

J-PARC MR 速い取り出し用新セプタム電磁石の故障への対応

COUNTERMEASURES FOR THE FAILURE OF THE NEW SEPTUM MAGNET 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, 發知英明, 佐藤洋一,
安居孝晃, 松本教之, 松本浩

Soma Iwata[#], Koji Ishii, Tatsunobu Shibata, Takuya Sugimoto, Susumu Igarashi, Hideaki Hotchi, Yoichi Sato,
Takaaki Yasui, Noriyuki Matsumoto, Hiroshi Matsumoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

From July 2021, upgrade works of the septum magnets for fast extraction (FX) commenced with an aim of increasing the beam power of MR to 1.3 MW from 500 kW. However, we found defects that are water leakage and brazing failure in the magnetic coil of the septum (SM32) in August 2021. We decided to postpone its installation and produce new magnet coils for SM32. Full restoration of SM32 is expected in the summer of 2023. The beam extraction in June 2022 was performed using a temporary vacuum duct instead of the SM32 magnet, and the extraction beam orbit was maintained by increasing the magnetic field of the other five septum magnets. In this presentation, we will report on the study of the beam extraction method without SM32 during the period until recovery, and the result of the beam test in June 2022.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR)は、ニュートリノ実験施設 (NU)へ速い取り出し(FX)でビームを供給してきた。ビームパワーは2020年1月に515 kWを達成したが、ニュートリノ振動測定[1]の統計量を上げるために更なる高出力化が計画[2, 3]されている。運転周期を2.48 sから1.16 s (通称1 Hz 運転)に短くし、ビーム強度も 2.6×10^{14} PPS から 3.3×10^{14} PPS に増強することで、1.3 MW出力となることを目指している。

FX用の電磁石レイアウトをFig. 1に示す。上流から、5台のキッカー電磁石(KM)、2台の低磁場セプタム磁石(SM)、および4台の高磁場SMが配置されている。リング内側へ取り出すのがニュートリノ(NU)ライン、外側へ取り出すのがAbortラインである。

1 Hz 運転に向けて、FX用SMのアップグレードが必要とされ、2021年7月より交換作業が実施された。低磁場SMは渦電流誘導型(EDDY SM)に変更した。変更前はパターン運転だったが、通電を約1 msのパルス運転とすることで発熱が低減される。また、セプタムコイルもなくなるため、通電時の振動によるホロン絶縁膜の損傷リスクがなくなり、耐久性向上に寄与する。高磁場SMのうち、SM30, SM31, SM32が交換対象で、誘導電流による発熱対策のため、真空ダクトがセラミック製に変更された。また、ビームロス低減のため、アパーチャが狭い四極電磁石 QDT155 を大口径化する計画[4]がある。磁極長も大きくなるため、SM30~SM32は磁極長および設置位置も変更される。SM33については、取り外しAbort側のSM32Aを上下流の向きを反転させて、NU側の新SM33Eとして再利用した。Abort側のSM33Aは交換し

