

J-PARC MR 速い取り出し用 Eddy セプトム電磁石の性能評価

THE EVALUATION OF THE Eddy CURRENT-TYPE SEPTUM MAGNET FOR FAST EXTRACTION OF J-PARC MR

芝田達伸^{*,A)}, 岩田宗磨^{A)}, 石井恒次^{A)}, 松本教之^{A)}, 松本浩^{A)}

Tatsunobu Shibata^{*,A)}, Soma Iwata^{A)}, Koji Ishii^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}

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

Abstract

The two eddy current type septum magnets (Eddy septa), which were installed in J-PARC MR in 2022, are part of the new fast extraction (FX) magnets. In present, their operation have no problems, however, we have still technical issues. One is stability of the output pulse current. The present operation condition, which was optimized by tuning of the extraction beam orbit, is not ideal for sufficient stability. We evaluated the stability with the present operation condition in 2025, and we found that the peak current of one eddy septum has a large halo component. We verified the impact of FX kickers noise and the extraction beam on the stability in 2024 and 2025. No impact of FX kickers noise was found, but, an impact of the extraction beam on the halo component was found. Second issue is residual field in the circulating line. We measured residual field of one eddy septum in 2024, and the field integral was sufficiently small, but the quadrupole component, $K_1L = (+1.77 \pm 0.03) \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, was larger than the leakage field of other FX septa obtained in 2022 and 2023.

1. J-PARC MAIN RING

J-PARC は 400 MeV 線形加速器、3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、50 GeV Main Ring (MR) の 3 基の加速器と、物質・生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設 (NU)、ハドロン実験施設 (HD) の 3 つの実験施設で構成されている [1]。MR では RCS から入射された 3 GeV 陽子ビームを 30 GeV に加速して NU または HD に出射する。NU への供給運転の場合、陽子ビームが MR を 1 周する約 5.2 μs の間に陽子ビーム全てを NU に出射する。これを速い取り出し (Fast eXtraction; FX) と呼ぶ。MR は NU 向けの供給ビームパワーを段階的に増強し、2028 年までに 1.3 MW の達成を目指している [2]。そのための戦略は繰り返し周期の短縮化 (高繰り返し化) とビーム粒子数の増加である。2021 年夏までの繰り返し周期は 2.48 s であり、供給ビームパワーの最大値は 515 kW であった。2021 年 7 月から 2022 年 5 月末までの長期停止期間に高繰り返し化のための最初の MR の増強が実施された。増強後の 2022 年 6 月から繰り返し周期は 1.36 s に短縮され、2023 年 4 月に MR の設計値である 750 kW 出力での 30 GeV ビーム取り出しに成功した [3,4]。同年 12 月、710 kW での利用運転に成功、2024 年 6 月には安定した 800 kW の利用運転に成功し、2025 年 3 月に現在の最高値である 830 kW に到達した。

2. MR FX 電磁石

MR の FX 電磁石は陽子ビームを NU 1 次ビームラインまたはビームアポートダンブライン (ABT) に振り分けるための電磁石である。4 台のキッカー電磁石 (FX キッカー)¹、2 台の低磁場 (Low Field; LF) セプトム電磁石 (LF セプトム)、4 台の高磁場 (High Field; HF) セプトム電磁石 (HF セプトム) で構成されている。FX 電磁石

も MR のビームパワー増強のためにアップグレードされた。FX キッカーは高繰り返し化のため電磁石用パルス電源の改修を行い 2017 年に完了した [5]。HF セプトムは高繰り返し化と大強度化、FX ビームライン上の四重極電磁石拡張化に対応するため、全台新しい電磁石に交換した [6]。4 台の内 3 台は新規製作の電磁石 (新 HF セプトム)、残りの 1 台は撤去する HF セプトムの磁極と新規製作の真空ダクトを使用して再構築したものを導入する。ところが 2021 年と 2022 年に新 HF セプトムの内 2 台の電磁石コイルで放電によるコイル損傷が発生した [7]。そのため新 HF セプトムのコイルを全て再製作する事になった。新コイル製作中は損傷したコイルも含め新 HF セプトムの全コイルに対して補強を施しビーム運転に使用した。2023 年 1 台分の新 HF セプトムに対して新コイルへの交換が完了した [8]。残りの 2 台分については 2025 年夏に交換が完了する予定である。

