

J-PARC MR アップグレードのための速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石 (3) THE NEW HIGH-FIELD SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF FAST EXTRACTION IN MR J-PARC(3)

芝田達伸 ^{*A)}、岩田宗磨 ^{A)}、松本教之 ^{A)}、石井恒次 ^{A)}、杉本拓也 ^{A)}、松本浩 ^{A)}

Tatsunobu Shibata^{*A)}, Soma Iwata^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Koji Ishii^{A)}, Takuya Sugimoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

Abstract

Upgrading the beam-power of the J-PARC Main Ring to 750 kW is underway by reducing the cycle from 2.48 s to 1.3 s. Required upgrade of the four High Field (HF) Septa will be completed in 2021. The operation test of a new HF SM31 was conducted in 2020. First was 1 Hz operation test. The power supply had no problem in the operation, and the joule heating at the magnet coil was lower than limit. We found a good linearity between the current and the gap field which has no saturation. The field integral in the magnet gap was measured to calculate the appropriate current for beam operation, and we found it was 3,400 A. We compared the gap field of the neutrino side with that of the beam abort side. The magnitude of gap field had no significant discrepancy larger than its measurement accuracy. On the other hand, the field structure along the beam direction had obvious difference. The end-fringe field was measured and we found large leakage field still existed around the end-fringes. We plan to product an additional magnetic shield which will be mounted in the circulating beam duct. The two large flanges to the new SM31 were weld without any problem in Nov. 2020, and the construction of the new SM31 was finished. All of the HF Septa will be installed in MR in early of 2022.

1. J-PARC

大強度陽子加速器施設 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 [1]。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。現在 (2021 年 8 月時点)、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 バケット全てを約 5 μ s の間に射出する。この手法を速い取り出し (Fast eXtraction; FX) と呼ぶ。現在 NU への供給ビームパワーの最大値は 2020 年に達した 510 kW である [2]。ビームパワーの設計値である 750 kW [3] 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 [4,5](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 の入射用電磁石と FX 用電磁石も 1 Hz 化と 1.3 MW 対応のためのアップグレードを進めており、2021 年度末に完了する予定である。FX 用電磁石は陽子ビームを NU 1 次ビームラインまたはビームアボートダンプ (ABT) ラインに振り分ける電磁石である [6]。これらのアップグレードの内容はキッカー電磁石用電源の改修と低磁場、高磁場セプタム電磁石の交換である。以下 FX 用高磁場 (High-Field; HF) セプタム電磁石 (HF セプタム) のアップグレードについて記述する。

2. FX 用高磁場セプタム電磁石

FX 用 HF セプタムは 4 セットあり全てが約 1 T の磁場を発生させる大気圧中で使用する常伝導電磁石である。ビーム上流方向からそれぞれ SM30、SM31、SM32、SM33 と呼んでいる (Fig. 1)。SM30 と SM31 は両極性型セプタム電磁石である。両極性型は 1 つのコアの中に左右対称に設置した 2 つのコイルを直列接続する事で互いに逆向きで同じ大きさの磁場を作る事ができる。両極性型は周回ビームと 2 つの取り出しビームラインが近い場合に有効である。SM32 と SM33 は取り出しビームラインと周回ビームラインの距離が十分に取れた位置にあるため通常の片極性型セプタム電磁石であり、NU と ABT への取り出し用の 2 台を 1 セットとして使用している。電磁石用電源からの出力電流はパターン波形である。現在の主なパターン波形は全幅約 1.5 s、フラットボトム (FB) からフラットトップ (FT) までの立ち上がり時間は MR のビーム加速時間と同じ 1.4 s である。HF セプタム電磁石のアップグレードは新規の電磁石に交換する事である。交換理由は主に次の 3 点である。1 点目はビーム上流部に設置されている四重極電磁石 (QM) の大型化に伴う HF セプタムビームライン長の短縮化が必要である事。2 点目は高繰り返しによって取り出し用ビームダクト表面に発生する渦電流による発熱量が増加する事への対策としてビームダクトの素材を現行のステンレス製からセラミックス製に変更する事。3 点目はビームが大強度化する事で増大するビームハローのロスによる放射化を軽減するため周回ビームダクトのアパーチャーを拡大する事である。SM33 については現行の SM32 と SM33 を再利用して新 SM33 を構築する。但しビームダクトについては、NU 用、ABT 用、周回ライン用全て新規製作品に置き換える。一方、HF セプタム用電源は