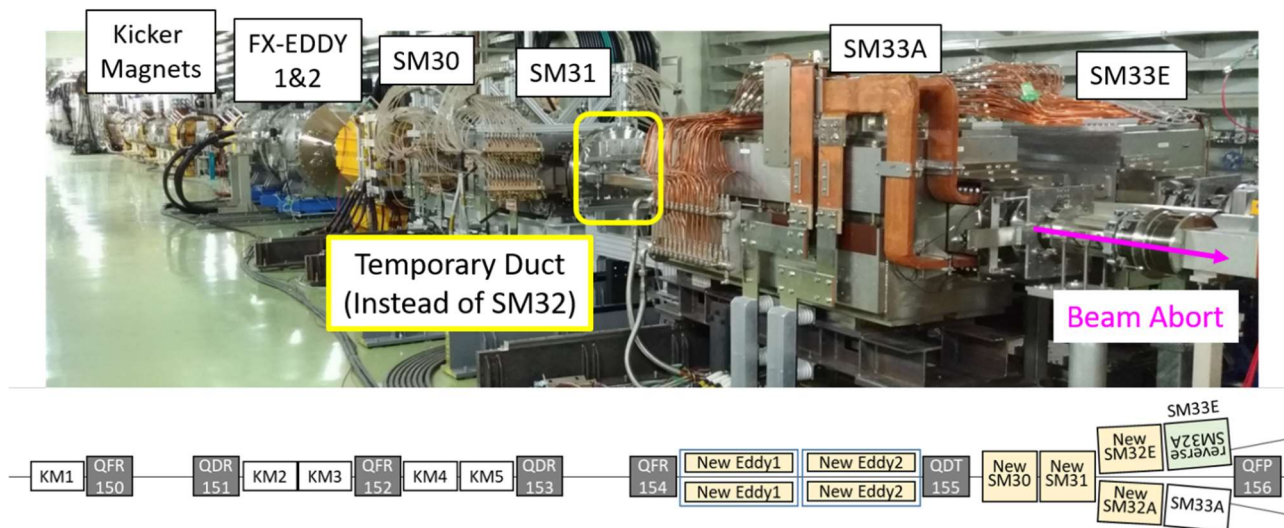


Figure 1: The layout of the FX magnets at J-PARC MR.

[#] soma.iwata@kek.jp

ない。新 SM のインストールの詳細は文献[5]にまとめている。

しかし、新 SM32 については、インストール前に不具合が確認された。SM32E のコイルに漏水とロウ付け不良があり使用不能と判断したが、コイルの再製作は、2022 年 6 月のビーム試験までに完了せず、ビーム試験は SM32 無しで実施せざるを得なかった。ビーム軌道計算を行い、周囲の SM の生成磁場を大きくすることで対応することにした。また、上下流の真空ダクトは仮設ダクトを要して接続した。2022 年 6 月のビーム試験[6]では 3 GeV ビームを Abort ビームラインへ取り出し、およそ想定通りの位置へビームを導くことができた。次は同年 11 月に 30 GeV ビーム試験が予定されているが、その時点でも SM32 の復旧は見込めない状況である。軌道計算では 30 GeV でも SM32 無しで取り出し可能であるが、高磁場 SM の電源出力電流は、定格に近い状況となる。2022 年 5 月に実施した 24 時間程度の連続通電試験では問題なかったが、出力低減策を用意しておく必要がある。本報告は、不具合のあった SM32 に対する対応についてまとめたものである。

2. 新 SM32 の初期不良

新規に製作された SM は、オフラインで通電試験および磁場測定を行う。新 SM32(Fig. 2)は 2021 年 8 月から実施予定だったが、コイルへの冷却水通水で、ホローコンダクター(ホロコン)からの漏水が 2 か所確認された。場所はいずれも NU 側(SM32E)の上側コイルの冷却水配管接続部付近だった。目視が困難な程度の微細なクラックがホロコンの屈曲部に発生しており、水路まで貫通していた。同様のクラックは Abort 側(SM32A)のコイルにもあったが漏水はなかった。SM30, SM31 のコイルでは、クラックは確認されていない。SM32 のみコイル製作に不備があったと言える。Figure 3 に示すように、エポキシパテを巻いて止水し、通電試験の実施を優先した。

通電試験は同年 8 月に着手した。300 A の DC 通電では全く問題なかったが、フラットベース(FB) 300 A / フラットトップ(FT) 1 kA のパターン通電を開始した直後に放電が発生した。運用に必要なのは約 3 kA である。放電箇所は、漏水のあった SM32E 上側のコイルだったが、漏水箇所とは別のホロコンのロウ付け部分で、独立した初期不良だった。Figure 4 に放電箇所を示す。熱で溶けた銀ロウが飛散しているのがわかる。ロウ付け部分でコイルのあるターンから次のターンに電流を渡すが、施工不良が原因で接触抵抗が高くなり、1 kA の通電の際に発熱、融解が発生し、生じた隙間で放電したものと考えられた。

問題箇所は、SM32E 上側のコイルに集中しているが、SM32A のコイルにも微細なクラックが存在することから、運用中に漏水が発生する可能性を否定できない。加えて、ロウ付けに関しても同様に製作された可能性が高く、放電のリスクがあるとみなせるので、全てのコイルを再製作することにした。尚、不良箇所を切除し、新たにホロコンを継ぎ足して修復することも検討したが、コイルを固めている樹脂にも熱が伝わり、絶縁性能を低下させる可能性があることから断念した。

