

J-PARC 主リング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 SOLUTIONS FOR MANUFACTURING DEFECTS OF THE NEW SEPTUM MAGNETS USING FOR FAST EXTRACTION IN J-PARC MAIN RING

岩田宗磨^{#, A)}, 石井恒次^{A)}, 芝田達伸^{A)}, 五十嵐進^{A)}, 發知英明^{A)}, 大森千広^{A)},
佐藤洋一^{A)}, 高柳智弘^{B)}, 松本教之^{A)}, 松本浩^{A)}

Soma Iwata^{#, A)}, Koji Ishii^{A)}, Tatsunobu Shibata^{A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Hideaki Hotchi^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)},
Yoichi Sato^{A)}, Tomohiro Takayanagi^{B)}, Noriyuki Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}

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

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

Efforts are being made to increase the beam power in the J-PARC main ring. The fast extraction (FX) section for the neutrino beam line was also upgraded, involving the replacement of two low-field septum magnets (SM) and three high-field SMs over a year from summer 2021. Just before the beam commissioning in December 2022, it was confirmed that each turn of all coils for the new high-field SMs were joined by soldering rather than by brazing. The currents in the two hollow conductors joined at the coil formation are in opposite directions, resulting in repulsive forces. The soldered joints in the coil formation experienced insufficient strength with each current pulse, leading to actual instances of detachment and discharge. As coil remanufacturing requires time, we decided to modify the existing coil to supply the beam. By soldering an additional copper plate to the soldered part and increasing the joint area, the resistance to peeling was improved. The support fittings at the joint were also strengthened. Additionally for the high-field SMs that have durability issues we lowered their operation current to reduce the load. Cameras were installed inside the tunnel to monitor the discharge, and new voltage monitors were introduced to detect increases in resistance when the detachment occurs. After implementing these countermeasures, beam operation has been carried out since January 2023. This paper describes a series of events and solutions.

1. はじめに

J-PARC 主リング(MR)は速い取り出し(FX)によりニュートリノ実験施設(NU)へ高強度陽子ビームを供給している。現在はニュートリノ振動測定[1]の統計量の向上のため、ハイパーカミオカンデ[2]の建設が進められており、MRも高出力化を計画している。運転周期を2.48秒から1.16秒に短縮し、周回ビーム粒子数も30%増しにすることで、出力1.3 MWへの増強[3]を目指す。2023年4月には、運転周期1.36秒にて、750 kWを達成[4]した。

MR高出力化においてFX電磁石もアップグレードが必要となり、Fig. 1に示すとおり低磁場セプタム電磁石2台(EDDY1, EDDY2)と高磁場SM3台(SM30, SM31, SM32)が2021年7月から2022年5月にかけて更新[5]された。ビームはFX機器により、MRリング内側のNUへ取り出すのと同時にリング外側のアボートへも取り出される。上流にあるキッカー電磁石の励磁電流方向を変えることで取り出し側を決めている。このためFX SMは両側に磁場が反対向きになるような磁石構造となっている。

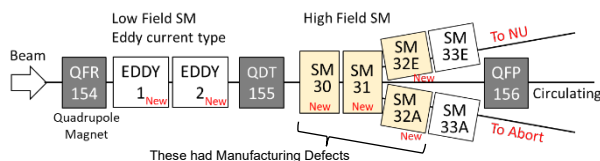


Figure 1: FX SM layout.

低磁場SMは、パターン通電の電流型からパルス通電の渦電流誘導型(EDDY)に変更している。渦電流誘導型のセプタム電磁石は、セプタム部にコイルを持たないため構造が簡単で、耐久性の向上やアパーチャ拡張が容易である。またパルス通電により発熱が少なく、漏れ磁場の低減も期待できる。

高磁場SMは、上流側にある四極電磁石QDT155の更新計画があり、磁極長短縮と設置位置変更が必要となる。QDT155は出射ビームに対して垂直アパーチャが狭いため、大口径なものを製作中である。大口径QDT[6]は収束磁場長を確保するため磁極長が長くなり、積分磁場長に少し余裕のある高磁場SMの磁極長を短くする。またSM30, SM31, SM32は出射ビームのダクト2本(ニュートリノライン側とアボート側)と周回ビームダクトの合計3本が互いに近接するため、1つのフランジに溶接される。ダクトが金属製だとダクト間に励磁パターンに応じたループ電流(ダクト間で誘導される渦電流)が流れる。高繰り返し運転では発熱が100°Cを超えると予想される。

