

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 (2) THE NEW HIGH-FIELD SEPTUM MAGNET FOR UPGRADING OF FAST EXTRACTION IN MR J-PARC(2)

芝田達伸^{*A)}、石井恒次^{A)}、杉本拓也^{A)}、岩田宗磨^{A)}、松本教之^{A)}、松本浩^{A)}、Fan Kuanjun^{B)}
Tatsunobu Shibata^{*A)}, Koji Ishii^{A)}, Takuya Sugimoto^{A)}, Soma Iwata^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)},
Hirosaki Matsumoto^{A)}, Kuanjun Fan^{B)}

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

^{B)}Huazhong University of Science and Technology (HUST)

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 first operation test for one of them, new HF SM30, was conducted in 2018, leaving several issues with the magnetic field to be resolved. One was a discrepancy of the gap field between the neutrino and beam abort line. The second was an asymmetric structure of transverse distribution in the leakage field. Investigations have shown that the origin of the former was a negative offset-voltage of the Hall sensor used. It was shown in the field measurement done in 2019 that the two gap-field are in good agreement after the negative offset-voltage is subtracted. No asymmetric structure was observed in the leakage field in this time. We produced the field clamps to reduce the end-fringe field. The end-fringe field was greatly reduced with the field clamps. The two large flanges to the new SM30 were weld without problem in Jan. 2020, and the construction of the new SM30 was finished.

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。現在の 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 μ 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 入射用電磁石と FX 用電磁石も 1 Hz 化と 1.3 MW 対応のためにアップグレードを進めている。全てのアップグレードは 2021 年度末に完了する計画である。FX 用電磁石は NU1 次ビーム (NU) ラインまたはビームアボート (ABT) ラインにビームを振り分ける電磁石である [5]。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 つのコイルを使用してお互い逆向きの磁場を作る。両極性型は磁場の影響を与えない周回ビームと取り出し方向が逆向きの 2 つの取り出しビームが近い距離に位置する場合に有効である。2 つの取り出しラインは片方が NU 用、もう片方が ABT 用である。SM32 と SM33 は分岐が十分にできた位置にあるため片極性型セプタム電磁石であり、それぞれ NU と ABT への取り出し用に 2 台を 1 セットして使用している。電磁石用電源からの出力電流はパターン電流である [6]。現在の主なパターン波形は全幅約 1.5 s、FB から 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 セプタム電磁石の交換理由は次の 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在の SUS 製からセラミックス製に変更する事。3 点目は大強度ビームのハロー部のビームロスによる放射化を軽減するため周回ビームダクトのオーバーチャーを拡大する事である¹。以上の理由から交換が必要

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

¹ 周回ビームラインのオーバーチャーが大きくなるのは SM30 と SM31 である。また取り出しラインについては全て垂直方向のビームオーバーチャーが大きくなる。

要な SM30、SM31、SM32 の新規製作及び現行機との交換を決定した。SM33 については新規製作はせず現行 SM32 と SM33 を組み合わせた再利用品を構築する予定である。電磁石用電源は全て現行機を再利用する予定である。HF セプタムのアップグレードの内容や現行機との比較についての詳細は Ref. [6] を参照されたい。



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

3. 2018 年の新 SM30 試験運転

新 SM30 は 2015 年に製作された。そして 2018 年 9 月～10 月に初めて新 SM30 の試験運転を行い高繰り返し試験と磁場測定を行った [6]。供給電源は行機の SM30 用の電源を使用した。高繰り返し試験においては繰り返し周期は最短で 1.16 s まで試験をし、電源側にも電磁石側にも問題がなく、1.3 MW 出力のための運転が十分可能である事が確認できた。一方、磁場測定には幾つか問題が残った。NU 側の磁極間磁場を測定した結果、印加電流値に対して発生磁場は飽和する事もなく充分良い線形性を示したが、磁極間距離と電流値から計算される予想値に比べて 0.4% 程低い値になっている事が分かった。更に NU 側と ABT 側の取り出しビームダクト中心の磁極間磁場を比較した結果、約 40 Gauss の差異があった。試験運転終了後の原因調査によって測定に使用したガウスメータの出力信号電圧に僅かな負極性のオフセット電圧が含まれている事が判明した。オフセット電圧は約 -2 mV 程度であるが磁場に換算すると約 -20 Gauss であるため、お互い逆極性の NU 側と ABT 側の磁場の相対的な差は約 40 Gauss になる。よって NU 側と ABT 側の不一致の主な原因は負極性のオフセット電圧であると特定した。他の問題は周回ライン上への漏れ磁場である。周回ライン中心に対して水平方向に沿った ± 9 mm の位置で漏れ磁場の大きさを比較した結果、磁極端部付近で約 2 倍の差異が見られた。また磁極端部の漏れ磁場の大きさはシミュレーションで予想された数値と同程度であり充分小さい値であったが更に軽減できる可能性があると判断し、漏れ磁場軽減対策として追加シールドの導入を決定した。