コイルの再製作は、SM32E 用が 2022 年内に、SM32A 用が 2023 年春に完成する予定である。従って、2022 年

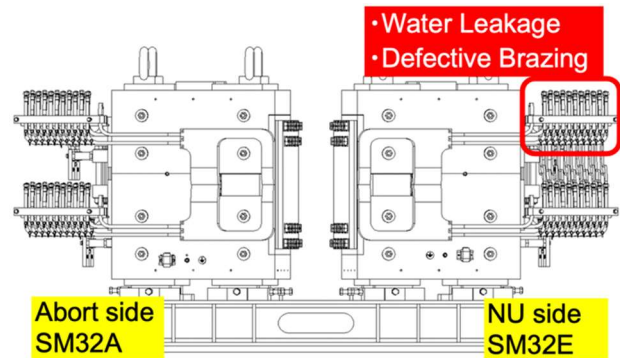


Figure 2: The downstream side of SM32.

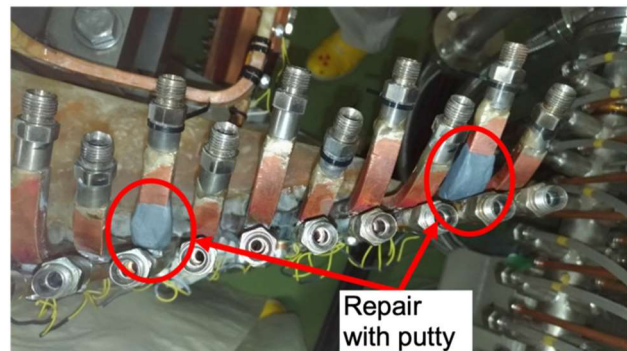


Figure 3: Water leakage points at SM32E upper coil.

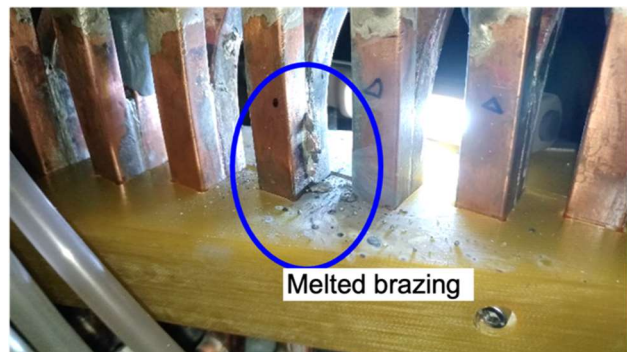


Figure 4: Occurrence of discharge.

6 月の FX SM アップグレード後の最初のビーム試験は SM32 無しで実施された。同年 11 月のビーム試験でも SM32A は復旧できない。インストールは 2023 年の夏季メンテナンス期間に行う予定である。

3. 新 SM32 無し条件でのビーム軌道計算

SM32 の不具合が発覚したが、FX SM 群は SM33 を除き 1 台が故障しても、他の SM の生成磁場を上げてビーム供給が継続できるように設計[7]されている。SM32 無しでのビーム軌道を SAD (Strategic Accelerator Design) [8]を用いて計算した。チューンは FX 運転で使用されている $(v_x, v_y) = (21.35, 21.43)$ とした。Momentum Compaction Factor は 0.4%、Closed Orbit Distortion は 1 mm とした。また、将来的に KM1 を取り外し、予備機として保管することが検討されているため、KM1 を不使用とした。NU / Abort ラインの取合い点(QFP156 上流側磁極

端面の位置)で、水平位置 543 mm、角度 77.22 mrad を満たすようにした。

SM32 無しの条件で 3 GeV と 30 GeV ビームの Abort 取り出しについて軌道計算した結果を Fig. 5 に示す。エミッタンスについて、3 GeV ビームは、MR 入射時にコリメータで絞られ 60π mm mrad 程度 (Fig. 5 青点線) だが、QDT155 の垂直アパーチャが狭いため、水平 30π mm mrad、垂直 15π mm mrad (Fig. 5 青実線) で検討した。30 GeV ビームは、 2σ 相当の 15π mm mrad [9] (Fig. 5 赤実線) とした。

3 GeV ビームの取出しでは、各電磁石の通電電流が低下するが、パルス運転の KM や EDDY SM は低出力時に安定性が悪くなるため、通電対象を KM5 と EDDY2 だけに減らすことで、それらの通電電流値を上げる。Table 1 に各 KM、SM の磁場と電源出力設定をまとめる。30 GeV ビーム取出しでは、高磁場 SM の設定が定格値に近いことがわかる。2022 年 5 月に実施した 24 時間程度の連続通電で異常はなかったが、長期間の運用には向かないと思われる。対応を検討したので後述する。