3. 新 LF セプトム

LF セプトムのアップグレードは従来の電流型セプトム電磁石 (旧 LF セプトム) から渦電流誘導型の新セプトム電磁石 (Eddy セプトム) [9, 10] と新パルス電源への交換であった。旧 LF セプトムと同様 Eddy セプトムも 2 台導入した。ここでビーム上流部からそれぞれ Eddy-1、Eddy-2 と呼ぶ。Eddy セプトムの特徴はセプトムコイルが存在せず磁極側面開口部に 6 mm 厚の銅板 (セプトム板) を装着した形状になっている事である。セプトム板の表面に発生する渦電流による逆向き誘導磁場によって磁極側面開口部からの漏れ磁場を相殺する事で周回ビームライン上の漏れ磁場を旧 LF セプトムよりも小さくすることができる。渦電流を誘導する必要があるので Eddy セプトムはビーム取り出し時のみ励磁する短パルス電磁石である。Eddy セプトム用新パルス電源は 2 台の 6.6 kV \times 5 A 出力の主充電器、1 台の 6 kV \times 0.15 A 出力の補助充電器、550 μF と 325 μF の 2 系統並列回路から成るコンデンサバンク、2 系統

* tshibata@post.j-parc.jp

¹ FX キッカーは元々 5 台であったが 2024 年夏に 1 台撤去され、2024 年 11 月以降は 4 台体制になった。

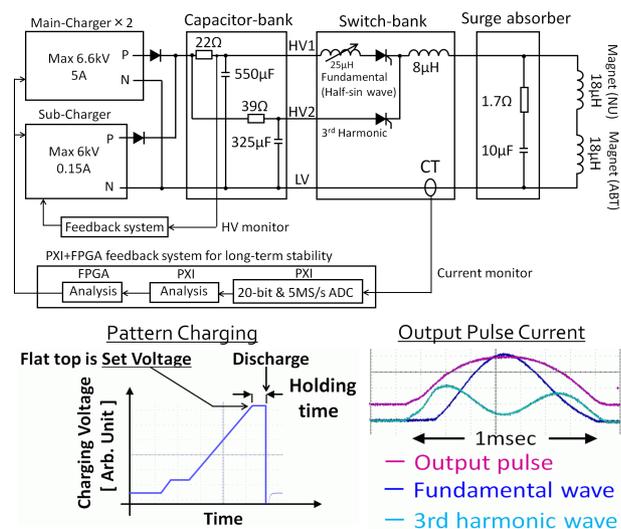


Figure 1: Circuit diagram of short-pulse power supply for the Eddy septum magnet (upper), pattern charging voltage (lower right), and output pulse current waveform (lower left).

それぞれに独立のサイリスタ半導体スイッチから成るスイッチバンク、CR方式サージアブソーバーで構成されている (Fig. 1(上))。充電電圧はパターン制御で行いフラットトップ (Flat Top; FT) の電圧を設定電圧とする (Fig. 1(左下))。出力パルスはパルス幅が約 0.8 ms の半正弦波であり (Fig. 1(右下))、最大電力は 6 kV×22 kA、30 GeV ビーム取り出しは 3 kV×11 kA を想定した。1 台目の新パルス電源と電磁石の試験機を 2014 年に製作し、2021 年まで通電試験と磁場測定を行いながら電源と電磁石の評価及び改修を行った [11–17]。そして 2 台の新パルス電源は 2022 年 3 月に完成し、2022 年 3 月に電源棟内への配置も完了した。2 台の実機用電磁石の最終組立は 2021 年から 2022 年にかけて行い、2022 年 4 月に MR への導入が完了した [18]。ビーム運転用に使用を開始した 2022 年 6 月以降、現在に至るまで安定した運転を続けている。出力電流フィードバックシステムのソフトウェアの不具合が度々発生したが、2023 年 11 月までに解消する事に成功した。

新パルス電源の最重要課題はショット毎の出力パルス電流の再現性 (出力安定性) が充分高いことである。出力安定性は取り出し陽子ビーム軌道の安定性に直接影響する重要な要素である。高い出力安定性を得るため新パルス電源は 2 つの独立なフィードバックシステムを使用しており、出力安定性はそれらの精度で決定される。1 つ目は補助充電器によるリアルタイムフィードバックシステムである。主充電器により設定充電電圧の 99% に到達すると、補助充電器に切り替わり、充電電圧をリアルタイムでモニターしてアナログフィードバックを掛けながら設定電圧の約 10^{-4} の精度で充電を完了することができる。2 つ目は長期安定性を保つための PXI [19]+FPGA を用いたデジタルフィードバックシステムである。出力パルス電流をスイッチバンク内に搭載されているピアソン製の電流変換器 (CT) で検出し、20 bit 分解能、5 MS s⁻¹ の PXI-ADC で電流波形を記録する。記録された電流波形からピーク電流値が

