

BEAM COMMISSIONING OF J-PARC SLOW EXTRACTION

Masahito Tomizawa^{#,A)}, Yoshitsugu Arakaki^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Daisuke Horikawa^{B)}, Takuro Kimura^{C)},
Akio Kiyomichi^{D)}, Koichi Mochiki^{E)}, Ryotaro Muto^{A)}, Shigeru Murasugi^{A)}, Hidetoshi Nakagawa^{A)},
Katsuya Okamura^{A)}, Shinya Onuma^{E)}, Tadashi Koseki^{A)}, Hikaru Sato^{F)},
Alexander Schnase^{G)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Junpei Takano^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui, Fukui, 910-8507

^{C)} University of Miyazaki, 1-1 Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki 889-2192

^{D)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), 1-1-1 Koto, Mikazuki, Sayo, Hyogo 679-5198

^{E)} Tokyo City University, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo, 158-8557

^{F)} Tsukuba University of Technology, 4-3-15 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki, 305-8520

^{G)} JAEA/J-PARC Center, 2-4 Schrane Shirakata, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

In the last beam commissioning for the slow extraction, we have achieved very high extraction efficiency by tuning of the bump orbit and the septum position of the electrostatic and magnetic septa. A spill feedback system implemented in last summer shutdown 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 遅い取り出しのビームコミッショニング

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。取り出しビームを診断するためのスクリーンモニターが ESS、SMS 付近に設けられている。H21 年夏の長期シャットダウン期間に、スピルフィードバック用の高速応答 Q 電磁石 EQ(2 台)、RQ(1 台)と電源がインストールされた。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後、7ヶ月にわたる長期シャットダウン期間を経て、H21 年 10 月~H22 年 2 月の期間中に遅い取り出しのビームコミッショニングが再開された。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おこなった結果、取り出し効率は大幅に向上した。ビームスピルに関しては、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。現状の大きな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。以上の取り出し効率向上・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 RUN21-22 と RUN26-30 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 1 回から 3 回になり、その結果 MR のバンチ数は 2 から 6 になった。さらに 4 回入射・8 バンチの取り出しの試験にも成功した。バンチ数を増やすことは 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ことである。

加速周期は 6 秒のまま、加速時間を減らしフラットトップ時間を 0.7 秒から 2.63 秒とした。チューンのランピングスピードをそれにとめない遅くすることにより、スピル時間を 0.2 秒から 1.5~2

表 1 遅い取り出し運転のパラメーターの比較

| | RUN21-22 (09/1~2 月) | RUN26-30 (09/10 月~10/月) |
|-------------|------------------------|-------------------------------|
| MR入射回数 | 1 | 3 (4) |
| バンチ数 | 2 | 6 (8) |
| 加速周期 (s) | 6 | 6 |
| フラットトップ (s) | 0.7 | 2.63 |
| スピル長 (s) | 0.2 | 1.5~2 |
| ビームパワー (kW) | 0.3 | 1~2.6 |
| 粒子数 (ppp) | 4×10^{11} | $1.3 \sim 3.2 \times 10^{12}$ |

[#] masahito.tomizawa@kek.jp

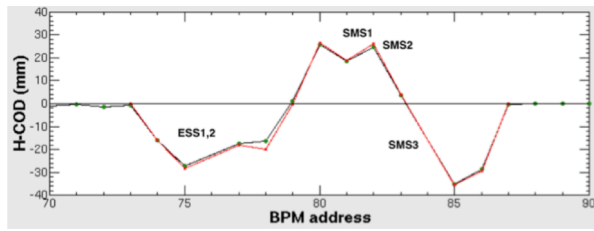


図1 遅い取り出し直線部のバンプ軌道。
緑は理想値、赤は実測値。

秒まで延長することができた。この改良によって同じビーム粒子数にたいして取り出しビームの平均強度をスパイル長の分下げることができたことになり、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 0.3 kW ($1 \times 10^{11} \text{ ppp}$) から $1 \sim 2 \text{ kW}$ ($1.3 \sim 2.6 \times 10^{11} \text{ ppp}$) まで増やすことができた。また短時間であるが 2.6 kW の取り出しにも成功した。

3. 取り出し効率向上

取り出し効率の絶対値を精度よく求めることは容易ではない。取り出し効率を求める方法として、遅い取り出しを行わないで、バンプ磁石とステアリングにより ESS と SMS1 の場所にバンプ軌道をつくり、その振幅を調整して各々のセプタムでビームロスが発生するようにする。その時の DCCT の信号の減り具合から、ビームロスモニター(BLM)のカウント数をロス粒子数に換算することができる。その結果、遅い取り出し時において、BLM のカウント数からロスの粒子数が求まり、取り出し効率を得ることができる。この方法では、バンプを作ったときの BLM の分布と遅い取り出し時の分布が完全に一致

