

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 THE REDUCTION OF THE LEAKAGE FIELD OF THE NEW SEPTUM MAGNETS FOR FAST EXTRACTION IN J-PARC-MR

芝田達伸^{*,A)}, 岩田宗磨^{A)}, 石井恒次^{A)}, 松本教之^{A)}, 佐藤洋一^{A)}, 五十嵐進^{A)}, 發知英明^{A)},
安居 孝晃^{A)}, 浅見 高志^{A,B)}, 杉本拓也^{A)}, 松本浩^{A)},

Tatsunobu Shibata^{*, A)}, Soma Iwata^{A)}, Koji Ishii^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Susumu Igarashi^{A)},
Hideaki Hotchi^{A)}, Takaaki Yasui^{A)}, Takashi Asami^{A,B)}, Takuya Sugimoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)},

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

^{B)} University of Tokyo/KEK

Abstract

As part of the goal of increasing the beam power of the Main Ring for Fast eXtraction (FX) in J-PARC to 750 kW, the two low-field septa and three high-field septa for FX were installed into MR in 2022. The most significant goals regarding the magnets are achieving an extremely low leakage field in the circulating line. To reduce the leakage field in the circulating line, the new pure iron duct-type magnetic shields were produced for all the septa in 2021, and mounted in the circulating line in 2022. We verified that the leakage field in the circulating line of a low-field septum and high-field septa were greatly reduced. We also confirmed that the impact of the leakage field of all of the septa for FX on the 3-GeV circulating beam was below 1/10 of that of the previous septa for FX in beam test in July 2022.

1. J-PARC MAIN RING

J-PARC は 400-MeV 線形加速器、3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) と 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 8 バケットの 3-GeV 陽子ビームを受け取り、30 GeV に加速した後、NU または HD に出射する。NU への供給運転の場合、8 バケットの陽子ビーム全てを約 5.2 μ s の間に NU に出射する。これを速い取り出し (Fast eXtraction;FX) と呼ぶ。LI から負水素イオンビームを射出し、MR で加速した陽子ビームを NU に向けて出射するまでを 1 サイクルとし、1 サイクルの時間を繰返し周期と呼ぶ。2021 年夏までの繰返し周期は 2.48 秒であった。NU への最大供給ビームパワーは 2021 年 3 月に到達した約 515 kW (陽子数で 2.66×10^{14} ppp) である [2]。ビームパワーの設計値である 750 kW を達成するため繰返し周期を 1.32 秒に短縮する事を目指している。更に 2028 年度末までには 1.3 MW 出力達成のために繰返し周期を 1.16 秒まで短縮し、ビーム強度も増強する [3]。現在、ビームパワー増強のために MR の大規模なアップグレードが進行中であり、NU 用出射電磁石 (FX 用電磁石) のアップグレードも行って来た [4]。そして 2021 年 7 月から 2022 年 5 月まで MR の長期停止期間を設けてアップグレードの大部分が完了した。2022 年 6-7 月には繰返し周期 1.36 秒でのビーム試験が行われた [5]。次の MR ビーム運転再開は 2022 年 11 月を予定し、ビーム試験の後に NU/HD への供給運転が再開される予定である。

2. FXセプタム電磁石

FX 用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プライン (ABT) に振り分ける

電磁石であり、5 台のキッカー電磁石、2 式の低磁場セプタム電磁石、4 式の高磁場セプタム電磁石で構成されている。FX セプタム電磁石は低磁場、高磁場セプタム電磁石の総称であり、これらのアップグレードは新電磁石への交換である。主なアップグレードは 2022 年 5 月末に完了した (Fig. 1)。詳細は Ref. [6] を参照されたい。