算出され、測定ピーク電流値と設定値との差から補正量を計算する。補正量は FPGA で累積され、累積された補正量を次のショットの充電電圧に加算する。最終的に出力ピーク電流値は 10^{-4} 以下の精度で安定化する。2019 年に補助充電器の出力調整を行った結果、主充電器から補助充電器に切り替わった後、補助充電器の出力電流が安定になるまでに要する時間 (切り替え時間) が設定電圧によって異なり、低電圧充電になるほど要する切り替え時間は長くなる傾向にあった。主充電器と補助充電器の微調整の結果、充電電圧が 3 kV、0.5 kV での切り替え時間はそれぞれ 46 ms、126 ms になった [15]。2021 年、設定電圧と充電電圧が FT 値に到達してから放電まで充電電圧を維持する時間 (FT 維持時間) を変えて良好な出力安定性が得られる条件を調査した。結果、ショット毎のピーク電流値分布の pk-pk 値を出力安定度として、設定電圧は 3 kV 以上、FT 維持時間は 50 ms 以上で出力安定度が約 120 ppm 以下になる事が分かり、これらを好安定化条件とした [17]。

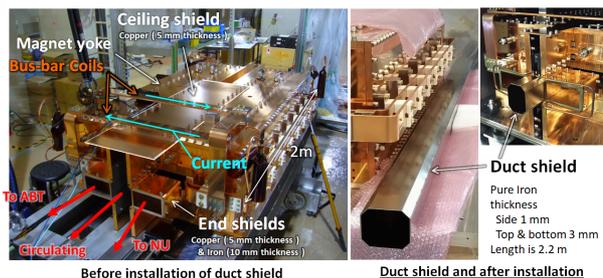


Figure 2: Photographs of the eddy septum magnet and magnetic shields.

セプタム電磁石の最重要課題は周回ビームライン上の漏れ磁場低減である。旧 LF セプタム電磁石は約 1.5 s 幅のパターン励磁の際に生成される大きな漏れ磁場が二極成分だけでなく四極成分としても存在し、特にビーム入射時の漏れ磁場の影響が大きかった。Eddy セプタムはビーム入射時に励磁による漏れ磁場成分がないという利点がある。但し、励磁磁場のパルス幅が約 0.8 ms であるためビーム取り出しタイミングであるピーク時までの約 0.4 ms は励磁磁場による漏れ磁場が存在する。この漏れ磁場を低減するために発生源に合わせて幾つかの磁気遮蔽体を追加した (Fig. 2)。1 点目はセプタム板に重ねて装着されている 0.6 mm 厚の冷間圧延銅板 (SPCC) である。SPCC シールドによる漏れ磁場の遮蔽効果は非常に大きく、磁極端部近くでは 1/5 程度に低減した。2 点目は磁極端部の磁場による周回ライン上への大きな漏れ磁場を低減するために磁極端部の取り出し口に装着したエンドシールドである。エンドシールドは厚さ 5 mm の銅板と厚さ 10 mm の鉄を重ねてコの字に模った構造をしている。OPERA 3D による計算ではエンドシールドによる漏れ磁場の低減率は約 1/10 である [20,21]。3 点目は磁極の天井部に設置した銅板 (天板シールド) である。左右の電磁石コイルを直列に接続するための銅製の渡り導体を作る電流磁場が周回ライン内に直接届くため大きな漏れ磁場成分となる。この漏れ磁場を低減するため磁極上面と渡り導体の間に長さ 1.2 m、厚さ 5 mm の無酸素銅板を設置した。この天

板シールドの遮蔽効果も大きく、漏れ磁場を 1/6 程度に低減した事を測定によって確認した [11]。最後に Eddy セプタムの周回ライン全域の漏れ磁場を包括的に低減するために側面の厚さが 1 mm、上面と底面の厚さが 3 mm、全長が 2.244 m の純鉄製ダクト型シールドを周回ライン内に設置した。ダクト型シールドにより漏れ磁場の積分磁場 (BL 値) を 1/5 程度に低減する事ができた。以上の磁気遮蔽を導入した事により漏れ磁場の BL 値を $\approx 0.2 \text{ G m}$ に低減した。30 GeV 陽子ビームに対してノーマル四重極係数の積分値 (K_1L) は旧 LF セプタム 2 台分が $\approx 3.7 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ であったのに対して Eddy セプタム 2 台分で約 1/20 の $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ に軽減する事ができた [18]。

