

J-PARC MR 速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石 SM32 の復旧と性能評価 THE RECOVER AND PERFORMANCE EVALUATION OF A NEW HIGH FIELD SEPTUM MAGNET SM32 FOR FAST EXTRACTION IN J-PARC MR

芝田達伸^{*,A)}, 岩田宗磨^{A)}, 石井恒次^{A)}, 松本教之^{A)}, 松本浩^{A)}

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

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

Abstract

As part of the goal of increasing the beam power of the Main Ring (MR) for fast extraction (FX) in J-PARC to 1.3 MW, all of the FX septa were replaced with new septa in 2022. However, one of the new FX high field septa which is called SM32 had fatal defect in its magnetic coil in 2021, and the installation was postponed. Therefore, we determined to produce new magnetic coils for the new SM32. The new magnetic coils were completed in March 2023, and the installation in the SM32 in summer 2023. We measured the magnetic gap field and leakage field, then we found no problem. Especially, the strength of leakage field along the circulating duct was sufficiently small, and we confirmed that the quadrupole field component of the leakage field was reduced less than 1% of that of the previous SM32. After recovery of the new SM32, the beam power of MR for neutrino facility achieved 800 kW in June 2024.

1. J-PARC MAIN RING

J-PARC は 400-MeV 線形加速器 (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、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 では RCS から入射された 8 バケットの 3-GeV 陽子ビームを 30 GeV に加速して NU または HD に出射する。NU への供給運転の場合、約 5.2 μ s の間に 8 バケットの陽子ビーム全てを NU に出射する。これを速い取り出し (Fast eXtraction;FX) と呼ぶ。現在、MR では供給ビームパワー 1.3 MW への増強が進行中である [2]。そのための戦略は繰返し周期の短縮化とビーム粒子数の増加である。LI から負水素イオンビームを射出し、MR から NU に向けて陽子ビームを出射するまでを 1 サイクルとしたときの 1 サイクルに要する時間を MR の繰返し周期と呼ぶ。2021 年夏までの繰返し周期は 2.48 s であったが、繰返し周期短縮のために主電磁石用大型新電源の導入 [3]、RF 加速空洞システムの増強 [4]、リングコリメータシステムの増強 [5]、入射及び NU 用出射電磁石 (FX 電磁石) システムのアップグレード等が実施され、2022 年 6 月以降は 1.36 s に短縮した。2023 年 4 月に MR の設計値である 750 kW 出力での加速ビーム取り出しに成功した [6,7]。同年 12 月には 710 kW での利用運転に成功し、2024 年 6 月には 800 kW の利用運転にも成功した。

2. FX 電磁石

2.1 FX 電磁石のアップグレード

FX 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ポートダンプリン (ABT) に振り分ける電磁石であり、5 台のキッカー電磁石、2 式の低磁場セプタム電磁石 (低磁場セプタム)、4 式の高磁場セプタム電磁石 (高磁場セプタム) で構成されている。低磁場セプタム

と高磁場セプタムをまとめて FX セプタムと呼ぶ。MR のビームパワー増強のために行った FX 電磁石のアップグレードは電源改修による高繰返しへの対応及び新電磁石への交換であった。キッカー電磁石については電磁石用パルス電源の改修を行い、高繰返し対応の高出力電流且つ充電電圧波形を制御可能なパターン出力方式にした新充電用電源の開発と導入、PFN 回路内のシャント抵抗とシャントダイオードの改良を行った [8]。キッカー電磁石用電源の改修は 2017 年に完了した。低磁場セプタムについては薄いセプタムコイルの自己振動に対する耐久性への懸念解消、大口径化、発熱量軽減、周回ライン上の漏れ磁場軽減の必要性から新電磁石システムへの交換を行った。従来の約 1.5 s 長のパターン磁場出力方式から約 1 ms の短パルス磁場出力方式に変更し、渦電流型セプタム電磁石と新パルス電源を開発し導入した [9]。高磁場セプタムについては全て新電磁石への交換を実施した。電源については現行機が高繰返しに充分対応すると判断し、交換や改修は行わずそのまま使用した。

