

J-PARC 主リングにおける 30GeV 陽子ビームの遅い取り出し調整 BEAM COMMISSIONING OF SLOW EXTRACTION AT J-PARC MAIN RING

武藤亮太郎^{#, A), B)}, 新垣良次^{A), B)}, 木村琢郎^{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)}, Akihiko Matsumura^{C)}, Shigeru Murasugi^{A), B)},
Katsuya Okamura^{A), B)}, Yoshihisa Shirakabe^{A), B)}, Masahito Tomizawa^{A), B)}, Eiichi Yanaoka^{A), B)}

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

^{B)} J-PARC Center

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

Abstract

Beam commissioning of the slow beam extraction at J-PARC Main Ring was carried out in January, February and June, 2018. The user operation with the beam power of 51 kW and the spill duty factor of about 50 % was achieved, and in the beam study we successfully extracted 6.8×10^{13} protons per pulse, which corresponds to the beam power of 62.8 kW. In this paper we discuss the details of the beam commissioning and future plans for the further improvements of the beam power and the time structure of the extracted beam.

1. はじめに

茨城県那珂郡東海村に位置する J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)[1]の 30 GeV 陽子シンクロトロン(以後 MR(Main Ring)と呼ぶ)では、3 次共鳴を用いた遅い取り出しによって取り出された約 2 秒間のスピル長をもつ陽子ビームをハドロン実験施設に供給している。ハドロン実験施設で実施される素粒子原子核実験において高統計の物理データを収集する上で、大強度かつ時間構造の少ないビームが求められている。Figure 1 に MR と遅い取り出しを行う直線部の機器構成を示す。2009 年の初ビーム取り出し以来、ビーム強度の増強と取り出しビームの時間構造の改善を進め、2016 年にはビームパワー41kW (4.7×10^{13} ppp)、ビームの時間構造を表すスピル duty factor (ビーム電流を I として $\langle I \rangle^2 / \langle I^2 \rangle$ で定義される指標。時間構造が全くない場合 100 %となる。ここで $\langle \rangle$ は取り出し時間中の平均値を表す。) 約 50 %でのビーム供給を行った[2]が、2017 年 4 月に遅い取り出し直線部の最上流に位置する静電セプタム (ESS) のセプタムリボン (タングステン・レニウム合金製) が断線し、これに伴い通常は 2 台使用している静電セプタムを 1 台構成に変更する必要が生じた。その結果静電セプタム下流でのビームロスが増加し、2017 年 5 月~6 月の利用運転ではビームパワーは 37 kW にとどまった[3]。本論文では、静電セプタムを 2 台の構成に戻した後に実施された、2018 年 1 月から 2 月にかけてのビームタイム(RUN78)と、2018 年 6 月のビームタイム(RUN79)における遅い取り出しビーム調整について述べる。

2. チタン製静電セプタムのインストールとそれに伴うビーム調整

通常の遅い取り出し運転では静電セプタムを 2 台使用

する。これらのリング内での位置を上流側から順に ESS1、ESS2 と呼ぶことにする。2017 年 4 月に断線したのは最上流 ESS1 の位置の静電セプタムである。断線した静電セプタムを撤去し、ESS2 の位置の静電セプタムを ESS1 の位置に移動して 2017 年 5~6 月のビーム運転を行った。

その後、2017 年の夏季シャットダウン中に、新規に製作した静電セプタムのコンディショニングを完了させた[4]。この静電セプタムは残留放射線量を低減することを目的に真空チェンバーやセプタムリボンを支えるコアの素材として純チタンを用いており、またリボンが断線した際にそれを検知する機構や、切れたリボンが対向する電極に触れることを防ぐバップルを備えるなどの改良が施されている。このチタン製静電セプタムをビームによる放射化のより激しい ESS1 の位置にインストールし、ESS1 の位置に移動されていた静電セプタムは ESS2 の位置に戻して 2018 年 1 月のビーム調整に臨んだ。