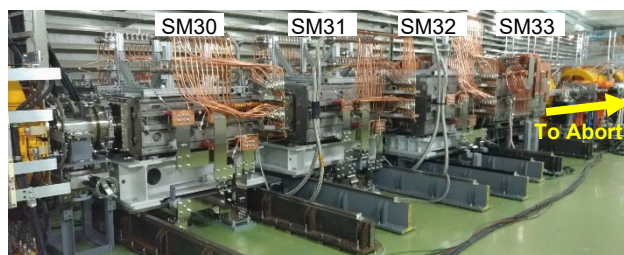


Figure 2: High field SM.

[#] soma.iwata@kek.jp

ため、出射側の2本のダクトをセラミック製に変更した。SM33については、アポート側(SM33A)はそのまま旧SM33Aを使用し、ニュートリノ側(SM33E)は垂直アパーチャの大きな旧SM32Aを再利用することにした。Figure 2に新しく設置された高磁場SMの写真を示す。

SM30、SM31、SM32の新規製作に伴い、問題となっていた漏れ磁場の低減も同時に改善[7]する。旧取り出しセプタム電磁石群は周回ビームライン上に大きな漏れ磁場を有しており、繊細なビーム操作を難しくしている。漏れ磁場の量にして1/100程度、磁石あたり1 Gauss・m程度を目標に低減化を図ることにした。

2021年FX SMのインストール作業の際、SM32のコイルに初期不良[8]が見つかった。このためSM32はインストールを断念し、他のSM励磁量を上げることでビーム運転を開始することにした。2022年6月ビームエネルギー3 GeV(入射エネルギー)でのビーム試験は無事終了したが、同年12月に予定された30 GeVのビーム試験は、直前に製作不備がさらに見つかり、延期となってしまった。新しいSM30、SM31、SM32はいずれも同じメーカーが製造し、2015年に納入されたものである。以下に、これら製作不備、及びその後の対処に関して詳述する。

2. コイルの製作不備

2022年12月、30 GeVビーム試験開始直前の通電状態でSM31のNU側コイルで熔融、漏水が起きた。熔融箇所は、コイルの各ターンを接合している部分である。高磁場SMのコイルは1ターンごとに冷却水路を持つため、各ターンは冷却水の給排水のために、磁極外へホロコンダクター(ホロコン)を引き出している。その給排水口の近くでホロコン同士が接合され、ターン間の接合がなされてコイルが形成されている。コイルの構造をFig. 3に示す。またFig. 4に示すようにホロコンがひどく損傷し、使用不能となった。銅が融解しているが、しきい値80°Cの温度センサは反応していない。60 mmほどの距離があることと冷却水が継続して流れていたため、温度センサまで熱が伝達しなかったと考えられる。

SM31で起こった原因を調査していた際、溶解し飛散した接合材料の金属片が柔らかいことに気づいた。調べた結果、ホロコン接合がはんだ付けで施工されていることが判明した。本来であれば、十分な強度を持つロウ付けで施工されるべきである。ホロコン接合部には、あるターンから次のターンへ電流が流れるが、接合部付近の2本のホロコンの電流の向きは逆になるのでアンペール力は斥力となる。発生時の電流について、パターン通電のフラットトップで4000 A程度となっており、この時の斥力の大きさは20 N程度と推定できる。大きな力ではないが、通電試験も含めてすでに100万回程度の負荷がかかっており、強度不足による疲労蓄積に耐えられず、ホロコン同士が剥離したものと推測される。剥離で放電が起こり、ホロコンの融解から漏水に至ったと考えられる。

SM30、SM31、SM32は同じメーカーで製作されていることから、初期不良で使用不能となったSM32のコイルのホロコン接合部を破壊検査した。いくつかの接合部では簡単に人の手で剥がせるものがあった。またはんだ付けしてあるホロコンの表面は磨き残しがあり、錆や汚れが付着していた。はんだ不良が発生しやすい状況と言える。

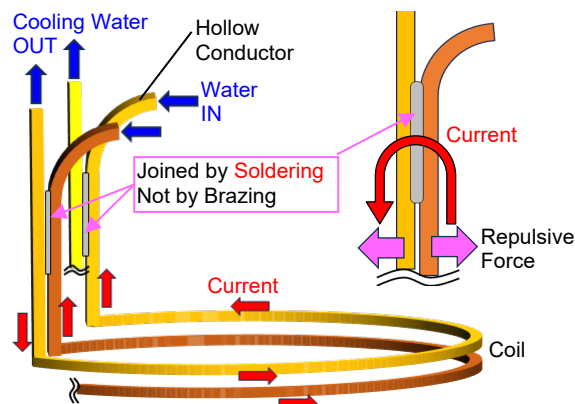


Figure 3: Overview of the coil for high field SMs.

