

J-PARC MR 速い取り出し用新セプタム電磁石のインストール

THE INSTALLATION OF THE NEW SEPTUM MAGNETS FOR FAST EXTRACTION IN J-PARC MAIN RING

岩田宗磨[†], 石井恒次, 芝田達伸, 杉本拓也, 五十嵐進, 佐藤洋一, 松本教之, 松本浩
 Soma Iwata[†], Koji Ishii, Tatsunobu Shibata, Takuya Sugimoto, Susumu Igarashi, Yoichi Sato,
 Noriyuki Matsumoto, Hiroshi Matsumoto
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We aim to supply a high-power proton beam of 1.3 MW to the neutrino facility from J-PARC Main Ring (MR) by shortening the repetition cycle to 1.16 s from 2.48 s and increasing the number of particles by 1.3 times. The septum magnets for fast extraction (FX) needed to be replaced to reduce the heat that is generated as a result of shortening the repetition cycle. The two beamlines to the neutrino facility and to the abort dump have a symmetrical layout of 6 septum magnets each, a total of 12. Two low field magnets (EDDY1 and EDDY2) and three high field magnets (SM30, 31, 32) were replaced in period from July 2021 to May 2022. The most downstream high field magnet (SM33) reuses the septum magnets that have been used. In this presentation, we will report the installation work of the septum magnets on the beamlines and the alignment results using the laser tracker.

1. はじめに

J-PARC MR (Fig. 1)は、大強度陽子線を供給することにより、T2K 長基線ニュートリノ振動実験[1]に貢献している。ニュートリノ検出器側ではハイパーカミオカンデ[2]の建設が進んでおり、J-PARC MR も出力ビームパワーを上げるために一部の機器をアップグレードする必要がある。強度を約 1.3 倍の 3.3×10^{14} PPP (Particles Par Pulse) に増強し、繰り返し周期を 2.48 秒から 1.16 秒(通称 1 Hz 運転)に短縮することで、1.3MW の出力を達成することを計画[3, 4]している。

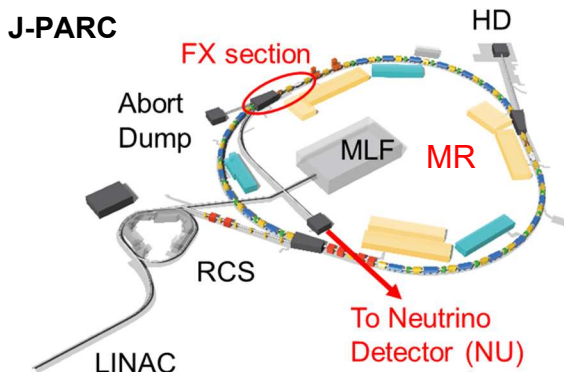


Figure 1: Schematic layout of J-PARC.

Figure 2 にアップグレード後の J-PARC MR FX セクションのセプタム電磁石(SM)のレイアウトを示す。FX セクションは、リングの内側へビームを取り出すニュートリノ(NU)ビームラインと外側へ取り出す Abort ビームラインがあり、SM は周回ラインを挟んで対称に配置されている。上流から 2 台目までを低磁場 SM、以降を高磁場 SM と呼ぶ。

低磁場 SM[5-11]は、1 Hz 運転による発熱問題等を解決するために、約 0.3 T、パルス運転の渦電流誘導型

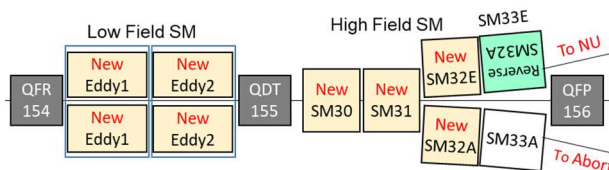


Figure 2: New layout of the FX septum magnets.

