

# J-PARC MR 速い取り出し用セプタム電磁石の漏れ磁場測定 THE LEAKAGE FIELD OF THE NEW SEPTUM MAGNETS FOR FAST EXTRACTION OF J-PARC MR

芝田達伸<sup>\*,A)</sup>, 岩田宗磨<sup>A)</sup>, 石井恒次<sup>A)</sup>, 松本教之<sup>A)</sup>, 松本浩<sup>A)</sup>

Tatsunobu Shibata<sup>\*,A)</sup>, Soma Iwata<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Noriyuki Matsumoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

## Abstract

As part of the goal to increasing the beam power of the Main Ring for fast extraction (FX) in J-PARC to the design value of 750 kW and future goal of 1.3 MW, the new five septa for FX (FX-septa) were installed into MR in 2022. The most significant technical goals regarding the FX-septa are achieving an extremely low leakage field in the circulating line. To reduce the leakage field, the new pure iron duct-type magnetic shields were produced and mounted in the circulating ducts of the FX-septa in 2022. We measured the leakage field in the circulating lines of the two FX-septa which are high-field septa, and have confirmed that the quadrupole component of the leakage field was reduced to  $\approx 1\%$  of the previous FX-septa.

## 1. J-PARC MAIN RING

J-PARC は 400-MeV 線形加速器 (LI)、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 から入射された 8 バケットの 3-GeV 陽子ビームを 30 GeV に加速し、その後 NU または HD に出射する。NU への供給運転の場合、約  $5.2 \mu\text{s}$  の間に 8 バケットの陽子ビーム全てを NU に出射する。これを速い取り出し (Fast eXtraction:FX) と呼ぶ。MR では現在 NU への供給ビームパワーの増強が進行中である。まず設計値である 750 kW での安定供給の早期達成を目指し、更に 2028 年度末までには 1.3 MW 出力の達成を目標としている [2]。LI から負水素イオンビームを射出し、MR から NU に向けて出射するまでを 1 サイクルとしたときの 1 サイクルに要する時間を MR の繰返し周期と呼ぶ。2021 年夏までの繰返し周期は 2.48 秒であったが、この繰返し周期を大幅に短縮する高繰返し化によってビームパワーの増強を行う。繰返し周期短縮のため主電磁石用大型新電源の導入 [3]、RF 加速空洞システムの増強 [4]、リングコリメータシステムの増強 [5]、そして NU 用出射電磁石 (FX 電磁石) システムの改修と新型化等のアップグレードが進行中である。主電磁石用大型新電源の導入、リングコリメータシステム、FX 電磁石のアップグレードについては 2021 年 7 月から 2022 年 5 月末までの長期停止期間にその大部分が完了した。2022 年 6 月末から繰返し周期 1.36 秒でのビーム試験が 1 週間程行われた [6]。この試験では入射エネルギーである 3 GeV でのビーム周回試験が行われた。次のビーム試験は 2023 年 1 月末から 3 月中旬の約 2 ヶ月間実施され、最大エネルギー 8 GeV までの加速試験を行った。2023 年 4 月 15 日から初の 30 GeV 加速試験を行った。そして 4 月 16 日に初の 750 kW 出力での加速ビーム取り出しに成功した [7,8]。

## 2. FX 電磁石のアップグレード

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。低磁場セプタム電磁石と高磁場セプタム電磁石をまとめて FX セプタムと呼ぶ。FX 電磁石のアップグレードは高繰返し化に対応した電源改修及び新電磁石への交換であった。2017 年度にキッカー電磁石用電源に使用する充電用新電源の開発と導入、PFN 回路内のシャント抵抗、シャントダイオードの改良が完了した [9]。低磁場セプタム電磁石については高繰返しに対応した新電磁石システムへの交換を実施した。従来とは異なる新電磁石として渦電流型セプタム電磁石を採用し、新パルス電源も導入した [10]。高磁場セプタム電磁石については電磁石本体を全て新電磁石に交換した。電源については高繰返しに充分対応すると判断し、交換や改修は行わずそのまま使用する事で決定された。FX セプタムの MR へのインストールは 2021 年 7 月から 2022 年 5 月末までの期間にまとめて実施した。詳細は Ref. [11] を参照されたい。

