

J-PARC-MR アップグレードのための新しい入射セプタム電磁石の開発 THE DEVELOPMENT OF NEW INJECTION SEPTUM MAGNET FOR UPGRADE OF J-PARC MR

芝田達伸^{*A)}、川口祐介^{B)}、石井恒次^{A)}、Kuanjun Fan^{A)}、杉本拓也^{A)}、松本浩^{A)}、松本教之^{A)}
Tatsunobu Shibata^{*A)}、Yusuke Kawaguchi^{B)}、Koji Ishii^{A)}、Fan Kuanjun^{A)}、Takuya Sugimoto^{A)}、
Hiroshi Matsumoto^{A)}、Noriyuki Matsumoto^{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

We are improving the J-PARC Main Ring(MR) for beam power of 750 kw which is the first goal of the J-PARC. The repetition period of the MR operation for the Fast eXtraction must be upgraded to 1.3 sec(~ 1 Hz) from 2.48 sec. It is necessary to exchange the new Injection septum magnet I and its power supply which are installed at the injection line from RCS to MR, because the current injection septum magnet I can not be operated with 1 Hz repetition. In addition to that, we confirm the large leakage field around circling beam line, then we must improve the magnet with low leakage field. We started the development of the new Injection septum magnet I and its power supply in 2013. The new injection septum magnet I can operate with 1 Hz repetition and have low leakage field which its order can be expect 10^{-4} of gap field. The new injection septum magnet and the power supply were completed in Autumn 2014. In this report, we will report the detail of new injection septum magnet system and results of its performance.

1. J-PARC

J-PARC は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で製作運営する世界最大級の強度を誇る大型陽子加速器施設であり中性子や中間子、 μ 粒子、 ν ビーム等を用いた研究が行われている [1][2]。J-PARC は 400 MeV-LINAC、3 GeV-RCS と 50 GeV-MR の 3 基の加速器から構成される。LINAC ではピーク電流値 30 mA、時間幅 0.5 msec の 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 繰り返して運転することができる。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 月の時点で世界最高強度の 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、NU(HD) 運転時の繰り返しは 2.48 秒 (6 秒) である。NU 運転の場合 8 バケットを $\sim 5\mu$ 秒の間に射出する。一方 HD 運転の場合は 3 秒かけて射出する。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 2015 年 6 月に 370 kW に達した。MR が目標とする NU への供給ビーム電力は 0.75 MW である。MR の大電力化はバンチ内陽子数の増強と繰り返しを上げ

る事である。目標周期は 1.3 秒 (簡単に 1 Hz 化と呼ぶ) である。大電力の達成を目指すためには様々な課題の克服が必要である。1 秒周期対応の主電磁石用電源の開発、そして後述する入射用電磁石の改良が必要である。以下に MR 用入射電磁石について記述する。

2. MR 用入射電磁石

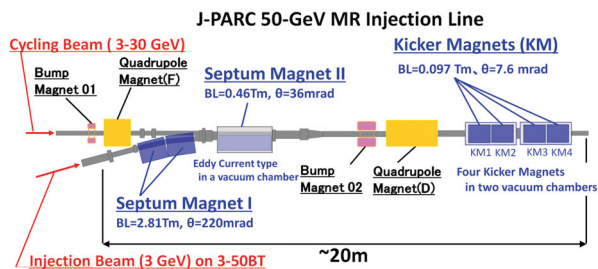


Figure 1: The layout of the Injection Magnets in 50 GeV Main Ring.

MR 用入射電磁石の配置図を図 1 に示す。入射用電磁石は 120 msec の間に MR に 8 バケットの 3 GeV 陽子ビームを入射するために使用される 3 種の電磁石から構成される。入射セプタム電磁石 I (以下入射セプタム I) は RCS と MR を繋ぐ 3-50BT と MR 周回ビームラインとの交差点に設置されており陽子ビームを 1.44 T の強磁場により 220 mrad 偏向させる高磁場セプタム型電磁石である。入射セプタム電磁石 II (以下入射セプタム II) は 0.34 T の低磁場で 36 mrad の偏向を与える低磁場セプタム型電磁石であり、渦電流誘導型電磁石と呼ば

