

J-PARC 主リングにおける FX 830 kW, SX 90 kW の利用運転達成と今後の展望 ACHIEVEMENTS AND NEAR FUTURE PLAN OF J-PARC MAIN RING

佐藤洋一^{#, A)}, 發知英明^{A)}, J-PARC 主リング加速器

Yoichi Sato^{#, A)}, Hideaki Hotchi^{A)}, on behalf of J-PARC Main Ring Accelerator

^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

In the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), the power increase is progressing. In 2025, the power in fast extraction (FX) operation reached 830 kW of user operation, exceeding the desired performance of 750 kW in FX. The power in slow extraction (SX) operation reached 92 kW of user operation, and approaching the desired performance of 100 kW in SX. The hardware enhancement and beam optics development plans are currently underway to achieve 1.3 MW in FX by JFY 2028 and over 100 kW in SX in JFY 2026 through further power enhancement. The current status and future prospects of MR power enhancement will be presented in this report.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の主リング (MR) [1] では、パワー増強が順調に進み、2025 年に速い取り出し (FX) 運転における所期性能 750 kW を超える 830 kW の利用運転、遅い取り出し (SX) 運転における所期性能 100 kW に迫る 92 kW の利用運転を達成した[2]。現在も更なるパワー増強により、2028 年度 FX 1.3 MW、2026 年度 SX 100 kW 超の利用運転を目指した新光学の開発やハードウェア増強計画が進行中である[3]。

FX, SX 運転ともに、パワー増強はパルス当たりの陽子数増とパルス繰り返し時間の短縮により成されてきた。現在までの MR パワートレンドを Fig. 1 に示す。2021 年から 2022 年にかけては、1 年超のシャットダウン期間を取り、パルス繰り返し時間の大幅な短縮 (高繰り返し化) を主目的とした MR ハードウェア大改造:

- ・ 主電磁石電源改造 (新電源採用、配線変更)
- ・ RF システム増強 (加速空洞増設、陽極電源増設)
- ・ 入出射システム増強 (高繰り返し対応)
- ・ コリメータ増設 (ビーム損失の局所化)

などを行った。各機器の大改造後の性能を活かした、安定な利用運転、パワー増強の実現には、ハードウェア調

整、ビーム調整、利用運転におけるビーム安定性およびメンテナンス性評価を行い、それらを踏まえた更なるハードウェア調整・ビーム調整を重ねる必要があった。これらの努力は現在も継続中であり、今後の増強方針にも逐次反映されている。

2. FX ビーム調整と運転状況

2.1 FX 利用運転

2021–2022 年の大改造後、FX 運転では、それまでのパルス周期を 2.48 s から 1.36 s に、3 GeV から 30 GeV への加速時間を 1.40 s から 0.65 s へと短縮した。ただし、ビーム光学系は、2021 年までの安定な 515 kW ニュートリノ (NU) 利用運転実績 (2.7×10^{14} protons per pulse、2.48 s パルス周期) がある、改造前のビーム光学系を維持することを基本指針とした。しかしながら、改造後の主電磁石電源[4, 5]は、MR の 3 回対称構造から見て、非対称な配線を採用せざるを得なかったことから、非構造共鳴の抑制のために、新電源のリップル抑制・調整性能を生かしたビーム光学系の対称性追求を行った[6, 7]。

高繰り返し FX 運転での NU 利用運転は 2023 年 11 月に開始され、同年 12 月には所期性能 750 kW を超える 760 kW を達成した。その後も

- ・ 主電磁石電源リップル改善[4, 5]
- ・ 共鳴補正電磁石最適化[3]
- ・ チューントラッキング最適化

といったハードウェア・ビーム調整を重ねることで非構造 3 次共鳴の影響は更に抑制された。併行して、増設 MR コリメータを活用したビーム損失局所化[8]、FX 取り出し時のビーム損失軽減に向けた 30 GeV 光学系の開発も進んでいる[9, 10]。こうした MR における改造後機器とビーム調整要素の精密調整、並びに上流加速器における MR 向けビームのエミッタンス・ハロー低減調整 [11, 12] を通して、パワー増強は段階的に進められた。

