

J-PARC 主リング速い取り出しビーム軌道計算の評価

EVALUATION OF BEAM ORBIT SIMULATION FOR FAST EXTRACTION IN 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)}, 浅見高史^{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)}, Takashi Asami^{A)},
 Noriyuki Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}

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

Abstract

At J-PARC Main Ring, efforts are underway to increase the beam power supplied to the neutrino facility (NU). Until 2021, the beam power was 500 kW, but in December 2023, it reached 760 kW. With the increase in beam power, measures to address beam loss have also become necessary. The beam profile and orbit near the beam loss points were adjusted with an accuracy of 1-2 mm, successfully reducing the residual dose. High-precision orbit calculations are essential for making such fine adjustments. However, when the parameters of the septum magnets (SM) were adjusted to pass through the center of the most upstream beam position monitor (BPM) on the NU line, the orbit calculation using the adjusted parameters showed that the beam was shifted several millimeters towards the circulating line side, rather than passing through the center of the BPM. The SM settings used in the orbit calculations reflect the measured magnetic field distribution and alignment results, and the deviation at the BPM caused by these errors is about 0.1 mm, which cannot explain the observed difference. The BPM was surveyed using a laser tracker, and the difference from the position assumed in the orbit calculation was investigated. It was found to be shifted by 1.2 mm on the extraction side, resulting in a larger difference between the measured beam position and the orbit calculation. Additionally, the extracted beam passes outside the good field region of the quadrupole magnet (QM). The magnetic field distribution of the QM was simulated in 3D and compared with the magnetic field distribution used in the orbit calculation. In the simulation, the integrated magnetic field (BL) in the extraction beam passing area was found to be less than 1% smaller than that used in the orbit calculation. Reflecting this result in the orbit calculation showed a tendency to reduce the difference with the measured beam position, but it did not resolve the issue. The investigation of the magnetic field distribution of the QM will continue, and other potential causes will also be explored.

1. はじめに

J-PARC 主リング(MR)は、速い取り出し(FX)でニュートリノ実験施設(NU)へ 30 GeV 陽子ビームを供給している。供給出力は、2021 年まで約 500 kW だったが、運転周期を 2.48 秒から 1.36 秒に短縮するなど増強作業を進め、2023 年 12 月に 760 kW を達成[1]した。FX 機器はキック

カー電磁石(KM)5台、低磁場セプタム電磁石(SM)2台、高磁場 SM4 台から構成されるが、このうち低磁場 SM 全てと高磁場 SM3 台がアップグレード[2]された。今後も、さらなる運転周期の短縮や、ビーム粒子数の加増で、1.3 MW を目指す[3]。一方で、MR 高出力化に伴い、ビームロスの影響も注目されるようになってきた。特に FX セクションでは、取り出しビーム軌道(以下、ビーム軌道)がア

