

J-PARC MR アップグレードのための新しい入射セプトム電磁石の開発 (3) THE DEVELOPMENT OF NEW INJECTION SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF J-PARC MR(3)

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

We are improving the Main Ring (MR) for beam power of 750 kW which is a first goal of J-PARC. The repetition period of the Fast eXtraction(FX) must be shortened to 1.3 sec from the current period of 2.48 sec for the improvement of the beam power. We must upgrade injection and extraction magnets and their power supplies for upgrading the beam power. In 2016 summer, we have finished the replacement of a high field injection septum magnet and its power supply. One of the main reason was that the previous injection septum system could not be operated with 1.3 sec repetition. The other thing was that we have confirmed the large leakage field around circulating beam line of the injection magnet, so we must reduce them. The new injection septum magnet and its power supply were produced in 2014. We started to conduct the test-operation of the power supply and measurement of the magnetic field in 2015, and finished in August 2016. We have started the beam operation with the new injection septum in October 2016. The converter units in the new power supply of the new injection septum were broken in October and November 2016 as initial trouble. The main source of the trouble was electric noise in the gate signal. After countermeasure, we have no trouble in the power supply. We have found that there is still small leakage field in the upstream line of the new injection septum. We have installed an additional magnetic shield to the new injection septum.

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¹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 μsecの間に射出する²。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³。NUへの供給ビーム電力は2017年2月に470 kWに達した⁴。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⁵。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

²MR周回リング1周分の時間

³HDへ2秒かける理由はHD内の2次粒子ビーム検出器の応答速度からの制限やHD用標的へのダメージを軽減するため。

⁴470 kWは平均電流値で15.7 μA。

⁵2010年MR運転開始時の繰り返し周期は3.52 sec。その後徐々に周期を短縮していった。

*tatsunobu.shibata@j-parc.jp

¹但しその後水銀標格納容器の故障により2017年7月の時点では約150 kWに落ちて運転している。2017年秋以降に新規製作中の水銀標格納容器を用いて500 kW以上への回復を目指している。

している。2016年夏にMR入射電磁石の一つ入射用セプタム電磁石1と電磁石用電源(新入射セプタム1)を1Hz対応の新電磁石と新電源に交換した。以下にMR用入射電磁石、特に新入射セプタム1について記述する。MR速い取り出し用電磁石については[2][3]を参照されたい。

2. 750 KW に向けた MR 用入射電磁石の改修

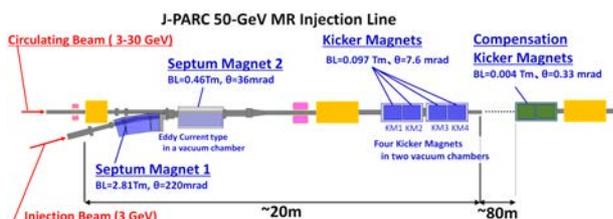


Figure 1: The layout of the Injection Magnets in 50 GeV Main Ring in 2017.

2017年7月時点でのMR用入射電磁石の配置図をFigure 1に示す。入射電磁石は120 msecの間にRCSからMRに8パケットの3 GeV陽子ビームを入射する⁶ための電磁石であり、2台のセプタム電磁石と5台のキッカー電磁石から構成されている。入射セプタム電磁石1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。入射セプタム電磁石2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んでいる。セプタム電磁石の下流には5台の集中定数型キッカー電磁石(キッカー電磁石)が設置されている。最初の4台のキッカー電磁石の出力磁場は全て同じ約0.04 T、偏向角の合計は7.6 mradである。5台目は先の4台の更に80 m程下流に設置されており、磁場は約0.01 T、偏向角は1桁小さい約0.3 mradである。他のキッカー電磁石と区別して補正キッカー電磁石と呼ぶ[4][5]。MRの目標ビーム電力である750 kWに増強するため入射電磁石も改修する必要がある。全ての改修は2019年度までに完了する事を目標としている。以下本研究の新入射セプタム電磁石1について記述する。