2024 年 6 月には 800 kW (2.27×10^{14} protons per pulse、1.36 s パルス周期)、2025 年 3 月には 830 kW (2.35×10^{14} protons per pulse、1.36 s パルス周期) での安定 NU 利用運転が実現した[2]。830 kW 運転における周回陽子数並びにビーム損失分布を Fig. 2、Fig. 3 に示す。800 kW

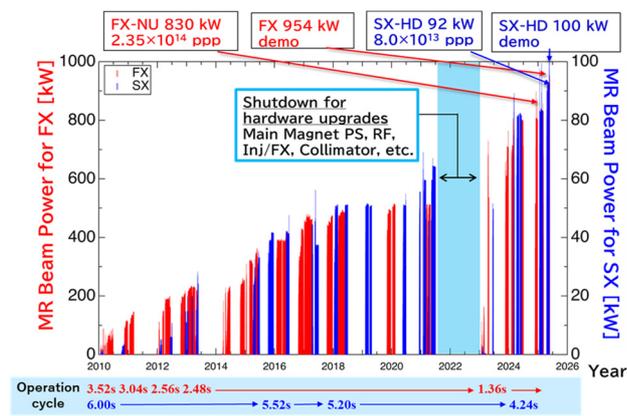


Figure 1: MR beam power achieved to date.

[#] yoichi.sato@j-parc.jp

運転では、ビーム損失率は推計 0.8%、ビーム損失分布はコリメータエリアに局所化され、メンテナンス性は確保されていた。一方、830 kW では、ビーム損失分布はコリメータエリアに十分局所化されていたものの、ビーム損失率は推計 1.5% であり、2021 年以前の NU 利用運転におけるビーム損失率と同等となるまで増加した。このビーム条件での利用運転期間は短期であったため、残留線量を踏まえたメンテナンス性の評価は未了であった。しかしながら、このままで更なるパワー増強を目指すことは厳しいと言え、ビーム損失率を 1% 以下に抑えたビーム条件の開発、光学系の更なる改良が急務であった。

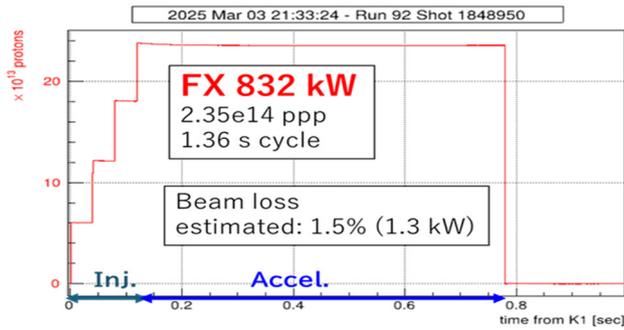


Figure 2: Circulating beam intensity for the FX 830-kW user operation.

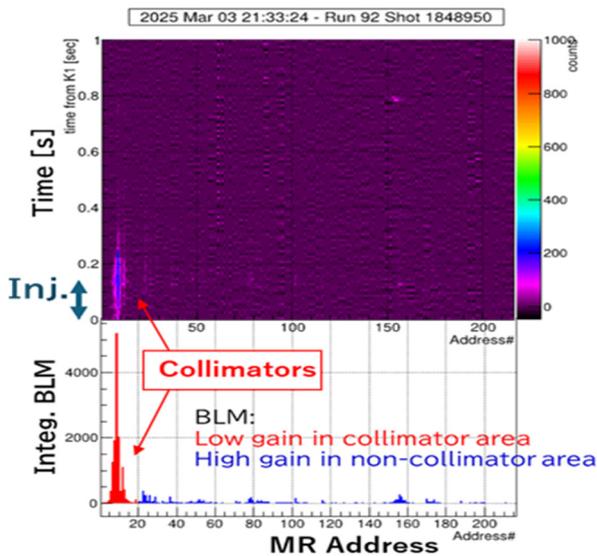


Figure 3: Beam loss monitor (BLM) counts along the MR for the FX 830-kW user operation.

