

J-PARC 主リングにおける加速途中のビーム取出し軌道の最適化

OPTIMIZATION OF EXTRACTED BEAM ORBIT DURING ACCELERATION AT J-PARC MAIN RING

岩田宗磨^{#, A)}, 石井恒次^{A)}, 芝田達伸^{A)}, 佐藤洋一^{A)}, 安居孝晃^{A)}, 吉村宣倅^{B)},
木村琢郎^{A)}, 上窪田紀彦^{A)}, 松本教之^{A)}, 松本浩^{A)}
Soma Iwata^{#, A)}, Koji Ishii^{A)}, Tatsunobu Shibata^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Takaaki Yasui^{A)}, Nobuyuki Yoshimura^{B)},
Takuro Kimura^{A)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} Kyoto University

Abstract

During beam operation in J-PARC main ring (MR), if an equipment abnormality is detected, the beam will be discarded to the abort dump using fast extraction (FX) and beam operation will be stopped. This is done within 1 ms of operation time even during acceleration. Of the kicker magnets (KM) and septum magnets (SM) that construct the FX section, the charging patterns of the pulse-excited KM and low-field SM are difficult to synchronize with the increasing beam energy. Therefore, the beam extracted during acceleration will not follow the adjusted beam orbit extracted at 3 GeV flat bottom or 30 GeV flat top, and will not reach the abort dump center. It is necessary to avoid beam irradiation to places other than the beam dump. If a high-intensity beam is hit to the bellows or welded parts of the vacuum duct leading up to the beam dump, there is a possibility of damage. The change in beam orbit must be such that the arrival point to the abort dump within the 700 mm diameter of its cross section. By adjusting the charging pattern of the KM and low-field SM, and the current pattern of the high-field SM, we can get a solution that the beam would reach the abort dump even if it was extracted at any timing during acceleration. In the beam test in April 2023, beam extraction was performed at each timing of 5, 8, 15, 20, and 25 GeV during acceleration under the MR operating condition assuming beam supply to the neutrino experimental facility, and it was confirmed that all beams reached the abort dump. Each orbit was generally consistent with the simulation, and the expected result was obtained.

1. はじめに

J-PARC 主リング(MR)は、ニュートリノ実験施設(NU)とハドロン実験施設(HD)へビームを供給[1]している。前者は MR で加速されたビームを瞬時に 1 回で取り出す速い取り出し(FX)で、後者はビームを数秒かけて何十万回で取り出す遅い取り出し(SX)で、供給を行っている。FX セクションには、ビーム周回ラインに対して NU 供給ラインとは逆方向にビームを取り出すアボートラインを持つ。アボートラインの末端にはアボートダンプが設置され、MR 構成機器に異常を検知した際やビーム調整・試験の時に、ビームを安全にダンプする。J-PARC の構成を Fig. 1 に示す。また、FX セクションの機器配置を Fig. 2 に示す。上流側に設置された 5 台のキッカー電磁石(KM)の極性を切り替えることで、ビームの行き先を NU 側かアボート側に決定する。意図した運用では、予め設定したビーム取出しタイミングと極性で、KM 励磁トリガーが電源に入力される。一方、MR 構成機器のいずれかで異常を検知した場合は、ランダムなタイミングで、アボート側への KM 励磁トリガーが入力される。異常検知からトリ

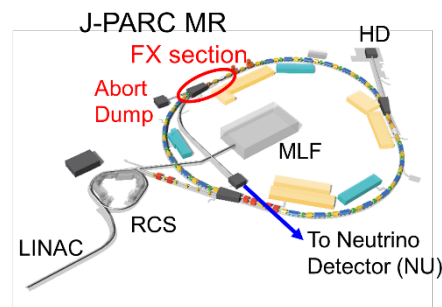


Figure 1: J-PARC layout.

