

J-PARC-MR アップグレードのための新しい速い取り出し用低磁場セプタム電磁石の開発(3)

THE DEVELOPMENT OF A NEW FAST EXTRACTION SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF J-PARC MR

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 Coropration

2-3-1 Yakura, 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 some problems in durability of septum coil by their vibration, and have large leakage field in the circulating line. 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 large by its high power. We are developing the new FX LF-Septum magnets and their power supplies. The new magnets are a induced eddy current type. The induced eddy current type does not have septum coil, but has a thin plate. We can 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 have reported the measurement of gap-field, leakage field and performance results of the power supply in PASJ2014 and PASJ2016. The main work in recent years were adjustment of the power supply. The long-term stability was satisfied by installing the feedback with PXI+FBGA system. On the other while, the periodic noise which are synchronized with beam operation were observed in the power supply, that have made the reproducibility of pulse by pulse large. We must resolve the noise effect. In final, we will introduce the sub-charger system for the power supply as final system.

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る[1]。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。LINACではピーク電流値45 mA、最大パルス時間幅0.5 msecの負水素(H⁻)ビームを400 MeVに加速し、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2つの核外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。1回の出射で2バケット出射する。RCSからMLFへ送る陽子ビーム電力の設計値は1 MWであり、2015年4月に500 kWに達した。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 sec(5.52 sec)である。NU運転の場合MRからNUへ8バケットを約5 μ secの間に射出する。一方HD運転の場合は2 secかけて射出する。この射出時間の違いから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は2017年2月に470 kWに達した。MRの供給ビーム電力の設計値は750 kWである。この設計値を達成するために様々な方法が検討された。その結果バケット内陽子数の増強と繰り返し周期の短縮化という方針を選択した。ビーム強度増強のためLINACではRFイオン源や大電流用RFQの導入によるH⁻ビーム電流値の増強が行われた。MRではビーム損失量の軽減により着実に増強している。目標とする繰り返し周期は1.3 secである(簡単に1 Hz化と呼ぶ)。周期短縮による大電力化のためMRでは様々な課題の克服が必要である。1 Hz対応の主電磁石用電源の開発、高勾配RF加速空洞の開発、MR入射部コリメータの容量増強、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。750 kW達成は2019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[2][3]を参照されたい。

*tatsunobu.shibata@j-parc.jp

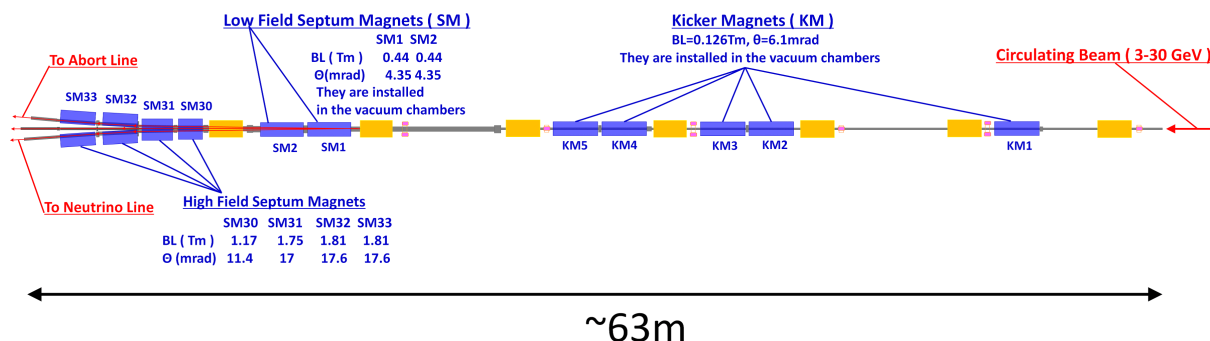


Figure 1: The layout of the Fast Extraction Magnets in 50 GeV Main Ring.