3. 新入射セプタム1

2005年に製作された最初の入射セプタム1(旧入射セプタム1)はMRの1 Hz化のために電源、電磁石共に交換する必要がある。交換理由の一つとして電源の1 Hz繰り返し不可能である点が挙げられる。旧電源の出力インバータは2石IGBTで構成されていたため負電圧制御ができず自然放電による立ち下がりに1 sec程度を要した⁷。そのため新電源は1 Hz繰り返しの運転が必要条件であった。旧電磁石は周回ビームライン

⁶40 msec 間隔で4回入射される。

⁷立ち下り時間は電磁石での自然放電に要する時定数で決まる。旧入射セプタム1の時定数は約0.2 sec。

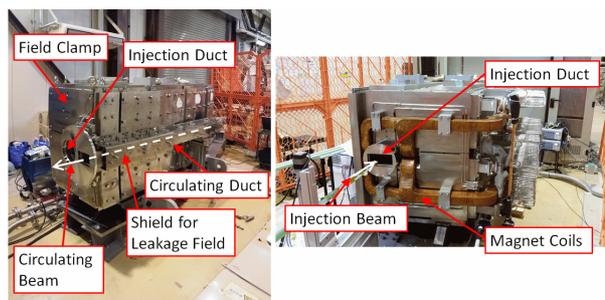


Figure 2: The final figure of the new injection septum magnet 1.

上への漏れ磁場が問題となっていた⁸。旧入射セプタム1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されていた。磁極の間隙、磁極端部のむき出しコイルから周回ライン上への漏れ磁場(10~20 Gauss)を軽減する必要があった[6]。その後シールドの追加を行ったが下流部には最後まで20 Gauss程度の漏れ磁場が残っていた[7]。またビームが大強度化するに従い空間電荷効果によるビームハローも大きくなるためビームダクトの口径を大きくする必要もあった。更に1 Hz化とともに導体コイルの発熱量が大きくなり旧入射セプタム1のホローコンダクタでは冷却能力が不足するため寸法を変更する必要があった。我々は上記の必要条件を全て満たす新電源と新電磁石を2014年に製作した[8]。2015年1月から2016年8月までJAEA施設内の陽子加速器開発棟にて動作試験及び磁場測定を行った。この試験で確認されたセプタム板の大きな振動とその軽減対策、漏れ磁場の更なる軽減を行った[8][9]。また2015年8月に発生したビームダクト用フランジ溶接における真空漏れに伴いビームダクトの再製作を実施した。Figure 2に新電磁石の写真を示す。磁極内磁場と漏れ磁場の測定結果、セプタム板の振動測定結果については[9]で報告した。その後追加測定した結果と解析の更新を行った最終結果を以下にまとめる。

4. 積分磁場測定の最終結果

4.1 磁極内磁場

磁極内積分磁場の測定結果について記述する。積分磁場は磁極内磁場をビーム軌道に沿ってマッピング測定する事で計算した。出力電流は2,300 Aから3,400 A(最大電流値)までの範囲で変化させた。測定結果をFigure 3に示す。左図が各電流値での磁場の位置分布、右図が積分磁場と電流の相関図である。電流値3,400 A出力時の磁極内磁場は1.78 Tであった。最大出力磁場が1.47 Tであった旧入射セプタム1に対して十分出力範囲が広い事を確認できた。積分磁場と電流値の相関図の低電流側の2点を結んだ直線(赤色)と全点を用いて2次曲線でフィットした線(青色)を重ねた。3,400 Aの積分磁場は直線値よりも値が低い。これは電磁石の磁極が磁気飽和に近づいている事を示す。設計積分磁場である

⁸漏れ磁場軽減の限界によって新しい電磁石の必要性は2010年には既に認識されていた。

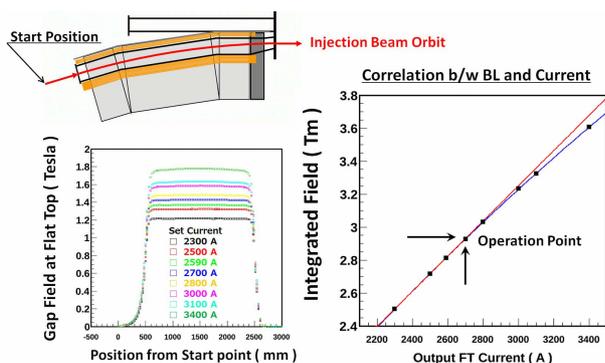


Figure 3: The Gap field(Left) and the correlation with BL and set flat top current(Right).

