

J-PARC メインリング直線部 4 極磁石停止による静電セプタム重故障と復旧 ELECTROSTATIC SEPTUM ACCIDENT AND RECOVERY BY A QUADRUPOLE POWER SUPPLY TRIP IN THE STRAIGHT SECTIONS

富澤正人 ^{*A)}, 新垣 良次 ^{A)}, 岡村 勝也 ^{A)}, 木村 琢郎 ^{A)}, 栗本 佳典 ^{A)}, 小松 雄哉 ^{A)}, 白壁 義久 ^{A)},
武藤 亮太郎 ^{A)}, 村杉 茂 ^{A)}, 柳岡 栄一 ^{A)}, 吉井 正人 ^{A)}, 松村 秋彦 ^{B)}

Masahito Tomizawa ^{*A)}, Yoshitsugu Arakaki ^{A)}, Katsuya Okamura ^{A)}, Takuro Kimura ^{A)}, Yoshinori Kurimoto ^{A)},
Yusuke Komatsu ^{A)}, Yoshihisa Shirakabe ^{A)}, Ryotaro Muto ^{A)}, Shigeru Murasugi ^{A)}, Eiichi Yanaoka ^{A)},
Masahito Yoshii ^{A)}, Akihiko Matsumura ^{B)}

^{A)}KEK/J-PARC Center,

^{B)}Nippon Advanced Technology (NAT)

Abstract

In 60 kW-slow extraction operation of J-PARC main ring, a vacuum circuit breaker (VCB) connected to AC line for power supplies of quadrupole magnets in the straight sections was opened. The septum ribbons for the first electrostatic septum (ESS1) were broken by a bump orbit distortion caused by the quadrupole field decrease. The troubled ESS has been successfully replaced to a spare ESS, and the slow extraction operation has been resumed adopting a countermeasure to shorten the current fall time of the bump currents. In the 2nd VCB open incident happened in the resumed operation, the countermeasure well worked and the replaced ESS could be perfectly protected.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR) では、3 次共鳴を用いた遅い取り出し方法により、3 GeV から 30 GeV まで加速された陽子ビームを約 2 秒間かけて、素粒子・原子核実験を目的としたハドロン実験施設に供給している [1,2]。2009 年 1 月に MR において 30 GeV の陽子ビームの遅い取り出しに初めて成功して以来、2021 年 2 月の段階で、5.2 秒サイクルにおける粒子数は 6.5×10^{13} 、対応するビームパワーは 60 kW に到達した。MR における大強度ビームの遅い取り出し運転においては、遅い取り出し過程で起こるビームロスやデバンチ時のビーム不安定性の抑制に加えて、各種機器のトリップが起因となって発生する異常ビームによる機器の損傷の回避が大きな課題となってきた [1]。遅い取り出し運転において、機器損傷を誘発する異常ビームは 2 種類に分類される。1 つは通常より短時間で多くのビームが取り出されてしまうことである。この典型例は、2013 年に起こったハドロン実験施設の放射能漏洩事故の発端となった事象である。この時スピルの時間構造を一様にするスピン制御電磁石電源 (EQ 電源) の電流指令系統の不具合により、5 ミリ秒という短い間に、多量のビームが金ターゲットまで到達し、金ターゲットの一部が蒸発拡散した。この事故を受け、MR 側では再発防止策として、EQ 電源の電流偏差異常を高速で検知し停止するシステムを導入した [3]。運転再開後、様々なインターロック信号により遅い取り出しを停止するシステム (SX アポート) を導入した [1,4]。これらの対策は有効に働き、その後のビーム強度アップに貢献した。もう一つの危険な異常ビームは、粒

子密度が高い周回ビームが静電・磁石セプタム装置のセプタム面に当たることである。2017 年に行なったバンプ軌道調整中に、水平方向のビーム不安定性によりビーム振動が増大しビームが静電セプタムのセプタム面にあたり、タングステン・レニウム合金のセプタムリボンが破断し一部が電極に接触した。chromaticity 設定値が微妙に不安定性を誘発し易い値にセットされていたのが原因と推測されている。この時は下流側静電セプタム (ESS2) を故障した上流側静電セプタム (ESS1) の位置に移動し運転再開に漕ぎ着けた。そのあとの夏季メンテ期間に、移動した静電セプタムは元の位置に戻し、スペアの静電セプタムを上流位置にインストールして 2 台による運転を再開した。