2. 750 KW に向けた 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 Figure 1 に示す。FX 電磁石の主な用途は NU ビームラインと MR アボ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。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¹。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、平坦部が 10 msec、立ち下がり時間は長いもので約 0.6 sec 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。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 キッカーは電源の改修を行っている。パルスモジュレータ内の PFN への充電時間が現状で 1.8 sec のため、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。2017 年 3 月、開発された 1 Hz 対応の新充電器を 1 台実機用に導入した²。2017 年夏期停止期間中に残りの 4 台全ての充電器を新充電器に交換する計画である。またパルスモジュレータのシャントダイオード抵抗を 1 Hz 用の新しい物に交換する事も実施中である [4]。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 [5]。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 2019 年の夏を目標としている。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

現行機 (Figure 2) の低磁場セプタムは真空槽に収納された電流型セプタム電磁石である。2 台の低磁場セプタムは同じ構造を持ち、発生磁場は約 0.23 Tesla、各偏向角は 4.4 mrad (計 8.8 mrad) である。新低磁場セプタム電磁石と電源の構成図を Figure 3 に示す。低磁場セ

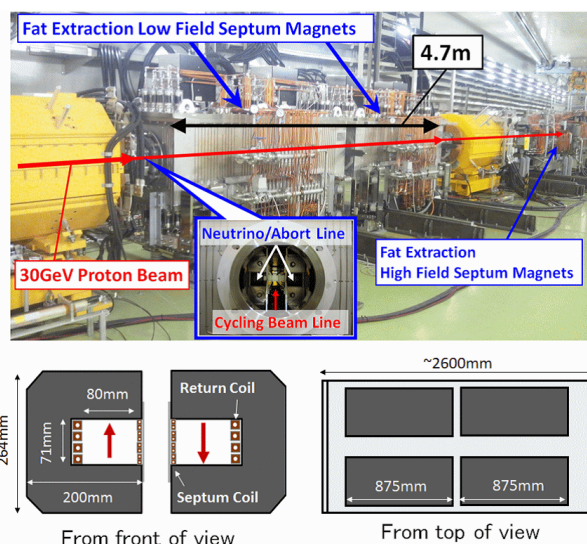


Figure 2: The current low field septum magnets for fast extraction of 30 GeV proton beam. There are two vacuum chambers, which two septum magnets are installed in one vacuum chamber

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事。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事。周回ビームラインへの漏れ磁場は ~ 2 Gauss/cm 程度の Q 成分があり、磁極端部では ~ 50 Gauss が存在するため漏れ磁場軽減が必要である事。そこで上記の課題を克服するため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 [6]³。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 (Figure 2)。そのため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ためコイル絶縁部の耐久性問題が解決する。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

¹低磁場と高磁場の名称の定義は定まっていないが 1 T 以下を低磁場、1 T 以上を高磁場とした。

²5 台の FX キッカー電磁石に対してに対して 5 台の充電器を使用している。

³Eddy セプタムは入射セプタム 2 で既に使用されている。

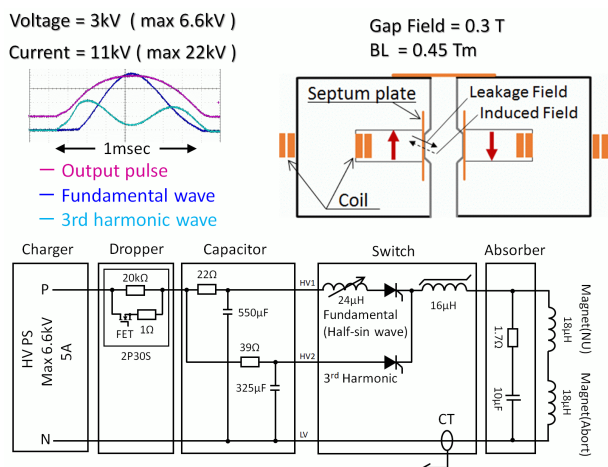


Figure 3: The abstract of the new LF-Septum magnet, and the diagram of the P.S. for the new LF FX-Septum magnet.

