

J-PARC MRにおける二倍高調波重畳による非対称RFバケツを用いたバンチ整形

BUNCH SHAPE CONTROL USING ASYMMETRIC RF BUCKET WITH THE SECOND HARMONIC RF IN THE J-PARC MR

杉山泰之^{*,A)}, 清矢紀世美^{A)}, 冨澤 正人^{A)}, 武藤 亮太郎^{A)} 田村文彦^{B)},
吉井正人^{A)}, 大森千広^{A)}, 原圭吾^{A)}, 長谷川豪志^{A)}

Yasuyuki Sugiyama^{*,A)}, Kiyomi Seiya^{A)}, Masahito Tomizawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Fumihiko Tamura^{B)},
Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}

^{A)} KEK/J-PARC

^{B)} JAEA/J-PARC

Abstract

J-PARC Main Ring delivers 30-GeV protons to the hadron experiments by the slow extraction. The beam power by the slow extraction reached 90 kW, and the studies to reach higher beam intensities are in progress. The instability during the injection period and the debunching process is one of the issues to achieve higher beam intensities. The longitudinal emittance blow-up is introduced to mitigate the instabilities. We achieved the beam power of 80 kW by injecting the beam into the RF bucket with the initial phase offset to have emittance blow-up in the early stage of the acceleration. The bunch with more broader and flatter longitudinal distribution is required to achieve higher beam intensities. The second harmonic RF was introduced to make asymmetric RF buckets for bunch shaping. This new method was key to achieving the beam power of 90 kW.

1. はじめに

J-PARC [1] の主リング (MR) シンクロトロン [2] 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各実験施設へと供給している。ハドロン実験に対しては検出器の瞬時レートを抑えるために長い時間 (~ 2 s) をかけて取り出される。この運転モードを遅い取り出し (SX) 運転モードと呼ぶ。MR は 2025 年夏時点で、 7.95×10^{13} 個の陽子を 1.36 s 毎に加速することでビーム強度 90 kW を達成している。

Table 1: Parameters of the J-PARC MR and its RF system for the SX as of 2025.

parameter	value
energy	3–30 GeV
beam intensity	(achieved) 7.95×10^{13} ppp
beam power	(achieved) 90 kW
repetition cycle	4.20 s
accelerating period	0.65 s
accelerating frequency f_{RF}	1.67–1.72 MHz
harmonic number h	9 (fundamental RF), 18 (second RF)
number of bunches N_b	8
maximum RF voltage	400 kV ($h = 9$), 110 kV ($h = 18$)
No. of cavities	9 ($h = 9$), 2 ($h = 18$)

Table 1 にハドロン実験に対する遅い取り出し (SX) 運転モードにおける 2025 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 の加速 RF システムはハーモニック数 h が $h = 9$ と $h = 18$ のデュ

アルハーモニック RF システムとなっており、 $h = 9$ は基本波として加速に用いられ、 $h = 18$ は二倍高調波としてバンチ成形に用いられる。

2. 遅い取り出しにおけるビームロス

SX 運転モードのビーム強度向上にはビーム入射段階とビーム取り出し前のデバンチ過程でのビームロス低減が必要不可欠である。

ビーム入射段階では横方向の不安定性抑制のためピーク電流の低い、つまり高いバンチングファクター (平均電流/ピーク電流) のビームが求められる。

SX 運転モードにおいては、ビームは RF 電圧をオフにしてデバンチを行った後で、3 次共鳴を用いてセプタム電磁石を用いてビームをゆっくり取りだしている [3]。デバンチ過程においては、ビーム強度の増加に伴って電子雲の発生と真空度の悪化、横方向の不安定性等が観測されビームロスの原因となっていた [4]。同じタイミングで縦方向 Microwave 不安定性が観測されたことから原因のひとつと考えられている [5]。これらの不安定性を抑制するには取り出し時に縦方向のエミッタンスが大きいビームが求められる。

