

# J-PARC MR 新入射セプタム 1 の追加磁気シールドによる漏れ磁場軽減 THE REDUCTION OF THE LEAKAGE FIELD OF THE NEW INJECTION SEPTUM MAGNET 1 BY USING A NEW MAGNETIC SHIELD IN MR J-PARC

芝田達伸<sup>\*A)</sup>、松本教之<sup>A)</sup>、石井恒次<sup>A)</sup>、杉本拓也<sup>A)</sup>、松本浩<sup>A)</sup>

Tatsunobu Shibata<sup>\*A)</sup>, Noriyuki Matsumoto<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Takuya Sugimoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

## Abstract

An injection septum magnet (InjSep1) was installed in MR in 2016 for one of the upgrading of beam power of MR. We have measured the leakage field before installation, and it was found from the measurement results that the leakage field at the beam upstream region of the circulating duct was enough smaller than previous InjSep1, however we tried to reduce the leakage field further by installation a new magnetic shield. First magnetic shield was produced in 2017, and we installed it in the InjSep1. The leakage field was reduced, however the magnetic field of a quadrupole magnet at beam upstream of the InjSep1 was also reduced slightly. The decrease of the magnetic field of the one of main magnet was not permitted from the requirement of beam optics. In consequently, the first version was failed. The second one was produced in 2018, and we measured the leakage field was measured in Jan. 2019. The leakage field was reduced, while no reduction of the quadrupole magnet. We decided to use the second version for beam operation. The new additional shield was started to use in Nov. 2019.

## 1. J-PARC

大強度陽子加速器施設 J-PARC は 400 MeV-LINAC(LI)、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]。RCS は LI で生成された 400 MeV の負水素イオンビームを陽子ビームに変換し 3 GeV のエネルギーに加速した後 MLF または MR に出射する繰り返し周期が 40 ms の陽子シンクロトロンである。MLF への供給ビームパワーは 2020 年 6 月の時点で約 600 kW に達し、設計値である 1 MW に向けて強度を増強している。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 に出射する陽子シンクロトロンである。NU 運転時の MR の繰り返し周期は 2.48 s である。NU 運転の場合 MR から NU へ 8 バケットを約 5  $\mu$ s の間に射出する。これを速い取り出し (Fast eXtraction;FX) と呼ぶ。NU への最大供給ビームパワーは現在約 510 kW である。ビームパワーの設計値である 750 kW [2] を達成するために 2022 年度から繰り返し周期を 1.3 s に短縮した運転を開始する予定である [3,4](1 Hz 化と呼ぶ)。更に次期目標の 1.3 MW 出力達成のために繰り返し周期を 1.16 s に短縮する計画である。MR 入射用電磁石の内、高磁場セプタム電磁石と入射キッカー電磁石もアップグレードが必要である。入射キッカー電磁石についてはパルス電源の改造 [5]、インピーダンス整合用抵抗の改造 [6]、入射キッカー電磁石の出力電流に含まれる反射波による磁場によって影響を受ける周回ビームの軌道を補正する補正キッカーの新

規導入が挙げられる [7,8]。高磁場セプタム電磁石については電源と電磁石両方ともに交換が必要であり、新しい高磁場セプタム電磁石システムが 2016 年に導入された [9]。2020 年 8 月現在 MR 入射用電磁石で改造中の機器は入射キッカー電磁石のインピーダンス整合用抵抗である。これまで何度も改修されてきた抵抗であるが、1.3 MW に向けた更なる高い耐熱性を必要とする抵抗の開発を進めている [10]。以下入射用高磁場セプタム電磁石について記述する。

## 2. MR 入射用セプタム電磁石 1

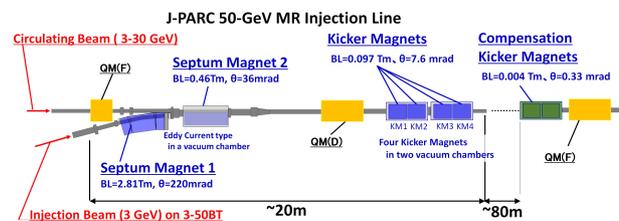


Figure 1: The schematics of the injection magnets group in MR.