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 (Eddy セプタム 1 セット)。それぞれの Eddy セプタムが NU ビームラインと MR アポートライン用となる。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上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 $18 \mu\text{H}$ である。コイル抵抗値は約 $0.2 \text{ m}\Omega$ 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 $36 \mu\text{H}$ 、 $0.4 \text{ m}\Omega$ となる。磁極開口部は現行機の $80 \text{ mm(H)} \times 71 \text{ mm(V)}$ から $140 \text{ mm(H)} \times 80 \text{ mm(V)}$ に変更した。1 セットの 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 セプタムは各ビームラインに対して 2 台ずつであるため、真空チャンバーを 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 (複数台)、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僅かに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備わっており、それぞれに充電される。コンデンサの容量はそれぞれ $550 \mu\text{F}$ 、 $325 \mu\text{F}$ 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サイリスタスイッチである。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。電磁石への出力電流パルスは約 1 msec 幅 (平坦部の $10 \mu\text{sec}$) の半正弦波であり、電圧 \times 電流の最大は $6 \text{ kV} \times 22 \text{ kA}$ 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や磁場測定を行っている [5] [6] [7]。

4. 低磁場セプタム電磁石の性能評価

必要な出力磁場のパルス毎の再現性及び長期安定性への要求精度は 10^{-4} である。また磁場の平坦度は平均値に対して 10^{-4} である。 10^{-4} の精度は直径 26 mm 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。低磁場セプタムの磁場が 1×10^{-4} 変化すると標的上での陽子ビームの位置は約 0.13 mm 変化する。出力磁場の精度はコンデンサへの充電電圧精度で決定される。

4.1 出力電流値のパルス毎の再現性評価

充電器単体での出力電圧のパルス毎の再現性精度を測定した結果、 4.6×10^{-4} (peak to peak) であった。充電器とドロップ回路を用いたコンデンサへの充電電圧のパルス毎の再現性精度を測定した結果、 5×10^{-5} 以下である事を確認した⁴。充電電圧のパルス毎の再現性精度は要求精度である 1×10^{-4} 以下を満たした [5][7]。

4.2 出力電流値の長期安定性の評価

出力磁場の長期安定性を保証するためにはスイッチバンク内に搭載された CT を用いた電流モニターの数から充電器出力へのフィードバックシステムが必要であった。フィードバックシステム導入以前の 2016 年 4 月に行った長期安定性の評価の結果、約 2 時間の間で出力電流値は運転直後の出力電流値に対して 430 ppm 程度の時間変動が見られた。時間変動の原因調査も行われたが制御盤の温度が関係している事は分かったが根本的な時間変動の原因ではなく、フィードバック無しでの要求精度を満たす長期安定性を実現するには至らなかった。フィードバックシステムの導入は 2016 年 12 月に完了した。フィードバックシステムは PXI と FPGA を用いて構築された。PXI (PCI eXtensions for Instrument) は National Instruments が開発した計器/制御システム用のプラットフォームである。Compact-PCI Express (PCIe) をベースにした測定用モジュール、通信モジュール等が数多く用意され、同じく PCIe の制御用 PC モジュールで制御が可能である。PXI 開発のためのソフトとして LabView、LabWindow/CVI がインストールされている Max Measurement and Automation Explorar を使用する。PXI を使用した理由は充電電圧をデジタル制御する事、出力電流の測定に 20bit 以上の分解能を持ち且つサンプリングレートも高い高分解能高速 AD が必要だったからである。フィードバックシステム導入直前の長期安定性を再確認した結果、開始後約 2 時間で出力電流は 500ppm だけ変動したが (Figure 5 (上 Figure)), フィードバックシステム導入後は時間変動は起こらず出力電

