

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 (7) THE NEW LOW-FIELD SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF FAST EXTRACTION IN MR J-PARC(7)

芝田達伸^{*A)}、岩田宗磨^{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)}、松本教之^{A)}、松本浩^{A)}、

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

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

^{B)}Nichicon Kusatsu Corporation

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(Eddy-Septum) since 2014. The pending technical issues are disagreement in two current monitor systems and the long switching time of the Main-charger to Sub-charger at low charging voltage. We measured a gap field during measurement of current, and found no drift in time variation of gap field. Our conclusion was that the cause of the disagreement is electric and radiative noise which make the drift in the time variation. The long-term stability of the output pulsed current depends on the switching time and charging voltage. We investigated the correlation between the keeping time of flat-top charging voltage and long-time stability with various charging voltages. Then, we determined the minimum keeping time with good stability for 30 GeV, 8 GeV and 3 GeV beam extraction. In June 2021, we have first conducted the 1 Hz operation and high-voltage test of the Eddy-Septum which is mounted in a vacuum chamber, and we found no problem. Two new pure iron duct type magnetic shield for reducing the leakage field were produced in July 2021. The new LF FX-Septum will be installed in MR in early of 2022.

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 (2021 年 8 月時点)、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 の間に射出する。これを速い取り出し (Fast eXtraction;FX) と呼ぶ。現在 NU への供給ビームパワーの最大値は 2020 年に達した 510 kW である [2]。ビームパワーの設計値である 750 kW [3] 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 [4, 5](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。MR の入射用電磁石と 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おり、2021 年度末に完了する予定である。FX 用電磁石は NU 1 次ビームラインまたはビームアボートダンプ (ABT) ラインに陽子ビームを振り分ける電磁石である [6]。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 用低磁場セプタム電磁石

現行の FX LF セプタム電磁石 (LF セプタム) は発生磁場約 0.23 T、曲げ角約 4.35 mrad の片極性電流型セプタム電磁石である [6]。NU と ABT への取り出し用に磁場の方向が互いに逆向きの 2 台のセプタム電磁石を向い合せて設置し、その間を周回ビームが通過する。LF セプタムの位置ではまだ取り出しビームの分岐が 100 mm 程度と十分な距離ではないためビームダクトの設置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 2 台の電磁石全体を 1 セットとして 1 台の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。LF セプタム用の真空槽は 2 台あり、それぞれに同じセプタム電磁石が収納されているので、合計 2 セットの LF セプタムを使用している。印加電流はパターン電流である。現状のパターンは全幅は約 1.5 s、立ち上がり時間は 1.4 s、フラットトップ (FT) の維持時間は 20 ms である。アップグレードのために FX LF セプタムの交換を行う理由は現行機の使用年数が 10 年以上であるため細いセプタムコイルの経年劣化による絶縁破壊を危惧している事、ビーム大強化に伴って増大するビームハロー損失に伴う放射線を軽減するためのアパーチャーの拡大の必要性、そして低エネルギー領域で影響が大きい LF セプタムの漏れ磁場軽減の必要性である。

新しい LF セプタムは現行機とは全く異なる渦電流誘導型セプタム電磁石 (Eddy セプタム) である (Fig. 1) [6]。但し周回ラインを挟むように 2 台のセプタム電磁石を向かい合わせに設置する事、2 台の真空槽内にそれぞれ 1 セットずつ収納され、計 2 セットの LF セプタムを使用する点は同じである。セプタム電磁石の最も重要

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

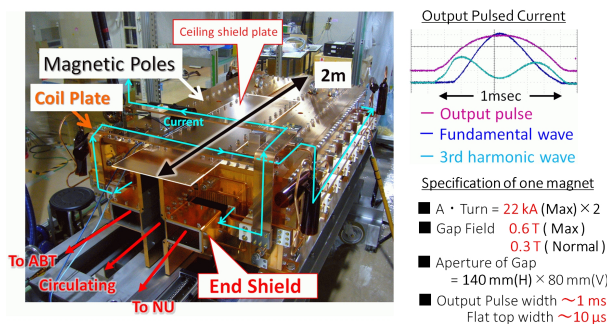


Figure 1: The photograph of the Eddy septum magnet (left), the waveform of the output pulsed current (center), and the specification list of the Eddy septum system (right).

