

J-PARC 遅い取り出しの誤動作ショット

ACCIDENT OF J-PARC SLOW EXTRACTION OPERATION

富澤正人[#], 岡村勝也, 中川秀利
 Masahito Tomizawa[#], Katsuya Okamura, Hidetoshi Nakagawa
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The accident in J-PARC hadron experimental hall was triggered by the target damage due to an unanticipated short beam pulse from J-PARC main ring. The short beam pulse was generated by the rapid current increase, which was caused by malfunction of a spill feedback quadrupole (EQ) power supply system. The simulation with the slow extraction process can explain the short beam pulse generation. An investigation for the malfunction of the EQ power supply system is under way. We have considered measures to prevent recurrence.

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(ハドロン実験施設)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)、バンク磁石(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の高速応答 Q 電磁石 EQ(2 台)、RQ(1 台)が導入されている[1]。

遅い取り出し利用運転中(RUN49)の 2013 年 5 月 23 日 11 時 55 分に EQ と RQ 電磁石電源が機器警報(MPS)で停止した。この際、EQ 電源系の誤動作により、約 5 ミリ秒という短時間にビームが取り出された。その結果ターゲットに深刻な損傷を引き起こし、ハドロン実験施設放射能漏洩事故へ発展した。ここでは、この MPS 発報ショットで起こった事象と、MPS 発報後の対応について詳しく解説する。また、事故後に行った誤動作原因調査の現状報告、再発防止対策について述べる。

2. スピル制御の概要

現状の遅い取り出し運転では、加速周期 6 秒中の 2.93 秒のフラットトップ区間で、ビームは約 2 秒間にわたって連続的に取り出される。取り出しビーム強度をできるだけ一定にするために、高速応答性を持つ Q 磁石、EQ (Extraction Quadrupole) と RQ (Ripple Compensation Quadrupole)を導入している。EQ 磁石はスピル全体の形をできるだけ矩形にする役割を担っている。RQ 磁石は主電磁石電源のリップルによるスピルのスパイク構造を抑制する役割を持つ。EQ のチューン変動量は 340A で 0.03611、RQ は ±200A で ±0.00288 である。

図 2 はスピル制御系の信号の流れを表している。

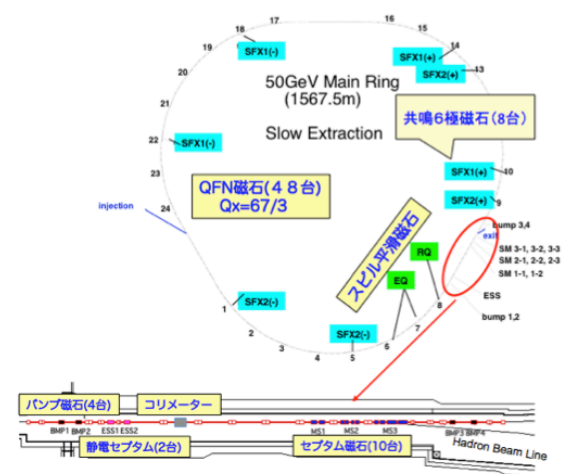


Figure 1: Layout of slow extraction devices.

ターゲットへ向かうビームライン(ハドロンビームライン)に置かれたスピルモニターによりビーム強度を測定し、そのビーム強度信号と DCCT の値もとにスピル制御ユニット内の DSP がリアルタイム(100 kHz)で演算し、EQ 電源と RQ 電源に指令を送る。この指令信号はデジタル信号であり、KEK で開発された VME 規格の GPIO ボードにより一旦光に変換され、再度 GPIO ボードによりデジタル信号に戻され、電源の制御部に送られる。光通信はシリアルであるので GPIO ボードによってパラレルとシリアルの変換が行われる。VME 筐体は GPIO ボードの電源供給のためだけに使用されている。スピル制御ユニットからは別の EQ 指令信号が出力され、この信号はダイナミックバンクの指令電流の演算に使われる[2]。

3. 遅い取り出し運転と性能

誤動作ショットが起こる前の利用運転でのビームパワーは 24 kW、粒子数は 3×10^{13} ppp であった。取

[#] masahito.tomizawa@kek.jp

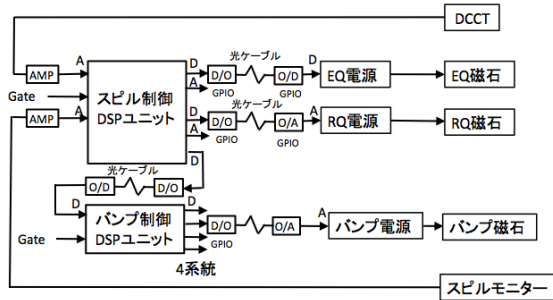


Figure 2: Flow diagram of spill feedback system.