### 2.1 高磁場セプタム電磁石のアップグレード

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り、大気中で使用する常伝導電磁石である。1 式の高磁場セプタムは必ず 1 つの周回ビームラインと 2 つの逆方向の取り出しラインを持つ構造となっており、それぞれの取り出しライン上に印加する磁場は互いに逆極性である。高磁場セプタムはビーム上流方向からそれぞれ SM30、31、32、33 と呼んでいる。SM30 と 31 は 2 つの逆極性磁場を 1 つの磁極で生成する両極性電磁石である。SM32 と 33 はそれぞれ 2 台の独立の片極性電磁石を周回ラインに対して対称に配置させた構造となっている。高磁場セプタムのアップグレードである新電磁石への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 (QDT155) の大口徑化に伴い [2]、高磁場セプタム用ビームライン

\* tshibata@post.j-parc.jp

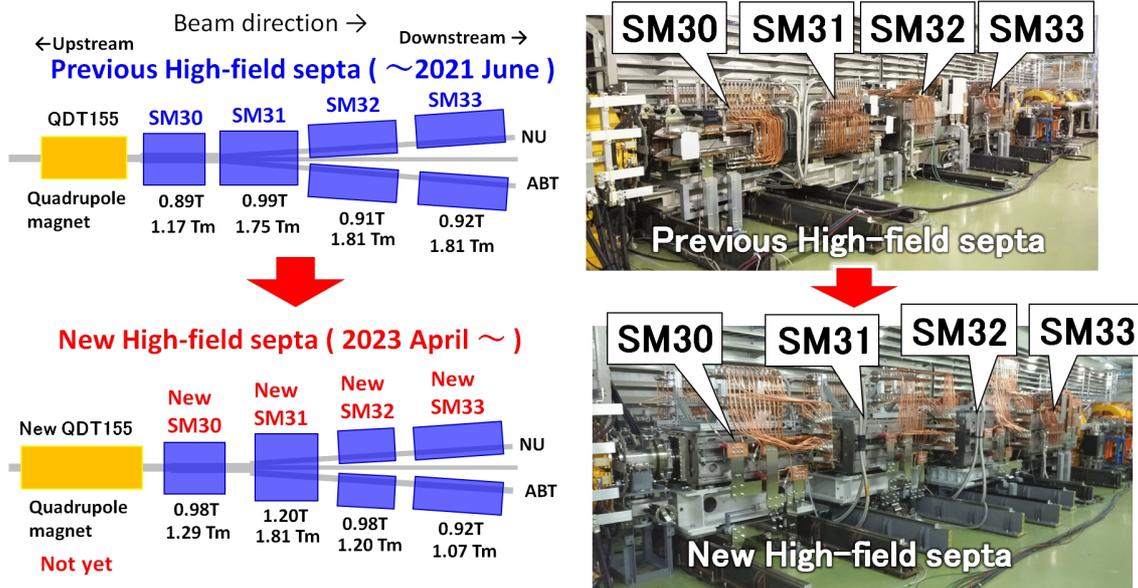


Figure 1: The layout and photographs of the previous and new FX high-field septa.

長の短縮化が必要である事。2点目は高線り返しによってSUS製の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、ビームダクトの材質をセラミックスに変更する事。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、ダクト材質をSUSから純チタンに変更する事である。純チタンは長寿命の放射性同位元素の生成がなく低放射化材として有効であり、また表面からの放出ガス速度がSUSに比べて低いため真空ダクト材としても有効である[12]。新電磁石への交換対象はSM30、31、32の3式である。SM33は撤去されるSM32とSM33のABT側の磁極と新規製作のビームダクトを用いて新SM33として再構築する。新電磁石は製作難易度が高いSM31、30、32の順に製作され2015年に順次納品された。納品後、2018年から2020年の間に新SM30、SM31の通電試験と磁場測定による性能評価を行った[13-15]。2021年10月から高磁場セプタム電磁石の撤去作業が開始された。新SM33の構築は2022年3月に行われ問題なく完了した。新高磁場セプタムの入れ換えは2022年5月末に完了し、通電試験を経て2022年6月以降のビーム運転にて運用が開始された。Fig. 1に高磁場セプタムのアップグレード前後のレイアウトと写真を示す。