2025 年 2 月までは、図 1 に示すようにビームの入射位相に対して基本波に位相オフセットを加えて RF バケツの初期位相をずらすことでダイポール振動中のフィラメンテーションによるエミッタンス増大を行い、80 kW のビーム強度を達成していた。

80 kW を越える強度になると加速前のビーム入射・周回中のロスが無視できなくなっていた。それまでは入射時の基本波オフセット位相の増大で対応していたものの、 60° を超えると次第に RF バケツの端に近づいて RF バケツからの溢れも増大するため、これに変わる新たなロス低減策が必要となった。

* yasuyuki.sugiyama@kek.jp

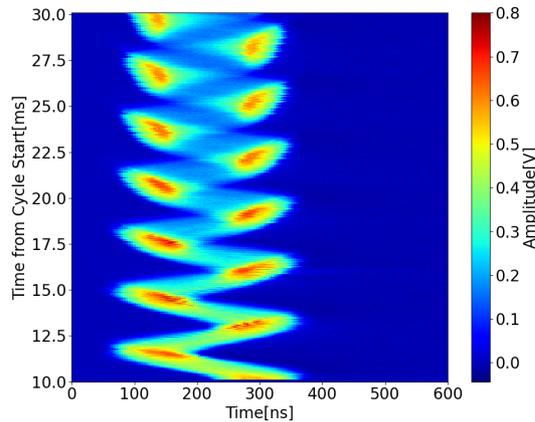


Figure 1: Mountain range plot in the case of the phase offset (55°) injection only with $h = 9$.

3. 二倍高調波重畳によるビームロス低減試験

2025年4月のSX運転モードのビーム調整の際に、強度増加に向けたビームロス低減策として、二倍高調波の重畳を試みた。

入射期間中に二倍高調波を重畳してエミッタンス増大を行う手法は以前から提案されていた [6]。以前提案していた手法では二倍高調波ありのRFバケツに対してビームを運動量方向にずらして入射する方法であったが、今回は簡単のためにビームの入射位相のみによる調整を試みた。

まず、二倍高調波有りのRFバケツの中心にビームを入射してロスや不安定性を確認した。図2に二倍高調波ありでバケツの中心に入射した際のマウンテンプロットを示す。マウンテンプロットからも分かるように二倍高調波により速やかにピーク電流が抑えられている。しかしながら、同時にビームの入射期間中に横

方向の不安定性が発生しており、そのままでは加速に使用できなかった。

そこで、それまでの手法をヒントに、基本波および二倍高調波の位相にオフセットを与える事を試みた。調整を行っている際に、二倍高調波位相はビーム入射位相に合わせたままで基本波位相のみずらした場合に横方向ロスが大幅に低減されることが分かった。図3に二倍高調波ありで基本波位相のみ 55° ずらした場合のマウンテンプロットを示す。二倍高調波ありで中心入射の時と比べてピーク電流の減少は少ないものの、二倍高調波無しで位相オフセット入射の時よりもピーク電流が抑えられていることが分かる。

図4に強度80 kW相当のビームに対する二倍高調波の有無、基本波位相オフセットの有無でのバンチングファクターの比較を示す。二倍高調波ありで基本波位相オフセットありの場合は、二倍高調波ありで中心入射の時と比べてバンチングファクターの最終到達値は低いものの、二倍高調波無しの位相オフセット入射のときと比べてバンチングファクターの振動が速やかに収まっており最終到達値も5%程改善していることが分かる。

図5に80 kW相当のビームに対する基本波位相オフセットに加えて二倍高調波の有無でのMR各部でのビームロスの時間変化の比較を示す。二倍高調波を加えて基本波に位相オフセットを付けることで、入射期間中の直線部Aのロスが大幅に低減されることがわかる。

こうして、入射時間帯でのロスを抑制出来る条件が出来たため、加速調整を行った。この際、2025年1月まで採用していた最大電圧が400 kVの加速電圧パターンに加えて、基本波位相オフセット 55° 、振幅110 kVの二倍高調波の重畳を入射開始から加速初頭の230 ms間に行う様にしたところ、強度80 kWのビームをロス無く加速が行うことが出来た。また、デバンチ前に行っているバンチ回転操作の電圧振幅や印可時間も特に変更せずとも不安定性を抑制することが出来た。

