

# 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 THE NEW LOW-FIELD SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF FAST EXTRACTION IN MR J-PARC

芝田達伸<sup>\*A)</sup>、濱野慧<sup>B)</sup>、中村健太<sup>B)</sup>、川口祐介<sup>B)</sup>、石井恒次<sup>A)</sup>、  
杉本拓也<sup>A)</sup>、松本教之<sup>A)</sup>、松本浩<sup>A)</sup>、Fan Kuanjun<sup>C)</sup>

Tatsunobu Shibata<sup>\*A)</sup>, Kei Hamano<sup>B)</sup>, Kenta Nakamura<sup>B)</sup>, Yusuke Kawaguchi<sup>B)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Takuya Sugimoto<sup>A)</sup>,  
Noriyuki Matsumoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>, Kuanjun Fan<sup>C)</sup>

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

<sup>B)</sup>Nichicon Kusatsu Coropration

<sup>C)</sup>Huazhong University of Science and Technology (HUST)

## Abstract

Our goal of the beam power of Main Ring (MR) for Fast eXtraction (FX) is 750 kW. The repetition rate for beam operation must be increased from current 0.4 Hz to 0.78 Hz in 2021. We have been evaluating the new Low-Field FX Septum Magnets (LF FX-Septa) which are induced eddy current type since 2014. The induced eddy current type does not have any septum coil, but has a thin plate. We also need a new pulse power supply (PS). The 1 Hz operation test and leakage field measurement were conducted in 2018 and 2019. We have still technical issues about the PS. We confirmed the large end-fringe field. Thus, the additional magnetic shield was installed, and we confirmed the leakage field were reduced by the shield. The new LF FX-Septum will be installed in MR in 2021.

## 1. J-PARC

大強度陽子加速器施設 J-PARC は 400 MeV-LINAC、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 (MLF)、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 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 に出射する加速器である。NU(HD) 運転時の MR の繰り返し周期は 2.48 s (5.20 s) である。NU 運転の場合 MR から NU へ 8 バケット全てを約 5  $\mu$ s の間に出射する。一方、HD 運転の場合は 2 s かけて出射する。この出射時間の違いから NU (HD) へのビーム取り出しをそれぞれ「速い取り出し (Fast eXtraction;FX)」、「遅い取り出し (Slow eXtraction;SX)」と呼ぶ。現在の NU への最大供給ビームパワーは約 500 kW である。ビームパワーの設計値である 750 kW [2] を達成するために 2021 年度に繰り返し周期を 1.3 s に短縮化する計画である [3,4] (1 Hz 化と呼ぶ)。更に次期目標として 1.3 MW 出力達成のためには繰り返し周期を 1.16 s に短縮する事も視野に入れている。1 Hz 化のため主電磁石用電源の開発が進んでおり、2018 年には偏向電磁石用新電源と実機の偏向電磁石を用いた通電試験が行われた [5]。そして MR の入射用電磁石と速い取り出し用電磁石 (FX 電磁石) の 1 Hz 化と 1.3 MW 対応のためのアップグレードを進めている。全てのアップグレードは 2021 年度の完成を目標にしている。入射用電磁石については [6-8] を参照されたい。

FX 電磁石は NU1 次ビームラインまたはアポルトラインにビームを振り分けるための電磁石である [9]。これらのアップグレードはキッカー電磁石用電源の改修と低磁場、高磁場セプタム電磁石の交換である。以下低磁場セプタム電磁石について記述する。