## 2.2 高磁場セプタムのトラブルと対処

アップグレードされた高磁場セプタムであるが、電磁石コイルに大きなトラブルが2件発生した。1件目は2021年8月、新SM32の通電試験中にNU側の電磁石コイルで致命的な放電が発生し、ホローコンダクタが大きく損傷した。この損傷により2022年5月末までのMRへのインストールを延期した。放電の原因が電磁石コイルのターン形成部の施工不良によるものと判断し、新SM32の電磁石コイルはNU側、ABT側両方で再製作を決めた。詳細についてはRef. [16]を参照さ

れたい。新SM32用の新電磁石コイルはNU側が2022年11月、ABT側が2023年3月に完成した。2件目は2022年11月、MRにインストールされビーム運転に運用中だった新SM31のNU側電磁石コイルで新SM32と同様の放電現象が発生しホローコンダクタが大きく損傷した。この故障によりビーム運転が不可能となったが、早期復旧のため2023年1月に新SM32のNU側用新電磁石コイルを急遽導入し、ビームラインへのインストールを実行した。また放電した電磁石コイルと同型の電磁石コイルを使用している新SM30のNU側とABT側、SM31のABT側、SM32のABT側の電磁石コイルに対して放電を防ぐため、ターン形成部に補強を施した。以上の改修作業を行い、通電試験を経て2023年1月末にビーム運転を再開させた。但し、このビーム運転では高磁場セプタムへの印加電流値に制限を加えた事で加速エネルギーは8 GeVを最大値とした制限付きでの運転だった。加速エネルギーの制限を解消するため2023年3月に故障した新SM31のNU側電磁石コイルにバイパス処置を施し、NU側の通電も可能にした。この処置によって漸く全高磁場セプタムが通常の電流値を印加できる状態で仮復旧させる事ができた。新SM31用電磁石コイルの故障と対処の詳細についてはRef. [17]を参照されたい。

## 3. 高磁場セプタムの漏れ磁場対策

高磁場セプタムで重要な課題は周回ラインへの漏れ磁場を極力軽減する事である。そして低エネルギー陽子に対する漏れ磁場が最も大きくなる。そのため3-GeV周回ビームを使い旧FXセプタム電磁石の漏れ磁場による影響の大きさを評価した[18]。評価方法は周回ビームの $\beta$ 変調から漏れ磁場のintegrated normal quadrupole coefficient ( $K_1L = \frac{d}{dx} (\int B(s)ds) / (B\rho)$ ;  $x$ は水平方向位置,  $s$ は縦方向位置,  $B(s)$ は磁束密度,  $B\rho$ は

beam rigidity) を求める事である。その結果、顕著な  $\beta$  変調が観測され、 $K_1L$  は主電磁石の四重極電磁石 1 台の  $\approx 3\%$  に相当する値であった。これは大きな影響であり、特に最も影響が大きい高磁場セプタムは取り出し用ビームダクトと周回ビームダクト間の距離が短い SM30 と 31 である事も判明し、その寄与は高磁場セプタム全体の  $\approx 76\%$  であった。SM32 の寄与は  $\approx 18\%$  であった。

漏れ磁場を軽減対策としてまず純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。他にも電磁石コイルの上下流端部(コイル端部)を流れる電流が作る磁場が周回ラインに到達し大きな漏れ磁場となるため(端部磁場)、コイル端部を純鉄製のフィールドクランプ(FC)で覆う事が有効な手段である。2019年、新 SM30 のコイル端部に FC を装着した事で端部磁場が 1/10 程度に軽減した [14]。3-GeV 陽子ビーム取り出しに対応したフラットボトム (FB) 電流値での  $K_1L$  を求めると、 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  であった。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、FB 電流値と加速後の 30-GeV 陽子ビーム取り出しに対応したフラットトップ (FT) 電流値での  $K_1L$  を計算すると、それぞれ  $4.8 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  であった。 $K_1L$  としては非常に小さな値であるがセプタム板内での磁気飽和が原因と思われる大きな漏れ磁場が残存している事を確認した [15]。これらの結果から更なる漏れ磁場軽減が必要であると判断し、新 SM30、31 の周回ビームダクト内に板厚がそれぞれ 1 mm、3 mm の純鉄製のダクト型シールド(内部シールド)を 2022 年に導入した (Fig. 2)。周回ビームダクトの全長はそれぞれ 1.644 m、1.837 m であるため内部シールドの全長はそれぞれ 1.765 m、1.950 m で設計した。新 SM30 用の内部シールドの出入口の内寸法はそれぞれ 56.8 mm(H)  $\times$  103.4 mm(V)、85.6 mm(H)  $\times$  103.4 mm(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 82.2 mm(H)  $\times$  99.4 mm(V)、219.6 mm(H)  $\times$  99.4 mm(V) であり、同じくテーパ構造である。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、最も高い漏れ磁場が観測された付近の漏れ磁場を測定した結果、内部シールド導入前の  $\approx 2\%$  程度に大幅軽減した [19]。