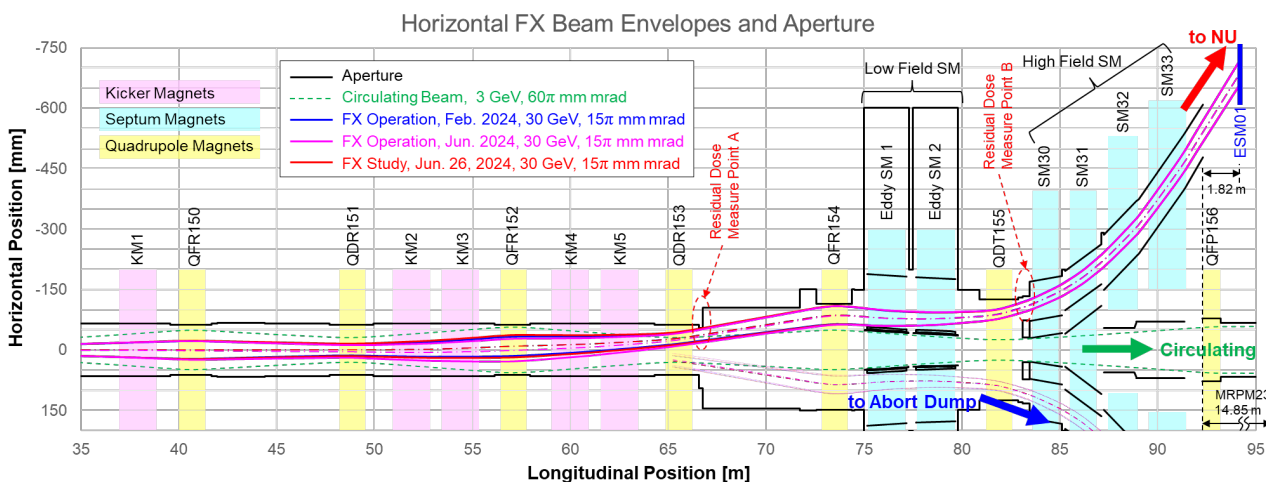


Figure 1: Layout of FX section and beam envelopes with aperture.

[#] soma.iwata@kek.jp

パーチャに近接する箇所があるため、ビームダクト表面線量が 10 mSv/h に達することもあった。Figure 1 に FX セクションの機器レイアウトおよび水平方向のアーチャーとビームエンベロープを示す。また、Table 1 に、Fig. 1 で示す箇所の残留線量を示す。

Table 1: Residual Dose at Measure Points in Fig. 1

Measure Point	Residual Dose		
	Measured 6 hours after Beam Stop		δ
	Feb. 2024 FX 680 kW Operation	Jun. 2024 FX 800 kW Operation	
A	6.1 mSv/h	3.1 mSv/h	-49 %
B	10.0 mSv/h	6.6 mSv/h	-34 %

2024 年 2 月の 680 kW NU 供給運転で、四極電磁石 QDT155 と SM30 の間のビームダクト表面線量が、運転停止から 6 時間後の測定で 10 mSv/h に達した。これは周囲での保守作業等を制限することになるので看過できない。残留線量増加の原因は、QDT155 のビームダクト内壁とビームが近接するためである。Figure 2 に QDT155 下流側端部におけるダクト断面とビーム断面を示す。ビーム断面はエミッタンス 15π mm mrad で描いており、楕円の外周に存在するハロー成分は 0.1 % オーダーである。2024 年 6 月の 710~800 kW NU 供給運転では、同年 2 月と比較し、QDT155 下流側での垂直方向のビーム断面サイズ半幅が 2.1 mm 縮小され、軌道も 0.6 mm 周回ライン側に寄っている。これはビームロスを減らすために意図的に変更したもので、残留線量が 2/3 程度に低下した。これらのビーム断面サイズや軌道は SAD コード[4]を用いて計算しており、1 mm 以下の精度での調整を行うため、軌道計算も同等以下の精度が要求される。

軌道計算においては、新たに導入した SM の詳細な磁場測定データとアライメント結果を反映した。その上で、NU ライン最上流に設置されている静電誘導型ビーム位置モニター ESM01 [5]と、NU ラインとは周回ラインを挟ん

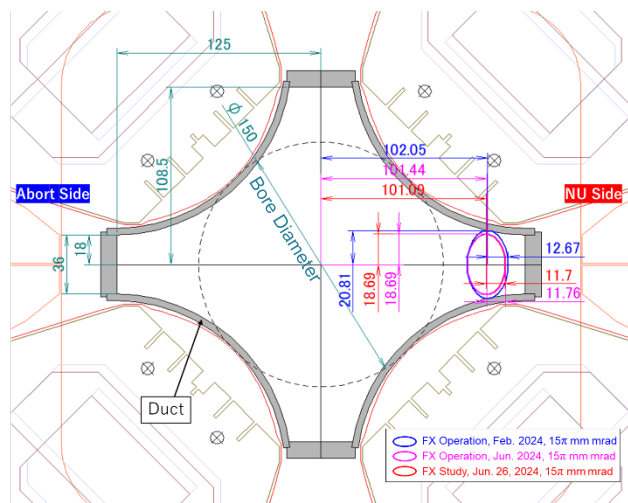


Figure 2: FX beam spots at downstream end of QDT155.