2 台の静電セプタムの新規インストールおよび再設置を行ったことで、セプタムリボンのビームに対する位置の

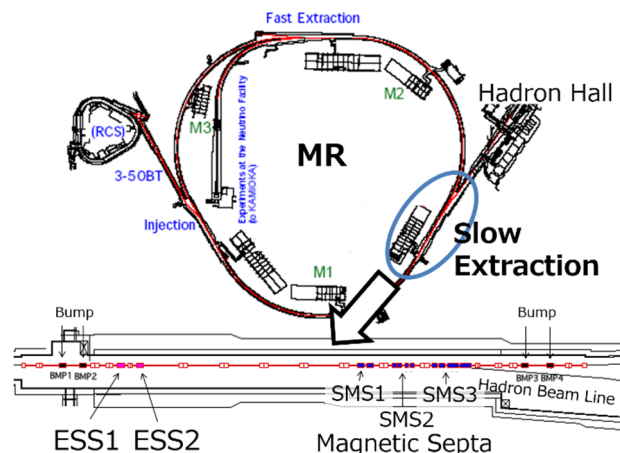


Figure 1: Schematic view of the J-PARC Main Ring and the straight section for the slow beam extraction.

[#] ryotaro.muto@kek.jp

再現性が懸念されたが、セプタムリボンの位置を遠隔操作で移動させながら各 Q 磁石にとりつけられた Beam Loss Monitor (BLM) のカウント値を最小化するアライメントを行ったところ、ESS1 は 90 μm 、ESS2 は 300 μm の位置調整でビームロスを最小とすることができた。ただこの後、ESS1 においてチェンバー内圧力の 2×10^{-4} Pa までの大きな上昇を伴う放電があり、それ以後ビーム取り出しにともなう ESS1 のチェンバー内圧力上昇が 3×10^{-6} Pa 程度と、それまでの 2×10^{-7} Pa より 1 桁以上大きくなる現象が起きたことから、ESS1 の電圧を定格の 104.4 kV から 70 kV に下げて 2018 年 6 月末までの利用運転を行った。Figure 2 に取り出しビーム量で規格化された BLM のカウント値のプロットを示す。RUN78 の値とともに、セプタムリボンが断線する以前の RUN65 の値をプロットしている。RUN78 は RUN65 をほぼ再現しているが、ESS1 の下流の BLM76 の値のみが 1.5 倍ほどに増加している。

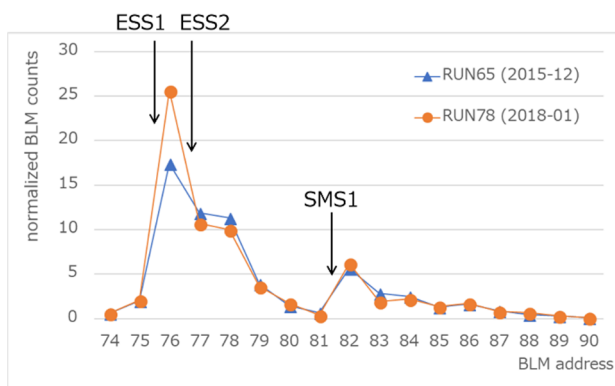


Figure 2: Normalized BLM counts in the straight section for the slow beam extraction.

一方、アラニン線量計により測定した ESS1 および ESS2 の位置での吸収線量を Fig. 3 にしめす。横軸は遅い取り出しによって取り出された陽子数である。塗りつぶされた丸および三角はセプタムリボン断線以前のデータを、点線はそれらに対する近似直線を表している。RUN78 の測定値はこの直線上によくのっており、取り出しビーム量あたりの静電セプタムにおけるビームロスは RUN78 以前の値をよく再現していることを示している。こ

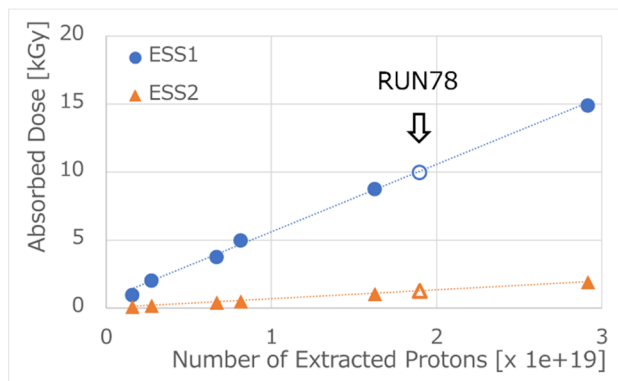


Figure 3: Absorbed Dose at ESS1 and ESS2. Open circle and triangle are for the RUN78. Filled circles, filled triangles and dashed lines are for the data taken before the break down of the ESS septum ribbons.

