

J-PARC MR アポートラインのマルチリボンプロファイルモニター

A MULTI-RIBBON BEAM PROFILE MONITOR IN A BEAM DUMP LINE OF J-PARC MR

橋本義徳^{#, A)}, 佐藤洋一^{A)}, 酒井浩志^{B)}, 濱田英太郎^{A)}

Yoshinori Hashimoto^{#, A)}, Yoichi Sato^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Eitaro Hamada^{A)}

^{A)} J-PARC / KEK

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

Abstract

A multi-ribbon beam profile monitor in a beam dump line of the J-PARC main ring (MR) has been used in the beam operation of the MR. Combining the fast extraction (FX) system to the beam dump line, the monitor is able to conduct the MR beam diagnostics at the arbitrary timing and energy from the injection period of 3 GeV to the extraction timing of 30 GeV. The extraction timing can be controlled in the number of circulating-turn, therefore, we can observe the progress of beam profile turn by turn. The ribbons of the monitor are 1 μm thick titanium foils. They are durable to the high intensity protons as 8 bunches of $4E13$ protons per bunch (ppb), which are the maximum number of protons in the MR. The sensitivity range of each ribbon channel is adjustable at its attenuator to the front-end input signal, and beam profiles can be measured even $1E10$ protons per pulse (ppp). This wide range capability provides the diagnostics of the MR beams in several operation modes. This report presents current device configuration, and the several cases of the MR beam diagnostics observed by the monitor.

1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC 30 GeV 主リング(MR)では速い取り出しシステムにより 3 GeV 入射から 30GeV 加速までの任意のタイミングでアポートラインにビームを取り出すことができる[1]。これによりアポートラインにあるプロファイルモニター (AbortMRPM) では、周回および加速中のバンチ形状をそのタイミングでアポートすることで測定できる。この測定は、大強度ビームの特性測定だけでなく MR ビーム調整、パラメータ最適化に効力を発揮している。アポートには、他に BPM が 2 台、FCT、COMET 実験のための Extinction Monitor のビーム診断機器が並ぶ (Fig. 1)。本報告では、AbortMRPM の測定システムの現状、ビーム診断とビーム調整の事例の報告と今後の展望を述べる。

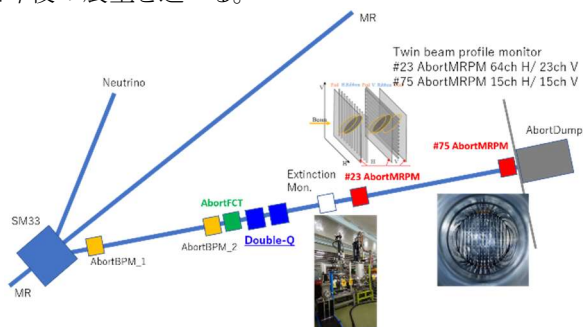


Figure 1: Beam diagnosis devices in abort beam line at J-PARC MR.

2. AbortMRPM#23 測定システム

装置と測定システムの現状を以下に述べる。それらの

[#] yoshinori.hashimoto@kek.jp

開発からの経緯は、文献[2, 3]にある。AbortMRPM#23 は、取り出し分岐点から 23 m に位置するプロファイルモニターである。

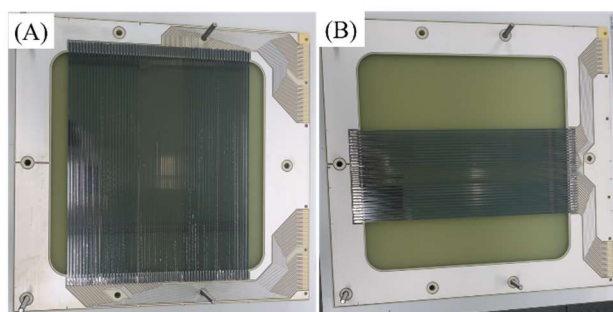


Figure 2: Titanium ribbon target with a thickness of 1 μm . (A) horizontal 64ch, and (B) vertical 32ch.