2.2 高磁場セプタムのアップグレードと新 SM32 電磁石コイル故障

高磁場セプタムは全てが約 1 T の磁場を発生させる電流型常伝導セプタム電磁石である。1 式の高磁場セプタムは 1 つの周回ラインと NU と ABT 用 2 つの取り出しラインを持ち、其々の取り出しライン上に印加する磁場は互いに逆向きである。4 式の高磁場セプタムはビーム上流方向からそれぞれ SM30、31、32、33 と呼んでいる。SM30、31 は 2 つの逆極性関係の磁場を 1 つの磁極内に組み込んだ 2 つの電磁石コイルで生成する両極性型である。周回ラインと取り出しラインの分岐が充分でない場所で使用する場合に有効である。SM32 と 33 は周回ラインと取り出しラインの分岐が充分なため、其々 2 台の独立の片極性電磁石を周回ラインに対して対称に配置させた構造となっている。新電磁石への交換対象は SM30、31、32 であり、新電磁石は 2015 年に製作した。2018 年から 2020 年に新 SM30、SM31 の通電試験と磁場測定による性能評価を行い、各電磁石は完

* tshibata@post.j-parc.jp

成した [10–12]。2021 年 10 月から高磁場セプタムの撤去作業と新電磁石の導入が開始された。新 SM33 については新 SM30、31、32 とは異なり、撤去された SM32 と SM33 の ABT 側の磁極、電磁石コイルと新規製作の SUS 製ビームダクトを用いて新 SM33 として再構築した。新 SM30、31 と新 SM33 の MR への導入は 2022 年 5 月に完了した [13]。一方、2021 年 8 月、新 SM32 の通電試験中に NU 側電磁石コイルで放電が発生し、ホロコネクタ (ホロコン) が損傷した。放電の原因はホロコン末端のターン形成部の施工不良によるものと断定した [14]。この損傷により 2022 年 5 月の MR へのインストールを延期し、新電磁石コイルの再製作が決定された。

3. 新 SM32 の復旧

3.1 新電磁石コイル製作と復旧まで

新 SM32 の新電磁石コイル (新コイル) 設計では、オリジナルコイルに対して幾つかの変更を加えた (図 1)。1 点目は放電事象の再発防止のため、ターン形成部はホロコン同士を直接ロウ付けするのではなくホロコンにロウ付けした銅板を通して導通する構造に変更した。2 点目はコイル直流抵抗値の大幅変更である。オリジナルコイルには直流抵抗値が小さいという問題があった。高磁場セプタム電源のインバータ回路は 2 石の IGBT で構成されているため立下りの制御ができず、立下り時間はコイルインダクタンス (L) と直流抵抗値 (R) の比で定義される時定数 ($\tau=L/R$) に比例する。オリジナルコイルの R は NU 側、ABT 側でそれぞれで $17.7\text{ m}\Omega$ (20°C 時) であり、 τ は約 160 ms であった。 τ が大きい事で高繰り返しに対応できなくなる可能性があったため、新コイルの R は電源の出力最大電圧 350 V 以下になる条件の下で高い値で設計した。まず導体の断面積を小さくするためホロコン断面をオリジナルコイルが $9\times 13.5\text{ mm}^2$ であったのに対し、 $9\times 9\text{ mm}^2$ に変更した。次にオリジナルコイルのリターンコイルには R を下げるために 1 ターン毎に断面積が $20\times 8\text{ mm}^2$ の補助導体をホロコンに並行してロウ付けしていたが、新コイルでは補助導体は取り付けない方針に変更した。その結果、新コイルの R は $37\text{ m}\Omega$ (20°C 時) となり、 τ は 107 ms となった。一方、導体断面積を小さくしたためセプタムコイル、リターンコイルともにコイル幅が大幅に小さくなったので、空いた空間は G10 板と BT 板で埋めた。3 点目はビーム上流部のコイル端部の内寸法の高さを 308 mm から 236 mm に変更した。コイル開口部の寸法を小さくすることで端部磁場が小さくなると期待できる。新コイルは NU 側、ABT 側で同時に製作はせず、故障した NU 側を先行して製作した。NU 側新コイルは 2022 年 11 月に完成し、ABT 側新コイルは 2023 年 3 月に完成した。

2022 年 6 月からのビーム運転には新 SM32 が使えなかったため、新 SM32 に代わる SUS 製のドリフト管を製作し設置した。新 SM32 の復旧は 2023 年夏メンテ期間に行う予定であった。しかし 2022 年 12 月、新 SM31 の NU 側コイルで新 SM32 と同様の放電現象が発生し、ホロコンに致命的な損傷を与えた。新 SM31、32 が故障したことでビーム取り出しが不可能となったが、早期復旧のため 2023 年 1 月、新 SM32 の NU 側新コイルを急遽導入する事で新 SM32 を仮復旧させた。新 SM32 用の