(EDDY1, EDDY2)に変更された。約 1 T の高磁場 SM[12-14]は、上流側の 3 台 (SM30, SM31, SM32) を新たに作り直した。それらは周回ラインと NU, Abort ラインが近接しているため、SM30 と SM31 の上流と下流、および SM32 の上流では、1 つの大きなフランジに 3 本のビームダクトが溶接されている。全て金属製の場合、各ダクト間でループ回路ができるので、SM パターン励磁に伴い誘導電流が生じ、発熱する。NU, Abort ラインのダクト材質をセラミックに変更し、電流が流れないようにした。

発熱対策の他に、ビームロスによる残留線量の低減対策も必要である。現在は、低磁場 SM と高磁場 SM の間にある四極電磁石 QDT155 の垂直アパーチャが最も狭く、大口径化の計画[15]がある。磁極長も拡大するため、SM31, SM32 は磁極長を縮小し、SM30~SM32 の設置位置を下流側に変更した。SM33 については、新規製作はせず、撤去した高磁場 SM の磁極とコイルを再利用し、真空ダクトのみ新規製作をして新 SM33 として構築した。Abort ライン側については旧 SM33A をそのまま使用した。NU 側に使用されていた旧 SM33E は磁極間距離が旧 SM33A に比べて 20 mm 狭いため、旧 SM33A と同形状の旧 SM32A を新 SM33E として使用した。

新 SM への交換作業は、2021 年 7 月から 2022 年 5 月までの期間で実施した。新 SM32 にはコイルの欠陥[16]があり、この期間でのインストールは断念した。新 SM32 の空きスペースは、上下流の真空ダクトを繋ぐ一時的なダクトを用意した。2022 年 6 月のビーム試験において、繰り返し周期 1.36 秒で 3 GeV ビームを Abort ラインへ取り出すことに成功[17]した。

[†] soma.iwata@kek.jp

本報告では、新 SM のインストール作業について紹介し、レーザートラッカー(LT)を使用した精密アライメント結果と得られたアクセプタンスについて報告する。

2. 新 SM のインストール作業

新 SM をインストールする前に、旧 SM を撤去(Fig. 3)する必要があった。放射化により、放射線管理区域外へは持ち出せないため、MRトンネル内に旧 SM の保管場所を確保するところから作業が始まった。



Figure 3: Disassembly of SM31 and SM32A/E.

旧 SM 撤去後は、新たにアンカー打設し、リニアモーションガイド(LMG)を設置した。各 SM はメンテナンス性を考慮し、容易にラインイン / アウトができるよう、LMG 上に設置される。また、各 SM の架台には、高さおよび傾きを調整する機構を用意していないため、LMG の台座で調整する。LMG 台座は、床の高低差を吸収するためにも、高さ・傾き調整機構が必要だった。LMG のアライメントも重要で、LT を使用し、高さを ± 0.05 mm、ビーム軸方向の位置を ± 0.1 mm の精度で合わせた。前者は後述する LT によるアライメント精度を意識し、後者は LMG2 本を平行設置する際の許容誤差未満となるようにした。

2.1 低磁場 SM のインストール

Figure 4 に低磁場 SM 交換前後の写真を示す。また、Fig. 5 に示すように EDDY1, EDDY2 本体は、真空チャンバー内に組み込まれる。ビーム通過が 15 万回に及ぶ周回ラインのアクセプタンス確保が優先されるが、ビームライン上では、真空チャンバー内の測量ができないため、真空チャンバーの基準座を介して、2段階の測量が必要となる。各電磁石本体は、まずベースプレート上で位置合わせを行い、その後ベースプレートごと真空チャンバー内に挿入した。NU/Abort 両側のセパタ面に挟まれた周回ラインのダクト型磁気シールド[18]中心が、真空チャンバーのフランジ中心と一致するようにベースプレートの位置を合わせ、LT で真空チャンバー基準座に対するダクト型磁気シールド内壁面や磁極のビーム通過部分の内壁面を測量した。この測量データを元にビーム軸に対する最適な基準座座標を求めた。最後に真空チャンバーを LMG 上に設置し、ビームライン上でのアライメントする。架台の水平方向調整機構を使い、基準座が前述の座標と一致するようにした。

