

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

芝田達伸^{*A)}、石井恒次^{A)}、杉本拓也^{A)}、松本教之^{A)}、松本浩^{A)}、Fan Kuanjun^{B)}

Tatsunobu Shibata^{*A)}, Koji Ishii^{A)}, Takuya Sugimoto^{A)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}, Kuanjun Fan^{B)}

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

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

Abstract

J-PARC Main Ring (MR) is currently working on improved beam power to 750 kW by shorting the beam operation cycle from 2.48 s to 1.3 s. Upgrade of the four High Field Septa (HF FX-Septa) will be completed in 2021. The present power supplies will be reused at that time. The new three HF FX-Septa were produced in 2015. In 2018, the first operation test of the one of the HF FX-Septa was conducted. The high repetition rate operation had no trouble. The magnetic gap fields and the leakage field were measured. We found a discrepancy of 0.4% between the neutrino and abort extraction. The leakage field and field integral were small at the center of circulating line. The end fringe field was large. We found an asymmetric field along transverse direction.

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 に出射する加速器である。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 μ s の間に出射する。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 500 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 2021 年度に繰り返し周期を 1.3 s に短縮化する計画である [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 に短縮する事も視野に入れている。1 Hz 化のため主電磁石用電源の開発が進んでおり、2018 年には偏向電磁石用新電源と実負荷を用いた通電試験が行われた [5]。MR 入射電磁石と MR FX 用電磁石の 1 Hz 化と 1.3 MW 対応のためのアップグレードも進めている。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 [6]。これらのアップグレード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。

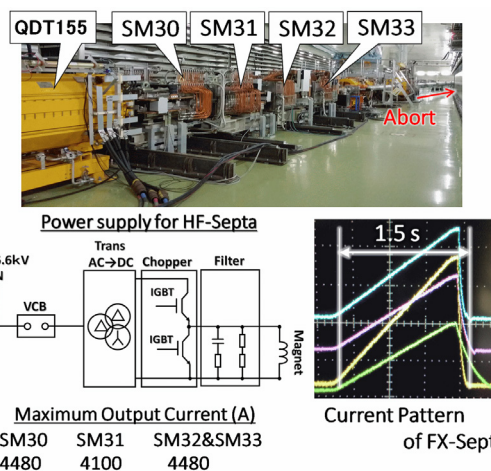


Figure 1: The present FX HF-Septa, their power supplies and output current patterns.

2. FX 用高磁場セプタム電磁石

FX 用高磁場セプタムは 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(上))。SM30 と SM31 は両方ともに両極性セプタム電磁石と呼ばれている。両極性セプタム電磁石は 1 つのコアを使用して 2 つの逆極性の磁場を作る。両極性型は周回ビームと 2 つの取り出しビームの分岐が十分ではない近い距離に位置する場合に有効である。SM32 と SM33 は分岐が十分にできた位置にあるため片極性セプタム電磁石である。電磁石用電源は全て同じ型の電源を使用しており、両極性型である

* tatsunobu.shibata@j-parc.jp

SM30、SM31 にそれぞれ 1 台ずつ、SM32 と SM33 はまとめて 1 台の電源、合計 3 台の電源を使用している。電源の基本回路を Fig. 1 (下) に示す。AC6.6 kV を入力とし、AC/DC コンバータによって整流した DC 電圧を 2 石の IGBT を搭載したチョッパ回路でパターン電流に変換する。電流のパターン波形やフラットボトム (FB)、フラットトップ (FT) の電流値は全て遠隔操作で制御ができる。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。

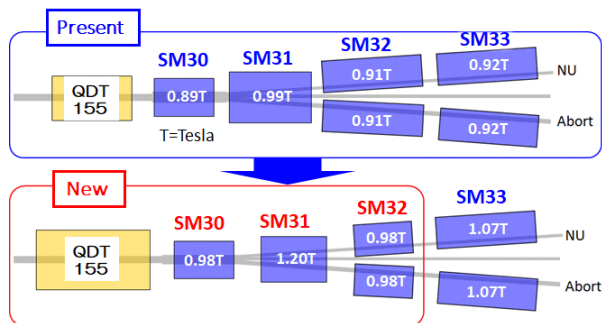


Figure 2: The layout of the present and new FX HF-Septa.