MR 用入射セプタム電磁石は RCS から出射されたエネルギー 3 GeV の陽子ビームが 3-50BT というビーム輸送経路を通して MR の周回軌道に正確に入るために必要な偏向電磁石である。入射セプタム電磁石は 2 台あり、ビーム上流方向から高磁場セプタム電磁石 1 台、低磁場セプタム 1 台で構成されている。入射セプタム電磁石の下流部に入射キッカー電磁石と補正キッカー電磁石が設置されている (Fig. 1)。入射用高磁場セプタム電磁石を入射セプタム 1 と呼んでいる。初代入射セプタム 1 は

\* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

2005年に製作され2008年のMR運転開始時から使用していたが1 Hz化のため電源と電磁石本体両方を交換する必要があった。電源交換の理由は仕様上1 Hz運転が不可能であった事である。電磁石交換の主な理由は周回ラインへの漏れ磁場が大きくこれ以上の軽減が現状では不可能であった事と大強度化するビームに対してビームダクトのアーチャーを大きくする必要があった事である。新しい入射セプタム1は2014年に製作され、JAEA構内の陽子加速器開発棟で2016年8月まで試験運転を行い、同年秋にMRのビームラインにインストールされた[9]。Figure 2にMRにインストールされる前の新入射セプタム1の写真を示す。そして2016年10月末からのビーム運転での使用開始以降現在に至るまで、最初の1ヵ月間に発生した初期不良によるコンバータユニットの故障事象[9]以外では特に大きな問題は発生しておらず非常に安定した運転を続けている。新入射セプタム1はMRの1.3 MW運転の条件である1.16 s周期の運転にも十分対応できる。

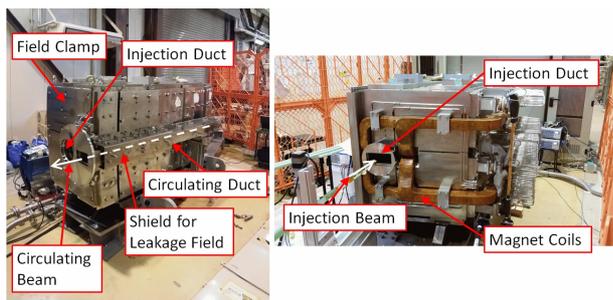


Figure 2: The new Septum Magnet I which was installed in 2016.

### 3. 漏れ磁場軽減対策 (2015年～2016年)

新入射セプタム1では周回ビームラインへの漏れ磁場を軽減するための幾つかの手段を取った。1つはビーム下流部側コイル端部を強磁性体である珪素鋼板を積層した構造のフィールドクランプ(FC)を取り付けた事である(Fig. 2(左))。FCによってコイルから直接発生する磁場を吸収し、周回ライン上への漏れ磁場を軽減することができる。他には周回ダクトへの磁気遮蔽の追加である。2014年に電磁石を製作した時点では周回ダクトの材質はSUS316Lであった。SUS製の周回ダクトの周りには漏れ磁場を軽減するために5 mm厚の純鉄製のカバーシールドが設置されていたが、1つのカバーシールドのみでは漏れ磁場の軽減率が不十分であると判断し、周回ダクトとカバーシールドの間と周回ダクト内部側面にそれぞれに純鉄製のシールドを追加設置した[11]。前者を外部シールド1、後者を内部シールドと呼び、カバーシールドを外部シールド2と呼ぶ。3つの磁気シールドを搭載した状態で周回ビーム軸に沿って周回ダクト内の漏れ磁場の位置分布を測定した。フラットトップ(FT)の電流値は2,800 A、3,100 A、3,400 Aの3通りで行った。2,800 Aは初代入射セプタム1のビーム運転時の出力電流値、3,400 Aは新入射セプタム1用電源の最大電流値である。その結果、2,800 Aでは測定範囲全体で1 Gauss