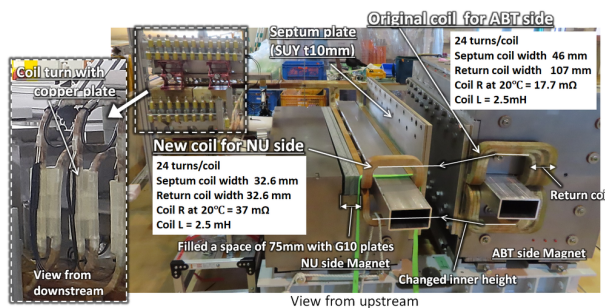


Figure 1: Photograph of new magnetic coil for NU side and original magnetic coil for ABT side.

真空ダクトはドリフト管をそのまま新 SM32 の磁極に組み込んで使用し、ABT 側コイルはオリジナルコイルを使用する事になったので、ターン形成部に十分な補強を施した。2023 年 3 月には他の高磁場セプタムも含めてフラットトップ (Flat Top; FT) 電流 $4,000\text{ A}$ の通電試験を 100 時間実行し、補強による耐久性が充分であることを確認した [15]。ABT 側新コイルの導入は 2023 年夏メンテ期間に行った。この導入時に SUS 製ドリフト管を正規の真空ダクトであるチタン製周回ダクトとセラミックス製取り出しダクトに交換した。新 SM32 の組立完了後、新 SM32 としては初めてとなる磁場測定を実施した。磁場測定の目的は磁極内磁場と周回ビームライン上の漏れ磁場の評価である。測定結果の詳細は次章で記述する。磁場測定完了後の同年 10 月、周回ダクトと 2 本の取り出しダクトに直径 750 mm の 1 枚の真空フランジを溶接した。溶接後の真空フランジとダクト間の真空リーク量は充分小さい $10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下であることを確認した。新 SM32 完成後、1 週間程の連続通電試験を行った。この試験では FX 用運転の電流パターンに設定し、フラットトップ電流 $3,500\text{ A}$ で約 130 時間、 $4,000\text{ A}$ で約 44 時間の通電を行った。通電試験で特に問題は発生しなかった。2023 年 11 月末から新 SM32 は完成形の状態で MR ビーム運転での運用が開始された (図 2)。2024 年 6 月末までのビーム運転中問題は一度も発生せず非常に安定した運転を行った。

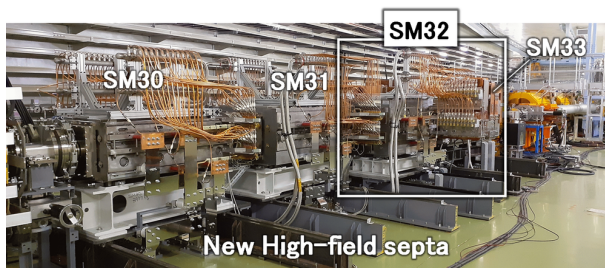


Figure 2: Photograph of new high field septa including new SM32 in Jan. 2024.