り出し効率はこのビーム強度においても 99.5%を維持しており[3], spill duty factor は約 43%であった[4]。1 年前の利用運転でのビーム強度は 6 kW, spill duty factor は 27%であったので大幅に取り出しビーム性能が向上していたことになる[1]。

4. 誤動作ショットの説明

図 3 (上側) は誤動作ショット直前の正常ショットのスピル制御関係のパターンを記録したスクリーンショット(表示画面のハードコピー)である。横軸は時間(秒)で、ゼロ点はフラットトップ開始 (P3 タイミングと呼ぶ)である。P3 から 0.3 秒後に DSP から EQ に電流を流し始める命令が出力されている。電流がピークに達する付近でビームが出始めている。EQ に流れるピーク電流はこのショットの例では約 87A であるが、ショットによって多少のばらつきがあり、ビーム強度等の条件を変更した際にも変化する

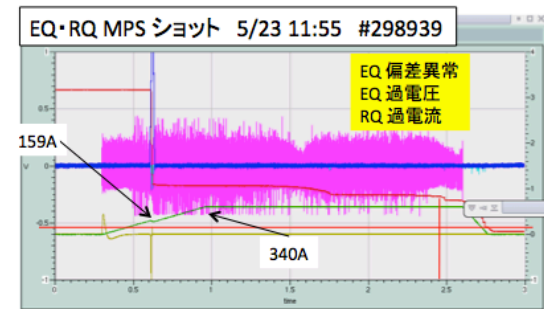
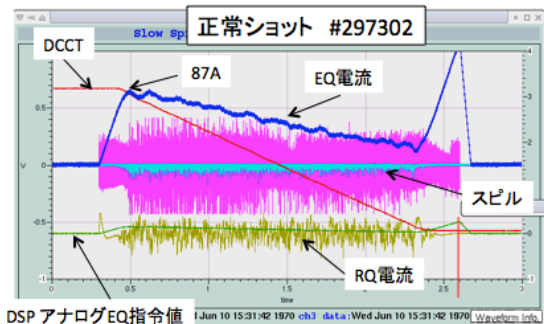


Figure 3: Ordinary (upper) and accidental (lower) spill feedback patterns.

る場合がある。DSP はスピルモニターのビーム強度信号をリアルタイムで読み込み、ビーム強度が一定になるような電流指令値を送っている。RQ にはスピルのスパイク構造を平坦にするために細かい時間構造をもつ電流が流れているのがわかる。

誤動作が起こった時のスクリーンショットが図 3 下図に示されている。P3 から 0.3 秒後に DSP による EQ 電流指令は正常時と同様の命令を送っていた。しかし 0.3 秒間にわたって EQ 電流は全く流れていない。DSP はビームが出ないため、さらに電流を流す指令を送った。通常の最大指令値を上回った 159A まで達した時、突然 EQ 電流が流れた。同時に DCCT の値も急激に減少した。EQ 電源はこの急激な応答により、過電圧で停止した。また、電流偏差異常のステータスが出力された。ただし、偏差異常が DSP からの電流指令にもかかわらず電流が流れなかったことにより発生したのか、それとも急激な電流変化により発生したのかは不明である。一方、RQ はこの急激に増加したビーム強度を減らすために応答したが過電流で停止した。誤動作時発生した EQ の異常な電流パターンや偏差異常は、2009 年のスピル制御導入以後の約 125 万ショットに及ぶビーム取り出し運転で初めての事象である。

図 4 はデータアーカイブに残された DCCT のパターンを時間的に拡大したものである。この結果から誤動作で EQ 電流が流れたタイミングで DCCT が約 5 ミリ秒でリングを回っていたビームの約 2/3 (2×10^{13} protons)のビームがリングからなくなったことを示している。また、今回の誤動作ショットでは、主に遅い取り出し直線部を中心に大きなビームロスが発生していた。