で反対側に取り出す Abort ライン最上流に設置されたマルチリボンプロファイルモニター MRPM23 [6]において、実測ビーム位置と軌道計算を比較した。その結果、両者は一致しないことが分かった。SM の磁場測定誤差やアライメント誤差の影響では説明できない大きさのずれだったため、別の原因の調査を開始した。以下に進捗状況を報告する。

2. FX 機器の現状と軌道計算への反映

アップグレードされた 5 台の SM のうち、Eddy SM1, Eddy SM2, SM30, SM31 はそれぞれ詳細な磁場測定[7-16]を実施した上で、2021 年~2022 年にインストールした。SM32 はコイルに漏水とホローコンダクター(以下、ホロコン)接合不良[17]があった。コイル形成において、1 ターンごとにホロコン接合が行われているが、その内の 1 か所で放電が発生し、コイルの再製作を行うことになった。SM32 が使用できない期間は、他の SM の出力を上げて補い、NU へのビーム供給運転を実施予定だったが、2022 年 12 月に SM31 のホロコン接合部で放電[18]が発生した。原因を調査し、SM30, SM31, SM32 全てのコイルのホロコン接合部がロウ付けではなくはんだ付けで施工されていたことが分かった。はんだ付けでは強度不足のため、通電時の負荷の蓄積で剥がれて放電が生じる。SM32 が使用できない分、SM30, SM31 はフラットトップ (FT)の通電電流を上限の 4,000 A に設定していたため、より短期間で放電に至ったと考えられる。SM30, SM31 のコイルも再製作する。

NU 側の SM32 は 2023 年春に、Abort 側は同年夏に、ロウ付けの再製作コイルを組付けた。全てのコイル交換が完了してから磁場測定[19]を実施した。SM30, SM31 のコイル再製作は 2025 年夏までに完成予定で、それまでははんだ付けのコイルで運用を続ける。はんだ付け部分は剥がれないように治具で固定する一方、FT 通電電流を 3,200A 程度に抑えて、負荷を軽減している。また、放電のあった NU 側の SM31 は、全 30 ターンのうち破損した 2 ターンをバイパスし、28 ターンで運転している。磁場は Opera 3D [20]でシミュレーションし、磁場測定も実施した。両者に矛盾はなく、正常時の 93.3 %になるものとして軌道計算に反映している。

2023 年 11 月以降は FX 機器全ての磁場測定データが揃い、それらを使って軌道計算できるようになった。積分磁場(BL 積)の測定誤差は 0.1 %程度が見込まれる。仮に 0.1 %の誤差があった場合の ESM01 でのビーム位置への影響を Table 2 にまとめる。影響は軌道計算で求めたが、非常に小さいことがわかる。

SM のインストールにおいてはレーザートラッカー(API Radian R-50)を使用してアライメントしている。測量精度は ± 0.05 mm である。設置位置は、ビーム方向(s)に対して水平直交方向(X)の精度を優先し、0.5 mm 未満のずれとした。垂直方向(Y)は理想的な位置に対して 1 mm 程度ずれている箇所がある。s 方向については、低磁場 SM が周囲の機器との干渉のため、約 6 mm 上流側に設置された。他は 1 mm 未満の精度である。軌道計算への位置情報入力には s 方向のみを行っており、1 mm 精度で反映している。s 方向に 1 mm ずれていたとしても影響は Table 2 にまとめたずれの 1/10 程度であり、無視できる。