⁴充電電圧 3 kV、繰り返し周期 3 秒の運転条件下での測定結果

流が安定している事が分かる (Figure 5(下図))。今後の課題はフィードバックパラメータの最適化である。

4.3 ビーム起因の周期的ノイズの影響

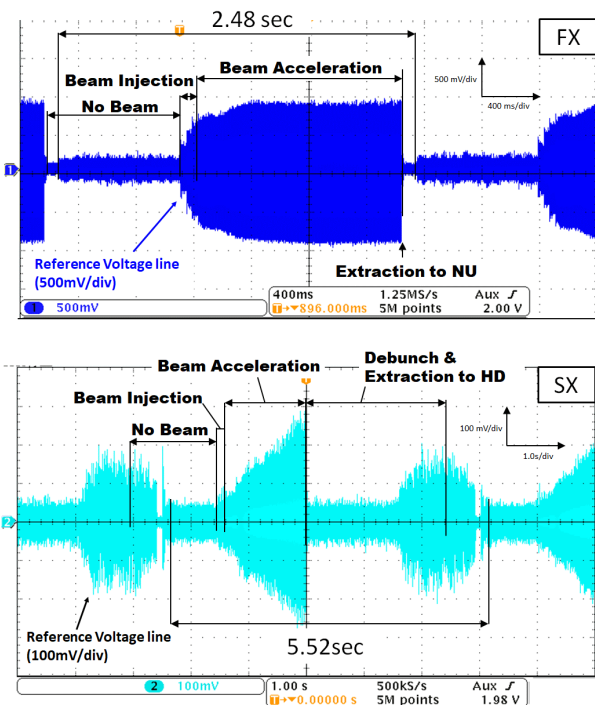


Figure 4: The periodic noise in the reference voltage line which were taken during FX operation (Upper) and SX operation (Lower).

2016年4月頃、FX運転中にMR周回ビームのタイミングに同期した周期的ノイズが充電器への電圧指令信号上で観測された。またこのノイズはSX運転中にも観測された。Figure 4)は観測されたノイズ波形である(上図がFX運転中に取得、下図がSX運転中に取得)⁵。ノイズの特性としてまずビームがMRに入射された時点からノイズレベルが大きくなる事が挙げられる。そして加速終了後はノイズレベルが小さくなる事も挙げられる。但しSX運転中に限ってはHDにビームを取り出している時間帯の後半に再びノイズレベルが上昇する。この点についてはビーム同期の有無に疑問が持たれる。2016年12月FX運転中、Eddyセプタムの長期安定性の評価の際、このノイズの影響により出力電流の再現性精度が悪化した。出力電流の再現性精度を評価した結果、MR周回ビーム無し(Off Beam)の間は精度は50ppm(Pk-Pk)であったが(Figure 5(上図))、MR周回ビーム有り(On Beam)の間は200ppm(Pk-Pk)の大きな揺らぎが観測された(Figure 5(下図))。充電器への設定信号上にノイズが重畳する事で設定値が変動され、結果充電器からの出力が変化すると推測される。Off Beamの際にはノイズがほぼ消失した。他の電磁石運転時にも僅かにノイズが見えたがほぼ全成分がMR周回ビームに原因があると思われる。電源棟内の空間ノイズも