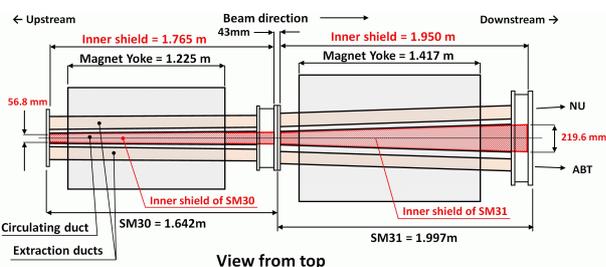


Figure 2: Illustration of the new SM30 and SM31 and the inner shields which were mounted in the circulating ducts.

2022 年 7 月のビーム試験にて 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影響の大きさを評価した。評価方法は同じく周回ビームの  $\beta$

変調から  $K_1L$  を測定し、2021 年 4 月に測定された旧 FX セプタム電磁石の漏れ磁場による  $K_1L$  の値である  $-2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  と比較する事であった。測定結果、周回ビームに顕著な  $\beta$  変調は観測されず、新 FX セプタムの  $K_1L$  は上限値として  $-1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  を得た [19]。よって新 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。これまでは FX セプタム電磁石に隣接している 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、半整数の 2 次共鳴 ( $2\nu_y = 43$ ) を抑制した [2, 20, 21]。今後はトリムコイルを別の誤差磁場補正に使用でき、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。四重極電磁石の誤差磁場の評価精度も向上しており、今後の新たなトリムコイル補正の可能性も示唆する結果も得られている [22]。

#### 4. 高磁場セプタム電磁石の漏れ磁場測定

2022 年 10 月、新 SM30、31 の周回ビームダクト内の垂直成分の漏れ磁場測定を行った。磁場の値だけでなく時間発展も測定するために磁場波形を記録した。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、磁場波形の記録には 16 ビットの AD 変換ボードを使用した。磁気センサーをビーム軸方向に沿って移動させて縦方向の位置依存性を測定した。縦方向位置依存性は水平方向 (x 方向) の位置を変えて 5 つのライン上で測定した。但し新 SM30 と 31 の内部シールドの口径が異なるため、x 方向の測定範囲は異なり、SM30 は  $x=0 \text{ mm}$  (中心ライン) と  $\pm 13.4 \text{ mm}$  (13-mm ライン) の 3 つのライン、SM31 はその 3 つに加えて  $\pm 26.1 \text{ mm}$  (26-mm ライン) 5 つのラインに沿って測定した。印加電流の形状はビーム入射、加速、取り出しに合わせたパターン形状になっており、パターンパラメータとして、FB 電流、FT 電流の値を定義する。本測定において、FB 電流値は SM30、31 でそれぞれ 535 A、471 A とし、FT 電流値はそれぞれ 3,843 A、3,960 A の一定値を与えた (Fig. 3)。これらの値は新 SM32 を除く 3 式の高磁場セプタムだけでビーム運転する場合に適した値である。

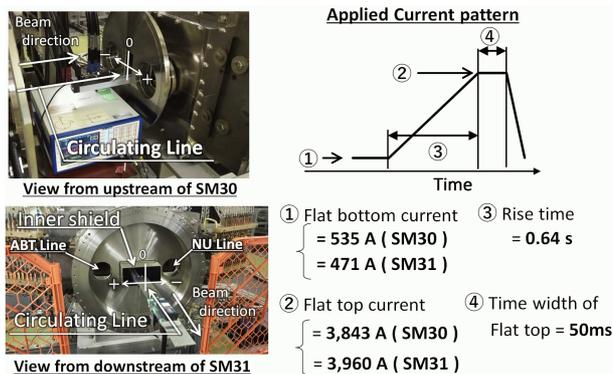


Figure 3: Photographs of SM30 and SM31 (left), and the applied current pattern (right).