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

全て現行機を使用する。新しい SM30、SM31、SM32 は 2015 年に製作され、2018 年から通電試験を順番に実施した。通電試験の主な目的は 1 Hz 運転の確認と磁極内磁場と周回ライン上の漏れ磁場測定である。まず 2018 年、2019 年に新 SM30 の通電試験を行った [7,8]。2020 年には新 SM31 の通電試験を行った。以下新 SM31 の通電試験の詳細について記述する。

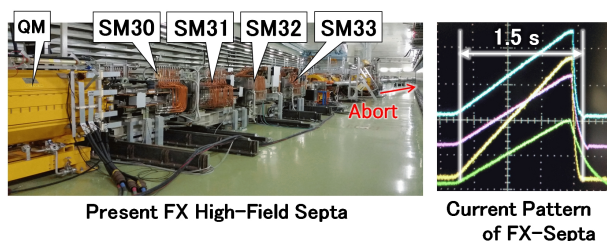


Figure 1: The photographs of the present FX HF Septa, and their output current patterns.

3. 新 SM31 の通電試験

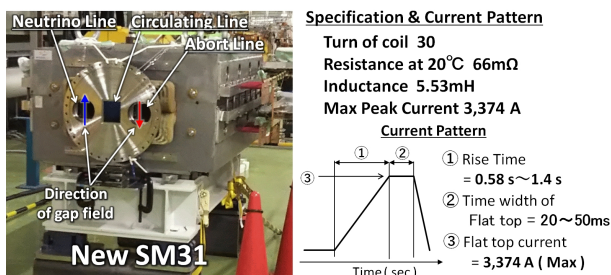


Figure 2: The photograph of the new SM31 (left). The specification and the output pattern current (right).

新 SM31 の通電試験を 2020 年 9 月から 11 月にかけて行った。通電試験の目的は高繰返し運転の確認、磁極内磁場と周回ビームライン上への漏れ磁場の測定である。使用する電源は現行機 SM31 用の電源であるため、通電試験は新 SM30 と同様 MR トンネル内で行った。Figure 2 に新 SM31 の写真とスペック、印加するパターン電流波形を示す。

2019 年に行った新 SM30 の通電試験の結果を踏まえて幾つか工夫をした点を挙げる。まず磁極端部コイルを強磁性体である純鉄で覆う事で磁極端部から周回ビームラインに入り込む磁場を遮蔽するフィールドクランプ (FC) を本試験前に設計、製作を進めた事で FC を装着した状態で通電試験を開始する事ができた。次は磁場測定に対する工夫点である。磁場測定に使用した磁気センサーは新 SM30 の磁場測定に使用した物と同じホール素子を使用したガウスメータである。ガウスメータを使用して磁場測定を行う際に注意しなければならない事が 4 点ある。1 点目は磁気センサーの出力信号に含まれる磁場に換算して約 30 Gauss のオフセット電圧である。このオフセット電圧は時間とともに変化するため磁場測定の前後で記録する必要がある [8]。但し通電中電磁石

コイルには常時約 400 A の FB 電流が流れるためオフセット電圧は通電の前後で測定する。2 点目は磁気センサーが持つ温度特性である。磁気センサーはホール素子であるため温度上昇と共に抵抗が高くなり出力信号レベルも下がる傾向がある。そこで 2020 年 6 月に磁気センサーの温度係数を測定した。その結果、 $-0.053\%/^{\circ}\text{C}$ の温度係数を持っている事が分かった。温度はガウスメータのプロブに内蔵された温度センサーで測定できるため、磁場測定中にも常に温度特性による真値からのずれを補正する事ができる。3 点目は磁気センサーの回転である。プロブは円筒形をしており、回転方向への校正が必要である。新 SM30 の磁場測定では回転方向の校正を行わなかったが、新 SM31 の磁場測定では別に用意した 0.2 T の C 型永久磁石を用いて回転の校正を行った。垂直成分が約 1984 Gauss に対して水平成分が数 Gauss になるように回転方向を調整した。

