

J-PARC MR 遅い取り出しにおけるスピル構造の改善にむけたシミュレーションスタディ

SIMULATION STUDY FOR THE IMPROVEMENTS OF SPILL STRUCTURE OF THE SLOW EXTRACTION AT J-PARC MR

武藤亮太郎^{*A,B)}、新垣良次^{A,B)}、木村琢郎^{A,B)}、小松雄哉^{A,B)}、松村秋彦^{C)}、村杉茂^{A,B)}、
岡村勝也^{A,B)}、白壁義久^{A,B)}、富澤正人^{A,B)}、柳岡栄一^{A,B)}

Ryotaro Muto^{*A,B)}, Yoshitsugu Arakaki^{A,B)}, Takuro Kimura^{A,B)}, Yusuke Komatsu^{A,B)}, Akihiko Matsumura^{C)},
Shigeru Murasugi^{A,B)}, Katsuya Okamura^{A,B)}, Yoshihisa Shirakabe^{A,B)}, Masahito Tomizawa^{A,B)}, Eiichi Yanaoka^{A,B)}

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

^{B)}J-PARC Center

^{C)}Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

Abstract

One of the main issues of the slow extraction of the J-PARC Main Ring is the large time structure of the extracted beam induced by the large ripples on horizontal betatron tune. The spill feedback system and transverse RF system are adopted to cope with the large tune ripple, and the spill duty factor is about 50% in the recent user operations. To understand and improve the effect of the spill feedback system and transverse RF system, we made a simple simulation for the time structure of the slow extraction including above effects. In this paper we report the details of the simulation, its behavior and future prospects.

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) [1]の主リング(MR)では、30 GeV陽子の遅い取り出しビームをハドロン実験施設での素粒子原子核物理実験に供給している。2次粒子生成標的で生成された大量の π および K 中間子を物理実験での高統計データ収集のために有効に活用するためには、取り出しビームの時間構造(スピル構造)が少ないことが重要である。J-PARC MRの遅い取り出しでは、主に主電磁石電源の電流リップルに起因するチューン変動が取り出しビームの大きな時間構造を作る。これを抑制するために、取り出しビーム強度信号(スピル信号)を用いたチューンのフィードバック制御を行い[2]、またStripline Kickerを用いて横方向RFを周回ビームに加えることでスピル構造の平坦化を行っている[3]が、スピル構造の平坦性を示すスピル duty factorは2019年4月の利用運転時で約50%にとどまっている[4]。そこで、遅い取り出しの簡易的なシミュレーションを作成し、チューン変動と横方向RFがスピル構造に効果を及ぼすメカニズムの定性的な理解を試みた。本論文ではその結果について報告する。

2. 遅い取り出しのメカニズムと、シミュレーション内での簡易的な表現

J-PARC主リングでは、ベータトロン振動の3次共鳴を利用した遅い取り出しを行っている[5]。遅い取り出しのメカニズムの模式図をFig. 1に示す。共鳴6極電磁石による6極磁場の励起と、水平ベータ

トロン振動数を3次共鳴(J-PARC MRの場合22.333)に近づけることによって、位相空間が三角形の安定領域とその外側の不安定領域に分割される。取り出し開始前には、ベータトロン振動数と3次共鳴の距離を十分とっておき、位相空間上に分布する粒子をすべて含むような大きさの三角形の安定領域を作っておく。そこから徐々にベータトロン振動数を3次共鳴に近づけていくと、安定領域は小さくなっていき、振幅の大きな粒子から順に不安定領域に入っていき、不安定となった粒子はセパトトリクスに沿って振幅を増大していき、静電セプタム[6]のセプタムリボンに到達した粒子は、静電セプタムの電場によってキックされ、周回ビームから分離され、取り出される。

上記のようなメカニズムを簡易的にシミュレートするため、位相空間上の粒子分布を、規格化された位相空間上での中心からの距離の2乗 $R^2 = X^2 + Y^2$ に対応するパラメータで表すことにする。また振幅の大きな領域では、同じエネルギーを持った粒子はセパトトリクスの三角形に沿って分布する。