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

れる電磁石である。入射セプタム II の下流には入射用キッカー電磁石 (以下入射キッカー) が 4 台設置されている。4 台の入射キッカー電磁石の出力磁場はそれぞれ全て同じ 0.04 T であり、偏向角は 4 台の合計で 7.6 mrad である。

MR 大強度化のため 2012 年に入射電磁石の中期計画案として数年以内の全入射電磁石の 1 Hz 対応化が開始された。1 Hz 化に伴い交換が必要な電磁石は入射セプタム I の電源と電磁石、出射キッカーの電源、出射セプタムの全ての電源と電磁石である。2015 年現在入射セプタム I については本報告により詳細を述べる。入射セプタム II はビーム軸方向に沿った磁極出入口近辺の漏れ磁場が問題になっているため改善策として端部シールド追加を提案している [15][10]。入射キッカーについてはパルスの立ち上がり時間を 300 nsec 以下にし、更に反射波の影響を少なくするため電源並びに電磁石の回路の変更を行っている [16]。しかし完全には反射波の影響を消す事ができないため入射キッカー下流に反射波による影響を消す補正キッカーを 2015 年 4 月導入した [15][14][10][11][16][17]。以下本研究対象である入射セプタム I について記述する。

3. 入射セプタム I

入射セプタム I は MR に入射される陽子ビームを大角度で偏向させ MR の周回軌道に移動させるための最初のセプタム電磁石である。以下に現行機と新規機について述べる。

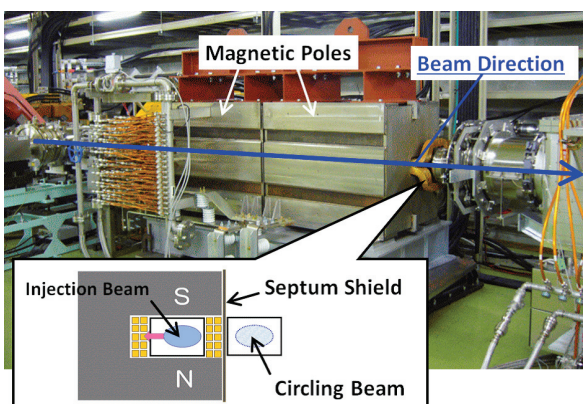


Figure 2: The photograph of the current Injection Septum Magnet I.

3.1 現行機と新規機の必要性

現行機の入射セプタム I 電源への供給電力は 3 相 AC400 V を受電トランス盤 (容量 150 kVA) で 3 相 AC120 V に降圧して入力している。3 相 AC120 V で受電された電圧は IGBT を用いた昇圧チョッパー型コンバータによって DC360 V に昇圧され大容量コンデンサー (5.76 F) に充電する。充電後はパルス出力盤内の 2 石の IGBT チョッパー型インバータ回路によってパターン形成した電流波形として出力される。通常運転時の 1 パルス当たりの出力エネルギーは約 200 kJ である。パルスは 2.48 秒周期で出力されるので平均電力は 80 kW である。電源内の消費電力を加えると平均電力は約 100 kW

である。つまり 1 Hz 運転の場合 AC 受電盤の容量を超えてしまう。パターン波形の立上がり 0.25 秒、フラットトップ (FT) が 0.2 秒であるが、インバータが 2 石 IGBT であるため負の電圧を出力する事ができず立ち下がり制御はできない。そのため立下がり時間は電磁石の抵抗 (56 mΩ) とコイル (インダクタンス 11.8 mH) の RL 回路による自然放電の時定数 (0.2 秒) で決まり、立下がり時間として約 1 秒必要である。現行機電源の最も重要な問題はパターン電流の立ち下がり時間が長いために 1 Hz 運転に対応していない点である。更に電源の出力ピーク電流の最大は 2,900 A であるが、通常 3 GeV ビーム入力に対して 2,784 A の出力であるため将来の運転方針である 3.3 GeV ビーム入射に対応できない。以上の点から MR の 1 Hz 化のためには電源の交換が必要である。

