

J-PARC MR の速い取り出し用新低磁場セプタム電磁石の開発 (4) THE DEVELOPMENT OF A NEW LOW FIELD SEPTUM MAGNET FOR FAST EXTRACTION IN J-PARC MR (4)

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

Tatsunobu Shibata^{*A)}、Yusuke Kawaguchi^{B)}、Kenta Nakamura^{B)}、Kei Hamano^{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 Kusatsu Corporation

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

Abstract

The J-PARC Main Ring are working on improved beam power to 750 kW by shortening the repetition period from 2.48 s to 1.3 s. The low-field septum magnets in the fast extraction beam line will be replaced by new magnets around 2020. We constructed a test-bench of a new magnet which are induced eddy current type and a new power supply in 2014. We were in trouble with the periodic radiative noise which had effect on the stability of output current. We tried to protect against the radiative noise, and finally we were able to solve the problem. In March 2018, we introduced a new Sub-charger system instead of the Dropper which broke down in 2016 due to difficulty of its tuning. Since the scheme of the Sub-charger is simpler than that of Dropper, we can expect to operate stably. The stability of output current requires below 100 ppm, and we confirmed the Sub-charger system satisfied that. We measured the horizontal distribution of the field integral of the magnetic gap field, and the flatness was 0.15%/47 mm which is much smaller than that of current low-field septum magnets.

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]。LINAC では RF イオン源 (IS) で生成されるピーク電流値 45 mA、最大パルス時間幅 0.5 ms の負水素 (H^-) ビームを線形加速器を使って 400 MeV に加速し¹、最大 25 Hz の繰り返しで RCS に入射する。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 に入射直後、荷電変換フォイルを通過する際に電子が除去され陽子ビームに変換される。RCS に入射されたバンチは加速前に 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 MLF と MR に別々に出射する。RCS から MLF へ送る陽子ビームパワーの設計値は 1 MW であり [2]、2018 年 6 月の時点で 525 kW に達した。2018 年 7 月 3 日のビーム試験では 1 MW ターゲット試験が実施され 935 kW を記録した [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²。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。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) への取り出しを「速い(遅い)取り出し」と呼ぶ。NU への最大供給ビームパワーは 2018 年 8 月の時点で 494 kW である。そしてビームパワーの設計値である 750 kW [2] を達成するために繰り返し周期を 1.3 s に短縮化する計画である [3,4](1 Hz 化と呼ぶ)。そのため MR では、1 Hz 対応の主電磁石用電源の開発 [5,6]、高勾配 RF 加速空洞の開発 [7]、MR 入射部コリメータ部のアップグレード [8,9]、そして MR 入射電磁石と MR 速い取り出し用電磁石の 1 Hz 化対応が必要である。2018 年 3 月までに主電磁石用新電源のために 3 棟の新電源棟が建設された。2018 年 8 月現在 BM 用新大型電源 1 台が製作され調整中である [10]。高勾配 RF 加速空洞は 2014 年から 2016 年にかけてアップグレードされ、現在金属磁性体に FT3L を用いた 4Gap の空洞 9 台 (7 台を基本周波数用、2 台を 2 倍高調波用) を用いて運転している [7]。750 kW 達成は 2021 年度以降を目標にしている。以下に MR 速い取り出し用電磁石、特に現在開発中の低磁場セプタム電磁石について記述する。MR 入射用電磁石については [11-13] を参照されたい。

2. MR 速い取り出し用電磁石の改修

MR 速い取り出し用 (Fast eXtraction;FX) 電磁石 (以下、FX 電磁石) を Fig. 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偏向であり、ビーム上流部から 5 台の集中定数型キッカー電磁石 (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 キッカーの磁場の極性を反転する事で NU ビームラインと MR アポー

