

J-PARC RCS における 2 倍高調波を用いたバンチ平坦化操作の最適化 OPTIMIZATION OF BUNCH LENGTHENING USING SECOND HARMONIC IN J-PARC RCS

足立 恭介 ^{*,A)}, 田村 文彦 ^{A)}, 野村 昌弘 ^{A)}, 島田 太平 ^{A)}, 沖田 英史 ^{A)}, 吉井 正人 ^{B)},
大森 千広 ^{B)}, 清矢 紀世美 ^{B)}, 原 圭吾 ^{B)}, 長谷川 豪志 ^{B)}, 杉山 泰之 ^{B)}

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

^{A)} J-PARC Center, JAEA, ^{B)} J-PARC Center, KEK

Abstract

Under current operating conditions, the bunch length of the RCS extraction beam is shorter than that the MR RF bucket. In order to improve the RCS-MR longitudinal matching, a method for bunch lengthening of the RCS extraction beam is proposed. The proposed method is based on driving a second harmonic RF voltage just before the beam extraction and the placing the beam at the unstable fixed point (UFP). This method has the advantage of being able to bunch lengthening in a short time, even when the slip coefficient is small, as is the case immediately before extraction from RCS. Furthermore, by optimizing the driving pattern of the second harmonic, it is possible to fine-tune the bunch shape, which is expected to improve matching with the MR RF bucket. The present study is an exposition of the results of an investigation into the enhancement of matching through the optimization of bunch shape manipulation, as well as the results of demonstrations.

1. はじめに

J-PARC は 400 MeV のリニアック、3 GeV シンクロトロン (RCS)、及び主リングシンクロトロン (MR) で構成された大強度陽子加速器施設である。RCS は、設計ビーム強度 8×10^{13} ppp の大強度ビームを極めて少ないビームロスで安定に加速することに成功しており、最大 1 MW 相当の大強度陽子ビームを物質生命科学施設 (MLF) および MR に供給している [1]。MR は、ビーム強度 2×10^{14} ppp という世界最大級の強度を誇る加速器であり、2024 年には 800 kW の利用運転を達成した。現在、最大 1.3 MW のさらなる大強度化を実現するためのアップグレード計画が進められている [2]。

MR のような大強度陽子ビームの加速において、ビーム損失を低減するには空間電荷効果の低減が不可欠である。この効果は荷電粒子間に存在するクーロン力であり、特にビーム強度が高い場合、ビームの運動に大きな影響を与える。現在の運転条件では、RCS の取り出しビームのバンチ長は MR の RF バケツに対して短く、空間電荷効果を評価する指標であるバンチングファクタ (B_f) が小さい状態である。 B_f が小さいと空間電荷効果の影響が顕著となる。MR の大強度化を実現するためには、RCS の取り出しビームのバンチ長を長くして B_f を増大させる必要がある。

バンチ長を引き伸ばし、 B_f を増大する手法として、バンチ平坦化操作が提案されている [3]。この手法では、RCS の加速終盤にステップ的に駆動する 2 倍高調波電圧を用いて発生させる不安定点 (UFP: Unstable fixed point) を利用した位相空間分布の引き伸ばしと、基本波電圧によるバンチ回転操作を組み合わせることで、バンチ長が長く B_f の高い取り出しビームを実現する。2 倍高調波のステップ的な駆動による操作は非断熱的な操作であるため、スリップ係数の小さい RCS の加速終盤においても短時間でバンチ長を伸ばすことができる

利点を持つ。さらに、UFP の生成に 2 倍高調波を利用することでバンチ形状の細かな調整が可能となり、MR の RF バケツ形状とのマッチング向上が期待される。本発表では、UFP を用いたバンチ平坦化操作の概要について述べた後、バンチ形状操作の最適化によるマッチング向上の検討結果と、ビーム試験の結果について報告する。

2. 2 倍高調波を用いたバンチ平坦化操作

スリップ係数 η が 0 未満の条件において、バンチ平坦化操作の概略図を図 1 に示す。基本波電圧 (V_1) に 2

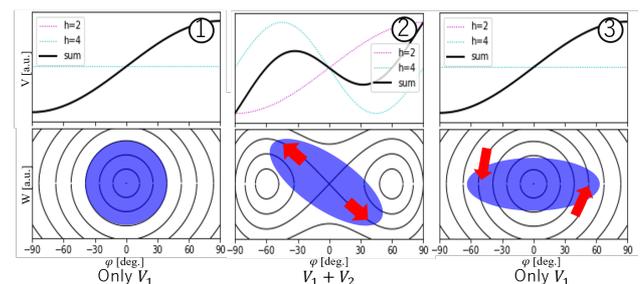


Figure 1: The illustration shows the scheme of bunch lengthening using the UFP. (first row) The fundamental and second harmonic RF voltages, as well as their superimposed voltage waveforms. (second row) Contour lines of the hamiltonian and the direction of bunch shape change.