入射から取り出しまでロスを低減出来る条件が整っ

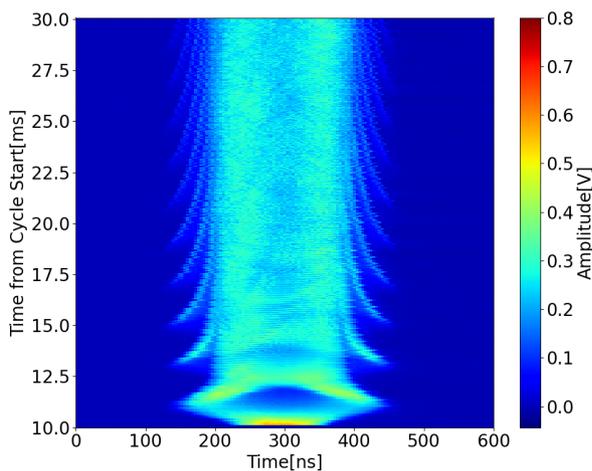


Figure 2: Mountain range plot in the case of the bucket center injection with dual harmonic RF.

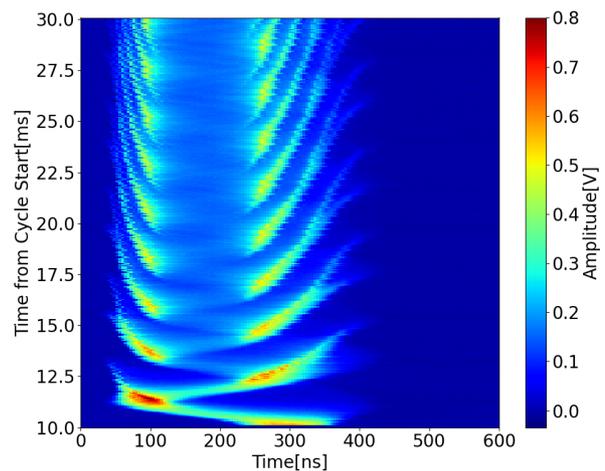


Figure 3: Mountain range plot in the case with $h = 9$ phase offset (55°) with dual harmonic RF.

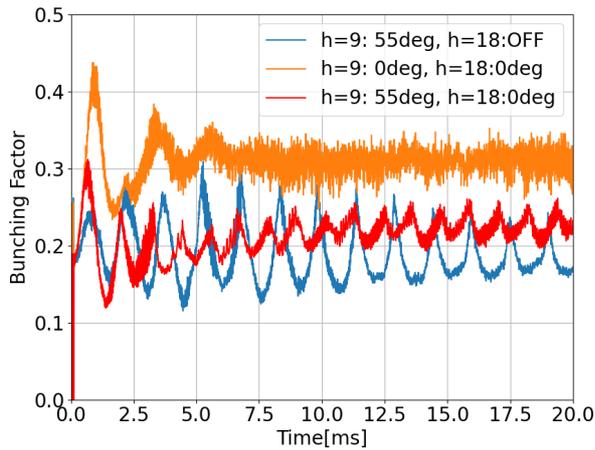


Figure 4: Comparison of the bunching factor at the beam power of 80 kW.

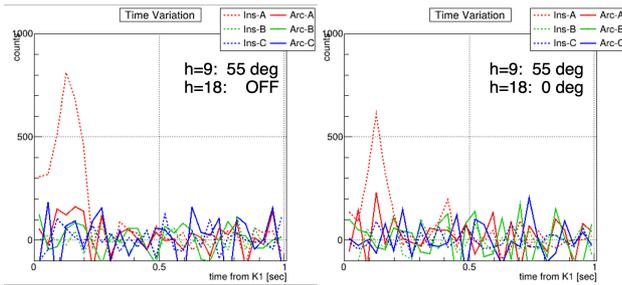


Figure 5: Comparison of the beam loss in the case of $h = 9$ phase offset (55°) with and without 2nd RF ($h = 18$) at the beam power of 80 kW.