Figure 3: The new FX High-field septum magnets.

高磁場セプトム電磁石の交換理由と変更点について記述する。1 点目は高磁場セプトムビームラインの短縮である。ビームの大強度化に伴い高磁場セプトムの上流側にある四重極電磁石 (QDT155) のボア径を 150 mm から 220 mm に拡大する。ボア径拡大に伴う磁極内磁場の減少を補うため磁極長が 1,860 mm から 2,360 mm に変更される。QDT155 の磁極長は長くなるが NU ラインまでの距離は同じであるため高磁場セプトム用のビームライン長が短くなる。そのため高磁場セプトム電磁石の寸法変更が必要になった。検討の結果、SM31 と SM32 を大幅に短縮した。2 点目は取り出し用ビームダクトの

素材変更である。現在の素材は全てステンレス製であるが、高繰返しによる金属製のダクト表面に発生する渦電流の発熱が問題になる。特に現行機のように 2 本の取り出し用ビームダクトと 1 本の周回用ビームダクトが上下流それぞれ 1 つの大フランジに溶接される構造の場合、各ビームダクト表面で発生した渦電流が上下流の大フランジを流れ大きなループ電流を作る事が懸念される。このビームダクト表面上での渦電流の発生とループ電流発生を抑制するために取り出し用ビームダクトの素材を絶縁性のセラミックスに変更する。一方セラミックスダクトは強度的にはステンレスダクトに比べて非常に劣るため肉厚を厚くする必要があり現行の 5 mm から 9 mm 厚に変更する。但しビームのアーチャーを確保するために現状より磁極間距離を大きく必要があり、電磁石コアも新規製作が必要になる。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アーチャーを拡大する。また、ビームダクトの素材を現状のステンレスから低放射化素材である純チタン製に変更する。以上の理由から交換が必要な SM30、SM31、SM32 の新規製作及び現行機との交換を決定した。SM33 については上記の理由に対して必ずしも新規製作の必要がなく、現行 SM32 の ABT 側のセプトム電磁石を SM33 の NU 側のセプトム電磁石として再利用する計画である。¹ Figure. 3 に 2015 年に製作された 3 台の新高磁場セプトムを示す。現行機の高磁場セプトム電磁石と新高磁場セプトム電磁石のスペックとそれぞれの運転条件を表 1 にまとめた。現状の全積分磁場である 6.55 Tesla×m と同じ積分磁場を保つために新 SM30、SM31、SM33 の積分磁場を現行機よりも大きく設定する。そのため現行運転条件よりも高い電流が必要になる。しかし電磁石用電源は全て現行機を再利用する予定である。その理由は新電磁石が要求する大電流は現行機でも十分供給できるからである。MR は元々 50 GeV 加速を想定していたが現在は 30 GeV 加速で運転している。そのため電源の出力電流には十分余裕があり新高磁場セプトム電磁石用に使用する点では問題はない。但し高繰返し運転が可能かどうかという点は未確認である。

3. 新 SM30 の試験運転

2018 年度の夏期シャットダウン中に新 SM30 の試験運転を行い高繰返し試験と磁場測定を行った。供給電源は現行機の SM30 用の電源を使用した。電磁石コイルへの冷却水の流量は現状の 150 L/min よりも大きい 200 L/min で通水した。

3.1 高繰返し試験

まず高繰返し試験を行った。繰返し周期は現状の 2.48 s と 1.32 s、1.28 s、1.16 s で試験をした。各周期での立ち上がり時間はそれぞれ 1.4 s、0.7 s、0.65 s、0.58 s に設定した。この値は各周期でのビーム加速時間に等しく、主電磁石用電源の出力電流の立ち上がり時間とも同じである。FT の電流値は 500 A から最大定格の

¹ ABT 側の方がアーチャーが大きい。SM33 も NU 側のアーチャーを大きくする必要はあるが新しい電磁石を製作する事なく、現行機の SM32 の ABT 側を再利用する事で対応できる。

Table 1: Comparison of the Present and New High-field Septa. NU Means Neutrino Line. ABT Means Abort Line.