入射セプタム I 電磁石の現行機を図 2 に示す。磁極長 900 mm の磁極 2 台を 5.67° の角度を持たせてビーム軸に沿って並べる事で一つのセプタム電磁石を構築している。セプタム電磁石は理想的にはセプタム板より外部の周回ダクト側には漏れ磁場がない電磁石であるが、現行機の入射セプタム I には周回ダクトに沿って大きな漏れ磁場が存在する [9]。周回ダクトの上流部には最大 20 Gauss 程度、2 つ割りにされている磁極の間の空間から最大 10 Gauss 程度、そして下流部の出口付近には最大 25 Gauss の漏れ磁場が存在する。漏れ磁場の大きさには出力パルス波形に伴った時間変化依存性も見ることができ、大きな漏れ磁場が発生するのは磁場の立上がり時と立下がり時である。RCS からの 4 回入射の時間領域の漏れ磁場による BL 積は約 $5 \times 10^{-1} \text{ T} \cdot \text{m}$ である。磁場の立下がり時の BL 積は最大 $-10 \text{ G} \times \text{m}$ であり、この漏れ磁場は時間と共に指数関数的に減衰するが 30 GeV への加速中常に影響を与える。そのため入射セプタム I も新しく交換する必要がある [9]。

4. 新入射セプタム I 電源と電磁石の製作

新電磁石への重要な要求は 1 Hz 運転が可能になる事、FT 部でのパルス毎の磁場の安定性や平坦度が 10^{-4} 以下である事、漏れ磁場を 1.4 T に対して 10^{-4} の 1 Gauss レベルに軽減する事、他にも将来考えられる RCS からの 3 GeV 以上のエネルギー入射も可能にする事も重要である。

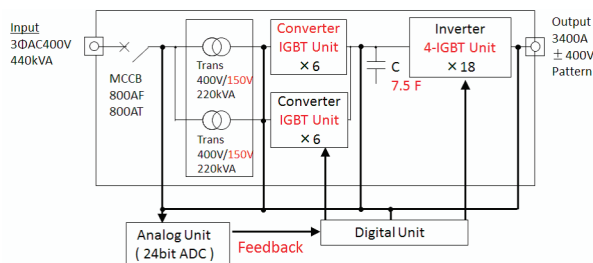


Figure 3: The diagram of the power supply for the new injection septum magnet I.

まず電源について記述する。1 Hz 運転を可能にするため電流パターンの立下がり部も制御可能な 4 石の IGBT を用いたインバータ回路を採用した。コンバータ回路は現行機同様 4 石 IGBT を用いた 3 相チョッパー型昇圧

コンバータ回路を採用した。電源への1次電圧は3相AC400Vであり、受電後2つの変圧器(容量はそれぞれ220kVA)で3相AC150Vに降圧する。降圧した3相AC150VをコンバータでDC480Vに整流し7.5Fの大容量コンデンサに充電する回路となっている。更に負荷である電磁石に印加された際にインダクタンスに貯まる磁気エネルギーを充電用コンデンサに戻す回路を製作した。また電流安定性を保つためのパルス毎の充電電圧のフィードバックをデジタル制御で行う。電源は2014年秋に完成した。図3に製造された電源の基本回路構成図を示す。新電源による電流波形の立ち上がり立ち下りの時間は両方0.2秒を可能にする。またFT部は現行機と同じ0.2秒である。

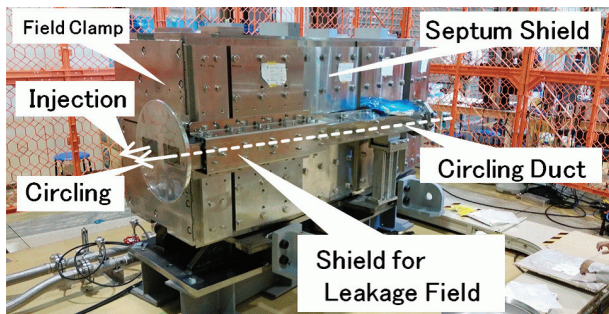


Figure 4: The photograph of the new injection septum magnet I.