たことで、2025年4月末からは強度 90 kW での SX 運転モードの利用運転を実現することが出来た。

4. 縦方向シミュレーション

二倍高調波ありで基本波位相オフセットの有無によるビームロス低減のメカニズムを探るため、ビームの

縦方向シミュレーションを実施した。

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 [7] を用いて行った。今回は、ビームローディング効果と空間電荷効果は考慮せずにシミュレーションを実施した。シミュレーションにはマクロ粒子数を 10 万個用いた。

シミュレーションでは、基本波電圧 160 kV、二倍高調波電圧を 110 kV とし、基本波位相オフセットの有無、二倍高調波の有無で 2 万ターン後 (約 110 ms 後) での位相空間分布を比べた。

図 6 に、基本波のみで位相オフセットあり、二倍高調波ありで基本波位相オフセット無し、二倍高調波ありで基本波位相オフセットありの場合の 2 万ターン後の位相空間分布を示す。

二倍高調波ありで基本波位相オフセット無しの場合、基本波のみで位相オフセットありの場合と比べて時間方向には平坦でピーク電流の低い分布になっているものの運動量広がり小さくエミッタンスが小さいことが分かる。この運動量広がりの小ささが横方向の不安定性の一因であると考えている。

一方で、二倍高調波ありで基本波位相オフセットありの場合は、位相空間分布の中心に粒子がないホローな分布となっており、時間方向に平坦であるだけでなく運動量方向にも十分広がった分布となっていることが分かる。また、基本波と二倍高調波の位相のオフセットによって RF バケツが非対称になっている。基本波位相オフセットによりフィラメンテーションが起きているのは二倍高調波無しの場合と同様であるが、非対称 RF バケツによってビームがより外側を周回するようになってホロー分布が形成されるのに加えて、シンクロトロン運動も早くなっておりバンチングファクターの速やかな安定に寄与していると考えられる。

次に、基本波位相だけでなく、二倍高調波位相も変化させて、最適な位相の組み合わせをシミュレーションを用いて探索した。

図 7 に様々な位相の組み合わせでの位相空間分布を示す。基本波位相オフセットと二倍高調波位相オフセットが同符号の場合には、エミッタンスが小さくなり位

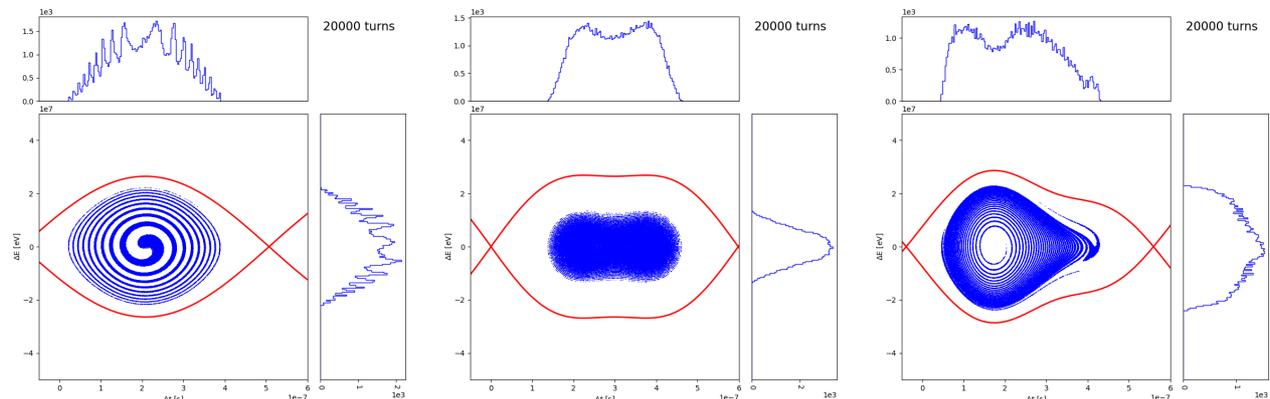


Figure 6: Phase space distributions at 20000 turns in the simulation. (Left: Phase offset injection (55°) only with $h = 9$. Center: Bucket center injection with dual harmonic RF. Right: Injection with $h = 9$ phase offset (55°) and dual harmonic RF.

