

J-PARC-MR アップグレードのための 新しい新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の開発 THE DEVELOPMENT OF A NEW FIRST EXTRACTION SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF J-PARC MR

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

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

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

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)}Nichicon Corporation

2-3-1 Ykura, Kusatsu, Shiga, 525-0053

Abstract

Our goal of the beam power for the Fast eXtraction(FX) of J-PARC MR is 750 kW. We are upgrading the MR FX magnets for reducing the repetition to 1.3 sec(approximately 1 Hz) operation. The present FX Low Filed(LF) magnets which are conventional type have problem in durability of septum coil by thier vibration, and have large leakage field in cicularing line as 10^{-3} of the gap-field. In addition to that, we need the large aperture in the magnets in order to reduce the beam loss of the beam halo which will become to be larege by high power. We are developing the new FX LF-Septum mangets and thier power supplies. The new magnets are induced eddy current type. The induced eddy current type does not have septum coil, but has a thin plate. We expect that there is no problem in durability, we can construct the thin septum plate, the leakage field can be reduced to 10^{-4} . The first new LF-Septum magnet and its power supply were constructed in 2014. We reported the mapping of the gap field and leakage field in PASJ2014. After that, we adjusted power supply and measured the reproducibility of the gap-field and output current. We also produced second FX LF-Septum in 2016. We will report the status of the measurement results of the performance of the FX LF-Septum, and the development of the power supply.

1. J-PARC

J-PARCはKEKとJAEAが共同で運営する世界最大級の大型陽子加速器施設であり、中性子、中間子、 μ 粒子、 ν ビームを用いた様々な研究が行われている [1][2]。J-PARCは400 MeV-LINAC、3 GeV-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る。LINACではピーク電流値45 mA、時間幅0.5 msecの負水素(H^-)ビームを400 MeVにまで加速してRCSに最大25 Hzで入射する。RCSは入射エネルギー400 MeV、出射エネルギー3 GeVの加速器で、25 Hz繰り返しで運転する事ができる。400 MeV- H^- ビームはRCSの周回軌道に入射直後、荷電変換フォイルを通過する際に核外電子を除去され陽子ビームに変換される。RCSに入射された約500個の中間バンチは加速前に2つのバケットに形成される。バケット形成後陽子ビームは3 GeVにまで加速される。3 GeV陽子ビームはMLFとMRに別々に入射され、1回の入射で2バケット入射する。RCSからMLFへ送る陽子ビーム電力は2015年4月に世界最高強度の500 kWに達した。また2014年12月の大強度試験に於いて1 MW相当の出力に成功した。

MRは入射エネルギー3 GeV、出射エネルギー30 GeVでありNU(HD)運転時の繰り返しは2.48 sec(5.52 sec¹)である。NU運転の場合8バケットを $\sim 5\mu$ secの間に出射する。一方HD運転の場合は約3秒かけて出射する。この出射時間の違いからNU(HD)への取り出しを「速い(遅い)取り出し」と呼ぶ。NUへの供給ビーム電力の最高は2016年5月に420 kWに達した。MRが目標とするNUへの供給ビーム電力は750 kWであり、大電力化のためバンチ内陽子数の増強と繰り返しを上げる必要がある。陽子数の増強はLINACからの H^- ビーム電流値の増強とMRでのビーム損失の軽減により着実に増強している。そして目標とする繰り返し周期は1.28 sec²である。大電力達成を目指すためMRでは様々な課題の克服が必要である。1 Hz周期対応の主電磁石用電源の開発、そして後述する出射用電磁石の改良が必要である。以下にMR用出射電磁石について記述する。

2. MR 速い取り出し用出射電磁石

MR 速い取り出し用(Fast eXtraction;FX)出射電磁石(以下FX電磁石)を図1に示す。FX電磁石の主な用途はNUビームラインとMRアポートラインへのビーム

