

J-PARC 遅い取り出し運転の現状と今後の計画

PRESENT STATUS AND FUTURE PLANS OF J-PARC SLOW EXTRACTION

富澤正人^{#,A)}, 新垣良次^{A)}, 木村琢郎^{A)}, 下川哲司^{A)}, 村杉茂^{A)}, 岡村勝也^{A)},
白壁義久^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 柳岡栄一^{A)}, 田村 文彦^{B)}, 石 健^{C)}

Masahito Tomizawa^{#,A)}, Yoshitsugu Arakaki^{A)}, Takuro Kimura^{A)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Shigeru Murasugi^{A)},
Katsuya Okamura^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Shi Jian^{C)}

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

^{B)} JAEA/J-PARC Center, ^{C)} IMP/CAS, China

Abstract

Beam powers of 42 kW and 51 kW have been attained for the user operation and beam study by the slow extraction from the J-PARC main ring (MR), respectively. A beam instability during the debunch process has been observed. The instability has been successfully suppressed by a longitudinal dipole oscillation at the injection. The time structure of the extracted beam has been improved by applying a transverse RF and by replacing a spill monitor. Plans toward further high beam power are proposed. Future plans on the slow extraction are also discussed.

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、静電セプトタム(ESS1,2)、セプトタム磁石(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。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。またアーク部にある 48 台の QFN によりチューンを直線的に共鳴線 $Q_x=67/3$ に近づけている。

J-PARC の遅い取り出しでは、取り出しビーム強度と時間構造の一様性が求められる。偏向電磁石(BM)と四重極電磁石(QM)電源の電流リップルは設計時の想定と比較すると大幅に悪く、その影響で取り出しビームの時間構造(スピル)は大きなスパイク構造を持つ。EQ, RQ によるスピル制御[1]のみでは十分な一様性を達成することができず、横方向高周波電場 Transverse RF (TRF) の導入により改善をおこなっている。ダイナミックバンパの手法を含む遅い取り出しスキームにより高い取り出し効率を維持しながら運転を続けてきたが[2]、最近のビーム粒子数の増加にともなって、デバンチ時のビーム不安定性が観測されるようになった。この不安定の抑制対策により高い取り出し効率を保ちながらビーム強度を上げることが可能となった。現在の運転状況とビーム時間構造、ビームパワー向上のための取り組みと今後の計画について報告する。

2. スピルの時間構造の改善

メインリング主電源の現状の電流リップルは、遅い取り出しを行うリングとしては非常に大きく、 dI/I で 10^{-4} 台にとどまっている。6 台の BM 電源、11 台の QM 電源の各々に対して、DCCT による出力電流測定値から水平

[#]masahito.tomizawa@kek.jp

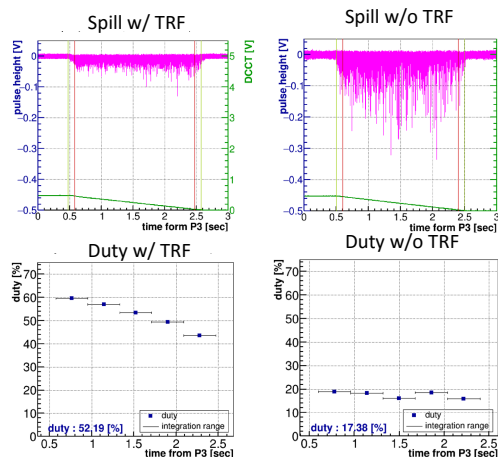


Figure 1: Spill and duty factor with and without TRF.