2.1 低磁場セプタム電磁石

交換前の低磁場セプタム電磁石 (旧低磁場セプタム) は 1 式当たり 4 台の片極性電流型セプタム電磁石で構成されていた。周回ビームライン (周回ライン) に対して左右対称なセプタム電磁石を向い合せに設置し、磁場の向きを互いに逆方向に発生する事でそれぞれが NU と ABT への取り出しに使用する。旧低磁場セプタムには真空ダクトが存在せず、4 台のセプタム電磁石全体を 1 台の真空槽内に収納した。真空槽は 2 台あり、合計 2 式の低磁場セプタムが使用された。磁極内磁場は約 0.23 T であり、2 式分の 30-GeV 陽子ビームの曲げ角の合計は約 8.7 mrad であった。印加電流の形状は全幅が約 1.5 秒のパターン電流であった。旧低磁場セプタムを新電磁石に交換する理由は主に以下の 3 点である。1 点目は周回ラインへの漏れ磁場軽減の必要性である。特にビームエミッタンスが大きい加速前の低エネルギー領域で影響が大きい四重極成分 (Q 成分) を軽減する必要があった。2 点目はビーム大強度化に伴って増大するビームハロー損失による放射化を軽減するためのアパーチャー拡大の必要性である。取り出しラインの口径は 80 mm(H) \times 70 mm(V) であったが、特に水平方向の口径を拡大する必要があった。3 点目は通電時にコイル間に働く電磁力によってセプタムコイル自身が振動する事でホローコンダクタを使用したセプタムコイル表面の絶縁破壊が危惧されている事が挙げられる。旧低磁場セプタムは 2008 年の MR 運転開始時から使用し続けているため、経年劣化による耐久性の低下から今後絶縁破壊が発生する可能性が高いと考えた。

新低磁場セプタム電磁石は渦電流誘導型セプタム電磁

* tshibata@post.j-parc.jp

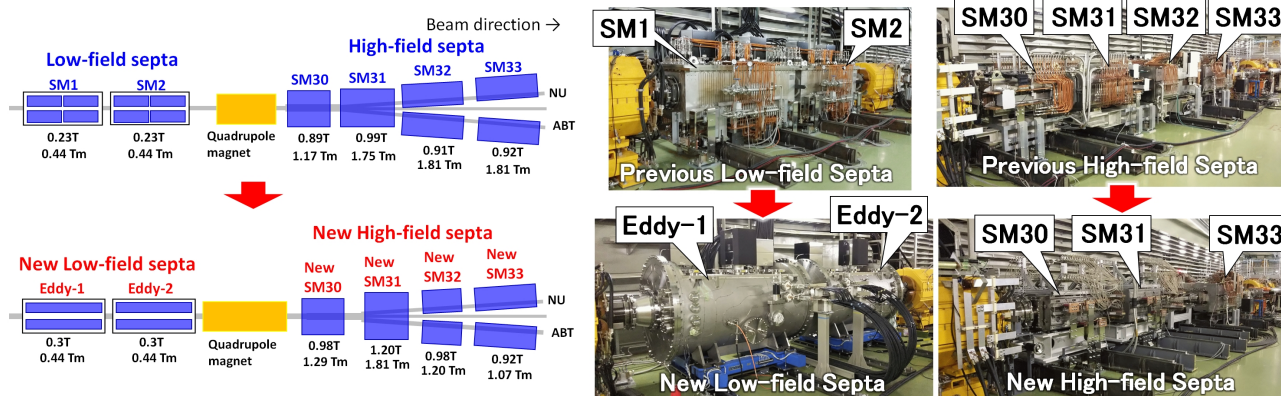


Figure 1: The layout and photographs of the previous and new FX septa.