2.81 T·m になるビーム運転時の電流値をオペレーションポイントと呼び、旧入射セプタム1のオペレーションポイントは、2,780 A(1.44 T)であった。新入射セプタム1では約2,590 A(1.37 T)である事が分かった。旧入射セプタム1よりも低い電流値(磁場)で同じ積分磁場を得る事ができた。旧入射セプタム1との違いはまずは磁極長の違いである。旧入射セプタム1の磁極長は約1.8 mであったが新入射セプタム1は約2 mである。また磁極間距離も旧入射セプタム1が98 mm だったのに対して新入射セプタム1は96 mm であるため同じ電流値でも新入射セプタム1の方が2%程度高い磁場を得ることができる。

4.2 周回ビームラインへの漏れ磁場

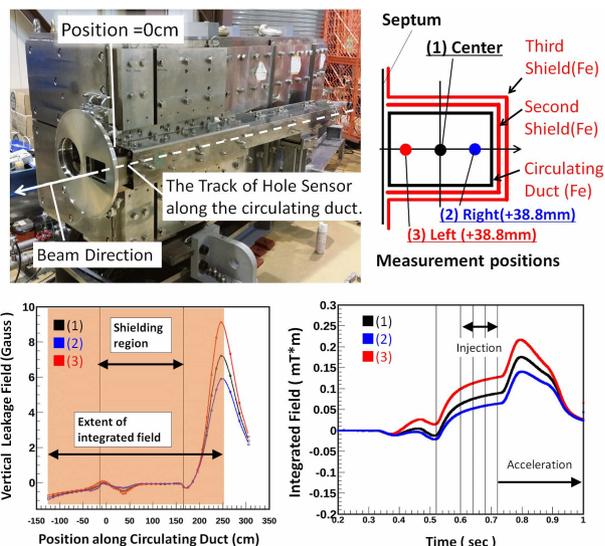


Figure 4: The vertical leakage field and its BL with 2,700 A, where the leakage field was measured as average during beam injection time. We did not include the region above +250 cm for calculation of the BL, because a QM is located at this position in the beam line.

新入射セプタム1用の周回ダクトの材質は磁気遮蔽の

ためSUYである。更に周回ダクトの周りに二重のSUYシールドを設置し、計三重遮蔽構造にした (Figure 4の右上)。周回ダクト内部含む周回ラインに沿った漏れ磁場測定を行い積分磁場を計算した。測定は周回ダクトを含む4.3 m長の範囲で行った (Figure 4の左上)。測定軌道は周回ダクトの中心と中心から±38.8mmの位置をビーム軸方向に沿って測定した。Figure 4に出力電流2,700 A時のマッピング測定(左下)と積分磁場の時間波形(右下)を示す。ここで電磁石下流部末端部を0 cmの基準位置とした。図中の磁場は垂直成分でありビーム入射時間である120 msec間の平均値を示している。また下から上向きの磁場が正成分とした。旧入射セプタム1で問題になっていた下流部に見られた20 Gaussの漏れ磁場は新入射セプタム1には見られない。これは下流部のコイルを磁気遮蔽用のフィールドクランプで覆った効果である [8]。一方、周回ダクトより上流部では中心軌道上に約7 Gaussの磁場が存在する事が分かった。この部分の磁場は電磁石入射部である上流部のむき出しコイルが作る磁場を直接観測した結果であると推測している。この磁場成分は旧入射セプタム1でも見られた。積分磁場を計算するにあたり積分範囲はFigure 4(左下)のカラー領域である-124 cmから+250 cmとした⁹。結果、入射時間の積分磁場が0.1 mT·m程度であった。加速時間内では0.2 mT·m程度であった。加速時間内の積分磁場は主に上流部の磁場の影響である。以上の結果はオペレーションポイントよりも4%程高い電流値での結果であるが既に旧入射セプタム1に比べて漏れ磁場が軽減した事を確認した。