な特徴は周回ビームラインへの漏れ磁場を極端に軽減できる事である。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が、Eddy セプタムの基本構造は通常の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 セプタムへの印加電流は現行のパターン電流ではなく短パルス状電流である。C型偏向電磁石型であるためC型の開口部から外側に磁場が漏れる。この漏れ磁場がパルス形状であるため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事がEddy セプタムの特徴である。Eddy セプタムを使用する事が現行機に対して有利な点は、セプタムコイルよりも薄いセプタム板を使う事でより開口部の拡大化に繋がる事、セプタムコイルの絶縁性に対する耐久性の危惧が無くなる事、パルス磁場を印加するためMRへの入射直後の低エネルギー領域から加速中の時間帯に漏れ磁場が存在しない事、ビーム取り出し時での漏れ磁場も現行機より小さくなる事が期待できる事、パルス電流を印加する事でパターン電流を印加する現行機よりも発熱量を軽減できる事である。発生する渦電流については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幅に比べて長い場合がある[7]。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[8]。この時定数の長い誘導磁場を相殺するために印加する電流波形に正弦波型を採用する事が多い[7]。一方、FX用のEddyセプタムへの印加電流は最大出力6 kV×22 kAの半正弦波であり、全幅は約800 μs、FTの幅は約10 μsである。FT部の平坦度を向上させるため出力電流パルスは基本波と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、その後電源開発と磁場測定を続けている[6, 8-13]。

3. これまでの開発のまとめ

LFセプタム用パルス電源の最重要課題は出力パルス電流の長期安定性の向上である。長期安定性の条件はpk-pkで100 ppm以下を目指している。100 ppm(pk-pk)は現行機の安定性である。2016年、長期安定性を保つ

ためのPXIとFPGAを用いたフィードバックシステム(PXI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]。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2018年、ドロップ回路を撤去し、補助充電器システムを導入した。補助充電器システムを用いた出力電流値の揺らぎはpk-pk値で70 ppmを達成した[10]。2019年にはサージアブソーバー回路の試験を行い、回路定数の最適化を行った[11]。また、電源と電磁石間を結ぶ出力ケーブルをそれまでの試験用の約30 m長の同軸ケーブルから本番用の200 m長の同軸ケーブルに置き換えた[11]。出力電流のFT部の平坦度は基本波と3次高調波電流の重ね合わせ具合で決まるがこの重なり具体は2つの放電トリガーの時間差で調整する。2019年に時間差を調整して平坦度の最適化を行った。その結果、平坦度が最小になるのは時間差が80 μs付近であり、平坦度は135 ppmである事が分かった[11]。2020年には基本波と3次高調波用の放電トリガーの独立化を行った[11]。それまでは2つの放電トリガーは独立ではなく1系統の3倍高調波用放電トリガー信号を制御盤内で分岐し、制御盤内の遅延回路を通して基本波用の放電トリガー信号を生成していた。しかし遅延回路で発生するジッターが出力安定性に影響を与えたため、2つの放電トリガーを独立化し、トリガーの時間差はJ-PARCのタイミングシステムで制御する方針に変更した。2021年3月、EPICSによる遠隔操作が確立した。

4. 出力パルス電流の安定性評価

出力パルス電流の安定性に関する課題は次の2点である。1つ目はPXIシステムが示す出力パルス電流安定性の結果を別デバイスでは再現しない再現性問題である[12]。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[12]に対して、低い充電電圧での運転方針を検討する事である。

4.1 PXIシステムの再現性問題

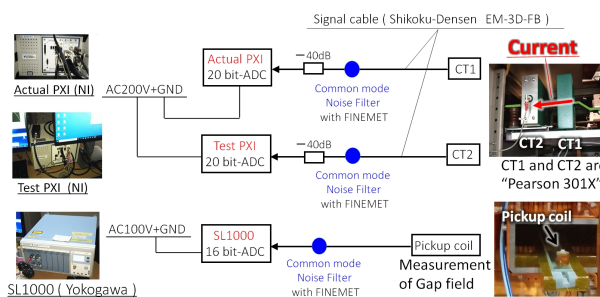


Figure 2: The scheme of measurement of output pulsed current and gap field.