SM32コイルの初期不良は2つあり、ホロコンの曲げ部に生じていたクラックからの漏水と、今回と同様のターン間接合部で起きた放電であった。後者は明らかにのはんだ付け施工に起因したものと考えられる。2021年7月の初期不良発見の際に、ロウ付けされているものと疑わず、はんだ付けであることに気付けなかったことが悔やまれる。

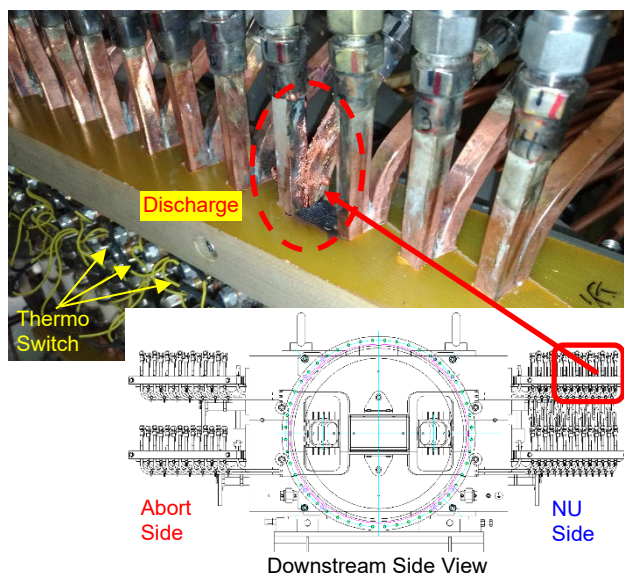


Figure 4: Discharge point of SM31.

はんだ付けを撤去してロウ付けに変えてしまうができないかの検討を行ったが、ロウ付け時の熱でエポキシ樹脂モールドが炭化し、絶縁性能が劣化することが協力メーカーから指摘された。複雑に曲げられ、密集したホロコンの束に施された、ガラス布を含むモールドを除去し、ロウ付け後に再モールドするのは非常に困難で、再製作したほうが将来的にも心配なく使用できるとの結論に至った。SM32はすでにコイル再製作に動き出しており、2023年夏にロウ付けされた新たなコイルに交換する。SM31も新規にコイル製作を行い、2024年夏の交換を目指す。また問題の起こっていないSM30に関しても新規コイルの製作を検討している。

3. はんだ付けコイルを使用するための対策

コイル再製作を行う方針と定めたが、再製作は時間がかかるため、現行のはんだ付けコイルを再利用してビー

ム運転を継続させる必要がある。はんだ付けコイルを使用するにあたり、接合部の剥離を生じさせない工夫が必要である。剥離が始まると、ホロコン間に生じる斥力を抑えられなくなり、隙間が生じて放電する。剥離しないように物理的に強度を上げる方法と、生じる斥力を小さくする方法が考えられる。一方で、剥離が生じたとして損傷を最小限にするための安全対策も必要である。剥離によって接合部の接触面積は減るので、電気抵抗は反比例して上昇し、電源側の出力電圧が上昇する。また放電により出力電圧がパルス状になることも考えられる。電源出力電圧の監視を行って電源を停止するインターロックを導入した。加えて漏水センサを用いた電源停止インターロックと、放電光をカメラで監視する安全対策を施した。

3.1 はんだ付け接合部の補強

2 本のホロコンのはんだ付け部分の両側面に、厚さ 2 mm の銅板をはんだ付けして、はんだ付けの接触面積を 5 倍に拡張することにした。銅板はんだ付け後の写真を Fig. 5 に示す。事前に不良コイルで試験を繰り返して施工方法を確立し、破壊検査を行って均一で強固な接合面が得られることを確認した。コイル再製作が間に合わない SM30 と SM31 の両側、SM32 のアボート側、接合部で約 120 箇所、補強を実施している。はんだ付け作業は、熱がモールド部分に伝わらないよう、作業箇所とモールドの間に濡れた布を巻いて行う。モールド付近の温度は 80°C を超えないように施工した。

