

J-PARC メインリングにおける遅い取り出しスピルシミュレーション SIMULATION STUDY ON THE BEAM SPILL STRUCTURE OF THE SLOW EXTRACTION AT J-PARC MAIN RING

武藤亮太郎 ^{*,A)}, 木村琢郎 ^{A)}, 村杉茂 ^{A)}, 沼井一憲 ^{A)}, 岡村勝也 ^{A)}, 白壁義久 ^{A)},
富澤正人 ^{A)}, 柳岡栄一 ^{A)}, 松村秋彦 ^{B)}

Ryotaro Muto ^{*,A)}, Takuro Kimura ^{A)}, Shigeru Murasugi ^{A)}, Kazunori Numai ^{A)}, Katsuya Okamura ^{A)},
Yoshihisa Shirakabe ^{A)}, Masahito Tomizawa ^{A)}, Eiichi Yanaoka ^{A)}, Akihiko Matsumura ^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Japan

^{B)} NAT Corporation, Ibaraki, Japan

Abstract

In the J-PARC Main Ring (MR), the slow extraction of the 30 GeV proton beam is performed using third-order resonance. The extracted beam is used for various particle and nuclear experiments in the Hadron Experimental Facility. One of the important properties for the extracted beam required by physics experiments is a flatness of the time structure of the beam. We performed a simple beam simulation of the MR slow beam extraction to investigate the effect of the betatron tune ripple on the beam time structure. In addition, the effects of feedback control on the extraction using a fast Q magnets and a transverse RF kick using stripline kickers were investigated in the simulation.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR) では、3 次共鳴を利用して 30 GeV 陽子ビームの遅い取り出しを実施している [1]。取り出されたビームはハドロン実験施設において様々な素粒子・原子核実験に利用される。取り出しビームに対して物理実験から要求される重要な性質の 1 つは、ビームの時間構造の高い平坦性であるが、MR 主電磁石電源の大きな電流リップルに起因する水平ベータトロンチューンの大きな時間変動により、取り出しビームは大きな時間構造を持っている。MR では 2021 年の夏から 2022 年の夏にかけて主電磁石電源の更新作業を行っており、主電磁石電源の電流リップルは大きく改善すると期待されている [2]。そこで、MR での遅い取り出しの簡易ビームシミュレーションを行い、ビームの時間構造に対するチューンリップルの影響を調査した。さらに、現在ビーム取り出しにおいて用いている、速い Q 磁石を使用した取り出しに対するフィードバック制御と、ストリップラインキッカーを使用した横方向 RF キックの効果を実験で調べた。

2. J-PARC MR の遅い取り出しとビームのスピル構造

J-PARC MR の遅い取り出しでは、リングに 8 台設置された六極電磁石によって 3 次共鳴を励起し、水平ベータトロンチューンを 22.333 に下から徐々に近づける。不安定領域に入った粒子は周回ごとに振幅を増大させていき、振幅が静電セプタム [3] のセプタムリボンを超えた粒子は、セプタムリボンとチャタ電極の間の高電圧によってリングから削り出される。MR では、ベータトロンチューンをゆっくりと 3 次共鳴 22.333 に近づけることで、約 2 秒のスピル長

のビーム取り出し (繰り返し周期 5.2 秒) を実現しているが、ベータトロンチューンがリップルをもつと、取り出しビームがそれに対応した時間構造を持ってしまい、取り出しビームの平坦性が損なわれてしまう。Figure. 1 は、ベータトロンチューンのリップルに対して何も対策を施さない状態でビームの取り出しを行ったときのスピル構造を示している。このときの運転では、多項式関数による固定電流パターンを四極電磁石に入力して大域的なスピル成形のみを行っている。取り出しビームのスピル構造を評価す

