

J-PARC MR アポートラインにおけるマルチリボンプロファイルモニタの製作と性能評価

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF MULTI-RIBBON PROFILE MONITOR AT J-PARC MR ABORT LINE

佐藤究^{*A)}、橋本義徳^{B)}、魚田雅彦^{B)}、佐藤洋一^{B)}、五十嵐進^{B)}、
酒井浩志^{C)}、遠藤正之^{C)}、藤山浩樹^{C)}、小関忠^{A,B)}、濱田英太郎^{B)}

Kiwamu Sato^{*A)}, Yoshinori Hashimoto^{B)}, Masahiko Uota^{B)}, Yoichi Sato^{B)}, Susumu Igarashi^{B)},
Hiroshi Sakai^{C)}, Masayuki Endo^{C)}, Hiroki Fujiyama^{C)}, Tadashi Koseki^{A,B)}, Eitaro Hamada^{B)}

^{A)}Department of Physics, the University of Tokyo

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

^{C)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Main Ring (MR), the world-class high intensity proton synchrotron, accelerates proton beam from 3 GeV to 30 GeV. The MR has the upgrade plan to increase the beam power up to 1.3 MW. For the understand of high-intensity beam dynamics, emittance measurement between 3 and 30 GeV is planned by a newly installed multi-ribbon profile monitor (MRPM) in abort beam line, one of extracted transport lines. The abort beam line transports the extracted beam from MR to a 7.5 kW beam dump. Taking the beam profile data by the MRPM with sweeping quadrupole field strength, beam emittance will be obtained by the Q-scanning method. The first high-intensity beam study was performed in the spring of 2019. In this paper we report the status of development and performance evaluation of the MRPM.

1. はじめに

J-PARC 主リング (MR) は J-PARC の加速器群の最下流に位置し、入射される 3 GeV 陽子ビームを 30 GeV に加速したのち二つの取り出しモード：ニュートリノビームラインには速い取り出し (FX)、またハドロンビームラインには遅い取り出し (SX) で運転を行っている。ビーム強度を特徴付けるパルスあたりの陽子数 (ppp) は FX において 2.6×10^{14} を記録しており [1]、これは世界の陽子シンクロトロンのうち最大である。現在 MR では 750 kW, 1.3 MW への段階的なアップグレードを予定している。MR のデザイン値である 750 kW へは MR 繰り返し時間を現行の 2.48 s から 1.32 s に短縮することで達成可能で、2021 年度のシャットダウン期間に予定されている。また 1.3 MW へは繰り返し速度を 1.32 s から 1.16 s にさらに短縮した上で、陽子数を 2.6×10^{14} ppp から 3.3×10^{14} ppp へと約 27% のに増強することで達成する予定である。アップグレードに際したコミッションングにおいて、特に MR のビームダイナミクスを議論するためにエミッタンス測定が重要である。現在 3 GeV 入射直後及び 30 GeV 取り出し直後に測定可能であるもの一方で、3-30 GeV の MR 周回中もしくは加速中のエミッタンス精密測定は、大強度ビームとの相互作用の繰り返しによるビームロスを引き起こすために実現していない。現在、この MR 周回中のエミッタンス測定を行うため、任意のタイミングで取り出しが可能なビームダンプへの輸送ライン

(アポートライン) において、四重極電磁石とプロファイルモニタを用いた Q-scan 法によるエミッタンス測定システムを構築している。2018 年からマルチリボンプロファイルモニタ (MRPM) の製作を行い、2019 年 3 月末に加速器へのインストールが完了した。さらに 2019 年 4 月に大強度試験を行いデータ測定の健全性を確認し [2]、この評価が必要とされている。

2. 装置開発とインストール

2.1 MR アポートライン

アポートラインは FX キッカー電磁石と FX セプタム電磁石から成る FX システムから MR ビームダンプ (アポートダンプ) への輸送ラインであり、MR を周回するビームを安全に取り出し輸送する直線路である。このアポートラインに MRPM をインストールした [2]。Figure 1 はその概略図である。FX キッカー・セプタムによって曲げられたビームは、25 m 下流の四重極電磁石ダブレット (Abort Q) を通り、その 2 m 下流の MRPM、さらに 60 m 下流に位置するアポートダンプで吸収される。キッカーは ~1000 ns かけて立ち上げ、~5000 ns でフラットトップが励磁可能であり、立ち上げを任意の時間に設定することができ、任意の運動量で MR 周回ビームの取り出しが可能である。また Abort Q の電源で極性の変更が可能であり、Q-scan の範囲を確保することができる。これらの機器を用いた single passing の測定は MR およびニュートリノビームライン、ハドロンビームラインへの影響はないため、各利用運転調整やスタディ