3.1 高繰返し試験

本高繰返し試験では 1 Hz 試験として 1.32 s、1.28 s、1.16 s 周期の試験運転を行った。高繰返し試験で確認すべき点は電磁石コイルの発熱量である。発熱量の評価は電磁石コイルとして使用しているホローコンダクタ内を流れる冷却水の温度上昇で評価した。FB 電流値は 408 A で固定し、FT の電流値は 3,400 A と 3,600 A の 2 通りで試験を行った。Figure 3 に 3,600 A の 1.16 s 周期の電流波形を示す。3,400 A での結果、1.32 s、1.28 s、1.16 s 各周期でのコイル内の冷却水の上昇温度は全て約 11°C であった。3,600 A での結果、全ての周期で約 13°C であった。パターン電流の実効値から計算した上昇温度は 3,400 A、3,600 A それぞれ 11°C 、 13°C であったため、計算値と実測は良く一致した。ホローコンダクタの限界上昇温度である 20°C に比べても小さいため発熱量に問題がない事を確認した。現行機電源も問題なく稼働する事を確認した。Table 1 に 3,400 A、3,600 A での各周期の電流パターンの立ち上がり時間 (Rise Time; RT) と冷却水の温度上昇 (ΔT) をまとめる。

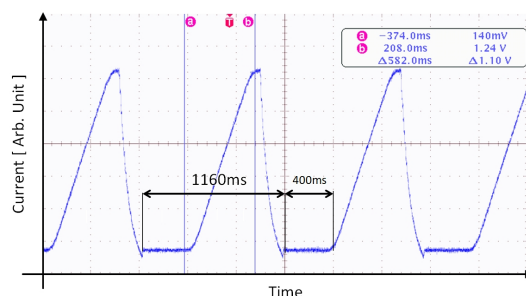


Figure 3: The waveform of output current of 3,600 A at 1.16 s cycle.

3.2 電流値と磁極内磁場の線形性確認

印加される電流値と NU 側の磁極内磁場との線形性を FT 電流 861 A から 3,368 A の範囲で確認した。Figure 4 に各電流値での磁場波形、設定電流値と磁極内磁場の相関図を示す。高磁場領域でも磁場は飽和する事なく良い

Table 1: Setting and Results of the 1 Hz Operation

FT Current (A)	Cycle (s)	RT (ms)	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
3,400	1.32	700	~ 11
3,400	1.28	650	~ 11
3,400	1.16	580	~ 11
3,600	1.32	700	~ 13
3,600	1.28	650	~ 13
3,600	1.16	580	~ 13

線形性を保っている事が確認できた。直線フィッティングした結果、その傾きは 3.472 ± 0.004 であり 設計値である 3.501 に比べて 0.8% 小さかった。原因の 1 つに磁極間距離が設計よりも大きくなっている事が考えられるが、設計値が 107.7 mm に対してずれを説明するための値は 108.6 mm である。0.9 mm の差はアラインメント精度から見ても非常に大きく、磁極間距離の違いが原因である可能性は低い。次は設定電流値と実電流値の差であるが、3,300 A 設定時の設定値と実電流値の差が測定によって 0.01% である事が確認され、実電流との差が原因である可能性も低い。他の原因としては磁場測定方法である。線形性確認を行った時はまだ温度補正や磁気センサーの回転方向の校正を開始していなかったために測定結果にずれが生じた可能性を考えている。

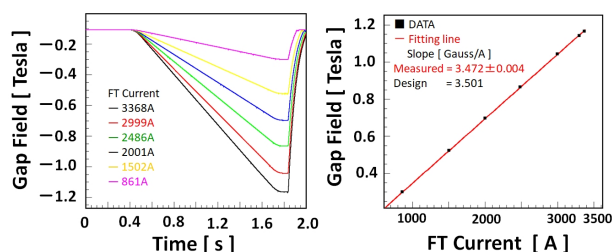


Figure 4: The waveform of gap field on the NU line (left), and the correlation with current and gap field (right).

