

## IMPROVEMENTS OF SLOW-EXTRACTED BEAM FROM J-PARC MAIN RING

Masahito Tomizawa<sup>#A)</sup>, Yoshitsugu Arakaki<sup>A)</sup>, Daisuke Horikawa<sup>B)</sup>, Si-Won Jang<sup>C)</sup>, Hyejin Kim<sup>C)</sup>, Takuro Kimura<sup>A)</sup>, Koichi Mochiki<sup>D)</sup>, Ryotaro Muto<sup>A)</sup>, Shigeru Murasugi<sup>A)</sup>, Hidetoshi Nakagawa<sup>A)</sup>, Katsuya Okamura<sup>A)</sup>, Shinya Onuma<sup>D)</sup>, Hikaru Sato<sup>A)</sup>, Alexander Schnase<sup>E)</sup>, Yoshihisa Shirakabe<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>, Eiichi Yanaoka<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI),  
Shonan Village, Hayama, Kanagawa 240-0193

<sup>C)</sup> Kyungpook National University (KNU), Daegu 701-702, Korea

<sup>D)</sup> Tokyo City University, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo 158-8557

<sup>E)</sup> JAEA/J-PARC Center, 2-4 Schrane Shirakata, Tokai, Ibaraki 319-1195

### Abstract

In the last beam operation for the slow extraction, we have achieved a very high extraction efficiency (99.5%) by the dynamic bump scheme. A spill feedback system and a transverse RF system worked well and improved the spill structure. We report one year's progress of the beam commissioning and plans for the coming run.

## J-PARC 遅い取り出しビーム性能の改善

### 1. はじめに

J-PARC メインリング(MR)において 30 GeV に加速された陽子ビームは、3 次共鳴を利用した遅い取り出しによって、素粒子・原子核実験施設へ供給される。遅い取り出し装置は、静電セプタム(ESS1,2)、セプタム磁石(SMS1-3)、バンブ磁石(SBMP1-4)、共鳴を励起するための 6 極磁石(RSX1-8)、そしてそれらの電源・制御系から構成される。また取り出しビームの時間構造を改善するために、取り出されたビーム強度信号をもとにフィードバックを行う高速応答 Q 電磁石 EQ(2 台)、RQ(1 台)が用意されている。H20 年 1 月に遅い取り出しビームを素粒子・原子核実験施設へ導くことに成功した。H20 年 10 月～H22 年 2 月の期間中に行われた遅い取り出し運転(RUN26-30)においては、ビーム軌道調整と ESS とその下流にある SMS1 のセプタムの位置調整を行った結果、取り出し効率は 98%台に向上した。スピルに関しては、EQ によるフィードバックにより約 1.5 秒間一定な平均強度を持つスピル波形を得ることができた。大きな主電源リップルによるスピルのスパイク構造は、RQ のみならず EQ も用いることにより改善することができた。H21 年 10 月～11 月(RUN35, 36)においては取り出しバンブ軌道を取り出し中に動かす手法(dynamic bump)を導入することによりさらに取り出し効率を改善することができた。

また、EQ, RQ によるスピルフィードバックに加えて、横方向の RF 電場をビームに加えることによりスピル性能を改善することができた。RUN35-36 で行われた取り出し効率向上・スピル性能改善を中心とした内容で報告を行う。

### 2. 遅い取り出し運転進捗の概要

表 1 は RUN26-30 と RUN35-36 の遅い取り出し運転のパラメーターの比較である。RCS から MR へのビーム入射回数は 3 回から 4 回になり、その結果 MR のバンチ数は 6 から 8 になった。バンチ数を増