4. 2019 年の新 SM30 再試験

2018 年の磁場測定で判明した問題点改善の確認も含め、漏れ磁場軽減試験を目的に 2019 年の 10 月再び磁場測定を行った。通電試験のセットアップは 2018 年と同じである。磁場測定に用いる磁場センサーも 2018 年の測定と同じホール素子を用いたガウスメータである。そ

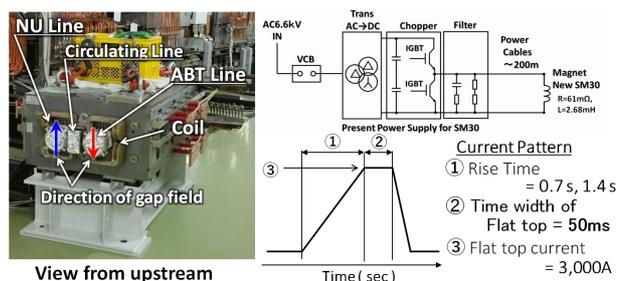


Figure 2: The photograph of the new SM30 (left). The circuit diagram of the power supply, and the output pattern current (right).

のため負極性のオフセット電圧の差引きが必要であるが、オフセット電圧は測定状況や時間によって変化する可能性があるため測定前後で測定し、その平均値を差し引く事にした。Figure 2 に新 SM30 と電源の基本構造とスペックを示す。出力電流パターンのフラットボトム電流は 370 A、立ち上げ時間は 0.7 s または 1.4 s、フラットトップ電流は 50 ms 長の 2,930 A で設定した。2018 年の試験運転では最大 3,754 A であったので 820 A 低い電流値で運転した。ビーム運転時のフラットトップ時間は 20 ms であるが、磁場センサーの信号に見られる交流成分のノイズに対し十分な精度の平均値を取るために長めの時間を設定した。この設定変更は 2018 年の試験にはない。本試験では高繰り返し試験は行わないため繰り返し周期は 2.48 s で行った。

4.1 NU 側と ABT 側の磁極内磁場測定

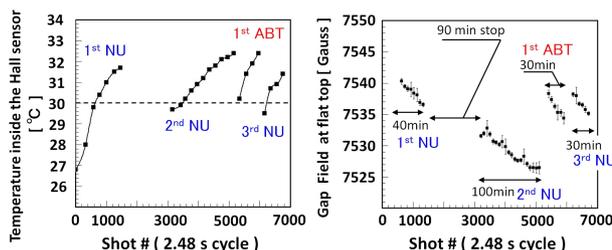


Figure 3: The time variation of the temperature which is mounted in the Hall sensor (left), and the gap field of NU and ABT line (right).

磁極内磁場測定の目的は NU 側と ABT 側の磁場の比較と積分磁場 (BL) の水平方向に沿った一様性の測定である。磁場測定は 2018 年と同じ装置を使用した。ビーム軸に沿った 2 m の範囲でマッピング測定が可能になるようにビームダクト内にレーンを敷き、そのレーン上にビーム中心と同じ高さに位置する磁場センサーを取り付けた台車が移動する仕組みになっている。台車の位置は ± 0.5 mm の測定精度を持つポータブルレーザー距離計を使って測定した。2018 年の試験では磁極内磁場を測定する装置が一式しかなく磁場測定を NU 側から ABT 側に切り替える際には通電を一度停止し装置を入れ替え、通電を再開する手順を取っていた。その場合出力電流のわずかな変化等不確定な要素が生まれ厳密な比較