3.2 漏れ磁場対策

最後に新 SM32 への漏れ磁場対策について記述する。セプタム電磁石の最重要課題は周回ライン上の漏れ磁場

を極力軽減することである。新 FX セプタムの漏れ磁場はアップグレード前の FX セプタムに比べて大幅な漏れ磁場軽減を目指した。漏れ磁場の源はセプタム板から直接漏れる磁極内磁場と磁極端部に露呈しているコイルの生成磁場である。そして漏れ磁場軽減には磁気遮蔽が最も有効な方法であり、遮蔽体として我々は SUY (JIS 規格 C2504) [16] 相当の純鉄を使用する。新 SM30、31 では磁極端部にフィールドクランプ (FC) と呼ぶ SUY を素材とする磁気遮蔽体で端部コイルを覆う事で漏れ磁場を軽減させた。更にセプタム板からの漏れ磁場成分も含めた包括的な磁気遮蔽体として周回ダクト内に SUY 製のダクト型シールド (内部シールド) を設置する事で更なる漏れ磁場軽減を行った。内部シールド方式を選んだ理由は周回ダクトは磁極内に組み込まれており、ダクト外側に磁気遮蔽体を追加する空間がなかったからである。これらの対策によって新 SM30、31 の漏れ磁場はアップグレード前の 1% 以下に低減した [17]。新 SM32 についても同様の対策を施し、磁極端部のコイルに厚さ 15 mm の SUY 製 FC を設置した。新 SM32 の周回ダクト外側には磁気遮蔽体を追加する空間があったため、内部シールドではなくダクトを囲う外部シールドを追加した。外部シールドの厚さは天板と側板が 5 mm、底板が 12 mm である。全長は 1,510 mm であり、周回ダクトの全長 1,640 mm のほぼ全域を覆う構造にした。更に、2015 年の納品時に使用していた 10 mm 厚のセプタム板の成分解析を行った上で SUY 製の板に交換した。2020 年に実施した新 SM31 の漏れ磁場測定の結果、セプタム板の磁気飽和による大きな漏れ磁場が観測された [12]。磁気飽和の原因はセプタム板の材質にあると考えていたため、2020 年新 SM32 で使用されているセプタム板の成分解析を行った。その結果、SUY が満たすべき炭素の含有量 0.03% 以下に対して測定値は 0.098% であったため、セプタム板が SUY 相当ではなく炭素の含有量が 0.02~2% の炭素鋼である事を確認した。Ni は検出されなかったためパーマロイでない事も確認した。以上から使用されていたセプタム板に十分な磁気遮蔽能力がないと判断し、SUY 製の板を新規に製作し交換した。

4. 新 SM32 の磁場測定結果

2023 年 9、10 月、NU、ABT 側取り出しダクト内の磁極内磁場と周回ダクト内の漏れ磁場測定を実施した (図 3)。磁気センサーにはホール素子を用いた OECO (旧 F.W.BELL) 製の 8030 型ガウスメータを用い、磁場波形の記録には 16 ビットの AD 変換ボードを使用した。磁気センサーをビーム軸方向 (=s 方向) に沿って設置したルール上を移動させる事で s 方向分布と積分磁場 (BL 値) を測定した。更にレールの水平方向 (=x) の位置を変える事で、BL 値の x 位置依存性から高次成分を評価した。通電は FX 用の運転条件で行った。但し出力電流パターンの FT 部の時間幅はビーム運転時は 20 ms であるが、試験のため 50 ms に変更した。注意点は磁場測定のために敷設した試験用の電力供給用電線が生成する磁場である。本測定のために新 SM32 をビームラインから外周側に 1 m 程度並行移動させたため通常の通電に使用する電力供給用銅ブスバーの一部が使用できず、試験には一部電線を使用した。この試験用電線は電磁石周辺に敷

設する必要があるため電磁石周辺には電線が作る磁場が発生する。磁極内磁場測定には影響ないが、周回ダクト内の漏れ磁場測定には影響した。

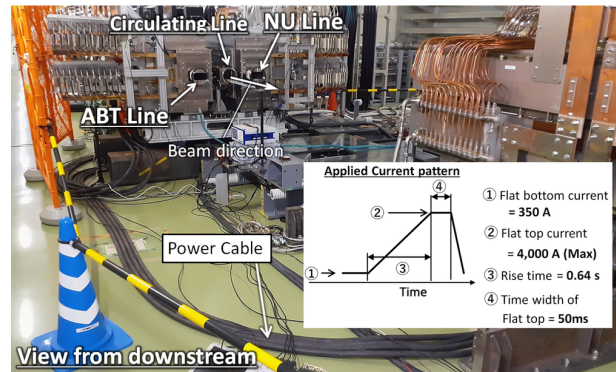


Figure 3: Photograph of field measurement of new SM32 at MR tunnel in 2024.