方向のチューンに焼き直したものの総和は $\pm 2 \times 10^{-3}$ 程度と大きい。理想的なスピルの場合 100%となる量 duty factor[2]で言うと、何もしない状態ではわずか 3%程度である。電源電流リップルによる磁場への影響の低減のため、取り出し時には一部の磁石に巻かれた補正コイルをショートしている。これにより duty factor は数%程度改善された。EQ と RQ によるスピルフィードバックにより duty factor は 17%程度に改善された(Figure 1 右)。さらなる改善のために、ベータatron振動数の少数部分のハーモニクスを持つ横方向高周波電場 Transverse RF (TRF) を導入した。高周波電場はストリップラインキッカーで発生させる[3]。現在の運転例では、TRF は幅 2 KHz をもつ中心周波数 47.47 MHz のスペクトラムを持つ。取り出し中の duty factor の変化をできるだけ少なくするために、周波数を約 42 ステップで 30 Hz ずつずらしている。チューンの少数部分に焼き直すと 0.01 の幅をもち 0.322 から 0.326 まで動かしていることに対応している。さらに

別のストリップラインキッカーで幅 62.5 KHz を持つエッジ周波数 252.5 KHz のスペクトラムを持つ TRF をかけている。この場合、チューンの少数部分では 0.321 から 0.648 をカバーしている。これらの TRF の導入により duty factor は大幅に改善された。さらに前回の RUN において、3 台シリーズにパワーケーブルが接続されているストリップラインキッカー(47.47 MHz)のケーブル長の最適化により、キック力を増やすことが可能となり、1.4 倍のキック力により duty factor は 10%程度改善した。今後はさらにキック力を増やし duty factor の改善を目指す。キック力を増やすと EQ 電流は下がりゼロ電流に近づく。制御を安定にするためにチューンのランピングの調整を行っている。また、ビームラインの真空仕切り膜からの 2 次粒子の強度をプラスチックシンチと光電子増倍管により測定するスピルモニターを新規のものに置き換えることで数%の duty factor の向上が得られている。以上の改善により duty factor は 50%を越えた(Figure 1 左)。

3. ビーム強度依存の振る舞いと対策

J-PARC の遅い取り出しでは、取り出し前に加速空洞の電圧をゼロに落としデバンチさせている。デバンチの過程で、リングのインピーダンスによりビームは運動量を失う。この運動量の低下は取り出し効率を悪化させる。フィードフォワード法による RF 空洞のビームローディング補償により運動量の低下を 0.2%程度に抑えている[4]。

ビーム粒子数を増やす過程において、取り出し直前のビームロスと取り出し時のビームロスの増加が観測されるようになった。周回ビームのエミッタンス増加を伴う横方向のインスタビリティーによるものと推測される。デバンチ時の Chromaticity の補正量を弱くし取り出し時は補正をフルにする調整は効果があった。しかしながら Chromaticity 補正電源の能力から補正量を短い時間で大きく変化させるには制限があることもあり、ビーム強度を増加させた際にこの方法だけでは不十分となった。この不安定性によるビームロスを克服するために、入射時にビームをキャプチャーする RF の位相をずらし、ダイポール振動を起こさせたところ、この不安定性が劇的に抑制されることがわかった。シンクロトロン振動の繰返しによりスミアされ縦方向のエミッタンスが増加したことにより不安定性が抑制されたと解釈される。この手法により加速開始時のビームロスも小さくなった。

この不安定性が起きるとき、静電セプタムの下流に置かれた電子雲モニターでデバンチの途中(RF OFF から 50~100ms)で電子雲が観測されている[5]。また、同時にリング全周に渡り真空が悪化する。さらにデバンチ中のビームの時間構造に高い周波数成分が誘起されている兆候が観測されている。これらの状況から、以下のようなビームロスメカニズムが考えられる。

- デバンチの途中で、局所的に起こるビーム密度増加とリングのインピーダンスにより、ビームの縦方向分布に微細構造が発生する(例えばマイクロウェーブ不安定性)。
- この高周波成分により、例えばマルチパクタリングが発生し真空が悪化する。

- この真空悪化が1つの原因になり e-p 不安定性のような横方向の不安定性が起ころはじめ、ビームロスが発生する。

以上はまだ推測の段階に過ぎず、今後 wall current monitor によるビームの時間構造や、電子雲モニターの詳細データの取得、解析により原因を探る計画である。