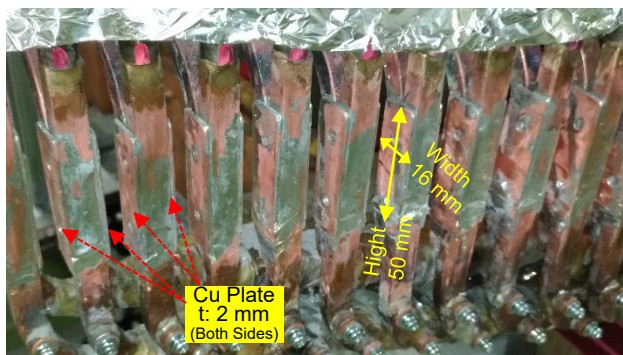


Figure 5: Reinforcement by soldering Cu plates.

ホロコン接合部にはガラスエポキシ製のガイドが元々設けられている。ホロコン位置に合わせてガイド形状が設計されているが、ホロコンとガイドには隙間があり、面接触で十分に固定されているわけではない。点接触では振動の余地があると考えられるため、ホロコン同士に

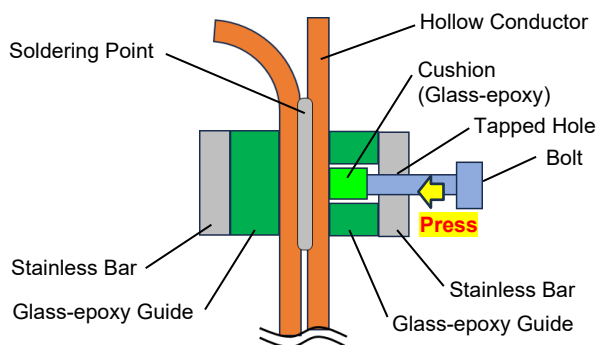


Figure 6: Structure to fix the soldering point.

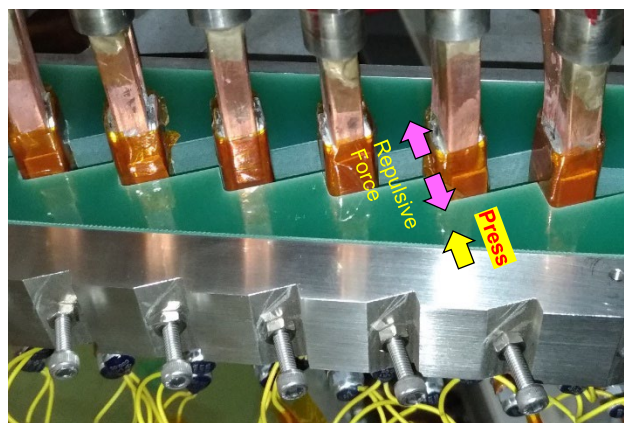


Figure 7: New guide to press hollow conductor joints individually.

働く斥力を抑え込む方向にボルトを挿入し、個々の接合部を強固に締め付けることにした。構造を Fig. 6 に、また実際に改造したガイドを Fig. 7 に示す。ボルトがホロコンを押す力は、各ボルトを保持するステンレスバーのたわみからおよそ 200 N~300 N と推定され、発生する斥力の 10 倍程度となっている。

銅板はんだ付けは、製作不備の発見後すぐに試験と施工を行い、2023 年 1 月中旬に完成した。しかし新ガイドの製作には時間がかかり、同年 3 月の完成となった。ビーム試験のスケジュールは後述するが、1 月末~2 月に 8 GeV 取り出しのビーム運転を行った際は、場所によって既存ガイドにエポキシパテを埋めたりシム板を挟んだりした補強で、ホロコン接合部の固定を行っている。

3.2 高磁場 SM の低電流運転の検討

ホロコン接合部に生じる斥力を低減できれば、はんだ付け部に蓄積する疲労を軽減でき、寿命を延ばすことができる。アンペア力は電流の 2 乗に比例するので、少しの電流低減でもその効果は大きい。4 台の高磁場 SM を稼働させることが鍵となる。