倍高調波電圧 (V_2) を重畳することで生成される UFP をバンチ中心に置くことで、赤い矢印で示すようにバンチは UFP によって形成されるポテンシャル等高線に沿って引き伸ばされる。引き伸ばし後、基本波電圧のみに切り替えることで、ビームはその位相空間内において形状を保ったまま回転する。最も位相方向に広がったタイミングで取り出すことで、平坦化されたバンチを取り出しが可能となる。2 倍高調波電圧を重畳した場

* kyosuke.adachi@j-parc.jp

合のハミルトニアンのパテンシャル項を式 1 に示す。

$$\frac{eV_1}{2\pi h} \left(\cos(\varphi) + \varphi \cos(\varphi_s) - \frac{1}{2} \frac{V_2}{V_1} \cos(2[\varphi - \varphi_s]) \right) \quad (1)$$

ここで、 φ_s は同期位相を示している。重畳する 2 倍高調波の位相は、基本波電圧のみの電圧パターンによって加速する場合の同期位相を保つように設定される。また、図??から分かるように UFP が生成される条件は φ_s 周りで電圧の傾きが負となる場合のため、 $\frac{V_2}{V_1}$ が式 2 で示す条件を満たす必要がある。

$$\frac{V_2}{V_1} \geq \frac{1}{2} \cos(\varphi_s) \quad (2)$$

平坦化操作に用いる 2 倍高調波の電圧パターン（以下、UFP パターンと呼ぶ）の一例を図 2 に、パラメータを表 1 に示す。図左は UFP パターンの全体を、図右に取り出し直前部分を拡大した UFP パターンを示す。2 倍高調波の電圧値は基本波との比率（電圧比）より決定した。

Table 1: Parameters of the UFP Pattern

time	19.4 – 19.65 ms
Ratio (V_2/V_1)	1.2
Rise and fall time	0.01 ms

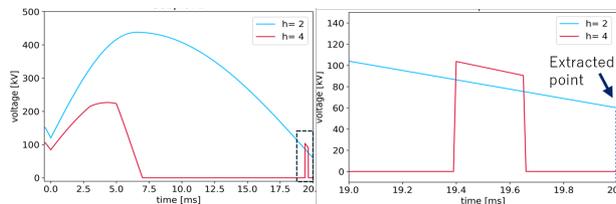


Figure 2: The left graph shows the acceleration pattern in which the second harmonic RF voltage is applied at the end of the acceleration. The right graph shows an expanded view of left graph.

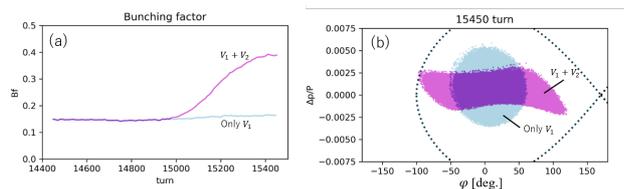


Figure 3: The comparison of the B_f (left) and bunch shape (right) with and without application of the second harmonic RF voltage.

バンチ平坦化操作の有無による RCS 取り出し直前の B_f の変化およびバンチ形状を図 3 に示す。図左は通常電圧パターンでの B_f と図 2 の UFP パターンを適用したときの B_f を示している。バンチ平坦化操作によって取り出し直前の B_f が 0.2 から 0.4 まで増大することが確認できる。図右は同様に電圧パターンごとの取り

出し位置での位相空間分布を示しており、バンチ形状の平坦化を確認できる。本手法は RCS による実証試験が行われ、シミュレーション結果を再現する結果が得られた [4]。

3. バンチ平坦化操作の最適化検討

3.1 概要

MR の入射バケツとのマッチングを向上させるためには、RCS の取り出しビームの B_f やバンチ形状について、より自由度の高い調整手法が必要となる。 B_f とバンチ長について、UFP パターンの印加時間および電圧比に対する傾向を図 4 に示す。 B_f は 2 倍高調波の印