現状のダイポール振動によるビーム不安定性対策により、高い取り出し効率を維持したまま、51 kW ビーム強度での遅い取り出し試験に成功している。ダイポール振動のための位相のずれは 50° である。スタディー時には、ターゲットを回避する軌道にビームをずらし、さらにビームサイズを広げることにより、ターゲット損傷のリスクを回避するモードでおこなっている。しかしながら、安全の観点から今回の 51 kW を越えるビームパワーでの遅い取り出しは見送った。ビームを速い取り出しでダンプに捨てることにより、66.3 kW のビームパワーにおいて、デバンチ時の電子雲が抑制されていることを確認した。この試験ではダイポール振動のための位相のずれを 60° にセットした。

さらにビーム強度を増やした場合の今後の対策を以下に示す。

- 入射時のダイポール振動による調整を進める。
- 2 次高調波空洞を導入しミスマッチによりフラットボトムでのエミッタンスを増やす。
- フラットトップで、RF の位相を 180° ずらし運動量を増加させる(phase jump)。この方法は、ずらした後の RF 電圧と電圧を OFF するまでの時間で分布を制御できる。その他の RF マニピュレーションも RF グループにより検討が行われている。
- フラットボトムで 100~200 MHz の高周波によりエミッタンスを増加させる。このための VHF 空洞は現在 RF グループが 2018 年度導入を目標に設計を行っている。

4. SX アポート

ハドロン事故後、ビームによる機器のダメージを回避するために、異常が検出された時に高速で遅い取り出しビームを停止するシステムを導入した。EQ に新たに設けられた高速応答基板により電流を高速で停止し[6]チューンを共鳴から遠ざける。同時に共鳴6極磁石、バンク電磁石の電流を停止する。ターゲットの温度、取り出しビーム強度、遅い取り出しエリアや HD ビームラインのロスモニターの信号等でこのインターロックが働く。このシステムの導入により信頼性のある利用運転が可能となっている。またビームスタディー時には、大きなビームロスが発生する可能性があるが、即ビームを停めることができるため、効率よくスタディーを進める事が可能となっている。

5. 利用運転の現状

現在のターゲット周りの能力によるビーム受け入れ申請値が 50 kW であり、ビームパワーの1時間での積算値が 50 kW・h の 90%となるように PPS の警報が設定されて

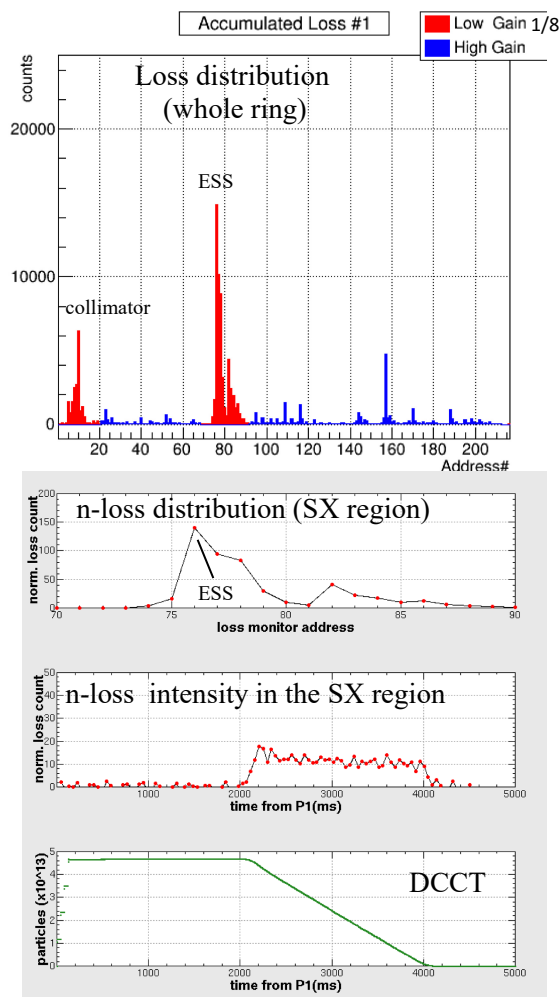


Figure 2: Beam loss distribution, its intensity and DCCT signal.