* kiwamust@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

と同時に用いることができる。

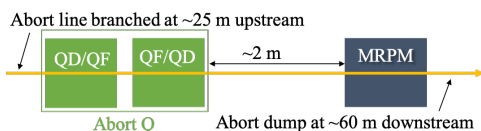


Figure 1: Layout sketch of measurement system.

2.2 SAD を用いたビーム光学計算

加速器計算ソフトウェア SAD [3] を用いてアポトラインのモデル化と光学計算によるビーム予測を行った。ラティスマデルは FX システムが位置する MR 直線部からアポトダンプまでを想定した。このラティス入射条件及び四重極電磁石のパラメータは MR の利用運転条件として、FX tune(21.35, 21.43), SX tune(22.30, 20.78) の設定を用いた。FX システムにおけるキッカー電磁石 (KM1-5) 及びセプタム電磁石 (SM1-2, SM30-31, SM32-33) のパラメータは FX, SX の 30GeV 設定を反映させた。四重極電磁石の位置オフセットに影響する閉軌道からの変位 (COD) を考慮し、直線部のステアリング電磁石を設定した。COD は特に SX 運転で最大 6 mm の local bump を導入しているため無視できず、四重極の電磁石のオフセットによるビーム軌道の変更は大きい。Abort Q の極性は QD,QF、パラメータは最大の 600 A の設定とした。本モデルによる SX 設定 30 GeV ビームに対する $\sqrt{\beta}, \eta$ の結果を Fig. 2 に示す。青い箱で示されている KM, SM の双極成分により水平 (H) 方向の η が変更させていることがわかる。緑色の箱は四重極電磁石の位置であり、運動量 30 GeV のビームに対して Abort Q による betatron 振動への寄与は大きくないことがわかる。

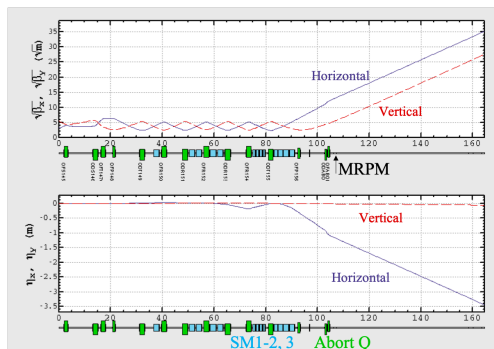


Figure 2: Calculated $\sqrt{\beta}, \eta$ for 30 GeV beam in SX setting.

本モデルを用いて計算した Betatron 軌道と、FX システム及びアポトラインのアパチャーとの比較を行った。ここで運動量分散は MR の許容値 $dp/p = 0.003$ とし、 2σ エミッタンスを 3, 12, 16 π mm-mrad と SXMRPM における測定値から MR 許容値までの 3

つの条件で行なった。その H 方向の結果を Fig. 3 に示す。横軸は入射位置からの MR 直線方向の変位、縦軸はその直線と垂直な水平方向の変位であり正方向はビーム進行方向から右側を意味している。H 方向では、図に示すように (a)FX 設定でエミッタンス $12\pi, 16\pi$ のとき SM1-2 の上流で交わっていることがわかった。(b)SX 設定ではそのような交わりは見られず、MRPM まで 16π 以下のビームが通ることがわかった。一方垂直 (V) 方向の軌道は MRPM までアパチャーと交わることがなかった。

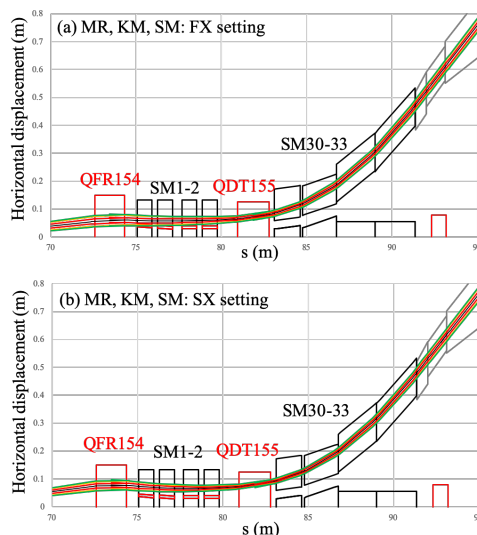


Figure 3: Calculated horizontal beam orbits.