利用運転中の 2021 年 2 月 28 日に、遅い取り出し中大きなビームロスが起こり、上流側静電セプタム (ESS1) のセプタムリボンの切断と電極短絡が発生し運転が停止した。同時に直線部の四重極電磁石の 7 台の電源と 3 台の chromaticity 補正用電源の入力ラインにある真空遮断器 (VCB) が原因不明のオープン状態になったことが判明した。この報告では、VCB オープンによりビームがどのような影響を受けリボンの切断に至ったかの解析結果を述べる。また再発防止策、静電セプタム復旧作業と運転再開後に再度発生した VCB オープン事象について報告する。

2. 遅い取り出し運転と SX アポート

MR の遅い取り出しは $Q_x = 67/3$ の 3 次共鳴を使っている。この共鳴を励起する 2 ファミリーからなる 8 台の共鳴六極電磁石とスピルフィードバック四極電磁石 (EQ, RQ) はリングのアーク部に配置されている。一方、2 台の静電セプタム (ESS1, ESS2)、低・中・高磁場セプタム磁石、4 台のバンプ磁石は遅い取

* masahito.tomizawa@kek.jp

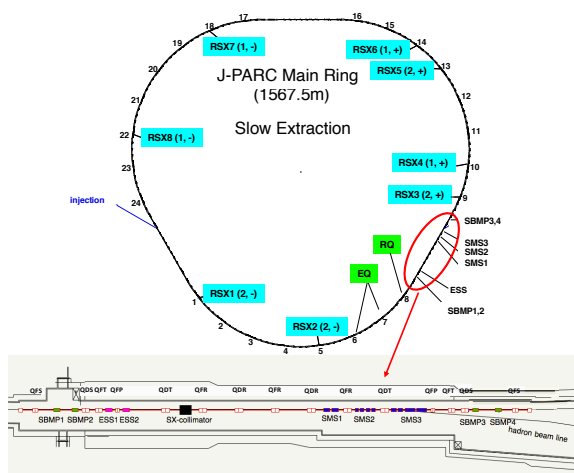


Figure 1: Slow extraction devices in MR.

り出し直線部に配置されている (Fig. 1)。バンプ軌道は ESS1 入口で中心軌道がセプタム位置 -60 mm に対して、 -35 mm となるように作られる。マイナス方向はリング内側を示す。バンプ軌道の角度は取り出し効率が最大となるように、セパトロリックスの縮小に応じて取り出し中にシフトさせている (Dynamic Bump と呼ぶ [5])。2020 年 12 月とその翌月に実施されたビーム調整において、Skew-四極磁石によるリニアカップリング補正、デバランチ時の不安定性抑制により、取り出し効率 99.5% を維持したまま、ビームパワーは 5.2 秒サイクル運転で 50 kW から 60 kW にアップすることができた。

MR の遅い取り出しにおいては、機器保護 (MPS) の観点から、遅い取り出し中に直ちに取り出しを停止し、フラットトップの終了時に速い取り出し直線部のキッカーで残ったビームをアポートダンプに廃棄する SX アポートと言われる保護システムを導入している [1,4]。主電磁石電源、RF 機器、遅い取り

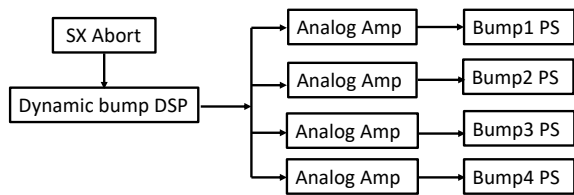


Figure 2: Bump control and current patterns at SX Abort.