このパラメータを横軸にとり、粒子の分布を作る。実際の加速器ではこの分布は一様分布ではないため、EQ[2]と呼ぶ磁石を用いて取り出しレートがほぼ一定となるようにセパトトリクスの動きをコントロールしている。このシミュレーションでは簡単のため、粒子の分布は一様とした。このパラメータで表した粒子分布上では、取り出しが進むに従ってセパトトリクスがパラメータの大きなほうから小さなほうへ動いていく。この様子は、Fig. 2の上の図に示した。不安定になった粒子は取り出され、スピルモニタに信号を発生させる。このスピルモニタの信号を用いて、セパトトリクスの動きを制御してやることにより、平坦な取り出しビームを作るのが、スピ

* ryotaro.muto@kek.jp

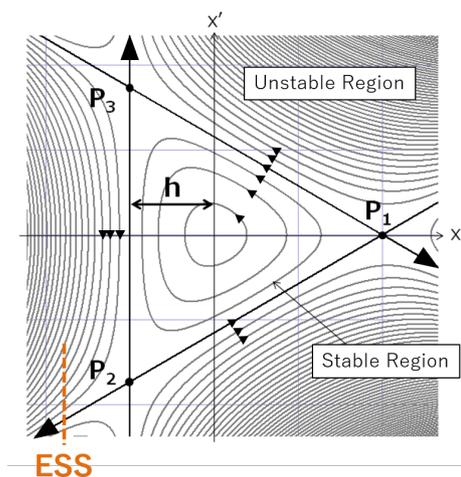


Figure 1: Schematic picture of the trajectories of the particles on the normalized phase space in slow extraction. The height of the stable triangle, h , is determined by the beta-tron tune and the strength of the resonant sextupoles.

ルフィードバック制御の目的である。

また、横方向 RF は、Fig. 2 の下の図のように、この粒子分布のエッジをぼやけさせる効果をもたらす。横方向 RF には粒子分布全体をセパトリクスの方へ押しやる作用があるが、この効果は実際の取り出しでは EQ 電流の feedback 制御により相殺されるため、本シミュレーションでは簡単のためこの効果はないものとした。

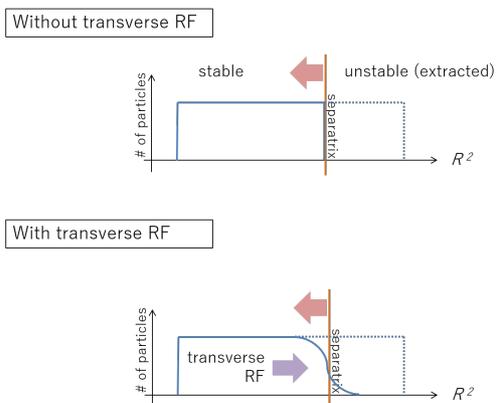


Figure 2: Schematic picture of the particle distributions in the simulation. Upper panel corresponds to the case without transverse RF and lower panel is for the case with transverse RF. The particle distributions are parametrized by R^2 , the square distance of a particle from the center of the normalized phase space.

3. シミュレーションの結果と考察

このシミュレーションでは、チューンリップルとして、50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 500 Hz のリップル成分を位相を $\pi/4$ ずつずらしながら重ね合わせた

ものを使った。各成分の大きさは 2×10^{-5} とした。このときの取り出しスピルの様子を Fig. 3 に示す。チューンリップルに応じて、取り出しスピルが構造を持っている。ビームを取り出すためのチューン走査範囲は、2秒間で0.2としている。このとき、取り出し開始から0.1秒間のスピル信号を用いて求めたスピル duty factor は55.7%である。

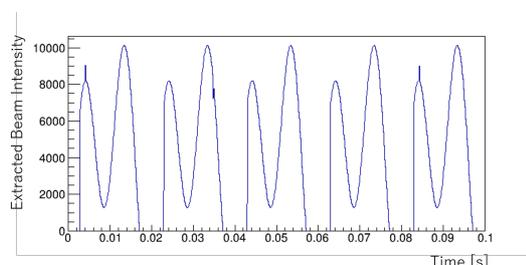


Figure 3: Simulation result for the extracted beam intensity with no spill regulation system.