2.3 MRPM ターゲット製作と評価

MRPM はビームによる電極からの二次電子放出の電荷量を測定し、H,V 方向に張られた複数のリボン電極の信号を再構成することでプロファイルを得るモニターである。リボン前後に高電圧をかけて放出された二次電子を収集することで、ノイズ除去を図っており、リボン電極および高電圧電極には、薄く耐久性のある導電材料として $1.2 \mu\text{m}$ の Ti 薄膜を用いた。H/V 方向にそれぞれ 67/33 ch、幅の異なるリボンをアサインして製作した [2]。Ar 雰囲気でのレーザーカットで製作し、2次元測定によりリボン幅とリボン間隔を測定した。その結果、リボン幅の精度は 1.1% に抑えられた。

2.4 DAQ システムの評価

DAQ システムとして CAVALIERII [4] を使用した。全 96 ch に対するリニアリティ測定の結果を Fig. 4 に示す。リニアリティの精度は $\pm 1.5\%$ であった。ch#94 のみ出力信号が線形にならず、この ch は測定不可能であることがわかった。この ch に割り当てられたのは H 方向の端から 3ch 目であったため、ビーム中心が直接当たることはないとして急ぎの修繕は必要ないと判断した。他の回路特性、リボンから CAVALIERII までの全回路に対する測定が現在進められている。

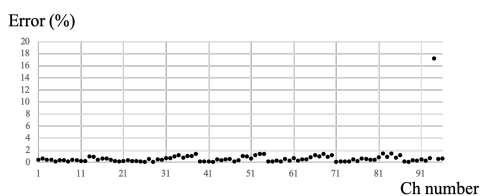


Figure 4: Errors of fitted slopes for all channels.

3. 大強度ビーム試験

3.1 測定結果

2019年4月に大強度ビーム試験を行った。FX/SX 運転設定を想定した典型的な結果を Fig. 5 に示す。ビーム運動量は 30 GeV、パンチ数 2(利用運転 8) であり、強度は 7.72×10^{13} ppp, 141.18 kW(FX 最大強度)、 1.36×10^{13} ppp, 12.58 kW (SX) であった。測定条件として、半数の ch(H:32/V:16) に -20 dB の減衰器を設置し、他の ch における信号は解析において 1/10 としている。さらに始め 100 sample 平均をバックグラウンドとしてオフセットを無視した。MRPM で測定した結果を Fig. 5 に示す。上半分の図は左から FX H 方向、V 方向、SX H 方向、V 方向であり、横軸はリボンが掃く格子の右下端点からのそれぞれの方向への距離である。また縦軸は取り出しタイミングからの時間であり、2 パンチ分の信号が見えていることがわかる。下半分の図は上半分の時間方向の積分であり、H, V 方向のある ch に対するすべての信号の和を示している。なおビームコア近傍でゲインの最大値に到達していたため、大強度の測定の際にゲイン調整の必要があることがわかった。結果として図からわかるように、FX, SX 設定いずれの場合においても左右非対称な分布になっており、ビームの削れが確認された。これは光学計算での結果とは整合しなかった。また削れのため測定結果によるビームサイズの評価ができなかった。この削れは、FX 設定ではビーム進行方向から右側と左側、下側で起こっており、また SX 設定では左側が削れていると予想でき、この傾向は今回のビーム試験の他のショットに対しても見受けられた。プロファイル測定を行った

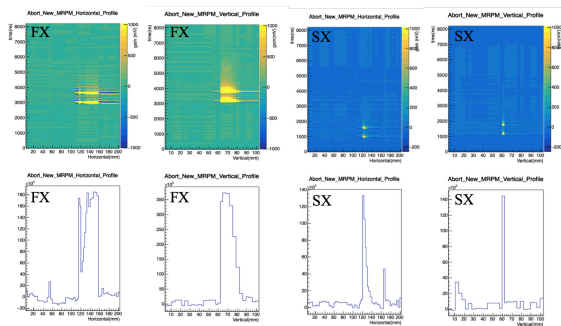


Figure 5: Typical results of beam test (FX/SX mode).