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

¹ 2018 年 7 月の LI 大電流試験で 60 mA の 400 MeV 出力を記録した。

² HD 運転時の繰り返し周期は 2018 年 1 月に 5.52 秒から 5.20 秒に短縮された。

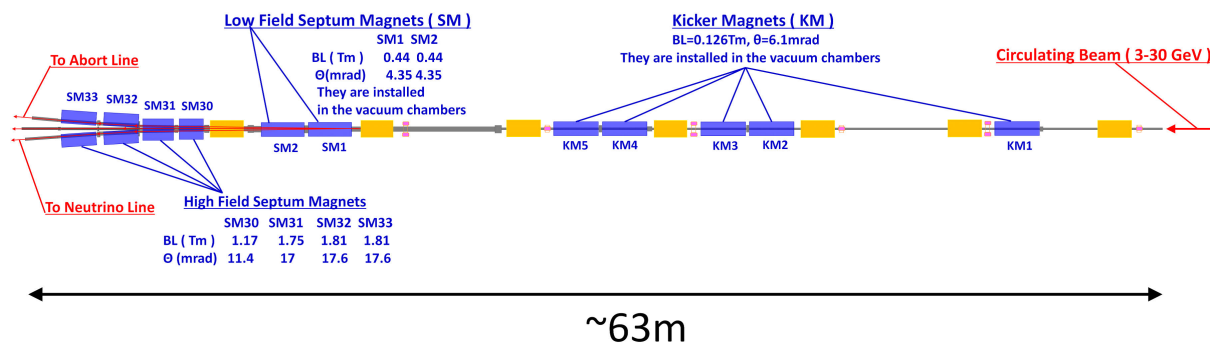


Figure 1: The layout of the Fast Extraction Magnets in 50 GeV Main Ring.

トラインへの取り出しの切り替えを行っている。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 s、平坦部が20 ms、立ち下がり時間は長いもので約0.6 sである。これらのFX電磁石も1 Hz化に向けた改修を行っている。FXキッカーはPFN回路充電用の充電器とパルスモジュレータの改修を行った。パルスモジュレータ内のPFNへの充電時間は1.8 sであったため、1 Hz化に対応した新しい充電器の開発を導入を進めてきた[14]。2017年3月完成した1 Hz対応の新充電器を1台実機用に導入した³。そして2017年夏に残りの4台全てを新充電器に交換した。またパルスモジュレータ5台分のシャントダイオード抵抗も1 Hz用に交換した。以上の改修によりFXキッカーの1 Hz化は完了した。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[15]。後述する低磁場セプタムと高磁場セプタムのMRへの導入は2021年を予定している。

3. FX用低磁場セプタム電磁石

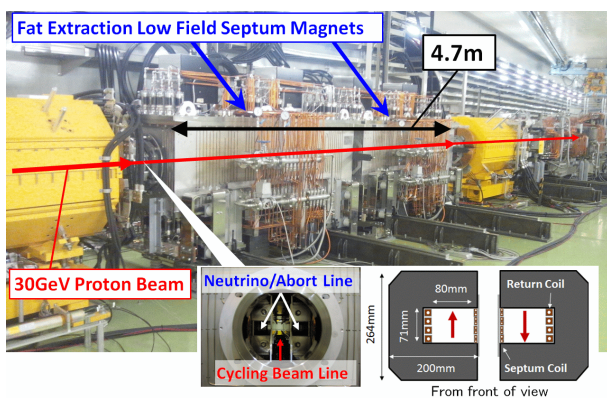


Figure 2: The current low field septum magnets for fast extraction of 30 GeV proton beam. There are two vacuum chambers, which two septum magnets are installed in one vacuum chamber.

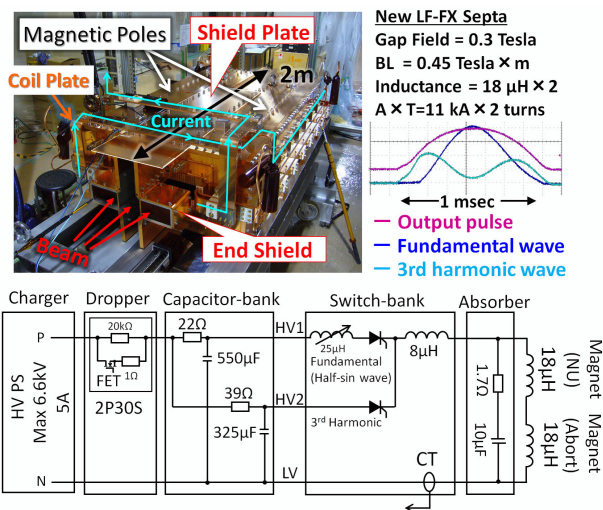


Figure 3: The abstract of the new LF-Septum magnet, and the diagram of the P.S. for the new LF FX-Septum magnet.