4.1 線形性確認

印加電流値と NU 側の磁極内磁場の線形関係を測定した。印加電流値と磁場は FT の値を使用した。図 4 に FT 電流値を 500 A から 4,000 A の範囲で変化させた時の磁極内磁場との相関を表示する。黒線は 2 次関数で定義したフィッティング結果である。赤線は設計値であり、電流に比例する 1 次関数である。この結果から 3,000 A までは良い線形性を持ち、3,000 A 以上で磁気飽和による設計値からのずれを確認できた。FT 電流値 4,000 A で設計値からのずれは 1.6% であり、この量は漏れ磁場や発熱量に寄与する。つまり 3,000 A 以上になると漏れ磁場が上昇する事が予想できる。但し、現在の NU、HD 運転での新 SM32 の FT 電流値は最大で 3,000 A であるため、ビーム運転時は磁気飽和がほぼない非常に小さい漏れ磁場である事が期待できる。測定磁場の絶対値の精度は 2017 年に行った NMR との比較結果と 2019 年に行った ≈ 0.2 T の C 型永久磁石を用いた較正の結果から $\approx 0.3\%$ であると評価した。

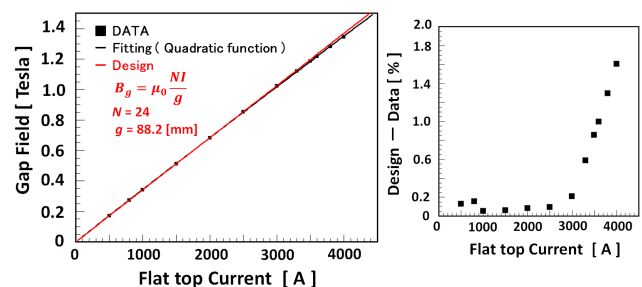


Figure 4: Linearity between flat top current and gap field (left), and difference between design and data (right).

4.2 磁極内磁場測定

磁極内磁場は主に NU 側で測定し、ABT 側は NU 側との比較のために取り出しダクト中心 ($x=0$ mm) のみで

測定した。FT 電流は 4,000 A で固定した。図 5 に NU 側と ABT 側の $x=0$ mm の位置で測定した磁極内磁場の s 方向分布を示す。両方の磁場構造に特に問題はない事が確認できた。また NU 側と ABT 側で磁場の絶対値は平坦部で ≈ 2 gauss(0.014%) の違いしかなく、非常に良く一致している事が確認できた。次に BL 値の高次成分の評価をするため x 方向に ± 28 mm の範囲で磁気センサーを移動させて測定した。図 6 に BL 値の x 方向依存性を示す。誤差棒は統計誤差 ($\approx 0.01\%$) のみを使用した。NU 側と ABT 側の BL 値の差は 0.08% であった。2024 年の時点で新 SM32 は NU 側コイルと ABT 側コイルで独立電源によって励磁するシステムになっており、互いに独立に微調整が可能である。よって NU 側と ABT 側で同一電流による完全対称性は要求されない。しかし電磁石は対称構造であるため、対称性の確認は重要である。NU 側と ABT 側の差はビーム運転時の FT 電流値である 3,000 A に対して ≈ 2.4 A の違いに相当する。この差は出力電流の微調整量に比べて小さく両者が充分対称である事を確認した。高次成分については四重極成分 (Q 成分) が確認できた。 ± 28 mm の範囲での差は $\approx 0.18\%$ である。この差は 3,000 A に対して 5.4 A に相当する。この差もビーム取り出し軌道調整の微調整範囲以下であるため、 x 方向によるビーム取り出し軌道の違いが問題になる事はないと判断した。ビーム取り出し軌道は主に NU 一次ビームライン上に設置されている ESM01 や SSEM01 上 [18] でのビーム位置を観測しながら調整する。新 SM32 の位置での取り出しビームサイズは全幅で ≈ 40 mm(3σ) であるので $\approx 0.18\%$ の差はビームエンベロープ付近の粒子に影響を与えるが、 x 方向のビーム位置とビーム方向の変位量は ≈ 0.1 mm、 ≈ 0.02 mrad であり特別大きな量ではない。磁極内磁場測定の結果、NU 側と ABT 側の磁場構造に問題はなく、両者は充分対称である事、Q 成分も小さい事を確認できた。