X, Y 方向のずれは、軌道計算に反映していないが、磁場分布への影響は 0.1 %未満であることから、これも無視できる。

Table 2: Beam Position Deviation with Setting Value +0.1 %

Item	Jun. 2024 FX to NU Setting Value	Setting Value +0.1 % Deviation at ESM01	
		Position (X) [mm]	Angle (DX) [mrad]
KM1	12 kV	-0.00	0.001
KM2	33 kV	0.03	0.001
KM3	33 kV	0.04	0.002
KM4	33 kV	0.04	0.002
KM5	33 kV	0.03	0.002
Eddy SM1	2.045 kV	0.09	0.006
Eddy SM2	2.075 kV	0.07	0.005
SM30	3,214 A	0.11	0.011
SM31	3,200 A	0.12	0.016
SM32	3,003 A	0.08	0.013
SM33	3,003 A	0.09	0.022

3. ビーム軌道の実測値と軌道計算の比較

FX 機器を新規パラメータで運用する場合、最初の NU へのビーム供給時にビーム軌道の調整を行う。基本的に高磁場 SM を調整し、ESM01 の中心をビームが通り、かつ角度も NU ラインに一致するようにする。ESM01 の読み値は、1 shot ごとに ±0.5 mm 程度の範囲でばらつくことが確認されており、軌道調整もその程度の精度で行う。角度は ±0.05 mrad の範囲で合わせている。また、MR の条件が変わらなければビーム軌道は上記の精度の範囲内で再現する。

Abort ラインへの取り出しについては、Abort Dump までビームロス無しで届くようにする。Abort Dump は φ720 mm と大きく、ダクト径も十分大きいので、細かい軌道調整は実施していない。ビーム位置は上流の MRPM23 と Abort Dump の直前にある MRPM75 で確認し、MRPM23 で ±20 mm 程度、MRPM75 で ±150 mm 程度の範囲内を目安にしている。Eddy SM1~SM31 は、NU 側と Abort 側を 1 台の電源で通電しているため、NU 側と Abort 側は共通の通電設定となる。SM32 と SM33 は NU 側と Abort 側で分かれており、それぞれの SM32, SM33 を直列に繋ぎ、1 台の電源で通電する。従って、NU 側と Abort 側を独立に調整できる。SM31 までは NU 側と共通設定になるので、Abort 側の軌道調整は、SM32, SM33 のペアのみで行うことになる。

ビーム軌道計算の精度を確認するため、2024 年 6 月 26 日のビーム試験でビーム軌道の実測値と計算値の比較を行った。比較した NU へのビーム供給用 FX 機器パラメータは以下の 3 種類を用意した。

- (1) 2024 年 2 月に NU へのビーム供給運転を行った際のパラメータ
- (2) 2024 年 6 月に NU へのビーム供給運転を行った際のパラメータ
- (3) 2024 年秋以降に運用予定の QDT155 でのビームロスをより低減させるための FX パラメータ

尚、パラメータ(2)と(3)は、周回ビームのオプティクス条件は共通で、QDT155 における取り出しビーム断面サイズが小さくなるように、チューンと MR の各四極電磁石 (QM) の K 値(B'L/Bp)が調整[21]されている。(1)~(3)の条件で、ESM01 および MRPM23 のビーム位置情報を取得した。

一方で、ビーム位置を実測した際の FX 機器パラメータを使って軌道計算を行い、ESM01 および MRPM23 で検知されるはずのビーム位置を求めた。この時、取り出しタイミングにおける、各 QM の K 値の設定指令情報も確認しており、軌道計算で使用する値と一致することを確認した。K 値設定は、実際の通電電流に 0.1 %の精度で反映されている。

Table 3 に、実測ビーム位置と軌道計算の比較結果を示す。

Table 3: Difference between Measured and Calculated Position

Study No.	NU ESM01 1.82 m from QFP156	Abort MRPM23 14.85 m from QFP156
	Difference [mm] (Calc. - Data)	Difference [mm] (Calc. - Data)
(1)	-2.7	-11.9
(2)	-0.6	-9.4
(3)	-1.4	-9.3