5. 新電源と新電磁石のMRへのインストールと動作試験

新入射セプタム1のMRへのインストールと動作確認は2016年8月から10月にかけて行われた。新電磁石はMRトンネルの旧入射セプタム1の場所に、新電源はMR第1電源棟にインストールされた。インストールされた新電磁石と新電源の写真をFigure 5に示す。

5.1 新電磁石の動作試験

ビームラインにインストールする前に新電磁石の試験通電を行い出力電流2,300Aでの磁極内磁場を測定した。測定された磁場を2016年8月に測定した同じ2,300Aでの測定値と比較した結果、平坦部で2.4 Gaussの差がある事が分かった。この差の原因は測定位置の僅かな違いと電源側から見た負荷の違いによるものと推測できる。電源と電磁石間の出力ケーブル長と本数はインストール前の試験では1本当たり約12 m長の325 sqのケーブルを8本使用した(P側4本の並列、N側4本の並列)。一方MRトンネル内では1本当たり約200 m長の250 sqのケーブルを12本使用している(P側6本の並列、N側6本の並列)。そのため時定数が変化しているため電流の立ち上がりに変化し、平坦部の磁場の形状が変化したと考えた。この結果を踏まえて

⁹周回ダクトの下流側には実際に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く本解析では積分磁場に加えた。一方+250 cmよりも上流部にはビーム収束用の四極電磁石(QM)が存在しているため事実上磁場は考慮しなくてよいと判断し積分磁場の範囲から外した。



Figure 5: The new injection magnet 1 which were installed to the beam line in MR (Upper). The new power supply of the injection magnet 1 which were installed to MR power supply building (Lower).

新電源の出力ゲインの再調整を行い、出力波形の再調整を行った。新電磁石のインストールは無事に終了し動作も特に問題は生じなかった。

5.2 新電源の初期不良

新電源はインストール直後の動作確認からビーム運転開始後暫くは初期不良による故障が発生した。MR 第1電源棟で新電源の整備が終了し通電試験を開始した直後、12台あるコンバータユニット¹⁰の1台が故障した。確認した結果、コンバータユニットを構成する3台のIGBTユニットの1台が故障した事が判明した。故障箇所は入力、出力ラインのヒューズ、数台のIGBT、IGBTゲート信号線のP側のG-E間抵抗そして1枚のゲート基板であった。この故障箇所からIGBTのPN短絡¹¹故障が発生したと推測した。その後故障したIGBTユニットを抜き取り11台のコンバータユニット体制での運転に切り替えた。12台あるコンバータユニットは特に1sec周期、3,400Aを最大出力としたときの仕様であるため2.48sec周期での2,590A出力に対しては11台でも十分対応できると判断し、夏季停止期間終了後のビーム運転再開時にはコンバータユニット11台体制で開始した。しかしビーム運転再開の1週間後、再びコンバータユニット中の1台のIGBTユニットがPN短絡による故障が発生した。故障原因を調査した結果、制御盤内のコンバータ制御基板で生成されるゲートパルス信号に信号レベル以上の電圧を持ったスパイクノ

¹⁰AC150V から DC480V へ昇圧する。

¹¹アーム短絡とも言う。

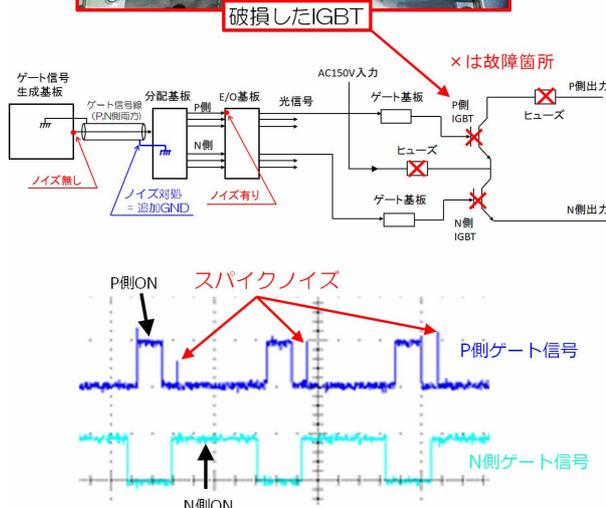


Figure 6: The broken IGBT unit and the source of the accident.