2.2 高磁場 SM のインストール

Figure 6 に高磁場 SM 交換前後の写真を示す。

新 SM30, SM31 は、磁極内に周回 / NU / Abort ラインの 3 本の真空ダクトを設計通りの位置に組み込んだ後、

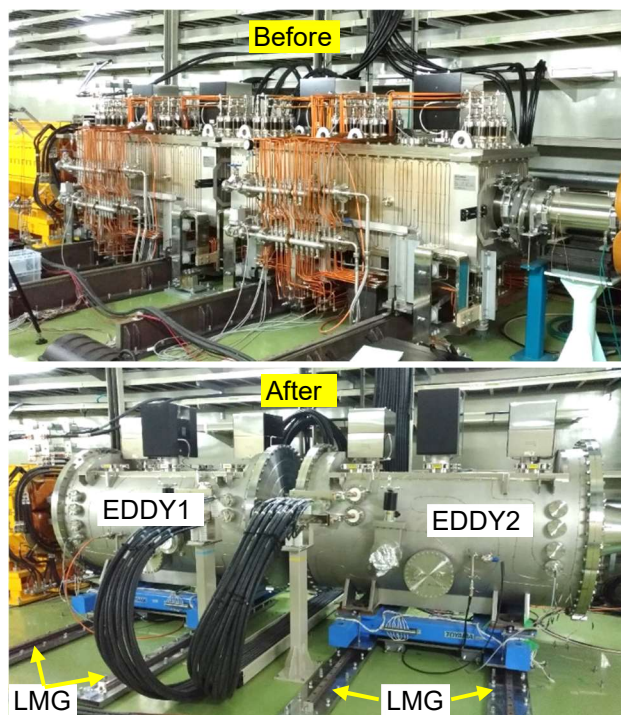


Figure 4: The previous and new low field SM.

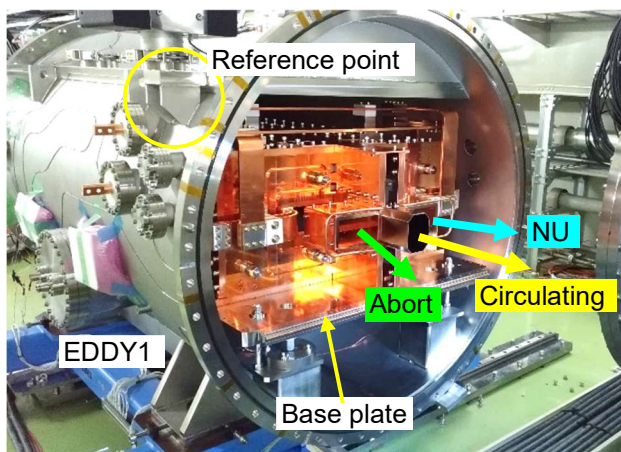


Figure 5: EDDY1 in the vacuum chamber.

3 本を 1 枚のフランジに溶接した。アライメント手順は、低磁場 SM の場合と同様で 2 段階の測量を要する。磁極の基準座に対する真空ダクト内壁面やフランジ中心を測量し、そのデータから求めた最適な基準座位置となるようにビームライン上で位置合わせをした。

インストールが延期されている SM32 についても、同様の手順であるが、磁極は NU 側(SM32E)と Abort 側(SM32A)で分離しているため、事前に架台上で双方のアライメントが必要となる。

SM33E, SM33A については、電磁石自体は再利用だが、SM32 との間隔が変わるため、真空ダクトは交換した。測量に関して、磁極の基準座がコイルに隠れるため、磁極と真空ダクト内壁を同時に測量できる LT 設置位置がなかった。従って正確なアパーチャは把握できていない。フランジ中心位置の測量や、ノギス等の測定により、真空ダクト内壁面は設計値 ± 0.5 mm 程度の精度で設置できており、ビームエンベロープに対しアパーチャにも十分

