

APPROACH FOR HIGH INTENSITY SLOW EXTRACTION FROM J-PARC MAIN RING

Masahito Tomizawa^{#,A)}, Yoshitsugu Arakaki^{A)}, Daisuke Horikawa^{B)},
 Takuro Kimura^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Shigeru Murasugi^{A)}, Hidetoshi Nakagawa^{A)},
 Katsuya Okamura^{A)}, Hikaru Sato^{A)}, Kenichiro Sato^{A)}, Tetsushi Shimokawa^{C)},
 Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Fumihiko Tamura^{D)}, Takeshi Toyama^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI),
 Shonan Village, Hayama, Kanagawa 240-0193

^{C)} Saga University, 1 Honjo-machi, Saga, 840-8502

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

Abstract

In the operation for the slow extraction from J-PARC main ring, we have achieved a very high extraction efficiency (99.5%) above 10 kW beam power. We report approaches we have already executed and are planning toward a higher intensity slow extraction.

J-PARC 遅い取り出しビーム高強度化へむけての取り組み

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(SX)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)、バンパ磁石(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。図 1 はこれらの装置の配置が示す。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。

遅い取り出し陽子ビームの大強度化にむけてもっとも深刻な問題は、遅い取り出し過程で生じるビームロスによって引き起こされる周辺機器の放射化と放射線損傷である。機器の放射化はメンテナンス時の被爆量を増やし、機器の放射線損傷はメンテナンスの頻度を増やす。従って、遅い取り出しビームの大強度化にむけて、取り出し効率の向上と達成した高い取り出し効率の維持が重要である。さらに避けられないビームロスの局所化と遮蔽、残留放射能が大きい装置や真空ダクトを優先的に残留放射能が低減できる材料で置き換えることも有効である。以上の観点から、遅い取り出しビームの大強度化へむけての取り組みについて今後の計画も含めて報告する。

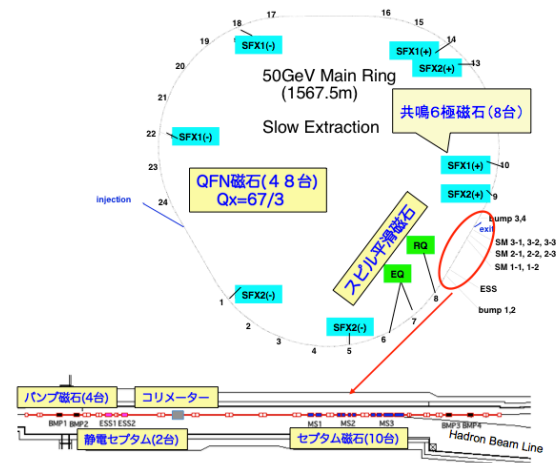


図 1 遅い取り出し装置の配置

2. 遅い取り出し運転運転の状況

震災後初めての遅い取り出し運転は RUN40 (2012 年 1 月～2 月)、最も最近の運転は RUN43 (2012 年 6 月～7 月)に行われた。遅い取り出し運転の状況を以下で簡単に述べる。

遅い取り出し運転では加速周期は 6 秒で、4 バッチ入射に必要な 0.12 秒の直後に加速を開始する。加速開始終了時のそれぞれ 0.1 秒のパラボラ期間を含む加速時間は 1.9 秒である。またフラットトップは 2.93 秒である。取り出しのためにアーク部の 48 台

[#] masahito.tomizawa@kek.jp

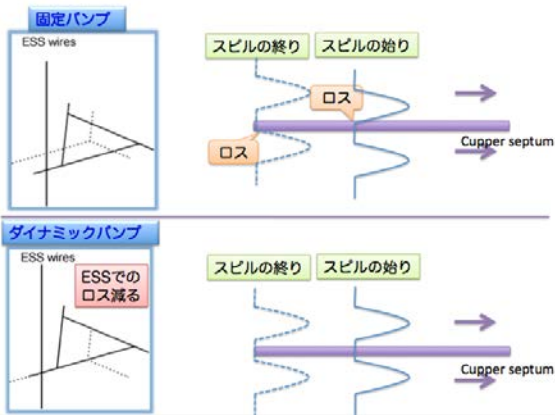


図2 ダイナミックバンプスキーム

の Q 磁石(QFR)によりチューンを直線的に共鳴 $Q_x=67/3$ に近づける。

高い取り出し効率を得るために COD 補正、バンプ軌道の調整、2 台の静電セプタムそしてその下流の低磁場セプタムの位置調整を行った[1]。さらに以下のセクションで述べるダイナミックバンプと減速対策により、RUN43 では実験向けに 6 kW ビームを取り出し効率 99.5% で供給することができた。また 14 kW (1.7×10^{13} ppp) までのビーム試験もを行い、6 kW 時とほぼ同等の高い取り出し効率を得ることに成功し、実験グループからの今後一年間の高強度化要求に対応できる見通しがついた。