石 (Eddy セプタム) である [7]。Eddy セプタムにはセプタムコイルは存在せず、磁極側面開口部に薄い銅板 (セプタム板) を装着した形状になっている。コイルにはホーコンダクタを使用せず薄い銅板を使用する。印加電流はビーム取り出し時のみ印加する短パルスである。Eddy セプタムの優位性は漏れ磁場を大幅に軽減できる事である。パルス磁場がセプタム板を貫通する際にセプタム板表面上で発生する渦電流によって誘導される誘導磁場が漏れ磁場を打ち消す事で、旧低磁場セプタムよりも低い漏れ磁場に軽減する事が可能である。更にビーム取り出し時のみ励磁するため、MR への入射と加速の時間帯に漏れ磁場が存在しない。他の利点としてセプタムコイルがないため磁極開口部の拡大が可能になる。ホーコンダクタのセプタムコイルが存在しないため絶縁破壊の心配もない。パルス電流を印加する事で電磁石の発熱量が大幅に軽減できる事も期待できる。新低磁場セプタム電磁石は 2 台の Eddy セプタムを周回ラインに対して対称に設置し、1 台の真空槽内に収納する。これを 1 式として旧低磁場セプタムと同様 2 式使用する。ビーム方向に対して上流側を Eddy-1、下流側を Eddy-2 と呼ぶ (Fig. 1)。設計検討の結果、磁極開口部の口径は 150 mm(H)×80 mm(V)、磁極長は約 1.5 m、コイルターン数は 2、セプタム銅板の厚さは 6 mm で決定された。旧低磁場セプタム用電源はパターン電流出力用であるため、Eddy セプタム用の新電源の開発も必要であった。設計検討の結果、出力は 6 kV×22 kA を最大値とする半正弦波のパルス電流であり、時間幅は全幅で約 800 μs で決定された。30-GeV ビームの取り出し条件は 3 kV×11 kA を想定した。まず 2014 年に 1 式目の新電源と Eddy セプタムを製作した。そして 2021 年まで試験通電を行い電源の評価及び改修、磁場測定及び漏れ磁場軽減対策を行った [8–14]。2 式目の新電源と Eddy セプタムは 2016 年に製作した。MR インストール用の Eddy セプタムの最終構築は 2021 年 3 月から開始し、MR へのインストールは 2022 年 4 月に完了した。新電源の MR へのインストールは 2022 年 2 月に行い、出力調整は 2022 年 5 月に完了した。

2.2 高磁場セプタム電磁石

4 式の高磁場セプタム電磁石 (高磁場セプタム) は全てが約 1 T の磁場を発生させる電流型セプタム電磁石である。ビーム上流方向からそれぞれ SM30、31、32、33 と呼んでいる (Fig. 1)。交換理由は主に次の 3 点である。1 点目はビーム上流部に設置されている四重極電磁石の大型化に伴う高磁場セプタムビームライン長の短縮化が必要である事。2 点目は高繰り返しによって SUS 製取り出し用ビームダクト表面に発生する渦電流による発熱量が増加する事への対策として、ビームダクトの素材をセラミックス製に変更する事。3 点目はビームの大強度化に伴う周回ビームダクトの高放射化を軽減するためビームダクトの口径拡大とダクト素材を SUS 製から純チタン製に変更する事である。SM30、31、32 は新電磁石に交換し、SM33 は撤去される SM32 と SM33 の ABT 側の電磁石と新規製作の真空ダクトを用いて新 SM33 として再構築する事にした。新 SM30,31,32 は全て 2015 年に製作された。その後、2018 年、2019 年にまず新 SM30 の通電試験と磁場測定による性能評価を行い [15,16]、2020 年新 SM31 の性能評価を行った [17]。新 SM32 の通電試験は 2021 年夏に実施したが電磁石コイルに致命的な欠陥が発見され、MR へのインストールを延期した。詳細については Ref. [18] を参照されたい。新 SM33 の構築は 2022 年 3 月に行われ問題なく完了した。新 SM30、SM31、SM33 の MR へのインストールは 2022 年 5 月に完了し、通電試験を行い問題がない事を確認した。

3. FX セプタム電磁石の漏れ磁場軽減対策

FX セプタム電磁石の重要な課題は周回ライン上の漏れ磁場軽減である。原理的には漏れ磁場をゼロにする事ができる構造であるが現実にはゼロにする事はできず、鉄のような強磁性体を磁気遮蔽体として磁極側面開口部を覆う必要がある。他にも漏れ磁場に強く寄与する箇所が鞍型をした電磁石コイルの前後橋部である (コイル端部)。コイル端部ではコイル内を流れる電流が作る磁場が周回ラインに到達するため大きな漏れ磁場 (端部磁場) となる。