ガー出力まで 1 ms 程度以内で実行されるので、通称 ms-Abort トリガー[2]と呼んでいる。これがフラットベース (FB)やフラットトップ(FT)のタイミングであれば、KM やセプタム電磁石(SM)の出力は、理想的な出射ビーム軌道となるように調整されていて、直径約 700 mm のアボートダンプの中心付近にビームが到達する。一方、加速途中で ms-Abort トリガーが入力された場合、FX 機器はそれぞれの運転パターンに沿った立ち上げ途中でビームを取り出すことになる。FX 機器の運転パターンは、各電

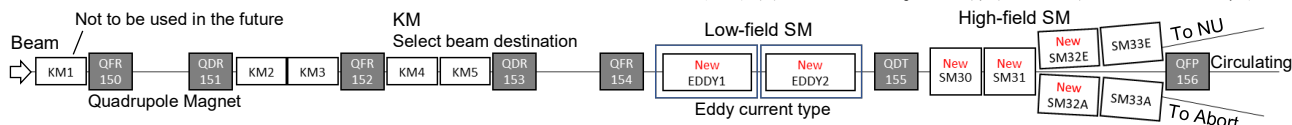


Figure 2: FX section.

soma.iwata@kek.jp

源の特性を考慮され、完全にはビームエネルギーと同期していないため、出射ビーム軌道は、FB または FT の取出し軌道と一致しない。軌道が大きすぎるタイミングがあり、途中のダクトの溶接部分や壁面の薄いベローズに照射されると、局所的な発熱でクラックが生じて真空が破れる恐れがある。そのため加速途中のアポルト取り出しでも、途中のアパーチャでのビームロスがなく、ビームがアポルトダンプに到達するように調整が必要である。

MR 機器は、NU への供給ビームの高出力化のため、アップグレードが進められている。運転周期を 2.48 秒から 1.16 秒に短縮し、周回ビーム粒子数も積み増しすることで 1.3 MW [3]出力することを目標にしている。これにより、FX セクションの SM もアップグレード[4]を実施した。2022 年 5 月までに新しい SM をインストールしたが、3 台の新高磁場 SM [5-7]のコイルに初期不良[8, 9]があり、予定通りの運用はできていない。コイルの再製作は進めているが、全てが復旧できるのは 2025 年となる見込みで、それまでは初期不良のあるコイルを修理して運用していく。その一つの対応として、高磁場 SM の励磁電流を極力下げて運用している。低電流化によりビーム軌道の曲げ角が不足するので、上流に設置された低磁場 SM の励磁電流を上げる必要がある。

また KM についても使用台数を 5 台から 4 台に変更する。KM は取り出しビーム軌道と周回ビーム軌道を分離する役目を持っており、特に最上流のセプタム部での軌道分離が主目的となる。KM1 は軌道分離には効果的でない位置に設置されており、低磁場 SM の弱い蹴り角を補完する役を担っていた。今回のアップグレードで低磁場 SM の蹴り角強化が成されたため KM1 の役目は終了したと言える。一方、MR 高出力化に向けて加速空洞の増設が計画されており、KM1 のスペースは空洞スペースにもなることから、今後は KM1 を使用しない運転パターンを確立していくこととなった。

アップグレードによる運転条件変更を加味し、加速途中のいずれのタイミングでもアポルトビームが途中のアパーチャに干渉せず、ダンプまで到達するよう、FX 機器の調整を行った。2023 年 4 月のビーム試験を行い、加速途中の 5, 8, 15, 20, 25 GeV アポルト取り出しで軌道測定をした。

2. FX 機器の運転パターンの調整

2.1 パターン調整の条件

FX を構成する機器で、パルス通電を行うのは KM と低磁場 SM [10-16]である。低磁場 SM は渦電流誘導型で通称 Eddy SM と呼んでいる。これらはコンデンサバンクに充電し、励磁トリガーが電源に入力されると充電電荷を瞬時に出力する。KM のパルス立上りは約 1 μ s、Eddy SM は約 400 μ s である。充電パターンは MR の偏向電磁石や四極電磁石(以下まとめて主電磁石と呼ぶ)の通電パターンに近い形状である。しかし、充電電圧が低い(KM で 8 kV 未満、Eddy SM で 0.4 kV 未満)場合は充電電圧が安定せず、また充電完了後のパルス出力が安定するまでの時間はおおよそ 100 ms 程度を要している。このため FB 運転時は使用台数を減らして充電電圧を上げ、パルス電流波形を安定させている。充電完了後に安定する時間を確保するため、主電磁石よりも先に

FX パルス機器の充電電圧は FT に達する。加速途中 (FB-FT 間)の運転台数の変化や、充電電圧の早い FT 到達により、加速区間の充電パターン勾配はビームエネルギーの変化に沿ったものではなくなる。