イズが発生している事を確認した。具体的にはゲート信号生成基板からのTTL信号がゲートパルス分配基板を経由してE/O変換に伝送された直後の信号にスパイクノイズが発生していた。確認されたのはP側用ゲート信号のみでN側のゲート信号にはノイズは確認されなかった。観測されたスパイクノイズはP側のIGBTが本来OFF、N側のIGBTがONになっている瞬間に発生していたため、スパイクノイズによるP側ONとN側ONによるPN短絡の可能性を確認できた。一方コンバータ制御基板からの出力直後の信号にはスパイクノイズは観測されなかった。この事からスパイクノイズはコンバータ制御基板とE/O変換の信号線に乗った電氣的ノイズと推測した。そこで分配基板側のゲート信号線用シールドを制御盤筐体のGNDに落とす事でノイズ除去に成功した。その後PN短絡によるIGBTユニットの故障は発生せず、2017年7月の夏季停止まで安定運転を維持できた。そのため2017年の夏季停止期間にコンバータユニット12台体制への復旧を計画している。

6. 漏れ磁場による周回ビームへの影響評価

新入射セブタム1を使用したビーム運転は2016年10月24日から開始された。2017年7月時点でのオペレーションポイントは2,598.1Aである¹²。試験でのオペレーションポイントの推測値は2,590Aであったためその差は10A(0.38%)であった。入射セブタム1で重要な点は漏れ磁場による周回ビームへの影響である。周回ビームへの影響をビーム水平方向の位置を測定する

¹²積分磁場は2.83T·mであり偏向角にして222mradであった。

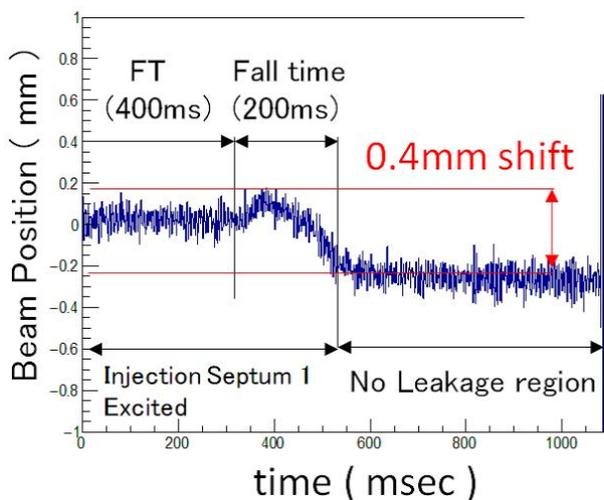


Figure 7: The shift of the beam position along the horizontal direction which was measured with BPM due to the leakage field of the injection septum.

事で評価した。今回新入射セプタム1に最も近い上流側のビーム位置モニター (BPM)1 台を使用した。BPMで測定したビーム水平位置の時間変化を Figure 7 に示す。横軸は時間、縦軸はビーム位置を表している。ビームの周回時間は1周当たり約 $5 \mu\text{sec}$ であるので周回する度にビームの位置がどう変化しているかを示している。新入射セプタム1の励磁磁場の平坦部では 0 mm の位置であった。一方励磁時間以降のビーム位置は -0.2 mm であった。つまり立ち下りの時間帯でビーム位置が約 0.4 mm 変化した事が分かる。この変化量に相当する積分磁場を SAD を使用して解析した結果約 $2.5 \text{ Gauss}\cdot\text{m}$ であった。漏れ磁場測定結果から立ち下がり時間帯の積分磁場は約 $2 \text{ Gauss}\cdot\text{m}$ であった事から両者に矛盾がない事がわかる。この変化量はすぐに問題になる変位ではない。MR 用の入射電磁石の中で最も積分磁場が小さい補正キッカー電磁石の $40 \text{ Gauss}\cdot\text{m}$ の 20 分の 1 程度である。しかし漏れ磁場の源の一つが入射側のコイルからの磁場であると推測しているため、この漏れ磁場を遮蔽する磁気遮蔽板の設置を計画した。