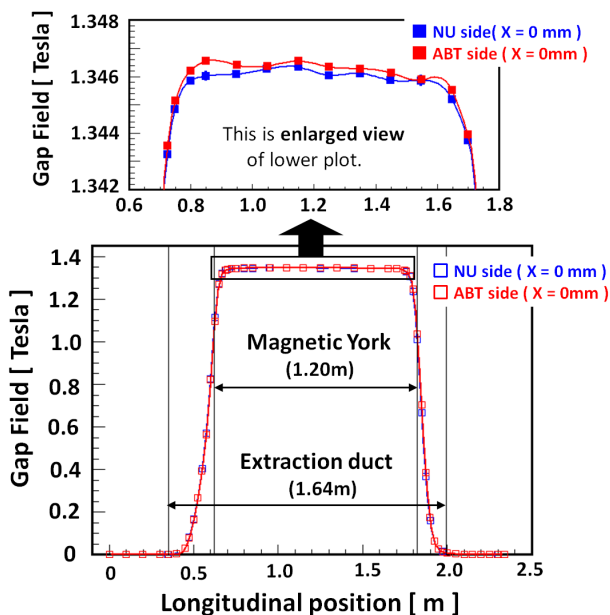


Figure 5: Gap field depends on longitudinal position in NU and ABT side extraction duct.

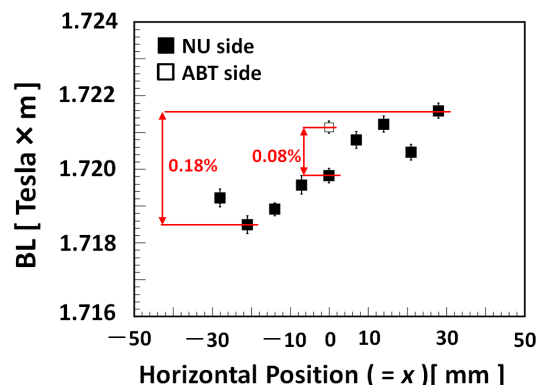


Figure 6: Field integral depends on horizontal position in NU side extraction duct.

4.3 周回ライン上の漏れ磁場測定

漏れ磁場測定では残留磁場も重要な測定対象である。新 SM30、31 の漏れ磁場測定結果から残留磁場が FB 電流による励磁磁場よりも大きく、顕著な磁場構造を持っている事が分かった。つまり残留磁場は MR へのビーム入射時の低エネルギー陽子に影響を与える。その空間分布は電磁石本体、周回ダクト用磁気シールドの磁化だけでなく地磁気や周辺の磁性体の磁場も含むため複雑な構造を持つと予想でき、実測定が不可欠である。残留磁場は $x=0$ mm の位置のみで測定した。本測定では試験用電線による磁場も観測されると予想できるが、分離は困難であるため全ての磁場を含めた解析を行った。漏れ磁場の高次成分は特に重要である。アップグレード前の旧 FX セプタムは漏れ磁場の Q 成分が非常に大きく、FX セプタム付近に設定されているトリム 4 極コイルを使用した漏れ磁場補正が必要であった。漏れ磁場の高次成分の評価をするため x 方向に ± 25 mm の範囲で測定した。FB 電流、FT 電流はそれぞれ 350 A、4,000 A で固定した。

図 7(上) に残留磁場と FB 電流印加時の励磁磁場の s 方向に沿った位置依存性の測定結果を示す。残留磁場と FB 電流印加時の励磁磁場では磁極内領域での値がほぼ同じであり、磁極内領域磁場は残留磁場が支配的である事が分かる。その大きさは ≈ -0.2 gauss であった。ビーム下流側領域では残留磁場と FB 電流での励磁磁場に大きな差が見られる。残留磁場が示す約 $+0.4$ gauss の磁場は方向が上から下向きの磁場であるため主に地磁気である。励磁磁場の $\approx +1.1$ gauss の内、地磁気分を差し引いた $\approx +0.7$ gauss は試験用電線による磁場であると推測した。ビーム上流側領域にも残留磁場と励磁磁場に差が確認できる。ビーム上下流領域に見られる残留磁場の大きさに差が見られるのはビーム上流側の方が磁極端部までの距離が近いこと、磁極や FC の残留磁場の影響を受けている事が原因であると推測できる。残留磁場による BL 値は -0.414 ± 0.004 (stat.) gauss-m であった。3 GeV 陽子ビームの偏向角で 0.003 mrad であり、 x 方向の変位量で $7.8 \mu\text{m}$ である。この値はビーム補正量としては無視できる量である。新 SM30、31 の残留磁場による BL 値は $+0.23$ gauss-m [17] であり、ほぼ同じ値であった。新 SM30、31、32 の残留