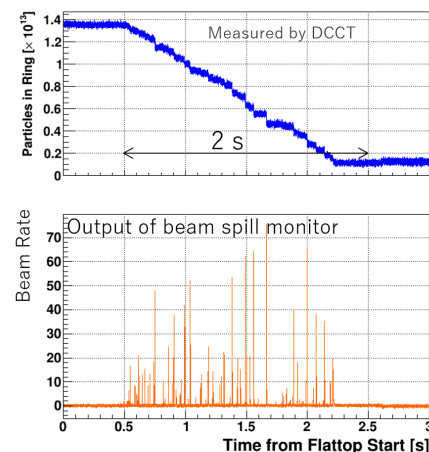


Figure 1: The time structure of the extracted beam when only the macroscopic spill structure shaping was performed with a fixed polynomial function current pattern on the spill control quadrupole magnets. Upper panel is the number of particles in the ring measured by the DCCT. Lower panel is the extracted beam rate measured by the plastic scintillator.

る指標として、spill duty factor $\langle I \rangle^2 / \langle I^2 \rangle$ を採用する。ここで I はビームレート、括弧は時間平均を表す。完全に平坦なビームに対しては spill duty factor は 100%

* ryotaro.muto@kek.jp

となる。Figure 1 のビームに対し spill duty factor を算出すると、約 4% となる。

スピル構造の時間平坦性を回復するため、J-PARC MR では、速い Q 磁石を用いたスピルフィードバックシステムと、ストリップラインキッカーを用いた横方向 RF キックを導入している [4]。Figure 2 に MR のスピル制御システムの概要図を示した。

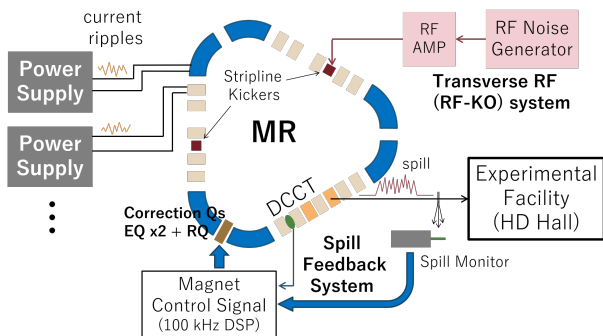


Figure 2: Schematic view of the spill regulation system in the slow extraction at J-PARC MR.

スピルフィードバックシステムおよび横方向 RF キックを適用した場合のビームの時間構造を Fig. 3 に示した。spill duty factor は約 46% と大きく改善するものの、依然として低い値にとどまっております。時間構造の平坦化は J-PARC MR のもつ課題の一つとなっている。MR で 2021 年の夏から 2022 年の夏にかけて更新された新主電磁石電源の電流リップルはこれまでの電源と比べて大きく改善すると期待されているため、本研究では遅い取り出しおよびスピル制御システムを計算機上で再現し、チューンリップルの改善がスピル構造に与える効果を見積もった。

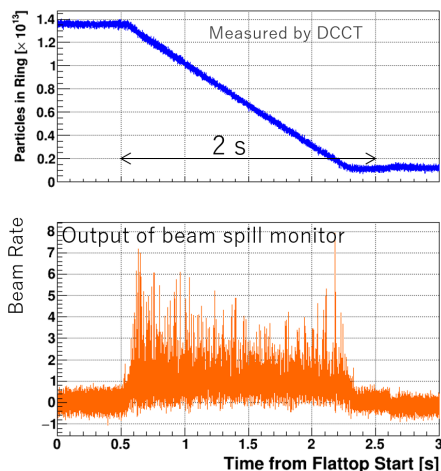


Figure 3: The time structure of the extracted beam with spill feedback system and transverse RF system.