*tatsunobu.shibata@j-parc.jp

¹2015年10月に6 secから5.52 secに短縮した。
²簡単に1 Hz化と呼ぶ。

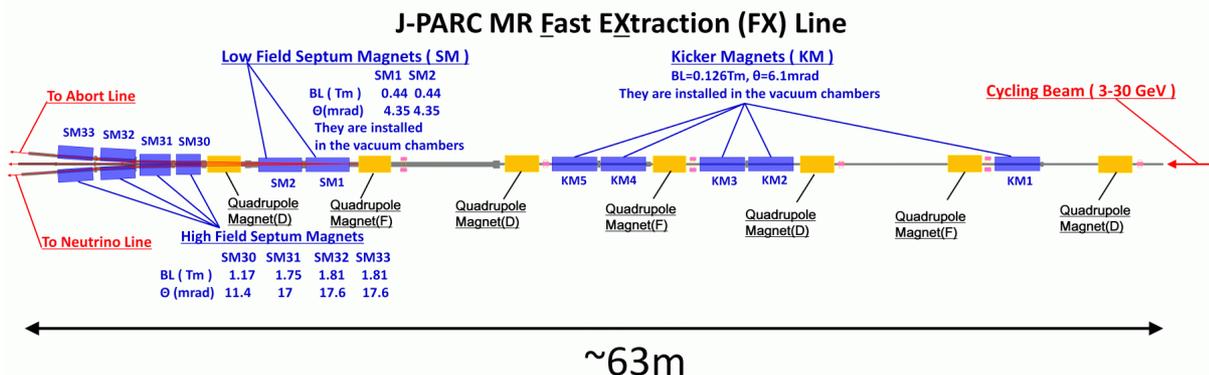


Figure 1: The layout of the fast extraction magnets in 50 GeV Main Ring.

偏向であり、ビーム上流部から5台のキッカー電磁石(以下FXキッカー)と6台のセプタム電磁石(以下FXセプタム)で構成されている。FXキッカーは1台当たり約0.06 Tの磁場によって合計6.1 mradの偏向を与える。FXキッカーの出力パルス磁場の時間幅は約5 μ secである。また磁場の極性を反転する事でNUビームラインとMRアポートラインへの取り出しの切り替える事を行っている。FXセプタムは後述する2台の低磁場セプタム電磁石と4台の高磁場セプタム電磁石から構成されている。6台のFXセプタムの出力磁場は全てパターン制御されたパルス磁場である。パターン波形は立ち上がり時間が1.4 sec、FT部が10 msec、立ち下がり時間が長いもので約0.6 secの時間幅を持つ。これらのFX電磁石も1 Hz化に向けたアップグレードを行っている。この節では後述する低磁場セプタム以外の電磁石について記述する。FXキッカーに関しては電磁石電源部の1 Hz対応化を進めている。2014年には試験用電源を用いて1 Hz試験を1,000時間行った。その後1 Hz対応パルスモジュールを商用運転用に導入して使用している。パルスモジュールに充電する充電器も充電時間の短縮等の目的から新電源への交換が必要であり開発を進めている。高磁場セプタムについては4つある電磁石の内3つの電磁石の交換を予定している。交換理由としてまず磁極長の変更が挙げられる。磁極長変更の理由は高磁場セプタムの上流部にある収束用四重極電磁石のサイズ変更である。サイズ変更理由はビーム強度が上がるに従ってビームハローを含めたビームサイズが大きくなり、そのためボア径の拡大と磁極長の拡大が必要になったからである[4]。四重極電磁石が大型化しても高磁場セプタムに要求される全偏向角度は変わらない。またNUビームラインまでの距離の変更もない。そのため高磁場セプタムは磁極長の短縮化を行い且つ全積分磁場は等しくするという条件の新しい出射セプタム電磁石の製作が必要になった。但し大強度用の出射セプタム電磁石群への条件は磁極長と磁場の変更だけではない。大強度に伴い大きなビームサイズに対応したギャップとビームダクトアパーチャーの変更、そして磁極内の真空ダクトについてはその表面で発生するビームによる発熱や強磁場による渦電流発熱対策として真空ダクトをセラミックスで製作する。4

台ある高磁場セプタムの内3台を交換する予定である。2016年7月現在交換予定交換予定の3台の新高磁場セプタム電磁石並びにセラミックスダクトの製作が完了している。高磁場セプタム用電源も1 Hz化に伴う改修が必要である。4台の高磁場セプタムに対して3台の電源を使用している。2台の電源はそれぞれ1台ずつの高磁場セプタム電源に供給している。残りの1台の電源で2台の高磁場セプタム電源に供給している。各最大出力は異なるが基本回路は全て同じである。電源の基本回路は入力3相6.6 kVを変圧し、ダイオード整流によってDC電圧に変換する。DC電圧は2石のIGBTインバータ回路を用いてパターン出力波形に変換する。2石であるため負電圧制御ができずパターン波形の立ち下りの制御ができず、立ち下り時間は負荷側の抵抗とインダクタンスによる自然放電によって決まる。2台の高磁場セプタムに供給している電源の出力電流の立ち下り時間は最大約0.6 secあり、パルス幅が1 secを超えるため1 Hzに対応していない事がわかる。この長い立ち下り時間の原因は1台の電源で2台の高磁場セプタム電磁石に電流を供給しているためにインダクタンスが大きくなり、それに伴い自然放電の定数も大きくなっている事である。そこで2台の高磁場セプタム電磁石に別々の電源から供給する案がある。後述する低磁場セプタム電磁石の交換により不要になる現行機の電源を再利用する事でアップグレードの費用も削減できる。次に低磁場セプタムの詳細について記述する。