磁場による BL 値の合計は $-0.18 \text{ gauss}\cdot\text{m}$ である。次に FB 電流による励磁磁場の Q 成分を測定した結果を図 7(下) に示す。各 BL 値の誤差は統計誤差 (≈ 0.004) と系統誤差 (≈ 0.088) の二乗和を使用した。系統誤差は $s=0 \text{ m}$ での測定磁場から算出した。 $s=0 \text{ m}$ 付近の磁場は試験用電線による磁場と地磁気が主に寄与しているため $x=\pm 25 \text{ mm}$ の範囲内ではほぼ一定値に近いと推測し、測定した 7 点の平均値からのずれの pk-pk から決定した。Q 成分は integrated normal quadrupole coefficient ($K_1L = \frac{d}{dx} (\int B(s)ds) / (B\rho)$; $B(s)$ は磁束密度、 $B\rho$ は beam rigidity) を求める事で評価した。測定の結果、 $K_1L = (-0.7 \pm 1.5) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ であった。旧 SM32 の FB 電流での K_1L 値は $\approx -2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ [19] であったため、Q 成分は 1% 以下に低減した事が確認できた。

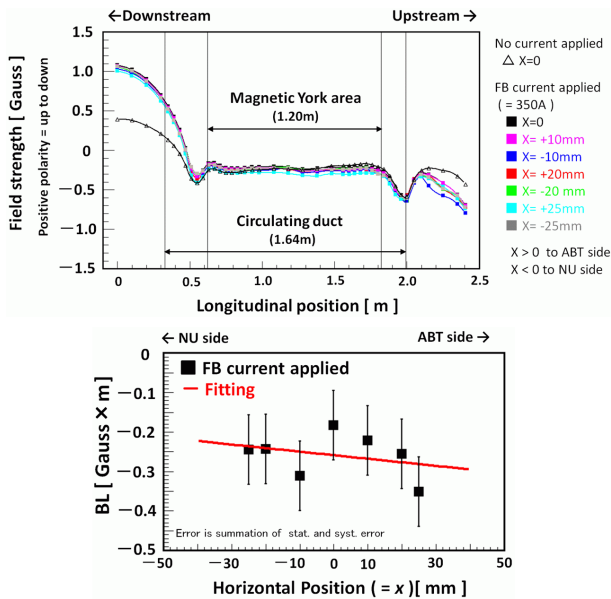


Figure 7: Field strength with FB or No current depends on longitudinal position in circulating duct (upper), and its Field integral depends on horizontal position (lower).

図 8(上) に FT 電流印加時の励磁磁場の s 方向に沿った位置依存性の測定結果を示す。各 BL 値の誤差は統計誤差 (≈ 0.008) と系統誤差 (≈ 0.088) の二乗和を使用した。ビーム上流側領域に Q 成分が見れるが、磁極内領域及びビーム下流側領域には x 方向の違いによる差がほぼない事が分かる。図 8(下) に FT 電流による励磁磁場の Q 成分を測定した結果を示す。顕著な Q 成分が確認できるが、ビーム上流側領域に見られた Q 成分の寄与である。但し、 K_1L の値は $(-1.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ であり、充分小さい値である。新 SM30、31 の K_1L の値は $(+0.9 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ [17] であったのでほぼ同等の値である。注意点は二極成分である BL の絶対値である。本測定ではビーム下流側領域に見られる試験用電線による磁場も含めた測定を行ったため、正しい二極成分の評価ができなかった。

以上の結果から新 SM32 の漏れ磁場はビームに影響を与えない非常に小さい寄与である事が確認できた。

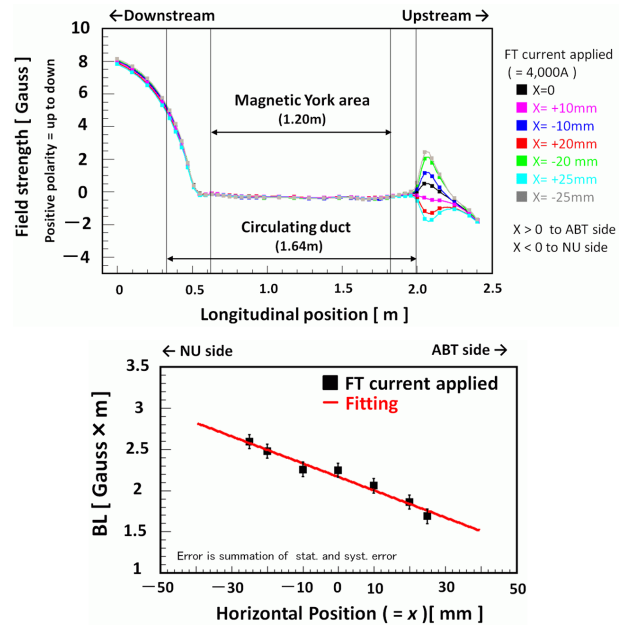


Figure 8: Field strength with FT current depends on longitudinal position in circulating duct (upper), and its Field integral depends on horizontal position (lower).