	SM30		SM31		SM32	
	present	new	present	new	present	new
ダクト口径	113×86	98×88	106×81	98×88	136×48	136×70
(H(mm)×V(mm))						
NU						
ABT						
周回 (上流)	60.5×106	62×106	70×106	100×106	110×110	110×110
周回 (下流)	80.5×106	82×106	140×106	200×106	Φ144 mm	110×110
磁場 (T)	0.89	0.98	0.99	1.20	0.91	0.98
積分磁場 (T·m)	1.18	1.292	1.75	1.808	1.81	1.198
電流値 (A)	2930	3600	2486	3300	2454	2950
磁極長 (mm)	1225	1225	1660	1417	1900	1200

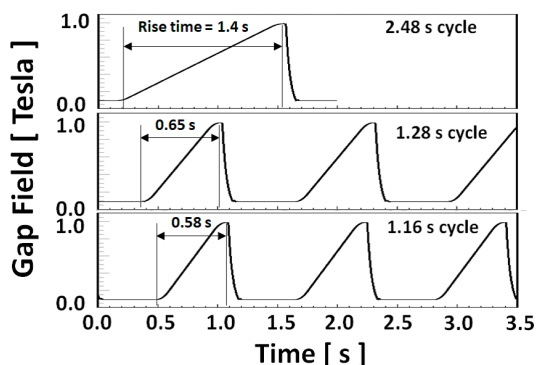


Figure 4: The waveform of magnetic field in 2.48 s, 1.32 s, 1.28 s and 1.16 s cycle.

3,850 A まで変化させた。Figure 4 に各繰り返し周期での出力磁場波形を示す。全ての条件で問題なく運転ができる事を確認した。通電中電磁石コイルの発熱を評価するためコイルの冷却水温度をサーモメータで測定した結果、入出力部での冷却水の温度差はいずれの場合でも約 20 度であり発熱量に問題はなかった。電源についてもサーモメータを用いて各部の温度を測定した結果、特に問題になるような発熱は発生しなかった。この高繰り返し試験の結果、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。

3.2 磁極内磁場測定

NU 側、ABT 側の磁極内磁場を測定した。磁場測定のセンサーにはホール素子 (F.W.BELL 製のテスタガウスメータ 8030) を用いた。8030 型は磁場の時間波形を見るためホール素子のアナログ出力端子が搭載されている。今回の測定ではこのアナログ出力を横河電機製のデータ収集システム SL1000 の 16-bit ADC ボードに入力して時間波形を記録した。ビーム方向に沿って磁極内磁場分布を測定するためホール素子を台車に固定し、台車がダクト内に設置したレール上を移動できるようにした。測定した磁場分布の範囲は磁極長 1,225 mm を含む 1.8 m 長であった。

まず NU 側の磁極内の 1 点の磁場と FT 電流値の線形性を確認した。FT の電流値は電源盤内に設置されてい

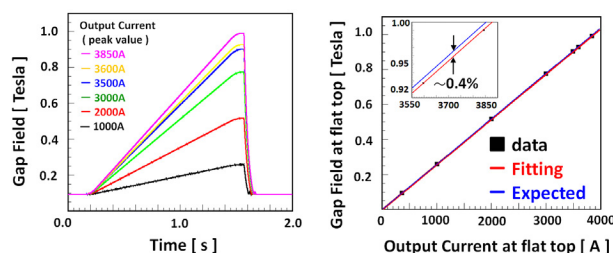


Figure 5: The linearity between output current and magnetic field.

る DCCT を用いて測定した。得られた電流値と磁場の線形性を Fig. 5 に示す。この結果から非常に良い線形性を持っている事が確認できる。但し磁極間距離 116.2 mm から計算される期待値に比べると少し低い値である事も分かった。

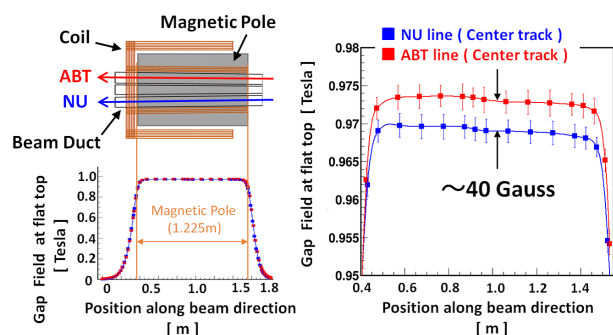


Figure 6: The Magnetic Field along the beam direction of Neutrino and Abort extraction.