以下であったが3,100 A以上では急激に漏れ磁場が上昇し、3,400 Aでは11 Gauss程度になり、初代入射セプタム1の漏れ磁場程度になる事が分かり、ビーム運転時の電流値では大きな漏れ磁場ではないが最大電流値になると漏れ磁場が問題になる事が懸念された。一方、周回ダクト出口からビーム下流方向に沿った漏れ磁場は数 Gauss程度になっており、FCによって漏れ磁場を良く軽減している事を確認できた[11]。次に周回ダクト内の漏れ磁場を軽減するために内部シールドの形状の最適化を行った。漏れ磁場は主に垂直成分が寄与している事が分かったので、側面だけでなく天板も追加した内部シールドが最も軽減率が高かった。最も軽減率が高い内部シールドを使用した場合、3,400 Aの印加電流での漏れ磁場が最大でも~3 Gauss程度に軽減できた[12]。内部シールドを使用した場合、漏れ磁場軽減ができる一方で周回ダクトのアーチャーを小さくする問題もあった。そこで2016年9月、内部シールドを使用せず、材質に純鉄を使用した新しい周回ダクトを製作する事が決定された[9]。

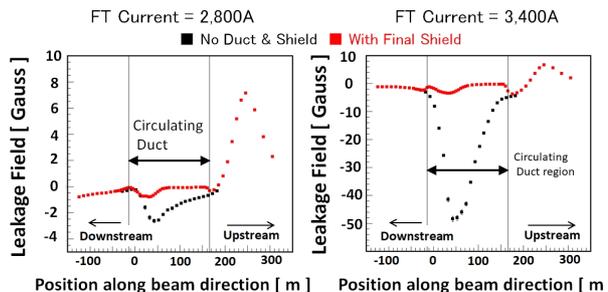


Figure 3: The measured longitudinal distribution of the leakage field with and without magnetic shield.

純鉄製の新周回ダクトは2016年3月に完成した。新しい周回ダクトの厚さはt5 mmであり、充分磁気遮蔽の効果がある。2016年7月純鉄製周回ダクト、外部シールド1、2全て設置しない状態での周回ライン上の漏れ磁場を測定した。FTの電流値は2,800 Aと3,400 Aの2通りで測定した。その結果をFig. 3に示す。漏れ磁場は高い場所でそれぞれ~3 Gauss、~50 Gaussであった。磁極内磁場はそれぞれ1.48 T、1.77 Tであるので、漏れ磁場の磁極内磁場に対する割合は $\sim 2 \times 10^{-4}$ 、 $\sim 3 \times 10^{-3}$ であった。特に3,000 Aを超える場合はセプタムコイルとセプタム板だけでは十分に漏れ磁場を軽減できない事を確認した。そして純鉄製周回ダクト、外部シールド1,2を搭載した状態での漏れ磁場測定を行った結果、周回ダクト内部とビーム下流方向の周回ダクト外部の領域では印加電流が3,400 Aの時でも2.5 Gauss以下であった。これは磁極内磁場の $1.4 \times 10^{-4}$ である。2,800 Aの場合では1 Gauss以下であったため $7 \times 10^{-5}$ 以下である[9]。初代入射セプタム1での同じ場所での漏れ磁場の最大値は約20 Gaussであったので大幅な軽減に成功したと言える。純鉄製周回ダクトやFCによって周回ダクト内と入射ダクトとの合流地点付近の漏れ磁場は十分軽減できたが、周回ダクトからビーム上流方向の領域には最大9 Gauss程度の磁場が存在している事が分かる。この領

域は電磁石上流側のコイル端部が作る磁場が直接観測されていると推測できる。初代入射セプタム 1 も同じ領域に漏れ磁場が存在し、その大きさは 10~20 Gauss であったので新入射セプタム 1 ではこの領域の漏れ磁場も軽減した。また積分磁場の時間発展を見ると、入射時間だけでなく加速開始から 200 ms の間にも積分磁場が大きくなる事が分かった。積分磁場の値は最大でも 0.2 mT·m であり、入射補正キッカー電磁石の 1/10 程度であった。