2.1 信号検出部

AbortMRPM#23 は、MR の入射ビームライン(3-50BT)の MRPM [4]と基本的に同じ 2 次電子(SE)放出を検出するプロファイルモニターである。ターゲットリボン(Fig. 2, Table 1)は、厚み 1 μm のチタン製であり、窓枠型フレーム(窓: $250 \times 250 \text{ mm}^2$)はアルミナセラミックス製である。ターゲットの製作方法は文献[2, 3, 5]に詳しい。リボンからの SE 放出率は、3-30 GeV で 0.02/陽子程度である。Figure 3 のようにリボン電極と 10 mm の距離で対向させた電極でリボンからの SE を捕獲する。捕獲のプラトー電圧は、 4×10^{13} 陽子/バンチの大強度で 180 V 程度以上であるので 230 V 程度を捕獲電極に印加した。また放出 2 次電子量の直線性は、 3.5×10^{13} 陽子/バンチ程度までをビームで確認している。

各リボンからの 2 次電子放出の電流信号は、1.5D-34C

の集合同軸ケーブルを通して 220 m 離れたローカル制御室で 50 Ω 終端またはアッテネートされ CAVALIER [6] に入力する。

Table 1: Ribbon Configuration

Dir.		Halo	Core	Halo	Total
H	Channel	23	21	23	67
	Pitch (Ribbon Width)[mm]	3.5 (2.5)	2.5 (1.5)	3.5 (2.5)	
	Span [mm]	80.5	52.5	80.5	213.5
V	Channel	12	9	12	33
	Pitch (Ribbon Width)[mm]	3.5 (2.5)	2.5 (1.5)	3.5 (2.5)	
	Span [mm]	42	22.5	42	106.5

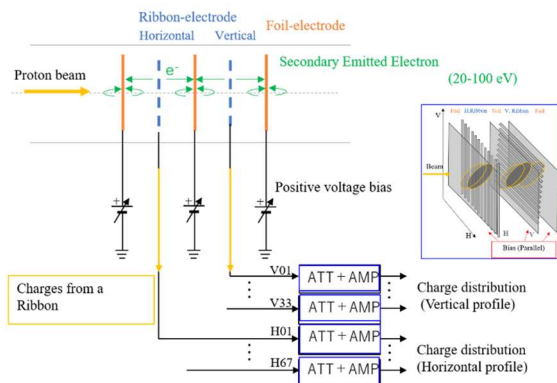


Figure 3: Conceptual diagram of profile measurement by secondary electron measurement.

2.2 信号処理部

CAVALIER の初段アンプの差動入力で信号は電圧で検出され、250 MS/s の 12bit ADC でデジタル信号となる。メモリ数は 2048 サンプルで、8 μs 程度の時間に相当する。CAVALIER は、初段アンプのゲインが 20 dB の Halo タイプと 0 dB の ESM タイプがある。これまで全て Halo タイプで構成していたが、ビームコアの部分では、信号電圧が大きくアッテネートを深くする必要があるため、ESM タイプに置き換えることを予定している。Halo, ESM タイプそれぞれの入出力特性を測定した(Fig. 4)。測定はモジュールごとに 16 ch 全てを用いて行った。良好な直線性もちその傾きのばらつきは、Halo タイプで ±1.4%、ESM タイプで ±1.3% である。周波数特性のばらつきも小さく、帯域は、Halo, ESM タイプのそれぞれで、22 MHz, 120 MHz であった。

また信号入力部に使うアッテネータは、これまで同軸の固定減衰器をそれぞれのチャンネル(全 96 ch)に取り付けて使用してきたが、今回リモート対応の 64CH アッテネータ(64CH ATT:カイズワックス KL2016 [7], Fig. 5)を開発した。64CH ATT では、TE 社の RF スイッチ HF3 を用いることで低インサクションロス化を図ると同時に広帯域化も得た。高周波特性の測定結果を Table 2 に、64 ch の測定に関して 300 MHz と 1000 MHz の数値を代表的に示す。