のことから、RUN78、79 に BLM76 で観測されたカウント値の増加は、静電セプタムでのビームロスの増大ではなく、ESS1 のチタン化により ESS1 でのビームロスで発生した 2 次粒子が下流の BLM76 で検出されやすくなっていることが主要因であると考えられる。現在取り出し効率は BLM のカウント値から算出しているが、現状の機器構成における取り出し効率の校正は今後の課題である。

3. ビームパワーの増強

現在のハドロン実験施設へのビーム取り出しの上限値は放射線申請において 53.4 kW と定められているが、これに 0.98 をかけた値 (52.3 kW) を PPS(Personnel Protection System)発報の閾値としており、さらにその下に 1% のマージンを設けて MPS(Machine Protection System)の閾値を設定して(51.8 kW)運用しているため、MPS の閾値である 51.8 kW が実質的な上限値である。RUN78 および RUN79 ではほぼこの上限値であるビームパワー 51kW (5.5×10^{13} ppp)での利用運転を行った。以下にビーム調整の詳細を述べる。

3.1 繰り返し周期の短縮

まず、より確実にビームパワー増強を実現するために、これまで 5.52 s であった繰り返し周期を 5.2 s に短縮した。これはビーム取りだし後に設けていた 0.4 s のマージンを 0.1 s に短縮して、フラットトップを 2.93 s から 2.61 s に短縮することで行った。この変更により、パルスあたりの粒子数は一緒でも、積算ビームパワーを約 6% 増やすことが出来る。変更前後の加速器電磁石の運転パターンの模式図を Fig. 4 に示す。

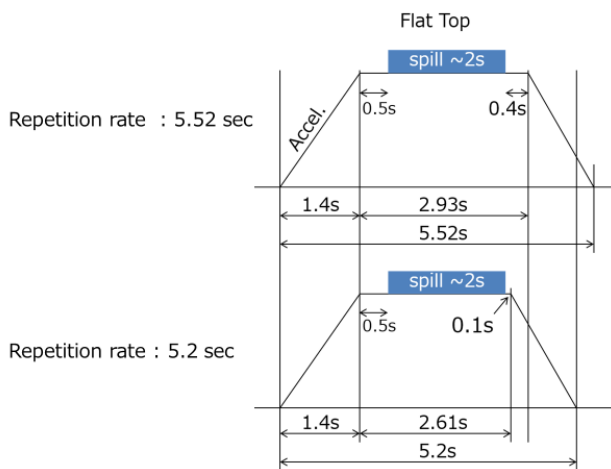


Figure 4: Excitation patterns of MR main magnets with the repetition rate of 5.52 s and 5.2 s.

3.2 デバンチ時のビーム不安定性の抑制

ハドロン実験施設への遅い取り出しビームは加速終了後に加速空洞の電圧をオフにしデバンチした状態で取り出される。ビーム強度の増加とともに、ビームがデバンチしていく過程でビームが不安定になる現象が観測されるようになった。デバンチ過程でのクロマチシティの補正を弱くし、さらに入射時にビームをキャプチャする RF 電

圧の位相にオフセットをつけて縦方向にダイポール振動させることが、このビーム不安定性を抑制する大きな効果を持つことがわかっている[2]。これまでの利用運転では RF 位相に 50° のオフセットを付けて 44 kW (5.1×10^{13} ppp、繰り返し周期 5.52 s)までの運転を行っていた。RUN78 においては位相オフセット 50° のまま受け入れ上限値にほぼ等しい 51 kW (5.5×10^{13} ppp、繰り返し周期 5.2 s)までパワーを上げてもビームの不安定性は十分に抑制されており、このパワーでの利用運転を行うことができた。また、利用運転終了後のビームスタディにおいて、62.8 kW に相当する 6.8×10^{13} ppp まで粒子数を増やしたが、位相オフセットは 50° のままでビーム不安定性はよく抑制されており、約 99.5%の取り出し効率をたもったままビームを取り出すことに成功した。一方 RUN79 では、利用運転に供する 51 kW のビームパワーにおいても位相オフセット 50° のままではビームの不安定性を抑制しきれず、位相オフセットを 55° まで増やすことでこれに対応した。この RUN79 と RUN78 でのビーム不安定性の違いの原因はまだ特定できていないが、MR の上流の RCS から取り出されるビームの横方向エミッタンスが RUN79 では RUN78 とくらべて小さかったことがわかっており、今後エミッタンスとビーム不安定性の関係についてスタディをすすめる予定である。