5. 誤動作ショット後の対応

EQ 誤動作からターゲット損傷までの経緯について説明する。この内容に関しては原子力規制庁に提出された法令第 2 報の資料にも詳細な記述がある。

EQ の MPS が発報した後、電源担当者により確認後に電源がリセットされた。さらに加速器 MR シフトにより MPS 発報から約 13 分後に運転が再開された。その後、筆者の一人(法令第 2 報の資料では遅い取り出しシステム担当者と書かれている)が運転記録

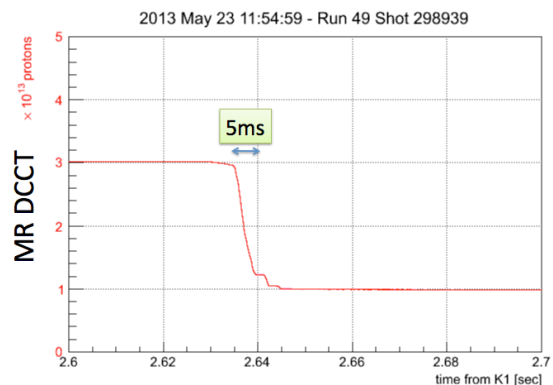


Figure 4: DCCT of accidental shot.

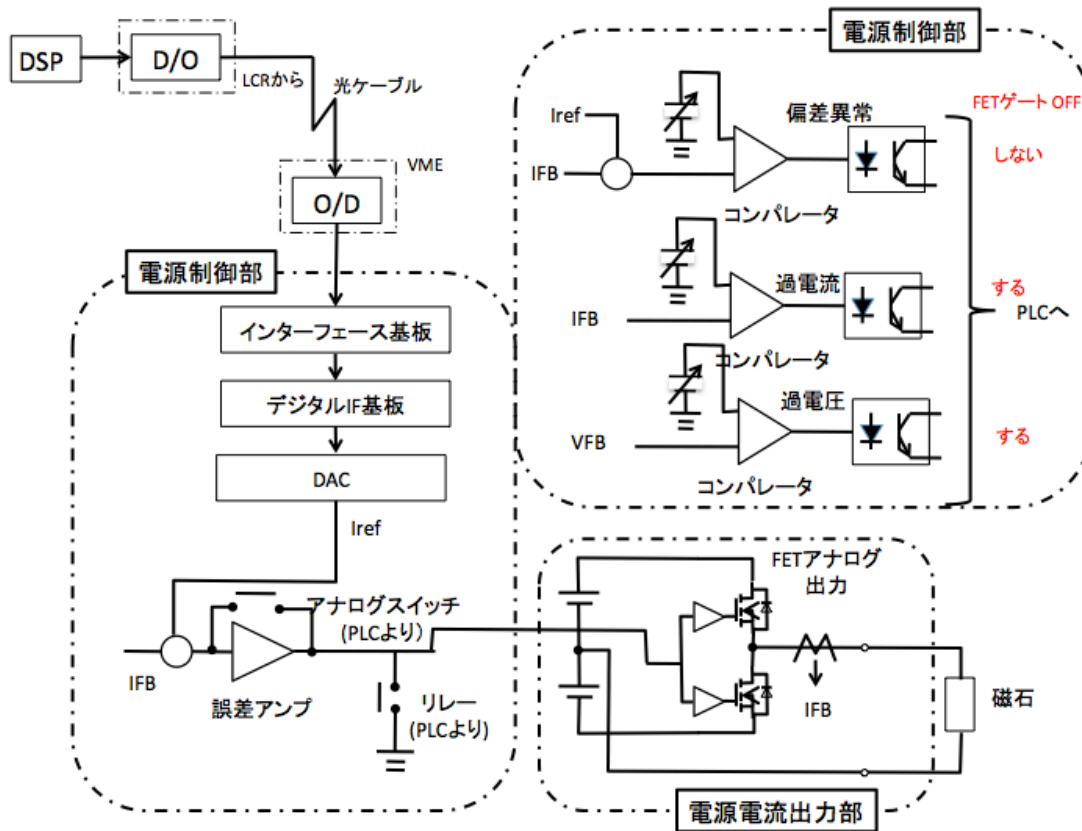


Figure 5: Flow diagram of EQ power supply control.