放電のあった SM31 の NU 側のコイルを再利用するには、放電した 2 ターンをバイパスし、健全なターンのみで運転できるようにする必要がある。放電コイルは上側コイルであるため、バイパスすると上下コイルでターン数が異なり、結果として磁場の非対称が生じる。シミュレーションした結果、上下での非対称性は 1 % 程度の素直な歪みであり、1 ターン取り出しでもあるため、バイパスして再利

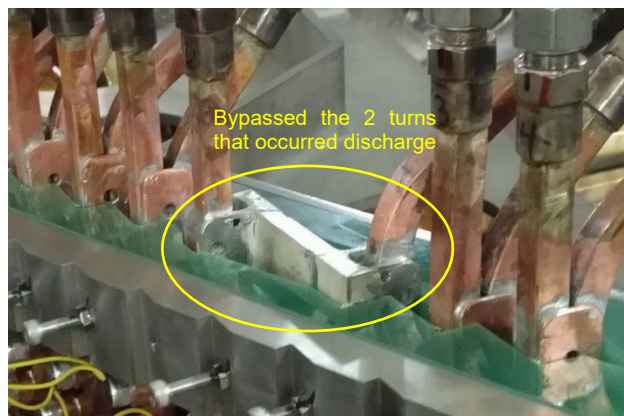


Figure 8: Repaired NU Side coil of SM31.

用することにした。なお NU 側はアボート側に比べ 2 ターン分の 7 % 程度磁場が低くなるが、SM32+SM33 は NU 側とアボート側で電源が分かれているため、励磁電流でその分の調整を行う。作業自体は 2023 年 3 月に実施し、1 月末～2 月の 8 GeV 取り出しビーム運転はアボート側のみでの使用であるため、給電配線の組み替えで対応した。施工状況を Fig. 8 に示す。

2022 年 12 月時点では SM32 は初期不良でインストールされていない。初期不良は NU 側コイルであったが、NU 側の新規製作コイルは 2022 年秋に納品されていたため、問題のなかったアボート側の旧コイルと組み合わせで SM32 とし、復旧することにした。作業は 2023 年 1 月に完成している。

4 台揃ったの運転に目途がたったので軌道計算を行い、高磁場 SM の通電電流を極力抑え、かつ NU へのビーム供給条件を満たし、輸送経路のアパーチャにも干渉しない解を求めた。軌道計算には SAD コード[9]を用いた。計算で使用したビーム条件は、エミッタンス = 15π mm mrad (3σ 相当)、Closed Orbit Distortion (COD) = 1 mm、 $\Delta P/P = 0.4\%$ としている。計算結果を Table 1 に示す。SM30 と SM31 で電流値が低減されるのに対し、取り出し後の位置と角度を保存するため、EDDY1、EDDY2、SM32+SM33 の電流値が増加している。それでも高磁場 SM に関しては全て 3100 A 未満となっている。SM31 を例にとると、デザイン値 3420 A と比べ斥力は 18 % となる。はんだ付け部分への疲労蓄積を軽減し、寿命の伸びが期待できる。また Table 1 のパラメータは 2023 年 4 月の 30 GeV ビーム運転で使用しており、問題なく NU 側にビーム供給を行っている。

Table 1: Parameters for 30 GeV FX

Item	Design Value	Flat Top Current [kA]		
		Without SM32 Discharge occurred in SM31	NU side coil of SM31 bypassed 2 turns by discharge	
			NU Side	Abort Side
EDDY1	6646	4722	9204	
EDDY2	6646	10879	5809	
SM30	3750	3820	3090	
SM31	3420	3956	3090	
SM32	2882	Not Used	3072	2967
SM33		4007		

3.3 出力電圧インターロック

前述の 3.1, 3.2 は、ホロコンの剥離を発生させないための対策だが、十分とは言いきれない。仮に、剥離から放電が発生したとして、それに瞬時に気付けない場合、放電が繰り返され、本件の事象と同様にコイルが使用不能になる。また最悪の事態として、火災の可能性も否定できない。剥離による電気抵抗上昇や放電は、電源出力電圧に変化をもたらす。これを監視し、異常時にイン



Figure 9: Output voltage monitoring module.

