

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 (2) THE DEVELOPMENT OF NEW INJECTION SEPTUM MAGNET FOR UPGRATING OF J-PARC MR(2)

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

We are improving the Main Ring (MR) for beam power of 750 kW which is the first goal of J-PARC. The repetition period of the Fast eXtraction(FX) must be short to 1.3 sec from the current period of 2.48 sec for the improvement of the beam power. It is necessary to exchange a high field injection septum magnet which will be installed at the injection line from RCS to MR and its power supply, because the current injection septum system can not be operated with 1.3 sec repetition. Since confirmed the large leakage field around current circulating beam line of the injection magnet, we must improve the shielding structure which make low leakage field. We started the development of the new injection septum magnet and its power supply in 2013. It can operate with 1 Hz repetition and the low leakage field which its order is 10^{-4} of the gap field. The new Injection septum magnet and the new power supply were constructed in 2014. We had many improvement of the magnet and power supply. We will install the new injection septum magnet system in this summer. In this presentation, we will report the detail of the results of its performances.

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-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5,000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MRからNUへ8バケットを~5 μsecの間に出射する。一方HD運転の場合は3 sec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、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 sec(簡単に1 Hz化と呼ぶ)である。大電力の達成を目指すため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、特に交換を必要とする入射セプタム電磁石Iについて記述する。

2. MR用入射セプタム電磁石I

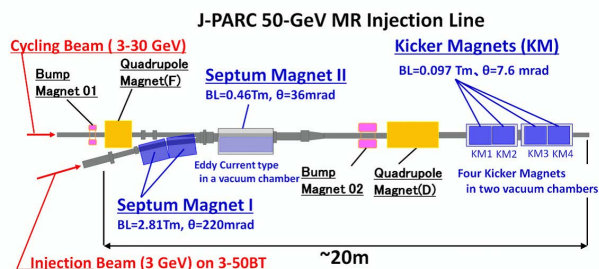


Figure 1: The layout of the Injection Magnets in 50 GeV Main Ring.

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

¹2015年10月に6 secから5.52 secに短縮した。

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 陽子ビームを注入するための電磁石である。入射セプタム電磁石 I は 1.44 T の強磁場により陽子ビームを 220 mrad (BL=2.81 T·m) 偏向させる高磁場セプタム型電磁石である。ここでは入射セプタム電磁石 I を単に入射セプタム I と呼ぶ。入射セプタム I の交換が必要理由は以下の通りである。出力インバータが 2 石 IGBT であるため負電圧を出力する事ができず立ち下がり時間に 1 sec かかる。最大出力電流 2900 A に対して現在 2800 A で運転しているため将来の運転方針の一つである 3.3 GeV ビーム入射に対応できない。電磁石は磁極長 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て構築している。磁極の隙間や終端部からの漏れ磁場が大きく大強度ビームに対しては更に軽減する必要がある [3]。ビームの大強度化に向けてビームダクトのアーチャーを大きくする必要がある。1 Hz 化とともに導体コイルの発熱量が大きくなり現行のホローコンダクタの寸法を変更する必要がある。そのため新電磁石への要求は 1 Hz 運転化、FT 部での磁場の安定性と平坦度が 10^{-4} 以下である事、ビームダクトのアーチャー拡大、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、3 GeV 以上のエネルギー入射も可能にする事である。我々は上記の条件を満たす新しい電源と電磁石を 2014 年に製作した [2]。2015 年夏までの試験ではセプタム板の振動量測定、周回ダクト内への漏れ磁場測定を行った。これらの結果、セプタム板の振動量は最大出力 3,400 A 時に 350 μm であった。漏れ磁場は 2800 A 出力時、最も高い位置で 1 Gauss 以下であるが、3400 A 出力時は 11 Gauss あった。3,400 A 時の値も現行機の漏れ磁場より小さい事を確認した [2]。しかし更なる漏れ磁場軽減を狙い周回ダクト内に純鉄 (SUY) シールドを試験的に導入した。数種類の SUY シールドを用いた結果、上面と底面、そしてセプタム板側に厚さ 5 mm の SUY 板を用いると漏れ磁場が大幅に軽減できる事が分かった [5]。