ができない可能性があったため、磁極内磁場の測定装置をもう一式製作し、通電を止めずに磁場センサーのみ入れ替える方法で NU 側と ABT 側の比較データを取得できるようにした。負極性のオフセット電圧は全ての測定前後で記録した結果、ほぼ-24 Gauss であった。Figure 3 に 1 日の間で測定された磁極内磁場と磁場センサー部に内蔵された温度センサーが示す温度の時間変動を示す。2.48 秒周期で連続通電を行い、その間 3 回の NU 側の測定と 1 回の ABT 側の測定を交互に行い、磁場の変動を測定した。但し、1 回目と 2 回目の NU 側の測定には 90 分の停止時間が存在する。磁場の値は負極性オフセット電圧を引いた数値である。温度を同時に記録した理由は通電中磁極内の空気の温度が数 °C 上昇するため磁場センサーの温度特性が影響するためである。表示されている磁場はショット番号 600 付近から表示しているがこれより以前の信号電圧が非常に不安定になっており安定な信号が得られるまで時間を要したからである。信号電圧が不安定になった原因は不明である。測定の結果としてまず温度変化について記述する。通電により温度は約 27 °C から最大 33 °C 程度まで上昇した。30 °C を基準にすると約 2~3 °C の上昇であった。一方磁場は NU 側、ABT 側で両方ともに 5~7 Gauss 程の減少が見られた。使用したガウスメータの温度係数は-0.06 Gauss/°C であるため測定された温度上昇から計算される磁場の変動量は 0.2 Gauss 以下である。従って磁場の減少はホール素子の温度係数では説明が付かないが、温度に対する応答性の問題であると考えている。そのためホール素子の温度特性を独自に測定する計画である。次に NU 側と ABT 側の磁場の比較結果について記述する。まず注目すべき点は 1st-NU、3rd-NU と 1st-ABT の磁場が一致しているという点である。温度による磁場の減少も一致しており、NU 側と ABT 側の磁場に 2018 年の測定結果のような不一致な点は見られなかった。一方 2nd-NU については他の 3 セットとは一致せず、全体的に約 7 Gauss 程度低かった。この不一致の原因はまだ判明していないが候補として磁場センサーのゲインの変動が考えられる。ショット番号 600 以前の磁場センサーの信号電圧が安定しなかったと同様の現象が起こった可能性がある。今後同じ現象が発生した場合に備え、測定前後で別に用意した DC 磁場を測定してゲインの相対的な校正を行う事を考えている。

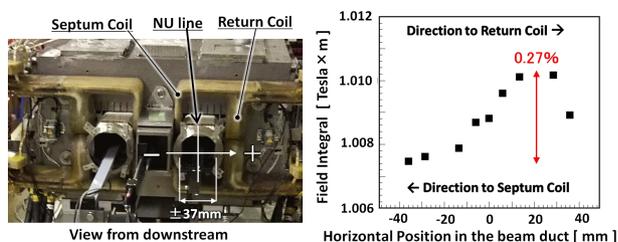


Figure 4: The view of the new SM30 from beam downstream (left), and the transverse distribution of the BL in the NU line (right).

Figure 4 に NU 側で測定した BL の水平方向分布を示す。測定した水平方向の範囲は水平方向のアーチャー ±49 mm に対して ±37 mm である。測定範囲の限界は

磁場センサーとセンサーの固定治具に依る結果である。BL は明らかにセプトムコイル側で低く、リターンコイル側で大きくなる構造を持っている。その高低差は約 0.27 % であり曲げ角度にして ~0.03 mrad である。印加電流は 2,930 A であったが、ビーム運転時の印加電流値は 2018 年の測定結果から 3,754 A である事が分かっている。この値は NU への取り出しビーム軌道の微調整の最小単位程度である。充分小さいというわけでないが現段階で大きな問題にはならないと考えている。