ここに、スピル信号を用いて生成したフィードバック信号を入れる。スピル信号、すなわちビームの瞬間強度は、リング内の粒子数を N として dN/dt であるが、これはチューン Q の時間微分を用いて、 $dN/dt = dN/dQ \cdot dQ/dt$ とかける。 dN/dQ はチューンあたりの粒子数であり、先程述べたようにこのシミュレーションでは一定としている。よって、スピル信号はチューンの時間微分に比例することになる。このため、スピル信号を積分したものをチューンに対するフィードバック信号として使い、これをそのまま用いた比例項、積分した積分項、不完全微分した微分項を作成し、各項を定数倍して足し合わせてフィードバック信号を生成した。

まずは、チューンの変動から取り出しまで、および取り出しを検出したスピル信号から、チューンへのフィードバックにおける時間遅れを無視してシミュレーションの動作をみた。この場合フィードバックは比例項のみで十分で、フィードバックを行った際のスピル信号を Fig. 4 に示す。また、比例項のゲインを変えたときのスピル duty factor の振る舞いを Fig. 5 に示す。ゲインを上げるにしたがってスピル duty factor は改善し、ほぼ100%に達するが、相対ゲインが0.025を超えると発振が顕著になり、スピル duty factor は悪化する。

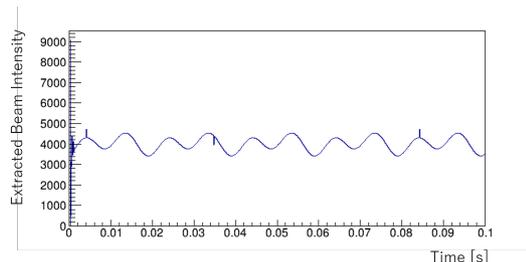


Figure 4: Simulation result for the extracted beam intensity with proportional spill feedback signal.

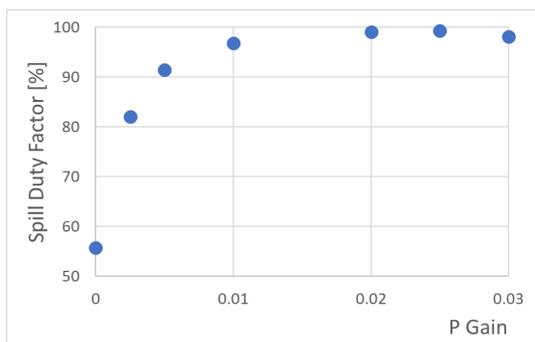


Figure 5: Spill duty factor dependence on the proportional gain in the spill feedback signal.

実際の取り出しにおいては、チューンの変動から取り出しまでの時間遅れは約 $200\mu\text{s}$ ある [7]。また、スピル信号検出からフィードバック信号生成までの時間は無視できるが、フィードバック信号を受け取った補正 Q 磁石がそれに応じた磁場を発生するまでの時間が約 $200\mu\text{s}$ かかる。そこで、計 $400\mu\text{s}$ の遅れ (むだ時間) をいれてシミュレーションを行った。まずは遅れがないときと同様に比例項のみでフィードバックを行い、比例項のゲインを変えたときのスピル duty factor の振る舞いを Fig. 6 に示す。時間遅れがあると、大きなゲインに対して不安定性が増し、ゲインを 0.0025 までしか上げることができない。この最大ゲインは delay を無視したときに比べて約 1/10 になっている。このときのスピル duty factor は 82% である。

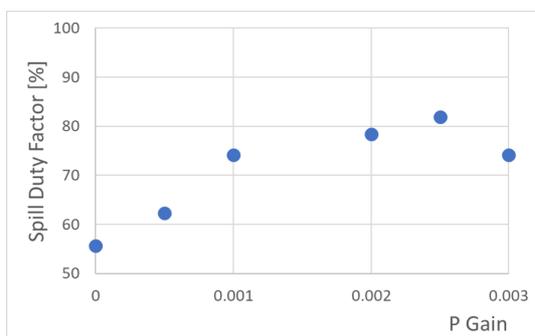


Figure 6: Spill duty factor dependence on the proportional gain in the spill feedback signal. The time delay is taken into account in the simulation.