な余裕があるので問題ないと言える。

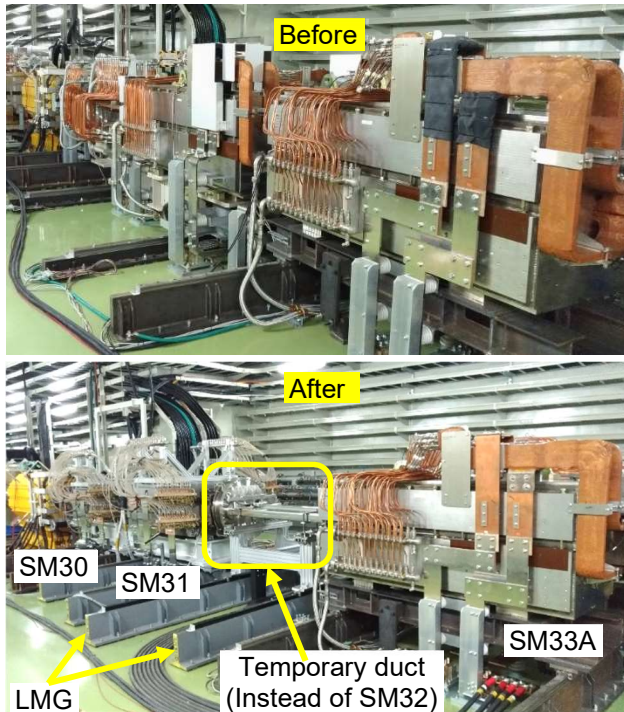


Figure 6: The previous and new high field SM.

3. アライメントの精度

測量およびアライメントに使用した LT は、API 社製の Radian R-50 である。SM30, SM31 のアライメント作業の様子を Fig. 7 に示す。

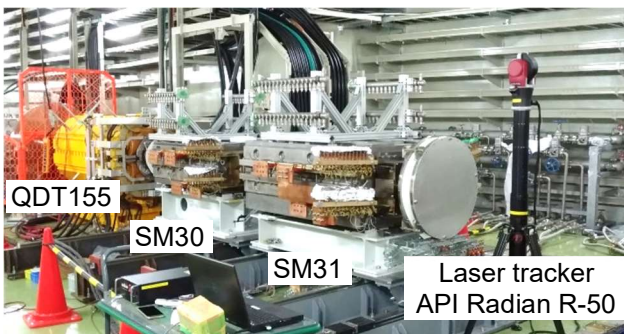


Figure 7: Alignment work for SM30 and SM31.

3.1 基準座標の取得

アライメント対象に最も近い上流側の四極電磁石 (QM) と下流側の QM (Fig. 7 の場合は QDT155 と QFP156) を結んだ直線をビーム軸相当として扱い、基準座標系の X 軸とした。X 軸に直交し、LT の持つ水平面と平行な方向を Y 軸、X-Y 平面に垂直な方向を Z 軸とした。

尚、この座標の取り方では QM のアライメントエラーが SM の設置位置に影響してしまうが、実際のビーム軌道と QM の詳細な位置関係は把握できておらず、評価が難しいので、ここでは考慮しないことにする。局所的なアライメントとなるが、1 か所の LT 設置ポイントから測量できる 3~4 台の QM 座標から最小二乗法で得られる直線と、2

台(QFR154-QDT155 または QDT155-QFP156)が作る直線を比較すると、SM の設置位置に与える影響は±0.05 mm 程度で、後述する測量誤差と同レベルなので、隣接する 2 台の QM で座標を作ることにした。