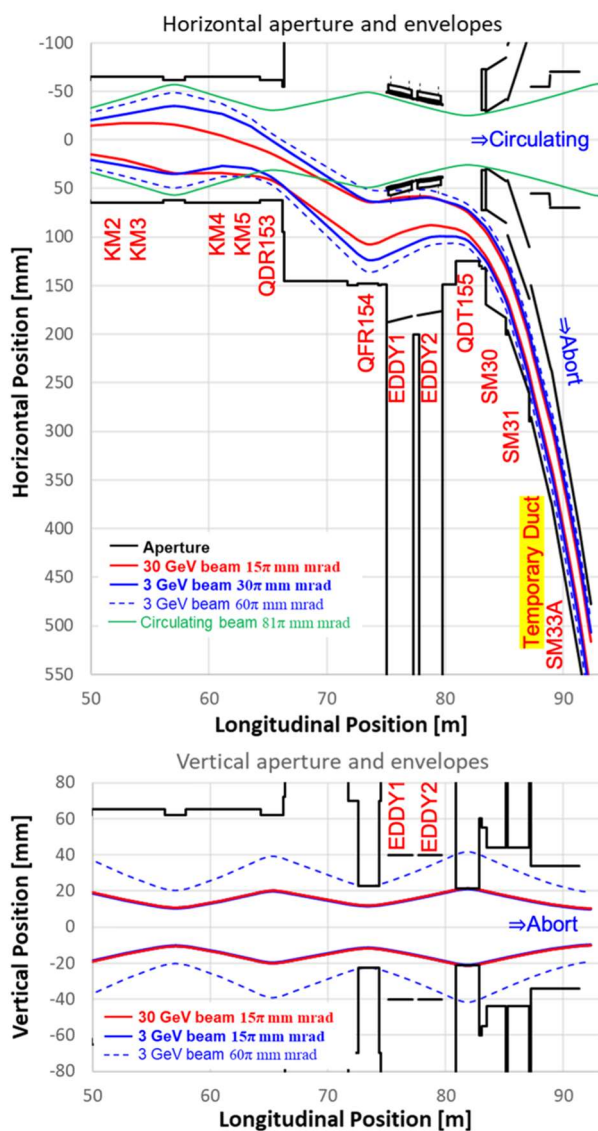


Figure 5: Beam envelopes without SM32.

Table 1: Summary of Settings of the FX Magnets When SM32 Is Not Used

	3 GeV	30 GeV
Max. BL	BL	BL
Max. B	B	B
P.S. Output	P.S. Output	P.S. Output
KM1		0 Tm 0 T 0 kV
KM2	0.126 Tm	
KM3	0.063 T	
KM4	33 kV	0.113 Tm
KM5		0.057 T 29.7 kV
EDDY1	0.847 Tm 0.565 T 18 kA	0 Tm 0 T 0 kA
EDDY2		0.235 Tm 0.157 T 5.00 kA
SM30	1.344 Tm 1.097 T 3.9 kA	0.187 Tm 0.153 T 0.543 kA
SM31	2.115 Tm 1.493 T 4.0 kA	2.094 Tm 1.478 T 3.96 kA
SM32	1.726 Tm 1.438 T 4.2 kA	0 Tm 0 T 0 kA
SM33	2.970 Tm 1.563 T 4.2 kA	0.356 Tm 0.187 T 0.503 kA

4. 3 GeV ビーム取出し

2022 年 6 月 27 日から MR のビーム試験が開始された。ビーム加速はせず、3 GeV DC 運転に限られたが、SM32 無しの条件で、Abort ライン上のビームプロファイルモニタ (MRPM#23) でおよそ想定通りのビーム位置を確認した。MRPM#23 の水平方向の出力データを Fig. 6 に示す。上のグラフでは MR を周回する 8 バンチが全て取り出されたことがわかる。また、下のグラフから、ビーム位置が約 7 mm 外側 (リングから遠ざかる方向) にあることがわかる。ビーム軌道の調整は実施しておらず、電源設定値に対する電源出力にずれがあったため、そのずれを考慮して軌道計算すると、Abort ラインの取合い点で位置 545.9 mm、角度 77.440 mrad であり、想定より 2.9 mm 外側を通り、曲げ角も 0.22 mrad 大きかった。MRPM#23 は取合い点より約 15 m 下流にあるため、MRPM#23 では約 6 mm 外側を通ると推測される。実測とは 1 mm の差が残っているが、概ね軌道計算結果と一致していると判断できる。