3. 真空ダクトの真空漏れと対策

入射セプタム I は 2015 年夏にインストールする予定であった。しかし 2015 年 7 月入射ダクトと周回ダクトに対する 1 枚の出射フランジを溶接した直後の真空引き試験で溶接部に大きな真空漏れが 2 箇所見つかった。真空漏れの原因は入射ダクトの構造にあったと考えている。図 2 に真空漏れ箇所と入射ダクトの外観図を示す。真空漏れを起こしたのは入射ダクト側の角の部分である。入射ダクトの出射部は出射フランジ面に対して斜めに取り付けられている。出射フランジ溶接はフランジとダクトの接触面を大気側からでなく真空側から行った。真空漏れ箇所を削ると僅かに溶接の一部にクラックが入っている事を確認しそのクラックが大気側と繋がっている事が分かった。このクラックは溶接で閉じる事なく真空側にも通じていた事も分かった。通常角ダクトは 4 枚の板を口型に溶接して製作するため四隅には必ず溶接という継ぎ目ができ、更にその継ぎ目の部分にフランジとの溶接部が重なるため継ぎ目の僅かなズレが真空リークに繋がったと推測した。2 箇所の真空漏れは再溶接によって修復する事ができ

たが、入射ダクトとフランジの接触する面の角はもう 2 箇所ある事からいづれ同じ真空漏れを起こす可能性は高く、更に通電による振動によって真空漏れを誘発する可能性も考えられた事から入射ダクトと出射フランジの再設計と製作を決定した。MR へのインストールは 1 年延期する事が決定された。

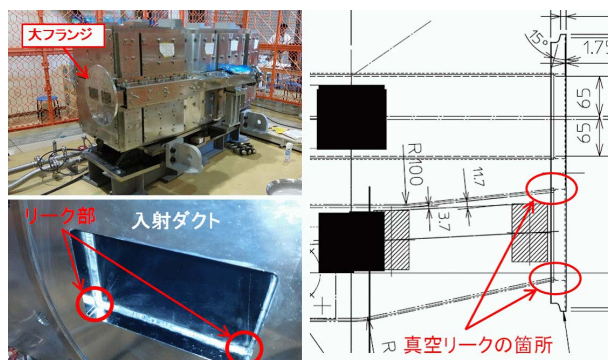


Figure 2: The vacuum leak points in the vacuum chamber.

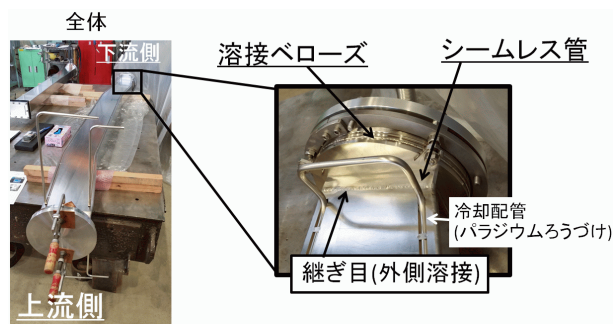


Figure 3: The photograph of the new injection beam duct.

新しい入射ダクトには幾つの変更を行った。まず最下流部には溶接ベローズを取り付けるように変更した。出射フランジと接続するのはダクトではなく溶接ベローズであり、斜め接触ではなく垂直入射に変更した。入射ダクトと溶接ベローズは斜め接触になるため間に SUS316L 製のシームレスダクトを使用し、入射ダクトと斜め接触するのはシームレスダクトになる²。シームレスダクトは 1 つの塊から角ダクトを削って製作するため継ぎ目がない。そのため真空リークを引き起こした角の構造的欠陥は解消される。またシームレスダクトとは大気側から溶接するためより真空リークが起りにくい。出射フランジとは溶接ベローズを直接真空側から溶接する事で接続する。接続面は角形ではなく溶接ベローズの円形である。詳細は後述するが入射ダクト表面の温度上昇を抑えるためにダクト表面に新しく冷却水配管を取り付けた。完成した入射ダクトの写真と下流部の拡大写真を図 3 に示す。周回ダクト側にも上下流両方にシームレスダクトを使用する。また漏れ磁場対策として周回ダクトの材質を SUS316L から純鉄 (SUY) に変更する事を決めた。SUY の周回ダクトの板厚は t5 mm であるためそれ自身が磁気シールドに