いる。実際はこの設定値を越えないようにさらにその 90% 程度のビームパワー 41~42 kW で運転を行っている。Figure 2 は運転条件での典型的なビームロス分布、取り出し中の SX 領域のロスの強度、周回ビームの強度の例を示す。スピン時間は約 1.9~2.1 秒で、TRF をスピン制御に加えることにより duty factor は 50% を越えている。

運転停止後、約 4 時間のビームクーリング後の残留線量は、初段静電セプタムの下流が一番強く、表面線量は 10 mSv/h を若干越える。30 cm 離れたところで、約 2 mSv/h 程度である。この線量は決して低いものではないが、このビームパワーでの遅い取り出しをやっている条件のもとでは概して少ないと言え、高効率での取り出しが行われていることを示すものである。

取り出し効率の長時間安定性は非常によい。スピンモニターの信号レベルは徐々に低下してきているが、これは放射線の影響と考えられている。この低下により見かけ上取り出しビーム強度が少なくなったと判断されスピン長が短くなる。スピン長 2.1 秒が 1.8 秒程度まで短くなっ

た時点でスピンモニターの電圧等で調整している。この調整は数日に一度程度の頻度で行っている。

取り出し下流のハドロン(HD)ビームラインでの残留放射線は非常に低く、これは遅い取り出し、HD ビームラインの設計・調整がうまくいっていることを示す。ターゲット直前のスピン内のビームの横方向の位置ずれは、プロファイルのサイズに比較して十分小さくなっている。これは、アクロマティックな取り出しに加えてダイナミックバンブの手法の導入によるものが大きい。スピン中の垂直方向 profile のサイズは若干取り出しが進むにつれて小さくなる傾向がある。この理由は現状では不明であり、まずは取り出しシミュレーションで再現するか確認を行う予定である。

6. チタンを用いた静電セプタムの開発

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の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。我々はチタン静電セプタムの開発・製作を行ってきた。真空容器、セプタムとしてのタングステンリボンを固定するヨーク、電極、フィードスルーのコロナリング、フランジ等にチタン材を用いている (Figure 3)。当初は高電圧試験において様々な問題が発生し、目標電圧を達成することができなかったが、高電圧部のチタン材に化学研磨表面処理を施す等により、運転電圧 104.4 kV に対して安定に 140 kV まで昇圧することに成功している。現在は、ビームカップリングインピーダンスを低減するために、ヨークと真空容器と端板の間にある空間を壁電流がスムーズに流すための RF コンタクトの設計を行っている。ウェーク場の解析には CST studio を用いている。RF コンタクトの導入が完成した後、MR へのインストールを実施する予定である。

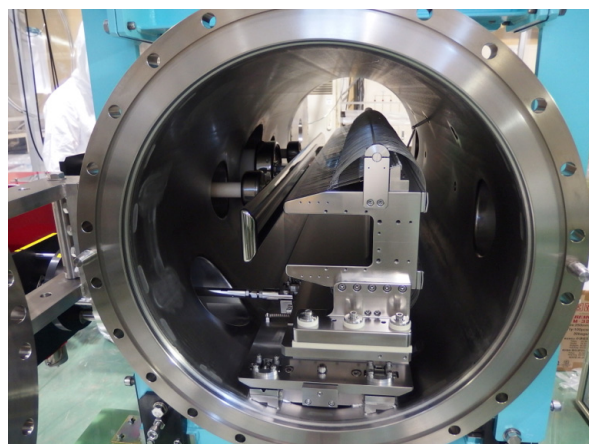


Figure 3: Titanium electric septum.