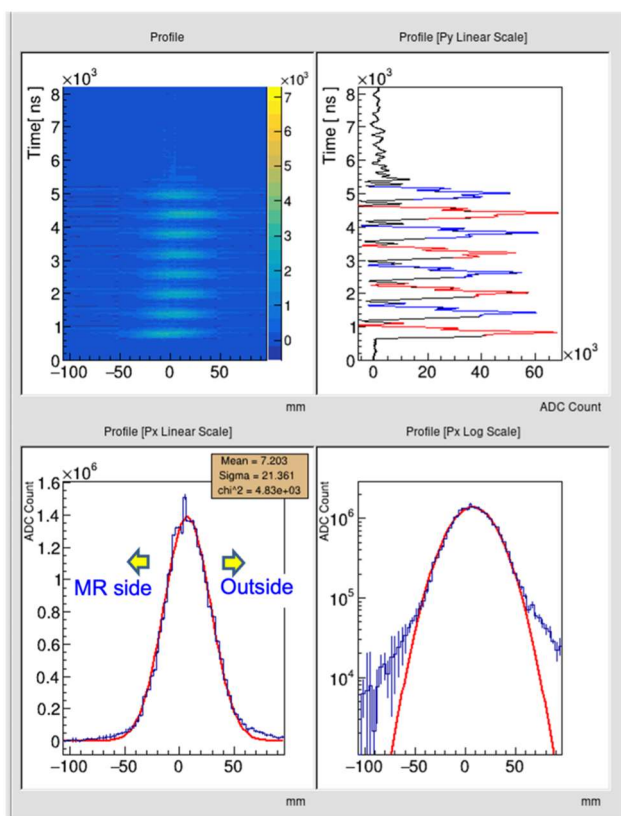


Figure 6: Output of MRPM#23 3 GeV beam extraction to the abort dump Jun. 30 2022 22:29 Run#89 Shot No.1182.

ビーム試験は 7 月 7 日 9:00 に終了し、その後、ビームロスの状況を確認するため、真空ダクトの残留線量を測定した。線量計には CANBERRA 製 RADIAGEM を使用した。校正済みのサーベイメータと比較して、差分は±10%程度だった。最も高い値を示したのは、SM30 上流側のダクトで、ビーム運転停止 5 時間後に Abort ライン側の側面の表面線量が 4 mSv/h を記録した。残留線量の時間変化を Fig. 7 に示す。短寿命核と長寿命核が混在していると予想され、指数関数近似には沿わなかった。

それ以外の箇所での表面の残留線量は、7 月 19 日に測定した値を水平ビームエンベロップとともに Fig. 8 に示

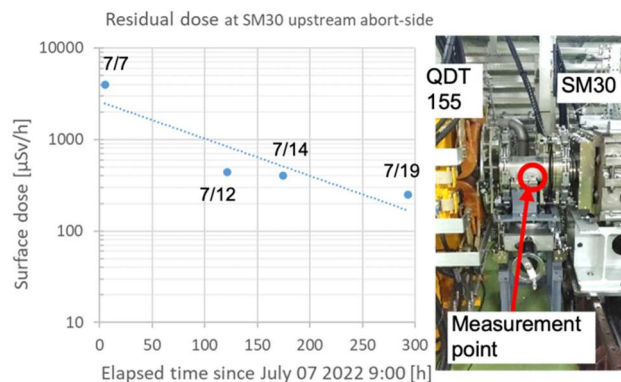


Figure 7: Residual dose at SM30 upstream abort-side.