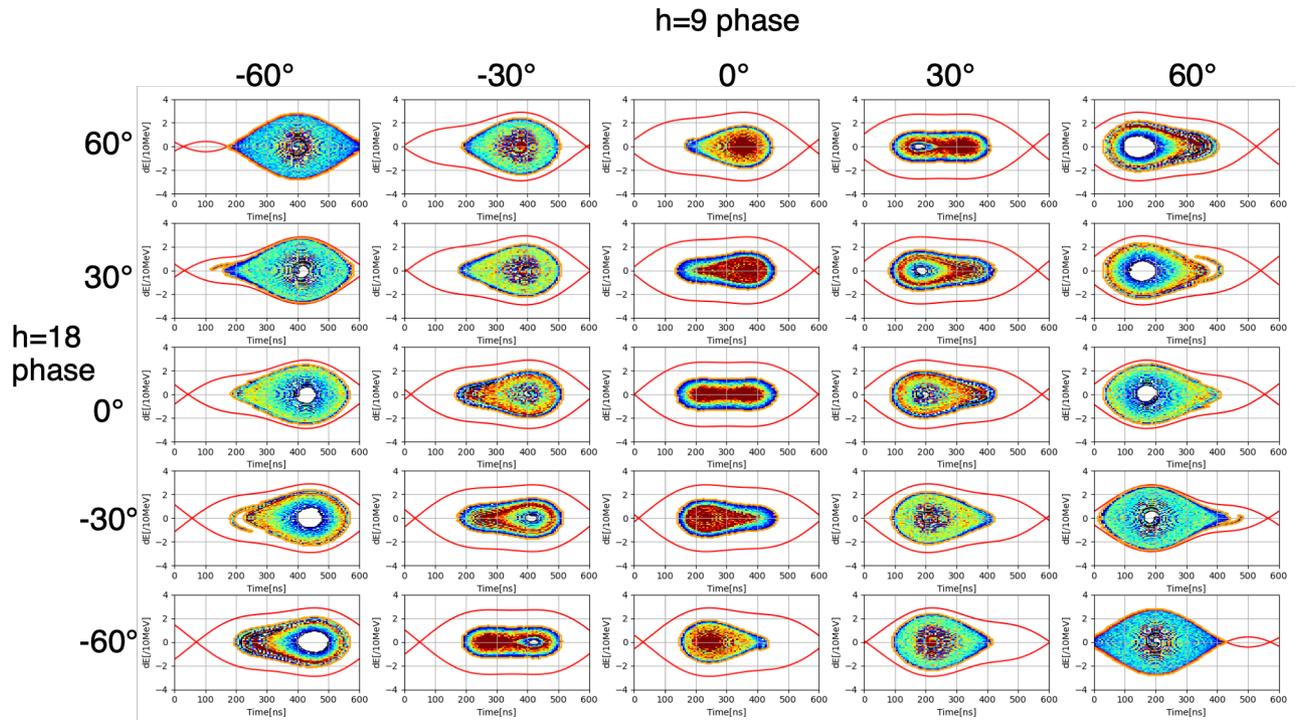


Figure 7: Phase space distribution at 20000 turns in the simulation for various combinations of the phase offset.