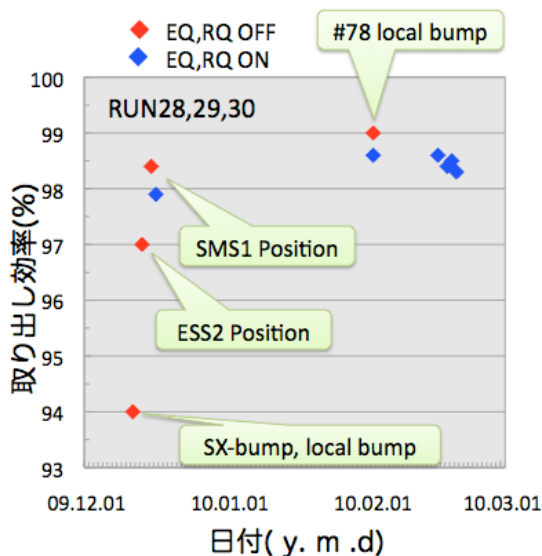


図2 取り出し効率の進展。

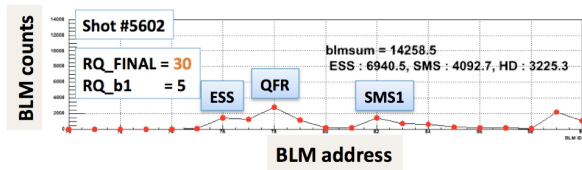


図3 BLM によるビームロス分布

しないことや、ロスのレートの違いによる誤差が生じ得ることに注意が必要である。ただしこの方法では求まる効率が誤差を含めて 100% を超えることはない。

取り出し効率をあげるためにバンプ軌道の調整が非常に重要である。求めたいバンプ軌道をつくるためには、もともとの COD をできるだけ小さくしておくことが望ましい。Q 磁石等のアライメントエラーに起因する COD 以外に、セプタム磁石の漏れ磁場による COD が発生する[1]。遅い取り出し運転では、遅い取り出し用セプタム磁石は DC 運転され、入射時では $\pm 3 \text{ mm}$ 程度の COD を作るがフラットトップでは一桁小さくなる。一方速い取り出し用のセプタム磁石は、遅い取り出し運転においても加速と同様なパターンで励磁され、同等の COD を発生する。入射・加速を含むフラットトップまでの COD はステアリングによって水平・垂直方向ともに $\pm 1 \text{ mm}$ 程度まで補正された[2]。

さらにフラットトップではバンプを軌道する領域の BPM のビームベースドキャリブレーションを行った上で、3 台のステアリング磁石の組み合わせによる補正によって COD を $\pm 0.5 \text{ mm}$ 程度まで抑えた。以上の補正後にバンプ軌道を作った。バンプ磁石のパラメータは計算値から出発し MICADO アルゴリズムによって目標とするバンプ軌道になるように 4 台の磁石のパラメータを決定した。さらに 3 台の隣り合う水平方向ステアリングの組み合わせによるローカルバンプの作成によりバンプ軌道を、BLM のカウント数を見ながら調整を行った。図 1 に調整後のバンプ軌道と設計値のプロットを示す。次のステップとして ESS と SMS1 のセプタム位置の調整を BLM のカウント数を見ながら行った。ESS2 と SMS1 の平行位置調整で劇的なロス改善が得られた。これら一連の効率向上の経過を図 2 に示す。後述する EQ, RQ を ON にした運転において、取り出し効率は 98.6% に達した。RQ を OFF にした場合、効率はさらにアップしたが、今後その原因を追求する必要がある。この取り出し効率は、約 9 時間連続運転の平均でありばらつきも少なかった。ただし別の時間帯に取り出し開始時だけにロスが増えその結果取り出し効率が 0.2% 程度悪くなるがあった。この原因は周回ビームのエミッタンスが大きくなり低磁場セプタムでのロスを引き起こしたと推定する。このロスは最後に述べるダイナミックバンプの導入で回避できると考えている。図 3 は BLM で測定されたロス分布である。

