respectively.

6. 1.5 MW ビーム加速試験

将来的な RCS の 1 MW を超える大強度ビーム実現に向けて、1.5 MW 相当の粒子数 (以下、「1.5 MW」とする) でのビーム加速試験を今春に実施した。1.5 MW ビーム試験では、3 GeV までビームを加速せず、PP 空洞で加速可能な 0.8 GeV までビームを加速し、加速前半におけるビームロスの調整およびビーム挙動の測定を実施した。1.5 MW ビーム調整の結果、装置パラメータが Table 2 の場合、1 MW と同程度の極めて低いビームロスで 1.5 MW ビームを加速できることが確認された。

Figure 12 は、装置パラメータが Table 2 のときに観測された BF である。1.5 MW 加速時の多重入射後の BF は運動量オフセットを導入していないにもかかわらず、1 MW 加速時よりも全体的に 5% 増加している。これは、運動量広がり半値幅で 0.87% と広い中間パルスビームを採用したことが主な要因である。

前章までと同様の手法で 1.5 MW ビーム加速時の BF を BLonD で計算した結果を Fig. 12 に示す。Figure 12 が示すように、BLonD は 1.5 MW ビーム加速時の縦方向ビーム挙動も精度良く再現できていることが分かる。BLonD のよる解析の結果、1.5 MW 加速時の空間電荷効果による BF の増加量は 2.5% 程度であることが確認された。参考までに、1 MW において空間電荷効果によ

るBFの増加量が1.5%程度である。

1.5 MW ビーム加速時に RF 空洞に発生した電圧を測定した結果が Fig. 13 である。h2, h4 については 1.5 MW ビーム加速時においても、1 MW 加速時と同様にプログラム通り印加できている。h6, h8 の高調波については、1 MW 加速時よりも増加しているが、増加率は粒子数の増加率と概ね一致しており、1.5 MW ビーム加速時の RF 電源動作に問題がないことが確認できた。

1.5 MW ビーム加速時の MF を BLongD で計算した結果が Fig. 14 である。1.5 MW 加速時の MF は 1 MW 加速時と同程度であり、1.5 MW においても縦方向は安定にビームを加速できていることが確認された。

Table 2: Machine Parameters at 1.5 MW Beam Test

Macro pulse	
width	600 μ s
peak current	60 mA
Intermediate pulse	
dp/p offset	0.0%
width	440 ns
momentum spread	0.87% (FWHM) (DB1/2 0/6000)
RF parameters of RCS	
RF cavity	SE : No. 1, 4, 5, 7, 9, 11 PP : No. 2, 3, 6, 8, 10, 12
RF frequency dp/p offset	0.0%
h4 phase sweep	-100 deg.
phase feedback pattern	Pattern C in Fig. 8

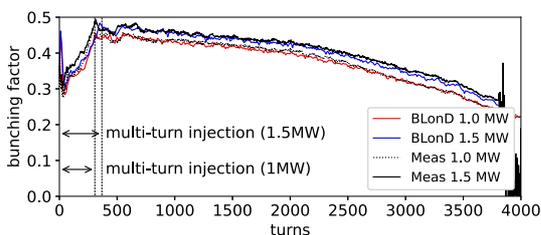


Figure 12: Measured and simulated BF of 1.5 MW and 1 MW beam.

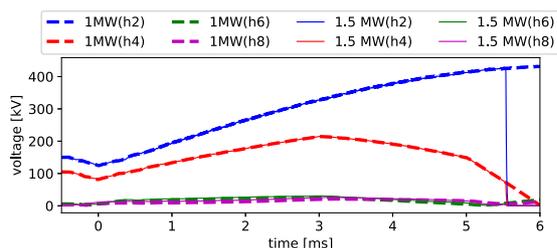


Figure 13: The vector-sum RF voltage measured at 1.5 MW and 1 MW beam.

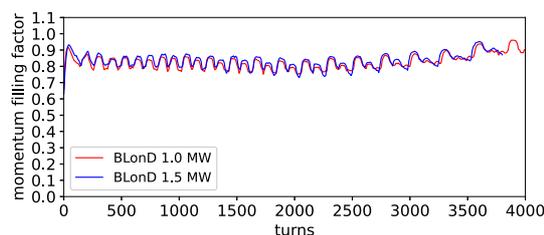


Figure 14: Simulated MF for 1.5 MW and 1 MW beam.

