

J-PARC MR アップグレードのための新低磁場セプタム電磁石の開発 (6) THE NEW LOW-FIELD SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF FAST EXTRACTION IN MR J-PARC(6)

芝田達伸^{*A)}、濱野慧^{B)}、中村健太^{B)}、川口祐介^{B)}、石井恒次^{A)}、杉本拓也^{A)}、
岩田宗磨^{A)}、松本教之^{A)}、松本浩^{A)}、Fan Kuanjun^{B)}

Tatsunobu Shibata^{*A)}、Kei Hamano^{B)}、Kenta Nakamura^{B)}、Yusuke Kawaguchi^{B)}、Koji Ishii^{A)}、
Takuya Sugimoto^{A)}、Soma Iwata^{A)}、Noriyuki Matsumoto^{A)}、Hiroshi Matsumoto^{A)}、Kuanjun Fan^{C)}

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

^{B)}Nichicon Kusatsu Corporation

^{C)}Huazhong University of Science and Technology (HUST)

Abstract

For our first goal of the beam power of Main Ring for Fast eXtraction(FX), 750 kW, we have been evaluating a new Low-Field FX Septum magnets which are induced eddy current type since 2014. In 2019, we finished the operation test with actual output coaxial cables, and a serge absorber without any problem. The two discharge triggers were separated and the flatness of the output pulsed current was optimized by the adjustment of the time difference of these two discharge triggers, and the best of the flatness was 135 ppm. In order to reduce the end fringe field, the new additional magnetic shields were produced and mounted on the end fringe. The end fringe field was quite reduced. The best additional shield was duct type shield which is installed in the circulating line. The field integral was less than 1 Gauss-m with the dut 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 に出射する陽子シンクロトロンである。現在の NU 運転時の MR の繰り返し周期は 2.48 s である。NU 運転の場合 MR から NU へ 8 バケットを約 5 μ s の間に出射する。これを速い取り出し (Fast eXtraction;FX) と呼ぶ。NU への最大供給ビームパワーは現在約 510 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 2022 年度から繰り返し周期を 1.3 s に短縮した運転を開始する予定である [3,4](1 Hz 化と呼ぶ)。更に次期目標の 1.3 MW 出力達成のために繰り返し周期を 1.16 s に短縮する計画である。1 Hz 化のため MR のアップグレードが進んでおり、MR 入射用電磁石と FX 用電磁石も 1 Hz 化と 1.3 MW 対応のために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 年度末に完了する計画である。FX 用電磁石は NU1 次ビーム (NU) ラインまたはビームアポート (ABT) ラインにビームを振り分ける電磁石である [5]。これらのアップグレードの内容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 FX 用低磁場 (Low-Field;LF) セプタム電磁石について記述する。

2. FX 用新低磁場セプタム電磁石

現行の FX LF セプタム電磁石は発生磁場約 0.23 T、曲げ角約 4.4 mrad の片極性電流型セプタム電磁石である。逆方向の NU 用と ABT 用への取り出し用に 2 台のセプタム電磁石が向い合せて設置され、その間を周回ビームが通過する仕様になっている。FX 用キッカー電磁石の約 11 mm 下流側に位置し、ビームの分岐がまだ 100 mm 程度と十分でないため、周回ビームラインと取り出しビームラインが非常に接近している。そのためビームダクトに必要な空間とビームに必要なアパーチャーの確保が両立しない。そこで電磁石全体を真空槽内に収納する事でビームダクトを不要にしている。真空槽に搭載されたセプタム電磁石は MR では他にも入射用セプタム電磁石 2 として使用されている。FX LF セプタム電磁石の交換が必要である理由はセプタムコイルの絶縁破壊の危惧、アパーチャーの大口径化の必要性、漏れ磁場軽減の必要性である。