4.2 周回ライン内の漏れ磁場測定

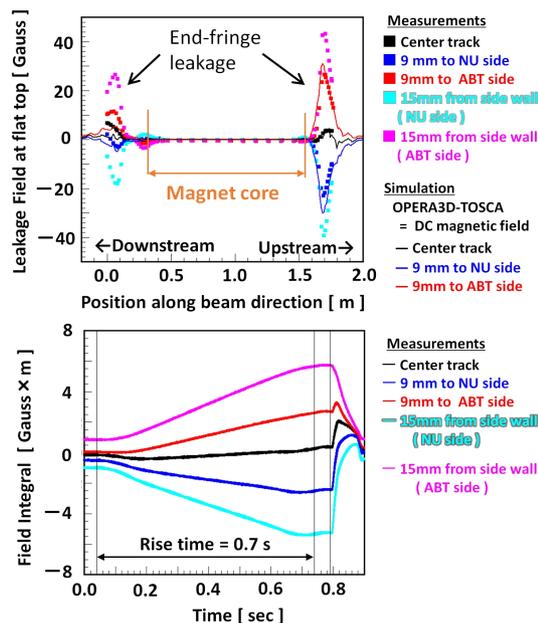


Figure 5: The longitudinal distribution of the leakage field (upper), and the time-dependent BL (lower). The data sets are compared with simulations.

周回ライン内をビーム方向に沿って磁場の位置分布を測定した。2018 年の測定結果の再現性を確認するために測定ラインは 2018 年の測定と同じ周回ビーム中心位置 (中心ライン) と中心ラインから水平方向に ±9 mm の位置を選んだ (±9 mm ライン)。また新たに周回ダクトの内面から中心方向に 15 mm の距離のライン (15 mm ライン) を測定した。周回ダクトの形状は上下流部の水平方向の内寸がそれぞれ 59 mm、86 mm のテーパ型になっているため 15 mm ラインはビーム軸方向に対して平行ではなく、上下流部でそれぞれ約 ±14.7 mm、±28 mm に位置する。5 つのライン上で測定された磁場分布と比較のために OPERA-3D-TOSCA [7] を用いて計算された漏れ磁場分布、そして BL の時間波形の結果を Fig. 5 に示す。シミュレーションは中心ラインと ±9 mm ラインのみである。最も漏れ磁場の高い上流端部の値は測定結果とシミュレーション結果で良く合っている事が分かる。また重要な点は 2018 年の結果に見られた ±9 mm ラインに見られた非対称な構造が見られず対称な構造をしている事である。この対称構造は 15 mm ラインにも見られるため周回ライン内での水平方向の分布

は中心軸に対して対称な構造になっている事が確認できる。2018年の結果が再現していない点については測定位置の違い、磁極内磁場測定でも問題の原因として挙げたホール素子のゲイン変動等が考えられる。一方下流方向はシミュレーションと測定結果が一致しておらず測定値の方が大きい。そして全ての測定ラインで左右対称になっていない事が確認できる。BLの時間波形の特徴は時間波形が印加されたパターン電流の形状をしている点である。つまり漏れ磁場の主成分はパターン電流であり、二次的な渦電流ではない事を示している。また時間波形がおおよそ左右対称の構造をしている事が分かる。僅かに左右非対称の構造になっているのはビーム下流部の非対称構造の影響が出ている事が原因である。測定の範囲内でのBLの最大値はビーム取り出し時間のフラットトップ時で15 mmラインの ~ 6 Gauss \times mであった、磁極内磁場のBLに対して0.06%の漏れ磁場である。現行機では ± 20 mmの範囲で磁極内磁場の0.1~0.65%の漏れ磁場が確認されているので既に現行機よりも漏れ磁場が小さくなっている事が確認できた。

磁極端部の漏れ磁場の原因は端部のコイルである。この漏れ磁場を更に軽減するため端部コイルを完全に覆い隠す強磁性体を用いたフィールドクランプ(FC)を製作した。FCの材質は純鉄製で板厚は15 mmである。FCを用いた漏れ磁場軽減能力についてもシミュレーションで見積もった。Figure 6に2019年10月に新SM30に装着されたFCとシミュレーションで見積もられた漏れ磁場の位置分布図を示す。