2.2 FX 運転における新光学系開発

改造前のビーム光学系を踏襲したパワー増強と併行する形で、新たなビーム光学系開発による、ビーム損失抑制研究も進められてきた。この研究は、FX 運転での目標である、2028 年度 1.3 MW 達成には、前節で述べた 830 kW 利用運転時の陽子数を 3 割以上増加させながらも (3.3×10^{14} protons per pulse、1.16 s パルス周期、1.3 MW)、ビーム損失率を大幅に抑制し、同等もしくはより良好なメンテナンス性を確保するために遂行された。

新たに開発された光学系(新 Arc 光学系)は、MR ア

ーク部の鉛直方向位相差の自由度活用により 3 本の構造共鳴 ($nx - 2ny = -21$, $2nx - 2ny = 0$, $8ny = 171$) を抑制する光学系である[13, 14]。開発にあたっては、3 GeV DC モードのビーム試験を重ねてベースとなる光学パラメータを確立し、その 3 GeV 光学系から FX 取り出し時に要求される 30 GeV 光学系へと繋がる、1.36 s 周期のビーム加速パターンを作成し、それに応じた主電磁石電源ドライラン調整を行った上で[4, 5]、2025 年 3 月から 5 月にかけて加速試験を行った[2, 15]。830 kW 加速試験において新 Arc 光学系は現行光学系に比し、ビーム損失半減を示した (Fig. 4)。新 Arc 光学系の採用と、上流加速器の更なる調整により、更なる大強度試験を行った結果、855 kW 相当の加速試験 (2.42×10^{14} protons per pulse、1.36 s パルス周期) において推計ビーム損失率 0.8% に成功し、利用運転に十分適用可能なビームパラメータを

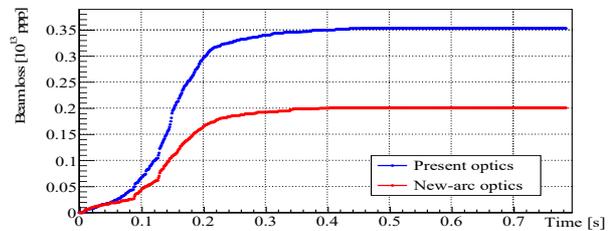


Figure 4: Beam losses estimated by the circulating beam intensity in present optics (blue) and new-arc optics (red) for FX 830-kW equivalent beam (2.35×10^{14} protons per pulse, 1.36 s cycle pattern).

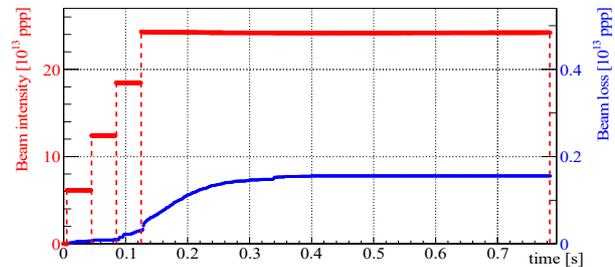


Figure 5: Circulating beam intensity (red) and estimated beam loss (blue) for FX 855-kW equivalent beam (2.42×10^{14} protons per pulse, 1.36 s cycle pattern) in new-arc optics. The beam loss ratio is $\sim 0.8\%$.

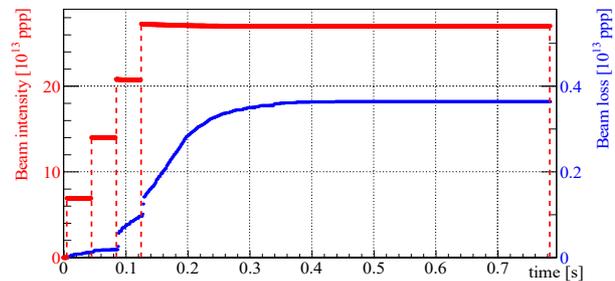


Figure 6: Circulating beam intensity (red) and estimated beam loss (blue) for FX 954-kW equivalent beam (2.70×10^{14} protons per pulse, 1.36 s cycle pattern) in new-arc optics. The beam loss ratio is $\sim 1.6\%$.