3.3 ビーム運転終了後の残留放射線量

Figure 5 に、利用運転終了後の残留放射線量のグラフを示した。値は on contact のものである。RUN79 終了後 106 時間冷却して測定したものと、RUN49 (2013 年 5 月、ビームパワー 24 kW) の運転終了後 5 時間冷却して測定した残留放射線量がプロットしてある。遅い取り出し直線部の下流部の、セプタム磁石群(SMS1,2,3)の領域の残留放射線量はほぼ一致しているが、ESS1 の下流側ダクト周辺の残留放射線量は RUN79 の後の測定が RUN49 の後の測定の約半分程度に減少しており、取り出し機器のチタン化が残留放射線量の低減に有効であることを示している。

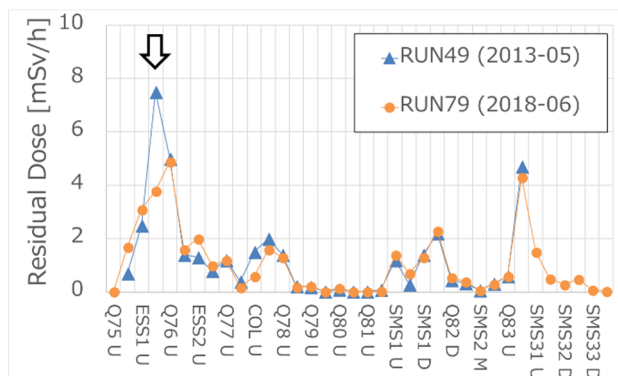


Figure 5: On-contact residual dose measured after the RUN49 (2013) and RUN79. The cooling time for each data is 5 hours and 106 hours, respectively. The arrow indicates the position of the ESS1.

4. 取り出しビームの時間構造の改善

取り出しビームの強度は MR の真空とハドロン実験施設のビームラインの真空を隔てる真空膜(純アルミニウム製、厚さ 100 μm)で発生する 2 次粒子をシンチレーションカウンタ(スピルモニタと呼ぶ)で検出することで計測しており、取り出しビーム量が一定になるようにリングの水平方向のベータatronチューンをフィードバック制御している[5]。また、ストリップラインキッカーで発生させた横方向の高周波電場(Transverse RF と呼ぶ)をビームに加えることで、取り出しビームの時間構造を改善している[6]。

RUN78 および RUN79 では取り出しビームの時間構造の改善に関するハードウェアの変更は行っていない。ビーム調整としては、各 RUN の立ち上げの際に約 2 秒のスピルを時間で 5 分割してそれぞれの区間で求めたスピル duty factor を最大化するように Transverse RF の周波数調整をおこなっている。取り出し時間全体で平均したスピル duty factor は約 50% である。

また、利用運転を継続していると、約 2 秒のスピル長に対し、0.1 秒/3 日程度の速度でスピル長が短縮していく現象が観測されている。これはスピルモニタのゲインが連続運転の継続につれて低下していくことにより、フィードバック制御により取り出しビームレートが増えていき、それに伴いスピル長が短くなっていくことが原因である。ビームレートの増加は 2 次粒子生成標的に対する熱負荷の増加や物理実験におけるバックグラウンドの増加を引き起こすため、これまではスピル長が 1.9 秒以下になった場合はビーム運転を一時停止してフィードバックパラメータの調整を行う必要があった。RUN79 において、スピルモニタの信号の積分値からスピルモニタのゲインの低下を検出し、フィードバックパラメータを自動で調整する機能を導入した。Figure 6 は RUN79 におけるスピル長のトレンドグラフである。RUN79 の前半は手動でパラメータ調整する必要があったが、後半のスピル長自動調整導入後(6 月 22 日以降)は、スピル長が約 2 秒で一定に保たれていることがわかる。

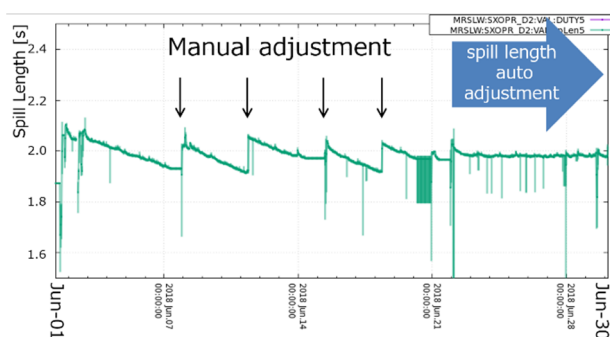


Figure 6: Trend graph of the spill length in RUN79.