3.3 磁極内磁場測定

磁極内磁場測定の目的は積分磁場 (BL) を測定しビーム運転に必要な電流値を決定する事、BL の水平方向に沿った一様性の測定を行う事、そして NU 側と ABT 側の磁場の対称性を評価する事である。ビーム軸方向に沿ったマッピング測定のため新 SM30 の磁場測定で用いたマッピング装置と同じ基本構造の装置を用いた。磁気センサーの位置も同じく ± 0.5 mm の測定精度を持つレーザー距離計を使って測定した。使用したガウスメータは 3 軸方向同時測定が可能であるため垂直成分と水平成分を測定しベクトル和を計算し、解析を行った。

BL の結果について記述する。BL は NU 側の磁極内磁場のみで評価した。FT 電流を 3,300 A で固定し、FT 電流での磁場を用いて計算した。NU 側のビームダクト中心を ± 0 mm として水平方向に沿って ± 36 mm の範囲で測定した結果を Fig. 5 に示す。中心位置での BL は約 1.746 T-m であった。ビーム運転で想定している新

SM31 の BL は 1.808 T-m であるので [7]、約 3.6% 低い事が分かる。この事からビーム運転に必要な FT 電流値は約 3,400 A である事が分かった。水平方向に沿った BL を測定した結果、セプタムコイル方向で上昇する構造となっており多極成分を持っている事がわかった。BL の高低差は約 0.4% であり曲げ角に換算して ~ 0.07 mrad であった。この値は現行機の NU への取り出しビーム軌道の微調整程度の数値であるため小さい値ではない。但し 30 GeV での取り出しビームサイズが約 40 mm [9] であるため、 ± 20 mm の範囲に限定すると BL の高低差は約 0.3% であり、曲げ角で約 0.05 mrad でなり際立って大きな値ではなくなる。

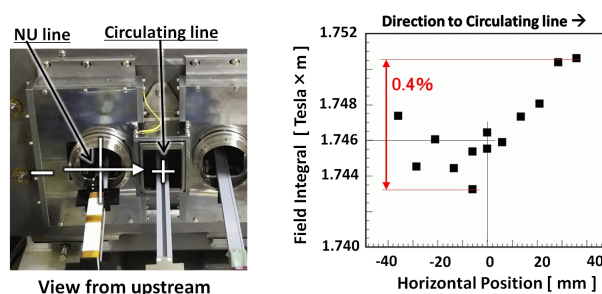


Figure 5: The view of the new SM31 from beam upstream (left), and the transverse distribution of the BL in the NU line (right).

次に NU 側と ABT 側の磁場の対称性の評価結果について記述する。NU 側と ABT 側は対称な構造であるため同じ電流値に対して理想的には同じ絶対値の磁場を発生する。新 SM30 では NU 側と ABT 側の磁場は時間変動を用いて比較した [8]。その結果、NU 側と ABT 側の磁場は一致する結果を得る事ができたが、同じ NU 側での再現性の結果、 ~ 7 Gauss 程度の不一致が見られた [8]。原因としては当時は温度補正、磁気センサーの回転等の不定性が挙げられる。そのため新 SM31 の磁場測定では不定性を無くするためセンサー温度の常時測定、センサーの回転方向の校正を徹底した。また磁気センサーの正極と負極での感度に差が生じている可能性を考慮し、NU 側、ABT 側の磁場が両方正極出力になるように回転方向を校正した。Figure 6 に FT 電流が 3,300 A と 3,400 A での NU 側と ABT 側のビーム軸方向に沿った磁極内磁場分布の比較結果を示す。磁場は絶対値で表示した。3,300 A では NU 側の磁場が高く、3,400 A の場合は ABT 側の磁場が高い。その差は約 10 Gauss ($\sim 0.1\%$) 程度であった。これは磁気センサーの測定精度が原因であると考えられる。線形性確認で得られた傾きの誤差は 0.12% であった。フィッティングの数値と実測値の差は最大 0.4% であった。また磁気センサーの確度は 0.25% である。つまり NU 側と ABT 側でセンサーの測定精度以上の顕著な差は出ていないと判断できる。一方、磁場の構造は明らかに異なっている。NU 側はビーム上流方向に近づくとも磁場が大きくなるが ABT 側は反対に小さくなっている。これが磁極の構造的な違いが原因であるのか、磁場測定環境の違いなのかは不明である。

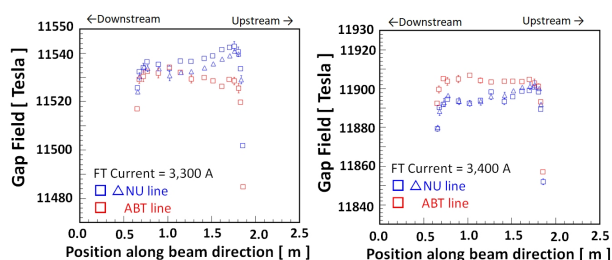


Figure 6: Comparison of gap field between NU and ABT line with 3,300 A(left) and 3,400 A(right).