新しい FX LF セプタム電磁石は現行機とは異なり渦電流誘導型セプタム電磁石 (Eddy セプタム) である (Fig. 1)。通常の電流型セプタム電磁石はソレノイドコイルと同じ原理でコイルの外に磁場を漏らさない構造になっている事が基本原理であるが、Eddy セプタムの形状は通常の C 型偏向電磁石と同じである。但しコイルは 2 ターンしかなく、セプタムコイルの場所には代わりに薄い銅板 (セプタム板) を装着した形状になっている。Eddy セプタムではコイルに短パルス状の電流を流す事で発生する漏れ磁場がセプタム板を貫通する際に、セプタム板表面上で磁場を打ち消す方向に渦電流が誘導され、その渦電流が作る誘導磁場が漏れ磁場を打ち消すという原理のセプタム電磁石である。Eddy セプタムは既に MR の入射用セプタム電磁石 2 [6,7] で使用され十分

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

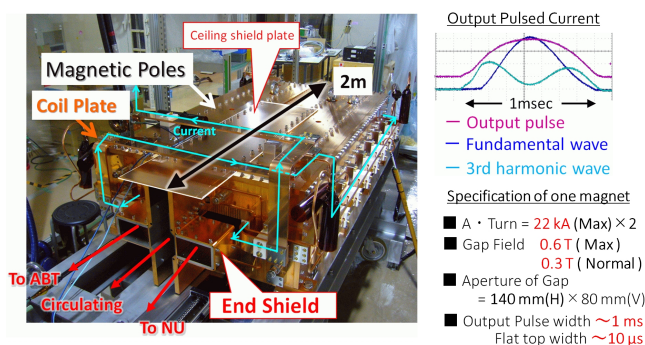


Figure 1: The photograph of the Eddy septum magnet (left), the waveform of the output pulsed current(center), and the specification list of the Eddy septum system(right).

実績のある電磁石である。但し電磁石筐体のインピーダンスに応じて渦電流の時定数が入力パルス電流幅に比べて長い場合がある。そのため時定数の長い誘導磁場が発生する特徴も持っている。この時定数の長い誘導磁場を相殺するために Eddy セプタム電磁石に印加する電流波形に正弦波型を採用する場合もある。FX 用の Eddy セプタム電磁石への最大出力は 6 kV×22 kA の半正弦波のパルス電流で、パルスの全幅は約 800 μs、フラットトップ部 (FT) の幅は約 10 μs である。FT 部の平坦度を上げるために出力波形は基本波と 3 次高調波の重ね合わせで構成されている。Eddy セプタム用パルス電源と電磁石は 2014 年に製作され、電源開発と磁場測定を続けている [5, 8–12]。Eddy セプタムも真空内仕様の電磁石である。Figure 1 は試験のため大気中に設置して通電試験を行っているが最終的には真空槽内に設置して使用する。Eddy セプタム用の真空槽は 2015 年に製作が完了した。

電源試験の最重要目的は安定出力を得る事である。2016 年長期安定性を保つための PXI フィードバックシステムを導入した [9]。2017 年には電源の制御盤から充電器に送信される充電電圧指令アナログ信号が MR ビームが作る空間ノイズの影響を大きく受ける事が判明した事でアナログ信号からシリアル通信の光信号に改修した [10]。更に、当初出力電流の安定性を決定していたのは充電電圧調整用ドロップ回路であったが、ドロップ回路自身に故障が多かった。そこでドロップ回路から補助充電器システムへの改修を行った [10]。補助充電器システムの導入は 2018 年 3 月完了し、出力電流値の揺らぎも r.m.s./average の値で 10 ppm、pk-pk 値で 70 ppm を達成した。2018 年夏には高繰り返し運転試験を実施した [11]。現状の MR の運転周期である 2.48 s と 1.16 s、1.00 s 周期の繰り返し運転での出力電流の揺らぎは全ての運転条件で 10 ppm であり非常に安定した結果を得る事ができた。FT 部の平坦度の測定を磁極内磁場の波形から測定した結果、 1.5×10^{-4} でありまだ改善が必要である [10]。

磁場測定では 3 kV 充電時の磁極内磁場が 0.3 T であり、磁極内を含む 2,260 mm 長の積分磁場 (BL) を測定した結果、0.469 T·m を得た。現行機の積分磁場は 0.44 T·m であるのでビーム運転に必要な積分磁場を十分満たす。また磁極内の BL の水平方向の一様性を