7. まとめ

本論文では、最新の 1 MW ビーム加速時の縦方向ビーム挙動を BLongD を用いて評価した結果について報告した。現在の 1 MW 加速では、近年の縦方向操作パラメータ調整の恩恵により、多重入射後の BF は 0.45 と高い値を達成しつつ、MF は 0.90 程度に抑えられている。実装を進めているシングルエンド空洞は、四倍高調波電圧が従来のプッシュプル型の RF 空洞よりも高く発生しているが、MF を 1% 増加させる程度で安定したビーム加速に影響を与えていない。中間パルスビームの運動量方向の分布の幅の拡大により、縦方向ペイント入射における運動量オフセット量を減らし、多重入射中を含めて BF を向上させられる選択肢を得た。位相フィードバック調整により、フィラメンテーションの発生を避け、多重入射後に到達する BF を変えることなく MF を 10% と大幅に低減でき、位相フィードバック調整がビームロスの低減に非常に効果的である。また、近年実施した 1.5 MW ビーム加速時の縦方向ビーム挙動を BLongD で評価した。1.5 MW においても BLongD で構築したコードで実際のビーム挙動を精度良く再現する。1.5 MW 加速時の MF は 1 MW 加速時と同程度で 1.5 MW ビームを縦方向に安定に加速できている。

現在の RF 電圧パターンは、5 年以上にわたり運用されてきたものであり、最新の装置パラメータに基づく最適化の余地がある。特に縦方向ペイントにおいては、入射ビームの運動量広がりや拡張および位相フィードバックの調整により、運動量オフセット量や二倍高調波の掃引位相に関する選択肢の幅が広がっている。今後は、これらの最新パラメータを踏まえた RF 電圧パターンの再設計を進める予定である。

参考文献

- [1] 山本風海他, “J-PARC 3 GeV シンクロトロンでの 1 MW 出力の達成”, 高エネルギーニュース, 34 (1), 19-28 (2015).
- [2] P.K.Saha *et al.*, “Beam loss and beam emittance minimization at J-PARC RCS for simultaneous operation to the MLF and MR”, Proc. of IPAC2024, pp. 939-942, (2024).
- [3] P.K.Saha *et al.*, “1-MW beam operation at J-PARC RCS with minimum beam loss”, Proc. of HB2023, pp. 147-152, (2023).
- [4] K.Yamamoto *et al.*, “Beyond 1-MW scenario in J-PARC Rapid-Cycling Synchrotron”, Proc. of HB2023, pp. 270-273, (2023).
- [5] H. Okita *et al.*, “Benchmarking of longitudinal calculation

- code BLoND for application to J-PARC RCS”, Proc. of PASJ2020, pp. 674-678, (2020).
- [6] H. Timko *et al.*, “Beam longitudinal dynamics simulation studies”, Phys. Rev. Accel. Beams 26, 114602, (2023). doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.114602
- [7] CERN, Beam Longitudinal Dynamics code BLoND version 2.0.11, <https://blond.web.cern.ch>
- [8] H. Okita *et al.*, “Improvement of longitudinal beam tracking simulation considering the frequency response of the cavity gap voltage monitor”, Nucl. Instr. Meth. A, 1041, (2022). doi:10.1016/j.nima.2022.167361
- [9] M. Yamamoto *et al.*, “Conceptual design of a single-ended MA cavity for J-PARC RCS upgrade”, J. Phys.: Conf. Ser., 1067 52014 (2018).
- [10] M. Yamamoto *et al.*, “Development of a single-ended magnetic alloy loaded cavity in the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid cycling synchrotron”, Prog. Theor. Exp. Phys. 073G01 (2023). doi: 10.1093/ptep/ptad085
- [11] F. Tamura *et al.*, “Commissioning of the next-generation llrf control system for the rapid cycling synchrotron of the japan proton accelerator research complex”, Nucl. Instr. Meth. A, 999, (2021). doi:10.1016/j.nima.2021.165211
- [12] H. Okita *et al.*, “Improvement of the longitudinal phase space tomography at the J-PARC synchrotrons”, J. Phys.: Conf. Ser., 2687 072005 (2024). doi:10.1088/1742-6596/2687/7/072005
- [13] F. Tamura *et al.*, “Multiharmonic vector rf voltage control for wideband cavities driven by vacuum tube amplifiers in a rapid cycling synchrotron”, Phy. Rev. Accell. Beams, 22, p. 092001 (2019).