アップグレード以前は 1 台の KM で FB 取り出しをしていたが、KM はサイラトロンスイッチを使用しているためプレファイヤーやミスファイヤーが起こってしまう。プレファイヤーは年に 1 回程度観測されているため、2 台運用とすることにした。FB の場合、KM が半分程度の蹴り角でもビームの多くは取り出され、残りのビームも Eddy SM のセプタム面や SM30 のダクトの溶接部分を保護するビームプロテクタで失われる計算となる。2 台運用の際の KM 充電電圧は 9 kV 程度となり、許容下限に近い。Eddy SM も FB は台数減らして 1 台で運用されるが、Eddy SM は半導体スイッチを用いているためパルスが抜ける頻度は KM と比べて少ないと期待される。充電電圧は約 0.5 kV と、やはり許容下限に近い。加速開始後、残りのパルス機器も充電を開始するが、6 GeV くらいまでの取り出では充電電圧が安定していない。しかしながら、FB で充電されていたパルス機器に対し相対的に蹴り角は小さいため、ビームは大きく軌道を外れることはないと考えられる。

パターン通電を行う高磁場 SM は、主電磁石と一致した通電パターンを持つことが可能である。しかしながら前述したような運用をパルス機器で行うため、高磁場 SM の電流励磁パターンも一致しない。パターン調整としてはまず FT の励磁電流値を決定する。言うまでもなく FT での取り出し回数が圧倒的に多いため、FT での取り出し軌道を最適化して優先させる。次に FB の励磁電流値を決めて、FT と直線で結ぶパターンを作成する。主電源はリップル抑制のため、加速開始時 (FB 直後)と終了時 (FT 直前)におよそ 100 ms のスージング期間を設けている。FX 機器も設けることは可能だが、加速中の励磁電流を完全に一致させることに意味はないため、FB と FT を直線で結ぶこととし、励磁開始と終了のタイミングを調整することにした。調整したパターンを Fig. 3 に示す。

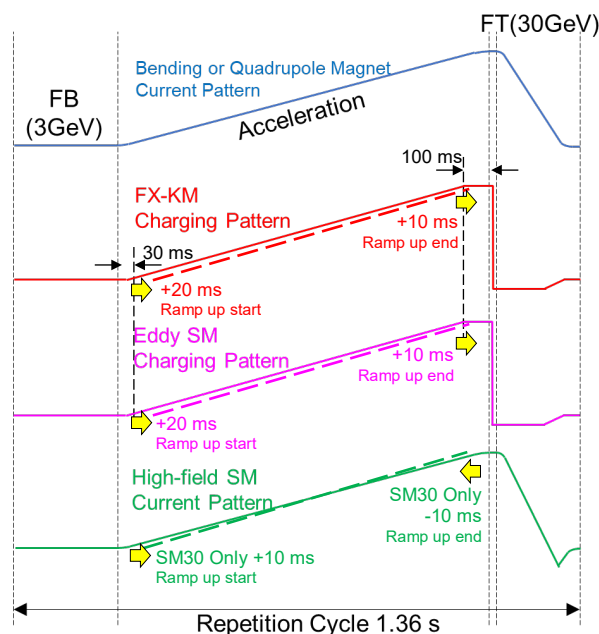


Figure 3: Overview of pattern adjusting.

2.2 パターン調整

パターン調整においては SAD (Strategic Accelerator Design) [17]を用いた軌道計算を行い、取り出しビームがアボートダンプに到達し、途中のアパーチャに干渉しない

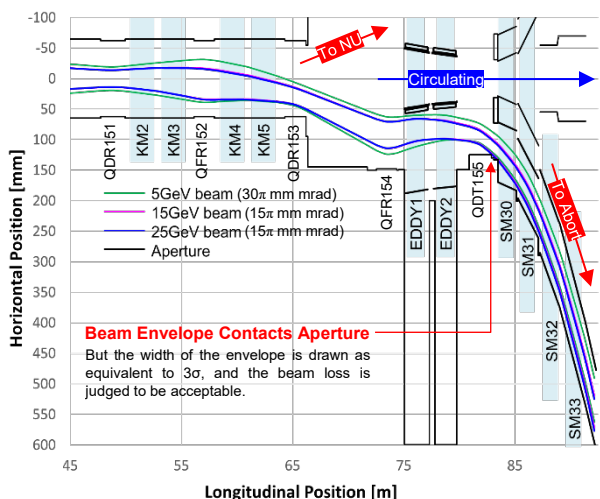


Figure 4: Envelopes of the beams extracted during acceleration.