3.1 Eddy セプタムの漏れ磁場対策

Eddy セプタムにはコイル端部はない。しかし磁極端部が端部磁場発生源となり漏れ磁場成分に強く寄与する。そこで端部磁場を軽減するため磁極端部にエンドフィールドクランプ (FC) を導入した。OPERA 3D によるシミュレーション計算では FC によって漏れ磁場は約 1/10 に軽減できると期待された [19,20]。次に左右の電磁石コイルを直列に繋ぐための渡り導体で生成される電流磁場が周回ライン内に直接届くため、これを遮蔽するために磁極上面と渡り導体の間に 5 mm 厚の無酸素銅板を天板シールドとして設置した。天板シールドによって漏れ磁場は 1/6 程度に減少した事を測定によって確認した [8]。2019 年、周回ラインの全長をビーム方向に沿って位置分布を測定した結果、周回ライン中心から水平方向に ± 33 mm の位置で磁極端部に約 10 Gauss の磁場を確認した [12]。そこで更なる漏れ磁場軽減のため、短い長さの純鉄製ダクト型シールドを製作し磁極端部に設置した結果、漏れ磁場は 2 Gauss 以下にまで軽減する事が確認できた。一方、磁極内領域には数 Gauss の漏れ磁場が残っていた。2020 年、周回ライン全体の漏れ磁場を軽減するため、周回ライン内に装着できる 2.3 m 長の純鉄製ダクト型シールドを製作した。ダクト型シールドの肉厚は側面が 1 mm、上底面が 3 mm である。このダクト型シールドを装着した状態でダクト型シールド内の漏れ磁場を測定した結果、2 Gauss 以下の端部磁場が観測されたのみで他の位置ではほぼ 0 Gauss にまで軽減する事に成功した [13]。この結果からダクト型シールドをビーム運転に導入する事が決定された。2021 年ダクト型シールドの最終形状を検討した。Eddy セプタム用真空槽の全長が 2.254 m であるため、ダクト型シールドの全長は 2.244 m に決定した。肉厚は試験版と同じにした。一方、試験版の断面形状は四角形であったが、最終版は周回ラインの断面形状に合わせて八角形にした。向い合せに設置される 2 台の Eddy セプタムは、間にできる周回ラインの水平方向のアーチャーが入口から出口に向かって狭くなるテーパ状に設置されるためダクト型シールドもテーパ状で設計した。検討の結果、Eddy-1 用の入出口の内寸法はそれぞれ 98.1 mm、84.6 mm に決まり、Eddy-2 用はそれぞれ 83.4 mm、74.4 mm に決まった。垂直方向の内寸法はテーパ形状ではなくビームのアーチャーに必要な 100 mm 以上を条件とし、最終的に一定値の 116.4 mm に決まった。ダクト型シールドは超高真空内に設置するため表面に無電解ニッケルメッキを施し、その後ベーキング処理を施した。ダクト型シールドは 2021 年 7 月に完成した。Fig. 2 に Eddy-1 のダクト型シールドの外観図と周回ラインに装着された状態の写真を示す。2022 年 3 月、ダクト型シールドを装着した状態の Eddy2 の周回ライン内をビーム方向に沿って漏れ磁場の測定を行った。測定範囲は周回ライン中心と水平方向に沿って ± 26 mm (26-mm track) の位置である。充電電圧は 3 kV と 4.5 kV の 2 通りである。Fig. 3 に今回の測定結果を 2019 年に測定したダクト型シールド無しの結果と一緒に示す。磁極内領域の磁場は 0.1 Gauss 以下に軽減し、ダクト型シールドの外側での最大値も 3 kV、4.5 kV でそれぞれ 3 Gauss、5 Gauss に軽減した。26-mm track の端部磁場の分布に非対称性が見