表 1: 遅い取り出し運転のパラメーターの比較

|             | RUN26-30<br>(09/10~10/2 月) | RUN35-36<br>(10/10~11 月) |
|-------------|----------------------------|--------------------------|
| MR入射回数      | 3                          | 4                        |
| バンチ数        | 6                          | 8                        |
| 加速周期 (s)    | 6                          | 6                        |
| フラットトップ (s) | 2.63                       | 2.93                     |
| スピル長 (s)    | 1.5~2                      | 1.8~2.3                  |
| ビームパワー (kW) | 1~2.6                      | 1~10                     |
| 粒子数 (ppp)   | 1.3~3.2×10 <sup>12</sup>   | 1.3~12×10 <sup>12</sup>  |

<sup>#</sup> masahito.tomizawa@kek.jp

やすことは RF をオフしてコースティングビームをつくるまでの時間を短縮するため、ビーム強度の一様性の観点から望ましい。

加速周期は主電源パターンの下降時間を 0.3 秒だけ短縮できることとなったため、周期は 6 秒のまま、フラットトップを 2.63 秒から 2.93 秒に延ばすパターンを選択した (図 1)。チューンのランピングスピードをそれに伴い遅くすることによりスピル長を延長した。この改良によって同じビーム粒子数に対して取り出しビームの平均強度をスピル長の分下げることができることになり、実験側からすると、その分ビームの質が向上したことになる。

30 GeV に加速された遅い取り出しビームのパワーは 1~2 kW ( $1.3\sim 2.6\times 10^{12}$  ppp) から 1~10 kW ( $1.3\sim 12\times 10^{12}$  ppp) まで増やすことができた。ただし 10kW の運転はデモンストレーション的短時間のみのものである。

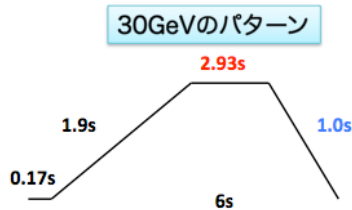


図 1: 遅い取り出し運転パターン

### 3. 取り出し効率向上

取り出し効率の向上は、取り出し時のロスを減らし、その結果としてロスによって生成される周辺機器の放射化を減らすために最も重要な要素の1つである。取り出し効率の向上のために遅い取り出し直線部の COD の補正、バンパ軌道の調整、2 台の静電セパタムそしてその下流の低磁場セパタムの位置調整によって、取り出し効率は 98% 台を達成できた。この調整の詳細については[1]を参考にされたい。この調整では、スピルの途中でバンパ軌道は一定 (fixed bump) であった。RUN35-36 では、さらに取り出し効率をあげるために、バンパ軌道を取り出し中に動かす手法を導入した (dynamic bump)。

ESS 入口でのセパトリックスが図 2 (左側) に表されている。取り出しの始まりは直線、終わりは点線で示されている。fixed bump モードでは、ESS の場所で取り出しビームの角度の広がりが生じ、これにより ESS セパタムの側面からセパタムにヒットする確率がかなりある。この取り出し角度の広がり、図 2 (右側) に示すようにさらに下流に置かれた低磁場セパタムでのロスを引き起こす。しかしながら、バンパ軌道を取り出しの開始と終わりで重なるように動かせばこの角度の広がりを抑制することができる。