いかを確認する。軌道計算において、チューンは FX 運転時の $(v_x, v_y) = (21.35, 21.43)$ 、 $\Delta P/P$ は 0.4 %、Closed Orbit Distortion は 1 mm とした。加速途中取出しのビーム軌道を Fig. 4 に、軌道計算で用いた各機器の推定生成磁場と、アボートラインにあるマルチリボンプロファイルモニタ(MRPM) 2 台の設置位置におけるビーム位置を Table 1 に示す。MRPM は上流側が#23、下流側が#75であり、それぞれ SM33A の磁極出口から、約 16 m、約 67 m の位置にある。Figure 5 にアボートラインを示す。

KMとEddy SMの充電パターンの立ち上がりは、当初は加速開始から 30 ms 後の予定だったが、軌道計算からさらに 20 ms 遅らせた。また充電完了も 10 ms 遅らせた。充電完了は、電源出力の安定性確保のため、加速終了の 100 ms 程度前とする要求があるが、それを 90 ms と短くした。Figure 4 で示す通り、SM30 の入り口でビームがアパーチャに干渉してしまうためである。以上のタイミング調整により、8 GeV 程度までは充電パターンの立ち上がりを十分遅らせることでビームアパーチャの干渉はなくなった。一方、15 GeV 以上のエネルギーでは完全に解消できず、ビームエンベロープのエッジが最大 3 mm 程度アパーチャ(ダクト内壁)を超えている。15 GeV 以上のビームエンベロープの算出は、エミッタンスを 3σ 相当

Table 1: Parameters of FX Components and Beam Positions on Abort Line

Item		5 GeV	8 GeV	15 GeV	20 GeV	25 GeV	
Time from Start of Acceleration [ms]		90.27	151.85	294.44	396.30	498.15	
Integrated Magnetic Field	KM2	0.0088	0.0223	0.0536	0.0760	0.0983	
	KM3	0.0088	0.0223	0.0536	0.0760	0.0983	
	KM4	0.0455	0.0560	0.0805	0.0979	0.1154	
	KM5	0.0416	0.0527	0.0783	0.0966	0.1149	
	EDDY1	0.0364	0.0919	0.2207	0.3126	0.4046	
EDDY2		0.0909	0.1178	0.1802	0.2248	0.2693	
	BL [Tm]	SM30	0.2119	0.3098	0.5439	0.7112	0.8784
SM30		0.3281	0.4854	0.8525	1.1147	1.3768	
	SM31	0.2205	0.3398	0.6181	0.8170	1.0158	
	SM32A	0.3948	0.6083	1.1067	1.4627	1.8186	
	SM33A						
Horizontal Angle [mrad]		75.402	75.969	76.677	76.926	77.086	
Horizontal Position [mm]	MRPM #23	Simulation	-26.2	-10.5	+7.5	+13.7	+17.7
		Real	-42.2	-18.5	+9.9	+21.5	+28.6
	Difference		-16.0	-8.0	+2.4	+7.8	+10.9
			-137.0	-91.6	-36.5	-17.1	-4.8
	MRPM #75	Simulation	-163.4	-91.9	-3.4	+27.8	+56.9
		Real	-26.4	-0.3	+33.1	+44.9	+61.7

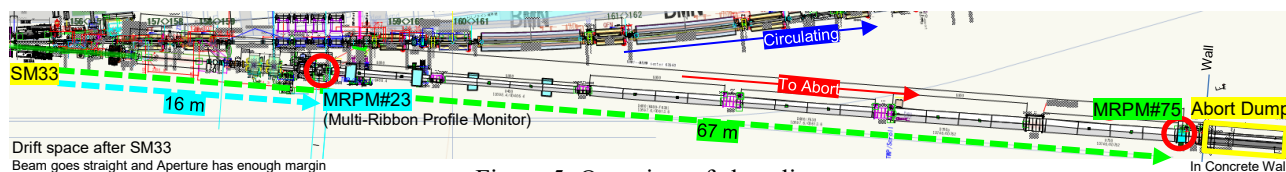


Figure 5: Overview of abort line.