## 2. FX 用低磁場セプタム電磁石

低磁場セプタム電磁石のアップグレードとして 2021 年に電源と電磁石両方を交換する予定である。現行機の電磁石は 2 台の真空槽に収納されたビームダクトの無い電流型セプタム電磁石である。ビームの分岐がまだ十分ではない領域で使用するためビームダクト用の空間が取れず真空槽で使用している。現行機の実出力パルス電流波形は全幅が約 1.5 s のパターンで形成されている。フラットトップ (FT) までの立ち上がり時間はビーム加速時間に合わせて 1.4 s に設定されている。現行機の電源では立下り電流の制御はできず電源と回路定数で決まる自然放電によって電流を下げている。典型的な 1 台当たりの発生磁場と偏向角はそれぞれ約 0.23 T、4.4 mrad である。現行機の問題は老朽化によるセプタムコイルの絶縁破壊の危険、大強度に向けた大口径化の必要性、そして漏れ磁場である [10]。現在開発中の新低磁場セプタム電磁石は渦電流誘導型セプタム電磁石 (Eddy セプタム) である。これは MR で使用中の入射セプタム 2 と同じ型のセプタム電磁石であり十分実績のある電磁石である。Eddy セプタムと電磁石用パルス電源 (新電源) の詳細は [9] を参照されたい。Eddy セプタムと新電源の先行機は 2014 年に製作され 2019 年現在に至るまで J-PARC 施設内の MR 第 3 電源棟内で電源の出力の安定性、磁極内磁場の安定性や積分磁場等の評価を行っている [10-12]。

\* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

電源の最大出力は  $6.6 \text{ kV} \times 22 \text{ kA}$  の半正弦波型のパルス電流で、パルスの全幅は約  $800 \mu\text{s}$ 、FT の幅は約  $10 \mu\text{s}$  である。出力電流波形は半正弦波の基本波と 3 次高調波の重ね合わせによって構成されている。基本波と 3 次高調波の充電放電回路はコンデンサ、スイッチング共に並列接続された別系統である。通常のビーム運転では  $3 \text{ kV} \times 11 \text{ kA}$  を想定しており、その時の発生磁場は約  $0.3 \text{ T}$  である。出力は現行機とは異なり短パルス電流であり、出力電流値はコンデンサバンクへの充電電圧によって決まる。ビーム加速中は充電を行い、ビーム取り出しタイミングに合わせて放電する。現行機はビーム加速中も磁場が発生するために周回ビームは漏れ磁場を受けながら加速しなければならないが、Eddy セプタムの場合は加速中の漏れ磁場がないという利点がある。2018 年 3 月に補助充電器を用いた出力試験においてパルス毎の再現性は  $70 \text{ ppm}$  (pk-pk)、 $\text{r.m.s./average}=10 \text{ ppm}$  で安定した運転ができた。発生磁場については  $3 \text{ kV} \times 9 \text{ kA}$  出力時の磁極内磁場は  $0.3 \text{ T}$ 、積分磁場は  $0.47 \text{ T}\cdot\text{m}$  であり十分要求値を満たした。一方積分磁場の FT 部の平坦度は  $1.5 \times 10^{-4}$  でありまだ改善が必要である [9]。以下、新電源試験としては初めてとなる  $1 \text{ Hz}$  繰り返し運転と新電源の技術的課題について述べ、最後に周回ビームラインへの漏れ磁場測定と漏れ磁場軽減試験について記述する。

### 3. 1 HZ 運転

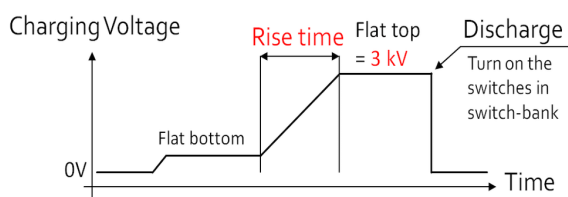


Figure 1: The waveform of the charging voltage pattern.