⁵このデータ取得中は電圧指令信号はOFFの状態でありノイズのみを観測した

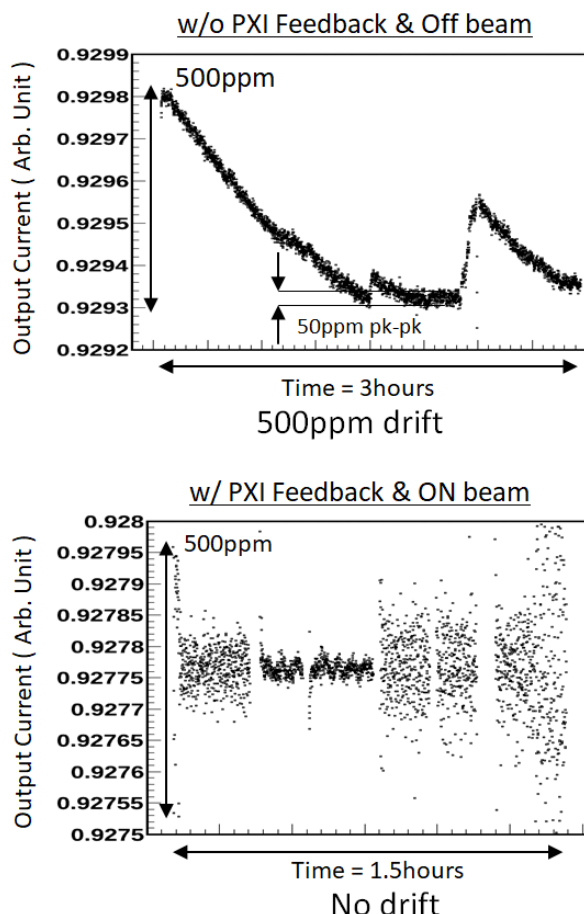


Figure 5: The time variation of the output current in Dec. 2016, which the feedback system was not installed and the MR proton beam was not operated.

測定した所、予想以上の空間ノイズが存在している事も確認できた。MR周回ビーム起因のノイズであるためノイズの根絶は非常に困難である。対策としてはノイズの性質や伝搬経路を理解した上で電源への影響を軽減する事である。今後ノイズの受けないように充電器用の入力電源へのフィルター強化、充電電圧制御用信号線の差動受け化、GNDの取り方等の改修を計画している。

5. 補助充電器の考案

ドロップ回路は設定電圧より10%程高めに出力する充電器の出力を受け、FETを用いて設定電圧まで精度良く降圧する回路である。FETはスイッチング素子による降圧よりも精度が良い。ドロップ回路にはFETが2並列×30直列の計60個が使用されている。充電器のパルス毎の再現性精度は 10^{-4} (100ppm)程度であるがドロップ回路によって 5×10^{-5} (50ppm)の精度に上げる事ができた。充電電圧の精度はドロップ回路へのフィードバックによって達成している⁶。ドロップ回路からコンデンサへの充電電圧は電圧検出器によって分圧され設定電圧と共に誤差増幅器に入力される。誤差増幅器

⁶上述した長期安定性用とは別のフィードバックシステム。

で測定値と設定値の差を計算するが、ここで扱う誤差増幅器のゲインはフィードバックの精度を決定する重要なパラメータである。このゲイン調整を誤るとFETを破壊しかねない。計算結果をドロップ回路にフィードバックさせFETの抵抗値を変える事で充電電流を制御し設定充電電圧に合わせるようなロジックを構築した。ドロップ回路の利点は既に達成している50 ppmのような充電電圧の精度である。一方欠点としてはFETに流れる電流値の制御が非常に重要であるため60個のFET全てのゲート電圧調整が必要であるがこの調整には長期間の時間を要する点である。更にFETの分流バランスの検出が難しいため分流バランスが崩れた時に発生するFET故障時の検出が困難である。そのため実際Eddyセプト用新電源での動作試験中の故障箇所はFETが最も多く、その度に60個全てのFETの交換と再調整を必要とした。この状況と今後の運用を考慮しドロップ回路に変わる新しい電圧調整ロジックを検討した。その結果充電器からの高電圧をドロップ回路で降圧する方式を変更し、補助充電器方式を考案した。充電器を主充電器としてコンデンサに直接充電し、設定充電電圧の約99%を充電する。そして主充電器と並列にコンデンサに充電する補助充電器を新構築し、補助充電器により残りの1%を充電する。充電電圧精度はこの補助充電器で保障する。充電器は3相AC400Vを受電しダイオード整流によってDC化した後IGBTによるチョップ制御にてパターン電圧を作る。このパターン電圧は高圧トランスで高圧のパターン電圧を出力する。補助充電器はFETを使用したドロップ部とスイッチング素子によるパターン波形生成回路(インバータ)と高圧トランスで構成する。基本回路は主充電器を基にしているがドロップ回路が備わっている点が異なる。補助充電器の出力電流は最大1A、最大電力4kWを想定している。補助充電器は主充電器に比べて電流値を小さくする事でコンデンサへの充電電圧の微調整を行い充電電圧精度を保証する。この補助充電器と主充電器に対する要求をまとめる。1つ目は補助充電器への入力電圧は主充電器内で整流されたDC電圧を使用する事で主充電器と受電電圧ラインを共通にする。2つ目は補助充電器のドロップ回路に使用するFETの数は数個程度にし、故障時に於いても交換と調整という復旧時間の短縮化を可能にする事。またFETの故障による補助充電器の動作不良時にはFET故障の特定が容易である事。そのためドロップの出力部に電圧検出回路を組み常時電圧監視を可能にする。充電電圧精度はドロップ部のFETの調整によって保障する。3つ目は補助充電器のスイッチング素子はIGBTを使用し、パターン波形を生成する。IGBTの短絡故障時には高速で停止するためにIGBT入力部に高速ヒューズを入れる。またインバータの出力部にも電圧検出回路を組み込み電圧の常時監視を行う。4つ目は補助充電器の高圧トランスをユニット化する事で故障時にもユニット交換という形で復旧を容易にする事。主充電器の出力電圧は設定充電電圧の99%から99.9%程度の範囲で可変にする。5つ目は補助充電器は充電開始から放電までの間連続出力させる事。放電後は次の充電までは停止する。6つ目は主充電器に対するフィードバックは自身の出力電圧に対して行う。そのため主充電器の出力部に分圧