測定した結果、0.15%/47 mm の勾配があり、現行機の 0.8%/44 mm に比べて磁極内の一様性が改善されている事を確認した [10]。周回ライン上の漏れ磁場測定の結果、磁極内領域の最大値は 3~4 Gauss であったが磁極端部が大きく、漏れ磁場軽減対策が必要である。磁極端部に箱型の純鉄製シールドを設置した所、磁極端部での漏れ磁場軽減に大きな効果がある事を確認した [11, 12]。

3. 電源開発

3.1 実運転用出力同軸ケーブル試験

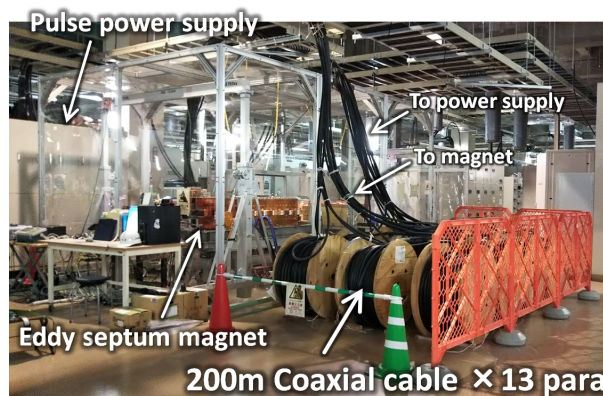


Figure 2: The installation of the 13 parallel coaxial cables of which the length is 200 m for actual operation.

Eddy 用電源から電磁石本体までは同軸ケーブルを用いて接続される。出力電流の行きは同軸ケーブルの芯線である内部導体を通り、帰りは外部導体を通る。2018 年 11 月までの試験では 1 本約 30 m 長の 60 kV 高耐圧同軸ケーブルを 2 本並列で使用していたが、ビーム運転時は実運転用ケーブルとして 1 本 200 m の同軸ケーブルを 13 本並列で使用使用する。200 m という長さは地上の電源から MR トンネル内に設置する電磁石本体までを中継無しで接続するために必要な長さである。2019 年 11 月に試験用のケーブルを撤去し、13 本の実運転用ケーブルに入れ換えた (Fig. 2)。実運転用同軸ケーブルを用いた通電で電流波形に特に問題はなかった。また将来 13 本の同軸ケーブルの内数本が使用できない状況になった場合でも残りの同軸ケーブルで運転が可能であるかどうかを確認した。具体的には 12 本、10 本のケーブルに減らした状態で通電を行った。試験用ケーブルとはインダクタンスが異なるため基本波と 3 次高調波間の電流のタイミングがずれていた。そのためまずタイミングの再調整を行った。各ケーブル数での出力パルス電流の波形を Fig. 3 に示す。ケーブルの本数を減らす事でピーク電流が下がり、ピーク時間が遅れていく事が確認できる。これはケーブルの並列数が減った事でケーブルの全インダクタンスが上昇した結果、ピーク電流値が下がり、パルス幅が長くなったからである。ケーブル本数を減らした場合はビーム運転時の電流値と放電タイミングの調整が必要である事が分かる。10 本のケーブルを使用の場合、13 本使用時に比べてパルス幅が 6 μs 長くなる。よってピーク時間は 3 μs のずれになる。ピーク時間が

$3\mu\text{s}$ 変化することは、 $5\mu\text{s}$ の間に 8 バンチのビーム全てを取り出す NU 用運転には非常に注意を必要とする。

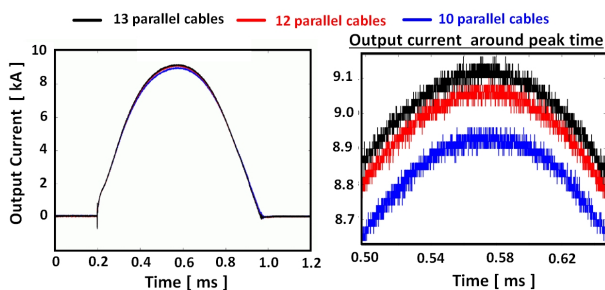


Figure 3: The measured waveform of the output pulsed current with 13, 12 and 10 parallel cables.