² 上流部の入射フランジとの間にもシームレスダクトを使用した。

なる。新しい入射ダクトと周回ダクトと出射フランジは2016年3月に完成し4月から6月にかけて交換された。出射フランジは7月に溶接された。真空リーク試験の結果リークはなかった。

4. セプタム板の振動量測定

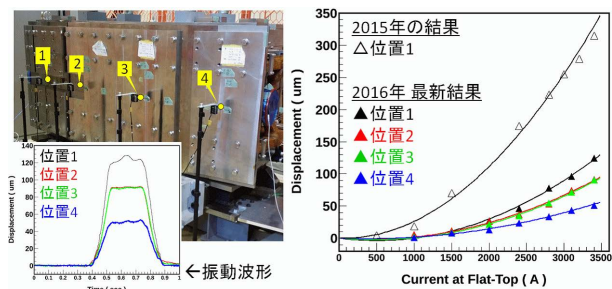


Figure 4: The measurements of oscillation of surface of the septum shields and its waveform.

振動の原因となる力はセプタムコイルとリターンコイルに流れる逆向きの大電流の間に働くローレンツ力であり、コイル同士が遠ざかる方向に力が働く。大きな振動量の原因は磁極内に設置されるセプタムコイル、入射ダクト、リターンコイルの位置精度、互いの間でできる僅かな隙間である。そのため新しい入射ダクトへの交換の際には位置の精度だけでなく隙間を極力無くしながら設置した。入射ダクトの交換後振動量はレーザー変位計³を用いて再び振動量を測定した。ビームラインの高さでビームラインに沿った振動量測定結果を図4に示す。振動量は昨年に比べて大幅に軽減している事が確認できた。最大振動量はビーム下流部のセプタム板表面で3,400 A出力で約120 μ mである。他の箇所も振動量は100 μ m以下である。セプタム板の振動で最も懸念される点はセプタム板自身の破壊である。そこで振動による金属疲労をANSYSを用いて解析した。解析のため3,400 A出力時の振動量の垂直方向に沿った位置依存性を測定し、測定結果を再現する様にセプタム板への入力荷重を決定した⁴その入力荷重と振動量が再現された磁極とセプタム板の構造モデルを用いてセプタム板への最大主応力を計算した。結果セプタム板への最大主応力は75.3 N/mm²であり、10⁷回の振動を行った時の疲労曲線の値⁵より十分低く破壊には至らないという事を確認した。以上によりセプタム板の振動は将来に渡り問題ないと結論付けた。

5. 磁極内磁場と出力電流測定

入射セプタムIの性能評価として磁極内磁場と周回ダクトへの漏れ磁場を測定した。磁極内磁場測定にはサーチコイル、漏れ磁場測定にはホール素子を用いた。サーチコイルは直径40 mm、縦10 mmの円形型の特殊石英

³キエンス製 CMOS レーザー振動計 IL-065(位値分解能 2 μ m、時間分解能 1 ms)

⁴計算された入力荷重は 1.2 MPa であった。単純計算によるローレンツ力は 2.3MPa であり 2 倍の差が生じる。但し計算に用いる磁場は磁極内磁場と同じ数値を使った。実際のコイル内部の磁場とは異なるのでローレンツ力が単純計算よりは小さくなると思われる。