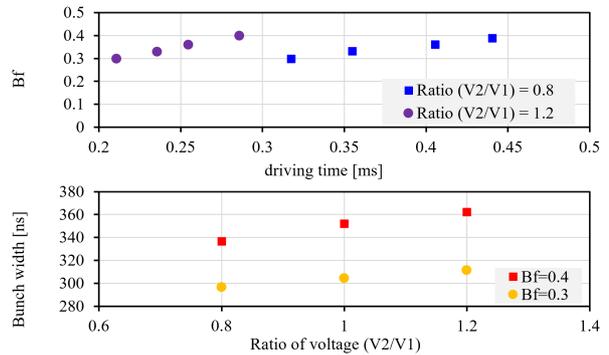


Figure 4: This figure shows the B_f and bunch length of the RCS extraction bunch for variations in the UFP pattern.

加時間の長さを変えることで調整が可能であり、バンチ長の制御には、2 倍高調波と基本波の電圧比を変更することが有効である。2 倍高調波の印加時間を長くとり電圧比をなるべく低くすることで、同じバンチ長で高い B_f を得ることができる。

次に、バンチ形状について考える。2 倍高調波を用いた平坦化操作によって平坦化されたバンチは、平行四辺形に近い形状となることが図 3 から分かる。平行四辺形の鋭角部を以降テールと呼ぶ。テールは、引き伸ばしとバンチ回転の両過程においてバンチ中の粒子ごとの角速度や回転方向の差異によって形成されると考えられる。このうち、バンチ引き伸ばし時の形成には引き伸ばし方向を中心としたポテンシャル等高線の非対称性が原因となる。このような非対称性は UFP の両側に発生する Stable Fixed Point (SFP) によるものであり、SFP にバンチの片側だけ引き込まれることでテールが形成される。

テール部の影響を調べるため、MR 入射後の縦方向ビームシミュレーションを行い、モーメントムフィリングファクタ (以降、MF) とエミッタンス (以降、 ϵ) を求めた。計算は $\phi_s = 0$ の領域のみで行い、基本波電圧 ($h=9$) は 155 kV、2 倍高調波電圧は 110 kV とした。図 5 に、MR 入射後の MF と ϵ の変化を示す。バンチを平坦化した場合でも MF に大きな振動が残り、 ϵ の増大が確認できる。このようなミスマッチは文献 [3] にて提案されている、MR の RF バケツの低エミッタンス化を実現する際に問題となる。

テール部分を解消する方法の一つとして、2 倍高調

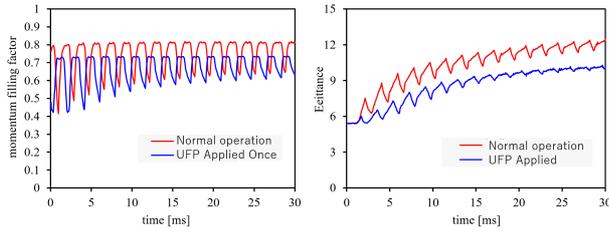


Figure 5: This figure shows a comparison of the MF (left figure) and ε (right figure) after MR injection, based on differences in the shape of the RCS extraction beam bunch formed by the normal voltage pattern and the UFP pattern.

波を再印加する UFP パターンの検討を行った。その概念を図 6 に示す。2 倍高調波による引き伸ばし時の各粒子の移動方向の違いに着目したバンチ形状の調整方法であり、バンチ形状の細部を制御し、MR 入射時のマッチング向上を目的としている。

3.2 UFP パターン作成

UFP パターンを作成するにあたり必要となる印加タイミングや電圧比は、数値最適化手法の一つである最小二乗法を用いて決定した。誤差関数として図 7(a) に示す 6 つの幾何学パラメータ ($\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_6$) を設定した。点 $\pm\Delta p/p$ を通る、 φ 軸に平行な 2 本の直線とバンチ等高線との交点の φ 座標から、以下のように幾何学パラメータを定義した。

- Δ_1 は、第 1 象限と第 4 象限の交点の φ 座標間の距離として定義
- Δ_2 は、第 2 象限と第 3 象限の交点の φ 座標間の距離として定義
- Δ_3 は、 Δ_1 と Δ_2 の差として定義
- Δ_4 は、第 1 象限と第 2 象限の交点の $\pm\Delta p/p$ 座標間の距離として定義
- Δ_5 は、第 3 象限と第 4 象限の交点の $\pm\Delta p/p$ 座標間の距離として定義
- Δ_6 は、 Δ_4 と Δ_5 の差として定義