Figure 7にFCを装着した状態での漏れ磁場測定結果を示す。Figure 5と比較すると端部の磁場とBLが飛躍的に軽減した。磁極内領域には -0.5 Gauss程度の磁場が存在している。この磁場はFCの導入位置とは関係ないため以前から既に存在しており、その源はセプタム板表面上で生成される渦電流であると推定される。測定結果、FCが有効である事が確認でき、FCをビーム運転時にも使用する事が決まった。ところで磁極端部から外側の領域で磁極から離れてもなお上昇する磁場が確認できる。この成分は電磁石に供給している戻り側の出力電流ケーブルが電磁石下流部付近の床にソレノイドコイルのような形状で設置されている事から、ケーブルが作る電流磁場である。またビーム上流部にも測定ラインの下に行き用の出力電流ケーブルを渡しており、その位置は磁場のピークを示した1.75 m付近である事から、このケーブルが作る同心円上の磁場が原因である事が分かった。Figure 8にビーム下流方向、上流方向からみた出力電流ケーブルの配置写真を示す。最終的には電線は使用せず銅ブスバーを使用する。銅ブスバーを流れる電流が作る空間磁場を相殺するために戻り用のブスバーは平行して電磁石の下を潜るように設置される最終的な配置での空間磁場をシミュレーションで見積もった結果、最大値で約0.5 Gauss程度であることを確認した。

5. 真空フランジの溶接

2020年1月、3本の真空ダクトを真空フランジに溶接する作業を行った。溶接する真空フランジは上流側と下流側それぞれに1個ずつあり、上流側は直径450 mm、下流側は直径510 mmである(Fig. 9)。下流側は溶接ベ

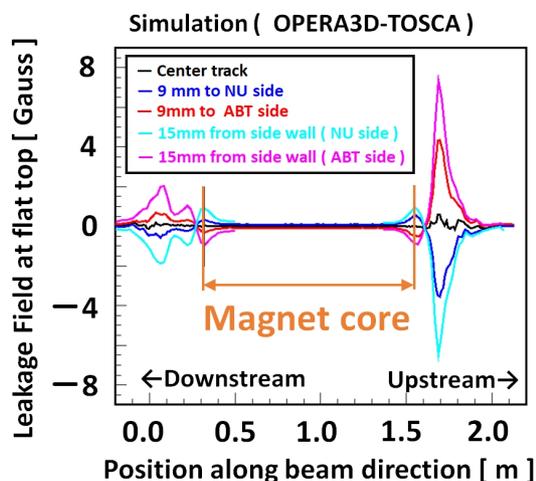
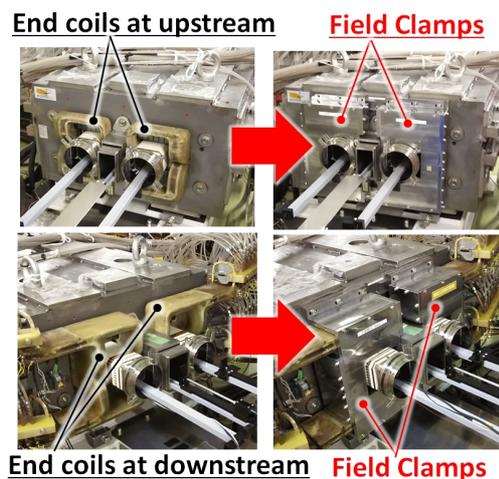


Figure 6: The installation of the field clamps (upper), and the simulation of the leakage longitudinal distribution with the field clamps (lower).

ローズ付きのフランジであり、新SM31の上流側真空フランジと直接接続する構造となっている。フランジの素材は両方純チタン製である。溶接する前にレーザーラッカーを用いてフランジ面の傾きを測定した。測定の結果上流側のフランジは約0.08度傾いている事が確認された。下流側はそれよりも傾きが小さかった。傾きはあるが真空ダクトとの溶接面には隙間はなく溶接には問題がない事を確認した。溶接完了後真空リーク試験を行った。リーク量は $3\sim 4\times 10^{-11}$ Pa \cdot m³/s程度であり問題はなく、スローリークも確認されなかった。真空リーク試験の終了後再びフランジ面の傾きと位置測定を行った。上流側フランジの傾きは0.08度であり溶接前と同程度であった。また周回ダクトの中心位置に対してフランジの中心は水平方向には約0.05 mm程度であったが垂直方向には約0.24 mm程のずれがある事も確認した。下流側フランジの傾きは0.02度であり上流側よりも小さい事を確認した。周回ダクトの中心位置に対するフランジの中心位置のずれは水平垂直共に0.1mm以下であった。