3.2 測量誤差

測量誤差の要因は、以下の 5 つが考えられる。

(1) LT 自身の誤差

LT の測量データは、100 回の測定データ(距離、水平角、垂直角)を平均し、座標変換して出力される。出力値のばらつきは、ある固定点を連続測定してみると、各軸それぞれ±0.01 mm (2σ)だった。

(2) ターゲットの設置誤差

ターゲット(リフレクタ)の方では、設置時に位置のばらつきが出る。

磁極の基準座を測量する場合は、専用のターゲット台座 (Fig. 8) を使用する。基準座のピン穴に台座を挿入する構造になっているが、その嵌め合いには 0.01~0.02 mm のわずかな隙間があり、加工精度による基準座ごとの個体差も予想されるが、(1)の誤差と合わせて概ね±0.02 mm (2σ)である。

真空ダクト内壁面など基準座以外を測量する場合は、対象の面に直接ターゲットを接触させる。測量点により誤差の条件は様々である。真空ダクト端部は溶接部分が近くにあるため、歪み等で面精度が悪く、接触点がわずかにずれるだけで測量値が変化する。この場合は測定点を増やし平均化して対応した。周回ラインのダクト型磁気シールドは強度が弱く、ターゲットを当てる方向にたわむ。この場合は、対向面の測量でターゲットを当てる点と向きを対称にすることで、ダクト中心位置を求める際に誤差を相殺するようにした。また、より強度のある角部に限って測量した。いずれの場合も測定回数を増やし平均値を求めるようにした。そのように対応しても基準座の測量に比べると誤差が大きくなる傾向だった。

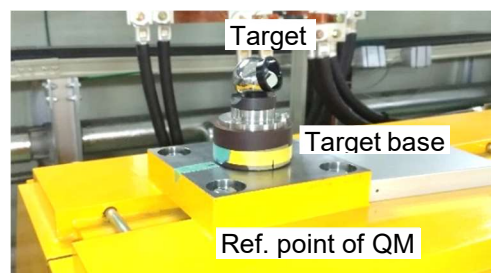


Figure 8: The reference point with the target.

(3) LT 出力値のドリフト

LT 出力値の時間変化(ドリフト)の一例を Fig. 9 に示す。変化の方向に規則性はなく、ドリフトの大きさも毎回異なった。軸との依存関係もないように見受けられる。経験的に起動後 1 時間程度経過すると、変動の傾きが緩やかになることが多いので、LT は 1 時間の暖機運転後に使用することになっているが、暖機運転後もドリフトがなくなるわけではなかった。20~30 分ごとに基準点を測量し、ドリフトを監視するようにした。ずれが 0.02 mm を超えた場合は、他の測量点も見直し、一定方向のずれが確認できる場合は、座標から測量をやり直すようにした。

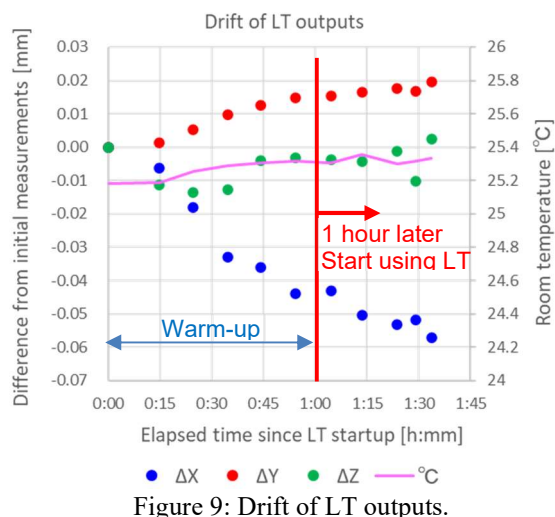


Figure 9: Drift of LT outputs.