4. 出力安定性の再評価

2023 年 4 月から開始した 30 GeV 取り出し試験以降、ビーム取り出し軌道調整の結果得られた Eddy セプタムのビーム運転時の設定電圧は常に 3 kV 以下である。2025 年の最新値は 2.244 kV (ピーク電流値で 6.885 kA)、FT 維持時間は 40 ms である。この値は 2021 年に得られた好安定化条件を満たしていない。そこで 2025 年に設定電圧 3 kV 以下での出力安定性の再評価を行った。また 2024 年から 2025 年にかけて FX キッカーと取り出し陽子ビームが出力安定性に与える影響も評価した。

4.1 設定電圧 3 kV 以下での出力安定性の評価

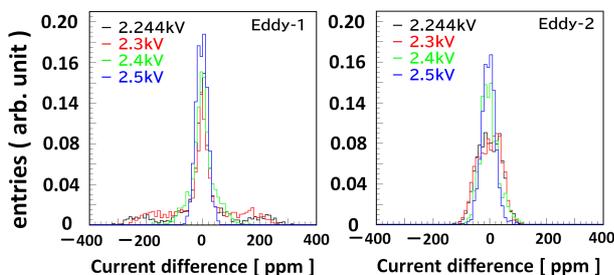


Figure 3: Normalized current difference of the Eddy-1 (left) and 2 (right) with the set voltage of 2.244 kV, 2.3 kV, 2.4 kV, and 2.5 kV.

2025 年 4 月、Eddy-1、Eddy-2 両方で、設定電圧を 2.244 kV、2.3 kV、2.4 kV、2.5 kV、2.75 kV、3.0 kV の 6 通りで通電試験を行い、ピーク電流値を測定した。FT 維持時間は 40 ms で固定した。Figure 3 に 2.244 kV から 2.5 kV までの分布図を示す。ここで横軸はピーク電流値の設定値との差とし、設定電圧によるピーク電流値の分布の違いを比較できるようにした。Eddy-1 の場合、設定電圧を 2.5 kV から下げるに従って分布の広がりが大きくなり、2.3 kV 以下では大きなハロー成分が確認された。分布の幅を pk-pk 値で評価すると、設定電圧が 2.5 kV では $\approx 200 \text{ ppm}$ であったが、設定電圧 2.244 kV では $\approx 700 \text{ ppm}$ もあり良好な出力安定性が得られていない事が分かった。一方、Eddy-2 の結果にはハロー成分は確認されなかった。この違いの原因は補助充電器が充電を開始するタイミングの変動量の違いによるものと推測している。2022 年、Eddy-2 の出力調整試験を行った際、同じ設定電圧でも補助充電器が充電を開始する

タイミングに約 20 ms の変動がある事が確認された。Eddy-1 にも同じように変動が存在していると考えられるが具体的な値は測定されていない。その大きな変動によってハロー成分が出現する可能性は充分あるため、調査と再調整によるハロー成分の解消が必要であると考えている。Eddy-1 でハロー成分が解消された 2.5 kV の分布を Eddy-2 と比較するため分布の幅を標準偏差 (1σ) で示すと、Eddy-1 では 21 ppm であったのに対し、Eddy-2 では 25 ppm であった。Eddy-2 の方が有意に大きく出力安定性に差がある事が確認された。この違いの原因は補助充電器の出力電流が安定になるために要する時間の差であると推測している。Eddy-1 の場合、出力電流が安定になるまでの時間は設定電圧 3 kV で約 46 ms で調整された。Eddy-2 は約 50 ms で調整された。僅かな差であるが、FT 維持時間が 40 ms であるため出力安定性の結果に差ができた可能性は充分考えられる。今後、Eddy-2 も再調整による出力安定性の改善を検討する。最後に、Eddy-1 で得られた $\approx 700 \text{ ppm}$ の出力安定性が NU 向けの 30 GeV 取り出しビーム軌道に与える影響を考察する。Eddy-1 のピーク電流値 6.885 kA が 700 ppm 変化した場合、NU 一次ビームラインに設置されている最初のビーム位置モニター [22] で観測される NU 向けの 30 GeV 取り出しビームの位置と角度のずれはそれぞれ $\approx 0.04 \text{ mm}$ 、 $\approx 0.002 \text{ mrad}$ であると見積もられた。この値は取り出しビーム軌道のばらつき量よりも小さく充分無視できる量である。そのため今回得られた出力安定性が即座に取り出しビーム軌道に影響を与える事がないと判断できた。