NU 側と ABT 側の取り出しビームダクトの中心をビーム方向に沿って測定した磁場分布を Fig. 6 に示す。ここで ABT 側の磁場は比較しやすくするため極性を反転して表示した。NU 側と ABT 側では約 40 G の違いがあった。ABT 側の最大磁場は-9,736 G、NU 側は 9,696 G あった。測定の誤差は ±15 G であり、各位置で測定した時の r.m.s. である。磁極間距離と FT 電流値である 3,754 A から計算される磁場は 9,743 G であった

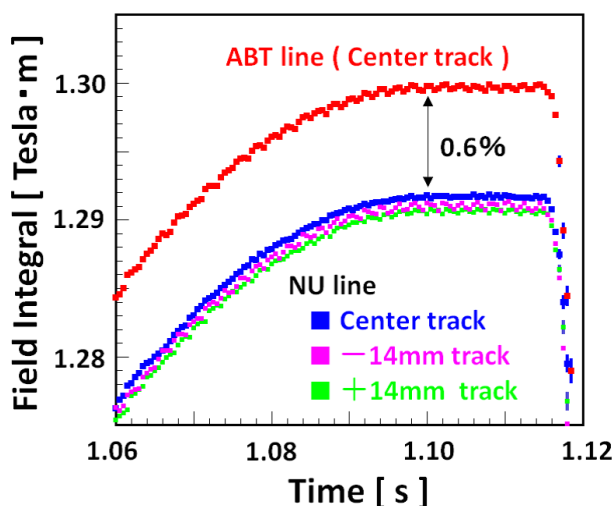


Figure 7: The field integral of the gap field along neutrino and abort extraction.

ので NU 側の磁場が設定磁場より約 50 G 程度小さい事を示した。次に磁場分布から NU 側、ABT 側それぞれの積分磁場を計算した (Fig. 7)。FT 部での積分磁場は 1.292 Tesla·m であり想定する積分磁場を十分満たす事が確認できた。NU 側と ABT 側の差は 0.6% である一方、NU 側の横方向 ±14 mm の位置との差は約 0.1% であったため横方向の位置の違いによる差ではない事が分かる。

試験運転終了後、NU 側と ABT 側の磁場の違いの原因を調査した。まず磁極間距離を測定した。NU 側は 116.2 ± 0.1 mm、ABT 側は 116.3 ± 0.2 mm であり差異はなかった。次にコイルのインダクタンスの差を測定した結果、約 $\pm 0.2\%$ の範囲で一致し、ばらつき最大の $\pm 0.5\%$ であった。NU 側と ABT 側どちらかに異常が見られる傾向は見つからなかった。セラミックスダクト表面に搭載されている RF シールドにも異常は見られなかった。ホール素子の極性による応答の違いも調べた。NU 側はホール素子の正極として、ABT 側は負極として測定されたためホール素子が感知する磁場が正極か負極かで応答が変化する可能性を確認した。約 2,000 G の静磁場を用いて極性による違いを比較した結果、正極と負極の差は 4 G 程度であり問題の差を説明する事はできない事を確認した。そして測定データを見直した所、FB の磁場が NU 側と ABT 側で既に 50 G の差がある事が確認できた (Fig. 8(左))。そこで測定系のオフセット電圧を調べ直した。まず試験運転ときに磁場が印加されていない状態で磁場を測定した時のオフセット電圧を調べた。測定日による違いもあったが -2.5 mV、-1 mV のオフセット電圧が存在する事を確認した。これは磁場の大きさに換算すると -25 G、-10 G であった (Fig. 8(右))。2019 年 5 月にオフセット電圧の再現性確認を行った。結果、SL1000 の ADC ボードのオフセット電圧が +0.8 mV あり、ホール素子のオフセット電圧は -2.5 mV である事を確認した。オフセット電圧の合計は -1.75 mV であり磁場の大きさに換算して -17.5 G であったため試験運転時のオフセット電圧をおおよそ再現した。試験運転時

再現性試験時も測定を始める前にはホール素子のゼロ補正を行うがアナログ出力には若干のオフセット電圧が残る事を意味した。-20 G 前後のオフセット磁場は正極で測定された NU 側の磁を小さくし、負極で測定された ABT 側の磁場を大きくする。以上の調査により NU 側と ABT 側の相違の主な原因は測定系のオフセット電圧であると断定した。2019 年秋に再び新 SM30 の磁場測定を計画しており、そこで磁極内磁場の再確認を行う予定である。再測定の際にはオフセットの測定が重要である。また横方向の多極成分測定も行う計画である。