メインリングでは、遅い取り出し直線部のディスプレイはほぼゼロになっており、この条件で水平方向のクロマティシティーをゼロ付近にセットす

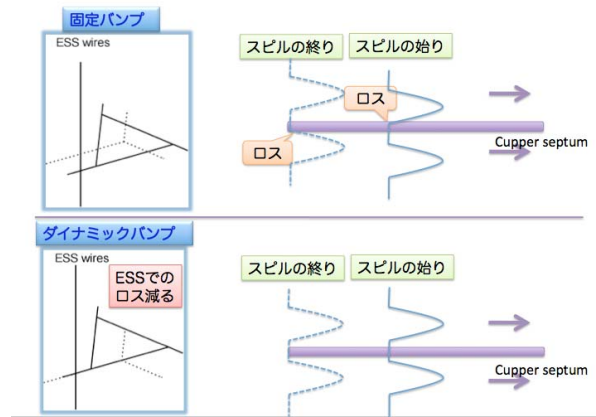


図 2: ダイナミックバンパスキーム

ると、セパトリックスはビームの運動量に依存しないことになる。このセパトリックスの運動量依存性が小さい条件では dynamic bump は極めて有効に働く。

dynamic bump の軌道パラメーターは、水平方向のチューンが求まればユニークに決まる。水平方向チューンはラティスを作るアーク部に置かれ 48 台の QFN というファミリーで共鳴線に近づけられる。しかしながらチューンはこれだけでは決まらず、スピルの時間的形を一様にするために使われる EQ 磁石の強さにもよる。やっかいなのはこの EQ 磁石の強さは取り出しの途中で時々刻々変化する。スピルフィードバック用信号により EQ 磁石の電流値は DSP から出力される。この出力信号をもう一度 dynamic bump 用 DSP で処理し 4 台のバンパ電流信号を演算し出力する。我々はこの dynamic bump 制御システムを開発し実用化することに成功した[2]。図 3 (上側) は fixed bump での取り出し領域でのビームロス総和の時間変化である。取り出し始めでロスが大きいことがわかる。一方、図 3 (下側) は dynamic bump モードで運転したときのものである。取り出し始めのロスが激減していることがわかる。この結果取り出し効率は 98% 中頃から 99.4% まで向

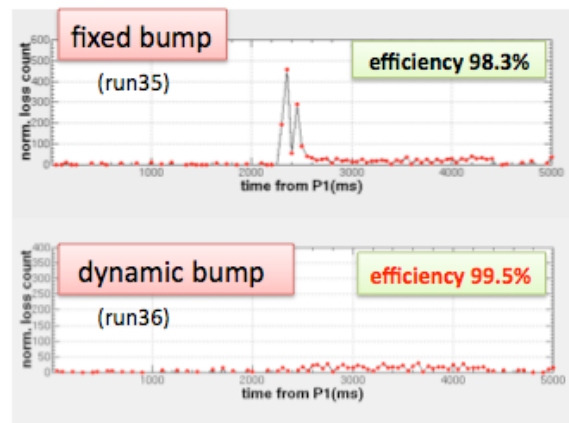


図 3: BLM によるビームロスの時間構造

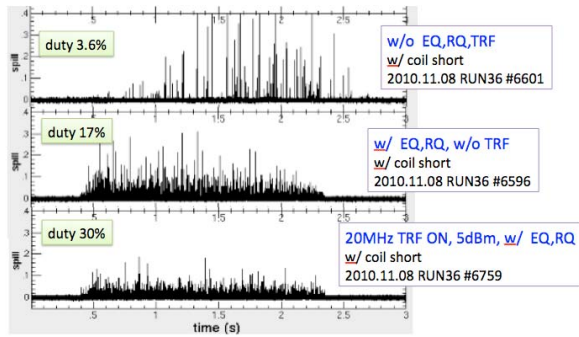


図 4: 3 種類の条件での取り出しビームのスピル

上した。さらに共鳴 6 極磁場の強さを 17% 増すことにより、ステップサイズが若干増えた結果、さらに 0.1% 効率が上がり最終的には 99.5% に達した。得られた取り出し効率は世界最高性能を達成したということを示す。

ちなみに、取り出し効率の絶対値の校正は、取り出しをせずに故意にロスを起こさせ DCCT の値とビームロスモニター (BLM) の信号値を比較することにより行われている [3]。