3.4 周回ビームダクト内への漏れ磁場測定

周回ビームダクト内をビーム軸方向に沿って漏れ磁場の位置分布を測定した。FB 電流は 408 A、FT 電流は 3,300 A で固定した。磁極端部コイルを覆う FC は装着した状態である。測定ラインは周回ビームダクト中心位置 (中心ライン) と中心ラインから水平方向に ± 10 mm、 ± 20 mm、 ± 25 mm の位置を選んだ。位置の正方向は ABT 方向である。また周回ビームダクトの内側面から中心方向に 18 mm の距離のライン (18 mm ライン) も測定した。周回ビームダクトの形状は上下流末端部の水平方向の内寸がそれぞれ 88 mm、218 mm のテーパ型になっているため 18 mm ラインはビーム軸方向に対して平行ではない事に注意する。FB から FT までの BL を評価するために磁場波形を記録した。

18 mm ライン以外の 5 つのラインに沿った磁場の位置分布の結果を Fig. 7 に示す。表示する磁場は FT 電流での漏れ磁場である。FC を装着した状態でも磁極端部に依然大きな漏れ磁場が残存している事を確認した。上流の方が漏れ磁場が大きい理由は上流側の方が周回ビームラインから端部コイルまでの距離が近いからである。また下流の方がビームビームラインに沿った広がり幅が大きい理由は下流側の方が端部コイルの幅が大きいからである。また全域に渡り漏れ磁場が正極に偏っている事が分かった。正極に偏った磁場は NU 側の漏れ磁場が大きい事を示しているがこの原因は電磁石の構造的、磁気特性の非対称性であると推測される。

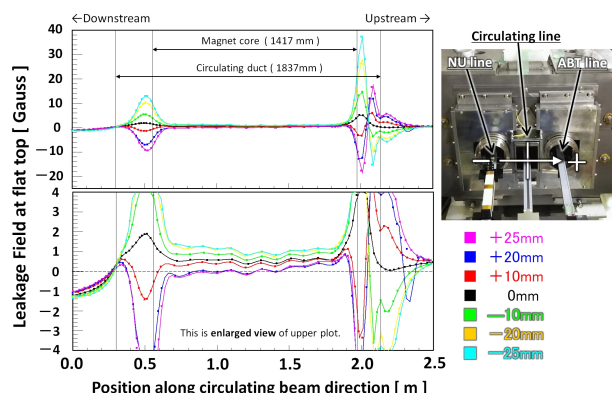


Figure 7: The longitudinal distribution of the leakage field in the circulating duct.

次に 18 mm ライン以外の BL の水平方向の位置依存

性を Fig. 8(left) に示す。BL の評価は FT 部よりも寧ろ FB 部が重要である。なぜなら FB は RCS から MR に 3 GeV 陽子ビームが入射する時間帯であり、入射された陽子ビームが加速される前に HF セプタムの漏れ磁場の影響を大きく受けるからである。FB 部に注目すると全ての測定ライン上の BL が 1.2~1.5 Gauss-m の値を持っている事が判明した。新 300 MeV セプタムは現行機とは異なりビーム取り出し時のみ励磁するパルス電流に変わるため FB 部での漏れ磁場はない。新 SM30 の FB 部の漏れ磁場成分は 1 Gauss-m 以下であった [8]。2016 年に導入された入射セプタム 1 のビーム入射時間帯の漏れ磁場は約 1.6 Gauss-m であるので [10]、この結果は入射セプタム 1 程度である。FB 部の BL としてはこの値は決して小さくはない。次に FT の BL の水平位置依存性を Fig. 8(right) に示す。その水平位置依存性は四極成分の構造を示している。また 1.6 Gauss-m 程度の二極成分がオフセットとして含まれている事も分かった。