NU 側、Abort 側いずれの取り出しでも、試験の条件(1)~(3)全てで、軌道計算による位置は、実測位置よりも周回ライン側にある。これは、実際のビームは軌道計算よりも強く蹴られていることを意味する。

ESM01 での実測位置と軌道計算の差に注目すると、条件(1)では約 3 mm となっており、Table 2 や、アライメント誤差で説明できる大きさを 10 倍ほど上回る。これは、FX 機器の生成磁場の誤差やアライメント誤差以外に原因があることを示す。MRPM23 は ESM01 よりも約 13 m 下流にあるため、ずれが拡大して見える。

4. 軌道計算のずれの原因調査

4.1 ビーム位置モニタの設置位置

MR は 2011 年の東日本大震災で、トンネル内にひびが入るなど損害を受けている。主要な電磁石は再アライメントされたが、NU ライン、Abort ラインと MR 側の位置関係は、建屋の歪みを吸収しきれず、ずれが残っている可能性がある。ビーム調整で使用するモニタの位置がずれていると結果に大きく寄与するので、MR の QM 配置を基準にして、NU 側の ESM01 と Abort 側の MRPM23 をレーザートラッカー(精度 ±0.05 mm)で測量した。

ESM01 (Fig. 3)には、測定のための基準座が用意されており、図面通りに製作されているものとして測量した。また、ESM01 の下流にあるステアリング電磁石 2 台の基準座も測量し、周回ラインに対する、NU ラインの角度も ± 0.2 mrad 程度の精度で測定した。

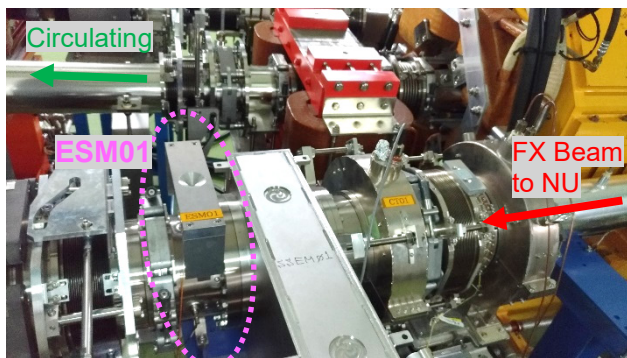


Figure 3: ESM01 on NU line.

MRPM23 (Fig. 4)については、直接測量することができず、チェンバーおよび MRPM23 の挿抜駆動軸の位置から MRPM23 の位置を推定する手法をとった。チェンバーや駆動軸の円筒部分について、多数の点を測量し、円形近似から中心点を求めるが、円の歪みは 0.3 mm ほどあり、また、レーザートラッカーの設置場所が限られ、円周の 1/3~1/2 ほどしか測量できなかったため、測定精度は ± 0.5 mm 程度と推測する。周回ラインに対する、Abort ラインの角度は、Abort ライン上の QM 2 台の測量結果から算出した。測定点が 2 点しかなく、Abort ライン全体の角度を示すとは言えないので、参考値として扱う。

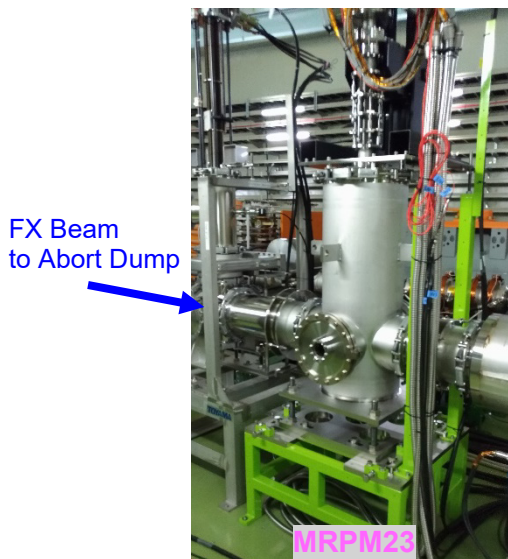


Figure 4: MRPM23 chamber on abort line.