の 15 mm mrad としている。高磁場 SM の通電パターンは SM30 のみを調整した。加速開始直後は、SM31 周辺のアパーチャにビームエンベロープが近接するので、立上げ開始を 10 ms 遅らせた。また、FT 到達を 10 ms 早め、立上げの勾配を上げた。これは KM と Eddy SM、SM30 の立上げを遅らせことにより、加速前半はアボートダンプへのビーム到達点が周回ライン側に大きく寄ってしまうため、これを緩和しようとしたものである。

3. ビーム試験結果

2023 年 4 月 20 日に、加速途中ビーム取出しの試験を行った。加速途中の 5, 8, 15, 20, 25 GeV となるそれぞれ

のタイミングで、ms-Abort トリガーを模擬した KM 励磁トリガーを作成して取り出しを行った。取り出しビームはアボートライン上の MRPM#23 と MRPM#75 で観測し、測定値と SAD 計算値を比較する。Figure 6 に MRPM#23、Fig. 7 に MRPM#75 の取得データを示す。上側の青い Conter-Plot の横軸は水平位置を表し、マイナスがリング内側、プラスが外側、ゼロが取り出し軌道の中心となっている。縦軸は時間となっており、ビームの時間構造を示す。MR は 8 バンチ周回しており、それらが順に取り出されていることがわかる。また色彩は、ビーム強度(ADC カウント)を示す。下側のヒストグラムは、横軸が水平位置、縦軸が ADC カウントであり、上のグラフの ADC カウントを水平位置ごとに時間積分したものである。

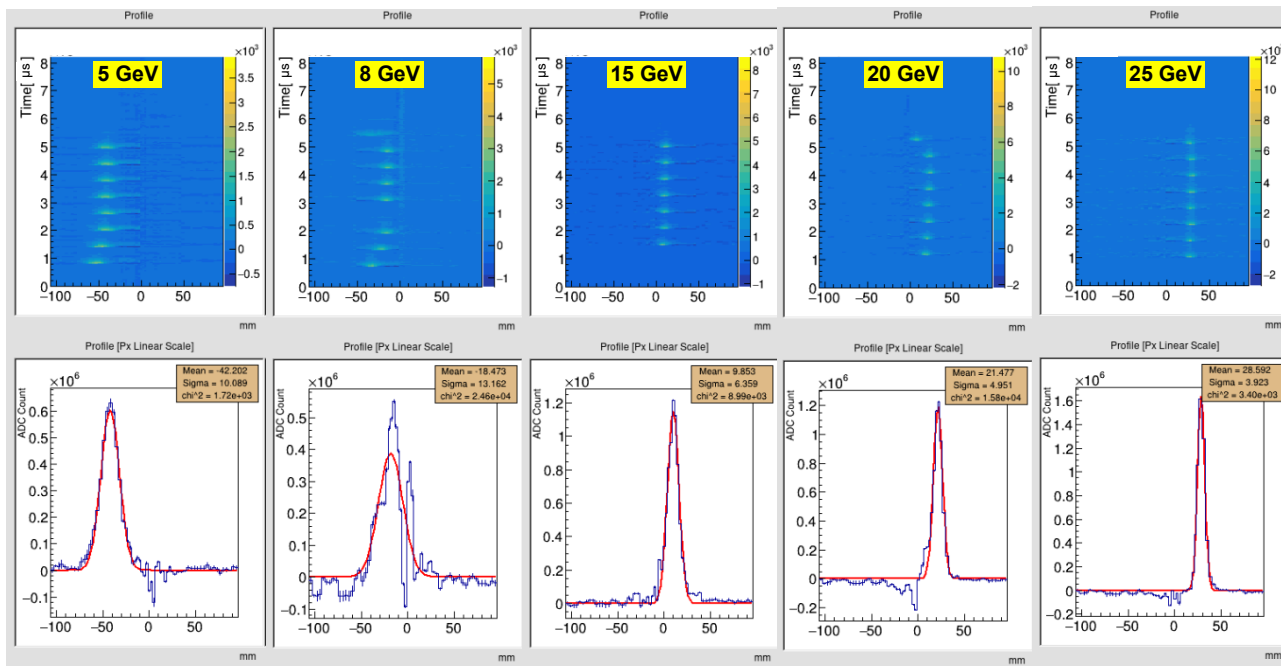


Figure 6: Horizontal beam profile at MRPM#23.