図 7(b) に示すように、幾何学パラメータがすべてゼロの場合、バンチは 2 つの長方形の各頂点と接する形状となる。最小二乗法によるパラメータ最適化には Python の科学計算ライブラリである Scipy の `least_squares` を使用した [5]。また、縦方向ビームシミュレーションには、CERN で開発された縦方向ビームシミュレーションコード BLoND (Beam Logitudinal Dynamics) を用いた [6]。

幾何学パラメータの最適化によって決定された UFP パターンを図 8 に、パラメータを表 2 に示す。2 倍高調波を 1 回印加する方法と比べ早いタイミングで 1 回目の印加を行うことで、2 回目の 2 倍高調波印加によるバンチ形状操作の時間を確保する。2 回目の 2 倍高調波の印加時間幅は狭くなっており、これは引き伸ばしを目的としたものではなく、成形を目的とした操作であると考えられる。また、電圧比はどちらも 1.0 未満となった。

Table 2: Parameters of the UFP Pattern Determined by the Least Squares Method

time (a)	19.31 – 19.56 ms
time (b)	19.83 – 19.93 ms
ratio (a) (V_2/V_1)	0.92
ratio (b) (V_2/V_1)	0.79
Rise and fall time ((a) and (b))	0.01 ms

3.3 縦方向ビームシミュレーション

作成した UFP パターンより計算した RCS の取り出しビームのバンチを図 9 に示す。2 倍高調波を 2 回印加することでテール部の無い、楕円に近い形状のバンチを形成できた。設定した幾何学パラメータにより、数値最適化手法を用いたバンチ形状の制御が可能であることが確認された。図 10 に MR 入射後の MF と ε を示す。通常の電圧パターンやテール部の残る 1 回印加の UFP パターンを用いた場合に比べ、MF の振動は大幅に抑制され、 ε はほとんど増大が見られないことが分かる。本検討により、2 倍高調波を 2 回印加する操作は、バンチ形状の最適化および MR とのマッチング向上に対して有効であることが示された。

3.4 ビーム試験

2 倍高調波を 2 回印加することによるバンチ形状操作の有効性を実証するためにビーム試験を行った。RCS 内において、トモグラフィ測定による位相空間分布の取得は現状困難である。そこで、バンチ平坦化後にさらにバンチ回転させた場合のテール部の広がりを調べることで、バンチ平坦化時のテール低減効果を推測する実験を行った。2 倍高調波を 1 回印加した場合と 2 回印加した場合について、取り出し位置よりも前の 15200 周で平坦化したバンチ形状とそこから 15400 周までバンチ回転したときの位相空間分布を図 11 に示す。なお、どちらの UFP パターンも 15200 周で $B_f = 0.37$ となるように数値最適化手法を用いて作成した。2 倍高調波を 1 回印加した場合は 2 回の場合に比べて平坦化時のテール部が大きく、バンチ回転後のテール部の広がりは大きい。それぞれのケースにおけるビームプロファイルを図 12 に示す。ビームプロファイルからも、2 倍高調波を 1 回印加した場合に比べて 2 回印加した場合のテール部の広がりが狭いことが分かる。

ビーム試験より得たビームプロファイルとシミュレーション結果の比較を図 13 に示す。実験結果はシミュレーション結果とよく一致し、2 倍高調波を 2 回印加することでバンチ平坦化後のテール部を抑制できる可能性が示唆された。

4. まとめと今後

J-PARC における RCS と MR の縦方向ビームマッチングの向上のため、RCS の取り出し直前に駆動する 2 倍高調波により生成される UFP を利用して、バンチ長を長くするバンチ平坦化手法が提案され、シミュレーションおよびビーム試験により実証された。本研究では、2 倍高調波の印加方法に工夫を加えることで、さ