3.2 サージアブソーバ試験

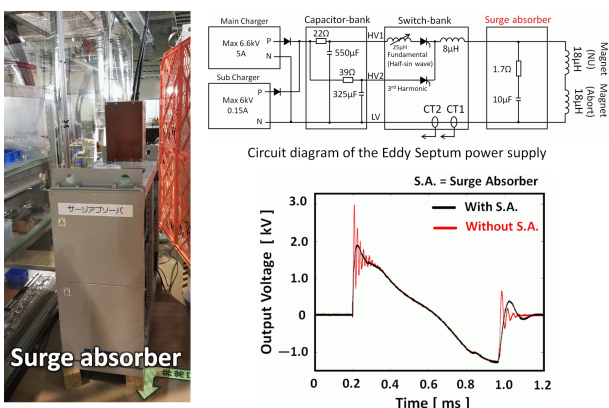


Figure 4: The photograph of the surge absorber and the circuit diagram of the pulse power supply. The measured waveform of the output pulsed current and voltage with and without the surge absorber.

サージアブソーバ回路は直流抵抗 ($1.7\ \Omega$) とコンデンサ ($10\ \mu\text{F}$) の直列回路で構成されスイッチバンクの出力端子に並列に接続して使用する。これまでの試験ではサージアブソーバ回路を使用していなかったため、2019 年 12 月に初めて接続し通電試験を行った。サージは主にスイッチバンク内の半導体スイッチであるサイリスタの動作時に発生する。サージアブソーバの有無での出力電圧の波形を Fig. 4 に示す。サージアブソーバを導入した場合、出力電圧に見られるサージによる電圧の振動がない事が確認できた。またサージアブソーバの回路定数の最適化も行ったが変更可能な範囲でサージ抑制の結果に大きな改善は現れなかったため特に大きな変更は加えなかった。

3.3 放電トリガーの独立化

基本波と 3 次高調波による合成波の形状はそれぞれの放電タイミングの時間差によって決定される [10]。まず 3 次高調波用の放電トリガー信号が外部から制御盤に入力される。基本波用の放電トリガー信号は 3 次高調波用

トリガー信号が制御盤に入力された後に制御盤内で分岐された信号である。この分岐信号が制御盤内に搭載された遅延回路によって時間差を生成される。この時間差を調整する事で出力電流の平坦度を調整する事が目的であるが、一方で重ね合わせ具体が変化するとピーク電流値も変化する。2018 年、出力電流値の長期安定性の評価試験を行った結果、出力電流が 150 ppm 程ジャンプする現象が度々観測された。原因は基本波用の放電トリガーのジッターによって合成波である出力電流波形が変化した事であると推測した。時間差が $0.16\ \mu\text{s}$ ずれると合成波のピーク電流が 150 ppm 程ずれる事も確認した。解決策として基本波用の放電トリガーを 3 次高調波用の放電トリガーから独立させる方針に変更した。2020 年 3 月、制御盤の改修が完了し、2 つの放電トリガー信号が完全に独立化した。ビーム運転時、2 つの放電トリガーは J-PARC が開発したスケジュールドタイミングシステム [13] によって制御する事で、2 つの信号の時間差に対するジッターも小さくなり、出力電流がジャンプする現象は解決すると期待できる。2020 年 8 月現在、2 つの信号は NIM 規格のディレイモジュールを使用して 2 つの信号の時間差を決定しているが、特に大きなジャンプ現象は確認されていない。

3.4 平坦度微調整

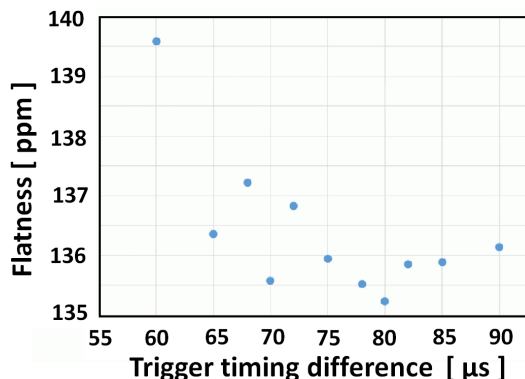


Figure 5: The correlation between trigger timing difference and the flatness around the peak timing of the output pulsed current.