現行機 (Fig. 2) のFX用低磁場セプタムは2台の真空槽に収納された電流型セプタム電磁石である。典型的な発生磁場は約0.23 Tesla、各偏向角は4.4 mrad (計8.8 mrad) である。現行機の問題は[16]に記載した。新低磁場セプタム電磁石と電源の構成図をFig. 3に示す。新しい低磁場セプタムとして渦電流誘導型セプタム電磁石 (以降、Eddyセプタム) を採用した[17]。Eddyセプタムは短パルス電流を印加させ、漏れ磁場相殺を渦電流のみで行う電磁石である。セプタムコイルがなく渦電流を発生させるための薄いセプタム板のみを用いる。セプタム板には渦電流が発生しやすい低抵抗体として7 mm厚の無酸素銅板と0.5 mm厚の純鉄を使用する。渦電流によってセプタム板から外部への漏れ磁場を相殺する事がEddyセプタムの原理であるが、実際は完全に相殺する事は難しい。Eddyセプタムは現行機と同様左右対称に作られた2台を向かい合わせに設置する⁴。左右対称のEddyセプタムが作る磁場は逆方向であるため中間に設けられた周回ビームラインに残った僅かな漏れ磁場は更に相殺される。この結果磁極内磁場の 10^{-4} に下げることが期待できる。リターンコイルはホロコンを使用せ

³ 5台のFXキッカーに対して5台の充電器を使用している。

⁴ これを1セットとする。

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 セプタムに無酸素銅を活用する理由は Eddy セプタ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。電磁石のインダクタンスは 18 μH である。コイル抵抗値は約 0.2 m Ω である。2 台分の Eddy セプタムのコイルは直列に繋がれており、負荷の合計としては 36 μH 、0.4 m Ω となる。磁極開口部は現行機の 80 mm(H) \times 71 mm(V) から 140 mm(H) \times 80 mm(V) に変更した。Eddy セプタムは現行機と同様真空チャンバーに収納される。必要な Eddy セプタム 2 セットであるため真空槽も 2 台使用する。Eddy セプタ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を出力する新しい電源も必要である。新電源はパターン出力充電器、充電電圧調整ドロップ回路、コンデンサバンク、サイリスタを用いたスイッチバンク、サージアブソーバー、そして 2 台の制御盤で構成されている。パターン出力充電器は 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。この充電器を複数台並列に接続する事で充電時間を短縮し高繰り返し運転に対応する。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 10% 高い電圧が出力されドロップ回路によって降圧しながら設定電圧に精度よく調整する事ができる。コンデンサバンクには 2 系統のコンデンサが並列接続されておりそれぞれ同じ電圧で充電される。コンデンサの容量はそれぞれ 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電する際に使用する半導体スイッチである。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。2018 年 8 月現在放電の時間差は 100 μs に設定されている。電磁石への出力電流パルスは約 1 ms 幅 (平坦部は 10 μs) の半サイン波であり、電圧 \times 電流の最大は 6 kV \times 22 kA である。2014 年に Eddy セプタム 1 セットと Eddy セプタム用パルス電源を製作し、J-PARC 施設内の MR 第 3 電源棟内で動作試験を行っている [15-17]。

4. MR ビーム起因の空間ノイズと対策

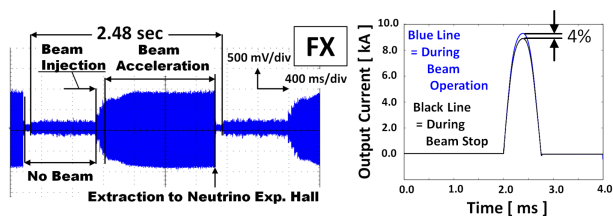


Figure 4: The periodic radiative noise which synchronizes with MR beam (left), and the waveform of the output current during MR beam operation and beam stop (right).