PXIシステムを用いた電流安定化フィードバックシステムはパルス毎の出力パルス電流のピーク値と設定

値の差を積算し、その値を補正量として充電電圧に加算するシステムである（使用する PXI を実機用 PXI と呼ぶ）。ここで長期安定性は出力パルス電流のピーク値の揺らぎや時間変動を pk-pk で表した量とする。PXI システムによって出力パルス電流の安定性は約 70 ppm を達成し、時間変動も確認されなかった [10]。一方、他のデバイスで独立に電流を測定しても同じ安定性を得る事ができず、測定電流値に大きなドリフトが見られる状況が続いていた。そのため PXI システムの結果が正しいのかどうかを判断する事が難しかった。カレントトランスファ、信号線用同軸ケーブル、-40dB アテネータは全く同じ型番を使用した。更に、2019 年 12 月、PXI システムで使用する PXI 製の 20 bit AD 変換をもう一式新規に購入した（試験用 PXI）。その結果 PXI システムのデータ処理には問題はなく、PXI システムは正常に動作している事を確認した。一方、試験用 PXI で取得した電流値には大きい時で 400 ppm を超えるドリフトが見られた。実機用 PXI と試験用 PXI への供給 AC200 V ラインと GND 線も完全に共通化したが結果は改善されなかった。2020 年 12 月の試験では 1 ショット前の電流値との差分を実機用 PXI と試験用 PXI で比較した。その結果、差分は殆ど一致している事が分かり、僅かなノイズ成分が影響していると推測した。2021 年 3 月、電流測定に追加して磁極内磁場の同時測定も行った (Fig. 2)。8,000 ショットの連続運転で得られた各ショット毎のピーク電流値と磁場の値の時間変動を Fig. 3 に示す。試験用 PXI の測定電流値は 8,000 shot の間に約 58 ppm 程度ドリフトした。一方、測定磁場は電流に比べて測定精度が悪く pk-pk で 150 ppm の揺らぎを持つが少なくとも 58 ppm のドリフトは見られずある程度一定値を保っている事を確認した。以上の結果から PXI システムの結果は正しく出力電流を安定化させていると判断し、試験用 PXI でのドリフトの原因はノイズの影響であると結論付けた。

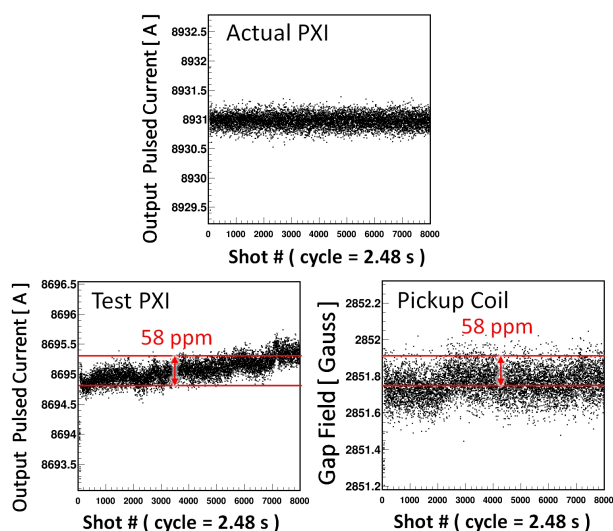


Figure 3: The time variation of output pulsed current by using actual PXI (Upper) and test PXI (Lower left), and gap field by using pickup coil (Lower right).

4.2 FT 維持時間と出力安定性の相関

2018 年頃、主充電器から補助充電器に切り替わり充電電圧が安定になるまでの時間は充電電圧が低い程長くなる事が分かった [12]。そこで 2021 年 6 月、出力パルス電流の安定性が FT の維持時間 (Δt) と充電電圧にどう依存しているかを調べた。 Δt とは充電電圧パターンの FT 到達時間から放電トリガーが入力されるまでの時間を言う。この目的は MR の取り出しビームのエネルギーが主に 30 GeV、8 GeV、3 GeV で想定されるため、各エネルギーに対応した充電電圧に対して最低限の Δt を決める事である。調査した結果を Table 1 にまとめる。

Table 1: Fluctuation of output current, pk-pk, depends on charging voltage and Δt . Δt means a keeping time of FT.