RUN36 の終了後ダクト表面 (on contact) での残留放射能のサーベイが行われた。RUN35 と RUN36 で  $7.5 \times 10^{17}$  個の遅い取り出しビームが供給された。RUN36 終了前は 3kW のビーム運転が約 2 週間続いた。ESS の下流の Q 磁石 QDT のさらに 1 つ下流の QFR の上流部が最も残留線量が高く、ビーム停止から 4 時間後において表面で 0.9 mSv/h (on contact)、表面から 30cm 離れたところで 0.1 mSv/h であった。この値は同等のビームパワーで運転されていた 12GeV-PS の残留線量と比較して格段に少ない。このことも、得られた高い取り出し効率を裏付けるものとなっている。この場所での残留線量を減らすために、直上流に遅い取り出し用のコリメーターを導入する計画である。これによりロスを局所化し周辺を遮蔽することにより定常メンテナンスを容易にすることを目的とする。

#### 4. スピル制御

偏向電磁石、四重極電磁石電源の出力電流リップル改善の努力はなされてきたが、依然として遅い取り出しで許容できる大きさには到達しておらず、 $dI/I$  は  $10^{-4}$  台に留まっている。図 4 はスピルの時間構造を取り出しビームラインに置かれたスピルモニターで測定した取り出しビームスピルである。上図は電源リップルによる磁場への影響を少なくする目的で、ラティスを構成する Q 磁石のトリムコイルの両端をショートしリップル成分をバイパスさせる対策がとられた場合である。この状態でスピルの時間構造の性能を表す duty factor [4] はわずか 3.6% である。この状態で EQ と RQ によるスピルフィードバック

[4,5] を ON にしたのが中図である。duty は 17% に改善した。さらに通常チューン測定に用いられるストリップラインキッカーにベータatron 振動の周波数 (20MHz) と取り出しのチューン幅に対応するノイズ幅 (1KHz) を持つ transverse RF 電場 [6] を周回ビームに与えることにより、duty factor を 30% までに改善することができた (下図)。ただしマルチパクタリングによる真空悪化が生じたため、実験のための運転には使われなかった。最近になって exciter にソレノイドコイルを巻くことにより 35 MHz までの周波数範囲でマルチパクタリングを抑制することに成功した [7]。次回の運転で実用化を目指す。

#### 5. 今後の予定

今年の冬に予定されている震災後の RUN に向けての計画は以下の通りである。

- 震災前のビーム性能を回復する。今後予定されている磁石の再アライメントによる条件の違いにより、多くのビーム調整時間を必要とする可能性がある。
- 一度デモンストレーション的に試みられた 10kW ビームでは取り出し効率は 90% 程度であった。dynamic bump のパラメーターを最適化することにより 3kW ビームと同等の取り出し効率達成を目指す。
- SX コリメーターを導入する。
- マルチパクタリングを抑制した transverse RF システムでスピルを改善しビーム供給をおこなう。
- 12 台ある主電源のうち、どのファミリーが最もスピルに影響を与えているか調査する。特定されたリップル信号をスピルフィードバックに使うことも考えられる。
- 現状の RQ 電源より 2 倍の電圧を発生させ位相の遅れの少ない R&D 機の工場試験を行う予定である。この結果次第では、ビーム運転での試験をすることが可能となる。

#### 参考文献

- [1] M. Tomizawa, et al., "Beam Commissioning of J-PARC Slow Extraction", Proc. of PASJ 2010, p.186.
- [2] E. Yanaoka, et al., "Development of Dynamic Bump System for J-PARC Slow Extraction", These Proceedings.
- [3] K. Satou et al., "Application of a Single-wire Proportional Counter to the Beam Loss Monitoring at J-PARC MR", Proc. of IPAC2010, p.1446-1448.
- [4] T. Kimura, et al., "Spill Feedback Control for the J-PARC Slow Extraction", Proc. of PASJ 2010, p.1076.
- [5] S. Onuma, et al., "Spill Feedback Control Unit for the J-PARC Slow Extraction", Proc. of PASJ 2010, p.687.
- [6] A. Schnase, et al., "Application of Digital Narrow Band Noise to J-PARC Main Ring", Proc. of IPAC2010, p.1446-1448.
- [7] A. Schnase, et al., "J-PARC MR Horizontal Exciter Test for Transversal Noise Application", These Proceedings.