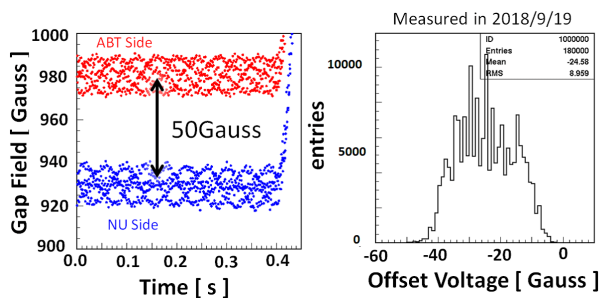


Figure 8: The gap field at flat bottom current (Left). The offset voltage which was measured during test operation (Right).

3.3 周回ビームライン上の漏れ磁場測定

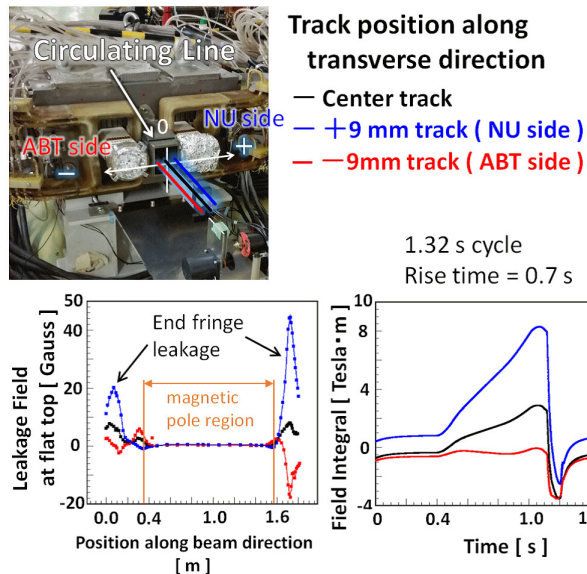


Figure 9: The leakage field along the circulated line. Center figure shows position dependence of leakage field at flat-top of output pulsed current. Right shows time dependent field integral.

セプタムコイルと周回ビームダクトの間には磁気遮蔽として 1 mm 厚の純鉄板を 3 枚重ねたセプタム板がある (SUY シールド)。磁極内磁場からの漏れ磁場は 3 mm 厚の遮蔽によって大幅に軽減されると期待できる。周回

ビームライン上をビーム軸方向に沿って 1.8 m 長の範囲で漏れ磁場分布を測定した。FT の電流値は 3,754 A に設定した。磁場センサーは磁極内磁場測定と同じホール素子を用いた。測定ライン数は周回ビーム中心位置と中心位置から横方向に ± 9 mm の位置の合計 3 本である。FT での磁場分布と積分磁場の時間発展を Fig. 9 に示す。磁極の範囲内では漏れ磁場が非常に小さい事が確認できた。一方磁極の外側はコイルからの回り込みの影響によりビーム上流では最大 50 G の漏れ磁場が存在する事を確認した。ビーム下流側の漏れ磁場がビーム上流側に比べて小さい。その理由は周回ビームダクト口径が下流方向に向かって大きくなるテーパ形状になっているためビーム下流部の方がビームダクト中心からコイルまでの距離が長くなり漏れ磁場の大きさが小さくなるからである。積分磁場については中心位置で最大 3 G·m であった。NU 側に +9 mm の位置では最大約 8 G·m であった。それぞれの積分磁場は曲げ角で約 0.004 mrad、0.01 mrad である。積分磁場の設計値は約 10 G·m であるため測定値は十分小さいと判断しているが、今後中心から 9 mm 以上離れた位置での漏れ磁場の評価も必要である。また磁極端部での漏れ磁場軽減により更に積分磁場を小さくする事が可能である。問題の一つは横方向 ± 9 mm の位置での漏れ磁場が非対称になっている点であり再測定の際に再検証する予定である。再測定の際には横方向の多極成分の測定も行う。