(4) 座標測量の誤差

座標を得るために複数点を測量するが、それぞれに(1)~(3)の誤差を持つ。これにより本来の座標軸に対して、測量で得た座標軸はずれを持つことになる。しかし、各測量点の分布幅の中に、得られる座標軸は収まっているはずなので、(1)~(3)の誤差よりも大きくなることはない。

(5) 基準座を介する2段階測量による誤差の積重ね

前述の通り、ビームライン上では真空ダクト内壁等を直接測量できないので、磁極基準座に対する位置関係を把握した上で、基準座を最適な位置に調整する。したがってLT測量は2回行うことになり、(1)~(4)の誤差が2回分積み重なる。

以上の個々の誤差について、具体的に評価できないものもあるが、同じ測量を何度か繰り返すことで、全体的な誤差を評価しようと試みた。試行回数が少ないので、ばらつきの幅でみると、QM 2 台を基準としたときの磁極基準座の位置の誤差は、 ± 0.03 mm 程度と見込まれる。真空ダクト内壁等の測量は、ターゲットを当てる箇所 conditions に左右されるが ± 0.03 mm ~ ± 0.05 mm となっていた。これらにより、2段階測量の精度は ± 0.05 mm 程度であると結論付けた。

4. アライメント結果

低磁場 SM のアライメントは 2022 年 4 月に、高磁場 SM は同年 5 月に実施した。アライメント前にビームエンベロープの計算を行い、周回ビームとアパーチャが近接する箇所は、特に慎重に位置合わせした。周回ビームはワンパスの出射ビームと異なり 15 万回ほど通過するため、ビームロスの影響が大きい。アライメント後に得られたアパーチャをビームエンベロープとともに Fig. 10 に示す。エンベロープの計算には SAD (Strategic Accelerator Design) [19]を使用した。チューンは、FX 運転時の $(v_x, v_y) = (21.35, 21.43)$ とした。Momentum Compaction Factor は 0.4%、Closed Orbit Distortion は 1 mm とした。

アライメント結果は設計アパーチャ[20]とほぼ重なっている。特に水平方向の周回ビームエンベロープと近接する EDDY1 上流側と SM30 上流側につい

ては、詳細なアライメント結果を Fig. 11, Fig. 12 に示す。EDDY1 では、周回ラインのダクト型磁気シールド内寸が、設計より 0.3 mm 小さくできており、アパーチャ中心は 0.04 mm NU 側にずれている。SM30 上流側は、周回ダクト(インナー磁気シールド)内壁面が平行四辺形状に歪んでいた。ダクトの 4 隅を測量しており、ビーム高さでの内壁面水平位置は平均して求めた。NU 側、Abort 側共に設計よりも 0.01 mm 狭く、アパーチャ中心のずれは 0.00 mm でビーム軸と一致している。それら以外のアクセプタンスに影響しない箇所については、設計アパーチャに近付けることよりも、磁極の回転や傾き、真空ダクト締結に支障が出ないことを優先した。真空ダクトのフランジ溶接は、位置がずれていたり傾きがあった