4.2 FX キッカーの影響評価

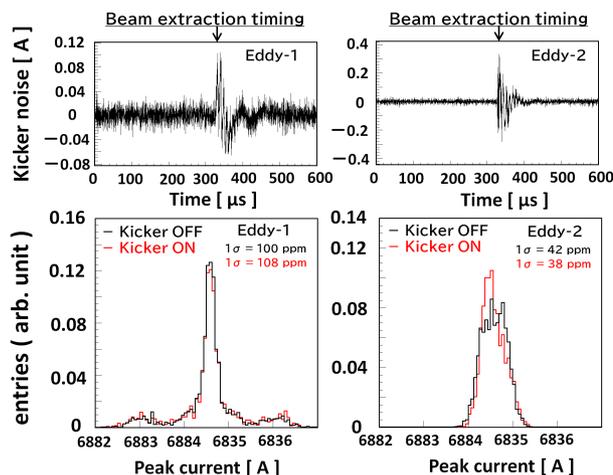


Figure 4: Kicker noise waveform (upper) and comparison of stability of the Eddy-1 and 2 with kicker and without FX-kicker noise (lower).

FX キッカーの出力パルス電力はピーク値が 33 kV \times 6 kA であるため大きなノイズ源になり得る。更に、FX キッカー用パルス電源と Eddy セプタム用パルス電源は同じ電源棟内の隣接された位置に設置されており、各パルス電源から電磁石までの電力ケーブルも隣接した経路に敷設されているため FX キッカーのノイズが Eddy セプタムの出力安定性に影響を与える可

能性は充分有り得る。2025年4月のMRビーム運転停止中にEddyセプタムと4台のFXキッカーのみをNU運転用の条件で通電する事でFXキッカーの影響を調査した。まずFXキッカーが生成する電気ノイズをスイッチバンク内に搭載されているCTで観測する試みを行った。Eddy-1、Eddy-2の其々のCTで観測されたFXキッカーによる電気ノイズ(キッカーノイズ)波形をFig. 4(上)に示す。縦軸はCTで観測したことから電流換算値で表した。キッカーノイズはビーム取り出しタイミングで高周波ノイズとして発生している事が分かる。またFXキッカーはNU側取り出しとABT側取り出しで出力電流の方向を逆向きに変更する。キッカーノイズの位相がFXキッカーの電流の向きに合わせて反転する様子も観測されたため、キッカーノイズは放射ノイズではなくEddyセプタムの出力ケーブルに直接流れる伝導ノイズである事が分かった。キッカーノイズのピーク電流値はEddy-1、Eddy-2でそれぞれ ≈ 0.1 A、 ≈ 0.3 Aであった。この値はEddyセプタムの出力ピーク電流値(6.885 kA)の10 ppm、40 ppmであるため大きな寄与ではない事が確認できた。次にFXキッカーの通電有りとなしの場合の違いだけでEddy-1、Eddy-2の出力安定性に差が生じるかを確認した結果をFig. 4(下)に示す。設定電圧は2.244 kVである。Eddy-1、Eddy-2ともにピーク電流値の分布にほぼ影響していない事が分かる。以上より、FXキッカー起因の伝導ノイズの寄与は小さく、出力安定性に影響を与えないと結論付けた。

4.3 取り出しビームの影響評価

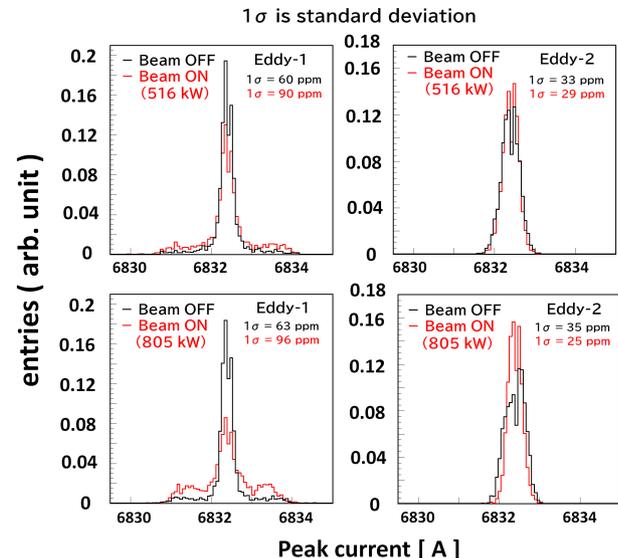


Figure 5: Peak current distribution of the Eddy-1 and 2 with extraction beam (beam on) and without extraction beam (beam off).