2018 年秋、初めて  $1 \text{ Hz}$  運転試験を行った。 $1 \text{ Hz}$  運転は充電器からコンデンサバンクへの充電時間の短縮が必要である。そのため  $1 \text{ Hz}$  運転を行うためには主充電器が 2 台以上必要である。主充電器からコンデンサバンクへの充電はパターン電圧出力で制御している (Fig. 1)。1 台の主充電器の最大出力は  $6.6 \text{ kV} \times 5 \text{ A}$ 、コンデンサバンクの全容量が  $875 \mu\text{F}$  である。充電電流はコンデンサの容量と設定電圧までの立ち上がり時間の勾配に比例する。例えば充電電圧としてビーム運転時の典型値である  $3 \text{ kV}$  の場合、立ち上げ時間を  $0.3 \text{ s}$  とすると充電電流は約  $8.75 \text{ A}$  になり、1 台の主充電器の最大電流値 ( $5 \text{ A}$ ) を超える。そのため主充電器は最低 2 台以上必要になる。補助充電器が完成した 2018 年 3 月はまだ 1 台の主充電器を使用した運転であった。理由は主充電器を 2 台使用する場合、主充電器用に供給する AC400V の使用電流が許容電流である  $50 \text{ A}$  を超える事を確認していたからである。そこで MR のビームアポートライン上で使用する四重極電磁石<sup>1</sup>用の入力 AC400 V ラインの許容電流値

<sup>1</sup> 通称アポード Q と呼んでおり、周回ライン上の四重極電磁石とは仕様異なる DC 電磁石である。

が  $300 \text{ A}$  であるため、2018 年夏期のシャットダウン期間中のみ臨時にアポード Q 用の AC400V ラインを Eddy セプタム運転用に使用した。試験した繰り返し周期は  $2.48 \text{ s}$ 、 $1.16 \text{ s}$ 、 $1.00 \text{ s}$  であった。充電電圧設定は  $3 \text{ kV}$  で固定した。充電電圧パターンは周期毎に変更し、 $2.48 \text{ s}$  の時は  $0.6 \text{ s}$ 、 $1.16 \text{ s}$  と  $1.00 \text{ s}$  の時は  $0.3 \text{ s}$  で設定した。各運転条件で問題なく約 6 時間の連続運転を行う事ができた。また出力電流値とパルス毎の再現性を評価した結果、全ての条件で出力電流のピーク値が一致し、パルス毎の再現性として  $\text{r.m.s./average}$  の値が  $10 \text{ ppm}$  程度である事が確認できた。表 1 に各繰り返し周期での充電電圧の立上時間、出力電流値の平均値、 $\text{r.m.s./average}$  値をまとめた。立ち上がり時間に関しては  $1.3 \text{ MW}$  出力運転時の主電磁石の立ち上がり時間に合わせた場合、 $0.58 \text{ s}$  にしなければならない。今後実際の運転条件に合わせた運転確認も行う予定である。

Table 1: The Operation Condition, and the Results of the Stability of Output Pulsed Current

cycle [s]	rise time [s]	peak current (average) [A]	r.m.s./ave. [ppm]
2.48	0.6	9224.97	10.3
1.16	0.3	9224.97	10.1
1.00	0.3	9224.97	10.1

### 4. 新電源の技術的課題

2019 年 7 月現在、新電源の性能を更に改善すべき課題が幾つかある。以下それらの課題について記述する。

#### 4.1 主充電器と補助充電器の切り換え時間

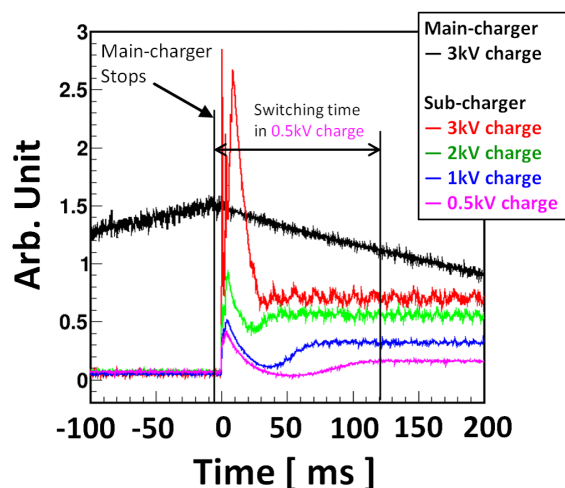


Figure 2: The switching time after optimization of the feedback system of the Main-charger and Sub-charger.