RUN30 の終了後ダクト表面 (on contact) での残留

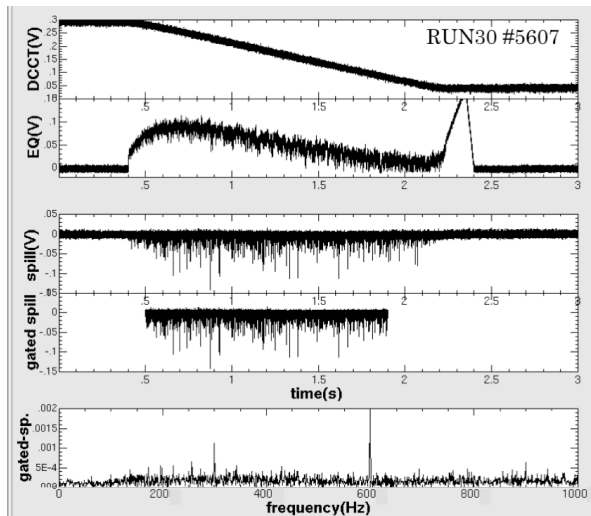


図4 EQ, RQ によるフィードバックを行った状態でのスピルとそのFFT。上図はDCCT信号。

放射能のサーベイが行われた。ビーム停止までの8日間で1~2 kWのビームパワーで合計 9×10^{16} 個の陽子ビームが供給された。ビーム停止後4時間で最大線量はSMS1下流で300 $\mu\text{Sv/h}$ であった。その次がESS2から下流2台目のQ磁石(QFR)の場所で200 $\mu\text{Sv/h}$ であった。7日後の測定ではおよそ線量は1/3に減少している。メンテナンス時の基準となる表面から30 cmのところでの線量は1/3~1/10程度に減る。

4. スピル制御

偏向電磁石、四重極電磁石電源の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いない。対応するチューンリップルはおよそ ± 0.003 程度である。電源リップルによる磁場への影響を少なくする目的で、全Q磁石のうちの水平方向のチューンに効くものについて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[3]。スピルには電源リップルに起因する強いスパイク構造が存在する[4]。スピルのFFTを見ると100 Hzまでの成分と600 Hzの成分が大きい。スピル性能を定量的に表すduty factor[4]は、フィードバックなしでは約3%であった。

フィードバックのEQシステムは主にスピルの平均強度をできるだけ一定にするのが目的である。一方RQはスピルのリップル分の補正を行う[4]。図4はEQとRQのフィードバックをかけた状態でのスピルの測定結果である。DCCT信号の減少度、スピルの形からわかるように、EQによって、平坦なスピル平均強度が得ることができた。リップル分に関しては100 Hz以下の成分への応答性に重点を置いたフィルターでRQを制御した[5]。さらにEQの比例制御項を大きくすることにより50 Hz程度までの成分に応答できるような設定とした。その結果duty

factorは11%程度まで改善した。100 Hz程度までの周波数成分が大きく減少した[4]。

EQ, RQによるフィードバックに加えて、周回ビームに横方向もしくは縦方向にRFノイズを加えることにより、常に共鳴に近づく成分を加えることによりスピルを改善をねらう試験を行った[6,7]。横方向のRFノイズは水平方向ベータatron周波数のハーモニクスを中心周波数としバンド幅1 KHzまでの一様幅を持つノイズRFをチューンメーターに与えることにより行った。まだ安定な運転を得るための調整は必要なものの、duty factorを1.5倍程度向上させる見込みが得られた。

5. まとめと今後の予定

RUN26-30の進展をまとめると以下の通りである。

- スピル長は0.2秒から1.5~2秒になった。
- 連続運転で1~2 kWのビームをハドロン実験施設に供給した。2.6 kWビームの試験にも成功した。
- 世界最高レベルの取り出し効率98.6%を達成した。しかも達成した効率は長時間安定であることが確認された。
- EQ, RQのスピルフィードバックによりスピルのduty factorに大幅な改善が得られた。RFのノイズをビームに加える方法がスピル改善に有望である感触を得た。

また今秋に予定されているRUNに向けての計画は以下の通りである。

- 取り出しの途中でバンブ軌道を動かすダイナミックバンブを導入する。これによってさらなる取り出し効率の向上をねらう。
- スピルの改善のために、600 Hz成分をターゲットにした制御アルゴリズムを導入する。スピル信号のノイズを極力除去する。RFノイズを併用した方法のスタディーを進める。
- 5 kWのビームパワーに挑戦する。

参考文献

- [1] Y. Shirakabe, et al., "Leak Field Analysis of the J-PARC MR Slow extraction Septum Magnets", These Proceedings.
- [2] J. Takano, et al., "Design of Slow Extraction from 50 GeV Synchrotron", Proc. of IPAC2010, p1058-1060.
- [3] S. Igarashi, et al., "Magnetic Field Reduction of the Main Ring Using Trim Coils", Proc. of IPAC2010, p.301-303.
- [4] T. Kimura, et al., "Spill Feedback Control for the J-PARC Slow Extraction", These Proceedings.
- [5] S. Onuma, et al., "Spill Feedback Control Unit for the J-PARC Slow Extraction", These Proceedings.
- [6] M. Tomizawa, et al., "Status and Upgrade Plan of Slow Extraction from J-PARC Main Ring", Proc. of IPAC2010, p.3912-3914.
- [7] A. Schnase, et al., "Application of Digital Narrow Band Noise to J-PARC Main Ring", Proc. of IPAC2010, p.1446-1448.