3. 遅い取り出しのシミュレーション

遅い取り出しのスピル構造を計算機上で再現するため、本研究では下記のような簡易的なシミュレーションを採用した。

1. 正規分布にしたがって各粒子の normalized coordinates (X, X') を生成する。各粒子の (X, X') と水平位置 x および角度 x' は twiss parameters を用いて下記の式で関係づけられる。

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}$$

2. 六極電磁石によるキック S を入れ、ベータトロンチューン Q_n の大きさだけ回転させる。

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \end{pmatrix}_{n+1} = \mathbf{R}(2\pi Q_n) \begin{pmatrix} X \\ X' + SX^2 \end{pmatrix}_n$$

3. ベータトロンチューン Q_n を徐々に 22.333 に近づけていく。不安定領域に入った粒子は振幅を増大させていくが、ESS のリボンの位置 $X = -0.004$ を超えたものを取り出された粒子としてカウントしていく。

J-PARC MR の直線部での dispersion はほぼ 0、また chromaticity もほぼ 0 であるため、運動量分布は考慮していない。また、バンブ軌道を取り出し中に変化させる dynamic bump は今回のシミュレーションでは取り入れていない。水平ベータトロンチューン Q_n を 22.322 としたときの、シミュレーション上での粒子の動きを Fig. 4 に示した。

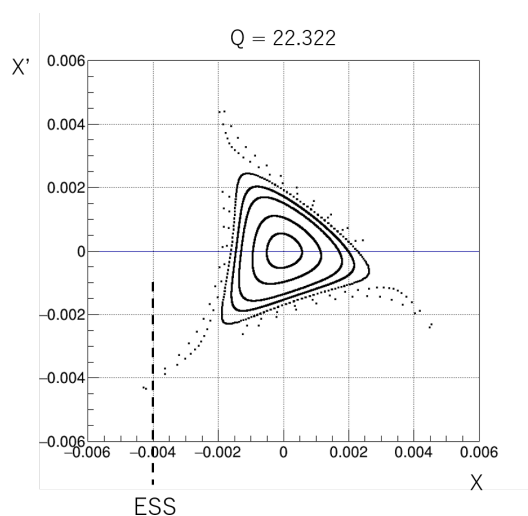


Figure 4: Behavior of the particles' (X, X') in simulation with the horizontal betatron tune Q_n of 22.322. ESS ribbons are located at $X = -0.004$.

このようにして作成した簡易シミュレーションに、測定された電磁石電源の電流リップルから生成したチューンリップルを入力した。まず、電流リップル

ブルをそのまま用いてチューンリップルに変換し、シミュレーションに入力してみたが、スピル構造が実際のものより良くなってしまい (spill duty factor 21%)、うまく再現できなかった。このため、電流リップルと磁場リップルの関係を測定したデータ [5] を用いて、チューンリップルの 400 Hz 以上の高周波成分を低減してシミュレーションに入力した。電流リップルと磁場リップルの関係の測定データと、シミュレーションに入力したチューンリップルの図を Fig. 5 に示した。

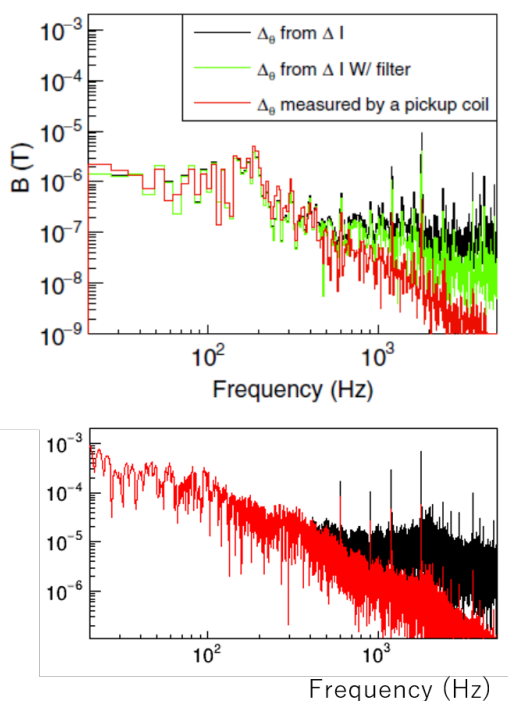


Figure 5: Upper panel: Measured current ripple (black line) and magnetic field ripple (red line) for the bending magnet [5]. Lower panel: Frequency component of the tune ripple for the spill structure simulation. The black line represents the tune ripple simply calculated from the current ripple of the main magnet power supplies. The red line is the frequency spectrum created by reducing the component above 400 Hz of the black line to reproduce the relationship between the current ripple and the magnetic field ripple. The tune ripple represented by the red line was input to the simulation.