相空間分布での密度も高くなっている。これは、それぞれの間の位相差が減少してしまったために多くの粒子がより内側に集中してしまったからであると考えている。

一方で、基本波位相オフセットと二倍高調波位相オフセットが逆符号の場合には両者の間の位相差が増えることでより外側に粒子が分布することができ、ホロー葉分布が出来て位相空間分布での密度も下がっていることが分かる。ただし、位相差が大きくなりすぎるとバケツよりも外側に出る粒子が出てしまう。

バケツから粒子が溢れない条件でエミッタンスやパンチングファクター、運動量広がり最適となる位相の組み合わせをシミュレーションを元に調べた。

図 8 に、様々な位相の組み合わせでの、パンチングファクター、位相空間分布での最高密度、エミッタンス、パンチ長、最大運動量広がり、Momentum Filling Factor を示す。ここで Momentum Filling Factor は簡単のため RF バケツの大きさとマクロ粒子の最大運動量の比とした。Bunching Factor に関しては基本波位相オフセットと二倍高調波位相オフセットが同符号の方がわずかに大きな値を示すのに対して、エミッタンスや運動量広がり、位相空間分布での密度に関しては、位相が逆符号であった方が良い結果を示していることが分かる。これらの分布から、Momentum Filling Factor を 0.8 程度に抑えつつ、より大エミッタンスで運動量広がり大きく位相空間分布での密度が小さい領域で許されるのは図 8 中で黒枠で囲んだ領域であることが分かった。

5. 大強度ビーム試験

シミュレーションで得られた条件を元に、ビーム強度 100 kW を目指したビーム試験を実施した。

シミュレーションで得られた条件領域の周辺をスキャンした結果、100 kW を越える強度では基本波位相オフセットが 45° 、二倍高調波位相オフセットが -20° の条件が最も入射期間でのビームロスが低いことが分かった。また、デバンチ過程での不安定性とビームロスに関しても、同様にこの条件が最も良好であることが分かった。この条件を用いて、2025 年 5 月に強度 100 kW のビームの遅い取り出しに成功した。

一方で、シミュレーションでは基本波と二倍高調波の位相オフセットが逆符号であればそれぞれの位相オフセットは正負いずれも問題なかったが、ビーム試験では基本波位相オフセットを負位相に設定したところ横方向の不安定性によるビームロスが発生した。この原因は現在調査中である。

6. まとめ

J-PARC MR ではハドロンホールへの遅い取り出しモードでのビーム運転強度増強のためにビームスタディを行っている。

ビーム入射時およびデバンチ過程でのビームロス低減の為に入射時のバンチ操作によるエミッタンス増大が不可欠であるが、これまで採用していたバンチ操作である位相オフセット入射ではビーム強度 80 kW 以上ではロスが無視できなくなってきた。