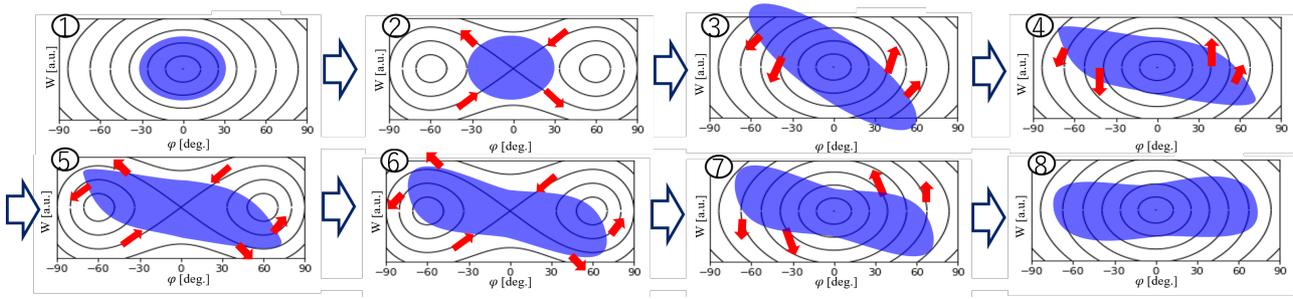


Figure 6: The schematic view of the change in bunch shape when second harmonic RF voltage are applied twice. The process is repeated twice: stretching by the UFP generated by second harmonic RF voltage and rotation by fundamental RF voltage.

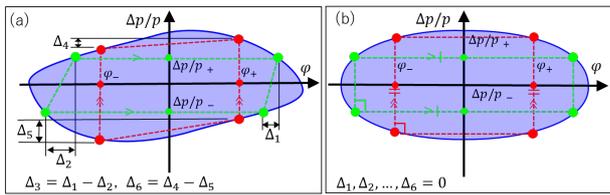


Figure 7: Geometric parameters of the extracted bunch targeted for optimization. (a) shows before and (b) after optimization.

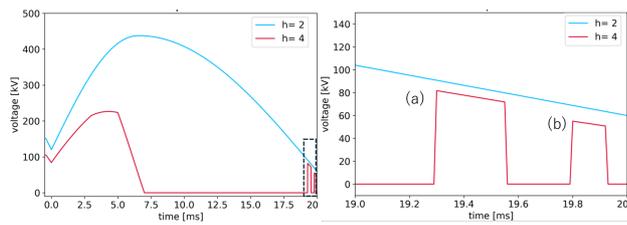


Figure 8: The left graph shows the UFP pattern in which second harmonic RF voltages are applied twice at the end of the acceleration. The right graph shows an expanded view of left graph.

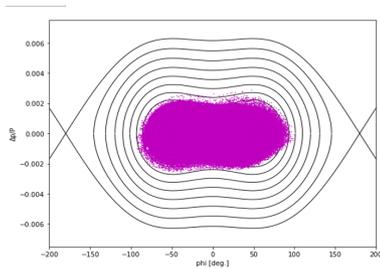


Figure 9: RCS extracted the bunch, eliminating the tail by applying the second harmonic twice.

らなるマッチング向上を実現する手法について検討を行った。2倍高調波を1回印加するUFPパターンを用いて平坦化されたバンチはその成形過程からテールを有しており、位相空間分布のミスマッチ部を残す形状となっていた。そこで、2倍高調波の印加回数を2回に増やすことでテールの発生を抑える方法を提案した。また、最適なバンチ形状の実現を目的とし、幾何学的

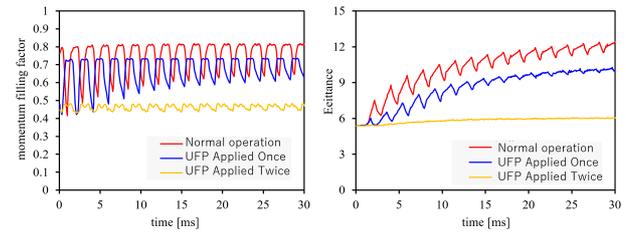


Figure 10: This figure shows a comparison of the momentum filling factor (left figure) and emittance (right figure) after MR injection using an RCS extraction beam bunch formed by an UFP pattern that applies second harmonic twice.