まず電流を印加しない状態での磁場分布を測定し

た。Figure 4(上)に測定された +13 mm ライン上の縦方向の位置分布を示す。新 SM30、31 両方の磁極端部で上昇が見られる有意な構造を持った磁場が観測された。この磁場は電磁石の残留磁場であると考えられる。新 SM31 の残留磁場は新 SM30 よりも大きい事が分かる。これは 2019 年の測定時に観測されたセプタム板の磁気飽和による大きな漏れ磁場の影響であると考えられる。新 SM30、31 の残留磁場の積分磁場値 (BL) は +0.23 gauss·m であった。この BL 値は 3-GeV 陽子ビームの偏向角に換算して  $\approx 2 \mu\text{rad}$  であるため二極成分としては充分小さく問題ではない。s=2 m の位置に  $\approx 0.2 \text{ gauss}$  の不連続点が見られるが、これは新 SM30 と新 SM31 で別々に測定したための系統的なずれである。Figure 4(中)は FB 電流を印加した時の 5 つのライン上の縦方向分布を示す。新 SM30 では 3 つのライン、新 SM31 では 5 つのライン上で測定した。磁場構造は残留磁場とほぼ同じである事が分かる。これは FB 電流による励磁磁場よりも残留磁場の方が大きい事を示す。+13 mm ライン上の BL 値は  $-0.03 \text{ gauss}\cdot\text{m}$  であった。残留磁場の BL 値との違いは僅かな励磁磁場の寄与と測定上の系統誤差が含まれた結果であると考えられる。水平方向の位置依存性が小さい事も確認でき、残留磁場はおおよそ二極成分である事も確認できた。Figure 4(下)は FT 電流を印加した時の縦方向分布を示す。FT 電流の印加によって励磁磁場が漸く観測できた。特に端部磁場は顕著な構造を持っており、水平方向の位置依存性も確認できる。FB 電流の印加時に比べて顕著な励磁磁場の寄与が見られるが、それでも漏れ磁場は小さく、+13 mm ライン上の BL 値は  $-0.2 \text{ gauss}\cdot\text{m}$  であり残留磁場程度の BL 値でしかない事も確認できた。s=2.3 m 付近で 26-mm ライン上に  $\pm 4 \text{ gauss}$  の鋭いピークが観測されたが、この箇所には 42 mm 長の内部シールドがない空間があり、磁気遮蔽の効果がないからである。

次に BL 値の水平方向位置分布から漏れ磁場の高次の成分、特に四重極成分の評価を行うため  $K_{1L}$  の測定を行った。まず Fig. 5 に縦方向位置分布から計算した BL 値の水平方向の位置依存性を示す。この結果から四重極成分の磁場勾配を計算すると、FB 電流印加時は  $\approx -0.014 \text{ gauss}\cdot\text{m}/\text{cm}$  であった。この磁場勾配は非常に小さく、残留磁場に四重極成分がほぼなく、二極成分のみが寄与している事を示している。FT 電流印加時の勾配は  $\approx 0.1 \text{ gauss}\cdot\text{m}/\text{cm}$  であった。この値も漏れ磁場成分としては非常に小さい値であることが分かる。これらの結果から計算した  $K_{1L}$  の時間発展を Fig. 6 に示す。FB、FT 電流値印加時の  $K_{1L}$  値はそれぞれ  $(-1.1 \pm 5.8) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 、 $(+0.9 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  であった。誤差は 0 A での新 SM30 上流側入口付近、新 SM31 下流側出口付近で測定された空間磁場の水平方向の位置の違いによるばらつきである  $\pm 0.05 \text{ gauss}$ 、 $\pm 0.02 \text{ gauss}$  を系統誤差と定義して算出した。FB 電流値での  $K_{1L}$  値は 2022 年 7 月のビーム試験で得た上限値以下であり矛盾しない。旧高磁場セプタムの SM30 と SM31 のみの寄与を考慮した場合、 $K_{1L}$  は  $\approx -1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  であった [18, 19]。つまり新高磁場セプタムの漏れ磁場が旧高磁場セプタムの漏れ磁場に対して  $\approx 1 \%$  程度にまで軽減した事を確認できた。また、内部シールド