得た (Fig. 5)。同ビームパラメータで更なる陽子数増を試みた結果、954 kW 相当の加速試験 (2.70×10^{14} protons per pulse, 1.36 s パルス周期) で推計ビーム損失率 1.6% となった (Fig. 6)。ただし後者は、Tune や Tune tracking pattern といった、強度依存性の高い最適化要素が未調整での結果であり、今後、ビーム損失率 1%以下を目指して調整を進める。

2025 年後半の FX 運転においては、FX パルス周期を 1.36 s から 1.28 s に短縮する予定である。入射から出射までの加速パターンは 1.36 s パルス周期と同じにし、立下り時間のみを短縮した。このためビームダイナミクスは同じとなり、上記の 855 kW 相当でのビーム損失率 0.8% を維持した上で 908 kW 相当のビーム運転が期待できる。このパターンに対応した主電磁石電源調整は順調に進んでいる。2025 年度後半では、新 Arc 光学系を採用した 1.28 s パルス周期での 900 kW NU 利用運転を行い、ビーム安定性並びにメンテナンス性を評価する。

3. SX ビーム調整と運転状況

3.1 SX 利用運転

SX 運転でのハドロン (HD) 利用運転では、2021 - 2022 年の大改造を経た 2024 年 4 月に、パルス周期を 5.20 s から 4.24 s に短縮し、3 GeV から 30 GeV への加速時間を FX 運転と合わせて 1.40 s から 0.65 s とした。ただし、30 GeV Flat top は改造前と同じく 2.61 s を保持した。これにより、改造前に達成した 65 kW 運転と同じパルス当たり陽子数 (6.9×10^{13} protons per pulse) でもほぼ同等なビーム品質を維持したまま 20% パワー増強を目指した。しかしながら、残留線量を同等以下に抑え、メンテナンス性を維持するためにビーム損失率を下げるのが求められた。更に、SX 運転の所期性能 100 kW 達成には、陽子数を 2 割増とすることが必要であり (8.8×10^{13} protons per pulse, パルス周期 4.24 s)、強度依存性を持つ、より厳しいビーム不安定性条件に対する対策も求められた。

調整方針は、大改造前のビーム光学系踏襲、既存調整ノブの最適化、新方針開発・採用を中心に据えた [16]。2025 年 2 月には ビーム強度 83 kW (7.2×10^{13} protons per pulse, 4.24 s パルス周期、取り出し効率 99.64%, Spill Duty 83%) が達成された。改造前の 65 kW 運転時 (6.9×10^{13} protons per pulse, 5.20 s パルス周期、取り出し効率 99.5%, Spill Duty 78%) に比べ、ビーム強度増強とビーム品質向上の両立に成功した [2]。取り出し効率改善は、主に静電セプタム (Electrostatic septum, ESS) 上流への散乱体導入により ESS でのビーム衝突が抑制され、遅い取り出しエリアのビーム損失が軽減されたことによる (Fig. 7) [2, 16]。また、Spill Duty の改善は、Transverse RF knockout 調整、ビームレート測定に対するスピルフィードバック調整 (RQ 電磁石) といった既存調整ノブの最適化に加え、主電磁石電源 A/D ボードへのフィルター追加によるリップル改善により成された [4]。

2025 年 4 月から 5 月にかけては、安定的な SX 利用運転として、ビーム強度 90 ~ 92 kW (8.0×10^{13} protons per pulse, パルス周期 4.24 s)、取り出し効率 99.67%、Spill Duty 83% が達成された。ビーム安定性抑制の鍵となる Flat top での 2 段階 RF デバンチ操作 [17] の更なる

最適化に加え、入射時間帯における RF 基本波と 2 倍高調波の位相差調整による、縦方向ビーム分布を平滑化とピーク電流を低減が実現し、入射時のビームロス抑制と Flat top デバンチ過程でのビーム不安定性抑制能力が強化された [18]。また増設したコリメータの最適化も行った。この結果、2025 年 2 月の SX 83 kW 運転よりも、更にビーム損失抑制とビーム損失局所化を得ている [2]。