主充電器 2 台体制による高繰り返し試験の際、充電電圧が設定の  $99.0\%$  から  $99.9\%$  に達し主充電器から補助充電器に切り替わり充電電圧が設定値の  $100\%$  に達して安定するまでに必要な時間 (切り換え時間) が充電電圧の設定値に大きく依存する事が判明した。2018 年末に切

り換え時間を測定した結果、充電電圧が 3 kV の時は約 60 ms、0.5 kV の時は約 650 ms であった。充電電圧が下がると切り替え時間が長くなる傾向にあった。通常のビーム運転では充電電圧は 3 kV を想定しているが 1 Hz 運転時の MR 主電磁石のパターン電流出力の立ち上がりから FT に達する所で設定されるスムージング時間が 50 ms であるため、60 ms という時間はまだ長いと判断した。また充電電圧を下げると 1.0 Hz 運転も不可能になることは問題である。つまり主充電器から補助充電器の切り換え時間の短縮は重要な課題である。1 Hz 試験後、切り換え時間短縮のために主充電器と補助充電器の充電電圧フィードバック回路の微調整を行った。微調整後の切り換え時間の測定結果を Fig. 2 に示す。充電電圧が 3 kV の時の切り換え時間を 46 ms に短縮する事ができた。充電電圧が 0.5 kV の時は 126 ms に短縮する事ができた。3 kV 時の切り換え時間は 50 ms 以下になったが、0.5 kV 時の切り換え時間は依然として長い。これ以上の切り換え時間短縮はフィードバック回路の調整のみでは難しく回路設計の改修が必要であるため、現在切り換え時間短縮方法を検討している。

#### 4.2 放電トリガーのジッター

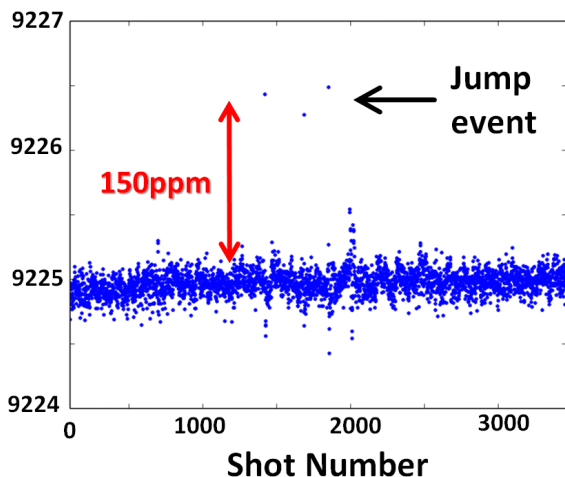


Figure 3: The time variation of output pulsed current. The three shots jumped 150 ppm.

2017 年に問題となった MR ビーム運転に同期した空間放射ノイズ [9] が解決された後、出力電流の長期安定性を評価していた時、出力電流値が 150 ppm 程ジャンプする現象が度々見られた (Fig. 3)。MR ビームとは同期しておらず新電源自体に原因があると考えた。調査の結果、出力パルス電流を構成する基本波と 3 次高調波の放電タイミングの差が設定値である 100  $\mu$ s から約 0.16  $\mu$ s 程ずれた時に発生する現象である事が判明した。同時に基本波、3 次高調波用の放電トリガー信号の時間差のずれが原因である事も判明した。時間差のずれと出力電流値の変化量の相関関係を定量的に評価するため回路シミュレーションと実試験で 2 つの出力電流の放電時間の差を 100  $\mu$ s から設定によってずらした量と合成波のピーク電流値の変化量 (ppm) との相関を調べた。その結果を Fig. 4 に示す。設定時間差からのずれが出力電流