NUまたはABT側に取り出された30 GeV陽子ビームがEddyセプタムの磁極内を通過するとEddyセプタム用電磁石コイルに電流を誘起し、それがノイズ電流(ビームノイズ)としてCTで検出される可能性がある。NU利用運転中もEddyセプタムのショット毎の出力電流のピーク値は記録されているため、記録データを用いてNUへの取り出しビームがEddyセプタムの出力安

定性に与える影響を調査した。取り出しビームの影響を正確に評価するため比較するデータは取り出しビームの有無以外はEddyセプタムを含めた周辺機器の通電条件が可能な限り同一である事が条件である。特にキッカーノイズ波形を除くため、ビーム停止中もFXキッカーの出力電流の極性は同じである事が重要である。更に取り出しビームパワーの依存性も評価するためビームパワーが異なるデータセットを使用した。以上の条件を満たすデータセットは2024年11月28日-29日と同年12月16日の2セットでビームパワーはそれぞれ516 kW、805 kWであった。Eddyセプタムの設定電圧はEddy-1、Eddy-2ともに2.227 kVでピーク電流の設定値は6.8324 kAであった。各データセットで取り出しビーム有り無しでのピーク電流値の分布を比較した結果をFig. 5に示す。Eddy-1については取り出しビーム有りの方がハロー成分が大きくなった様子が確認できる。またハロー成分の変化率は805 kWのデータの方が516 kWよりも大きい事も確認できることからビームパワーが高い程ハロー成分が大きくなり、出力安定性が悪化する事が分かった。具体的には分布の1 σ の値が取り出しビーム無しでは60 ppm、63 ppmだったのに対し、取り出しビーム有りでは90 ppm、96 ppmとなり分布の広がり有意に大きくなったことを確認できた。一方、Eddy-2については取り出しビーム有りの時に1 σ の値が大きくなった様子はなく、取り出しビームの影響と思える変化は確認されなかった。そればかりか取り出しビーム有りの方が1 σ の値が小さくなっており、取り出しビーム以外に影響を与えている要因があると推定され、今後この要因調査も重要な課題であると考えられる。

5. 周回ライン上の残留磁場測定

出力安定性以外の重要課題が周回ビームライン上の残留磁場の測定である。これまでFXキッカーと高磁場セプタムでは測定による残留磁場の正確な評価が行われた。FXキッカーの残留磁場は磁極に使用されているフェライトの磁化によるものであり、FXキッカーの寸法とフェライトの特性から2017年に推定された残留磁場のBL値は5台のFXキッカー全体で1.9 Gmであった。更にMRへのビーム入射直後の周回ビームのCOD補正量から推定値と矛盾のない1.8 Gmを得た[23,24]。4台のHFセプタムの内、ビーム上流側にある3台については2022年と2023年に残留磁場の直接測定を実施した。その結果、BL値の合計は+0.18 Gmであり、FXキッカーのBL値の1/10程度であることを確認した[8,25]。

EddyセプタムはMRへのビーム入射時間帯には励磁磁場は存在しないが残留磁場は存在する。特に周回ビームライン内に設置した純鉄製のダクト型シールドの残留磁場は無視できないため実測による評価が必要である。2024年、夏メンテナンス期間中の作業工程の都合上Eddy-1のみを対象としてダクト型シールド内をビーム軸に沿って垂直成分の残留磁場測定を行った。磁気センサーにはホール素子を用いたOECO(旧F.W.BELL)製の8030型ガウスメータを用いた。磁気センサーをビーム軸方向(s方向)に沿って設置したレール上を移動さ