2016 年 Eddy 電源の出力安定性評価試験を行った際、MR のビームタイミングに同期した周期的な空間ノイズが観測され、出力電流値が大きく変動する様子が観測された [16]。この空間ノイズは MR にビームが存在している時のみ発生する事が分かった。また、MR 第 3 電源棟だけでなく他の 2 つの電源棟内のサブトンネル付近で

同じ空間ノイズが観測できた。この空間ノイズ源は MR トンネル内で周回する陽子ビームによるウェイク場であり、伝送ケーブルを通して MR トンネルと地上の電源棟を繋ぐサブトンネルから地上に拡散していると予想した。Eddy セプタム電源はサブトンネル付近に設置しているため特に空間ノイズの影響が顕著に表れた。空間ノイズにより影響を受けている Eddy セプタム電源内の箇所を調査した。その結果制御盤 1 内で生成される充電器からの出力電圧波形を決める電圧指令信号のみが影響を受けている事が判明した。電圧指令信号は充電器の出力電圧パターン波形とその電圧値を 0V-10V でスケールしたアナログ信号である。そのため電圧指令信号に空間ノイズが上乘せされると充電器の出力電圧も変動する。そこでまず変動を抑えるため充電器側の電圧指令信号の入力部に差動受け基板を導入した。導入後の出力電流安定性試験は 2017 年 9 月の MR 夏期停止期間に行った。MR ビームがない期間での試験だったが充電電圧の揺らぎが大きくなった。原因は導入した差動受け基板と充電器内に搭載され電圧指令信号のバッファアンプである GATE-CONT 基板の故障である事が分かった。そのため差動受け基板は撤去し、GATE-CONT 基板は交換する事で変動がなくなった。2017 年 10 月、夏期停止期間が終了し MR ビーム運転が再開されたため、MR ビーム運転中の出力安定性試験を行った。結果、出力ピーク電流値は 9.19 ± 0.01 kA (r.m.s./average=0.1%)、磁極内ピーク磁場は 2982 ± 2 Gauss (r.m.s./average=0.06%) であった。これは MR ビーム起因による空間ノイズの影響で充電電圧のフラットトップで大きな電圧変動が発生するためである。Figure 4 に空間ノイズの時間波形と最大の変動量である約 4% を確認した出力電流波形を示す。

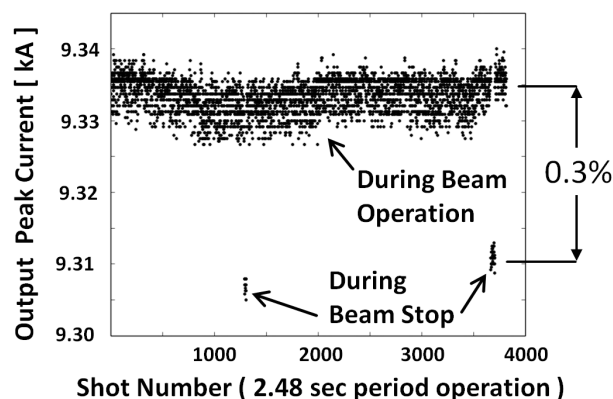


Figure 5: The time variation of output peak current during MR beam operation with protection against radiative noise.

空間ノイズ保護として以下の対策を行った。電圧指令信号 (以下、 V_{ref}) が揺らぐのは V_{ref} ケーブルがアンテナになり空間ノイズが V_{ref} の信号線に侵入したと考えた。 V_{ref} 用ケーブルは制御盤から充電器間を約 10 m 長さで配線されている。まずファインメットコアを使用したコモンモードフィルターを追加した。コモンモードフィルターによって高周波成分のノイズを除去した。コモンモードフィルターに加え、 V_{ref} 用ケーブルの配線の方法や経路を変えてノイズが乗りにくくしたり、ケー