られるがこれは渡り導体を作る電流磁場の効果である。積分磁場 (BL) の時間発展に関しては、シールド無しの状態では中心軸上で最大 1 Gauss \times m であったがシールド有りの状態では両方ともに約 0.2 Gauss \times m に軽減できた。26-mm track 上でも 4.5 kV で最大 0.6 Gauss \times m 程度であり、大幅に漏れ磁場が軽減した事を確認した。30-GeV ビーム取り出し時の Q 成分の積分磁場勾配 (GL) は約 0.08 Gauss \times m/cm であった。Eddy セプタム 2 式分のノーマル四重極係数 (K_1) の積分値 (K_1L) を算出すると $1.55 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ である。旧低磁場セプタムの K_1L は約 10^{-4} m^{-1} であったので約 1/10 程度に軽減した事を確認できた。

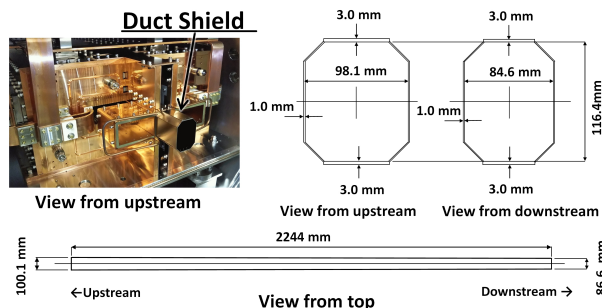


Figure 2: The additional duct shield for Eddy-1.

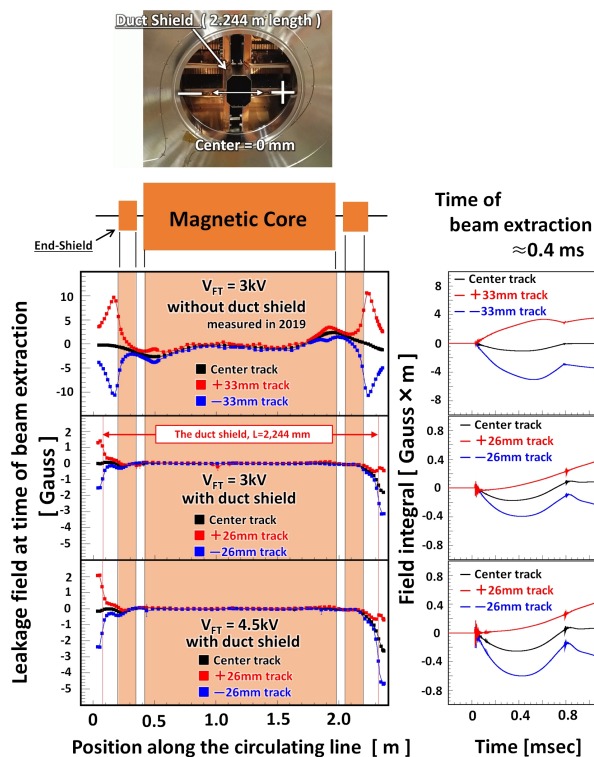


Figure 3: Leakage field and BL without any duct shields measured in 2019 (top) and with duct shield measured in 2022 (middle and bottom).

3.2 新高磁場セプタムの漏れ磁場対策

2019年、新SM30の漏れ磁場軽減対策として磁極端部にFCを装着した[16]。FC装着後の漏れ磁場測定の結果、3-GeV陽子ビーム取り出し用のフラットボトム(FB)電流値である369AでのGLは約0.2 Gauss×m/cmを得た。K₁Lは約1.57×10⁻⁴ m⁻¹である。新SM31については2020年FCを装着した状態での漏れ磁場測定の結果、磁極端部に依然大きな漏れ磁場が残存している事を確認した[17]。FB、フラットトップ(FT)電流値はそれぞれ408A、3,300Aに設定した。また周回ビームダクトの内側面から中心方向に18mmの距離(18-mm track)を測定した結果、ビーム下流部に最大170 Gaussの非常に大きな磁場が存在している事が確認された。この大きな磁場はセプタム板の磁気飽和による結果である事が分かった。FBとFT部のBLにはそれぞれ約~1.2 Gauss×m、~1.6 Gauss×mの大きな二極成分が観測された。GLはFB、FTでそれぞれ約0.12 Gauss×m/cm、約1.1 Gauss×m/cmであり、K₁Lは両方共に約1×10⁻⁴ m⁻¹であった。二極成分が特に大きいため更なる漏れ磁場軽減が必要であると判断した。