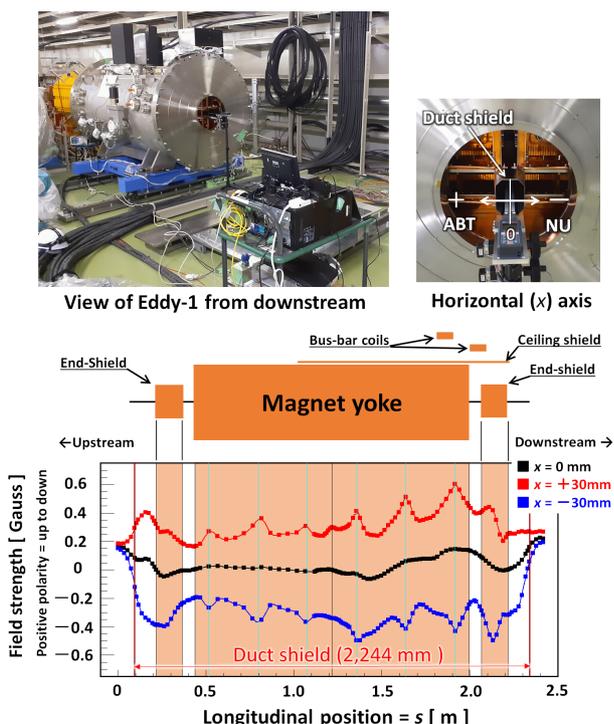


Figure 6: Longitudinal distribution of the residual field on circulating line.

せて s 方向分布を測定して BL を算出した。更にレールの水平方向の位置 (x) を ± 30 mm 変える事で、BL 値の x 依存性から四重極 (Q) 成分も測定した。Figure 6 に測定現場の写真と s 方向分布の測定結果を示す。 $x = 0$ mm の BL 値は 0.09 G m であり、HF セプタムの BL 値よりも低い事を確認した。一方、 s 方向分布には幾つかの明確な特徴が確認された。1 つ目は $s \sim 1.2$ m の磁極中央付近を境にビーム下流方向に向かって漏れ磁場が増加している事である。この原因は大きな漏れ磁場の源になっている渡り導体から発生された電流磁場によってダクト型シールドが強く磁化したことである。2 つ目は $x = \pm 30$ mm の位置を測定した磁場構造に等間隔で現れるピークである。各ピークの位置はセプタム板と重ねて設置されている 7 枚の SPCC シールドの各境界と一致する。SPCC シールドは s 方向に沿って並んで装着されているため、各 SPCC シールドの境目からの漏れ磁場が大きくなり、ダクト型シールドも強く磁化したと考えられる。

BL 値の x 依存性を示した結果を Fig. 7 に示す。この結果から残留磁場が Q 成分を持っている事が確認できた。残留磁場は MR に入射された直後の周回ビームに影響を与えるため、3 GeV 陽子ビームに対する K_1L を計算した結果、 $K_1L = (+1.77 \pm 0.03) \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ であった。2022 年と 2023 年に測定した HF セプタムの 3 GeV 取り出し用のフラットボトム (Flat Bottom; FB) 電流を印加した時の漏れ磁場の Q 成分は $K_1L = -1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ であった [8, 25]。Eddy セプタムの残留磁場は HF セプタムの漏れ磁場の Q 成分の 10 倍大きい、3 GeV 周回ビームに大きな影響を与えている可能性は低いと考えられる。今後の課題は未測定の Eddy-2 の残留磁場を測

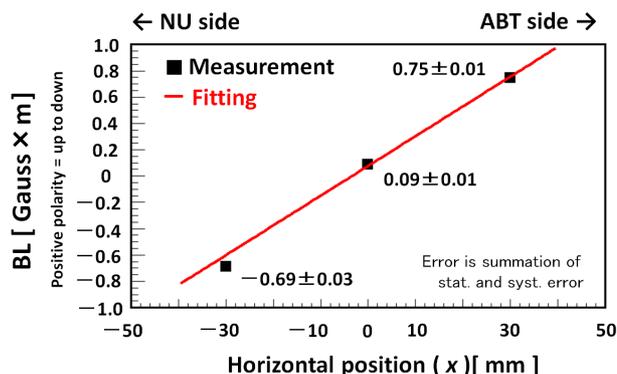


Figure 7: Horizontal distribution of BL of the residual field on circulating line.