得られたスピル構造を Fig. 6 に示す。spill duty factor は 5% であり、DCCT による測定は Fig. 1 の、スピル制御システムを利用せずに測定されたデータの階段状の傾向をよく再現できている。

次に、速い Q 磁石を用いたスピルフィードバックシステムと横方向 RF キックをシミュレーションに導入した。ビーム運転時の Q 磁石に対するフィードバック信号は DSP (Digital Signal Processor) によって生成されており、DSP の動作は C 言語を用いて記述されているので、シミュレーションにほぼそのままの形で取り込むことができる。電流指令値から

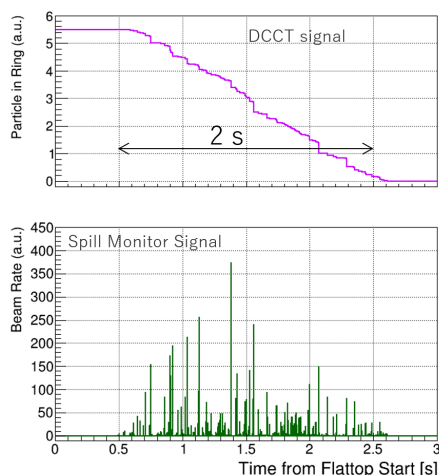


Figure 6: The simulated time structure of the extracted beam without the spill feedback system or the transverse RF system.

磁場応答までの遅延時間は、実測に基づいて、EQ 磁石に対しては $400\mu\text{s}$ 、RQ 磁石に対しては $50\mu\text{s}$ とした。横方向 RF キックについては、実際のビーム運転ではストリップラインキッカーを 2 台用いており、粒子がリングを 1 周する間の横方向 RF の振動回数として、1 台は $248.3263 \sim 248.3266$ 、もう 1 台は $1.250 \sim 1.414$ という周波数で運転している。今回のシミュレーションでは、よりスピル構造への効果が大きい $248.3263 \sim 248.3266$ の周波数を、 248.32705 の単一周波数で代表させて取り入れた。得られたスピル構造を Fig. 7 に示す。spill duty factor は 31% となった。

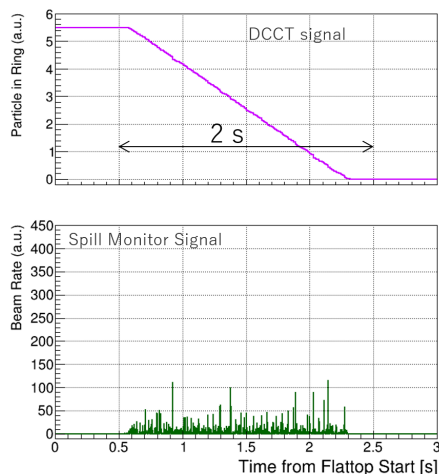


Figure 7: The simulated time structure of the extracted beam with the spill feedback system and the transverse RF system.

spill duty factor について、リップル対策を全く行わない場合、EQ と RQ を用いたフィードバック制御の

みを入れた場合、それに加えて横方向 RF キックを入れた場合の 3 つについて、実測値とシミュレーションを比較した表を Table 1 に示した。シミュレーションは定性的には実測値を再現できていると言える。

Table 1: Comparison of Spill Duty Factor between Measurements and Simulation Results

Spill Regulation Methods	Meas.	Sim.
Nothing	4%	5%
EQ and RQ	25%	15%
EQ, RQ and TrRF	46%	31%