次に新しい電磁石について記述する。新電磁石への最も重要な要求は漏れ磁場の軽減である。磁極の形状は漏れ磁場だけでなく多極成分も変化するため慎重に検討する必要がある。まず漏れ磁場の主な原因となったのは縦方向に2分割した磁極と磁極端部でコイルがむき出しになっている事である。そこで磁極は一体化形状が基本にしたSector型、Rectanglar、Arc型の3つの形状が提案された。電磁石製作の難易度を考慮しない場合最も形状的に良いのはRectanglar型であるがその中で最終的にSector型が採用された新しい電磁石への変更点は磁極の形状だけではない。下流側の磁極端部は周回ダクトとの合流地点から近いためコイルが作る磁場が周回ラインへの漏れ磁場として残ってしまう。新電磁石ではこのコイルからの漏れ磁場を軽減するため下流端板をコイルも含めてフィールドクランプで覆った。フィールドクランプは磁極と同じ珪素鋼板を用いた積層鋼板をステンレスで覆った構造をしている。これにより端板からの漏れ磁場を大きく下げる効果が期待できる。漏れ磁場軽減のための磁気遮蔽板については後述する。製作された新規電磁石を図??に示す。

5. 新入射セプタムIの動作試験と性能評価

5.1 試験準備

新入射セプタムIの動作試験はJAEA構内の陽子加速器開発棟の1階実験室内で行っている。2014年11月に新規機の電源と電磁石が納入された。12月から1月下旬にかけては電源の基本動作試験とコンバータ、インバータ調整等を行った。出力パターン波形が設定通り出力されている事を確認した(図5)。以下動作試験として磁場測定とFT部の電流安定性測定、入射セプタムシス

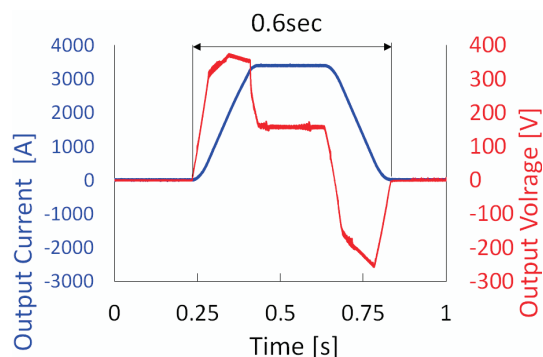


Figure 5: The waveforms of the outout current which its time width is 0.6 sec, and output voltage.

テムの消費電力についてまとめる。最初に動作試験直後に判明した電磁石の振動問題について記述する。

5.2 セプタム板の振動問題と対策

2015年1月セプタム板、周回ダクト、入射ダクトが水平方向に出力パルスに同期して大きく振動している事が確認された。振動の原因は磁場によって大電流が流れるコイルにローレンツ力が働きセプタム板を押すためである。具体的な振動量と電流の関係を調べるためにドップラー振動計と¹レーザー変位計²を用いて振動量測定を行った。振動量試験では振動による電磁石への損傷を避けるため出力電流の最高値を1800Aに定めた。最も振動量が多いのはSUYのセプタム板厚が5mmの最も薄い場所で、1,800A印加時に1.6mmであった。上流部のSUYの厚さが最も厚い15mmの場所でも1,800A印加時で約300 μ mであった。振動波形が電流波形と非常に良く似た形をしている事も確認した。

周回ダクトの位置変更ができないためセプタム板の厚さを変える事ができない。そのためセプタム板の強度を上げるためSUY板と交互に重ねて使用しているアルミ板(AL5052)の材質をSUS316Lに変更する事とセプタム板を押さえている最外層SUS304板(押さえ板)を厚くする事を選んだ。また押さえ板は周回ダクトを中心に上下に分割しているが、上下一体化した一枚板の押さえ板への変更が可能な上流部については上下一体化の押さえ板に変更した。軽減後の振動量として100 μ m以下を目指した。セプタム板の改修作業の際に磁極の分解を行い、コイルと入射ダクトを水平方向に押す事で隙間を作らないようにしているコイルサポートが振動によって緩んでいる事を確認した。セプタム板の入れ替えの前にコイルサポートの調整を慎重に行った。磁極の水平方向のギャップ面の長さは400mmである。この寸法に対してコイルと入射ダクトがぴったり納まるようにコイルサポートだけでなくBT板やカプトンを適切な厚さで挿入した。全ての振動対策を行った後再びセプタム板表面の振動量測定を行った。振動結果を図6に示す。通常の運転条件である2,800Aでは約200 μ m、最大の3,400Aで350 μ mであった。振動対策前に比べると1/10程度の軽減に成功した。また入射ダクト下流部の末端の振

¹小野測器製レーザードップラー振動計(Laser Vibrometer-Model LV-1710)