7. COMET 実験の遅い取り出し

標準理論を越えたミュオンが電子に転換する過程を観測する COMET 実験が J-PARC で計画されている。この実験では、8 GeV に加速された 3~4 バンチのビームをバンチしたまま遅い取り出しをおこない現在建設中の COMET 実験施設に供給する[7]。Phase-I では 3.2 kW, phase-II では 56 kW のビームパワーが必要である。バンチ間には 1 つないしは 2 つの空バケツが存在する。バンチバンチ間とバンチ内のビーム量の比(extinction)は極めて少ない 10^{-9} が必要となる。8 GeV 取り出しを行う場合に、周回ビームのダンピング効果が小さいため取り出しセプタム磁石のアパーチャーが問題になる。Phase-I ではビーム強度が小さいため、RCS の入射ペインティング領域を小さくし、RCS、MR ともエミッタンスグロースを抑えた調整を行う予定である。実際に行われた 8 GeV 加速試験において測定されたプロファイルから求められた rms エミッタンスは 30GeV の設計値と同等であることがわかった。従って現在使用しているセプタム磁石をそのまま使える見通しが得られた[8]。Phase-II のビームサイズでは、現在のセプタム磁石のアパーチャーは不十分であり 30GeV 運転と共存する垂直方向の aperture を大きくしたセプタム磁石の設計をおこなっている[9]。

また、上記の 8 GeV 加速試験においては、MR に入

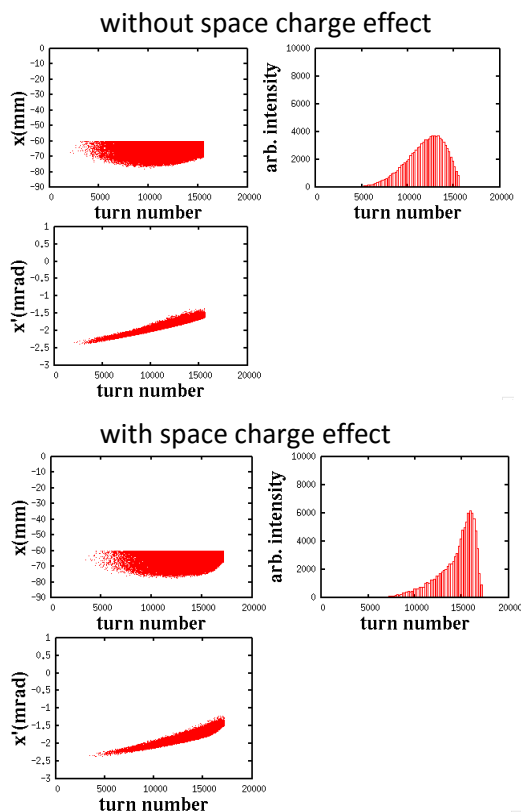


Figure 4: Comparison of COMET phase-II 8 GeV Slow extraction simulations with and without space charge effect.

射するビームの空バケツに存在するビームを入射キッカーのタイミングをずらすことにより入射直後にロスさせる試験を行った。この手法を取り入れることにより、8 GeV ビームを速い取り出しで測定した extinction の値は 10^{-11} 程度が達成されている。キッカーdelay の手法を取り入れた条件で遅い取り出し過程での extinction への寄与の測定は重要であり、今年度末にビーム試験が予定されている。