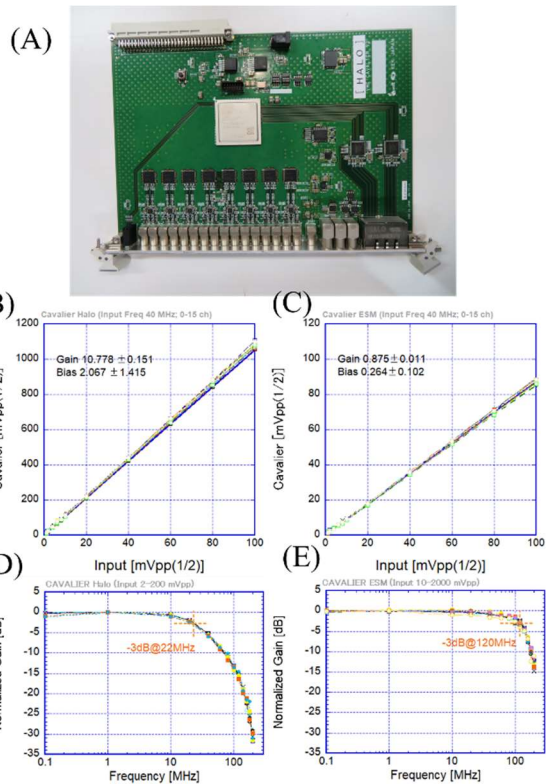


Figure 4: Cavalier 12bit ADC with 16ch inputs. The board (A), linearity of Halo type (B) and ESM type (C), frequency response of Halo type (D) and ESM type (E).

Table 2: Channel Transmission Deviation of 64ch ATT Module

Set value	Transmission [dB]	
	300 MHz	1000 MHz
0 dB	-0.163 ± 0.038	-1.068 ± 0.054
20 dB	-20.042 ± 0.036	-20.908 ± 0.120
40 dB	-39.796 ± 0.119	-41.506 ± 0.377

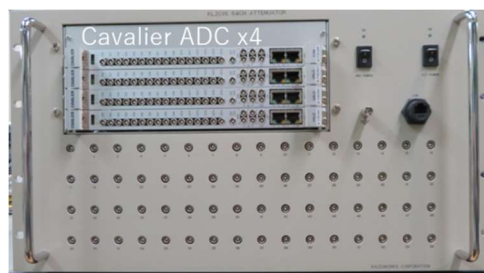


Figure 5: Front view of 64ch ATT. Lemo connectors for output was arranged, and four Cavaliers (64 channels in total) were installed. The inputs were located in the rear.

2.3 データ処理部

CAVALIER の ch データ(SE 電流時間波形:2048 sample/ch)は、SiTCP[8]経由でEPICSのIOC(サバ太郎[9])で収集する(Fig. 6)。EPICSでは、AbortMRPMとリングのDCCT、ビームロス、BPMなどのレコードデータを

まとめて **cadump** してショット毎にアーカイブする。

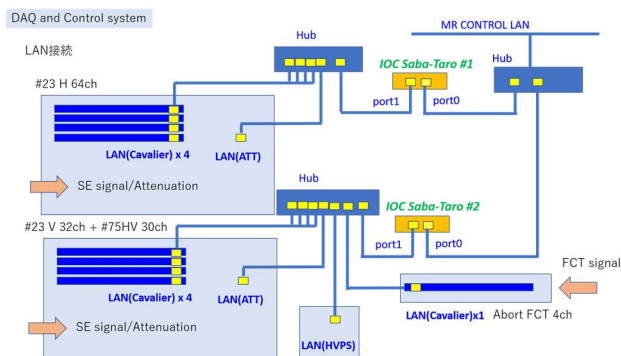


Figure 6: DAQ and control system with the Saba-Taro for EPICS IOC.