5. 今後の展望

5.1 ビームパワー

ハドロン実験施設の 2 次粒子生成標的は近い将来

アップグレードされる予定であり、それに伴い受け入れ可能ビームパワーも増加する。MR における遅い取り出しビームのパワー増強のためには、デバンチ時のビーム不安定性の抑制が大きな鍵を握る。今後 2 次高調波空洞と位相オフセットを組み合わせてさらに縦方向エミッタンスを増やす試みや、デバンチの直前に RF の位相を 180° 反転させてデバンチ時の運動量広がりを増加させることによる不安定性抑制に対する効果をみるスタディを行う予定である。またビームの不安定性に大きな違いのあった RUN78 と RUN79 の違いを生み出す要因の探索もすすめる。

また、取り出しビームの大強度化を目指す上では、取り出し効率をさらに向上させ、機器の放射化を抑えることも重要である。静電セプタムのセプタマリボンカーボンナノチューブを用いて製作しビームロス量を低減させる試みや、静電セプタムの上流に散乱体を設置して全体のビームロスを低減させる手法[7]についても検討・準備を進めている。

5.2 取り出しビームの時間構造

現在の運転に使用しているスピルフィードバックシステムは、スピルモニタで測定した取り出しビーム強度を入力信号として用いて、リングの水平ベータatronチューンをフィードバック制御して取り出しビーム強度の平坦化を行っている。このシステムには、チューンの変動が取り出しビームに反映されるまで数十ターンの delay があること [8]、またチューンの変動が大きい場合にはビーム強度が 0 になってしまう時間帯が生じるが、その時間帯はビーム強度からチューンの変動を推定することが難しいこと、などの困難がある。J-PARC MR 主電磁石グループの栗本佳典氏らにより、主電磁石の電流偏差からベータatronチューンの変動を高速計算し、リングのチューン制御に反映させる手法が考案・試験され、取り出しビームの時間構造の改善に有効であることが分かった [9]。今後、既存のスピルフィードバックシステムや Transverse RF と上記の新システムを共存させることで、現状をこえるスピル duty factor の実現を目指す。

6. まとめ

2017 年の夏期シャットダウン期間にチタン製静電セプタムを MR にインストールし、2018 年 1~2 月と 6 月に遅い取り出しビーム運転を行った。利用運転のビームパワーは現在の実質的な上限値にほぼ等しい 51 kW に到達し、静電セプタムおよびその下流デバイスによる取り出しビーム量あたりのビームロスは 2017 年夏以前の値をよく再現した。取り出しビームの時間構造を表すスピル duty factor は約 50% であった。1 shot でのビーム試験では、これまでに達成した約 99.5% という高い取り出し効率を保ったまま、ビームパワー 62.8 kW に相当する 6.8×10^{13} ppp の粒子の遅い取り出しに成功した。今後さらなるビーム強度の増強と取り出しビームの時間構造の改善を目指してスタディを続けていく。

謝辞

J-PARC MR の遅い取り出しは、MR のコミッショニンググループを始めとして、J-PARC に携わる全ての人々によって支えられて実現しています。心より感謝いたします。

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] M. Tomizawa *et al.*, "Present status and future plans of J-PARC slow extraction", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 1-3, 2016, pp. 70-74.
- [3] K. Hasegawa *et al.*, "Present status and future plans of J-PARC slow extraction", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1317-1321.
- [4] Y. Arakaki *et al.*, "A high voltage test of Titanium-ESS in J-PARC MR", in this conference, WEP018.
- [5] T. Kimura *et al.*, "Improvement of the spill feedback control system of J-PARC slow extraction", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, 2014, pp. 1279-1281.
- [6] A. Schnase *et al.*, "J-PARC MR horizontal exciter test for transversal noise application", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 2011, pp. 338-342.
- [7] R. Muto *et al.*, "Simulation study of beam scatterer for beam loss mitigation in slow extraction at J-PARC MR", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 892-895.
- [8] K. Okamura *et al.*, "A consideration on the transfer function between RQ field and slow extraction spill in the main ring of J-PARC", in this conference, WEP086.
- [9] Y. Kurimoto *et al.*, "Evaluation of slow-extracted beam quality with real-time betatron tune correction using magnet current at J-PARC Main Ring", in this conference, FROL11.