2016 年 12 月、MR のビームラインにインストールされた新入射セプタム 1 の漏れ磁場が周回ビームに与える影響を調べた [9]。新入射セプタム 1 のオペレーションポイントは ~2,600 A である。この時の入射ラインの積分磁場は 2.82 T·m である。調査方法はビーム入射後から入射セプタム 1 に近い 1 台のビーム位置モニター (BPM) で測定される周回ビームの水平位置の時間変動を調べる事である。陽子ビームは MR を約 5  $\mu$ s で 1 周するため位置は数百周の平均値を用いた。入射セプタム 1 の励磁磁場の平坦部でのビーム位置を 0 mm としたとき、立下り時間の間に約 0.4 mm 位置が変化した事を確認した。0.4 mm の変動量に相当する積分磁場を SAD を使用して解析した結果、約 0.25 mT·m であり漏れ磁場測定結果と一致した。初代入射セプタム 1 でも同じ調査を行っており、その時の結果は約 3 mT·m であった [13]。この結果から新入射セプタム 1 による漏れ磁場は 1/10 に軽減できた事を示した。今回得られた漏れ磁場の影響は周回ビーム調整に深刻な影響を与える事はない、しかし周回ライン上に存在する約 10 Gauss の漏れ磁場は入射セプタム 1 の上流側のコイル端部 (Fig. 2) が源である事は明確であるため、その軽減対策を行う余地があると判断し、更なる漏れ磁場軽減を目指した。電磁石下流部と同様上流側のコイル端部を全て覆う FC のような遮蔽体は設置空間の不足から現実的でないだけでない。よって漏れ磁場を軽減する手段としてはコイル端部から周回ラインへの磁場の回り込みを防ぐ事である。但し周回ダクトを磁気遮蔽体で覆うという最も簡単な方法を採用する事はできない。問題の周回ダクトはすぐ上流部の QM に直結しており、この周回ダクト内の磁場には QM からの漏れ磁場成分も含まれているからである (Fig. 1)。周回ビームの軌道調整は QM の漏れ磁場も考慮されているため、QM の漏れ磁場の軽減はビーム調整に大きな影響を与えることになる。QM の漏れ磁場による積分磁場を QM の磁極面からの距離で 200 mm~400 mm の範囲で計算すると磁極内半長分の積分磁場の約 0.3% になる。QM の積分磁場の許容軽減率は 0.1% であるが [14]、つまり漏れ磁場は 30% 程度の軽減が可能である。入射セプタム 1 の約 10 Gauss の漏れ磁場が存在する場所は QM の磁極面から約 200 mm の位置であり、この位置の周回ダクトを磁気遮蔽体で覆う事は許容軽減率を大きく超える事になる。

#### 4. 2017 年の漏れ磁場軽減試験

追加シールドの設置が可能な場所は限定される。上流部の QM は入射セプタム 1 のセプタム板に非常に接近しておりその隙間は僅か数 cm 程度である。その隙間に純鉄製の磁気遮蔽を設置する構造をシミュレーション [15] を使って設計した。その結果、形状は厚さ 13 mm、高

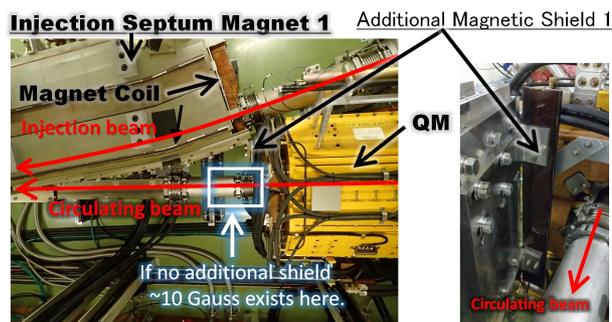


Figure 4: The additional magnetic shield 1 which was mounted on the injection septum 1.