2.4 データ解析プログラム

SE 時間波形データは、Fig. 7 のように処理される。いずれも、ビームショットの信号から BG ショットの信号を引いてから処理されている。(A)は各チャンネル毎の SE 時間波形のコンターマップである。(B)は各チャンネルの SE 時間信号の 64ch の合計である。(C)は、水平方向への射影したプロファイルであり、(D)はその対数グラフである。3 桁程度のデータを得ているが、最後の桁はエラーバーが大きい。220 m の信号伝送による高周波電圧信号の減衰とノイズによる影響が出ている。(E)は、MR の周回最大バンチ数 8 を取り出した時の各バンチの波形とプロファイルである。ショット毎にこのような解析が行われ、個々のバンチの水平(H)、垂直(V)方向の空間と時間情報を得ることができる。

3. ビーム診断とビーム調整

MR は速い取り出し(FX)運転と遅い取り出し(SX)運転の2つのオペレーションモードで運用され、それぞれビーム強度、サイクルパターン、チューンなども異なる[10, 11]。Figure 8 に現在利用運転で使用されているチューン近傍のダイアグラムを示す。AbortMRPM#23 で測定されるビームプロファイルでは、ビームエネルギー、チューンといった光学的な変更に加え、ベータatron共鳴やビーム不安定性の影響などが反映される。大強度調整の妥当性は、AbortMRPM#23 導入以前は、MR コリメータ部口径にビーム周縁部が抵触する量、すなわちビームロス量の応答で判断されてきた。しかしながら、ビームロス量は、ビーム周縁部の陽子が分布する、オペレーションポイント(Fig. 8 の黒点部)近傍チューンの共鳴線の影響を強く反映するため、ビーム全体の応答として見るには周回数を増やしてビームコアが抵触する共鳴線影響がビーム周縁部に広がるまで待つ必要があった。AbortMRPM#23 導入後は、任意の時間におけるビームコアのサイズ応答も判断材料とすることが可能となっている。また、Fig. 7 (E)に見るように、h=9 で運用する MR において、ビームをバンチ毎に 600 ns 間隔で周回する様子を切り分けた測定能力を生かし、8 バンチからなる周回パルスの空きスペースを狙った FX キッカータイミング調整にも活用され、FX セプタムでのビームロス軽減にも寄与している。

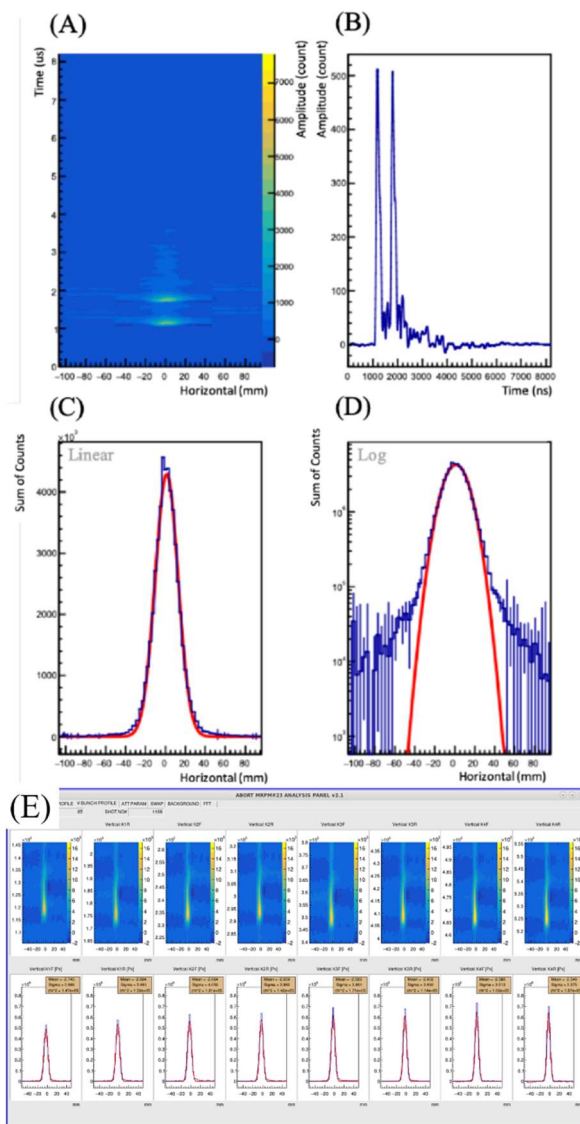


Figure 7: Data analysis display. (A)Contour map representing the time evolution of the projected SE, (B) time-waveform of Total SE for all channels, (C) projected beam profile in linear scale, (D) the same in log scale, (E) SE contour map and projected profile for each bunch.