5. まとめ

2021 年 8 月に速い取り出し用新高磁場セプタム電磁石の 1 つ新 SM32 の電磁石コイルが放電によって損傷した。新しく製作した新電磁石コイルは同じ放電事象が発生しないような構造に変え、直流抵抗値を上げる事で立下りの時定数を下げる工夫を与えた。NU 側新コイルは 2022 年 11 月、ABT 側新コイルは 2023 年 3 月に完成した。2023 年夏メンテ期間中に新 SM32 の完全復旧を行った。磁場測定の結果、磁極内磁場に問題はなく、漏れ磁場については 3-GeV の低エネルギー陽子に影響を与える事で問題になっていた四重極成分は旧 SM32 の 1% 以下に低減できた。完全な状態での新 SM32 でのビーム運転は 2023 年 11 月から開始され、2024 年 7 月時点で問題は発生していない。FX セプタムの復旧により NU 向けのビーム強度増強が着々と成果を上げ、2024 年 6 月には 800 kW の安定した利用運転を実現した。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] S. Igarashi *et al.*, "Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring", in *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2021, p033G01. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [3] K. Miura *et al.*, "J-PARC MR 高繰り返し化に向けた主電磁石電源のアップグレード", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 400-403. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUP0/TUP039.pdf
- [4] K. Hasegawa *et al.*, "Status and Upgrade plan of the MR

- Ring RF systems in J-PARC”, Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference, Thailand, June. 12-17, 2022, pp. 2031-2033. <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2022/papers/wepotk004.pdf>
- [5] M. Shirakata *et al.*, “J-PARC 主リングのビームコリメータ7台体制”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 756-760. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/THP0/THP017.pdf
- [6] T. Yasui *et al.*, “J-PARC MR Operation with the high repetition rate upgrade”, Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference, Italy, May. 7-12, 2023, pp. 1276-1280. <https://www.ipac23.org/preproc/pdf/TUXG1.pdf>
- [7] Y. Sato *et al.*, “J-PARC 主リングの高繰り返し化改造後のビーム運転”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 29- Sep. 1, 2023, WEOB4.
- [8] T. Sugimoto *et al.*, “J-PARC メインリング 速い取り出しキッカー電磁石システムのアップグレード”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp. 1061-1064. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP077.pdf
- [9] T. Shibata *et al.*, “The new eddy current type septum magnet for upgrading of fast extraction in main ring of J-PARC”, Journal of Phys. Conf. Series, vol. 2420, p. 012078, 2023. doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012078
- [10] T. Shibata *et al.*, “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”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Jul. 31- Aug. 3, 2019, pp. 85-89. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/TH0H/TH0H05.pdf
- [11] T. Shibata *et al.*, “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)”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 388-392. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP51.pdf
- [12] T. Shibata *et al.*, “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)”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, pp. 826-830. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/THP0/THP014.pdf
- [13] S. Iwata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用新セプタム電磁石のインストール”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 901-905. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRP0/FRP006.pdf
- [14] S. Iwata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用新セプタム電磁石の故障への対応”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 170-174. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROA/FROA05.pdf
- [15] S. Iwata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用新セプタム電磁石コイルの製作不備への対応”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 29- Sep. 1, 2023, WEP22.
- [16] <https://kikakurui.com/c2/C2504-2000-01.html>
- [17] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用セプタム電磁石の漏れ磁場測定”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 29-Sep.1, 2023, pp. 324-329. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TUP/TUP18.pdf
- [18] K. Abe *et al.*, “The T2K Experiment”, in *Nucl. Instrum. Meth.*, A659, 2011, pp 106-135. doi:10.1016/j.nima.2011.06.067
- [19] S. Igarashi, private communication, January 2015.