ショットに対する、MR の直線部における COD の結

果とモデル計算による COD の結果を Fig. 6 に示す。点は MR のビーム位置モニター (BPM) での測定位置、線は今回のモデル計算によるビーム中心位置である。数カ所再現できていない点があるものの、モデル計算の結果は BPM の測定結果と無矛盾であり、削れはセプタム電磁石より下流で起こったものだと考えられる。

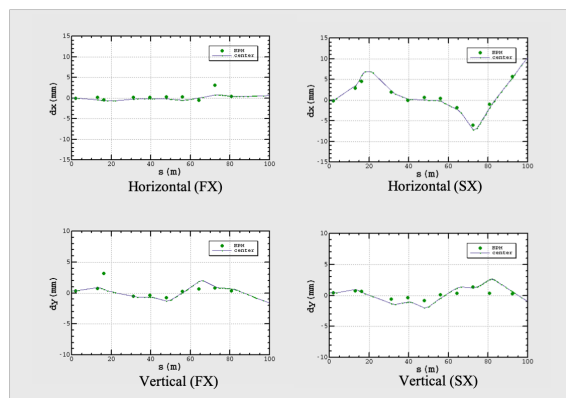


Figure 6: COD results by SAD and BPM.

3.2 ビームロス要因の候補

今回判明したビームロスの要因として、SM における H 方向の散乱によるもの、もしくは予期せぬ散乱体の存在によるものが挙げられる。SM における H 方向の散乱位置の考えられる候補としては、KM の励磁不足による SM1-2 での散乱、また SM30 に角度を持って入射することで曲げ角の増加による SM31 での散乱、SM31 での散乱の後、SM33 下流での散乱、が挙げられる。これら候補からの同定についてはビーム試験で確認し、キッカー・セプタムのパラメータ最適化をビームベースに行うことで実施する。また MRPM 上流に予期せぬ散乱体が存在する可能性は、利用運転後の空間線量が MRPM 上流で局所的に高い場所があることから、考えられている。そこで停止期間中に、散乱体の有無を確認するためにアポトラインを大気開放し内部を目視する。また、シンチレータを用いたロスモニターを新たに設置し、次回のスタディではアポトラインのロス分布をより詳しく測定できるようにする。

4. 結果と今後の展望

新しいビームプロファイルモニターが MR のアポトラインに設置された。SAD モデルを用いた Optics 計算によって COD を再現した。DAQ 及び大強度ビームのプロファイル測定が成功した。予測とは異なるビームの削れが見られ、要因の特定と測定時にはビームによる調査が必要であることがわかった。今後はビームロス要因の同定と対策を行うほか、CAVALIERII と測定システム全体の回路特性の評価、またそれによって可能になるビーム進行方向の測定精度の評価を進める。また SAD モデルを用いて

Abort Q による Q-scan 法の予測を行い、大強度ビーム試験においてエミッタンスモニタとしての MRPM 性能評価と試験運用を行う。

謝辞

ご指導頂いた、白形 政司氏、石井 恒次氏、芝田 達伸氏、富澤 正人氏、武藤 亮太郎氏、高野 淳平氏、堀 洋一郎氏、嶋本 眞幸氏、佐藤 吉博氏、安居 孝晃氏、三谷 稔氏、弘陽精工株式会社、ハヤシレピック株式会社、最後に J-PARC MR 加速器グループの皆様感謝の意を表します。

参考文献

- [1] S. Igarashi, “Challenges to Higher Beam Power in J-PARC: Achieved Performance and Future Prospects”, in Proceedings of IPAC2019, Melbourne, VIC, Australia, pp. 6–11; doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-MOYPLM1
- [2] K. Sato, Y. Hashimoto, Y. Sato, S. Igarashi, T. Koseki, E. Hamada, “Multi-Ribbon Profile Monitor for High Power Proton Beam at J-PARC MR Abort Line”, in Proceedings of IPAC2019, Melbourne, VIC, Australia, pp. 2561–2563; doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEFGW039
- [3] SAD; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [4] Eitaro Hamada *et al.*, “T2K 実験における陽子ビームモニタ用読み出し回路の開発”, 15pS41_06, JPS 2018 Autumn Meeting.