⁵SUY で 320 N/mm²、SUS で 260 N/mm²

ガラスにツイスト状の導線⁶を約1,000巻したものを使用した⁷。漏れ磁場測定用ホール素子としてF.W.BELL製8030型3ch-3軸ガウスメータを用いた。8030型は磁場の時間変化を測定するためのアナログ出力があり磁場波形を直接測定する事ができる。サーチコイルとホール素子の信号波形の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 1MS/sec、16bit 絶縁 AD 変換モジュールを用いた。波形の保存時のサンプリングレートは 5 kS/sec⁸、保存時間は 1 sec に設定した。磁極内磁場で最も重要な測定量は平坦部(FlatTop;FT)での積分磁場と磁場、電流の安定性である。RCS からの 3 GeV 陽子ビームは FT 部の 200 msec の間に 40 msec 毎に 4 回入射される。4 回入射にかかる時間である 120 msec の間、磁場が大きく変化すると入射されるビーム毎に偏向角が異なりビーム軌道の調整が複雑になる。そのため積分磁場平坦性は主に 120 msec 幅での平坦度として評価する。また出力電流の設定が同じでも出力電流や出力磁場がショット毎に異なるとビーム軌道の調整がやはり難しくなる。出力電流と磁場のショット毎再現性や安定性は入射ビームの偏向を安定に行う上で非常に重要な要求である。FT 部での電流と磁場のショット毎の再現性と平坦度は 10⁻⁴ 以下を必要とする。

5.1 パターン波形の補正

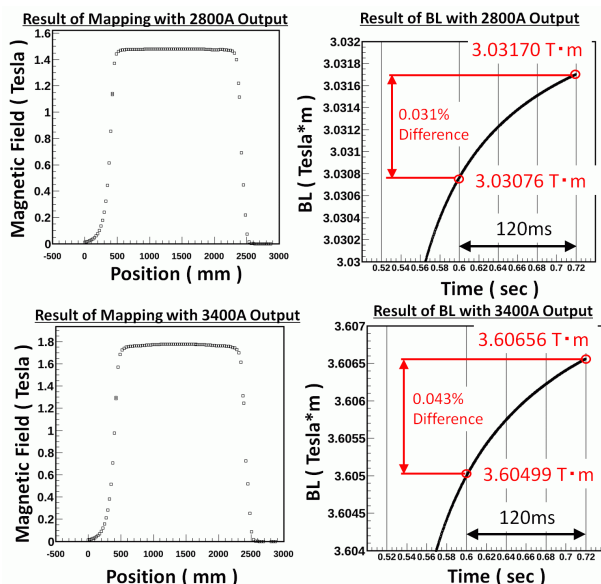


Figure 5: The results of the gap field(Left) and BL(Right).

まず積分磁場の平坦度について記述する。積分磁場は磁極内磁場をビーム軌道に沿って測定する事で計算する事ができる。入力パターン波形の FT 部は完全な平坦として入力されるが実際の磁場波形は入射ダクト表面の渦電流が作る磁場が加わり完全な平坦にはならない⁹。まず入力波形の FT 部が完全な平坦な場合でのビーム軌

⁶導線の直径は 0.1 mm

⁷石英ガラスを使用した理由は温度による熱膨張を軽減するため。

⁸時間分解能は 0.2 msec

⁹渦電流による磁場は印加される磁場を打ち消す方向に発生する。

道に沿った磁場分布とその積分磁場を測定した。出力 2,800 A と 3,400 A で測定した結果を図 5 に示す。ビーム入射開始時と終了時の積分磁場の差は $3\sim 4 \times 10^{-4}$ でありこれが平坦度になる。平坦度が要求値である 10^{-4} 以下には達していない事がわかる。そこで渦電流の影響を消すためにパターン波形に修正を入れて平坦度を改善させた。3,400 A 出力に対する修正前後の電流パターン波形と 2,500 A から 3400 A までの出力時の修正パターン波形を用いた積分磁場の結果を図 6 示す。修正パターンは FT 部開始直後に電流値を約 0.5% 上げ、その後は指数関数的に減少する波形である。積分磁場の波形図の縦軸は FT 部が終了する時間での積分磁場の値で規格化した。全ての結果で平坦度が 10^{-5} 台を満たしている事を確認した。