ブル全体をアルミホイルで巻くという対策を施した。その結果変動量は4%から0.1~0.3%程度に軽減する事ができた。次に試験用に製作した V_{ref} ケーブルに共通モードフィルタを付けると、電圧変動は0.2~0.4%に軽減した。次にケーブルにアルミホイルを巻いた所、電圧変動は更に小さくなり一様に0.3%以下に抑える事ができ、これらの方法の有効性を再確認した。空間ノイズの影響を軽減するために V_{ref} ケーブルに巻いたアルミホイルの接地方法の最適化も行った。アルミホイルの接地をフローリングするだけで電圧変動は最大3%になる事を確認した。そしてアルミホイルを制御盤と充電器の共通接地用銅板に接続した所、電圧変動は0.3%に軽減した。但し設置は制御盤よりに接続するよりも充電器側に近い接地用銅板に接地する方が電圧変動軽減の効果があつた。まとめると電圧変動が発生する原因は V_{ref} 用ケーブルに侵入した空間ノイズの影響である事。 V_{ref} が変動する事で誤ったフィードバックがかかり電圧変動が起こる結果となった。影響を抑制するにはサブトネルの開口部から遠くの位置に V_{ref} ケーブルを配線し、ファイメントコアを使用した共通モードフィルタやアルミホイルによってノイズの侵入を防ぐ事が重要である。最後にMRビーム運転中のショット毎の出力電流の再現性精度を評価した。Figure 5に出力電流の時間変化を示す。MRビーム有りとし無しでの変動量は約0.3%であつた。また電流値の揺らぎは $r.m.s.=2.33 \times 10^{-3}$ kAであり、 $r.m.s./average=0.024\%$ (240 ppm)であつた⁵。

4.1 補助充電器システムの導入

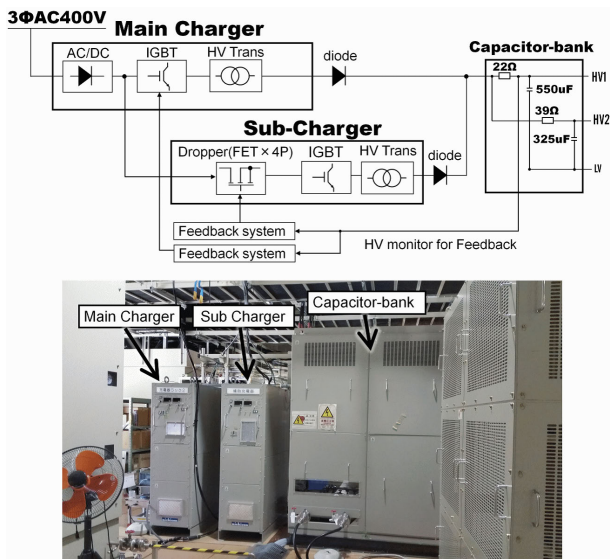


Figure 6: The scheme diagram (upper) and the photograph (lower) of the new Sub-charger system.

補助充電器システムはこれまで使用していたドロップ回路を撤去し、代わりに充電電圧精度を保証する充電器として補助充電器を使用するシステムである。ドロップ回路により出力電流安定性は50 ppm(pk-pk)を達成した

⁵ この試験中はドロップ回路を使用していないため出力電流安定性は悪い。

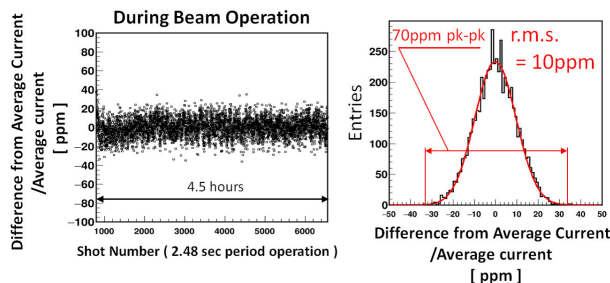


Figure 7: The time variation of the output current (left), and its distribution (right).