²キーエンス製CMOSレーザー振動計IL-065(位相分解能2 μ m、時間分解能1ms)

PASJ2015 THOM02

動も十分小さい必要がある。そこで末端部に入射ダクトの振動を抑える固定治具を新しく追加した。固定治具無しの場合振動量は最大 130 μm である事を確認したが固定治具設置後は 40 μm 程度に軽減した。振動対策前、周回ダクトの下流部はセプタム板に直接固定していたがセプタム板の振動の影響を受けないようにセプタム板の押さえ板に固定した漏れ磁場用磁気遮蔽板(詳細は後述)を貫通するボルトのみを接触点をする形で設置した。この対策後の周回ダクトの下流部端部での振動量は最大 40 μm 程度であり、上流部の振動量は最大 130 μm 程度であった。セプタム板表面での振動量の最大が 350 μm であったため目標値には達しなかったが、振動対策前に比べて十分振動量を軽減したと言える。

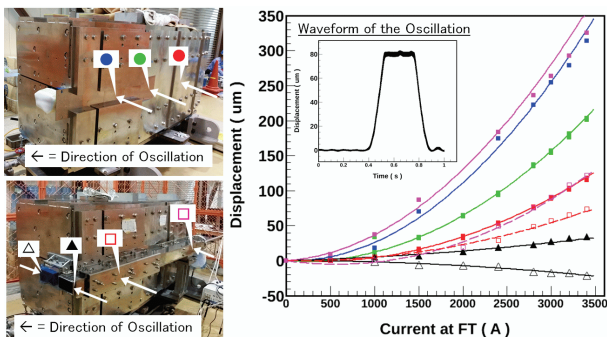


Figure 6: The measurements of oscillation of surface of the septum shields, injection and circling duct, and its waveform.

5.3 磁場測定

入射セプタム I の性能評価として磁極内の磁場と周回ダクトへの漏れ磁場を測定する。磁場測定にはサーチコイルとガウスメータを用いた。磁極内磁場は通常運転で約 1.4 Tesla であるためサーチコイル、ガウスメータ両方で測定可能である。一方漏れ磁場は数 Gauss 程度であるためサーチコイルでの検出は容易ではない。そのためガウスメータのみで測定した。使用したサーチコイルはガラスエポキシ製で直径 20 mm、高さ 10 mm の芯に直径が 0.1 mm の銅線が 2 本ツイストペアになったコイルを約 500 巻したものである。ガウスメータには F.W.BELL 製 8030 型 3ch-3 軸ガウスメータを用いた。このガウスメータは磁場波形を観測する事ができる点が大きな利点である。ガウスメータの較正として一定磁場を NMR と一緒に測定した結果を比較した。NMR では 3,856.18 Gauss でありガウスメータとは 7.6 Gauss の差 (~0.2% の差) であった。漏れ磁場を測定する場合には十分な精度であると判断した。

5.3.1 磁極内磁場測定結果 磁極内磁場はサーチコイルを取り付けた 3 つの電動スライダーを用いた X-Y-Z スキャナーを用いて測定した。信号記録には横河電機製の高速データアキュイジションユニット SL1000 シリーズと高速 1Mps、16bit 絶縁 AD 変換モジュールを用いた。また FT 部の設定電流が 2,800 A と 3,400 A での磁極出入口付近の磁場分布と磁場波形を図 7 に示した。ここで入射ダクトの上流部フランジ面を 0 cm とした。入射ダクト入口付近では -20 cm 辺りから磁場が発生し始

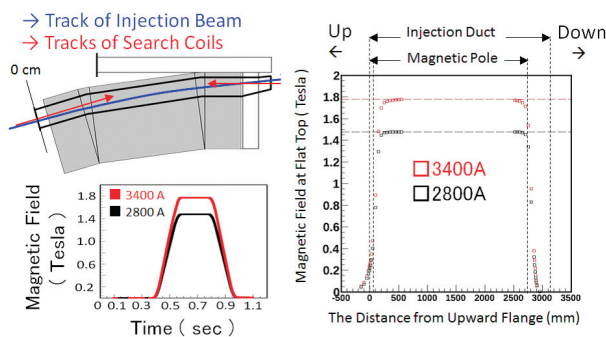


Figure 7: The measurements of the gap field along the injection duct, and its waveforms.