3. 低磁場セプタム電磁石

2台の低磁場セプタムは全く同じ構造を持つ。発生磁場は約0.23 Teslaであり、偏向角は両方4.4 mrad(計8.8 mrad)である。現行機(図2)は電流型セプタムと呼ばれる電磁石である。新しい低磁場セプタム電磁石と電源の構成図を図3に示す。低磁場セプタムの交換が必要な理由は以下の通りである。現行機の電磁石用コイルにはホローコンダクタが用いられているが磁極同士の電磁力による振動のためにコイル絶縁部の損傷の可能性が危惧される。ビーム強度増強に伴って大きくなるビームハロー部のビーム損失による放射化軽減のため大開口化が必要である。実際2016年2月にビーム

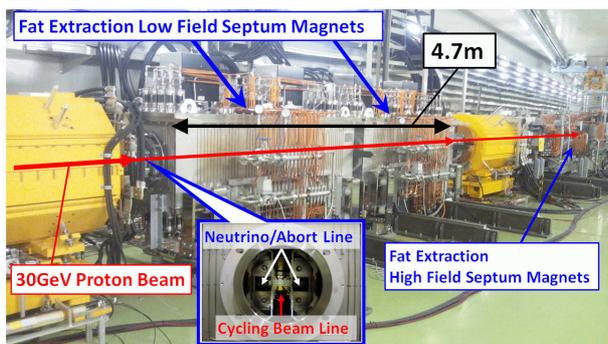


Figure 2: The current low field septum magnets for fast extraction of 30 GeV proton beam. There are two vacuum chambers, which two septum magnets are installed in one vacuum chamber.

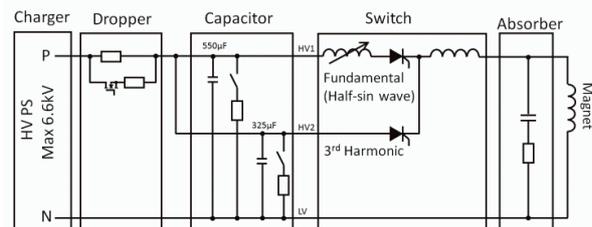
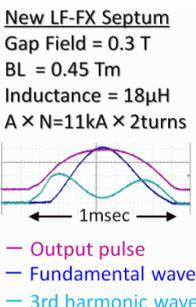
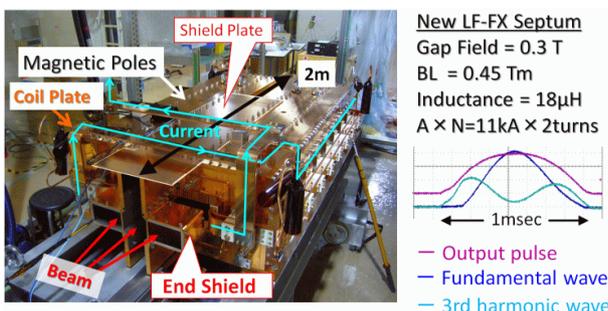


Figure 3: The photograph of magnet of the new LF FX-Septum(Upper). The diagram of the P.S. for the new LF FX-Septum(Lower).