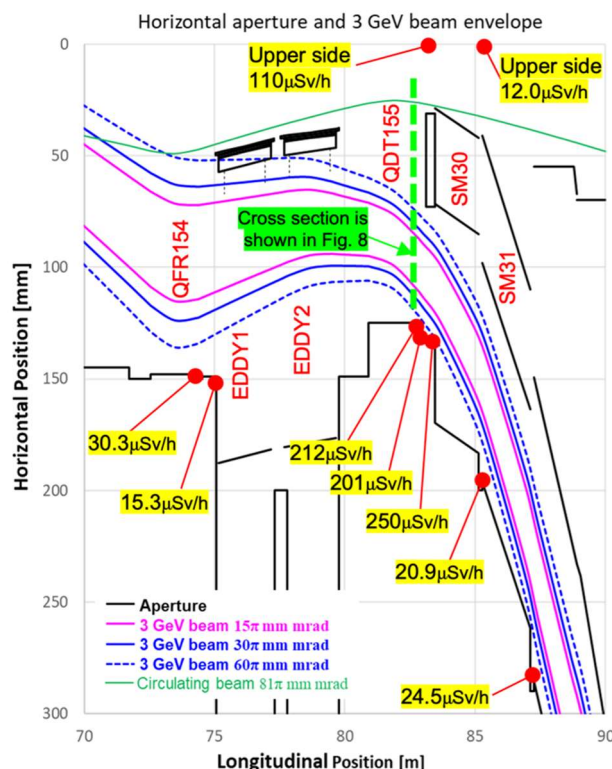


Figure 8: Measurement results of residual dose.

す。バックグラウンドは 0.1~1 μSv/h 程度である。残留線量が高かった場所と値を記載しており、多くの箇所は 10 μSv/h 程度であった。新 SM のダクトは初めてビームを通していているので、各部の測定結果から有意に放射化していることがわかるが、10 μSv/h 程度であれば既存ダクトの放射化と大差ない。SM32 が無い分、EDDY SM~SM31 の区間で取り出しビーム軌道は外側を通り、水平アパーチャに近接する。軌道計算上は 3 GeV ビームエミッタ相当の 60π mm mrad のエンベロップはアパーチャに干渉しないが、SM31 上下流のダクト端部で 20 μSv/h 程度であるのは、ビームが近接していることが原因と予想される。それに比べ QDT155 と SM30 間だけ、他よりも 10 倍ほど線量が多い。前述の通り QDT155 の垂直アパーチャが狭いので、そこでビームロスが発生した影響と推定できる。QDT155 下流側磁極端におけるダクト断面にビームスポットを重ねたものを Fig. 9 に示す。ダクト断面は菱形に近い形状となっており、垂直方向は 15mm mrad のアクセプタンスしかない。ここで多くのビームロスが生じ、発生した 2 次ビームが下流側の SM30 ダクトを放射化させたものと考えられる。

QDT155 と SM30 間のダクトを取り外し、QDT155 ダクト内壁の線量も測定した。真空ダクト内壁は汚損させられないので、線量計は表面から 2~3 cm ほど離れた。ビームを通した Abort 側の残留線量が NU 側の 2 倍ほど高くなっていた。ビームロスを低減し、放射化を抑制するには、QDT155 の大口径化が必要であることが改めて確認された。

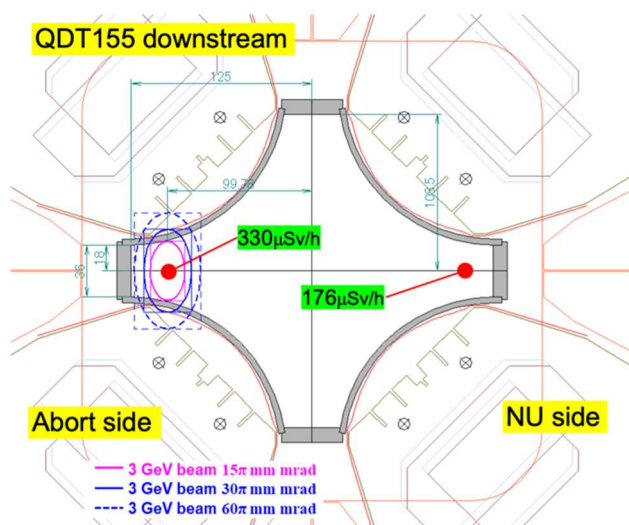


Figure 9: Cross section of the QDT155 duct.