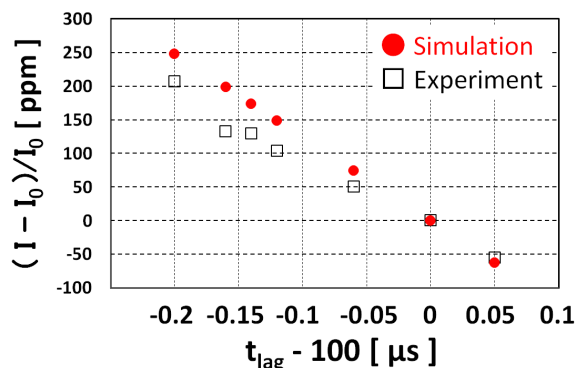


Figure 4: The correlation between the peak current and the time lag which was studied with simulation and experiment. The  $I_0$  means the peak current with the  $t_{lag}$  of 100  $\mu$ s.

値の変化量と比例関係にある。シミュレーションの結果は時間差のずれが 0.16  $\mu$ s の時、出力電流値の変化量は 185 ppm であり、実試験データと矛盾しなかった。よって今回の 150 ppm のジャンプが放電トリガーのジッターが原因である事が確認できた。現在の長期安定性の精度を決めている系統誤差には放電トリガーの僅かなジッターも含まれる。よりジッターの小さい放電トリガーを使用する事が長期安定性の改善に繋がると期待できる。現在の放電トリガーはまず外部から 1 つの光トリガー信号を放電トリガーとして新電源の制御盤に入力し、制御盤内で 2 分割する。一方の分岐信号は 3 次高調波用の放電トリガー信号としてスイッチングバンクに送信される。もう片方の信号は制御盤内で 100  $\mu$ s の遅延を与えて基本波用の放電トリガーとしてスイッチングバンクに送信される。今回は制御盤内で分岐された基本波用の放電トリガーに対する遅延処理に問題があったと推測した。この問題を根本的に解決するため 2 つの放電トリガーを独立化し、2 つとも外部から与えられるトリガーに変更する事を検討している。また、2 つとも J-PARC で開発され使用しているスケジュールドタイミング信号 [13] を使う事でより小さなジッターを実現し出力安定性の向上を試みる。スケジュールドタイミングを使用する利点は放電トリガー関係のトラブルが発生した場合に原因を突き止めやすく対策も取りやすいという事も挙げられる。2018 年末に遅延処理回路の FPGA のソフト改修を行った際、150 ppm のジャンプ現象が見られなくなった。しかしその後も約 100 ppm 程度のジャンプ現象が確認され現在も解決していない。ジッターとの関連は明らかではないがトリガー独立化は根本解決策として必要である。

#### 4.3 出力パルス電流測定

これまで出力パルス電流の測定には主にログスキーコイルを用いた。ログスキーコイルの出力信号は常に横河電機製のデータ収集システム SL1000 の 16-bit ADC [14] に入力した。しかしログスキーコイルでの電流測定精度は 100 ppm 程度であったので高精度測定には至らなかった。2016 年 12 月に PXI [15] による長期安定性用フィードバックシステムの導入以降は PXI を用いた電流測定も