次に、比例項のゲインを 0.025 に固定し、積分項および微分項のゲインを振ってみた。積分項はスピル構造の改善に寄与する (最大でスピル duty factor は 93%) もの、微分項を入れてもスピル構造は改善しなかった。Figure 7 に、スピル duty factor の積分項のゲインに対する依存性を示す。次のステップとしては、進み遅れ位相補償器を用いるなどの初歩的なむだ時間制御の手法を試みる事が挙げられる。

最後に、横方向 RF の効果を、粒子分布をランダムに拡散させることで取り入れた。結果を Fig. 8 に示す。横方向 RF を強くするにつれてスピル duty factor

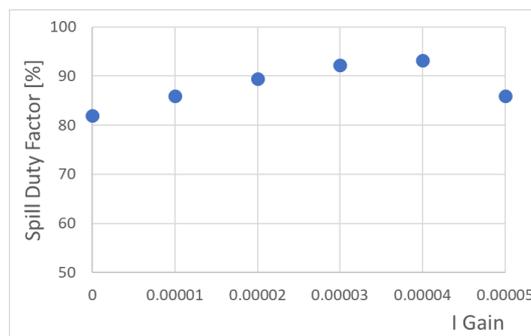


Figure 7: Spill duty factor dependence on the gain for the integral term in the spill feedback signal. The time delay is taken into account in the simulation.

が改善していく様子が確認できる。

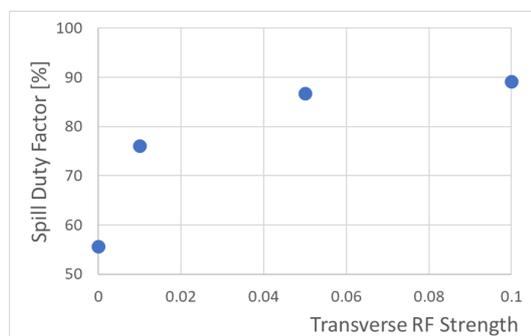


Figure 8: Spill duty factor dependence on the strength of the transverse RF.

4. 課題と今後

この論文では、チューンリップルや横方向 RF、またスピルフィードバックシステムの、取り出しビームの時間構造に与える影響を理解することを目的として、J-PARC MR の遅い取り出しについての簡易的なシミュレーションを作成し、スピル構造についての定性的な理解を試みた。このような簡易モデルを作成することは、新しいフィードバックアルゴリズムの検討や、チューンリップルの大きさとスピル構造の関係の検討などの際に有用であると思われるが、粒子の分布を R^2 のみで表している本モデルで実際の取り出しを定量的に再現することには限界がある。たとえば、粒子が不安定領域に入ってから取り出されるまでの時間 (transit time) は、粒子の R が同じでも位相空間上の位置によって異なる。transit time のもつ幅はスピル構造に大きな影響をもつが、この効果は本モデルでは考慮に入れることができない。簡易モデルによって大雑把な見当をつけ、詳細な tracking simulation で定量的に評価する、というように両者を組み合わせて利用することで、スピル構造改善への道筋をつけたいと考えている。

参考文献

- [1] Joint Project Team of JAERI and KEK, “The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators”, KEK Report 99-4 (1999) and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [2] A. Kiyomichi *et al.*, “Beam spill control for the J-PARC slow extraction”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, May 2010, pp. 3933–3935.
- [3] A. Schnase *et al.*, “Application of Digital Narrow Band Noise to J-PARC Main Ring”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, May 2010, pp. 1446–1448.
- [4] R. Muto *et al.*, “Current Status of Slow Extraction from J-PARC Main Ring”, Proceedings of IPAC’19, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 2311–2314.
- [5] M. Tomizawa *et al.*, “Slow extraction from the J-PARC main ring using a dynamic bump”, Nucl. Instru. Meth. A, vol. 902, pp. 51–61, 2018; doi : 10.1016/j.nima.2018.060.004
- [6] Y. Arakaki *et al.*, “Electrostatic septum for 50 GeV proton synchrotron in J-PARC”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, May 2010, pp. 3900–3902.
- [7] K. Okamura *et al.*, “A consideration on the transfer function between RQ field and slow extraction spill in the main ring of J-PARC”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 558–561.