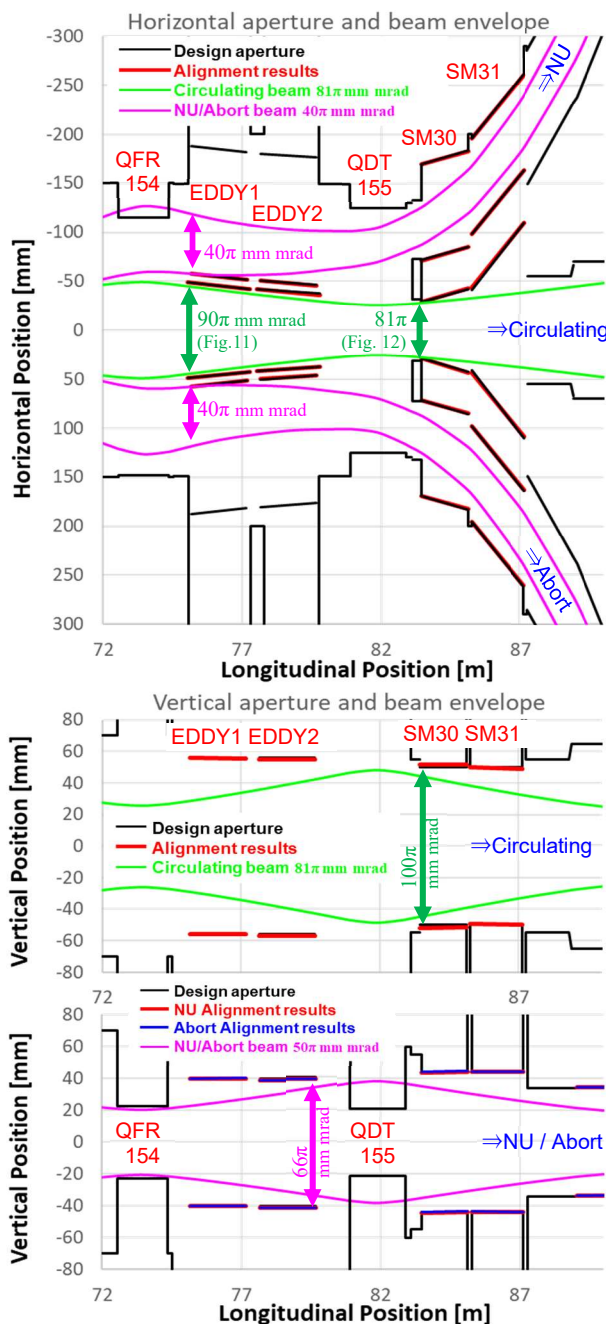


Figure 10: Alignment results and envelopes.

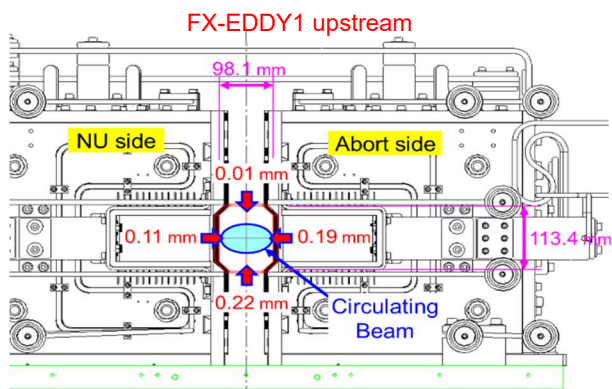


Figure 11: Alignment results of EDDY1 upstream.

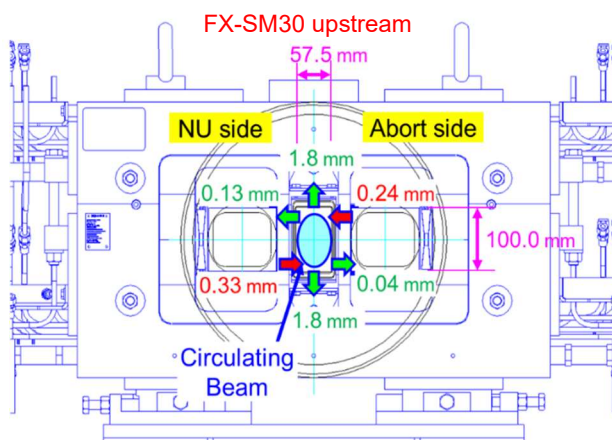


Figure 12: Alignment results of SM30 upstream.