2019 年 12 月、基本波と 3 次高調波用の放電トリガーの時間差と出力電流波形の平坦度の相関を調査し、平坦度の最適化を行った。最適化を行う前の時間差は常時 $100\ \mu\text{s}$ であり、平坦度は 150 ppm であった [10]。時間差を $60\ \mu\text{s}$ から変化させ、 $90\ \mu\text{s}$ まで変化させた時の時間差と出力電流波形から求めた平坦度の相関を Fig. 5 に示す。平坦度の定義はピーク電流値とピーク時間から $\pm 5\ \mu\text{s}$ の時間での電流値の落差との比である。この結果から平坦度が最小になるのは $80\ \mu\text{s}$ 付近であり、この時の平坦度は 135 ppm である事が分かった。目標とした平坦度は 100 ppm 以下に到達する事はできなかった。この調整以降は時間差を $80\ \mu\text{s}$ に設定した。

3.5 電源開発における残された課題

今後の電源開発における課題は次の3点である。1つ目はPXIシステム(実機用PXI)による電流測定結果を別デバイスで十分再現させる事である。現在新規に購入したPXIシステムを用いて再現性を確認しているが未だに両者は一致していない。但し実機用PXIシステムでのデータ処理には問題はない事を確認した。2つ目は主充電器から補助充電器への切り替え時間が充電電圧を低くすると長くなる問題に対して、低い充電電圧での運転方法を検討する事。3つ目は遠隔操作の確立である。

4. 周回ライン上の漏れ磁場軽減対策

最初の周回ライン上の漏れ磁場測定は2014年であり、左右の電磁石のコイルを直列に繋ぐための渡り導体が生成する電流磁場を遮蔽する天板シールドを導入した[5]。そして本格的な漏れ磁場の位置分布や漏れ磁場軽減対策を開始したのは2018年からである。2019年、周回ライン上をビーム軸方向に沿って位置分布を測定した[11,12]。1つのトラックは電磁石の全長2mを含む約2.3m長であり、測定したトラックは周回ライン中心と水平方向に沿って±33mmの位置の3本である。測定の結果、エンドシールドの外側には10 Gauss程の磁場が存在し、磁極端部にも4 Gauss程の磁場が存在している事が確認できた。この磁極端部からエンドシールド付近の漏れ磁場の軽減を目的に試験的なボックス型の磁気シールドを製作し磁極端部に設置した。この箱型シールドを使用した結果、エンドシールド付近の磁場は10 Gaussから2 Gauss以下にまで軽減する事ができた。また磁気シールドの素材に銅製と純鉄製の2種類で比較した結果、純鉄の方が遮蔽効果が大きかった[12]。

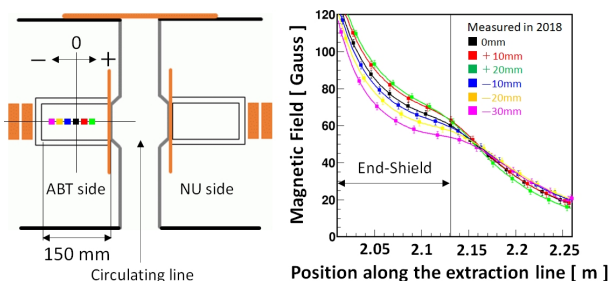


Figure 6: The longitudinal distribution of the gap field around the end-fringe measured in 2018.

箱型シールドによってエンドシールド付近の漏れ磁場軽減に大きな効果が確認できたので次にどの方向からの磁場が強く影響しているかを調査した。但しRef. [12]の結果からも推測できるが、ビーム上下流部で対称的な漏れ磁場構造になっている事から渡り導体からの電流磁場が主な成分ではない事が分かる。まず取り出しラインの磁極内磁場からの成分がどの程度あるのかを調べる。磁極内磁場は磁極の外側にも大きな磁場が漏れている事が分かっている。Figure 6に示す2018年の測定結果にはエンドシールド境界で~60 Gaussの磁場が確認できる。またエンドシールドから外側に向かって130 mmの距離でも約20 Gaussの磁場が存在している事が確認され