さ 980 mm の純鉄製の板状に決まり、設置位置は周回ダクトからコイル端部を直視できる場所であり、QM の磁極面に平行に設置した。追加シールド板は入射セプタム 1 のセプタム板に共締めする事で固定する構造にした。これを追加シールド 1 と呼び、2017 年 7 月に製作された。製作した追加シールド 1 の漏れ磁場軽減効果の試験を 7 月から 10 月に行った。試験内容は入射セプタム 1 の漏れ磁場、QM の漏れ磁場を追加シールド 1 の有無で比較する事である。磁場の測定は F.W.BELL 製のガウスメータ 8030 型を用いた。まず入射セプタム 1 の漏れ磁場測定を行った。測定位置は漏れ磁場が最も大きく見える箇所として周回ダクトの通路方向にビーム中心から同径方向に約 160 mm の位置で QM の磁極面から 18 cm、38 cm、82 cm の 3 点を測定した (Fig. 5)。入射セプタム 1 の電流パターンはビーム運転時と同じに設定した。FT 電流値は 2598 A、立ち上がり時間と FT 時間幅、立下り時間は全てに 200 ms である。漏れ磁場測定の結果を Fig. 5 に示す。18 cm と 38 cm の位置ではともにシールド有りの方が無しの時の 30% 程度にまで軽減している事がわかる。この追加シールドによる漏れ磁場の軽減効果は十分ある事が確認できた。82 cm の位置ではほとんど変化していない。この理由は磁場波形から分かるように漏れ磁場の主成分は渦電流による磁場であり、磁極から漏れてくる成分であるため、追加シールドによる軽減効果がない箇所であるからと推測できる。次に QM の漏れ磁場を測定した。測定箇所は周回ダクト上部、通路側側面と内側側面を各 3 点ずつである。QM の磁極面からの距離は 18 cm、25 cm、39 cm である。QM の磁場方向はダクト上部では水平方向、ダクト側面では垂直方向が主成分になる。測定結果を Fig. 6 に示す。ダクト上部での測定結果を見ると、18 cm でシールド有りの方が 6~7% 低い事が分かる。ダクト内側側面の結果はシールド有無で大きな差がない事はなかった。ダクト通路側側面では 18 cm の位置で 8%、25 cm の位置で 33%、39 cm の位置では 41% 小さくなっている事が分かる。追加シールドに最も近い通路側側面の位置が最も影響を受けている事が確認できた。反対に内側側面は追加シールドから最も遠い位置であるためその影響が小さい事も確認できた。この測定結果から QM の全積分磁場のロス量を計算した結果、0.3% 程度軽減すると予想された。この値は予想よりも大きく、許容軽減率と同程度であった。また通路側側面と内側側面で非対称な磁場が形

成される事もビーム調整に影響を与えると考えられる。以上の理由からこの追加シールドをビーム運転時に使用する事はできないと判断した。

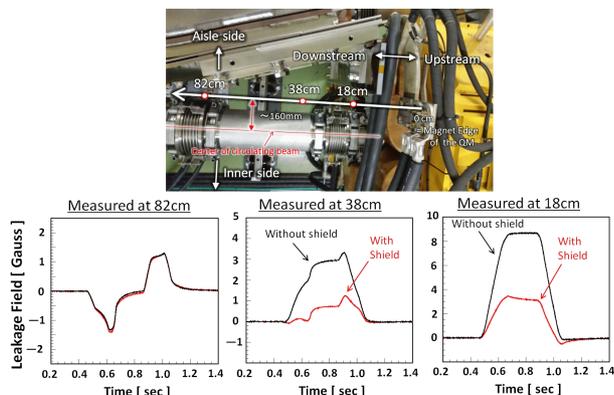


Figure 5: The leakage field of the injection septum 1 with and without the additional shield 1 measured in 2017.

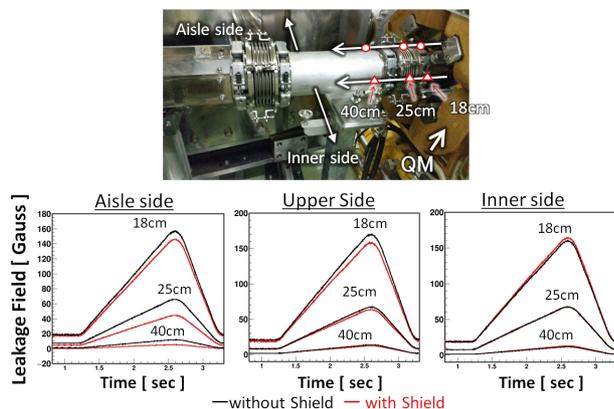


Figure 6: The leakage field of the Quadrupole magnet with and without the additional shield 1 measured in 2017.

## 5. 漏れ磁場軽減対策 2019 年

QM の漏れ磁場を許容軽減率程度まで軽減させた原因は追加シールド 1 が QM の磁極前方に位置し、周回ダクトから見て QM のコイルの一部が隠れる構造になっていた事であると判断した。そこで次の追加シールドとしては入射セプタム 1 の上流側コイル端部から周回ダクトまでの経路上に位置し、入射セプタム 1 のセプタムコイルに平行に設置する事で QM のコイルを隠さない構造を考案した。この新しいシールドを追加シールド 2 と呼ぶ。追加シールド 2 も追加シールド 1 と同様で純鉄製の板状シールドである。面積は 600 mm×110 mm、厚さは 20 mm で追加シールド 1 よりも厚く製作した。上下部には接近している QM のコイル間との放電を避けるためテーパになっている箇所を作った。追加シールド 1 は入射セプタム 1 のセプタム板に固定したが、追加シールド 2 は入射セプタム 1 の磁極上流部端面に治具を取り付け、その治具と結合する事で固定した。磁気遮蔽効果が