Table 4 に ESM01 と MRPM23 の測量結果と軌道計算で想定している位置とのずれを示す。ESM01, MRPM23 ともに軌道計算の想定位置よりも取り出し側に設置されていた。つまり、実測ビーム位置は取り出し側にシフトすることになる。Table 3 では、軌道計算によるビーム位置が周回ライン側にあることから、実測ビーム位置と軌道計算結果をより乖離させる結果だった。

Table 4: Survey Results

Item	Distance (X) from Circulating Line [mm]	Angle (DX) to Circulating Line [mrad]
NU ESM01	SAD: 685.6	SAD: 77.22
	Survey: 686.7	Survey: 77.38
	δ : +1.2	δ : +0.16
Abort MRPM23	SAD: 1689	SAD: 77.22
	Survey: 1690	Survey: 77.29
	δ : +1	δ : +0.07

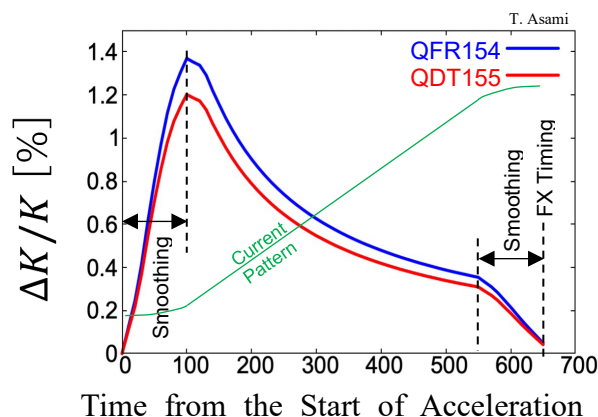


Figure 5: K value fluctuation due to eddy current in the duct.

4.2 QM ダクトに生じる渦電流の影響

MR の QM はパターン通電で運用されており、加速区間の磁場変化に伴い、金属製のダクトに渦電流が生じる。この渦電流の影響で、ビームが受ける磁場も変化する。QFR154 と QDT155 は取り出しビームが通過する都合で、他の QM とは異なり、Fig. 2 に示したようにダクト断面が星形になっているが、この形状の違いにより、渦電流の効果も他の QM より大きい[22]。ビームを取り出すタイミングでは、QFR154, QDT155 の磁場変化は小さいが、ダクトの渦電流は残っている可能性が考えられたため、取り出しタイミングでの渦電流の影響をシミュレーションした。加速開始から取り出しまでの K 値の変化を Fig. 5 に示す。取り出しタイミングでは、QFR154 の K 値の変動が 0.05 %、QDT155 が 0.04 %となり、影響は無視できると言える。よって、実測ビーム位置と軌道計算のずれの原因ではない。

4.3 QM の取り出しビーム通過領域の磁場分布

取り出しビームは QFR154 と QDT155 (Fig. 2 参照)でボア径の外側を通る。SAD 上で扱う磁場分布は、取り出しビーム通過領域でも、均一な磁場勾配があるものとして扱っている。Opera で 3D 磁場計算を行い、取り出しビーム通過領域の磁場分布について、軌道計算で扱う磁場分布との差異を調査した。3D 磁場計算はメッシュ設定が 0.5 cm と粗く、各評価点間の磁場値のばらつきも 1 %程度となっているが、BL 積の算出においては、0.1 %の精度となる。ビーム方向 L に直交する水平方向を X 軸

として、X=0 は QM の中心である。各 X 位置での BL 積を求め、Fig. 6 にプロットした。SAD では X 方向に一樣な磁場勾配が設定されているので、直線となるが、3D 磁場計算では QM の磁極形状やコイル配置等の構造による影響が反映され、QM 開口の端部では BL 積の低下が確認できる。Figure 7 に軌道計算で扱う BL 積に対する 3D 磁場計算の差分を示す。