電力が 395 kW に到達した時出射側に大きなビームロスが発生した。ビームの大電力化に伴い出射側にも残留放射量は確実に大きくなっていく事が確認された。周回ビームラインへの漏れ磁場は現状では磁極内磁場に対して 10^{-3} 程度であるが、 10^{-4} に軽減する必要がある。そこで上記の課題を克服するため新しい低磁場セプトムとして渦電流誘導型セプトム電磁石 (以降 Eddy セプトムと呼ぶ) が選ばれた [3]。Eddy セプトムは漏れ磁場相殺を渦電流のみで行う電磁石である。セプトムコイルがなく渦電流を発生させるための薄いセプトム板のみを用いるためコイル絶縁部の耐久性問題が解決する。セプトム板には渦電流が発生しやすい低抵抗体として 6 mm 厚の無酸素銅板と 0.5 mm 厚の純鉄を使用する事で漏れ磁場を 10^{-4} に下げる事が期待できる。リターンコイルにはホロコンを使用せず幅 74 mm、厚さ 9 mm の無酸素銅板を使う。磁極表面も無酸素銅で覆う構造となっている。Eddy セプトムに無酸素銅を活用する理由は Eddy セプトムも真空槽に収納されるため

ガス放出の少ない物質を使用する必要があるからである。磁極開口部は現行機の 80 mm(H)×71 mm(V) から 140 mm(H)×80 mm(V) に変更した。但し Eddy セプトムは渦電流による漏れ磁場を消去するため短パルス電流が必要である。そのため Eddy セプトム用電源は現行機のパターン電源から全く新しいパルス電源に交換する必要がある。新規電源はパターン出力充電器、充電電圧調整用ドロップ回路、コンデンサバンク、サイリスタを用いたスイッチングバンク、サージアブソーバー、そして制御盤から構成されている。パターン出力充電器はコンデンサバンクへの充電電源である。1 台当たりの最大出力電圧値は 6.6 kV、最大出力電流値は 5 A である。この充電器は複数台並列に接続する事で充電電流値を倍にする事も想定している。ドロップ回路はコンデンサバンクへの充電電圧の精度を上げるための調整回路である。充電電源からは設定より僅かに高い充電電圧が出力されドロップ回路を用いて入力電圧を降圧しながら精度良く設定電圧に調整する事ができる。コンデンサバンクは 2 つのコンデンサを備えており、充電電圧は分岐されてそれぞれに充電される。それぞれのコンデンサの容量は 550 μF、325 μF である。スイッチバンクはコンデンサバンクに充電された電荷を放出する際に使用するスイッチである。充電された 2 つのコンデンサから異なるタイミングで放電する事ができる。スイッチバンクから電磁石への出力電流パルスは従来のパターン波形ではなく 1 msec 幅 (平坦部の 10 μsec) の半サイン波である。電圧 × 電流の最大は 6 kV × 22 kA である。FT 部分の平坦度調整は 1 次基本波と 3 次高調波の出力タイミング調整によって行う³。そして FT の再現性を向上するためパターン充電電圧波形、出力電流波形の波形情報をパルス毎に制御ソフト内に取り込み出力電流の波高値、FT 部分の平坦度を微調整する。これにより期待される磁場の FT 部の再現性並びに平坦度の精度は平均値に対して 10^{-4} である。 10^{-4} の精度は直径 5 cm のニュートリノ標的へ入射する陽子ビームの位置精度の要求による。磁場が 4×10^{-3} 変化すると標的上での陽子ビームの位置は約 1 mm 変化する。1 台目 (先行機) の Eddy セプトム電磁石と電源は 2014 年に構築された。

4. 低磁場セプトム電磁石の性能評価

Eddy セプトムの動作試験として磁極内磁場と電流測定を行った。磁場試験のため電磁石は真空槽には入れず大気中に設置した。大気中での通電試験であるため大気中での耐圧を考慮して印加電圧は最大 3 kV とした。また大気中に Eddy セプトムを設置するためクリーンブースを設置し、その中で常時試験を行った。磁場測定用センサーにはサーチコイルを用いた⁴。電流測定には CT を用いた。サーチコイル、CT の出力電圧波形は横河電機製の SL1000 と 10MS/s、12bit の AD 変換モジュールまたは 1MS/s、16bit の AD 変換モジュールで記録した。以下性能評価の結果について記述する。

³550 μF コンデンサからの放電電流が 1 次基本波、325 μF コンデンサからの放電電流が 3 次高調波である。

⁴別名ピックアップコイルとも呼ばれている

4.0.1 磁場、出力電流値と充電電圧との線形関係 充電電圧を ± 1 V、 ± 5 V、 ± 10 V 変化させピーク磁場とピーク電流の変化量を測定した。その結果ピーク磁場と充電電圧、ピーク電流値と充電電流共に良い線形性を示す事が確認された。

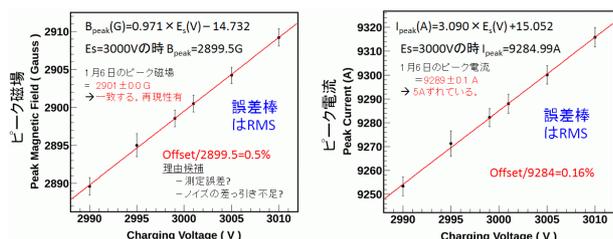


Figure 4: The linearity of the Peak of the Magnetic field and Current.