SX 90 kW 利用運転ビームパラメータを用いて、陽子数を増やしたビーム試験では、SX 101 kW (8.9×10^{13} protons per pulse, パルス周期 4.24 s、取り出し効率 99.66%、Spill Duty 83%) のデモンストレーションに成功し、デザインパワー SX 100 kW 運転でも利用運転可能なレベルのビーム品質を示した (Fig. 8)。2025 年度後半では、SX 100 kW での利用運転実現を目指して、スピル長調整、ビーム品質の安定性評価を重ねる。

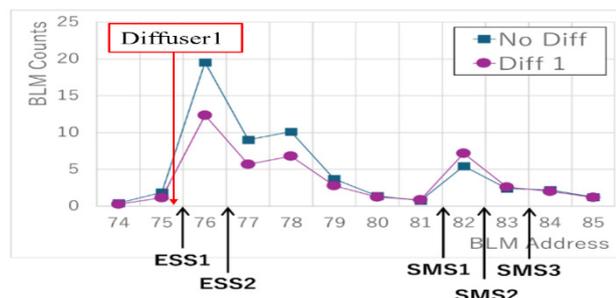


Figure 7: Beam loss monitor counts in the slow extraction section during the SX 80-kW operation with and without the diffuser.

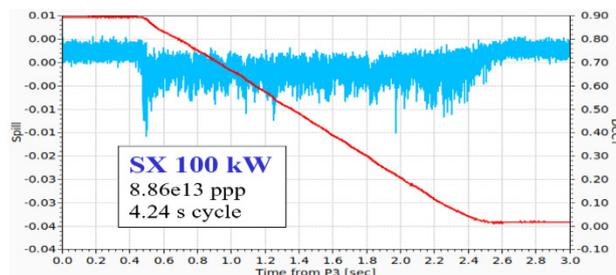


Figure 8: Beam spill structure during the SX 100-kW beam study.

4. 今後の展望

4.1 FX 運転

2025 年度から 2027 年度に行うハードウェア増強の主な物としては

- RF システム増強 (空洞増設、陽極電源増設) [19]
- 主電磁石電源増強 (Capacitor-Bank, ...) [4, 5]
- 電磁石補正用電源増強 (Trim-Quad/Sext) [20, 21]
- 新アボートダンプ導入 [22]
- 新ビーム位置モニターシステム導入 [3]

が挙げられる。さらに新 Arc 光学系での Tune 探索として、オペレーションエリアの変更も検討している [15]。2028 年度までに増強後のハードウェアドライラン、1.16 s 周期での機器調整を行い、2028 年度内の FX 1.3 MW 達成を目指す [3]。

4.2 SX 運転

2026 年度までに所期性能 100 kW での利用運転実現を目指す。更なるビーム損失抑制、大強度化に向けた、ハードウェア増強としては、

- ・ 散乱体システム増強と湾曲シリコン結晶の導入[23]
- ・ リップル補正システム増強[24]
- ・ VHF 空洞導入の検討

が進行中である。また、Flat top デバンチ過程でのビーム不安定性の更なる抑制効果を得るため、スリッページ引き上げによる、Microwave 構造緩和を可能とする、Flat top 光学系の開発も検討中である[25]。

5. まとめ

MR では、2021 - 2022 年の大幅な改造後、2025 年度前半までに、FX 830 kW、SX 92 kW の利用運転を達成した。また、FX 900 kW 以上、SX 100 kW の利用運転が視野に入るビーム試験のデモンストレーションにも成功した。2025 年度以降もハードウェア増強と光学系開発が計画されており、2028 年度の FX 1.3 MW 達成、2026 年度の SX 100 kW 超を目指した検討が進行中である。

謝辞

MR 増強は、J-PARC 全体の協力によりなされた。リニアック・RCS といった上流加速器調整、3NBT での上流加速器からのビーム品質の評価は、MR への入射ビームの品質向上の要となっている。また、NU、HD 利用施設側との相互的な協力関係は、ビーム調整時間の確保だけでなく、ビーム調整の妥当性評価に必須となっている。全ての J-PARC 関係者に深くお礼を申し上げたい。