りするので、フランジ中心がビーム軸に対して ± 0.5 mm 範囲内にあるように気を付けた。よって、設計アパーチャに対してずれが大きいところも生じた。ずれが最大となったのは EDDY2 の垂直方向で 1.2 mm 低く設置された。これは真空チェンバー内の磁極のアライメントが十分でなかったことも要因となっているので、今後機会があれば修正したい。

アクセプタンスについて、目標値は周回ラインが水平、垂直共に 81π mm mrad 以上である。これは MR への 3 GeV 入射ビームのエミッタンスに相当する。NU / Abort ラインは水平、垂直共 30π mm mrad 以上を目標とする。30 GeV 取り出しビームのビームハロー成分を含めた分布を考慮したときのエミッタンスに相当する。尚、Abort ラインにおいては、ビーム試験や、何かの問題でビームを捨てる際に、 81π mm mrad のビームが通るので、アクセプタンスは極力大きい方が良い。アライメント結果から得られるアクセプタンスは、前述の測量誤差の 2 倍を考慮し、内壁面よりも 0.1 mm 狭いものとして求めた。周回ビームに対しては、水平 81π mm mrad、垂直 100π mm mrad のアクセプタンスを確保でき、目標値を達成した。出射ビームに対しては、NU / Abort とも水平 40π mm mrad、垂直 66π mm mrad を確保した。水平方向について、Fig. 11 では周回ビームラインから遠い方のアパーチャに余裕があるように見えるが、これは低磁場 SM より上流側にあるキッカー電磁石(KM)のビーム曲げ角の上限(連続運転可能な最大出力=充電電圧 33 kV 時)で決まっている。3 GeV ビームの場合は、より大きく曲げることができ、ビーム軌道を外側に動かすことで 60π mm mrad 程度のアクセプタ

ンスとなる。FX SM のアクセプタンスに比べて、QFR154 の水平アパーチャや QDT155 の垂直アパーチャが狭くなっているが、それらは近い将来改修する予定[21]で、十分なアクセプタンスとなるはずなので、ここでは考慮しない。

各 SM のアライメント後、真空ダクトの締結をし、2022 年 6 月のビーム試験で、Abort ラインへの 3 GeV ビーム取出しに成功した。

5. まとめと今後の予定

J-PARC MR 高出力化に向けて、FX SM もアップグレードが必要とされた。新たな SM を製作し、2021 年 7 月から 2022 年 5 月の期間にインストールを実施した。SM32 は故障のため、インストールは延期されたが、EDDY1, EDDY2, SM30, SM31 は LT を使用した精密アライメントにより、アクセプタンスの縮小が最低限になるように設置でき、目標のアクセプタンス確保に成功した。

2022 年 6 月のビーム試験では 3 GeV ビームを Abort ラインへ取り出すことができた。同年 11 月のビーム試験では、SM32 無しの条件で 30 GeV を取り出す予定である。SM32 のインストールは、2023 年の夏季メンテナンス期間中を予定している。他の SM 同様に LT を使ってアライメントする。

また、FX SM 以外のアパーチャ拡張が必要である。QFR154 の真空ダクトは左右非対称で、NU 側が狭く作られている。このため NU ラインの水平アクセプタンスが目標値の 30π mm mrad に及ばない。これを 2023 年度に左右対称なダクトに作り直したいと考えている。NU / Abort ライン双方の垂直アクセプタンスを制限している QDT155 の大口径化計画も進めていきたい。

6. 謝辞

FX SM インストール作業は、主に株式会社 NAT 殿にサポートいただいた。多大な貢献に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- [2] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/>
- [3] S. Igarashi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01.
- [4] KEK Report 2021-2, June, 2021.
- [5] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.86-90.
- [6] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p.1204-1208.
- [7] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017, p.1051-1055.
- [8] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.499-503.
- [9] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.361-365.
- [10] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2020, p.594-598.
- [11] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, p.262-266.
- [12] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.85-89.
- [13] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2020, p.388-392.
- [14] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, p.826-830.
- [15] K. Fan *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.951-954.
- [16] S. Iwata *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FROA05.
- [17] T. Yasui *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FROA01.
- [18] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, p.1204-1208.
- [19] SAD code; <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [20] S. Iwata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, p.461-465.
- [21] S. Iwata *et al.*, Proc. of IPAC, 2021, p.3103-3105.