4. 漏れ磁場軽減の検討

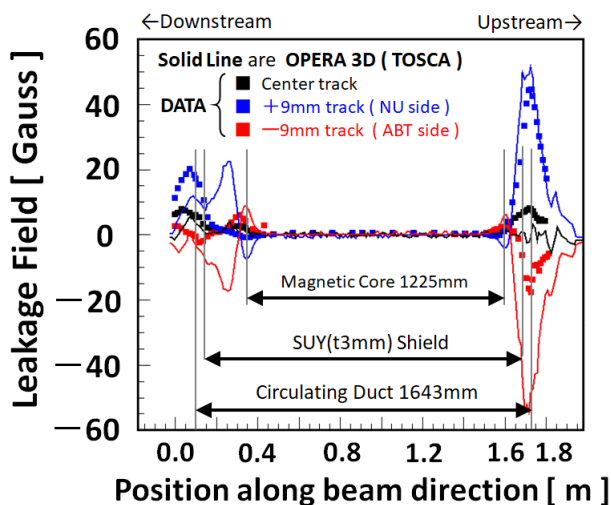


Figure 10: The comparison of the leakage field between data and simulation.

磁極端部での大きな漏れ磁場の原因はコイルからの回り込みであるため、磁極端部に磁気遮蔽を追加する事で漏れ磁場を軽減する事を計画している。磁気遮蔽の設計のためシミュレーションによる漏れ磁場の評価を始めた。まず静磁場解析ソフト OPERA-3D の TOSCA を用いた。新 SM30 の寸法や現状の磁気遮蔽を設定し、入力電流は実験と同じ 3754 A を入力した。SUY シールドは磁極端部から上流方向に 110 mm、下流方向には 208 mm

延長されている。計算された周回ビームダクト中心と横方向に ± 9 mm の位置での磁場を実データと比較した結果を Fig. 10 に示す。SUY シールド端部での漏れ磁場構造に注目すると上流部での磁場分布の構造は実データと良く似た構造を再現している。但し ± 9 mm での非対称構造はシミュレーションでは見えていない。下流部では上流部とは異なり磁場分布の構造を再現していない。つまり ± 9 mm に注目すると、磁極端部から SUY シールド端部までの領域において、実データでは十分漏れ磁場を軽減しているが、シミュレーションではその領域に ± 20 G のピークがある。以上の事からシミュレーションで再現できていない点は、 ± 9 mm の非対称性の構造と下流部の磁極端部から SUY シールド端部までの漏れ磁場構造である。非対称性については再測定の結果も必要であるため結論が出るのはその後になると考えている。磁極端部から SUY シールド端部までの漏れ磁場構造の不一致については現在シミュレーションの見直しと OPERA-3D ELEKTRA を用いて入力電流に実験と同じパターン電流を使用した結果との比較を試みている。現在実データとの比較と並行して磁極端部での漏れ磁場軽減のための追加シールドの具体的設計を進めている。再測定の際には追加シールドを用いた漏れ磁場軽減試験も計画している。

5. 今後の予定

2019 年の夏期シャットダウン期間中に再び新 SM30 の再試験を行う予定である。再試験ではオフセット電圧を正確に測定しながら NU 側と ABT 側の磁極内磁場の比較と多極成分の測定を行う。漏れ磁場測定に於いては追加シールドによる漏れ磁場軽減試験を行う。再試験後は 3 本のビームダクトに 1 つの大フランジを溶接する作業を予定している。大フランジの溶接作業が終了すると新 SM30 は完成する。新 SM30 の完成後、来年度には新 SM31 または新 SM32 の試験運転を計画している。

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 MR FX 用高磁場セプタム電磁石のアップグレードが進行中である。2018 年に新高磁場セプタム SM30 の通電試験を行い 1.3 MW 出力時に必要な高繰り返し運転に問題がない事を確認した。また磁極内磁場と周回ライン上の漏れ磁場を測定した結果、利用運転に必要な十分な磁極内磁場が得られた。一方漏れ磁場については磁極内領域では十分小さかったが磁極端部では依然大きな漏れ磁場が確認された。現在磁極端部での漏れ磁場軽減を目指し追加シールドの設計を行っている。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 年を予定している。

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.Shimogawa et al., Proc. of PASJ, 2019, p1266-1268.
- [6] T.Shibata et al., Proc. of PASJ, 2018, p499-503.