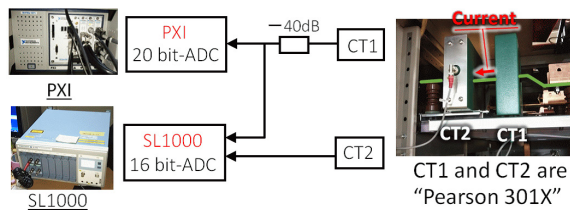


Figure 5: The scheme of the output pulsed current monitors

可能になった。PXI を用いた測定の場合、電流センサーはスイッチングバンク内に設置されている 1 台の電流変換器 (Pearson 製 301X 型;CT1) を用いる。この CT1 の出力信号は PXI の 20-bit ADC に入力される。入力された電流波形は FT 付近の  $40 \mu\text{s}$  のみを取得し、多項式でフィッティングをかけピーク値を算出する。パルス毎の電流波形やフィッティングパラメータは全て PXI のログに記録されるためオフラインで解析する事ができる。PXI によるフィードバック導入以降のパルス毎の出力電流安定性の評価は主に PXI を用いて行い、その結果は 2018 年 3 月時点で  $70 \text{ ppm (pk-pk)}$  であった [12]。一方、長期安定性の評価において以前からサーチコイルによる測定磁場に時間変動がありドリフトが観測されたが、PXI で測定された出力電流値は時間変動せず非常に安定するという不一致が確認されていた。更にログスコープを用いた電流測定においてもドリフトが見られたことからドリフトの原因を追究する必要がある。そこで 2019 年 1 月に CT1 と同じ型の CT を追加して (CT2)、PXI とは独立な電流測定を行う事にした<sup>2</sup>。2019 年 3 月以降 2 つの CT を用いた出力パルス電流の同時測定を行った (Fig. 5)。測定器の違いを評価するため CT1 からの出力信号を 2 つに分岐し片方を PXI の ADC、もう片方を SL1000 の 16bit-ADC に入力した。CT2 の出力信号は同じ SL1000 の ADC に入力した。電流測定環境を可能な限り共通にしノイズ対策も可能な限り共通にした。使用する信号ケーブルには四国電線の EM-3D-FB を用いた。EM-3D-FB はアルミ箔と錫メッキ銅線編組の 2 重シールド構造を持っている。共通モードフィルタも双方に使用した。Figure 6 に 2019 年 4 月 22 日に実施した約 7 時間連続運転で得られた出力パルス電流の時間変動を示す。PXI のデータは非常に安定であるが、CT2 を SL1000 に直接入力したデータは  $60 \text{ ppm}$  の変動をしている事が確認できる。CT1 の分岐信号を SL1000 で取得したデータは僅かなドリフトが確認できるが PXI データに近い結果であった。この結果から PXI と SL1000 の測定器による違いではない可能性が高い事を確認した。CT1 と CT2 の違いによる差であるかどうかを確認するため 2 つの CT を入れ替えた測定を行ったが同じ結果が得られたため、CT の違いによる差でない事が確認された。いずれの CT を使用するに関わらず SL1000 での直接測定では出力パルス電流値がドリフトする結果が得られている。2019 年 5 月 SL1000 の AC100 V ラインにノ

<sup>2</sup> ビーム運転中にフィードバック系に影響を与えないような PXI とは独立した電流測定環境を準備する必要もあったため CT2 の導入は重要であった。

イズカットトランスを導入したが特に変化はなかった。この不一致が意味する問題は深刻であり出力パルス電流が本当に PXI のフィードバック制御によって安定しているかどうかの判断を難しくしている。CT から測定器までの信号ラインは新電源自身を作るノイズの影響を大きく受けており、耐ノイズケーブルや共通モードフィルタを使用してもその影響が完全には消えていないと考えている。次に信号ケーブルを 2 重シールド付きツイストケーブルに置き換えて測定した。ツイストケーブルによるノイズ遮蔽の効果は一応には見られたがドリフトが消える事はなかった。またパルス電流が出力されている  $1 \text{ ms}$  の間にオフセットになるようなノイズが侵入していないかどうかを確認した結果、オフセットは全くない事を確認した。2019 年 7 月には SL1000 を  $2 \text{ mm}$  厚の銅箱に収納し、底面に信号ケーブルと電源ケーブル用の穴のみを空け、そこもケーブルを通した後でアルミホイルで覆うという処置を取った。その結果でもドリフトだけは残った。今後は SL1000 以外の測定器の使用も視野に入れて電流測定結果の矛盾の原因を探る。

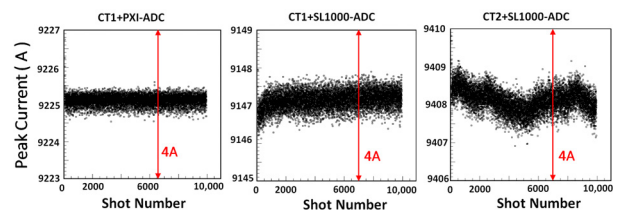


Figure 6: The time variation of the peak current of the output pulsed current by using the different monitor systems.