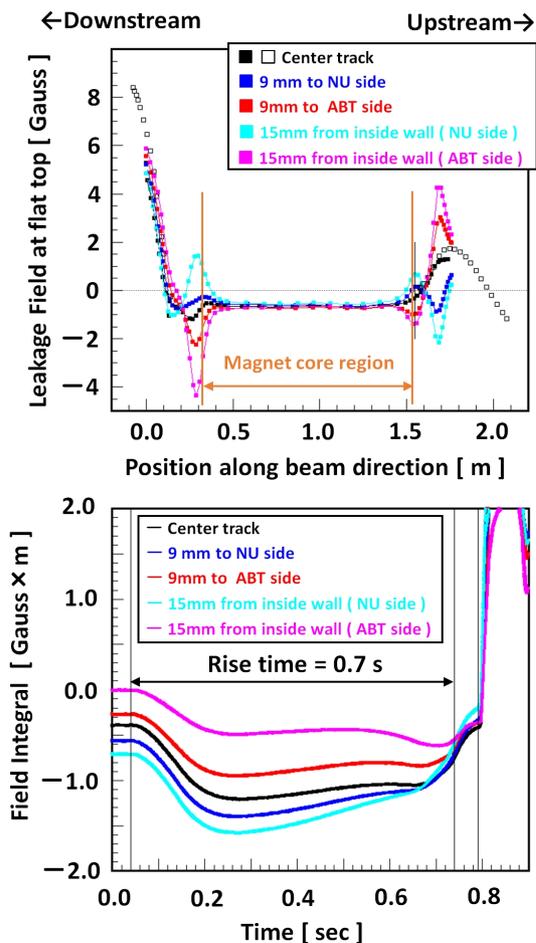


Figure 7: The longitudinal distribution of the leakage field (upper) and the time-dependent BL (lower) with the field clamps.

6. 今後の予定

2020年度は新 SM31 の試験運転を行い高繰り返し運転の試験と磁場測定を行い、その後真空フランジ溶接を計画している。2021年度は長期メンテナンス期間を予定している。この期間に現行機の全 HF セプタム電磁石の撤去を行い、新 SM30、SM31、SM32 のインストールを行う。また現行の SM32 の ABT 側と SM33 の ABT 側を使って新 SM33 の構築を行いインストールを行う。2021年度末までに全ての HF セプタムに対してのアップグレードを完了する予定である。

7. 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 セプタム電磁石のアップグレードが進行中である。2019年に新 SM30 の磁場測定を行った結果、NU 側と ABT 側で矛盾のない磁場を得る事ができた。また磁極端部に新規導入したフィールドクランプによって漏れ磁場の更なる軽減に成功し、新 SM30 の漏れ磁場は現行機よりも小さい漏れ磁場を実現した。2020年1月には電磁石の3本の真空ダクトに真空フランジを溶接



Figure 8: The location of the power cables.

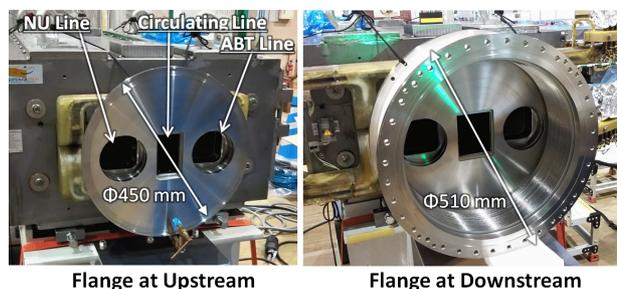


Figure 9: The large vacuum flanges for the new SM31.

する作業が行われ、新 SM30 の電磁石構築は終了した。他の高磁場セプタム電磁石も含めて MR へのインストールは 2021 年度を予定している。

謝辞

J-PARC MR の真空グループの方々には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] 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.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p499-503.
- [6] T.Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p85-89.
- [7] <https://operafea.com/opera-3d-static-electromagnetics-module/>