スピルに関しては、EQ によるフィードバックにより約 2 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ている。大きな主電源リップルによるスピルのスパイク構造は、依然大きな問題として残っているが、EQ, RQ によるスピルフィードバック系の改良に加えて、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改善を進めている[2,3]。

3. リアルタイムダイナミックバンプ

遅い取りだしに使うバンプ軌道を取り出しの途中で一定にする固定バンプモードでは、セパトトリックスの大きさが変化することにより、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 セプタムの側面からセプタムにヒットする確率

が増える、この取り出し角度の広がりにはさらに下流に置かれた低磁場セプタムでのロスを引き起こす(図2上)。しかしながら、バンプ軌道を取り出しの開始と終わりで、セパトトリックスからの取り出しアームが重なるように動かせば(ダイナミックバンプモード)、この角度の広がりを抑制することができる(図2下)。MR では、遅い取り出し直線部のディスパージョン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ると、セパトトリックスがビーム運動量にほぼ依存性しない条件を達成することができる。この特別な条件ではダイナミックバンプモードは極めて有効に働く。3 kW 以下のビーム強度において、この結果取り出し効率は 98% 中頃から 99.5% まで向上した[1]。

ダイナミックバンプの軌道パラメーターは、水平方向のチューンが求めればユニークに決まる。前述のように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 磁石の強さにも依存する。この EQ 磁石の強さは周回ビームの位相空間分布を反映し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のための EQ 磁石電流指令値は、DSP による処理で生成・出力される。この出力信号をもう一度ダイナミックバンプ用 DSP で処理し 4 台のバンプ電流信号を演算し出力する。図3は信号処理の流れを示す。我々はこのリアルタイムダイナミックバンプ制御システムを開発し実用化することに成功した[4]。リアルタイムダイナミックバンプモードは、スピル長の調整で EQ のパラメーターを変更する場合や、周回ビームの分布が変化するビーム強度調整を行う上で実用上必須のモードである。

4. SX コリメーター

震災前に遅い取り出し運転を行った RUN35 と RUN36 においては、 7.5×10^{17} 個の遅い取り出しビームが実験のため供給された。RUN36 終了前は 3 kW のビーム運転が約 2 週間続いた。この終了後において 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