Charing Voltage [kV]	Δt [msec]	pk-pk [ppm]	MR Operation	Remark
3.0	10	1,889	Operating	
3.0	50	117	Operating	
3.0	50	78	Stop	For 30 GeV
3.0	75	110	Operating	Operation
3.0	110	136	Operating	
3.0	110	89	Stop	
1.0	50	3,000	Operating	
2.0	50	914	Operating	
3.0	50	123	Operating	
4.0	50	109	Operating	
0.3	300	2,834	Stop	
0.3	350	477	Stop	For 3 GeV
0.3	400	444	Stop	Operation
0.3	900	410	Stop	
0.6	170	524	Stop	
0.6	200	263	Stop	For 3 GeV
0.6	300	236	Stop	Operation
0.6	900	232	Stop	
0.8	100	1,334	Stop	
0.8	150	214	Stop	For 8 GeV
0.8	200	163	Stop	Operation
0.8	500	165	Stop	
1.6	60	797	Stop	
1.6	75	98	Stop	For 8 GeV
1.6	100	99	Stop	Operation
1.6	300	94	Stop	

30 GeV ビーム取り出しの場合の充電電圧は約 3 kV である。そこで 3 kV での Δt を 10 ms から 110 ms まで変化させた。その結果、10 ms の場合の安定性は ~1889 ppm、50 ms 以上で 140 ppm 以下であった。また MR がビーム運転中の場合は安定性が数十 ppm 悪くな

る事も確認した。これらの結果から 30 GeV 取り出しの場合の FT の最低維持時間を 50 ms とした。次に Δt を 50 ms に固定し充電電圧を 1~4 kV に設定した場合の安定性を確認した結果、それぞれ ~3,000 ppm、~914 ppm、~110 ppm であった。

MR のビームスタディには加速しない 3 GeV 取り出しモードがある。取り出し先は NU ではなく ABT のみである。3 GeV 取り出しの場合の充電電圧は 0.3 kV である。0.3 kV の場合の Δt と出力安定性の関係を調べた結果、300 ms では 2,834 ppm、350 ms では 477 ppm であり、 Δt を長くすれば安定性も向上する事を確認したが、900 ms でも 410 ppm であるため決して良い安定性とは言えない。そこで通常ビーム運転時は 2 セットの Eddy セプタムを使用する事を想定しているが、3 GeV 取り出しの場合は 1 セットの Eddy セプタムのみを使用し、充電電圧を 2 倍の 0.6 kV で使用する方法を検討した。充電電圧 0.6 kV の場合、 Δt が 300 ms 以上での安定性は 230~240 ppm で一定になる事を確認した。Eddy セプタム 1 セットでのビーム取り出しの場合の取り出しビーム軌道の確認も必要であるが、1 つの解決策として有効な結果である。

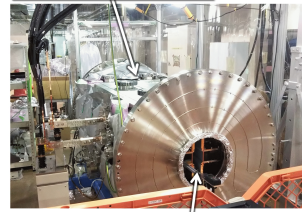
8 GeV は HD で新しく始まった COMET 実験用 [14] の加速エネルギーである。通常のビームは HD に取り出すため、Eddy セプタムで取り出す場合の行き先は ABT のみである。8 GeV 取り出しの場合の充電電圧は 0.8 kV であるため、3 GeV 取り出しモードの対策として考えた Eddy セプタム 1 セット体制を想定し、2 倍の 1.6 kV の場合の安定性も確認した。その結果、0.8 kV の場合は Δt を 200 ms 以上にすることで安定性が ~160 ppm になる事を確認した。一方 1.6 kV の場合は Δt を 75 ms 以上にすることで安定性は 100 ppm 程度になる事を確認した。この結果から 8 GeV の場合も Eddy セプタム 1 セット体制で充電電圧 1.6 kV 設定が有効であると考えられる。

以上の結果をまとめると、3 GeV、8 GeV 取り出しの場合は Eddy セプタム 1 セット体制を想定すると充電電圧 0.6 kV、1.6 kV で FT の最低維持時間はそれぞれ 300 ms、75 ms である。通常の 30 GeV 取り出しの場合は Eddy セプタム 2 セット体制で充電電圧 3 kV で 50 ms である。注意すべき点は MPS¹が発報した時、陽子ビームが速やかにビームアポートされる場合がある [15]。その場合は PXI システムによるフィードバックを受けずにパルス電流が出力されるため十分な安定性は保障されない。