漏れ磁場を更に軽減するため、新SM30、31の周回ビームダクト内に純鉄製のダクト型シールド(内部シールド)の導入を決定した。周回ビームダクトの全長はそれぞれ1.644m、1.837mであるため内部シールドの全長はそれぞれ1.765m、1.935mで設計した。内部シールドの板厚はそれぞれ1mm、3mmである。新SM30の板厚を1mmにした理由は周回ダクトに必要なアパーチャーに対して1mm程度の余裕しかなかったからである。新SM30用の内部シールドの出入口の内寸法はそれぞれ56.8mm(H)×103.4mm(V)、85.6mm(H)×103.4mm(V)であり、テーパ構造をしたダクトである。新SM31用の内部シールドの出入口の内寸法はそれぞれ82.2mm(H)×99.4mm(V)、219.6mm(H)×99.4mm(V)であり、同じくテーパ構造である。内部シールドは超高真空内に設置するためEddy用のダクト型シールドと同様の表面処理を行った。内部シールドは2022年3月に完成し、各周回ビームダクト内に装着された。2022年5月、MRにインストールされた新SM31の通電試験を行い、18-mm trackに沿った周回ライン内の漏れ磁場を測定した。測定時のFT電流は3,960Aとした。内部シールドを装着した写真と測定結果をFig. 4に示す。この結果から漏れ磁場が2020年測定時の約2%程度に大幅軽減した事を確認した。

以上の漏れ磁場対策を行った状態でのSM30、31の周回ビームライン上の磁場を磁場シミュレーションOPERA3D-TOSCAを用いて計算した。今回はDC電流で計算したため渦電流の効果は考慮されていない。電流値は新SM32を使用しない場合の3-GeV、30-GeVビーム取り出し用の値を用いた。3-GeVビーム取り出しの場合はSM30、SM31でそれぞれ535A、471A、30-GeVビーム取り出しの場合はそれぞれ3,830A、3,960Aとした。ビーム方向に沿った磁場分布の計算結果をFig. 5に示す。GLは3-GeV、30-GeVビーム取り出しでそれぞれ+0.02 Gauss×m/cm、+0.14 Gauss×m/cmであり、K₁Lはそれぞれ+1.9×10⁻⁵ m⁻¹、+1.3×10⁻⁵ m⁻¹であった。ここではSM33の漏れ磁場を計算していないが、周

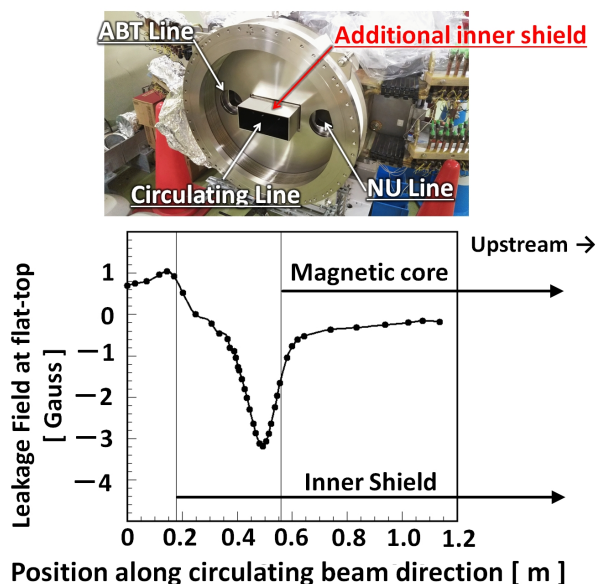


Figure 4: The additional inner shield mounted in the new SM31, viewing from downstream (upper). The longitudinal distribution of the end-fringe field along the 18-mm track with the inner shield (lower).