が、2014年から2016年の間に4回程故障し、復旧には数か月を要するという問題の多い回路でもあつた。そのためドロップ回路を撤去し、補助充電器を製作を決定した [16]。補助充電器の製作は2017年9月から開始され2018年3月に完成した。Figure 6に完成した補助充電器システムの構成図と写真を示す。補助充電器の最大出力は6 kV×0.15 Aである。補助充電器の利点は調整の容易さである。ドロップ回路の場合は充電電圧を直接降圧するため60個のFETの微調整が必要であつた。一方補助充電器はまず主充電器からの入力DC540 Vを4つのFET回路を用いて降圧し、その後IGBTを用いたインバータ回路でパターン波形を生成し、最後に高圧トランスで変圧するシステムになっている。出力調整は4つのFETで行うため、FETの微調整はドロップ回路に比べて格段に容易である。補助充電器システムの充電方法を示す。まず主充電器を使って直接コンデンサバンクに設定電圧の99%から99.9%まで充電する。主充電器での充電が完了すると主充電器は停止する。次に主充電器に並列に繋がっている補助充電器に切り替わり、残りの0.1%から1%の電圧を微調しながら充電する。よって補助充電器の出力精度がコンデンサバンクへの充電精度を決定する。主充電器と補助充電器の切り替わりの際には充電自体が停止しないようにオーバーラップ時間を設けている。主充電器、補助充電器ともに出力精度を上げるためにコンデンサへの充電電圧をモニターしながらフィードバック制御を行う。 V_{ref} ケーブルへのMRビーム起因の空間ノイズの影響を完全に解消するため、電圧指令信号はアナログ信号ではなくシリアル通信のデジタル信号に変えた。このため V_{ref} ケーブルへの影響は消えると期待できた。補助充電器システムの構築のためそれまで使用してきた充電器は主充電器という名前に変更して補助充電器システム用に改修した。また2台の制御盤もそれぞれ改修を行った。主充電器は並列に複数台の同時使用が可能であるが、使用する補助充電器は1台である。2018年3月J-PARC内で実負荷を用いた補助充電器の最終調整が行われた。補助充電器システムに要求する充電電圧精度はフラットトップのリプル、ショット毎の再現性精度ともに100 ppm以下である。最終調整によりフラットトップのリプルは20 ppm、ショット毎の再現性精度は70 ppm(pk-pk)に達した。Figure 7に2018年3月20日に測定したEddyセプタム電磁石への出力電流値の時間変動と分布を示す。ショット毎の再現性精度は $r.m.s./average=10$ ppm、pk-pkでは70 ppmであつた。MRビーム運転中であつたが空間ノイズによる変動

は全くなかった。よって補助充電器システムが我々の要求する精度を満たす事を確認した。

5. 磁極内磁場測定

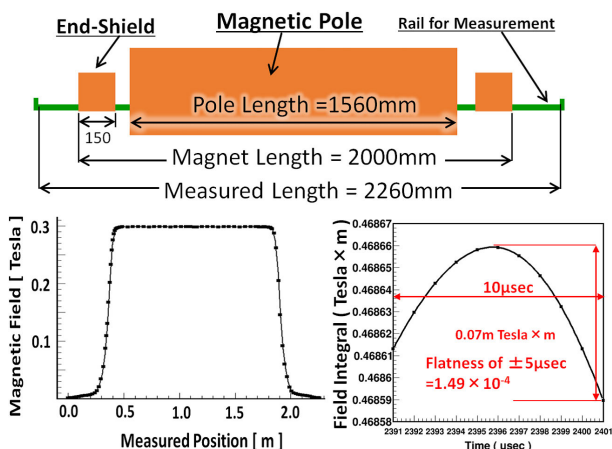


Figure 8: The side view of the Eddy-Septum magnet (upper), the position distribution of the gap field along a track at the center of gap (left), and its field integral (right).

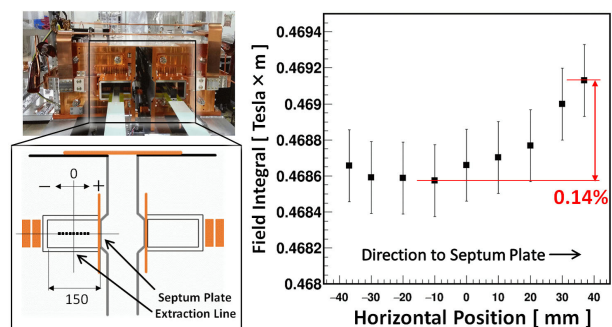


Figure 9: The horizontal distribution of the field integral along beam direction.