た。この磁極内磁場が周回側にも広がっている可能性を考慮し、Fig. 7(a)のようなシールドのビーム取り出し口を5 mm厚の純鉄板で覆った状態で漏れ磁場測定を行った。その結果、漏れ磁場が数 Gauss程度低くなった事から取り出し口から周回ライン側に入り込む磁極内磁場の寄与が数 Gaussである事が分かる。次にFig. 7(b)のように4 mm厚の純鉄板を上下に追加設置した状態で漏れ磁場測定を行った結果、漏れ磁場が更に減少した。よって垂直方向からの成分も数 Gauss存在している事が分かった。最後に側面に5 mm厚の純鉄板を左右した状態で漏れ磁場を測定した(Fig. 7(c))。その結果、箱型シールドの漏れ磁場軽減効果に近い結果になった。水平方向からの磁場が磁極内磁場以外からも寄与している事が分かる。以上の結果をFig. 7(下)に示す。最も漏れ磁場が大きく見える周回ライン中心から水平方向に沿ってNU側へ+33 mmの位置での結果のみを表示した。磁極内磁場からの直接の入り込みとそれ以外からの垂直方向、水平方向からの磁場の入り込みが加わっているため、箱型シールドが最も効果がある事が確認された。

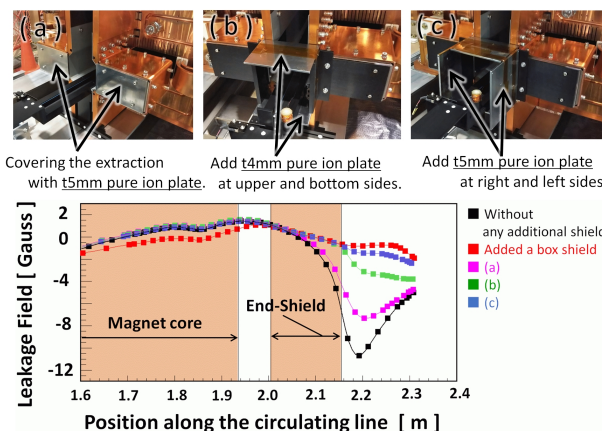


Figure 7: The photographs of the additional shields, and the measurement of the leakage field.

2020年7月磁極長を含めた2.3 m長の純鉄製のダクトシールドを製作した。ダクトシールドの外寸法は108 mm(H)×80 mm(H)で肉厚は3 mmである。ダクトシールドを周回ラインに納めた状態をFig. 8(上)に示す。この状態で周回ライン中心と水平方向に±33 mmの位置をビーム軸に沿って位置分布を測定した。測定結果をFig. 8(下)に示す。エンドシールドの境界付近で2 Gauss以下の磁場が観測されたのみで他の位置ではほぼ0 Gaussである事が確認できた。積分磁場の時間波形をFig. 9に示す。ビーム取り出しタイミングまでの積分磁場は1 Gauss-m以下である事が確認できた。この結果からダクトシールドの本格的な導入の検討を始めた。

ダクトシールドの今後の課題は最終寸法の決定である。現在の試験では周回ラインの水平方向のアーチャーは約110 mmあるが、実運転用の寸法は最大でも92 mm程度である。ダクトシールドの側面を厚くすると水平方向のアーチャーに大きく影響が出るため可能な限り薄くする必要がある。また試験用ダクトシールドの高さ寸法は磁極間距離と同じ80 mmであるが、周回