## 5. 周回ライン上の漏れ磁場測定

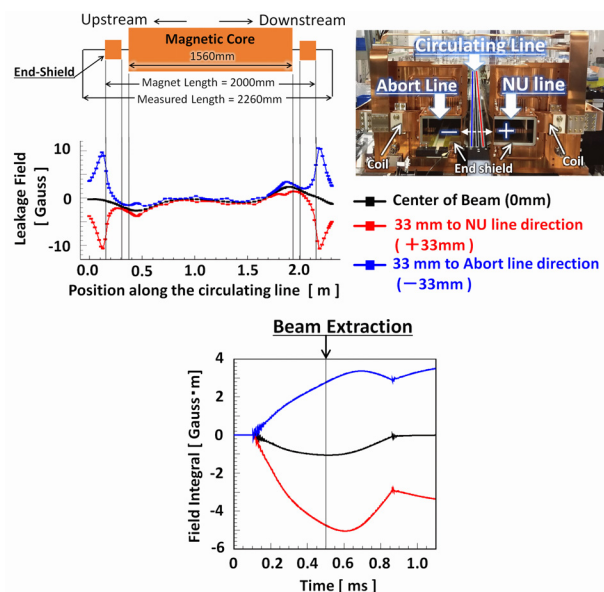


Figure 7: The longitudinal distribution of the leakage field along the circulating line (Upper). The time dependent field integral of the leakage field (Lower).

2019 年 6 月、周回ビームラインに沿った漏れ磁場の

位置分布と積分磁場を測定した。磁場測定は磁場センサーにはサーチコイルを使用した。測定範囲は磁極長1,540 mmを含む2,300 mm長であった。磁場分布の測定のためサーチコイルは絶縁材製の台車の上に設置し、台車は周回ライン上に設置した絶縁材レール上を移動できるようにした。サーチコイルの位置測定には市販のポータブルレーザー距離計を用いた。測定位置の精度は $\pm 0.5$  mmである。漏れ磁場測定を行う時の新電源の充電電圧は3 kVで固定した。期待される漏れ磁場の目標値は磁極間磁場の0.01% (0.3 G)以下である。本測定で最も懸念された点が磁極のアラインメントであった。使用している磁極用の架台はアラインメントが正確ではなく2つの向かい合う磁極が周回ビームラインに対して若干非対称になっており、向かい合ったセパタム板間の距離は上流部と下流部で異なり、その差は約3 mmであった。このアラインメントの不正確さはビーム中心では影響が出てくるがセパタム板に近づくに従って影響は小さくなる。そこでビーム中心とビーム中心から $\pm 33$  mmの位置をビーム方向に沿って漏れ磁場分布を測定した。漏れ磁場分布の測定結果をFig. 7(上)に示す。磁極内領域の漏れ磁場の最大値は約3~4 Gであり磁極端部付近で最も高くなっており目標値にはまだ1桁大きい事を確認した。セパタム板をこれ以上厚くすることは容易ではなく磁極内領域の漏れ磁場軽減方法を現在検討している。測定範囲で最も大きな漏れ磁場は $\pm 33$  mmの位置で上下流それぞれのエンドシールドの末端部で $\pm 10$  Gであった。この主な成分はコイルが作る磁場の回り込みであると推測できる。回り込み成分はエンドシールドに入る位置で最大になり、エンドシールド内は急激に軽減している。よって回り込み成分の軽減が漏れ磁場の大幅軽減に繋がると期待できる。磁場分布の構造にも注意すべき特徴がある。ビーム中心位置の磁場分布は磁極の中間地点付近を中心に極性が反転する反対称構造を持っている事である。一方 $\pm 33$  mmの位置ではまた異なる構造を持っている。ビーム中心位置のような反対称構造はもっておらず非対称な形をしているが、 $+33$  mmと $-33$  mm同士で反対称構造になっている。次に磁場分布から計算した積分磁場の時間発展をFig. 7(下)に示す。ビーム中心位置の積分磁場の最大値はビーム取り出しタイミングで約1 G·mであった。曲げ角に換算すると約0.001 mradである。積分磁場が小さいのは反対称構造による積分磁場の打ち消し合いが起こったからである。 $\pm 33$  mmの位置では磁極中間地点での極性反転が起こっていないため積分磁場は大きくなり、その最大値は約5 G·mであった。