めフランジ面からダクト内へ 40 cm 付近から一定になってくる。出口付近では入口に比べて磁場の落方が大きい。これは新しく取り付けられた漏れ磁場対策用のフィールドクランプによる磁場遮蔽の結果である。

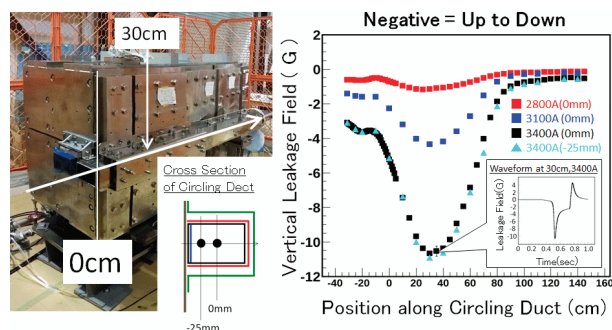


Figure 8: The measurements of the leakage field along the circling duct with inner and outer shields, and its waveform.

5.3.2 周回ビームラインへの漏れ磁場測定結果 上述した振動問題の対策としてセプタム板と押さえ板を変更した事をきっかけに周回ダクト周りの磁気遮蔽の見直しも行った。元の磁気遮蔽は周回ダクトの周りに SUY-1 製で厚さ 10 mm のコの字型遮蔽を設置する方法であったが、新たに 2 つの遮蔽を加えた。1 つは上記の遮蔽の外層に SUY-1 製の 730 mm \times 5mm のコの字型遮蔽を第二シールドとして設置した。もう 1 つは周回ダクト内のセプタム板側の面に SUY-1 製の長さ 770 mm \times 5 mm の板を内部シールドとして設置した。これらの追加シールドを設置した状態で周回ダクト内の磁場測定を行った。漏れ磁場測定にはガウスメータを用いた。周回ビームライン上に沿って周回ダクト内に設置した 2.2 m 長のアルミレール上をガウスメータのセンサーを移動させて測定した。漏れ磁場は時間波形も重要な要素なので波形を磁極内磁場測定と同様 SL1000 シリーズの AD 変換モジュールで記録した。ビーム方向に沿った測定位置として磁石の下流部末端部を 0 cm の基準位置として下流へ 17 cm の場所から上流部末端近くまでの範囲を測定した。測定磁場方向は周回ダクト断面に平行な 2 成分(垂直成分と水平成分)である。出力電流値は FT 部で 2,800 A、3,100 A、3,400 A の 3 通りで測定した。周回ダクト面内の測定位置はダクト中心、3,400 A

については中心からセプタム板方向に-25 mm 移動させた位置も測定した。測定された漏れ磁場の波形と位置分布を図8に示す。但し図には垂直成分の値のみ表示した。漏れ磁場は現行機と同様磁場の立上がりりと立下がり部で大きくなっている事が分かる。位置分布の値は立ち上がり部の最大値を用いた。2,800 A の場合は全ての位置で 1 Gauss 以下であり、最も漏れ磁場が大きい 30 cm の位置で約 1 Gauss であった。この値は磁極内磁場である 1.4 Tesla に対して $\sim 7 \times 10^{-5}$ であり要求の 10^{-4} 以下である。一方 3,100 A では最大 4 Gauss、3,400 A では最大 11 Gauss であり予想以上の漏れ磁場がある事を確認した。この結果から 2,800 A の時の BL 積は現行機の約 5×10^{-1} T·m に比べると数分の 1 に下がっている事が分かる。3,100 A や 3,400 A での漏れ磁場が予想以上の値であったが、それでも現行機の通常運転時の漏れ磁場と同じ程度であるため、新規機による漏れ磁場が現行機以上を軽減させる事に成功した事が確認された。

5.4 FT 部の電流値の平坦度評価

FT 部での電流の安定性や平坦度は 10^{-4} 以下を必要とする。今回 FT 部の電流値の平坦度評価を出力電流値のフィードバック用のモニターを用いて行った。電源の出力盤内に搭載されている DCCT の出力は制御盤内の AD 変換に入力される。平坦度は入力電流波形パターンと AD 変換された DCCT の出力波形の差である電流偏差を測定する事で評価した。この電流偏差はデジタル量で計算され後で DA 変換されて出力される。電流偏差はパターンのリファレンス波形と実波形の差を計算した値である。リファレンス波形の FT 部は完全に平坦であるため、FT 部での電流偏差の変化量が平坦度となる。FT 部での偏差の最大値と最小値の差は 0.07 A 程度であった。0.07 A は 3400 A に対して 2×10^{-5} である。このことから平坦度は 10^{-5} レベルに達している事を確認した。