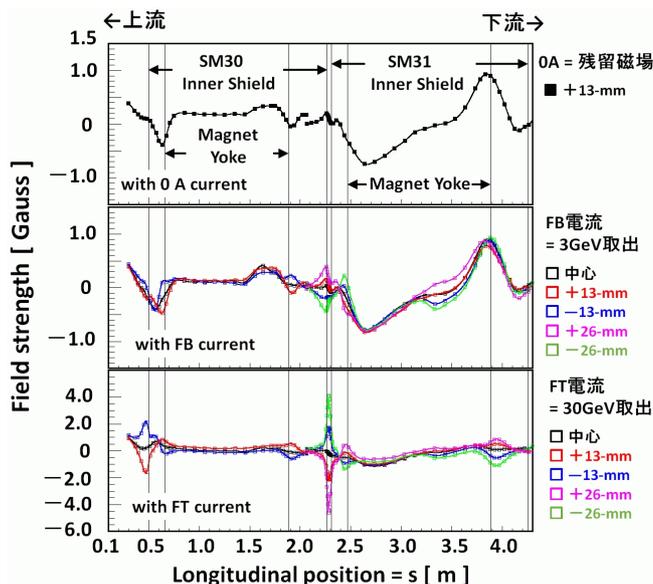


Figure 4: Longitudinal distribution of the leakage field in the circulating duct with an applied current of 0 A (top), FB current (middle) and FT current (bottom).

ドの効果を評価すると、新 SM30 のみでの  $K_{1L}$  値は FB 電流値で  $(-1.5 \pm 4.1) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  であり、内部シールド導入前よりも 1 桁小さい。新 SM31 のみでの  $K_{1L}$  値は FB、FT 電流値でそれぞれ  $(+2.4 \pm 1.9) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 、 $(+0.7 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  であり、両方ともに内部シールド導入前に比べて軽減した。特に FT 電流値の方は同じ電流値に換算して  $\approx 5.4 \%$  程度に軽減した。

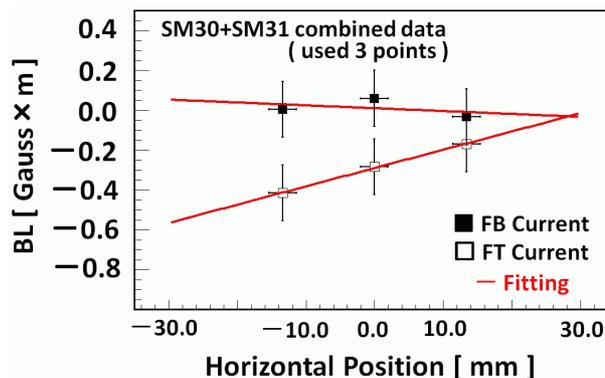


Figure 5: The horizontal distribution (quadrupole component) of the BL with applied current of FB and FT.

## 5. 今後の課題

今後の課題は新 SM30、31 の残留磁場の理解と新 SM32 の漏れ磁場測定である。残留磁場の大きさや構造についてはまだ十分な理解に至っていない。十分な理解を得るためにシミュレーションによる磁場解析が不可欠である。新 SM32 の漏れ磁場の実測も今後の重要な課題である。2023 年秋、新 SM32 の ABT 側コイルを

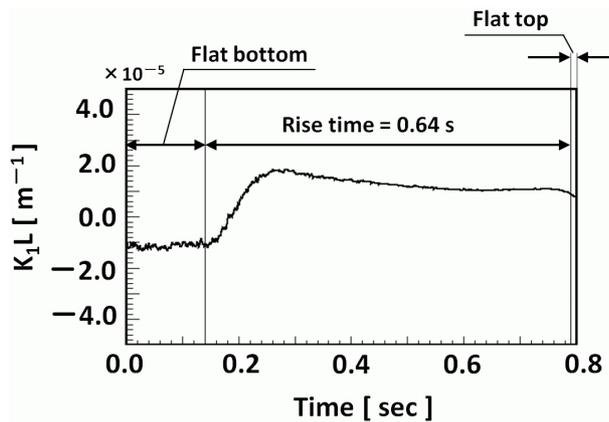


Figure 6: Time dependence of the integrated normal quadrupole coefficient,  $K_{1L}$ .