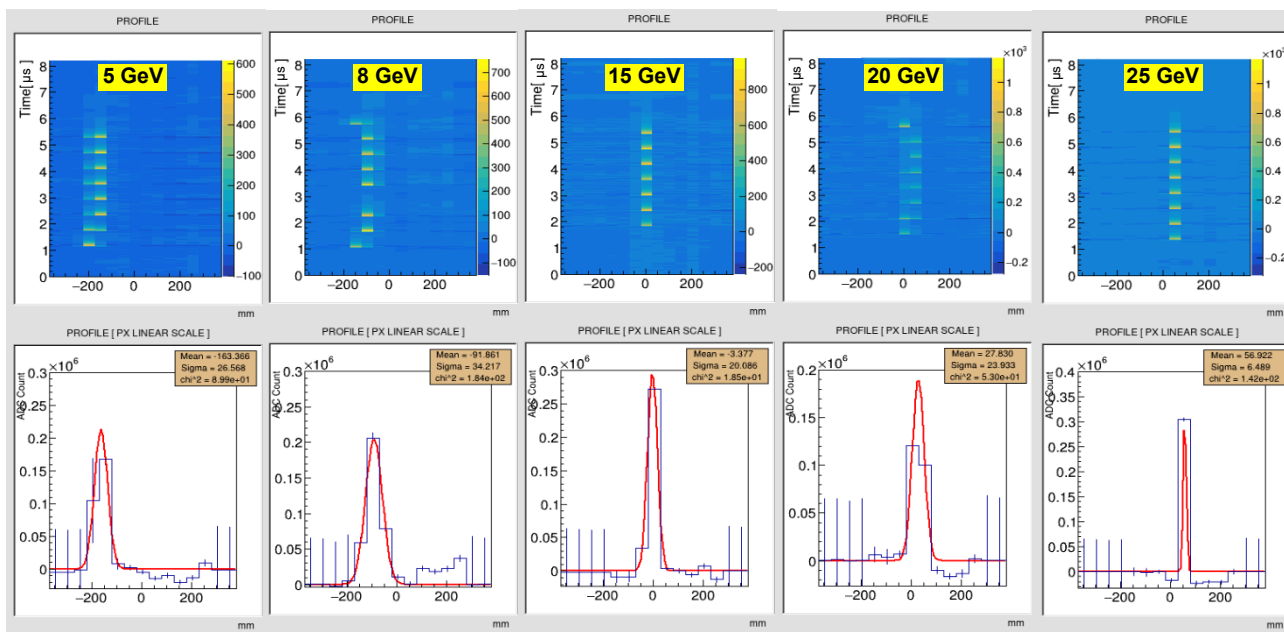


Figure 7: Horizontal beam profile at MRPM#75.

測定された水平方向ビーム位置は、Table 1 に示したように軌道計算値とずれがある。軌道計算を基準とすると、実際の軌道は加速前半で内側に、後半で外側にずれしており、エネルギーの増加とともにずれの大きさも変化している。軌道計算はSM32とSM33の積分磁場で測定値を用いておらず、アボートラインも設置位置のずれが指摘されており、軌道計算と実際の軌道は必ずしも一致していない。しかしながら、それらの要因によるずれの方向は決まっており、今回測定されたずれとは合わず、別の原因があると考えている。KMとEddy SMについて、電源出力安定のため充電完了後ある程度時間を要することから、充電途中の出力は期待通りの磁場が生成されていない可能性がある。調査は今後の課題としたい。

また出射ビームの時間構造では、8 GeVビームでバンチの間隔が大きい箇所があり、15 GeVビームでは7バンチしか確認できない。MRは9バンチ分のバケツを持ち、内1つのバケツを空にしている。この空バケツの通過タイミングに同期させてKMの励磁パルスが立ち上がるようにしているが、モジュールでの処理時間やケーブル長での時間が固定であるため、エネルギーが変わるとずれが生じてしまう。ビームエネルギーに合わせた可変の遅延モジュールが必要であり、課題となっている。

本件ビーム試験中は、FXセクションにあるビームロスモニタの情報を監視していたが、上記のように取り出せないバンチがある場合、あるいはKM励磁パルスの立ち上がりや立ち下りで蹴られたバンチがある場合を除いて、ビームロスの増加は確認できなかった。SM30入口でのビームロスが心配されたが、現状では問題はなかった。