回ビームラインと磁極の距離が短いSM30とSM31の漏れ磁場が最も影響が大きいためK₁Lの評価としては充分である。

3.3 ビーム試験による漏れ磁場の検証

2022年6月27日から7月7日までMRはアップグレード後最初のビーム試験を繰返し周期1.36秒の条件で行った[5]。このビーム試験で3-GeV周回ビームに対する新FXセプタム電磁石の漏れ磁場の大きさを周回ビームのベータ変調($\Delta\beta$)の大きさからK₁Lを求める事で評価した。 $\Delta\beta$ はFXセプタム電磁石の通電の有無の差から測定できる。2021年4月に測定した旧FXセプタム電磁石の漏れ磁場と比較した。旧FXセプタム電磁石の印加電流値は、旧低磁場セプタムが292A、旧SM30、31、32、33がそれぞれ314A、308A、270A、270Aであった。新FXセプタム電磁石の印加電流値は新SM30、SM31、SM33がそれぞれ535A、471A、484Aであった。測定されたビーム進行方向に沿ったY方向のベータ変調($\Delta\beta_y$)をFig. 6に示す。Y方向のチューン値が半整数値に近い $\Delta\beta_y$ はY方向の方が大きい。旧FXセプタムの場合には顕著な $\Delta\beta_y$ が観測されK₁Lが $-2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ であったのに対して新FXセプタムの場合には顕著な $\Delta\beta_y$ が観測されずK₁Lの上限値として $-1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ を得た。この結果はシミュレーションの値と符号は異なるが絶対値は矛盾せず、測定の感度以下であることを確認した。そして新FXセプタムの漏れ磁場の影響は旧FXセプタムに比べて1/10以下であることが確認できた。K₁Lの符号が正(収束成分)であるのか負(発散成分)であるのかを確認する事は重要である。今後新SM30と31の漏れ磁場の実測によって検証する予定である。これまではFXセプタム電磁石に隣接してい

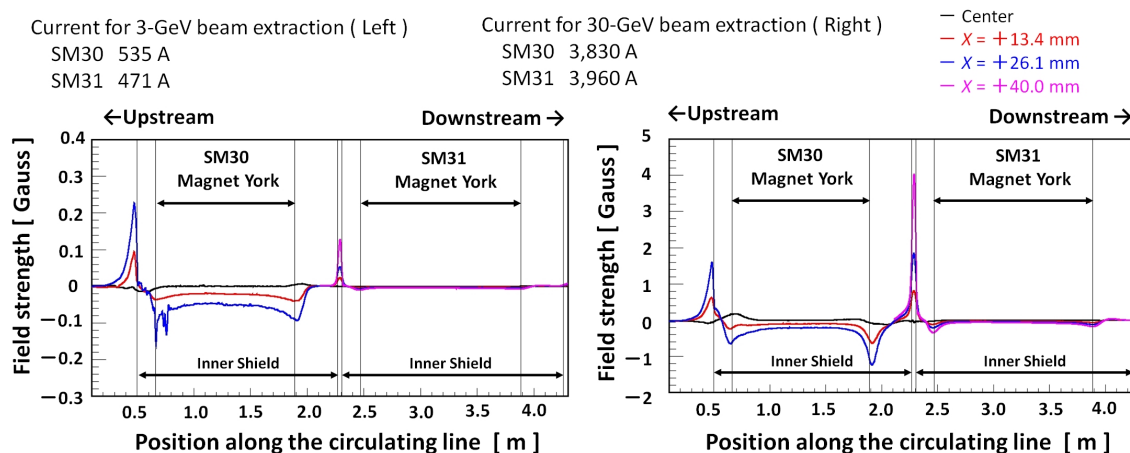


Figure 5: Simulation of the longitudinal distribution of the leakage field of the new SM30 and 31, where, the X is horizontal position which the positive is direction to the NU side. The positive field is direction from top to down.