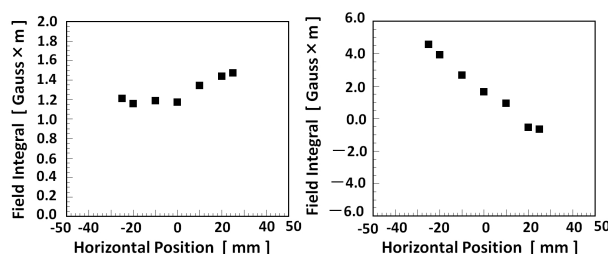


Figure 8: The BL of the leakage field depends on horizontal position in the circulating duct at FB(left) and FT(right).

新 SM31 の漏れ磁場を更に軽減するため周回ビームダクト内に純鉄製の磁気シールド (内部シールド) を挿入する方法を検討している。2021 年 8 月現在、設計している。内部シールドは周回ビームダクト全長に渡って差し込む形のダクト型を想定している漏れ磁場は主に側面から侵入するため側面の厚さが重要である。そのため厚さ 3 mm 程度を想定しているが、入射時の低エネルギー陽子のビームサイズは新 SM31 の周回ビームダクト入口で 70 mm、出口で 80 mm 近くあるため特に出口に対してはアパーチャーに余裕はない [11]。現在、内部シールドの側面をどこまで薄くできるか等の詳細な評価をシミュレーション計算を用いて進めている。

最後に 18 mm ライン上で測定した FT 電流の漏れ磁場の位置依存性を Fig. 9 に示す。ビーム下流部に最大 150 Gauss の非常に大きな漏れ磁場が存在している事が確認された。150 Gauss の漏れ磁場が観測された付近を水平方向に沿って磁場分布を測定した結果と、電流値と 150 Gauss が観測された箇所での磁場の大きさの相関を Fig. 10 に示す。水平方向の位置分布の結果、 ± 50 mm 付近から急激に磁場が上昇している様子が観測された。この結果は電流が 1,000 A を超え始めると鉄製のセプタム板が磁気飽和し漏れ磁場が急上昇した事を意味する。1,000 A は陽子のエネルギーで約 8.8 GeV に相当するためビーム加速中に漏れ磁場成分が急激に増えてくる。陽子ビームのビームサイズは加速されながら小さくなるが、 ± 50 mm を超える領域に位置する陽子は影響を受けると予想される。よってこの漏れ磁場の飽和成分を軽減するためにも内部シールドが必要である。

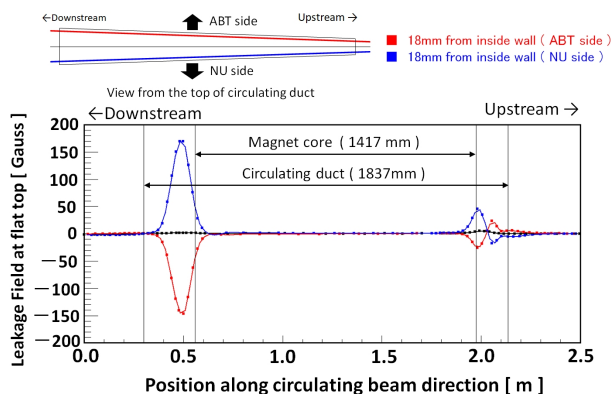


Figure 9: The longitudinal distribution of the leakage field in the circulating duct at 18mm from inside wall.

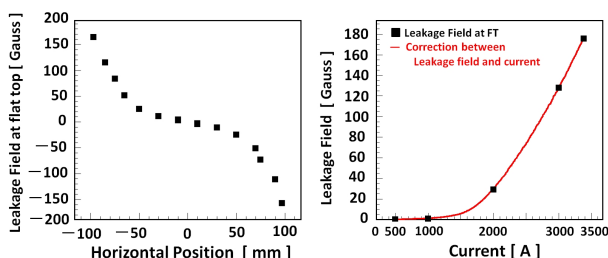


Figure 10: The horizontal distribution of the leakage field around the end-fringe at downstream(left). The correlation between leakage field and current(right).