COMET Phase-II のビーム強度での遅い取り出し過程における空間電荷効果を、KEK の Super Computer にインストールされた PTC/ORBIT コードにより調べた。Phase-II でのバンチあたりの粒子数は 1.13×10^{13} (加速周期 1.02s と仮定) である。縦方向のエミッタンスは、VHF 空洞等によるエミッタンス増化により 12 eV•s を仮定する。rms エミッタンスは 2.6π mm•mrad とした。このエミッタンスは 30GeV 設計エミッタンスより大きいため、バンチ軌道を設計より小さくし、それに対応して、ターンセパレーションを 20mm 以下にするために共鳴6極磁石の強さ $K2=B''L/B\rho l$ は設計値の 55% にしている。2次高調波空洞により期待されるバンチングファクター 0.2 を得る代わりに、ここでは基本波のみとし電圧を 100 kV に下げることによりバンチングファクター 0.18 を得ている。その結果バンチ長は想定している長さより長くなっている。Figure 4 上図はビーム強度が十分に弱い場合、下図は Phase-II のビーム強度での取り出しビームの x, x' 、時間構造分布を示す。両者の比較で x, x' 分布に大きな違いはないが、空間電荷効果のためチューンが共鳴から離れることにより、取り出し開始のタイミングが遅くなっている。今回の条件でのシミュレーションからは、Phase-II のビーム強度で、取り出しビームへの空間電荷効果は無視できないものの、取り出しに深刻な問題を引き起こすことはない判断できる。今後、よりリアルな条件でのシミュレーションによるチェックを行う予定である。

8. ストレッチャーリングの検討

ビーム強度の増強に加えて、ビームを各実験施設に供給する時間を十分に確保することは今後の極めて重

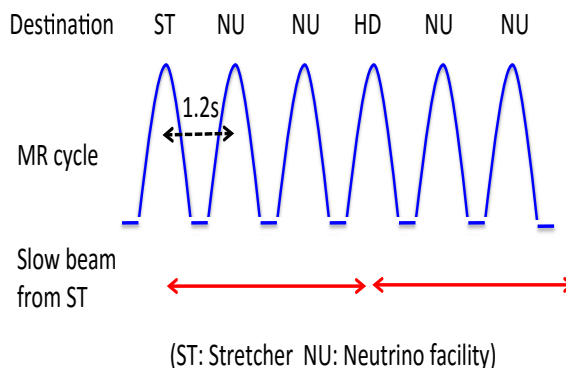


Figure 5: Main Ring and Stretcher mode.

要な課題である。ニュートリノ施設、ハドロン施設の実験に加えて、COMET が稼働すると、さらに事態は深刻になることが予想される。遅い取り出しストレッチャーリングはこの問題を解決する。MR で加速を行い、ストレッチャーリングに入射する。ストレッチャーリングに入射された後すぐに遅い取り出しを開始する。遅い取り出しをおこなっている数秒の間に、MR は入射加速を行いニュートリノにビームを供給できる。Figure 5 に例を示す。計画されている高繰り返し化により、MR サイクルは 1.2 秒 (0.83Hz) が可能となると仮定する。ある MR サイクルでビームをストレッチャーに供給する。ストレッチャーでは MR の 3 サイクル分の時間の中で遅い取り出しを行う。ストレッチャーで遅い取り出しをおこなっている間の MR の 2 サイクルはニュートリノへ供給する。これを繰り返す。これによって、ニュートリノは年間運転時間の実行 2/3 を使うことができる。一方ハドロン施設は、3.6 秒の繰り返して年間運転時間の 100%を使うことができる。元々の年間運転時間の割当が 1/3 とすると、年間積分粒子数は単純に 3 倍に増える。さらに、高繰り返し後の MR で遅い取り出しを行う場合、1.2 秒に現在のフラットトップ長約 2.9 秒を足した 4.1 秒サイクルより、ストレッチャーの繰り返しが 3.6 秒に短くなる分も得をする。従ってハドロン実験施設にとって極めて大きなメリットがある。ストレッチャーリングを加速可能な設計にできれば、将来のシナリオとして、ストレッチャーリングを MR II として、入射路と出射路でビームを振り分けることにより、実効繰り返しを 0.83 Hz から倍にすることができ、ニュートリノ向けビームパワーを倍増するシナリオを描くことも可能である。