そこで、二倍高調波の重畳によるビームロス低減試験を実施した。ビーム試験の結果、基本波と二倍高調

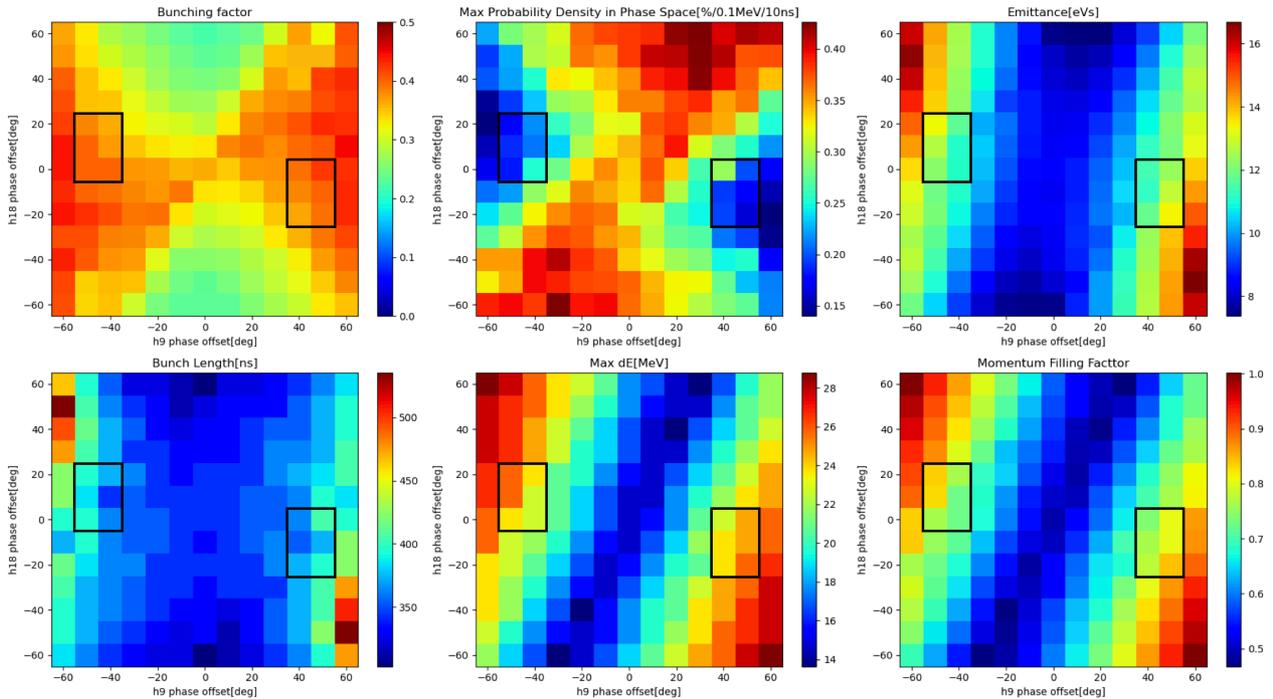


Figure 8: Longitudinal beam properties at 20000 turns in the simulation for various combinations of the phase offset. Black rectangles show the parameter regions used in the beam study.

波の位相をマッチさせた状態でバケツ中心にビームを入射した際には横方向の不安定性が発生するが、基本波位相にのみオフセットを与えたところロスが大幅に低減されることが分かった。この条件を用いてビーム強度 90 kW の利用運転を行うことが出来た。

基本波位相オフセットと二倍高調波位相オフセットの与える位相空間分布への影響を縦方向シミュレーションを用いて調べた。基本波位相オフセットを付けることで、RF バケツが非対称となり、大エミッタンスで運動量広がり大きいホロービームが形成されることが分かった。また、シミュレーションを元に最適な位相オフセットの組み合わせを求めた。

シミュレーションで求めた条件を用いてビーム試験を行い、強度 100 kW のビーム加速および取り出しに成功した。

今回の調整においては、デバンチ過程直前のバンチ回転操作のパラメータに関しては変更を行っていないが、入射時のバンチ操作の変更に伴って加速終了時の位相空間分布の変化が想定されることから、今後最適化を行うことで更なる強度増加が見込めると考えている。加速終了時の位相空間分布に関しては、今後データを取得してトモグラフィ再構成を行う予定である。ま

た、基本波位相オフセットが負の場合に観測された横方向の不安定性に関しては今後継続して調査を行う。

参考文献

- [1] S. Nagamiya, "Introduction to J-PARC," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2012, no. 1, p. 2B001, 2012.
- [2] T. Koseki *et al.*, "Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2012, no. 1, p. 2B004, 2012.
- [3] M. Tomizawa *et al.*, "Slow extraction from the J-PARC main ring using a dynamic bump," *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sect. A*, vol. 902, pp. 51–61, sep 2018.
- [4] B. Yee-Rendon *et al.*, "Electron cloud simulations for the main ring of J-PARC," in *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 874, no. 1, jul 2017, p. 012065.
- [5] Y. Sugiyama *et al.*, "Analysis of the Longitudinal Microwave Instability in the J-PARC MR," in *Proc. 4th J-PARC Symp. 2024*. (Accepted for publication).
- [6] Y. Sugiyama *et al.*, "Simulation of Phase-space Offset Injection with Second Harmonic RF for Longitudinal Emittance Blow-up in J-PARC MR," mar 2021.
- [7] H. Timko *et al.*, "Beam longitudinal dynamics simulation studies," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 26, no. 11, p. 114602, nov 2023.