2018年2月と7月磁極内磁場と積分磁場測定を行った。Eddyセプトム電磁石は全長2m、磁極長は1.56mである。磁場測定用のセンサーにはサーチコイルを使用した。コイルの巻き数は56巻のツイストケーブルを使用、断面積は π (cm^2)である。サーチコイルを水平に保つために全長2,380mmのガラスエポキシ製のレールを磁極内に設置し、サーチコイルを取り付けた台車をレール上をビーム軸に沿って移動できるようにした。サーチコイルの位置はレーザー距離計を使って測定した。レーザー距離計の測定位置精度は約 ± 0.5 mmであった。サーチコイルのレール上の移動量は全長2,000mmの電磁石に対して最大2,260mmである。磁極内磁場分布を見るため2,260mmの距離を約100ヶ所測定した。1ヶ所の測定磁場は約5から10ショットの平均値を用いた。Figure 8にEddyセプトム電磁石のポンチ絵と測定用レール長、磁極内の中心位置をビーム軸に沿って測定した磁場分布とピーク時間付近の積分磁場波形を示す。この時の充電電圧は3kVでありビーム運転時の典

型的な充電電圧である。磁極内の磁場は約0.3 Teslaであり、積分磁場のピーク値は 0.46866 ± 0.00020 Tesla \times mであった⁶。ともに現行機の典型値である0.23 Tesla、0.44 Tesla \times mを十分満たす値であった。またフラットトップである10 μ s幅での平坦度はピーク値に対して約 1.5×10^{-4} であった。理想は 1×10^{-4} 以下であるため今後フラットトップの平坦度微調整が必要である。次に磁極内をビーム中心軸の高さで水平方向に ± 37 mmの範囲で移動しながら積分磁場を測定した。積分磁場は全てビーム軸方向に沿った2,260mmの長さで測定した。測定された積分磁場の水平方向依存性の結果をFig. 9に示す。ここではプラスの方向がセプトム板の方向である。測定した範囲での積分磁場の水平方向の平坦度は0.15%/47mmであった⁷。中心からセプトム板の方向に移動すると積分磁場が上昇する傾向にある。一方コイル方向には特に大きな変化はなかった。現行機のFX用低磁場セプトムの磁極内磁場の水平方向依存性は約0.8%/44mmであり[18]、現行機よりも良い平坦度を示した。今後は垂直方向の積分磁場の依存性や周回ライン上の漏れ磁場の測定も行う予定である。

6. まとめ

MR FX用新低磁場セプトム電磁石の開発状況について報告した。MRビーム起因の空間ノイズに対して電圧指令信号線のノイズ対策を行い、最終的にはアナログ信号からシリアル通信に変更した事で空間ノイズの影響はなくなった。またドロップ回路の度重なる故障から新しく補助充電器を製作した。2018年3月に補助充電器は完成し、充電電圧の安定性は要求値を満たした。磁極内磁場の測定を行い、現行機の典型的磁場を十分満たし、磁極内磁場の水平方向依存性を積分磁場を測定する事で評価した結果、現行機よりも十分小さい事を確認した。

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, 2017, p73-76.
- [6] Y.Morita et al., Proc. of PASJ, 2017, p1056-1060.
- [7] K.Hasegawa et al., Proc. of PASJ, 2017, p924-928.
- [8] M.Shirakata et al., Proc. of PASJ, 2017, p1077-1080.
- [9] Y.Sato et al., Proc. of PASJ, 2017, p90-94.
- [10] T.Shimogawa et al., this proceedings, THP067.
- [11] T.Sugimoto et al., Proc. of IPAC, 2014, p526-528.
- [12] T.Sugimoto et al., Proc. of IPAC, 2016, p1337-1339.
- [13] T.Shibata et al., Proc. of IPAC, 2017, p576-578.
- [14] T.Sugimoto et al., Proc. of PASJ, 2017, p1061-1064.
- [15] T.Shibata et al., Proc. of PASJ, 2016, p1204-1205.
- [16] T.Shibata et al., Proc. of PASJ, 2017, p1051-1055.
- [17] T.Shibata et al., Proc. of PASJ, 2014, p86-90.
- [18] K.Ishii, private communication, Apr. 2018.

⁶ 誤差はサーチコイルによる測定系の系統誤差である。

⁷ 2月と7月では0mm位置での積分磁場が0.2%異なっていた。そのため7月に測定した ± 37 mm、+30mm位置での積分磁場は0.2%スケールして表示した。0.2%の違いは電流値の測定系の問題だと推測しているが調査中である。