出し機器、ビームロス増加、取り出しビームラインの異常等の検知により、高速でバンプ磁石、共鳴六極電磁石、EQ 電磁石電源の電流を停止させている。Dynamic Bump を行うためバンプ DSP はスビル制御 DSP から EQ 電流値をリアルタイムで受け取っているが、SX アポート信号を検知したとき、閉軌道の条件を保つために、各々の電流を 4 台の電流比を保ちながら 200 msec かけて立下げていた (Fig. 2)。SX アポートは現在の高強度遅い取り出し運転において危機保護のために必須のシステムとして運用されている。

3. VCB トリップによる ESS 故障と解析

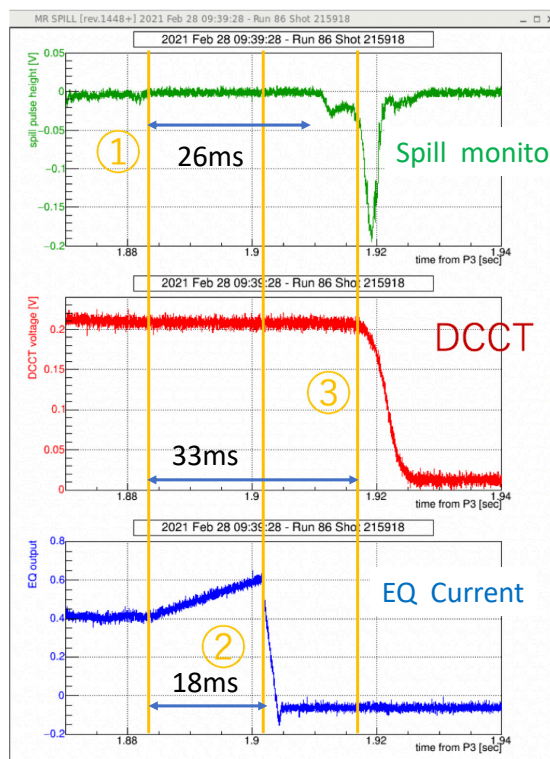


Figure 3: Spill, DCCT and EQ current patterns at the VCB trip.

遅い取り出し利用運転中の 2021 年 2 月 28 日の取り出し中に大きなビームロスが発生し、MPS によりビームは停止した。静電セプタム (ESS1) の高電圧 (104.4 kV) が電流増加により印加できない状態となり、セプタムリボンがなんらかの原因で切断し高電圧電極に接触していることが確実となった。同時に直線部の四極電磁石電源 7 台と chromaticity 補正六極電磁石電源 3 台の入力ラインに設置されている真空遮断機 (VCB) が何らかの原因でオープンになったことがわかった。Figure 3 はその時のスビルモニター、DCCT、EQ 電流信号である。①のタイミングで、直線部四極電磁石電源の電流が下がり始め、水平方向のチューンが共鳴線から離れたため EQ 電流がビームを出す方向に動いた。②のタイミングでは、SX アポートが働き EQ 電源も停止した。③のタイミング

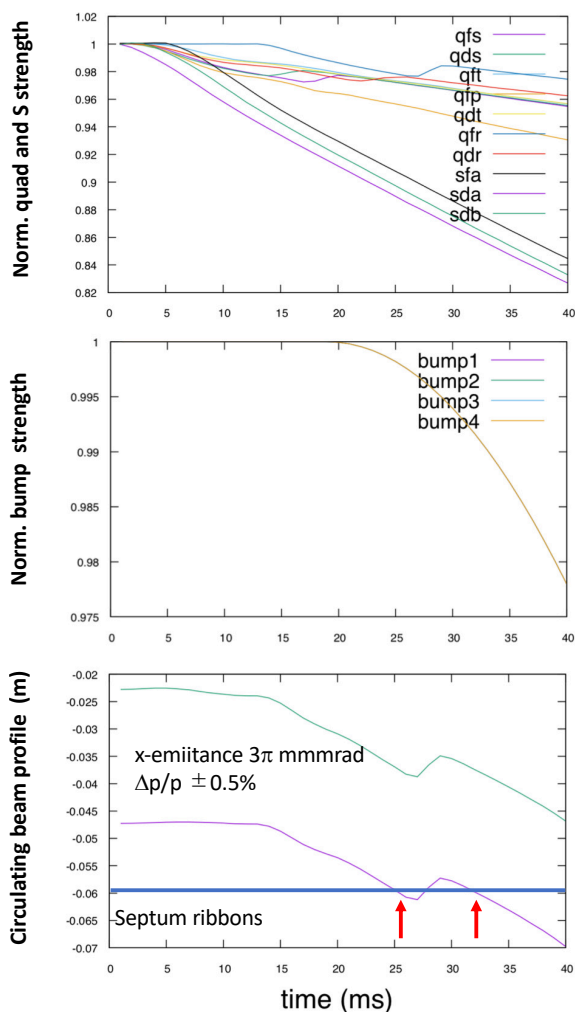


Figure 4: Quadrupole, bump fall patterns and beam profile at ESS1.