から実験室の放射線レベル上昇により原因を調査しているという記述を見つけ、ハドロン実験室のシフトに状況を問い合わせた。

その結果は

- EQ MPS 後の運転でターゲットからの2次粒子の収量が減った
- ターゲッティングをやり直した結果収量が回復した
- EQ MPS 後に実験室の放射線レベルが上昇しているようなので原因を調査中

というものであった。EQ MPS ショット以降ビーム軌道が変わったと判断しターゲッティングをやり直したとのことであった。この情報を受け、遅い取り出しシステム担当者が中心となり、EQ MPS 後の運転の取り出し効率や取り出し装置のパラメーターのチェックを行ったが、EQ MPS 前の正常な運転との違いはなく、取り出し軌道は MPS 後も変化していないと判断できた。その後、スクリーンショット等の記録の解析を行った結果、MPS 時に EQ が誤動作して急激に EQ 電流が増加し、そのタイミングで全ビーム量の約 2/3 に相当する量が減少していたことが DCCT のデータからわかった。この DCCT の減少分が仮にターゲットまで到達したとすると、短時間でビームが照射されたことによりターゲットが損傷し、2次粒子の収量が減ったのではないかと疑念が生じた。放射線レベルの上昇は、ターゲッティングのし

直しによるビーム軌道の変化にともなうビームロスが原因と考えた（この放射線レベル上昇の推測はその後間違っていることがわかった）。解析結果の資料とこの疑念をハドロン放射線発生装置責任者に伝えた。ハドロン放射線発生装置責任者はその後、ビーム軌道、ビーム強度の解析を行い、ビーム軌道は変化しておらず DCCT の落ちに対応する量のビームがターゲットに到達していたことから、短時間のビーム照射によりターゲットが損傷している可能性が高いという結論を下した。EQ の誤動作ショットから約7時間半が経過していた。

6. EQ 電源系の調査

図 5 は EQ 電源の制御の流れを示したものである。電源制御部に入力された電流指令デジタル信号は DAC によりアナログ信号に変換された後、誤差アンプによって電源電流出力部の MOSFET のゲート信号が作られる。過電流、過電圧はコンパレータで検出される。コンパレータの信号は光絶縁され PLC に送られる。PLC は FET ゲート信号を ON/OFF するアナログスイッチ、リレーを制御する。一方偏差異常が発生した場合は、PLC は異常状態を認識はするが FET ゲートは OFF しない設計となっている。

電源系の誤動作の原因を探るために、ビーム運転停止後に調査を開始した。その結果の主な物を以下にまとめる。

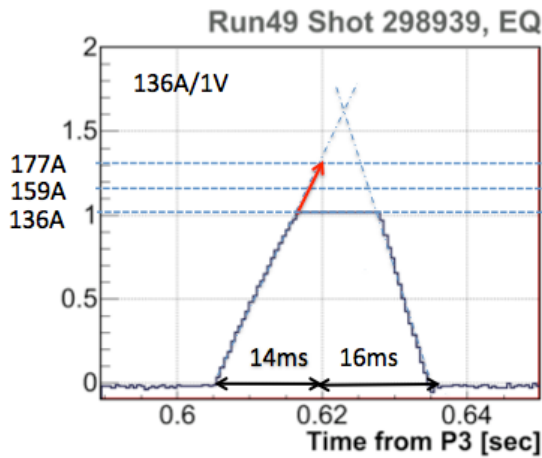


Figure 6: EQ current pattern at accidental shot.

- 目視により電源制御部のデジタル信号を伝送するケーブルのコネクター2カ所でロックが不完全であるところが見つかった。試験通電を行い機械的衝撃、50℃の熱衝撃を与えたが異常は発生しなかった。コネクターを当時の状態から段階的にゆるめて状態を見たが、ロックの不完全によるゆるみ程度では不具合は生じないと判断できた。
- 制御基板の目視、導通チェックを行ったが問題は発見されなかった。
- ステップ状の電流指令を与え電源の応答を測定した。159Aのステップ電流指令を与えた場合、ステップ入力から14ミリ秒で電流が177Aまで直線上に上昇し何回かのハンチング後に過電圧により電流が立ち下がった。ステップ入力から電流がゼロになるまでの時間は約32ミリ秒であった。
- デジタル信号のエラービットは光の送受信の不具合があると生成される。電源側でこのエラービットを模擬的にONにするとステップ電流指令と同様の振る舞いを示した。デジタル信号のストロブ異常でも同様の振る舞いを示した。
- 159Aのピークを持つノコギリ波の電流パターンで長時間通電を行った。現時点で、誤動作時と同じ現象は発生していない。