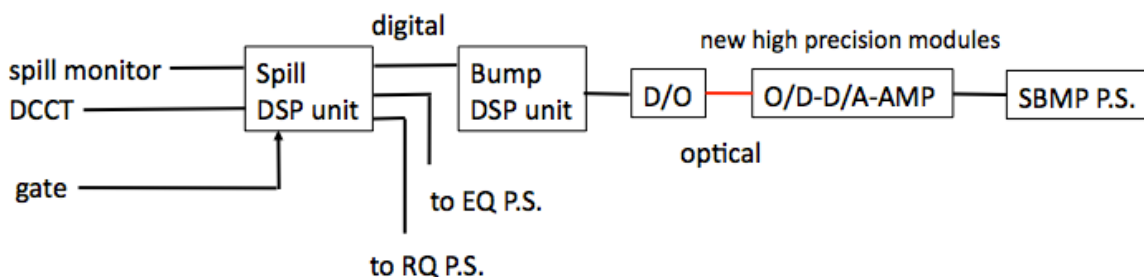


図3 リアルタイムダイナミックバンプの流れ

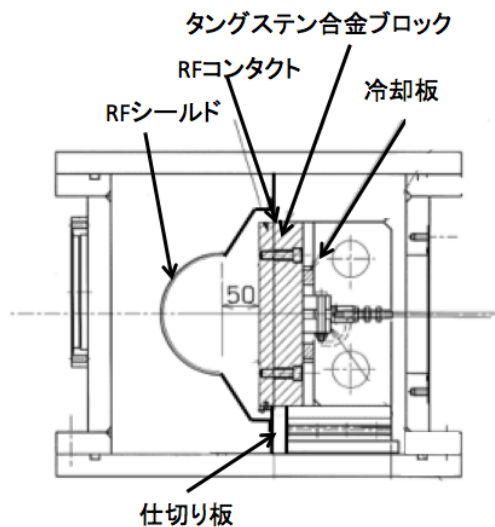


図4 SX コリメーターの断面図

ら4時間後において表面で 0.9 mSv/h, 表面から 30cm 離れたところで 0.1 mSv/h であった。このビームロスの原因は、取り出し時に静電セプタムのセプタムリボンで散乱されたビームのうち振幅の大きい粒子の一部が QFR 付近の真空ダクトに当たることによる。この対策として、QFR 上流にこれらの散乱粒子のみを削るコリメーターを設置することにした。散乱粒子を直接削るブロックはタングステン合金で、水平方向に移動可能なブロック 1 個と垂直方向に移動できる上下 2 個のブロックからなる。周回ビーム側との間に仕切り板を設置し、周回ビームのビームカップリングインピーダンスを減らすために、ブロックと仕切り板の間に高周波コンタクトを取り付けている。また周回側には壁電流をスムーズに流すための RF シールドが設置されている (図4)。真空チャンバーに接続されるビームダクトはチタン材でできている。チャンバーの周りは厚さ 10cm の大理石で囲まれている。大理石で囲まれた真空チャンバー、ビームダクトは一体構造となっており、容易に交換が可能な構造となっている。コリメーターは厚さ 30~70cm の鉄シールドで囲まれている。RUN40 のビーム試験において、鉄シールド内に置いたビームロスモニター(BLM)の値と下流の QFR 付近に置かれた BLM の値から最適なブロックの位置を探した。RUN36 と同等の粒子数を供給した RUN40 後の QFR 付近のダクトでの残留線量は、0.15 (on contact), 0.055 (30 cm distance) mSv/h と激減した。ちなみに SX コリメーターシールド直後のビームダクトの値も少なくそれぞれ 0.13, 0.040 mSv/h であった。SX コリメーターによりロスを局所化し遮蔽することができたことを示す。

4. 減速抑制

J-PARC 遅い取り出しビームは実験側の要求によりデバンチした状態で供給を行っている。現在のデバンチはフラットトップの開始とともに加速空洞の電圧をオフする方法で行っている。しかしながらビーム強度が上がるにつれインピーダンスの効果が無視できなくなり完全なデバンチ状態になるまでの過程でビームの減速が悪影響を及ぼす。5 kW 以上のビームに対して減速(運動量で約 1%)による取り出し時のビームロス増加が実際に観測された。減速量の推測は現在までのところ、デバンチ形成途中で、ディスパージョンの有限な場所のビーム位置モニター(BPM)による信号から求めた。より定量的測定のためには、ディスパージョンの有限な場所に置かれたイオンプロファイルモニター(IPM)が有効である。

減速による取り出し効率の悪化の原因は以下のように推測している。リングのクロマティシティーは、補正6極磁石の2つのファミリーで可能な範囲でほぼ完全に補正しているが、高次の効果によりオフモーメント領域で、運動量広がりに対して無視できない有限のチューンの広がりを生じる。このチューンの広がりによりセパトリックスが運動量に依存することになり、取り出し角度の広がりによる ESS リボンのヒット率を増加させる。また、バンブ軌道や EQ 励磁によってできるディスパージョンの微分による取り出し角度の広がりも悪影響を与え

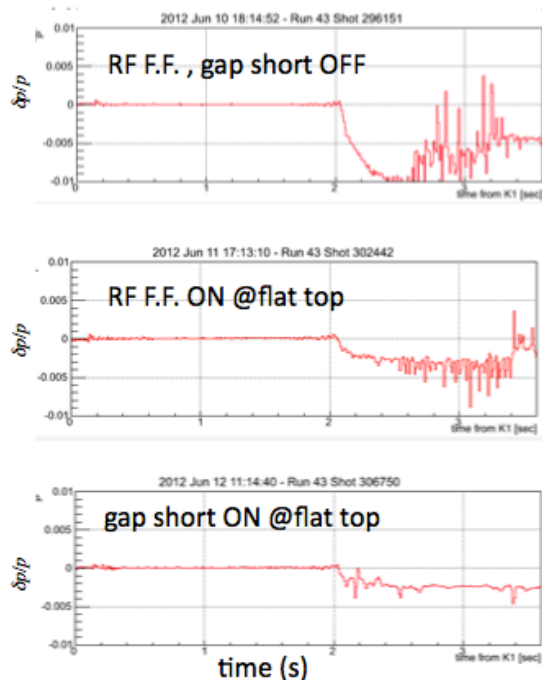


図5 BPM によるデバンチ過程における運動量シフト。ビームパワーは 6-6.3kW。RF は横軸の 2.12 秒でオフされている

る可能性がある。

現在の最大のインピーダンス源は 8 台から構成される加速空洞である。残りのインピーダンスは入射・取り出しのキッカー群と resistive wall が主なものと考えられる。加速ギャップのショート、もしくはビームローディング補償によって、ビームに寄与するウエイク電圧を減らすことができる。MR での加速空洞のビームローディング補償はフィードフォワード法(F.F.)を採用している[5]。RUN43 において両者による方法を試し、6 kW のビームにたいして運動量の減少約 0.2%までに抑えることができた(図5)。その結果 99.5%の取り出し効率を維持することができた。