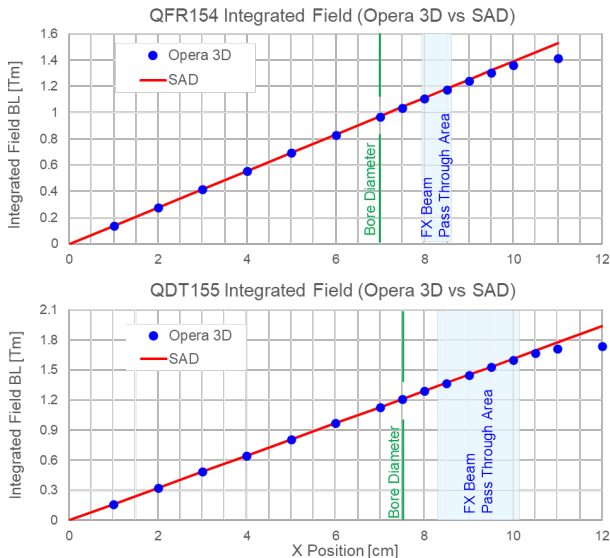


Figure 6: Integrated field simulation.

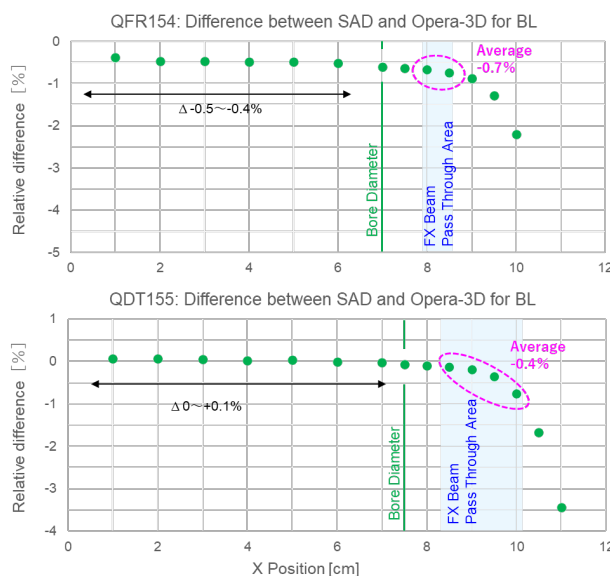


Figure 7: Difference in integrated field between used by SAD and simulated by Opera 3D.

ビーム通過領域における BL 積の差は、QFR154 で平均-0.7%、QDT155 で平均-0.4%だった。差の平均を軌道計算に反映させ、実測ビーム位置とのずれを見直した。ESM01 と MRPM23 の測量結果も含め、最終的なずれは Table 5 の通りとなった。明らかに実測位置との差は小さくなっている。しかし、ESM01 では最大 2 mm、MRPM23 では最大 9 mm のずれが解消できていない。QM の実際の磁場分布が軌道計算に反映されていないことは、一つの大きな原因と言えるが、他の原因の追究

は継続する必要がある。

Table 5: Difference between Measured and Calculated Position Reflecting the Investigation

Study No.	NU ESM01 Difference [mm] (Calc. - Data)		Abort MRPM23 Difference [mm] (Calc. - Data)	
	Position	QM BL	Position	QM BL
(1)	-2.7	-3.9	-2.0	-11.9 → -12.9 → -9.0
(2)	-0.6	-1.8	+0.5	-9.4 → -10.4 → -6.6
(3)	-1.4	-2.6	-0.4	-9.3 → -10.3 → -6.4