4. まとめと今後の課題

任意の取り出しビームエネルギーにおいて、ビームロスが小さくなるよう、FX機器によるアボート軌道の確立を行った。充電電圧パターン、励磁電流パターンを調整し、SADによる軌道計算でアバーチャが確保されるパラメータを求めた。そのパラメータを用いて加速途中の5, 8, 15, 20, 25 GeVでのアボート取り出しビーム試験を行い、測定値と計算結果を比較して大きなずれがないことを確認、同時に取り出しセクションで有為なロスがないことも確認した。一方で、軌道計算の結果とビーム位置の測定結果には小さくはない不一致が見られる。今後、この原因を追究していく。また空きバケツの同期では、ビームエネルギーに合わせた可変の遅延モジュールが課題として浮き彫りとなった。今後、開発を検討する。高磁場SMは製作不備のため、現在、低電流値での運転を強いられている。コイルは再製作中で、完成は2025年夏まで待たねばならないが、以降は定格電流値での運転が可能となる。定格電流でのビーム軌道は周回ライン側を通るようになり、SM30入口付近のビーム干渉の問題は解消される予定である。その際にはまたアボート軌道の確立やビーム試験を行う必要がある。今後も毎年のようにFX機器の運転パラメータが変更される可能性もあるので、今回明らかになった不一致点を洗い出し、精査して軌道計算の精度を上げ、次のアボート軌道調整に備えたいと考えている。

参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/c/>
- [2] T. Kimura *et al.*, “Development of a ms-Abort System via J-PARC MR-MPS”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp.609-612.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEPO/WEPO99.pdf
- [3] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [4] S. Iwata *et al.*, “The installation of the new septum magnets for fast extraction in J-PARC Main Ring”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp.901-905.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRPO/FRPO06.pdf
- [5] T. Shibata *et al.*, “The new high-field septum magnet for upgrading of fast extraction in MR J-PARC”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp.85-89.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THOH/THOH05.pdf
- [6] T. Shibata *et al.*, “The new high-field septum magnet for upgrading of fast extraction in MR J-PARC (2)”, Proc. PASJ2020, Matsuyama (Online meeting), Japan, Sep. 2020, pp.388-392.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP51.pdf
- [7] T. Shibata *et al.*, “The new high-field septum magnet for upgrading of fast extraction in MR J-PARC (3)”, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp.826-830.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/THPO/THP014.pdf
- [8] S. Iwata *et al.*, “Countermeasures for the failure of the new septum magnet for fast extraction in J-PARC Main Ring”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp.170-174.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROA/FROA05.pdf
- [9] S. Iwata *et al.*, “Solutions for the manufacturing defect of new septum magnets using for fast extraction in J-PARC main ring”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, WEP22, this meeting.
- [10] T. Shibata *et al.*, “The performance of a new First Extraction Septum Magnet for Upgrade of J-PARC MR”, Proc. PASJ2014, Aomori, Japan, Aug. 2014, pp.86-90.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUOL/SUOL01.pdf
- [11] T. Shibata *et al.*, “The development of a new First Extraction Septum Magnet for Upgrading of J-PARC MR”, Proc. PASJ2016, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp.1204-1208.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP1/TUP107.pdf
- [12] T. Shibata *et al.*, “The development of a new first extraction septum magnet for upgrading of J-PARC MR (3)”, Proc. PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp.1051-1055.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEPO/WEPO75.pdf
- [13] T. Shibata *et al.*, “The development of a new Low field Septum Magnet for fast extraction in J-PARC MR (4)”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp.499-503.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEPO/WEPO66.pdf
- [14] T. Shibata *et al.*, “The new low-field septum magnet for upgrading of fast extraction in MR J-PARC”, Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp.361-365.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPPH/WEPPH028.pdf

- [15] T. Shibata *et al.*, “The new low-field septum magnet for upgrading of fast extraction in MR J-PARC (6)”, Proc. PASJ2020, Matsuyama (Online meeting), Japan, Sep. 2020, pp.594-598.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP46.pdf
- [16] T. Shibata *et al.*, “The new low-field septum magnet for upgrading of fast extraction in MR J-PARC (7)”, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp.262-266.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MOP0/MOP015.pdf
- [17] SAD code, <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>