で大きなビームロスが発生した。その際スピルモニターに信号パルスが発生している。直線部四極電磁石電源の電流低下発生からビームロスが発生するまでの時間は約 33 ミリ秒、SX アポート発生からビームロスが発生するまでの時間は約 15 ミリ秒であった。Figure 4 は直線部の四極電磁石電源 7 台、chromaticity 補正六極電磁石電源 3 台、そして 4 台のバンプ電源の電流低下パターンとそれらのパターンから計算した ESS1 位置での周回ビームのプロファイルである。横軸の原点は四極電磁石電源と chromaticity 補正六極電磁石電源の電流低下開始タイミングである。大きなビームロスが発生したタイミングでは、SX アポートによるバンプ電流低下はわずか 1% だったことがわかる。バンプ軌道により周回ビーム中心は、ESS1 のセプタムリボン位置 -60 mm に対して -35 mm の設計位置にある。しかし、Figure 4 下図の計算からわかりように、直線部の四極電磁石電流の低下によりバンプ軌道が ESS1 のセプタムリボン側に寄り、一部の周回ビームがセプタムリボンに衝突することがわかる。取り出し前のビーム粒子数 $6.5 \times 10^{13} \text{ ppp}$ に対して、DCCT のビームロスによる減少分は取り出し開

始時との比較で約 31% と求まる。そのすべてが ESS1 リボンに衝突したと仮定したときのセプタムリボンの発熱の時間変化をプロットしたのが Figure 5 である。実際には温度上昇の途中で融点を超えるためその時点でリボンが切断する。

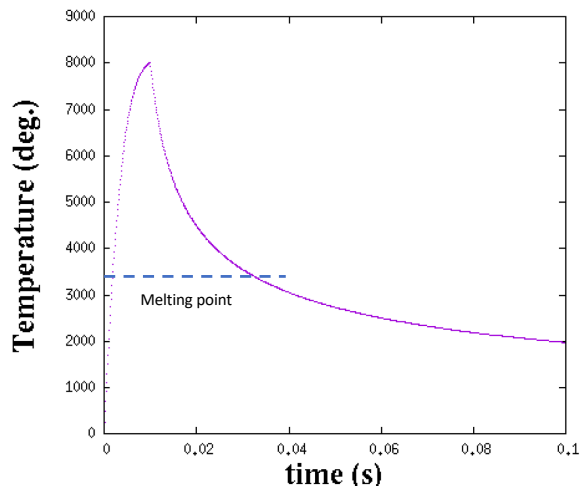


Figure 5: Simulated temperature rise of ESS ribbon.

4. 静電セプタム復旧

2月28日に発生した ESS1 の故障により遅い取り出し運転は中断したが、3月4日に故障した ESS1 をビームラインから取り外し、その場所に保管されていた直管を取り付けた。3月8日から同20日までは速い取り出しによるニュートリノ運転が行われた。スペアの ESS は故障した ESS と同じくチェンバーはチタン製であり、リニアック棟クライストロンギャラリーで既に 110 kV までの高電圧印加試験を終了していた [6]。ただし、このスペア ESS は、ESS2 位置用を想定していたために、セプタム位置とそれに伴う高電圧電極位置の変更と、カップリングインピーダンス対策の RF コンタクトを ESS1 位置用に交換する作業を新たに行なった。インストール時に必要となる ESS チェンバーの上下流端板に取り付けるチタン製単管は、長い間大気で放置されていたため、RCS の真空グループの協力により真空炉において約 750 度で 10 時間保持するベーキングを行なった。平行してクライストロンギャラリーで健全性確認のため 104 kV までの高電圧印加試験を行なった。過去に実施した ESS インストール時は電極をはずして輸送し、MR トンネル内インストール場所付近で再度電極を取り付ける作業を行っていた。この方法は電極の現場での再取り付け取り付けによる高電圧性能に関するリスクがある。今回の故障前に電極をはずさないで輸送する試験を実施しており、高電圧特性は輸送前と変わらないことが確かめられていたため、3月20日に行なった輸送でも電極をはずさないで行なった。輸送試験時と同様にクライストロンギャラリーから MR の搬入棟までの移動は、総輪アサス車を使い、MR トンネル内は ESS 搬送台車に載せたまま人力によって慎重に移動させた。Figure 6