5. まとめと今後の課題

FX セクションでのビームロス低減のために、ビーム軌道を 1 mm 以下の精度で精細に調整する。これにより軌道計算にも同等の精度が要求されるようになった。アップグレードされた SM の磁場測定データとアライメント情報を反映させ、軌道計算を行っているが、取り出しビームライン上の ESM01 や MRPM23 で得られるビーム位置は、軌道計算と一致せず、軌道計算よりも強くビームが曲げられていた。両者のずれは FX 機器の磁場測定や設置位置の誤差では説明できない大きさで、他の原因を調査した。ESM01 および MRPM23 の設置位置を測量すると、いずれも軌道計算上の想定位置に対して取り出し側に約 1 mm ずれていたが、それは実測と軌道計算結果とのずれを拡大させる結果だった。QM はパターン通電の加速区間でダクトに渦電流が発生し、生成磁場に影響を与えることが指摘されていた。取り出しタイミングでも渦電流の効果が残っている可能性が予想されたが、シミュレーションの結果、無視できるとわかった。また、取り出しビームは QFR154, QDT155 のボア径の外側を通ることがわかっているため、3D 磁場計算と軌道計算で扱う磁場分布を比較した。1%未満だが取り出しビーム通過エリアで BL 積が低下することが分かった。現時点で得られた BL 積の低下を磁場計算に反映させると、実測とのずれが縮小した。QM の実際の磁場分布が反映されていないことは、主な原因の一つと言えるが、ずれの問題は解消されておらず、他の原因追究も継続する。

今後は、QFR154, QDT155 の 3D 磁場計算を詳細に行い、ビーム軌道に沿った積分磁場を軌道計算に反映させ、実測ビーム位置との差を高精度で評価する。また、Abortラインへの取り出しは、NU供給以外の多様な条件がある。それらについても実測ビーム位置と軌道計算の差を求め、MR運転条件の違いが与える影響を調査する。周回ライン上のビーム位置モニターも取り出しタイミングに限って、ビーム位置データを取得できるので、ESM01, MRPM23 以外の情報も使い、実測と軌道計算の違いの原因追究に役立てる。

参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/c/press-release/2024/01/17001271.html>
- [2] 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/FRP0/FRP006.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] SAD code; <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [5] M. Friend, “J-PARC Neutrino Primary Beamline, Beam Monitors & Upgrade”.
<https://conference-indico.kek.jp/event/16/contributions/314/attachments/54/60/170918-10-Friend-J-PARCnu-PrimaryMonitors.pdf>
- [6] K. Sato *et al.*, “Development and Evaluation of Multi-ribbon Profile Monitor at J-PARC MR Abort Line”, *Proc. PASJ2019*, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp.1118-1121.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI036.pdf
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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/WEP0/WEP075.pdf
- [10] 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/WEP0/WEP066.pdf
- [11] 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/WEPH/WEPH028.pdf
- [12] 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
- [13] T. Shibata *et al.*, “The New Low-field Septum Magnet for Upgrading of Fast Extraction in MR J-PARC (7)”, *Proc. PASJ2021*, QST-Takasaka (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp.262-266.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MOP0/MOP015.pdf
- [14] 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
- [15] 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
- [16] T. Shibata *et al.*, “The New High-field Septum Magnet for Upgrading of Fast Extraction in MR J-PARC (3)”, *Proc. PASJ2021*, QST-Takasaka (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp.826-830.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/THP0/THP014.pdf
- [17] 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
- [18] S. Iwata *et al.*, “Solutions for the Manufacturing Defect of New Septum magnets Using for Fast Extraction in J-PARC Main Ring”, *Proc. PASJ2023*, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp.539-544.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/WEP2/WEP22.pdf
- [19] T. Shibata *et al.*, “The Recover and Performance Evaluation of a New High Field Septum Magnet SM32 for Fast Extraction in J-PARC MR”, *Proc. PASJ2024*, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEP056.
- [20] Opera 3D simulation software.
<https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/opera/>
- [21] T. Yasui *et al.*, “Resonances in J-PARC MR and Future Strategy”, *Proc. PASJ2024*, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEP088.
- [22] T. Asami *et al.*, “Evaluation of the Effects of Eddy Currents on Vacuum Ducts in J-PARC MR”, *Proc. PASJ2021*, QST-Takasaka (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp.454-457.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP017.pdf