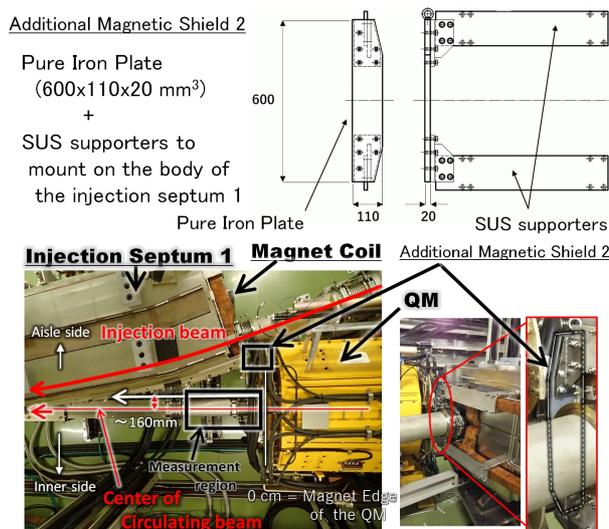


Figure 7: The second version of the additional shield.

ある箇所は純鉄の板状のみで、それ以外の治具類は全て SUS 製である。追加シールド 2 の設計と漏れ磁場軽減効果はシミュレーションを用いて検討を重ねた。そして追加シールド 2 は 2018 年 12 月に完成し、2019 年 1 月に入射セプタム 1 に試験的に搭載し、漏れ磁場測定を行った。Figure 7 に追加シールド 2 の図と搭載された状態の写真を示す。追加シールド 1 の時と同様、入射セプタム 1 と QM それぞれの単独通電を行い、それぞれの漏れ磁場を測定した。測定位置は周回ダクトの上部面は磁極面から 9 cm、30 cm の位置を 2 ヶ所、通路側側面と内側側面はそれぞれ磁極面から 20.5 cm、33 cm、52.5 cm の 3 ヶ所ずつを測定した。入射セプタム 1 の漏れ磁場の結果を Fig. 8 に示す。QM の磁極面から 20.5 cm と 33 cm の距離では両方ともにシールド付きの方が漏れ磁場が低く、52.5 cm の位置では元々漏れ磁場低い事もあり大きな差はない。この結果から追加シールド 1 と同様の 30% 程度まで漏れ磁場が軽減した事を確認できた。今回の漏れ磁場測定には汎用性のホール素子を用いた。測定精度は ~0.1%、信号レベルの揺らぎは pk-pk で ~1 Gauss である。ガウスメータ 8030 型に比べると精度が劣るため得られた磁場波形の揺らぎが大きい。次に QM の漏れ磁場測定の結果を Fig. 9 に示す。周回ダクト内側の 20.5 cm の測定結果では追加シールド 2 有りで 5 Gauss 程度磁場低くなっているがこれは追加シールド 2 を設置する際に一度測定位置で固定されていたホール素子が外れてしまい、取り付け直したが位置の再現性が不十分だった事が原因と考えられる。それ以外の測定点では追加シールド 2 の有無で変化がなく同じ磁場を得る事ができた。以上の結果から追加シールド 2 によって QM の漏れ磁場には影響を与えないで入射セプタム 1 の漏れ磁場のみを軽減できる磁気遮蔽体としてビーム運転にも使用できると判断した。

2019 年 4 月に追加シールド 2 を取り付けた状態で入射セプタム 1 の連続通電試験を行い、発熱箇所の有無や追加シールド 2 の振動等を確認した。その結果、特に問題なるような発熱や振動は確認されなかった。追加シールド

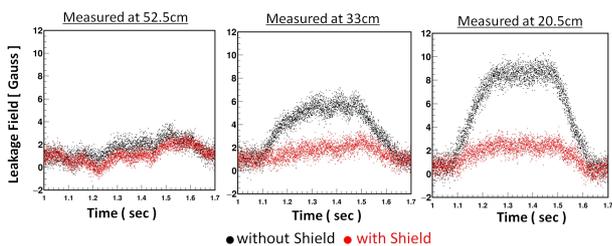


Figure 8: The leakage field of the injection septum 1 with and without the additional shield 2 measured in 2019.