ターロックで電源を停止することにした。製作した電圧監視モジュールを Fig. 9 に示す。各高磁場 SM 電源の電圧モニタ信号を監視モジュールに入力する。モニタ信号の電圧は電源出力の 1/100 となっている。モニタ信号の電圧があらかじめ設定しておいた上限しきい値を超えた場合に、電源停止のインターロック信号を出力するようにした。しきい値はノイズレベルを加味して調整しており、波形のピーク値の +0.2 V (+10 %) 程度であった。

3.4 漏水インターロックと放電のカメラ監視

コイルが溶解して漏水まで至ってしまった場合、もはやそのコイルは使用できない。しかしながら少しでも早期に発見するということや、漏水量を減らすという観点から、漏水センサを用いたインターロックを導入することにした。センサ部は 25 m の長さがあり、水が付着すると無電圧接点が発動する。トンネル内の床に設置し、接点を地上にある電源の外部インターロックに接続した。

加えて監視カメラを設置し、ホロコン接合部に放電が発生したことを目視確認できるようにした。こちらは即座に電源停止することはできないが、加速器オペレータが瞬時に状況を把握できることは重要である。監視カメラは放射線環境下に置かれるので、シールドボックスに入れている。監視カメラの映像は、加速器制御室の加速器オペレータの視野に入る位置に設置したディスプレイに表示される。表示された映像と監視カメラを Fig. 10 に示す。

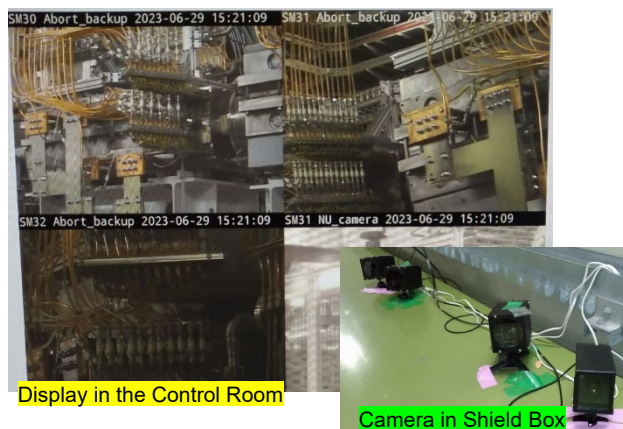


Figure 10: Discharge monitoring camera.

3.5 対策後の通電試験

全ての対策を施した上で、2023 年の 3 月に 200 時間程度の 3500 A ~ 4000 A 通電試験を実施した。日中は 4000 A、監視人員が少なくなる夜間は 3500 A、それぞれ

100 時間以上、通電試験を実施している。途中、通電を中断して、はんだ付け部分と Fig. 7 のホロコン押し付けボルトに異常がないかの点検を行っている。終了後を含めて異常は見られず、この通電試験は 4 月の 30 GeV のビーム運転実施の判断となった。

4. ビーム運転

4.1 8 GeV ビーム運転

2023 年 1 月から 2 月にかけて、ハドロン実験施設(HD)へ向けた遅い取り出し(SX)の 8 GeV ビーム運転が実施された。MR 機器で異常が起きた際にはビームをアポートさせる必要があるため、SX 運転においても FX 機器は稼働する。また HD へ取り出されずに MR 内に残ったビームもアポートする必要がある。はんだ付けコイルへの対策は一部未完成であったが、以下の 3 点を考慮して運転を実施することにした。

- 8 GeV 運転における高磁場 SM の通電電流は 1000 A 程度と低く、はんだ付け部への負荷は小さい。
- 既存のガイドとホロコンの隙間にシム板やエポキシパテを埋めることで、点接触から面接触の固定を実現した。
- NU 側へのビーム供給がないことから、SM31 の放電のあったコイルへ通電しないよう配線を組み替え、全 4 台での運転を可能にした。

また、この 8 GeV ビーム運転は、その後の 30 GeV ビーム運転を実施できるか判断する上で、重要な意味を持つ。低電流とはいえ 1 か月ほどの長いビームタイムを問題なく終えられたことで、各対策が有効であることが示せた。

4.2 30 GeV ビーム運転

全ての対策を完了し、通電試験を経て、2023 年 4 月に 30 GeV ビーム運転を実施した。期間は 1 週間弱と短かったが、異常等は見られていない。前述 3.5 の通電試験結果と併せ、今後の 30 GeV 運転に耐えうるものと期待している。またこの運転では、1.36 秒周期の運転で 750 kW 供給を達成している。高磁場 SM のコイル再製作と交換作業が残っているが、MR 高繰り返し化の大きなマイルストーンが 1 つ達成できたと言える。