まず積分磁場に主に寄与するエンドシールド部への回り込み成分を軽減する必要がある。2019年6月から7月にかけて試験的な磁気シールドを1台製作し(追加シールド)、上流側のエンドシールドの上流方向<sup>3</sup>に周回ビームラインに沿って設置した。製作した追加シールドは口径が120 mm $\times$ 115 mm、長さ150 mmの箱型シールドで材質は5 mm厚の純鉄(SUY)である。また箱型シールドの内上面と内両側面にはそれぞれ80 mm、90 mm幅の長さ300 mmのSUY板(厚さ2 mm)を2枚ずつ重ねた合計4 mm厚のシールド板として磁極に向かって設置した。80 mm幅は磁極内の垂直方向の口径、90 mm

は周回ラインの横方向の口径である。追加シールドを用いた漏れ磁場測定結果をFig. 8に示す。追加シールドを用いると大幅に漏れ磁場が軽減された事が確認できた。ただし今回の追加シールドは周回ビームラインのアーチャーを小さくしてしまう。更にエンドシールド末端からEddyセパタムを収納する真空槽の入口までの距離が約130 mmであるためEddyセパタムを収納する際、追加シールドが真空槽からはみ出す構造になっている。今後追加シールドの寸法の最適化が必要である。

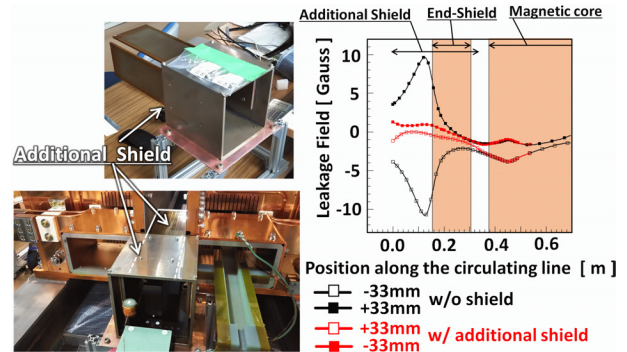


Figure 8: The result of measurement of the end fringe field with the new additional shield of SUY.

## 6. まとめ

J-PARC MRのビームパワーのアップグレードのためにMRのFX用低磁場セパタム電磁石のアップグレードが進行中である。高繰り返し化に向けた初めてとなる1 Hz運転とその安定性を評価した。新電源の性能向上のための課題として主充電器と補助充電器の切り換え時間の短縮、基本波と3次高調波のトリガー時間のジッター軽減が必要である。また出力パルス電流値測定結果が2つのモニターシステムで不一致ある問題の解決が急務である。周回ライン上の漏れ磁場分布についてもエンドシールド付近での漏れ磁場軽減の確立が重要な課題である。

## 参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] KEK Report 99-4 and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [3] T.Koseki *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys.,2012,02B004.
- [4] M.Kinsho *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p999-1003.
- [5] T.Shimogawa *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p1266-1268.
- [6] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of IPAC, 2014, p526-528.
- [7] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p1337-1339.
- [8] T.Shibata *et al.*, Proc. of IPAC, 2017, p576-578.
- [9] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p499-503.
- [10] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017, p1051-1055.
- [11] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p1204-1205.
- [12] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p86-90.
- [13] F.Tamura *et al.*, Proc. of ICALEPCS'03, 2003, pp. 247-249.
- [14] <https://www.yokogawa.co.jp/>
- [15] <http://www.ni.com/ja-jp/shop/pxi.html>

<sup>3</sup> Fig. 7の位置でいうと0 mm~150 mmの位置