参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, “Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron”, Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2012, p. 02B004, 2012. doi:10.1093/ptep/pts071
- [2] H. Hotchi and Y. Sato for J-PARC MR, “Progress of beam power upgrade in J-PARC Main Ring”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, June 2025.
- [3] 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, p. 033G01, 2021. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [4] Y. Morita *et al.*, “Correcting asymmetry of closed-orbit distortion in J-PARC main ring by reducing current ripples of main magnet power supplies”, in Proc. IPAC’24, Nashville, TN, USA, May 2024, pp. 931-934. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUAD2
- [5] Y. Morita *et al.*, “MW 級ビームパワーに向けた J-PARC 主リング主電磁石電源の増強” in Proc. PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, WEP073.
- [6] T. Yasui for J-PARC MR, “J-PARC operation with the high repetition rate upgrade” in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May 2023, pp. 1294-1298. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-TUXG1
- [7] T. Asami *et al.*, “Precise evaluation of time-varying quadrupole field errors through closed-orbit measurements in the J-PARC main ring”, PRAB, vol. 28, p. 012801, Jan. 2025. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.28.012801
- [8] M. Shirakata *et al.*, “Overview of seven-unit collimator system and its operation for J-PARC main ring”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, June 2025.
- [9] T. Yasui *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出しにおけるビームロス低減ビーム光学系” in Proc. PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, THP027.
- [10] S. Iwata *et al.*, “Reduction of beam loss at the fast extraction section in J-PARC”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, June 2025.
- [11] P. K. Saha *et al.*, “Beam loss and beam emittance minimization at J-PARC RCS for simultaneous operation to the MLF and MR”, in Proc. IPAC’24, Nashville, TN, USA, May 2024, pp. 939-942. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUAN1
- [12] P. K. Saha *et al.*, “J-PARC RCS における 1MW 出力を超える利用運転に向けたビームロス低減”, in Proc. PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, THP028.
- [13] T. Yasui *et al.*, “Beam optics for the compensation of third-order structure resonances”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 013G01 (2022). doi.org/10.1093/ptep/ptab146
- [14] T. Yasui and Y. Kurimoto, “Suppression of the eighth-order space-charge-induced resonance”, PRAB, 25, 121001 (2022). doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.121001
- [15] T. Yasui *et al.*, “Beam loss simulations for space charge mitigation in J-PARC MR”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, June 2025.
- [16] R. Muto *et al.*, “Status and outlook on slow extraction operation at J-PARC main ring”, in Proc. IPAC’24, Nashville, TN, USA, May 2024, pp. 1905-1910. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEYD1
- [17] M. Tomizawa *et al.*, “Slow Extraction Operation at J-PARC Main Ring”, in Proc. HB2021, Batavia, IL, USA, Oct. 2021, pp. 219-224. doi:10.18429/JACoW-HB2021-THDC1
- [18] Y. Sugiyama *et al.*, “Longitudinal microwave instability in the J-PARC Main Ring”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, June 2025.
- [19] K. Seiya *et al.*, “RF system upgrade for 1.3 MW operation of J-PARC main ring”, in Proc. IPAC’24, Nashville, TN, USA, May 2024, pp. 1017-1020. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUPC10
- [20] H. Hotchi *et al.*, “Numerical simulation study towards 1.3-MW beam operation at J-PARC MR”, in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May 2023, pp. 2316-2319. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-TUPM055
- [21] Y. Tan *et al.*, “Third order resonance correction using new Trim-S system in J-PARC MR”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, WEPB042.
- [22] M. Shirakata *et al.*, “Radiation Design of New 30 kW Beam Dump of J-PARC Main Ring”, in Proc. IPAC’19, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 2005-2008. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPTS032
- [23] R. Muto *et al.*, “Simulation studies on bent silicon crystals for loss reduction in slow extraction operation at J-PARC Main Ring”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, TUPB023.
- [24] T. Asami *et al.*, “Update of the tune ripple canceller system for slow extraction operation in the J-PARC MR”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025.
- [25] M. Tomizawa *et al.*, “Beam instability suppression during debunching process through slippage factor tuning in the J-PARC Main Ring”, in Proc. IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025.