器を設ける。フィードバックはモニター電圧と設定電圧値を誤差増幅器に入力し、その出力をIGBTが入力される。一方、補助充電器のフィードバックはコンデンサへの充電電圧に対して行い、ドロップ用FETにフィードバックを与える。そのため550 μ Fコンデンサへの入力電圧部に電圧検出回路を組む。フィードバックはモニター電圧と設定電圧値を誤差増幅器に入力し、その出力をFETに入力する。主充電器と補助充電器でフィードバックするために監視する電圧の箇所が異なる理由は2つのフィードバックが1箇所の電圧を制御する事によるトラブルを避けるためである。7つ目は主充電器の出力部、補助充電器の出力部それぞれにダイオードを設ける。主充電器と補助充電器の概略をFigure 6に示す。補助充電器導入のためには充電器と制御盤の改修も必要である。現在補助充電器製作は基本設計の段階であり、上記の要求項目についても現在検討中であるが2017年度中の完成を目指している。

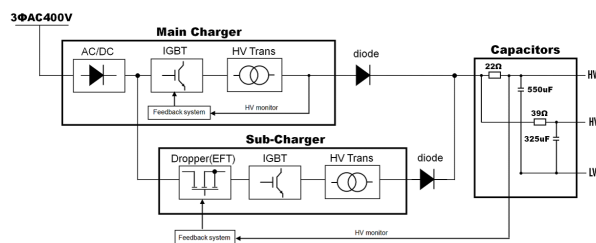


Figure 6: The illustration of idea of new power supply with a sub-charger.

6. まとめ

J-PARCの30 GeV-主シンクロトロンは陽子ビーム出力電力増強のために1 Hz 繰り返しを目指す。MR 用入射電磁石グループは1 Hz 運転対応の電磁石への交換や改善または追加を実行中である。本報告は速い取り出し用低磁場セプト電磁石の電源調整の現状についてまとめた。2016年12月に出力の長期安定性の精度を保証するフィードバックシステムを導入し、時間によって変動する出力のドリフトを抑える事ができた。一方MRの陽子ビーム起因と思われるノイズによって出力精度が4倍程悪化する事も判明した。ノイズ対策が今後の大きな課題の一つとなる。またパルス毎の出力精度を保っているドロップ回路には故障が多く、復旧にも時間がかかるため現在ドロップ回路に代わる補助充電器を用いた新しいシステム構築を計画している。補助充電器を用いたシステムは2017年度中に完成を目標にしている。

参考文献

- [1] J-PARC Home Page, <http://j-parc.jp/>
- [2] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p115-119.
- [3] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017.
- [4] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of PASJ, 2017.
- [5] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p1204-1205.
- [6] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p86-90.
- [7] T.Shibata *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p115-p119.