5.5 消費電力の測定

最後に入射セプタム I の消費電力 (3 相 400 V ライン) の測定を行った。電流出力の繰り返し頻度は常に 0.5 Hz である。結果、出力電流の FT 部の電流値が 2,800 A 時は 3 本の AC400 V 線の電流値は全て約 125 A であった。FT の電流値が 3,400 A 時は 175 A であった。よって消費電力はそれぞれ 87 kW、121 kW である事を確認した。つまり 1 Hz 運転時の消費電力は 2,800 A、3,400 A 出力時でそれぞれ 174 kW、242 kW である。次に電磁石と電源それぞれの発熱量を測定または見積りを行った。電磁石コイルで発するジュール熱は電磁石への冷却水の往復路の水温度差で計算できる。測定の結果、2,800 A、3,400 A 出力時の発熱量はそれぞれ 64 kW、92 kW であった。電源の発熱量測定も同様に冷却水の温度差から計算した。結果 2,800 A、3,400 A 出力時の発熱量がそれぞれ 5 kW、6 kW 程度であった。空冷分の発熱量は設計値から計算し 2,800 A、3,400 A 出力時がそれぞれ 13 kW、16 kW であった。以上の結果から 0.5 Hz 運転での 2,800 A、3,400 A 出力時の消費電力の合計は 82 kW、114 kW であり電力測定結果と矛盾しない。新規電源の AC 受電盤の容量は 440 kVA であるので 3,400 A 出力の 1 Hz 運転にも十分対応している事を確認した。

6. MR トンネルへのインストール状況と今後

現在新規入射セプタム I のインストール準備を進めている。7 月中には現行機の電源と AC 受電トランスを第一電源棟から撤去した。残った通電試験項目としては磁極内磁場分布や FT 部の平坦度測定、パルス毎の磁場の安定性測定、漏れ磁場の最終評価を行う。MR へのインストールは 9 月下旬を予定している。

7. 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 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 MR 入射用高磁場セプタム電磁石の開発と動作試験についてまとめた。その中でセプタム板の振動量が大きかったために振動を抑える対策を行い漏れ磁場軽減のための磁気遮蔽を追加した。その結果、振動量の軽減に成功し、漏れ磁場も現行機より大きく軽減している事を確認した。磁極内磁場の測定も行ったが詳しい測定は 8 月下旬に行う。消費電力も繰り返し 1 Hz で 3,400 A 出力が十分可能である事も確認した。最終的な磁場測定、電流測定を 8 月下旬から 9 月上旬に予定し、9 月下旬には MR へのインストールを行う。

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>
- [3] 小特集 大強度陽子加速器施設 J-PARC 日本物理学会誌 Vol.66, No.1, 2011.
- [4] F. Naito 1GeV リニアック検討資料, PLA-93-1.1993/07/28.
- [5] K. Abe et al, Phy.Rev.Lett., 112(2014)061802.
- [6] T. Nakaya, hep-ex, arXiv:1507.08134v1.
- [7] A. Holin, hep-ex, arXiv:1507.08564v1.
- [8] R. Shingaki et al., Proc. of Symp. on Acc. Sci. and Tech, 2003.
- [9] K. Fan et al., Proc. of 1st IPAC, 2010.
- [10] K. Fan et al., Proc. of 5th IPAC, 2014.
- [11] T. Sugimoto et al., Proc. of 5th IPAC, 2014.
- [12] I. Sakai et al., Proc. of EPAC, 2006.
- [13] T. Sugimoto et al., Proc. of 9th PASJ, 2012.
- [14] S. Fukuoka et al., Proc. of 10th PASJ, 2013.
- [15] K. Fan et al., Proc. of 10th PASJ, 2013.
- [16] T. Sugimoto, Presentation in 11th PASJ, 2014.
- [17] T. Sugimoto, Presentation in 12th PASJ, 2014.