はインストール直後のチタン製静電セプタムチェンバーの写真である。真空引きと絶縁液フロリナート充填・泡抜き作業を経て、3月24日に高電圧コンディショニングを開始し短時間で無事106 kVまで昇圧することができた。

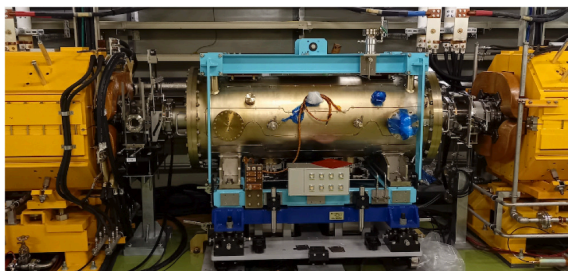


Figure 6: Installed ESS1 photo.

5. 再発防止策と運転再開

VCBのオープン動作が起こった理由はその当時不明であった。その状況で運転再開を行うためには、再度VCBのオープン動作が発生してもESSを守る対策が必要であった。その対策とし、直線部の四極電磁石電流の低下によってバンブ軌道がセプタムリボンに近づくことを避けるために、SXアポート発生によるバンブ電流の比例たち下げ時間を過電圧リミットが起こらない範囲で短くすることにした。最終的にVCBオープン事象以前の立ち下がり時間200ミリ秒[7]を54ミリ秒まで短くすることができた(Fig. 7)。また、連続通電試験で過電圧トリップが発生しないことを確かめた。3月27日からビーム運転を開始したが、まずバンブ電流の54ミリ秒のたち下げ中に、バンブ軌道と閉軌道が想定通りになっていることを確かめた。インストールしたESS1のビームにより誘発される放電の頻発をできるだけ避けるため、ビーム強度を徐々に上げ、ESS1の電圧は取り出し効率を悪化させない範囲で最終的に70~75 kVまで下げて運転した。

3月29日の9.4 kWでの遅い取り出し運転中にVCBオープントリップが再発した。今回のVCBオープントリップでは、幸いESSの故障は発生しなかった。Figure 8の解析からわかるように、今回のトリップでは、バンブ電流が早くたち下がったために直線部の四極電磁石電流の低下によるバンブ軌道のセプタムリボン側へのシフトは小さく抑えられ、周回ビームが直接セプタムリボンに衝突することが避けられたことがわかる。今回も大きなビームロスが発生したが、これは直線部の四極電磁石電流の低下によって水平方向のチューンが22の整数共鳴を横切るときに発生したもので(Fig. 8上図の約45ミリ秒のタイミング)、ESS以外の安全な場所でビームロスが発生したものである。さらなる対策として、VCBオープントリップ信号を高速でSXアポートに取り込む対策の動作確認後に運転は当日再開し、4月7日にビームパワー45 kWでE03実験を無事終了することができた。

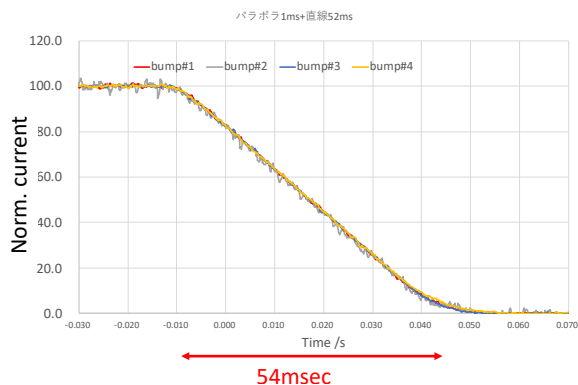


Figure 7: 54 msec. bump fall pattern.