4.1 磁極内磁場と出力電流の再現性評価

磁極内磁場と電流値のパルス毎の再現性と時間変動の測定を行った。サーチコイルの出力電圧波形には 16bit の AD 変換モジュールを用いて記録した。再現性の定義は平均値と標準偏差の比とする。充電電圧は 2.5 kV と 3 kV で繰り返し周期 3 sec で数時間連続運転を行った。3 kV 充電時に得られた結果を図 5 に示す。磁場と電流値の再現性はそれぞれ 2.5 kV 充電時にはそれぞれ 1.3×10^{-4} 、 2.6×10^{-4} であった。3 kV 充電時はそれぞれ 1.3×10^{-4} 、 2.6×10^{-4} であった。2通りの充電電圧で磁場と電流値の再現性は同じである事が確認できた。但し再現性への要求値は 10^{-4} 以下であるため要求を満たさない。電源の充電電圧の再現性は 50 ppm 以下である事を確認しているため磁場や電流の測定精度に原因があると考えた。サーチコイルの DC 的ノイズの変動量は信号レベルが 3,000 Gauss に対して約 0.3 Gauss であった。つまり変動量を下げるとか或いは信号レベルを上げ S/N を向上させる必要である。現在出力が 10 倍になる新しいサーチコイルの製作を予定している。時間変動の結果磁場と電流値はそれぞれは 3.4×10^{-4} 、 5.3×10^{-4} の減少後安定した。この変動の原因は主に電源の温度であると推測しているが詳細はまだ不明である。今後時間変動の原因と変動の軽減が必要である。

4.2 磁極内磁場の平坦度評価

ピーク磁場の平坦部での平坦度を測定した。サーチコイルの出力電圧波形は横河電機製の 12bit の AD 変換モジュールを用いて記録した。平坦度の定義は平坦部内のピーク磁場とピーク時間を中心に定めた時間幅での磁場の差とピーク磁場の比である。結果を図 6 に示す。波形は全イベントの平均であり誤差棒は RMS である。平坦度は平均を用いて計算した。その結果 $10 \mu\text{sec}$ の時間幅で 1×10^{-4} であった。要求する平坦度と同じ程度である。平坦度は基本波と 3 倍高調波の出力タイミングで微調整が可能である。将来出力タイミング調整によって平坦度を 10^{-5} に改善する事を目指す。

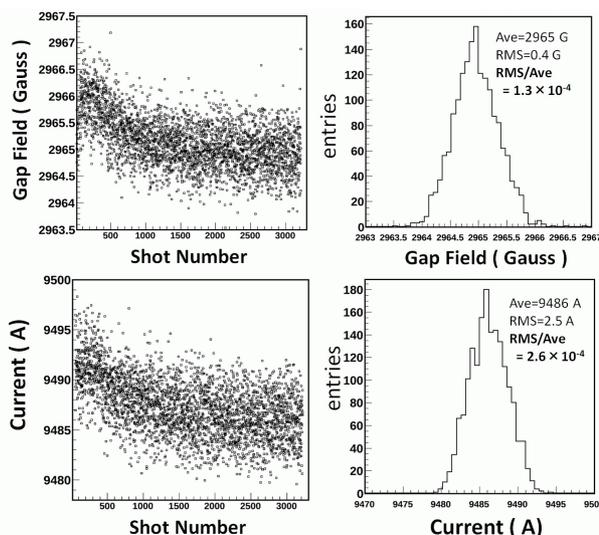


Figure 5: The responsibility and time variation of Gap Field and Output Current.

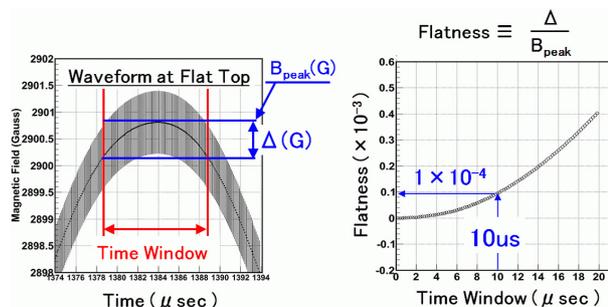


Figure 6: The flatness of Gap Field at Flat Top.