4. 新主電磁石電源でのスピル構造

現在 J-PARC MR では新規制作された新主電磁石電源の調整が進行中である。この新しい電源では、電流リップルがこれまでの主電磁石電源と比べて低減すると期待されている [2]。Figure 8 に、これまでの主電磁石電源と、新しい主電磁石電源の電流リップルの比較図を示す。

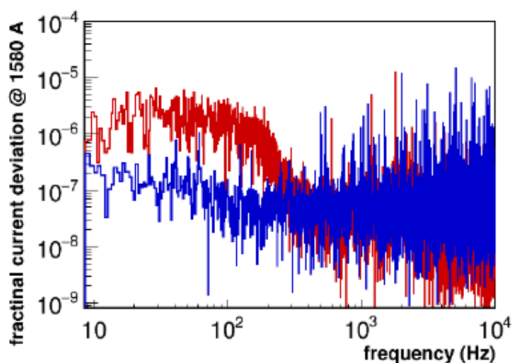


Figure 8: Comparison between the current ripples of old and new power supplies for bending magnets [2].

この図をもとに、シミュレーションに入力する水平ベータatronチューンのリップルを、200Hz から 100Hz にかけて 1/10 になり、100Hz 以下は 1/10 で一定となるように低減し、スピル構造を見た。結果を Fig. 9 に示す。ここでは速い Q 磁石によるスピルフィードバックおよび横方向 RF キックは未適用であるにも関わらず、主電磁石電源の電流リップル低減の効果により spill duty factor は 30% となった。現在、この低減されたチューンリップルに対するより効果的なフィードバックアルゴリズムの探索および横方向 RF キックの最適化をシミュレーション上でやっている。

5. まとめと今後

J-PARC MR の遅い取り出しに対するシミュレーションを構築し、主電磁石電源の電流リップルによるスピル構造を定性的に再現することができた。今後の課題としては、シミュレーションの高精度化に

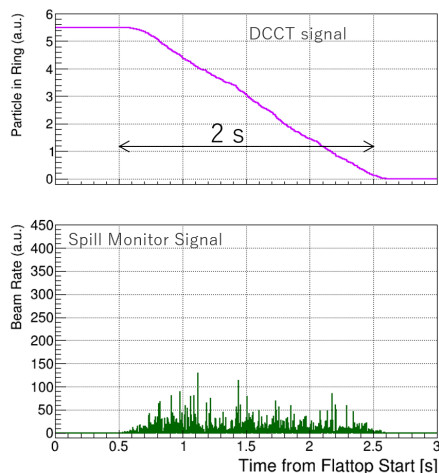


Figure 9: Results of the spill structure simulation with reduced tune ripple corresponding to the new main magnet power supplies.

よる定量的な spill duty factor の再現がある。また、新主電磁石電源の低減された電流リップルに対するフィードバック及び横方向 RF キックの最適化を今後進めていき、2023 年に予定されているビーム運転で実測データとの比較を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, “Slow extraction from the j-parc main ring using a dynamic bump,” *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 902, pp. 51–61, 2018.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, “New Power Supply of Main Magnets for J-PARC Main Ring Upgrade,” in *Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19)*, Melbourne, Australia, 19-24 May 2019, ser. International Particle Accelerator Conference, no. 10. Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, June 2019, paper TUPMP016, pp. 1266–1268, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP016>. [Online]. Available: <http://jacow.org/ipac2019/papers/tupmp016.pdf>
- [3] Y. Arakaki *et al.*, “Titanium electrostatic septa in J-PARC MR,” in *Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan*, (in Japanese)2019, pp. 1173–1175.
- [4] T. Kimura *et al.*, “The research of spill structure for J-PARC slow extraction,” in *Proc. 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan*, (in Japanese)2013, pp. 1130–1133.
- [5] D. Naito *et al.*, “Real-time correction of betatron tune ripples on a slowly extracted beam,” *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 22, p. 072802, July 2019. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.072802>