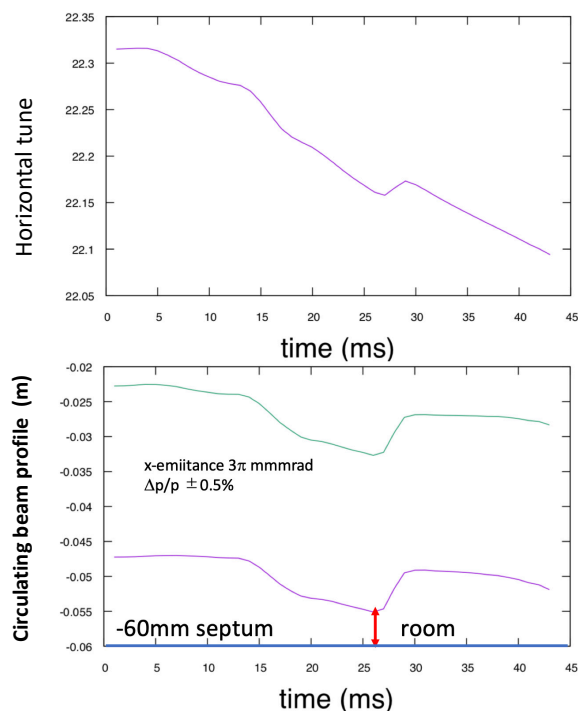


Figure 8: Horizontal tune and circulating beam profile at ESS1.

6. まとめ

J-PARC MRの利用運転中であった2021年2月28日に、遅い取り出し中に大きなビームロスが起こり、上流側静電セプタム(ESS1)のセプタムリボンの切断と電極短絡が発生し運転を停止した。直線部の四重電磁石の7台の電源の入力ラインにある真空遮断器(VCB)が原因不明のオープン状態になり、四重電磁石電流の低下によりバンブ軌道がESS1側にシフトし、周回ビームがESS1のセプタムリボンに衝突することにより故障が発生したことが解析の結果わかった。このバンブ軌道のシフト量を小さくするために、同じトリップが発生したときに、バンブ電流たち下げを200ミリ秒から54ミリ秒に短縮する対策を施した。さらにスベアの静電セプタム装置をインストールし運転再開することができた。運転

再開後に発生した 2 回目の VCB オープントリップ時には、バンプ立ち下がり時間短縮対策により、静電セプタムの損傷を回避できた。6 月 29 日のビームパワー 64 kW での遅い取り出し運転中に、3 回目の VCB オープントリップが発生した。上述の再発防止策により静電セプタムの損傷は再度免れたが、22 kV を降圧するトランスの油圧異常信号により VCB がオープンになったことが判明し、予定されていた約 18 時間の運転時間を残して運転は中止された。

参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, “Status and Beam Power Ramp-Up Plans of the Slow Extraction Operation at J-Parc Main Ring”, in *Proc. HB’18*, Daejeon, Korea, June 2018, pp. 347–351.
- [2] R. Muto *et al.*, “Current status of slow extraction from J-PARC Main Ring”, *Journal of Physics Conference Series*, 2019, 1350:012105.
- [3] M. Tomizawa, T. Kimura, H. Nakagawa, and K. Okamura, “Malfunction, Cause and Recurrence Prevention Measures of J-PARC Slow Extraction”, in *Proc. IPAC’14*, Dresden, Germany, June 2014, pp. 3370–3372.
- [4] T. Kimura *et al.*, “J-PARC MR の MPS 装置の異常発生と対策”, *Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 770-773.
- [5] M. Tomizawa *et al.*, “Slow extraction from the J-PARC main ring using a dynamic bump”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 902, 2018, pp.51-61.
- [6] Y. Arakaki *et al.*, “J-PARC MR チタン静電セプタム”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 1173-1175.
- [7] E. Yanaoka *et al.*, “バンプ電磁石電源のトリップ追従システムの開発”, *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1158-1159.