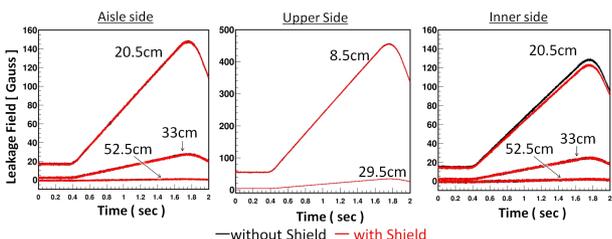


Figure 9: The leakage field of the Quadrupole magnet with and without the additional shield 2 measured in 2019.

ルド 2 は 2019 年の 5 月に最終設置された。

## 6. ビームへの影響の検証

追加シールド 2 を設置した状態でのビーム運転は 2019 年 11 月から開始された。11 月 4 日に入射セプタム 1 の漏れ磁場軽減効果を MR の陽子ビームを使って検証した。検証方法は前回と同様周回ビームの位置をビーム位置モニターで測定し、その時間変動を測定する事である。測定されたビームの位置の時間変化を Fig. 10 に示す。この結果、前は漏れ磁場によって  $\sim 0.4$  mm の位置変化が見られたが、今回は  $\sim 0.25$  mm の変化であった。よって追加シールド 2 によってビームへの影響が小さくなった事を確認できた。初代入射セプタム 1 の漏れ磁場によるビームの位置変化量は  $\sim 5$  mm だったので、新入射セプタム 1 と追加シールドを用いた漏れ磁場の影響は初代入射セプタムの約 1/20 程度に軽減できた。将来的にも大強度ビームの調整をより容易にする方向に変わると期待できる。

## 7. まとめ

2016 年秋に導入された新入射セプタム 1 には漏れ磁場をより軽減する工夫が加えられた。電磁石の下流側磁極端部への FC の導入、純鉄製の周回ダクトの導入、2 重の純鉄製シールドによって漏れ磁場は初代入射セプタム 1 の 1/10 程度に軽減する事に成功した。更に追加シールドを加え、上流部に設置された QM の漏れ磁場を軽減する事なく、入射セプタム 1 の漏れ磁場のみを更に 1/3 程度に軽減する事ができた。2019 年 11 月、追加シールドを設置した状態で MR の周回ビームを用いてビーム位置の時間変動を検証した。結果、追加シールドの設置前に比べてビームへの影響が約 37% 軽減し、初代入射セプタム 1 の時の 1/20 程度の影響に軽減できた。この追加

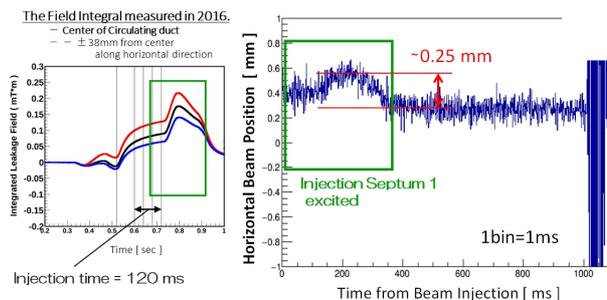


Figure 10: The shift of the 3 GeV circulating beam along the horizontal direction which was measured with beam position monitor due to the leakage field of the injection septum 1.

シールドの導入を持って入射セプタム 1 は完成したと言える。

## 謝辞

J-PARC MR のビームコミッショニンググループの方々には漏れ磁場の影響が与えるビームへの影響の解析をして頂き、感謝致します。

## 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.Sugimoto *et al.*, Proc. of IPAC, 2014, p526-528.
- [6] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of IPAC, 2013, p669-671.
- [7] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p1337-1339.
- [8] T.Sugimoto *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p1209-1213.
- [9] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017, p68-72.
- [10] T.Sugimoto, Proc. of PASJ, 2019, p998-1002.
- [11] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2015, p115-119.
- [12] T.Shibata *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p1337-1339.
- [13] K.FAN *et al.*, Proc. of PASJ, 2013, p54-57.
- [14] S.Igarashi, private communication, 2017.
- [15] <https://operafea.com/operafea-3d-static-electromagnetics-module/>