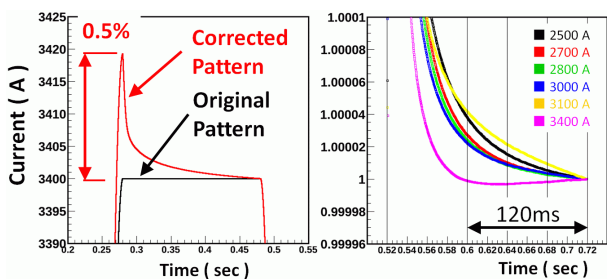


Figure 6: The normal and corrected pattern(Left) and results of BL with the corrected patterns(Right).

5.2 磁場位置依存性と積分磁場の評価

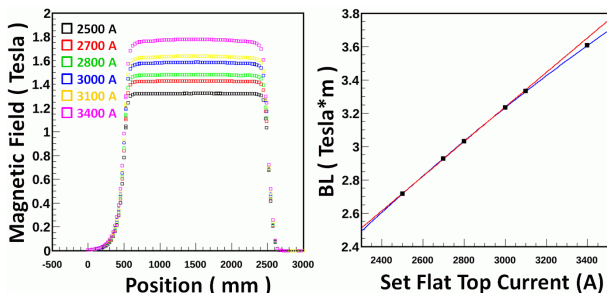


Figure 7: The Gap field(Left) and the correlation with BL and set flat top current(Right).

上述した修正パターン波形を用いてビーム軌道に沿った磁場分布の測定結果、積分磁場と設定電流値の関係を図 7 に示す。電流値 2,500A、3,400 A 出力時の磁極内磁場の最大値はそれぞれ 1.32 Tesla、1.78 Tesla であった。現行機の最大出力磁場は 1.47 Tesla であるため新入射セプタム I の出力範囲は現行機に対して十分広い事が確認できた。また新入射セプタム I の最大磁場は 1.77 Tesla を想定しているがその値も満たしている事も確認できた。積分磁場と電流値の相関に最初の 2 点を結んだ直線と 2 次曲線でフィットした線を重ねた。この関係を見ると 3,400 A の積分磁場は直線値よりも値が低い。これが電磁石の磁気特性であり、磁極が飽和に近づいている事を示す。他の点は直線上に近い値を持っているため入射セプタム I は良い磁気特性を持つ

ていると言える。現行機の入射セプタム I の積分磁場の設計値は 2.81 T·m である。新しい入射セプタム I で 2.81 T·m となる電流値は約 2,590 A であり現行機よりは低い電流値で同じ積分磁場を得る事ができる。この違いは主に磁極長の違いである。

5.3 磁場と電流のショット毎の再現性と安定性

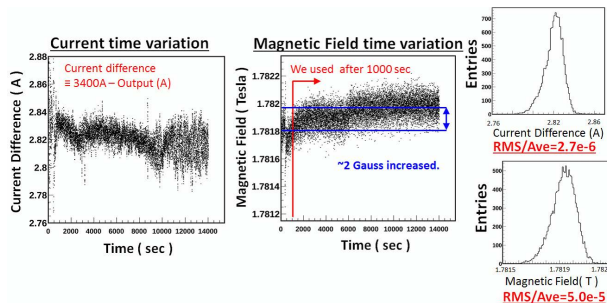


Figure 8: The reproducibility of Current and Gap Field.