新電磁石コイルへに交換する予定である。そして交換後漏れ磁場の実測を計画している。旧 SM32 の漏れ磁場の寄与は旧高磁場セプタム全体の  $\approx 18\%$  程度であった事からも決して大きくはないと予想されるが、新 SM32 の漏れ磁場の実測値が得られる事で FX セプタム全体の漏れ磁場の大きさがほぼ評価できると期待している。

## 6. まとめ

J-PARC MR では供給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 セプタム電磁石もアップグレードされ、新 FX セプタム電磁石が導入された。新高磁場セプタム電磁石の漏れ磁場を極力軽減するため、周回ビームへの影響が最も大きい SM30 と SM31 に対して磁極端部へのフィールドクランプの装着だけでなく周回ビームダクト内への内部シールドを導入した。これにより漏れ磁場の影響が大幅に軽減した事を 2022 年 7 月のビーム試験で確認した。2022 年 10 月には新 SM30、31 の漏れ磁場の直接測定を行い、漏れ磁場の寄与がアップグレード前の旧高磁場セプタム電磁石の漏れ磁場に対して  $\approx 1\%$  程度に軽減した事を確認した。

## 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] K. Miura *et al.*, “J-PARC MR 高繰り返し化に向けた主電磁石電源のアップグレード”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 400-403. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUP0/TUP039.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUP0/TUP039.pdf)
- [4] K. Hasegawa *et al.*, “Status and Upgrade plan of the MR Ring RF systems in J-PARC”, Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference, Thailand, June. 12-17, 2022, pp. 2031-2033. <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2022/papers/wepotk004.pdf>
- [5] M. Shirakata *et al.*, “J-PARC 主リングのビームコリメータ 7 台体制”, Proceedings of the

- 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 756-760. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2022/proceedings/PDF/THP0/THP017.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/THP0/THP017.pdf)
- [6] T. Yasui *et al.*, “J-PARC MR における高繰り返しビーム試験結果”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 151-155. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROA/FROA01.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROA/FROA01.pdf)
- [7] 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>
- [8] 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
- [9] 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](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP077.pdf)
- [10] T. Shibata *et al.*, “The new eddy current type septum magnet for upgrading of fast extraction in main ring of J-PARC”, *Journal of Phys. Conf. Series*, vol. 2420, p. 012078, 2023. doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012078
- [11] 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](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRP0/FRP006.pdf)
- [12] J. Kamiya *et al.*, “チタン合金の低放射化真空材料としての可能性について”, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, Vol. 56, No. 5, 2013, pp. 167-171 <https://doi.org/10.3131/jvsj2.56.167>
- [13] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR アップグレードのための速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Jul. 31- Aug. 3, 2019, pp. 85-89. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THOH/THOH05.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THOH/THOH05.pdf)
- [14] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR アップグレードのための速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石 (2)”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 388-392. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEP0/WEP051.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEP0/WEP051.pdf)
- [15] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR アップグレードのための速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石 (3)”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, pp. 826-830. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2021/proceedings/PDF/THP0/THP014.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/THP0/THP014.pdf)
- [16] 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/](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/)

- proceedings/PDF/FROA/FROA05.pdf
- [17] S. Iwata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用新セブタム電磁石コイルの製作不備への対応”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 29- Sep. 1, 2023, WEP22.
- [18] S. Igarashi, private communication, January 2015.
- [19] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR の速い取り出し用新セブ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 (Kyushu), Oct. 18-21, 2022, pp. 253-257. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB12.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB12.pdf)
- [20] S. Igarashi *et al.*, “Magnetic field ripple reduction of Main magnets of the J-PARC Main Ring using Trim coils”, Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference, Japan, May. 23-28, 2010, pp. 301-303. <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/mopeb011.pdf>
- [21] Y. Kurimoto *et al.*, “J-PARC Main Ring アップグレード”, 加速器学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 10-20, 2021. [https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles\\$\\%2F18\\$\\%2Fp10-20.pdf](https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles$\\%2F18$\\%2Fp10-20.pdf)
- [22] T. Asamiet *et al.*, “J-PARC MR 1.3MW 化計画のための光学測定によるリング全周の誤差四極磁場評価”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 29- Sep. 1, 2023, TUP21.