7. 新入射セプタム1への追加磁気遮蔽

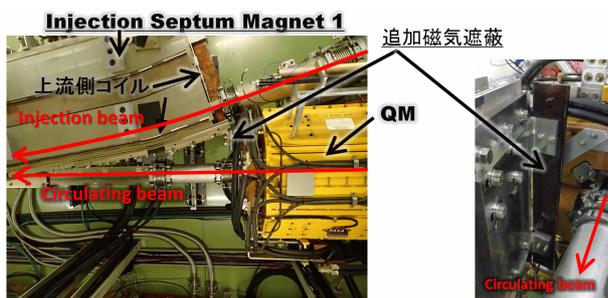


Figure 8: The additional shield have been installed to the injection septum 1.

追加磁気遮蔽体は上流部のコイルが作る磁場が周回ビームラインへ回り込む事を防ぐ目的で設置する。但し新入射セプタム1が作る漏れ磁場は遮蔽する必要があるがすぐ上流側に設置されているQMからの漏れ磁場を遮蔽する事はできない。QMの積分磁場が約 0.1% 以上変化するとビーム状態に影響が出る。遮蔽が必要な領域でのQMの漏れ磁場による積分磁場は全積分磁場の約 0.3% である。追加磁気遮蔽によるQMの漏れ磁場軽減率は 30% 以下である。そのため追加遮蔽体はビームダクトを覆うような構造ではなく Figure 8 の上図の箇所を設置する必要があった。しかし設置空間が狭いため大きな構造体を挿入する事ができないため形状は板状にした。漏れ磁場はビームラインの高さ付近だけでなく上下からの周り込みもあるため追加遮蔽体の垂直方向の長さは磁極の高さの分だけ必要であった。シミュレーションによる計算により遮蔽体はSUY製の厚さ 13 mm に決まった。磁気遮蔽体の製作は2017年6月から開始され2017年7月に完成した。完成した磁気遮蔽体はすぐ設置された。設置した追加磁気遮蔽体の写真を Figure 8 に示す。7月20日磁気遮蔽効果の評価のため入射セプタム1のみ通電し、漏れ磁場測定を行った。現在測定された磁気遮蔽体設置後の漏れ磁場の結果を解析中である。

8. まとめ

新入射セプタム1のインストールは2016年夏に完了した。新入射セプタム1は旧型よりも高い磁場を得る事ができ、更に小さい磁場でビーム運転に対応できる事ができた。また漏れ磁場も旧入射セプタム1よりも軽減している事を確認した。新入射セプタム1の漏れ磁場によるビーム位置の変動を調べた結果、ビームに僅かな変位を作っている事が分かったが大きな問題には至らない事も確認した。しかし漏れ磁場の源は理解しているため更なる漏れ磁場削減のための追加磁気遮蔽板を試験的に導入し、漏れ磁場測定を行った。現在測定磁場の解析中である。新電源はコンバータユニット故障という初期不良が発生したが、ノイズ対策を行った事で故障の再発を防止する事ができ、2017年7月まで安定して稼働した。

参考文献

- [1] J-PARC Home Page, <http://j-parc.jp/>
- [2] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p1204-1205.
- [3] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017.
- [4] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p1337-1339.
- [5] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p1209-1213.
- [6] K.Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2010, p295-297.
- [7] K.Fan *et al.*, Proc. of IPAC, 2014, p2097-2099.
- [8] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2015, p115-119.
- [9] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p115-119.