次に出力磁場と電流値のショット毎の再現性と長時間安定性について記述する。電流測定は電源に組み込まれたフィードバック用の電流偏差モニターを用いた。電流偏差は設定電流値と出力電流値の差である。ショット毎の再現性を示す値として磁場または電流値の標準偏差と平均値の比を用いる。3,400 A 出力時 (1 Hz 運転) の結果を図 8 に示す。磁場の再現性は 5×10^{-5} であった。再現性としては十分な値である。電流の再現性も $\times 10^{-6}$ であり十分な値である。次に磁場は長時間経過後約 2 Gauss(変化率は 1×10^{-4}) 上昇している。この理由は真空ダクト内の温度がこの間約 9 度上昇しているためサーチコイルの導線が僅かに熱膨張する事でサーチコイルの面積が変化した結果と考えられる。電流値は長時間運中約 0.02 A 程度の変動があり、3400 A に対して 6×10^{-6} 程度である。磁場の再現性と安定性が電流値より 1 桁大きい原因は磁場の測定精度が原因であると考えている¹⁰。3,400 A 以外の出力でも再現性を確認した。その結果を表 1 にまとめる。全ての条件で磁場と電流の再現性が目標とした 10^{-4} 以下である事が確認された。

Table 1: The Results of Responsibility of (1) Gap Field (2) Output Current

Set Current	(1)	(2)
2700 A	3.8×10^{-5}	2.2×10^{-6}
2800 A	3.7×10^{-5}	2.5×10^{-6}
3100 A	3.4×10^{-5}	2.3×10^{-6}
3400 A	4.9×10^{-5}	2.7×10^{-6}

5.4 周回ビームラインへの漏れ磁場測定

SUY 製周回ダクトを用いて周回ビームライン上の漏れ磁場を測定した。周回ダクト内の漏れ磁場分布を広範囲に測定するためにガラスエポキシ製の 4.6 m 長のレー

¹⁰サーチコイルの精度は約 1×10^{-5} である

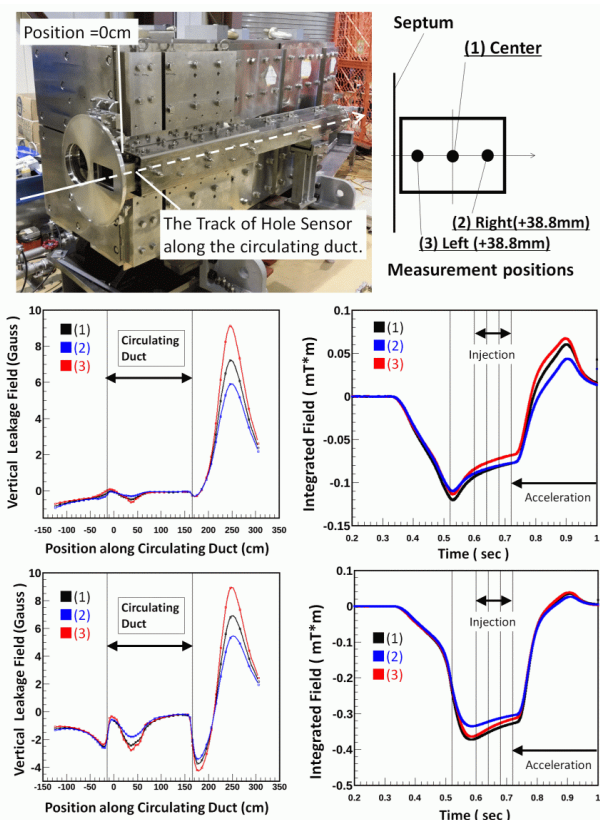


Figure 9: The leakage field and BL with 2800 A(Upper) and 3400 A(Lower), where the leakage field was calculated as average in injection time.