以上の結果からわかるように、誤動作を起こした根本原因はまだ特定できてない。今後も長時間通電試験等の調査を継続し原因の特定を目指す。

図6は誤動作ショットでWE7111に記録されていたEQ電流のパターンである。残念ながらEQ電流モニター信号が136Aで飽和しておりどこまで電流が流れたかの記録がない。しかし電流の流れ始めから再度電流がゼロになるまでの時間は30ミリ秒であり、159Aのステップ入力による応答はこの誤動作電流パターンに類似している。従って誤動作時には電流は図の赤線で示す177A程度まで流れた

と推測される。

7. シミュレーションとの比較

誤動作時の取り出しビームパルスを遅い取り出しの解析的アプローチに基づくシミュレーションと比較したので、その具体的方法と結果について以下で述べる。

3次共鳴の安定・不安定領域の境界を示すセパトリックスは共鳴6極磁場の条件が固定された場合、水平方向のチューンのみで決まる。チューンを共鳴線に近づけるとセパトリックス内の安定領域が小さくなり、不安定領域に移行した粒子が取り出される。取り出し開始時の粒子の分布は4次元空間のガウス分布を仮定し、rms エミッタンスは $0.75\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ とし 3σ でカットした。この時最大振幅は入射ビームが加速によるダンピングした値にほぼ近い。このエミッタンスではスピルの開始チューンは 22.313 となり実際の取り出し開始チューンに一致する。

誤動作時は短時間でビームが取り出されたため、スパイルモニターの信号は飽和し正しいビーム強度を示していない。ここでは DCCT の時間微分でビーム強度を求めた。誤動作時の EQ 電流 (図6の推測分も含む)、RQ 電流、QFN の電流パターンから求めた水平方向チューンをスパイル開始から EQ 電流が最大になったと推測される時刻まで求めた。図7(上側)のチューンで決まるセパトリックスとビーム分布からシミュレーションで求めたビーム強度が赤線で示されている。取り出しビームの時間幅やピークの大きさは、ほぼ誤動作時と一致している。RQ の役割はこのビームパルスの幅を若干狭くする役割があるが、影響はそれほど大きくない。この結果から、約5msのパルスのビームは、EQ 誤動作による急激な電流変化に対応したチューン変動により遅い取り出し

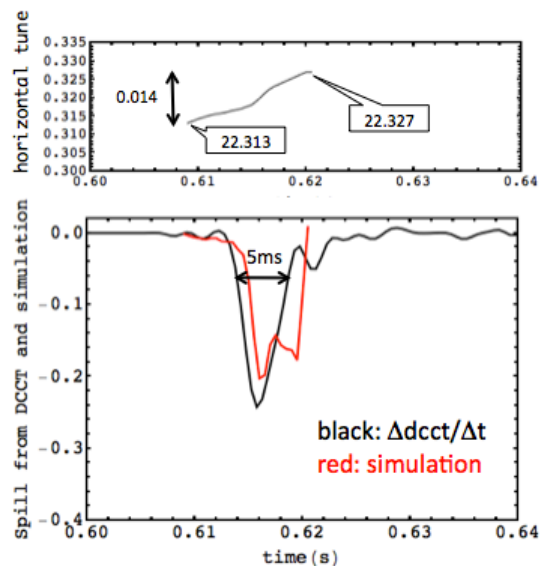


Figure 7: Tune and beam spill.