る3つの四重極電磁石にそれぞれ備わっているトリムコイルを用いてFXセプタム電磁石の漏れ磁場の影響を補償していた。しかし新FXセプタム電磁石の漏れ磁場が周回ビームに影響を与えなくなったため、今後はトリムコイルを別の誤差磁場補正や共鳴抑制等ビームの精密調整に使用でき、大強度ビーム運転に向けたアップグレードとしては非常に有意義な結果であると言える。

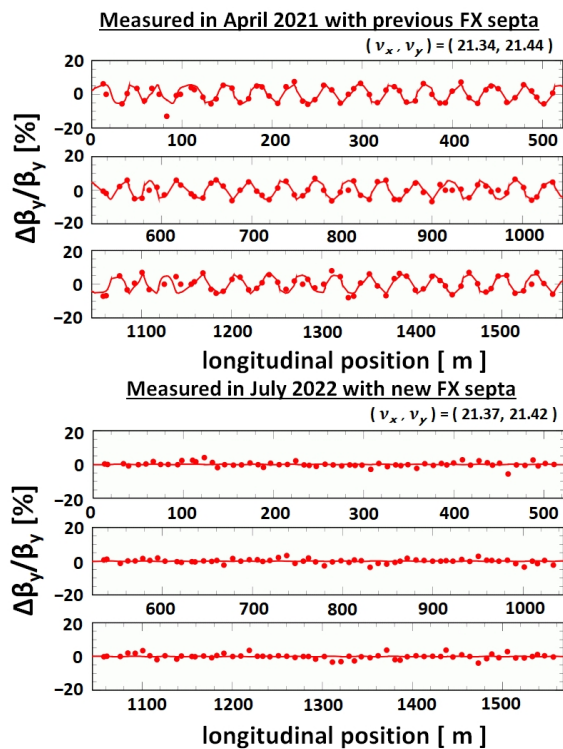


Figure 6: The beta modulation generated by the leakage field of the FX septa. The measured in 2021 with the previous FX septa (top) and in 2022 with the new FX septa (bottom). The $\Delta\beta_y$ is difference between FX septa on and off. The dots are data and line is fitting.

4. まとめ

J-PARC MR ではビームパワー増強のためのアップグレードが進行中である。FXセプタム電磁石も1台の高磁場セプタム電磁石を除いた新電磁石の導入が2022年5月末に完了した。新FXセプタム電磁石の重要な課題は漏れ磁場の軽減である。新低磁場セプタム電磁石として導入したEddyセプタム電磁石の漏れ磁場は旧低磁場セプタム電磁石に比べて1/10程度に軽減する事に成功した。新高磁場セプタム電磁石においてもフィールドランプ、内部シールドの導入した。2022年7月の3-GeVビーム試験で新FXセプタム電磁石の漏れ磁場の影響を評価した結果、漏れ磁場の影響は顕著に観測されず旧FXセプタム電磁石の1/10以下であることを確認した。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] J-PARC Group, KEK report 2021-2, June 2021.
- [3] S. Igarashi *et al.*, in *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2021, p033G01.
- [4] T. Sugimoto *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2017, p1061-1064.
- [5] T. Yasui *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2022, FROA01.
- [6] S. Iwata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2022, FRP006.
- [7] K. Kumagai *et al.*, in *Proc. of Symp. on Accelerator Science and Technology*, 1991, p220-222.
- [8] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2014, p.86-90.
- [9] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2016, p.1204-1208.
- [10] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2017, p.1051-1055.
- [11] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2018, p.499-503.
- [12] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2019, p.361-365.
- [13] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2020 p.594-598.
- [14] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2021, p.262-266.
- [15] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2019, p85-89.
- [16] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2020, p388-392.
- [17] T. Shibata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2021, p826-830.
- [18] S. Iwata *et al.*, in *Proc. of PASJ*, 2022, FROA05.
- [19] K. Fan *et al.*, in *Proc. of IPAC*, 2010, p295-297.
- [20] K. Fan *et al.*, in *Proc. of IPAC*, 2014, p2097-2099.