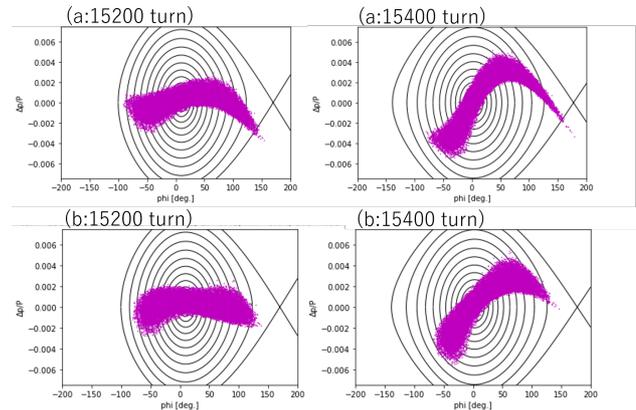


Figure 11: This figure shows the phase space distribution at 15200 turns that is set to be flattened using the bunch lengthening, and the distribution after 200 turns of bunch rotation from that turn. (a) shows the case when the second harmonic is applied once, and (b) shows the case when the second harmonic is applied twice.

パラメータを目的関数とする数値最適化手法を提案した。その結果、テール部を有さないバンチを形成するUFPパターンを作成できた。テール部のミスマッチが原因となって発生していたMR入射後のMFの振動やエミッタンス増大は大幅に抑制されることを確認した。また、2倍高調波を2回印加することによるテール部の抑制効果についてビーム試験を行った。その結果、ビームプロファイルがシミュレーション結果を再現し、2倍

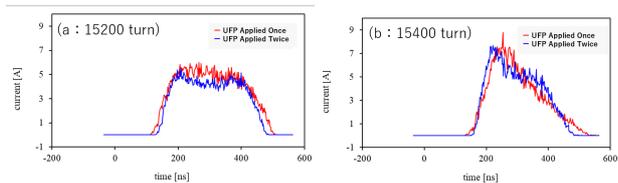


Figure 12: This figure compares the beam profiles at 15200 turns (left figure) and 15400 turns (right figure) based on differences in UFP patterns.

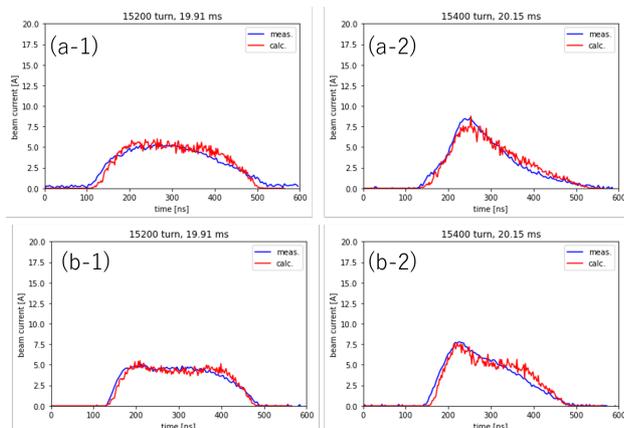


Figure 13: This figure shows a comparison of experimental and calculated results for the beam profile at 15200 turns and 15400 turns. (a) shows the case when the second harmonic is applied once, and (b) shows the case when the second harmonic is applied twice.

高調波を2回印加することでバンチ平坦化後の形状を調整できる可能性を示唆する実験結果が得られた。

今後の課題としては、バンチ平坦化操作後のバンチ形状最適化に関し、トモグラフィ測定を通じて位相空間分布の詳細な解析を進めていく予定である。また、2倍高調波の印加だけでなく基本波を活用することで、より汎用性の高いバンチ形状操作が可能となると考えられる。そのため、RCSにおけるUFPを用いたバンチ平坦化操作で可能な調整範囲を明確にしていく必要があると考える。また、バンチ平坦化操作に対する大強度ビーム運転に伴う高次高調波および空間電荷効果の影響について、シミュレーションと実験の両面から解析していく予定である。

参考文献

- [1] P. K. Saha *et al.*, “1-MW Beam Operation at J-PARC RCS with Minimum Beam Loss”, in *Proc. HB’23*, Geneva, Switzerland, Oct. 2023, pp. 147 – 152.
- [2] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, *Prog. of Theor. Exp. Phys.*, vol. 2021, no. 3, p. 033G01, Mar. 2021. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [3] H. Okita *et al.*, “Consideration for improving the longitudinal beam matching between RCS and MR at the J-PARC”, presented IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, paper TUPB002.
- [4] K. Adachi *et al.*, “Bunch lengthening of the extraction beam using second harmonic in J-PARC RCS”, presented IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, paper TUPB075.
- [5] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.least_squares.html
- [6] H. Timko *et al.*, “Beam longitudinal dynamics simulation studies”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 26, 114602 (2023).