定する事である。2025 年夏に Eddy-1 も含め Eddy-2 の残留磁場測定を予定しており、Eddy セプタム全体の残留磁場を評価する。

6. 結論

Eddy セプタムの出力安定性を再評価した結果、Eddy-1 には大きなハロー成分によって出力安定性が悪化している事が確認された。そのため Eddy-1 の補助充電器の再調整によってハロー成分の解消が必要である。Eddy-2 についても補助充電器の再調整によって出力安定性を改善する余地があると判断した。更に Eddy-1 は取り出しビームが出力安定性に影響を与えている事も分かった。Eddy-2 は取り出しビームの影響を受けておらず、別の要因の影響を受けている可能性を示唆する結果を得られた。今後取り出しビームの影響の低減と、別要因の調査が必要である。残留磁場については 3 GeV 周回ビームへの影響は小さい事を確認したが、今後 Eddy-2 の測定を行い、Eddy セプタム全体の Q 成分を評価する。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, in *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2021, p033G01. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [3] T. Yasui *et al.*, “J-PARC MR Operation with the high repetition rate upgrade”, Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference, Italy, May. 7–12, 2023, pp. 1276–1280. <https://www.ipac23.org/preproc/pdf/TUXG1.pdf>
- [4] Y. Sato *et al.*, “J-PARC 主リングの高繰り返し化改造後のビーム運転”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 29–Sep. 1, 2023, WEOB4.
- [5] T. Sugimoto *et al.*, “J-PARC メインリング 速い取り出しキッカー電磁石システムのアップグレード”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1–3, 2017, pp. 1061–1064. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP077.pdf
- [6] S. Iwata *et al.*, “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”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18–21, 2022, pp. 901–905.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRP0/FRP006.pdf
- [7] S. Iwata *et al.*, “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”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18–21, 2022, pp. 170–174.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROA/FROA05.pdf
- [8] T. Shiata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石 SM32 の復旧と性能評価”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, July 31–Aug.3, 2024, pp. 372–377.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/WEP0/WEP056.pdf
- [9] K. Kumagai, S. Matsui, and H. Miyade, “Field measurement of a pulsed septum magnet as an R & D for SPring-8”, Proceedings of the 8th Symp. on Accelerator Science and Technology, Saitama, Japan, Nov. 1991, pp. 220–222.
https://www.pasj.jp/web_publish/sast1991/PA-39.pdf
- [10] M. J. Barnes, J. Borburgh, B. Goddard, M. Hourican, “Injection and extraction magnets: septa”, CERN-2010-004, pp. 167–184. doi.org:10.48550/arXiv.1103.1062
- [11] T. Shibata *et al.*, “J-PARC-MR アップグレードのための新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の性能評価”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9–11, 2014, pp. 86–90.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SU0L/SU0L01.pdf
- [12] T. Shibata *et al.*, “J-PARC-MR アップグレードのための新しい新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の開発”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8–12, 2016, pp. 1204–1208.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP1/TUP107.pdf
- [13] T. Shibata *et al.*, “J-PARC-MR アップグレードのための新しい新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の開発 (3)”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1–3, 2017, pp. 1051–1055.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP075.pdf
- [14] T. Shibata *et al.*, “J-PARC-MR アップグレードのための新しい新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の開発 (4)”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7–10, 2018, pp. 499–503.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP066.pdf
- [15] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR アップグレードのための低磁場セプタム電磁石の開発”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, July 31–Aug.3, 2019, pp. 361–365.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPH/WEPH028.pdf
- [16] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR アップグレードのための低磁場セプタム電磁石の開発 (6)”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2–4, 2020, pp. 594–598.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/THPP/THPP46.pdf
- [17] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR アップグレードのための低磁場セプタム電磁石の開発 (7)”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9–11, 2021, pp. 262–266.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MOP0/MOP015.pdf
- [18] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR の速い取り出し用新セプタム電磁石の漏れ磁場軽減対策”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18–21, 2022, pp. 253–257.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB12.pdf
- [19] <http://www.ni.com/ja-jp/shop/pxi.html>
- [20] K. Fan *et al.*, “Low Leakage Field Septa for J-PARC Main Ring Injection system Upgrade”, Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, May 23–28, 2010, pp. 295–297.
<https://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/mopeb009.pdf>
- [21] K. Fan *et al.*, “New Design of J-PARC Main Ring Injection System for High Beam Power Operation”, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, June 15–20, 2014, pp. 2097–2099.
<https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/papers/wepro065.pdf>
- [22] K. Abe *et al.*, “The T2K Experiment”, in *Nucl. Instrum. Meth.*, A659, 2011, pp. 106–135.
- [23] T. Sugimoto *et al.*, “J-PARC メインリング速い取り出しキッカー電磁石のフェライト残留磁化によるビームロスに対する対策”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 7–10, 2018, pp. 1082–1086.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP092.pdf
- [24] A. Kobayashi *et al.*, “J-PARC Main Ring 大強度運転のためのビーム位置モニター (BPM) の高度化”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 1–3, 2017, pp. 187–191.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOM/THOM05.pdf
- [25] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用セプタム電磁石の漏れ磁場測定”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug. 29–Sep.1, 2023, pp. 324–329.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TUP1/TUP18.pdf