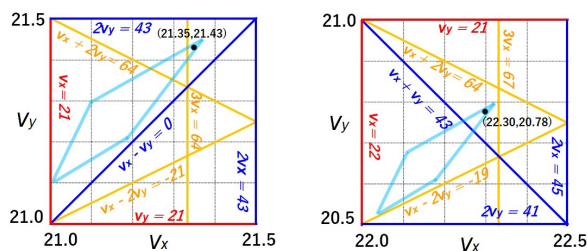


Figure 8: Tune diagrams adopted in the MR operations. Left one is for FX operation, and right one is for SX operation. Red lines for integer resonances, blue lines for half-integer resonances, and yellow lines for third resonances. The light blue squares represent assumed tune spreads.

3.1 ビーム強度、エネルギーへのプロファイル応答

ビームエミッタンス、ビームチューン拡がりは加速されるにつれ、ともに断熱圧縮の影響を受ける。ビーム強度は、増えるにつれビームチューン拡がり (Fig. 8 にみるひし形で図示されている領域) が大きくなり共鳴ラインとの抵触領域も増えるなどから横方向エミッタンスが増大するため、加速時のエミッタンスが断熱圧縮からズレた応答を示す要因となる。Figure 9 にオペレーションポイント (FX 運転時のもの) とアポートライン光学を共通にした上での、AbortMRPM#23 でビーム強度に対するビームプロファイルの応答を示す。図中の赤線は 3 GeV、青線は 30 GeV でのものであるが、エネルギーに関わらず、ビームプロファイルはビーム強度に対してほぼ線形の応答を示している。Figure 10 は Fig. 9 でのプロファイルサイズの強度依存性に対し、30 GeV と 3 GeV での比をとったものである。エミッタンスの断熱圧縮比は相対論的 $\beta\gamma$ (4.076 at 3 GeV, 32.96 at 30 GeV) に反比例する。エミッタンスの 3 GeV と 30 GeV の圧縮比は、理想的な断熱圧縮比 0.352 に対し、水平方向での増分が鉛直方向よりも大きい。これは Fig. 8 左図で見る FX 運転で抵触する共鳴線の内、 $3\nu_x = 64$ など、水平方向の影響が大きいことを示唆する。

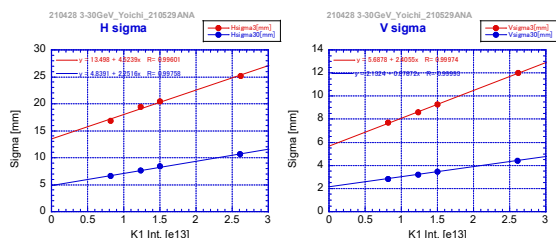


Figure 9: Beam profile responses to beam intensity for the same operation point in MR and the same optics in Abort line. Left is for horizontal, and right is for vertical. Red lines are at 3 GeV, blue lines are at 30 GeV.

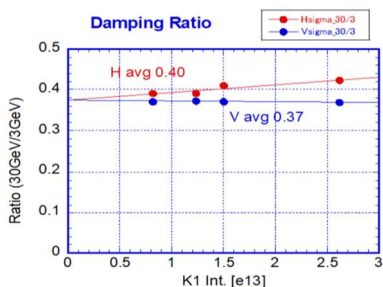


Figure 10: Damping ratio of the beam profiles responses in 30 GeV / 3 GeV. Red is for horizontal, and blue is for vertical. 0.352 is for ideal adiabatic damping ratio.