4. 真空フランジの溶接

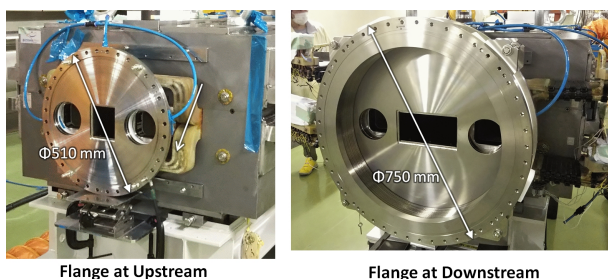


Figure 11: The large vacuum flanges for the new SM31.

2020 年 11 月、3 本の真空ビームダクトに上下流部それぞれ 1 枚ずつ真空大フランジを溶接した。溶接された真空フランジの寸法は上流側で直径 510 mm、下流側で直径 750 mm である (Fig. 11)。下流側は溶接ベローズ付きのフランジであり、新 SM32 の上流側真空フランジと直接結合する。フランジの素材は低放射化のため純チタン製である。フランジ溶接前後でフランジの中心位置と傾きをレーザートラッカーを用いて測定した。溶接の際に溶接部から生まれる張力によってフランジの位置や傾きが僅かに変化するからである。上流側フランジの溶接前後の中心位置の設計値からのずれはそれぞれ 1.0 mm と 0.9 mm であり殆ど変化はなかった。一方、溶接前後での傾きの変化量は 0.03 度であり、最終的な傾きは 0.05

度であった。下流側フランジの溶接前後の中心位置のずれもそれぞれ 0.9 mm と 1.0 mm であり殆ど変化はなかった。一方、傾きは溶接前後で 0.04 度変化し、最終的な傾きは 0.03 度であった。フランジ溶接は問題なく完了した。その後、真空リーク試験を行った結果、リーク量は 9×10^{-11} 以下であり、有意なリークがない事を確認した。フランジ溶接が完了した事で新 SM31 は完成した。

5. 今後の予定

2021 年夏期に新 SM32 の通電試験とフランジ溶接を行い新 SM32 を完成させる予定である。11 月頃には昨年完成した新 SM30 と共にビームから見た電磁石のインピーダンス測定を行う。12 月には現行機の全 HF セプトラム電磁石の撤去作業と新 HF セプトラム電磁石のインストールを行う。新 SM33 を構築するため現行機の SM32 の ABT 側の磁極解体を行う。解体後は新規製作する SM33 用の真空ビームダクトを組み込み、磁極を再構築する。全ての交換作業は 2021 年度末までに完了する予定である。

6. まとめ

J-PARC の MR では FX 用ビームパワーを増強するため FX 用 HF セプトラム電磁石のアップグレードが進行中である。2020 年に新 SM31 の高繰返し試験と磁場測定を行った。その結果、1.3 MW 出力を想定した 1.16 s 周期運転まで可能である事を確認した。電流値と測定磁場の間に良い線形性が得られた。NU 側と ABT 側の磁極内磁場測定の結果、ビーム軸方向に沿った位置分布の構造に違いがある事が分かった。絶対値にも違いが見えたが磁気センサーの精度による測定誤差である可能性が高いと判断した。磁極端部の漏れ磁場が依然高い事を確認し、周回ビームダクト内にダクト型の磁気遮蔽体が必要である事が分かった。現在、ダクト型シールドの設計を進めている。2020 年 11 月、3 本の真空ダクトに真空フランジを溶接する作業が行われ、新 SM31 の電磁石構築は完了した。全 HF セプトラム電磁石の MR へのインストールは 2021 年度末の完了を目指す。

謝辞

J-PARC MR の真空グループの方々に新しい特注のブランクフランジ等の真空部品の設計と製作して頂き、真空リーク試験も行って頂きました。感謝致します。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] S.Igarashi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01.
- [3] KEK Report 99-4 and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [4] T.Koseki *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys.,2012,02B004.
- [5] M.Kinsho *et al.*, Proc. of IPAC, 2016, p999-1003.
- [6] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p499-503.
- [7] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p85-89.
- [8] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2020 p388-392.
- [9] S. Iwata, private communication, Mar., 2021.
- [10] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021 p.793-797.
- [11] S. Iwata, private communication, July, 2021.