5. 30 GeV ビーム取出しに向けて

2022 年 11 月に 2 回目のビーム試験が計画されており、30 GeV ビーム取出が行われる予定である。SM32 無しでのビーム取出しは、Table 1 の設定値を使って対応する。しかし、高磁場 SM は上限出力に近いところで運用することになるので故障の心配がある。この対策について検討した。

新しいコイルの製作は、初期不良のあった NU 側が先行しており、Abort 側の納入時期とは 4 か月ほどの時間差が見込まれる。両方のコイルが揃うと、正式なインストールに向けて組付け作業が始まるので、故障対策が必要なのはそれまでの期間ということになる。

我々は、漏水も放電も発生していない既存の Abort 側コイルに注目した。NU 側コイル放電時に、Abort 側は 1 kA のパターン通電が行われている。漏水や放電のリスクがなくなったわけではないが、低電流であれば運用できる可能性がある。NU 側に新規コイル、Abort 側に既存コイルを組付け、1 kA 通電で運用した場合の軌道計算を行った。得られた各 SM の設定値を Table 2 にまとめる。KM の設定値は変更していないので省略している。高磁場 SM において 4 kA 以上の通電は不要になり、電源の負荷が軽くなったのがわかる。

Table 2: Setting for 1 kA Operation of SM32

		30 GeV	
		without SM32	SM32 1 kA
	Maximum P.S. Output	P.S. Output	P.S. Output
EDDY1	18 kA	5.00 kA	7.53 kA
EDDY2		11.55 kA	7.53 kA
SM30	3.9 kA	3.83 kA	3.75 kA
SM31	4.0 kA	3.96 kA	3.42 kA
SM32	4.2 kA	0 kA	1.00 kA
SM33	4.2 kA	4.04 kA	3.72 kA

一方で、2022 年 8 月に既存 Abort 側コイルの通電試験を行い、本来の設計パラメータ相当の FT 3 kA のパターン通電を 2 時間継続し、異常がないことを確認した。リスクが完全になくなったわけではないので、実際にどの電流値で運用するかは議論の余地があるが、FX SM の高出力運用を避ける一つの案として、期待が持てる結果が得られた。

6. まとめと今後の予定

1.3 MW への J-PARC MR 高出力化に向けて、運転周期短縮やビーム粒子数の積み増しが必要になる。FX SM も 1 Hz 運転における発熱対策や、ビームロス低減を考慮した改修など、アップグレードを行った。新たに製作した EDDY SM、SM30~SM32 の交換作業を 2021 年 7 月から 2022 年 5 月にかけて実施した。しかし、SM32 についてはインストール前の通電試験で、NU 上側のコイルに漏水と放電の不具合が発生し、インストールを延期せざるを得なかった。不具合が発生していないコイルも、クラックが見つかるなど信頼できないので、すべて再製作することにした。

2022 年 6 月のビーム試験では、SM32 の代わりに仮設ダクトを用意し、上下流の真空ダクトを接続した。また、SM32 無しでのビーム軌道計算を行い、概ね想定した軌道で 3 GeV ビームを Abort ラインへ取り出すことができた。QDT155 の垂直アクセプタンスが小さく、ビームロスと 2 次ビームによる放射化が大きいことも分かった。

2022 年 11 月に予定されているビーム試験では、30 GeV ビーム取出しが行われる。こちらも軌道計算を行い、SM32 無しでも取り出せるように設定値を求めている。但し、高磁場 SM 電源の出力電流が定格に近い値での運用となることが懸念されている。対応策として、不具合のなかった Abort 側コイルを利用して、SM32 を 1 kA 程度の低電流で運転することで、他の SM 電源の電流出力を低減させることを検討した。既存 Abort 側コイルの通電試験も終えており、SM32 無しでの 30 GeV 取り出し運転に支障が生じた場合に対応できるよう準備を進めている。

再製作中のコイルは NU 側が 2022 年内、Abort 側が 2023 年春に納入予定である。順次 SM32 磁極への組み込みを進め、オフラインでの通電試験・磁場測定を実施した後、2023 年夏にビームラインへのインストールを行う予定である。

参考文献

- [1] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- [2] S. Igarashi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01.
- [3] KEK Report 2021-2, June, 2021.
- [4] K. Fan *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.951-954.
- [5] S. Iwata *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FRP006.
- [6] T. Yasui *et al.*, Proc. of PASJ, 2022, FROA01.
- [7] S. Iwata *et al.*, Proc. of IPAC, 2022, p.2100-2102.
- [8] SAD code; <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [9] S. Igarashi *et al.*, Proc. 61th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018), Daejeon, Korea, Jun. 2018, pp. 147-152.