ルを製作した。台車に固定したホール素子をレールに沿って動かす事で漏れ磁場分布を測定し、積分磁場も計算する事ができる。測定範囲は周回ダクト入口から上流側に最大 1.4 m、出口から下流側に最大 1.1 m までである。測定軌道は周回ダクトの中心と中心から $\pm 38.8\text{mm}$ の位置をビーム軸方向に沿って測定した。2,800 A と 3,400 A 出力時のマッピング測定と積分磁場波形をそれぞれ図 9 に示す。ここで電磁石下流部末端部を 0 cm の基準位置とした。磁場は垂直成分でありビーム入射時間である 120 msec の平均値を示した。結果、2,800 A の場合周回ダクト内の漏れ磁場の最大値は中心軌道で -0.5 Gauss 程度であった。周回ダクト内の漏れ磁場はセプタム板に近い程値が高く、遠い方が値が低い傾向にあり、その差は 0.35 Gauss であった。周回ダクト上流側では約 9 Gauss 程度の大きな磁場が存在するがこの部分には遮蔽物がなく、電磁石コイルの磁場を直接観測した結果である。周回ダクト出口よりもビーム下流部には周回ダクト出口から 1 m 離れても 2,800 A でも -1 Gauss 程度残る事も分かった。積分磁場の範囲は -124 cm から +160 cm とし、周回ダクト上流部の磁場は含まなかった¹¹。結果 2,800 A で入射時間の積分磁場それぞれ -0.1 mT·m であった。加速時間でも 0.06 mT·m 程

¹¹ 周回ダクトの下流側には実際は真空ダクトが入るが SUS 製であるためシールド効果は小さいため、本解析では積分磁場に加えた。上流側は 50 cm 先には四重極電磁石が入り測定された磁場分布にはならないため本解析では積分磁場から外した。

度であった。この値は現行機より十分小さく漏れ磁場が軽減されている事を確認した。但し周回ダクト内での最大値は 3,400 A で -2.5 Gauss であり 2800 A の 0.5 Gauss に比べると大きい。この理由は 3,400 A ではセプタムシールドが磁気飽和し、漏れ磁場の効果が小さくなった結果であると考えている。ビーム入射時間の積分磁場は 0.4 mT·m であり、この値は現行機の通常運転時程度である。以上の結果から現行機の漏れ磁場よりも十分軽減した電磁石である事が確認できた。

6. 消費電力と発熱量の測定

Table 2: The Measurements of Consumption Power and Joule Heat of the Magnet

	2800 A		3400 A	
	0.5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	1 Hz
AC400V 電流値 (A)	125	236	175	347
入力電力 (kW)	87	163	121	240
発熱量 (1)(kW)	63	133	95	200
発熱量 (2)(kW)	70	-	98	201

最後に 0.5 Hz と 1 Hz 運転時の入射セプタム I の消費電力 (3 相 400 V ライン) と電磁石の発熱量についてまとめる。消費電力は入力 3 相 AC400 V の電流値をログスキー型電流変換器を用いて測定した。電磁石の発熱量は電磁石用冷却水の入力と出力の温度差を測定し計算した。出力電流 2,800 A と 3,400 A における各測定結果を表 2 に示す。ここで発熱量 (1)、(2) はそれぞれ電磁石コイルのみ、電磁石コイルと入射ダクト表面の合計の発熱量を示している。入射ダクトの発熱量は主に入射ダクト表面で発生する渦電流の寄与である。この発熱量は簡単な計算では 1 kW 程度であると予想しており矛盾しない。上述した 2,590 A 出力で 1 Hz 運転時の入力電力は上記の測定値から 140 kW と予想できる。2.48 sec 周期では 56 kW である。現行機の消費電力である約 100 kW 程度の半分程度の低電力化を実現した。

7. まとめと今後

新しい MR 入射用高磁場入射セプタム電磁石 I は 2015 年のインストール予定が真空ダクトの真空漏れにより 1 年延期になった。その後、新しい真空ダクトを製作した。出力磁場と電流のショット毎の再現性は十分要求を満たし磁場の平坦度や積分磁場も要求を満たした。漏れ磁場も現行機よりも十分軽減する事に成功した。消費電力も現行機より小さく繰り返し 1 Hz が可能である事も確認した。新しい入射セプタム I は 2016 年夏に MR ヘインストールする。

参考文献

- [1] J-PARC Home Page; <http://j-parc.jp/>
- [2] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2015.
- [3] K.Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2010.
- [4] K.Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2014.
- [5] T.Shibata *et al.*, Proc. of IPAC, 2016.