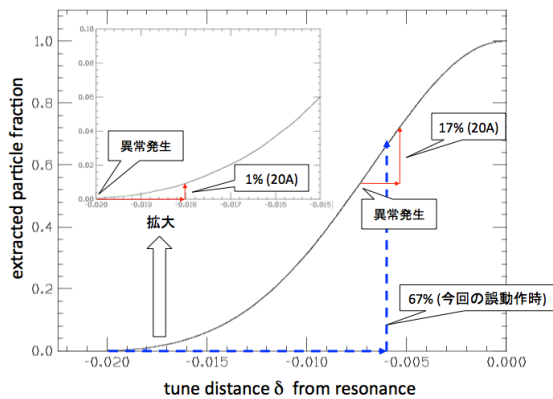


Figure 8: Tune distance from the resonance and extracted beam fraction.

のメカニズムで生成されたと断定できる。

図 8 はチューンの共鳴からの距離の関数として、取り出されるビームの割合を前述のシュミレーションの手法で求めた曲線を示す。EQ 誤動作時はスピルの開始からのチューンの変動量は 0.014 である(図 7)。このチューン変化量で取り出されるビームの割合は約 67%である。異常動作が起こってから 1 ミリ秒で電流を落とすことができると、電流の増加分は約 20A であり、チューンの変動量は 0.002 に抑えられる。取り出し開始時に異常が起こった場合、取り出し量はわずか 1%、図の曲線の傾きが大きいところで起こった場合においても 17%程度となり、ターゲット損傷のリスクを大幅に抑制できることがわかる。

8. 再発防止策

現在までのところ誤動作を引き起こした根本原因は特定できていない。しかしながら同様な現象が EQ 電源系のどこで起きたとしても、今回と同様なターゲット損傷を引き起こさない対策をとることは可能である。現在検討中の対策の主なものを以下にまとめる。

- 7. で述べたように、EQ 電源の異常発生から出力電流停止までの時間を大幅に短縮する。1 ミリ秒以下にすることを旨とする。このために PLC で行っていた FET ゲートの ON/OFF 制御をやめ、代わりに FPGA 等を用いた制御に変更する。
- EQ 電源を停止させる異常項目を追加する。具体的には、電流偏差異常、デジタル信号のエラービット、ストローブ異常である。また外部インターロックとして、DSP の出力電流と電源に流れた電流の偏差異常を検出し発報させる。
- 過電流の設定レベルを現在の 340A から 120A 程度まで下げる。

EQ 誤動作以外の様々なリスクも含めた以下の対策案も議論されている。

- 加速器のスタディー中はリスクが増大するため、ターゲットにビームがあたらないような回避策

をとる。

- 加速器側で、ハドロンビームラインの軌道、ターゲットに到達したビーム強度、ターゲットで発生した 2 次粒子の収量、ターゲット温度、各種放射線モニター値を随時チェックできるようにする。
- 異常の可能性がある時の判断体制の見直し
さらに異常が起こった際には、即座にビームをダンプに廃棄するビームアポルトは、どのような異常が起こった場合でも対応可能な最も有効な対策である。J-PARC MR においては、いくつかの解決すべき問題はあつたものの、ぜひ早期に実現させたい。

9. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設の事故につながったターゲット損傷は、メインリングからの大強度取り出しビームが短い時間でターゲットに照射されたことによって引き起こされた。取りだしビーム強度を平滑化するための EQ 電磁石電源系の誤動作による急激な電流増加によるチューン変動によって、遅い取り出しメカニズムによって、ビームがこのように短い時間で取り出されることが、シュミレーションでも確かめられた。事故後に行われた電流指令を含む EQ 電源系の調査が行われたが、原因の特定に至っていない。今後も引き続き調査を行う予定である。主な再発防止策は、異常を検出し停止する項目を追加し、異常時に高速で電流を立ち下げる制御を新たに導入することである。この対策によりターゲット損傷のリスクを大幅に抑制することが可能である。今回の誤動作とその波及効果を教訓とし、安全な取り出しシステムを構築し、取り出しビームの性能向上を目指す。

参考文献

- [1] M. Tomizawa, et al., "Approach for High Intensity Slow Extraction from J-PARC Main Ring", Proceedings of PASJ 2012, p.80.
- [2] E. Yanaoka, et al., "Improvement of J-PARC MR Slow Extraction Dynamic Bump Control System", Proceedings of PASJ 2012, p.528.
- [3] F.Tamura, et al., "Momentum Loss During Slow Extraction in the J-PARC MR and Its Countermeasures", This Proceedings.
- [4] T.Kimura, et al., "The Research of Spill Structure for J-PARC Slow Extraction", This Proceedings.