当面の減速抑制は RF 空洞の F.F.によるビームローディング補償で行う予定である。さらにデバンチ直前にあらかじめ運動量の減少分だけ加速しておくことを今後試みる。その他の対策としては、主電磁石励磁電流を減速による運動量の変化に対応して減らす方法が考えられる。ただし電流を減らす方向で電源が制御できない現状を解決する必要がある。また誘導加速空洞の導入も検討の対象となるであろう。

5. セプタムのチタン化

ビームロスによる残留放射能を低減するために、残留放射能が高くなる箇所装置材料をステンレスから純チタン製に置き換えることは有効である。MARS によるシミュレーションによると、チタン材を用いることにより残留放射能をステンレスの約 1/3~1/5 に低減できることがわかっている。製作コストは上がるが、期待される残量線量の低減のメリットはコストアップのデメリットを上回る。我々は残留線量が高い静電セプタムをチタン製のものに置き換えることにした。真空チェンバー本体、ビームが通過する上流・下流ベローのみならず、セプタムリボンを固定しているヨークとそのベースもチタン材料で製作する。チタン製静電セプタムの製作は今年度行い、オフライン試験を経て来年計画されている 6~7 ヶ月の長期シャットダウンにインストールを行う予定である。また静電セプタムの下流に設置されている真空チェンバー内に磁石をいれるタイプの低・中磁場セプタムチェンバーの入口・出口の大型フランジとそれらに接続するベローもステンレス製から純チタン材のもので置き換える予定である。これらの交換はこの夏のシャットダウン時期に行う計画である。

6. 長期的計画

上記で述べた取り組みに加えて、さらなるビームロス低減にむけての取り組みについて簡単に述べる。

- 現在の ESS のセプタムはタングステン(レニウム 26%)のリボンが採用されている。セプタム材料を原子番号の小さい材料で製作できれば、原子核反応、多重散乱を減らすことができるた

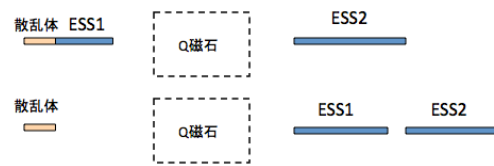


図6 ESSの上流に置く散乱体の2種類の配置のイメージ

めビームロスを低減できる。我々のグループでは入手可能なカーボンファイバーを燃糸することにより、強度の高いカーボンワイヤーの開発を行っている[6]。さらにカーボンワイヤーによる ESS 試験機を製作し高電圧試験を行う予定である。また、シート状のカーボン薄膜をリボン形状にカットしそれらをセプタム材として使うための検討も今後行う予定である。

- ESS の上流に原子番号の小さい散乱体を置くと、この散乱体にヒットしたビームは主に多重散乱の効果により、この散乱体の下流でビーム密度を減らすことができる。密度が減った位置に ESS のセプタムを設置できれば、全体としてビームロスを大幅に低減できる可能性がある(図6)[7]。散乱体は ESS と違い電場をかける必要がない可能性もあるが、ビーム密度の低減を大きくするために弱い電場をかけることもあり得る。散乱体の材料としてはカーボンワイヤー・リボンが適当であるが、タングステンワイヤー・リボンを用い、通常の ESS で並べるピッチを荒くすることで実効的な原子番号を減らすことも有効と考えられる。今後 MARS や GEANT による詳細なシミュレーションにより検討を進める予定である。

参考文献

- [1] M. Tomizawa, et al., "Improvements of Slow-Extracted Beam from J-PARC Main Ring", Proc. of PASJ 2011, p.73.
- [2] T. Kimura, et al., "The Research of Spill Feedback Control for J-PARC", These Proceedings.
- [3] A. Schnase, et al., "J-PARC MR Horizontal Exciter Test for Transversal Noise Application", Proc. of PASJ 2011, p.338.
- [4] E. Yanaoka, et al., "Improvement of J-PARC MR Slow Extraction Control System", These Proceedings.
- [5] F. Tamura, et al., "Commissioning of Multiharmonic Feedforward System for J-PARC MR", These Proceedings.
- [6] D. Horikawa, et al., "Status of Developing Low-Z Electrostatic septa for High Intensity Proton Beam Extraction", These Proceedings.
- [7] M. Tomizawa, BNL Accelerator Seminar, Sep. 24, 2003