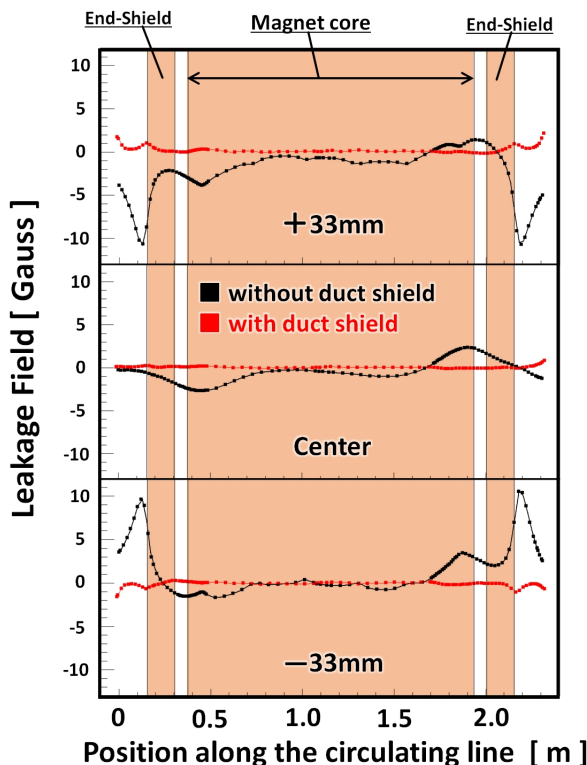
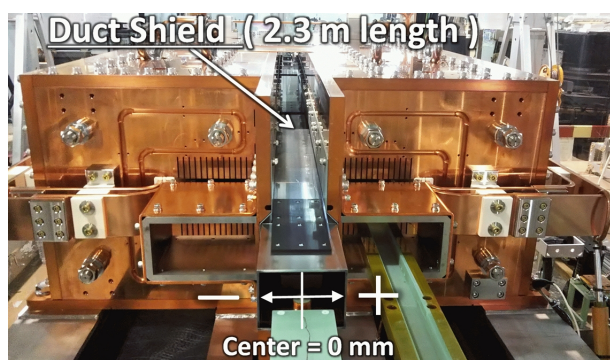


Figure 8: The installation of a duct shield in the eddy magnet(upper left). The measurement position in the circulating line (upper right). The longitudinal distribution of the leakage field along the circulating line with and without duct shield(bottom).

ラインを通過する周回ビームにはエミッタンスが大きい 3 GeV も含まれるため EDDY セプタムの周回ラインを通過するときのビームサイズが ± 40 mm を超える可能性がある事が SAD を用いたビームシミュレーション結果から報告されている [14]。今後ビームシミュレーション結果と漏れ磁場測定結果からダクトシールドのアーチャーを十分確保しながら漏れ磁場を十分軽減する最適値を決定する事が重要な課題である。そして真空チャンパー内での設置方法の検討も進めている。

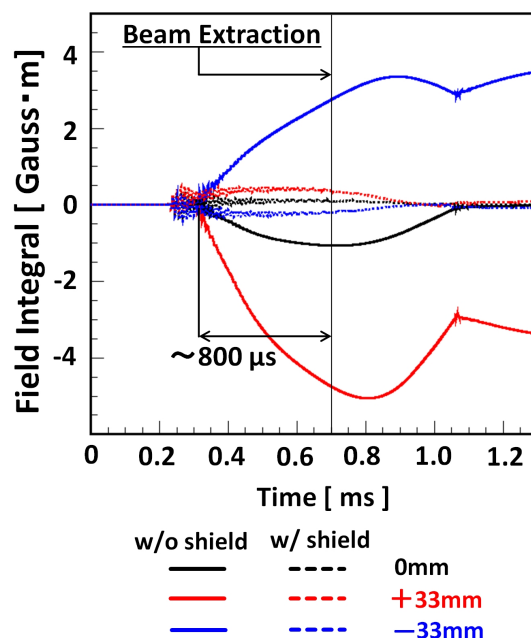


Figure 9: The time dependent field integral with and without duct shield.

5. まとめ

MR では 2021 年度に 750 kW に向けたアップグレードが予定されている。FX 用 LF セプタム電磁石も現行機から新しい Eddy セプタム電磁石に交換される予定である。Eddy セプタム用電源の開発は 2014 年から続けられており、実運用用の同軸ケーブルを用いた通電試験、サージアブソーバの試験、基本波と 3 次高調波用放電トリガーの独立化、平坦度の微調整が完了した。磁場測定においては漏れ磁場測定の軽減対策としてダクトシールドが最も軽減効果が高い事を確認した。現在本格的導入のため最適な形状と真空チャンパー内での設置方法等を検討している。

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, p.999-1003.
- [5] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.86-90.
- [6] K. Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2010, p295-297.
- [7] K. Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2014, p2097-2099.
- [8] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p.1024-1028.
- [9] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p.1051-1055.
- [10] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.499-503.
- [11] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.361-365.
- [12] T. Shibata *et al.*, Proc. of 3rd J-PARC sympo., 2019.
- [13] F. Tamura *et al.*, Proc. of ICALEPCS'03, 2003, pp. 247-249.
- [14] S. Iwata, private communication, July, 2020.