3.2 FX ビーム調整における運用

現在 MR では繰り返し時間の短縮によるビーム強度増強計画が進行中である[12]。主電磁石電源システムにおいては、FX 運転における繰り返し時間を 2.48 s から 1.36 s にするために、新電源を導入し既存電源とのハイブリッド運用をする大改造がなされた[13]。MR を構成する 11

種の四極電磁石群は MR1 周の対称性にあわせて 3 回対称に配置されているが、この改造前には 1 種あたり 1 電源で運用することで MR 光学系の 3 回対称性の維持を容易にしていた。しかし、電源システム改造後は、5 種の四極電磁石群を 1 種あたり 2 電源で運用することになり、2 電源の調整ズレがあれば MR リング半周毎に四極電磁石の励磁ズレを起こし光学対称性を崩すことで多くの共鳴線影響を増大させる。MR 光学調整においては対称性の確保が最大の焦点となっていて β 関数・ベータロン位相測定を元に行われる。ビームロス抑制をもってその妥当性を判断している。Figure 11 に MR FX 運転オペレーションポイントでの光学調整の進捗に対する大強度ビーム (バンチ当たり陽子数 2.7×10^{13}) のビームロス比 [12] と AbortMRPM#23 とビームプロファイルサイズとの対応を示す。この調整ではビーム光学の応答を明確にすべく、3 GeV でのビーム周回時間を通常の利用運転での 130 ms に対し 220 ms に延長した上でアポートラインにビームを出した。このため、ビームロス比が通常運転よりも強調する条件となっている。ビームロス比は、MR 調整の進捗として、3 回対称性調整前後で 11% から 5%、他調整 (進行方向条件など) の追い込みで 4% へと改善されているが、それに対しビームプロファイルは水平方向、鉛直方向ともに細くなる。これは光学調整前後での取り出し光学の Twiss パラメータの変調 < 3% よりも大きい応答と言え、光学調整の進捗が、ビームハロー部の応答を見る MR 内ロスだけでなく、ビームコアのサイズの応答でも評価できることが分かる。

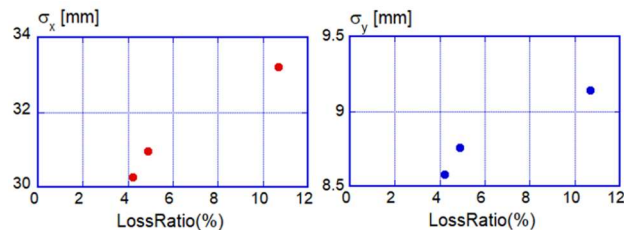


Figure 11: Beam profiles responses to beam tunings. Left is for horizontal profiles and right is for vertical profiles. Beam loss ratio (horizontal axis) represents the progress of the beam tunings.

3.3 SX 運転での運用

SX 運転におけるビーム調整では、周回ビーム強度を増やすだけでなく、遅い取り出しシステムとして、3 次非構造共鳴線 ($3\nu_x = 67$) 励起、ローカルバンブ、静電・磁場セプタムの運用により、約 2 秒に渡り均一なビームを、SX 取り出しラインを経由してハドロン実験施設に供給している。この均一性は、ハドロン実験効率はもちろんのこと、遅い取り出しシステム健全性の鍵となる。このため、SX 取り出しラインを用いずに 30 GeV でのビーム性質評価が出来る AbortMRPM#23 は、SX ビームパラメータ調整で積極的に活用されている。

SX 運転でのビームチューン拡がり、Fig. 8 右図に見るように、和共鳴 $\nu_x + \nu_y = 43$ に抵触している。共鳴線の影響はバンチ内での各陽子の位置によっても異なるが、30 GeV 到達してデバンチ後の遅い取り出し過程に

おいては、均一なビームとして取り出すためには、共鳴線 ($3 \nu_x = 67$) 以外の影響はなるべく抑制する必要がある。MR では Skew 四極電磁石を適用することで、和共鳴 $\nu_x + \nu_y = 43$ を抑制している[14]。Figure 12 に和共鳴抑制のための Skew 四極電磁石パラメータ調整前後の水平方向ビームプロファイルの変化を示す。大強度でのビームコア応答を見ながらの、直接的和共鳴調整は、AbortMRPM#23 の導入により可能になっている。