5. 真空槽内への装填と通電試験

Eddy セプタムは最終的には真空槽内に設置して使用する。通電試験に使用してきた試験用 Eddy セプタムとは別に 2021 年 2 月から 5 月にかけて Eddy セプタムをもう 1 セット新しく組み立て、真空槽内に設置する作業を行った。組み立てた Eddy セプタムは後続機用として 2016 年 3 月に製作した 2 セット分 [13] のうちの 1 セットである。組立が完了した Eddy セプタム入りの真空槽を試験用 Eddy セプタムと入れ換えた。翌 6 月、真空槽

Vacuum Chamber



Eddy Septum

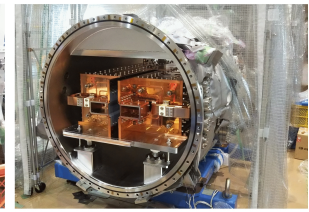


Figure 4: The vacuum chamber which mounts the Eddy Septum magnet.

内に設置した状態での Eddy セプタムに初めて通電が行われた (Fig. 4)。但し磁場測定のため真空槽内の真空引きは行わなかった。印加電圧はこれまで最高で 3 kV であったが、この試験では最高 4.5 kV までの印加を行った。また通電中の電磁石コイルや銅筐体端部の温度を監視し、顕著な発熱がない事を確認した。元々は電磁石コイルや銅筐体表面を水冷する予定であったが渦電流が発生する銅製のセプタム板以外の箇所への冷却はしない事が決定された。1.16 s 周期の 1 Hz 試験も実施した。この試験では充電電圧パターンにビーム運転時のパターンを想定した。FB の電圧は 0.3 kV、FT の電圧は 3.0 kV、FT 維持時間を 50 ms とした。1.16 s での立ち上げ時間は 580 ms であるが、FT 維持時間の 50 ms 分だけ短い 530 ms で設定した。運転中の充電電圧のモニター波形を Fig. 5 に示す。運転は特に問題なく行う事ができ、出力パルス電流の安定性も 89 ppm であった 真空槽内を真空引きした状態での通電は MR ヘインストールする直前の 2021 年度末に行う予定である。

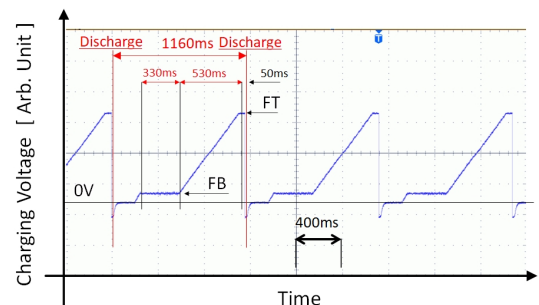


Figure 5: The waveform of charging voltage at 1.16 s cycle operation.

6. 周回ライン上の漏れ磁場軽減対策

2020 年 7 月、周回ビームライン上の漏れ磁場を軽減するため周回ビームライン内に装着する 2,300 mm 長の純鉄製の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をビーム方向に沿って漏れ磁場分布を測定した結果、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 にまで軽減する事

¹ Machine Protection System の略、運転中のいずれかの加速器装置がエラーを出した時に発報されるインターロックシステム。

に成功した。ビーム取り出しタイミングまでの積分磁場も 1 Gauss·m 以下である事が確認できた [11]。この結果からダクト型シールドが非常に有効であり、ビーム運転にも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 セプタムの全長は 2,000 mm であるがダクト型シールドは可能な限り長い物にしたい。但し Eddy セプタム用真空槽の全長が 2,254 mm であるため、ダクト型シールドの全長は 2,244 mm に決定した。肉厚は試験版と同様側面は 1 mm、上底面は 3 mm である。試験版の断面形状は四角形であったが、最終版は Eddy セプタムの周回ラインの断面形状に合わせて八角形にした。Eddy セプタムは上流、下流側両方ともに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形状に磁極が設置されるためダクト型シールドもテーパ形状で設計した。水平方向の内寸法は SAD を用いたビームシミュレーションによって決定した必要なアーチャーに合わせた [16]。結果、上流側の Eddy セプタム用は入口で 98.1 mm、出口で 84.6 mm の内寸法に決まり、下流側の Eddy セプタム用は入口で 83.4 mm、出口で 74.4 mm の内寸法に決まった。高さ方向はテーパ形状ではなく内寸法はビームのアーチャーに必要な 100 mm 以上を条件 [17] とし、一定の 116.4 mm で決まった。ダクト型シールドは真空内で使用するため製作にあたり表面処理として無電解 Ni メッキ処理、脱脂洗浄、250 °C での 24 時間ベーキングを行った。ダクト型シールドは 2021 年 7 月に完成し納品された。Fig. 6 に上流側 Eddy セプタム用のダクト型シールドを示す。ダクト型シールドを用いた漏れ磁場測定は 2021 年度末の MR ビームラインへのインストール直前の試験通電時に行う予定である。