2011 年にストレッチャーの議論をハドロングループと行ったが、磁石は常伝導電磁石を想定していたため、MR の上にストレッチャーの磁石を置く場合、スペースが厳しくメンテナンスも困難であり、さらに 30GeV 陽子という大きな $B\rho$ でストレッチャーへのコンパクトなトランスファーラインを作るのは難しいという判断をした。新規のトンネルにストレッチャーを建設する場合は、候補地の選定、建設コストが新たな問題として浮上した。

最近 TRIUMF の小中哲氏と KEK 低温グループの荻津透氏により、超伝導トランスミッションタイプのコンパクトな super-ferric 電磁石を用いたストレッチャーリングを MR トンネル内につくれないかという提案があった。その提案を受け、ビーム光学を中心とした具体的設計を開始した。ストレッチャーリングとトランスファーラインの主な磁石は超伝導電磁石でつくる、周長は MR と同じとする、偏向電磁石は収束を兼ねる combined function 磁石とするという基本方針のもと、リングのラティス、ストレッチャーリングの入射系、トランスファーラインの設計を行っている。ストレッチャーリングを現在の MR トンネルに設置することを真に可能とするためには、現在の機器との干渉、ストレッチャー機器の設置方法、メンテナンスシナリオ、放射線対策等の様々な課題を1つ1つ克服する必要がある。そのためにも、ストレッチャーの具体的検討がまず必要となる。

9. まとめ

2013 年のハドロン事故時に 24 kW であった利用運転でのビームパワーは、高い取り出し効率を維持したまま現在 41~42 kW にアップした。デバンチ時に起こるビーム不安定性の抑制のために導入された入射時の縦方向のダイポール振動がビーム強度アップに重要な役割を果たしている。ビームスピルでは、transverse RF のキック力増強とスピルモニターの置き換えにより、duty factor 50%を越えるまでに改善された。今後のビームパワー増強へむけての対策と今後の計画の検討状況を報告した。ここでは述べなかった散乱体のアイデアについては参考文献[2]を参照されたい。

謝辞

ストリップラインキッカーの調整は、モニターグループの外山毅氏と岡田雅之氏によるものです。RCS, MR のコミッショニンググループによる全般にわたるビーム調整に感謝致します。ハドロングループの森野雄平氏にスピル内の profile データの解析結果の提供をしていただきました。

参考文献

- [1] T. Kimura *et al.*, “Improvement of the Spill Feedback Control System of J-PARC Slow Extraction”, PASJ 2014, p.1279.
- [2] M. Tomizawa *et al.*, “Approach for High Intensity Slow Extraction from J-PARC Main Ring”, Proc. of PASJ 2012, p.80.
- [3] M. Okada *et al.*, “About Influence of a Beam to a DLC Coating”, Proc. of PASJ 2015, p.1347.
- [4] F. Tamura *et al.*, “Multiharmonic rf feedforward system for beam loading compensation in wide-band cavities of a rapid cycling synchrotron”, PRST Acc. Beams 14, 051004(2011).
- [5] B. Yee-rendon *et al.*, “Electron Cloud Study at SX Operation Mode at J-PARC MR”, This Proceeding.
- [6] M. Tomizawa *et al.*, “Malfunction, Cause and Recurrence Prevention Measures of J-PARC Slow Extraction”, Proc. of IPAC 2014, p.3370.
- [7] M. Tomizawa *et al.*, “J-PARC Accelerator Scheme for Muon to Electron Conversion Search”, Proc. of EPAC08, p.367
- [8] M. Tomizawa *et al.*, “Extraction Aperture and 8 GeV-Beam Size for μ -e Conversion Experiment in J-PARC, JPS Conf. Proc. 8, 2015 012019-1-5.
- [9] R. Muto *et al.*, “Design of Large Aperture Septum Magnets for the Slow Extraction of 8 GeV and 30 GeV Proton beam”, This Proceeding.