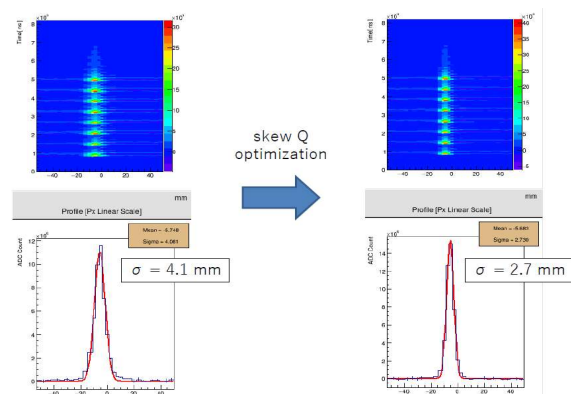


Figure 12: Response of horizontal beam profiles for optimizing skew quadrupole magnets. Horizontal size σ_x is minimized from 4.1 mm to 2.7 mm.

4. まとめと今後の展望

J-PARC MR のアボートラインに導入されているマルチリボンプロファイルモニター AbortMRPM#23 は、大強度ビームに対し、3 GeV から 30 GeV までの任意のエネルギーでのビームコアのサイズ応答を測定する能力を持つ。測定システム、信号検出、信号処理、データ解析プログラムは整備され、FX および SX 利用運転パラメータ調整に活用されている。今後の更なる運用としてまずは、抵触共鳴ラインやビーム調整パラメータ影響の加速中の変化をとらえること、ビーム不安定性抑制調整(横方向フィードバック操作、6 極電磁石パターン操作、進行方向分布操作)との対応評価としての活用を予定している。

エミッタンス評価は AbortMRPM#23 運用での重要課題であり、MR 3 GeV 入射輸送ラインや、MR 内プロファイルモニターなどとの整合性の評価を進めている。特にアボートラインにおける四極電磁石を用いた Q スキャン法の適用においては、四極電磁石と AbortMRPM#23 との距離が近いものの、エミッタンス評価精度を上げるために、アボートラインの最下流の AbortMRPM#75 との組み合わせ評価、ショット毎のバラつき評価(要因は複数の候補がある)、アボートライン四極電磁石漏れ磁場による周回ビームへの影響切り分けなどを検討している。更に、AbortMRPM#23 の時間分解能を活用し、ビームの水平・鉛直方向エミッタンスをバンチ内の進行方向位置に応じて把握することにより、大強度運転におけるビームダイナミクスシミュレーションとの対比を進めることで、より積極的にビームハロー成長因子の同定および成長抑制条件の最適化を進めたい。

謝辞

本研究は特別推進研究科研費 JP16H06288 の助成を受けたものである。本装置の開発・運用にあたっては、J-PARC 主リング加速器グループの全面協力、また周囲の関係者からも広く協力を受けた。各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] T. Kimura *et al.*, Proc PASJ2018, WEP099, pp.609-612; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP099.pdf
- [2] K. Sato *et al.*, Proc. PASJ2019, FRPI036, pp. 1118-1121; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI036.pdf
- [3] 佐藤 究, 修士論文, 令和元年度, 東京大学.
- [4] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. HB2010, Morschach, Switzerland, Sep. 2010, WEO2A01, pp429-433; <https://accelconf.web.cern.ch/HB2010/papers/weo2a01.pdf>
- [5] H. Akino *et al.*, proc PASJ2014, Aomori, SUP081, pp1221-1225; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP081.pdf
- [6] 濱田英太郎, "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", 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018; <https://openit.kek.jp/project/fadc250>
- [7] <http://www.kaizuworks.co.jp/>
- [8] <https://www.bbtech.co.jp/sitcp/>
- [9] S. Yamada., Proc. of PASJ2016, MOP092, pp.634-636; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP092.pdf
- [10] S. Igarashi, Proc. HB2018, Daejeon, Korea, Jun. 2018, pp147-152.
- [11] T. Koseki, Proc. IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, May. 2018, paper TUPAK005.
- [12] T. Yasui *et al.*, presented at PASJ2022, Oct. 2022, FROA01.
- [13] K. Miura *et al.*, presented at PASJ2022, Oct. 2022, TUP039.
- [14] M. Tomizawa, private communication.