5. 電源開発の現状

電源の性能として最も重要な点は出力電流の再現性と安定性である。これを決めるのは充電電圧とドロップ回路からコンデンサへの充電電圧の精度とフィードバックである。2016年7月時点で充電電圧の安定性、精度の向上を目指して調整している。充電器単体の出力安定性を測定した結果、充電電圧の安定性は 4.6×10^{-4} (peak to peak) である事を確認した。充電器とドロップ回路と充電電圧とアナログフィードバックを用いた充電電圧の安定性は充電電圧 3 kV、繰り返し周期 3 秒の運転条件で 5×10^{-5} 以下である事を確認した。充電電圧の再現性の要求は 1×10^{-4} 以下であるため要求数値を満たしている。但しドロップ回路には改修の有無を検討している。ドロップ回路に使用されている FET 回路はこれまでに度々故障を起こし、その度に FET 交換と調整のために長い時間を要した。現在ドロップ回路の見直しも検討に入れた議論が進行中である。デジタルフィードバック制御に使用する National Instrument の PXI システムについては 2016年7月の時点ではまだ完成しておらず仕様変更を行っている。元々はパルス毎の安定性を補正するためのフィードバックシステムとして使用する予定だったが、長期的な安定度を補正するためのフィードバックシステムとして使用する予定である。

ドロップ回路の見直しとPXIを用いたフィードバック導入が完了した後は再び磁場、電流の再現性や長期安定性の評価を行う。

[3] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014.

[4] K.Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2014.

6. 真空槽とEDDYセプタムの後続機

製作する2台のEddyセプタムは両方ともに真空槽に収納され、その真空槽も新規製作品である。1台のEddyセプタムに対して1台の真空槽を使用するため2台の新真空槽を製作し2014年5月に完成した。後続機である2台目のEddyセプタムは先行機の試験状況を踏まえ2015年に製作を開始した。電磁石本体には特に大きな設計変更はなく5mm厚の天板シールドを追加した。コイルについては試験用コイルを製作した。後続機の電磁石は予備も含めてEddyセプタム2台分⁵製作し、2016年3月に完成した。電源の方は先行機が試験中であるため充電器、コンデンサバンク、スイッチバンク、試験用簡易制御盤のみ製作し、2016年2月に完成した。完成後、後続機のEddyセプタムの1台を真空槽内に装着し、真空引き試験とベーキングを行った。

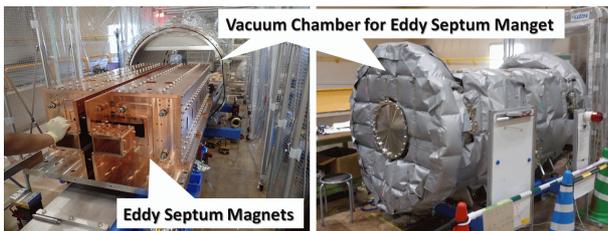


Figure 7: Left: The installation of the 2nd Eddy Septum Magnet into the vacuum chamber. Right: After the baking of the Eddy Septum Magnet.

7. まとめと今後

我々は出射用電磁石の交換や改善を進めている。新規製作した渦電流誘起型電磁石(Eddyセプタム)の性能評価として主に設定電圧と出力ピーク磁場と電流値の線形性の確認、パルス毎の再現性の確認や平坦度の測定を行った。再現性については用いたサーチコイルのノイズ軽減またはS/N向上による測定精度改善が必要である事が分かった。平坦度は10 μ sec幅で 1×10^{-4} であったが、更なる改善のため基本波と3倍高調波の精密な出力タイミング調整を行う予定である。電源調整の結果充電器とドロップ回路からコンデンサバンクへの充電電圧の安定性は 5×10^{-5} であった。電源調整の課題としてドロップ回路の見直しの問題とフィードバックの導入を完成させる必要がある。これらに並行して製作した後続機のEddyセプタムを用いて真空槽試験とベーキングを行った。2台のEddyセプタムのMRへのインストールは2017年夏を目標としている。

参考文献

[1] J-PARC Home Page, <http://j-parc.jp/>

[2] T.Koseki, OHO seminar 2010, <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html>

⁵磁極数でいうと4台分