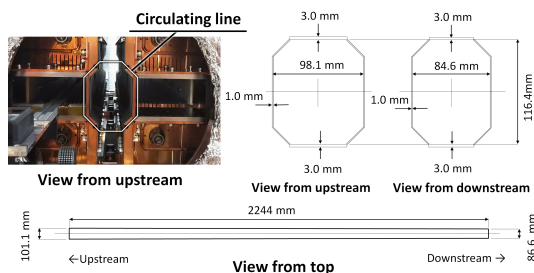


Figure 6: The new duct type shield for Eddy Septum at upstream side.

7. 今後

2021 年 6 月末に後続機として製作した残りの 1 セットの Eddy セプタムについても最終的な組立を終えて真空槽内に装填した。この Eddy セプタムは 2016 年 3 月に一度真空槽内に装填し、その後ベーキングを行った経験がある。真空槽内に装填した 2 セットの Eddy セプタムに対して今後複数回ベーキングを行い脱ガスを行う。まず 7 月に 2 セット目の Eddy セプタムに対して 1 回目のベーキングを 6 日間行った。今後ひと月に一度程度の頻度でベーキングを続けていく。Eddy セプタム用電源は全て MR 第三電源棟内に配置される。今後第三電源棟内で Eddy セプタム用電源を配置し、電源と電磁石を繋ぐ

200 m 長の出力用同軸ケーブルのケーブリングが行われる。同軸ケーブルは 1 セットの Eddy セプタムに対して 13 本使用されるので、合計 26 本配線される。Eddy セプタムは新しく追加されるシステムであるため、トリガータイミングロジックの構築、タイミング信号用光ケーブル、インターロック用信号配線等の配線も行う。Eddy セプタム用の出力パルス波形監視用モジュールの構築も必要である [16]。Eddy セプタムのインストールは 2021 年度末に完成する予定である。

8. 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、PXI システムを用いたフィードバックシステムによって得られた出力パルス電流の安定性が充分正しい事を確認した。出力パルス電流の安定性が充電電圧と FT 到達後の FT 維持時間の 2 つに依存している事が判明したため、3 GeV、8 GeV、30 GeV の取り出しエネルギー毎にその依存性を調査し、必要な FT 維持時間を決めた。2021 年 6 月、Eddy セプタムを真空槽内に装填した状態での通電を初めて行い、問題なく通電できる事を確認した。今後ベーキングも行い、2 セットの Eddy セプタムの MR ビームラインへのインストールは 2021 年度末である。

謝辞

J-PARC MR の真空グループの方々に真空槽ベーキングのセットアップやベーキングの監視などのサポートをして頂きました。感謝致します。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] S. Igarashi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01.
- [3] KEK Report 99-4 and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [4] T. Koseki, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 2012, 02B004.
- [5] M. Kinsho *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p.999-1003.
- [6] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.86-90.
- [7] Handbook of Particle Accelerators (Japanese), Maruzen Publishing Co. Ltd., ISBN 978-4-621-08901-9, C code 3550, NDC code 530, 2018, pp.321.
- [8] T. Shibata *et al.*, Proc. of 3rd J-PARC symposium, 2019.
- [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, 2020, p.594-598.
- [12] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.361-365.
- [13] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p.1024-1028.
- [14] <https://comet.kek.jp/>
- [15] T. Kimura *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.609-612.
- [16] S. Iwata *et al.*, Proc of PASJ, 2021, TUP019.
- [17] S. Iwata, private communication, Apr., 2021.