5. まとめと今後の課題

MR 高出力化に向けて FX SM のアップグレードを行ってきた。高磁場 SM の SM32 で初期不良、さらに SM31 ではホロコン接合部がロウ付けではなくはんだ付けという製作不備が発見された。SM30 を含む新規製作された 3 台の SM コイルは、再製作を行って交換することにした。再製作に時間を要するため、はんだ付けコイルの接合部を補強して、ビーム運転に備えることにした。

はんだ付け部分が剥離しないよう、2 mm 厚銅板を側面にはんだ付けし、接触面積を 5 倍に増やした。また、ホロコン自体を個々にボルトで押さえるようにガラエポ製のガイドの改良を行い、ホロコン間に発生する斥力の 10 倍程度の力で抑え込むようにした。さらに、発生する斥力低減のために、高磁場 SM の通電電流を抑える軌道を確認した。放電が発生した SM31 では、設計パラメータと比較して、斥力を 18 %低減している。また安全対策を

実施し、損傷を最小限にできるよう監視体制を準備した。対策後は 3500 A と 4000 A、それぞれ 100 時間超の通電試験を行い、健全性の確認を行った。2023 年 4 月には 30 GeV 取り出しでのビーム運転を実施し、750 kW の出力増強を達成している。

再製作されたコイルは、SM32 が 2023 年夏、SM31 が 2024 年夏、SM30 が 2025 年夏に、それぞれ導入予定である。従って、はんだ付けコイルは 2025 年まで維持しなければならない。ビーム運転の前後や途中のメンテナンス日など、はんだ付け部分の点検を怠らないようにしたい。初期段階で問題が発見できれば、更なる補強や改良が可能である。

電源出力の制限から、SM30 と SM31 のコイルは抵抗値を小さくする必要がある。SM32 には余裕があったため、コイル製作上の制限とはならなかったが、SM30 と SM31 に関してはコンパクトに製作する必要がある。検討に十分な期間が必要で、設計を含めた製作期間の長期化を懸念している。また SM30 と SM31 は 3 本のダクトが上下流で大フランジ溶接され、一体となった構造をしている。両側 2 本のダクトはセラミックス製であり、とても高価なものになっている。大フランジ溶接は、ダクトを電磁石に組み上げたのち実施されており、ダクトやコイルの取り出しを想定して設計されていない。導入前までに SM30 と SM31 のコイル交換作業を確立する必要がある。

並行して故障時のバックアップ体制に対する検討と整備を行う。FX 高磁場 SM は電源、電磁石共に 4000A 以上の励磁電流で運転が可能のように設計されている。定常と比べて 10~30 %程度のマージンを持たせており、低磁場 SM にも 70 %程度以上のマージンがある、このため SM33 を除く SM の 1 台が故障した際には、周りの SM 励磁電流を増やして対処する予定でいた。しかしながら今回の事象を受け、周りの SM 励磁電流を増やした運転は更なる故障を誘発するリスクを伴い、長期間のバックアップ体制を成しているとは言い難い。コイル製作には年単位の期間が必要となってくるため、リスクを伴わないバックアップが必要である。アップグレード前の旧 SM の再活用などを検討する所存である。

謝辞

本報告におけるはんだ付けコイルを使用するための対策について、Fig. 7 のホロコン押さえは、KEK 機械工学センターの高富氏に設計協力していただいた。また、ホロコンはんだ付け補強や、バイパス処置など、株式会社 NAT 殿には多大な尽力をいただいた。特に湯井氏、木村(崇)氏、佐藤(芳)氏、吉浦氏の活躍に感謝する。

参考文献

- [1] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>
- [2] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/>
- [3] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021, 033G01, doi:10.1093/ptep/ptab011
- [4] T. Yasui *et al.*, “J-PARC operation with the high repetition rate upgrade”, in *Proc. 14th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’23)*, Venice, Italy, May 2023, pp.1276-1280, doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-TUXG1
- [5] S. Iwata *et al.*, “The installation of the new septum magnets for fast extraction in J-PARC Main Ring”, *Proc. PASJ2022*,

PASJ2023 WEP22

- Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp.901-905,
[https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/
PDF/FRP0/FRP006.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FRP0/FRP006.pdf)
- [6] K. Fan *et al.*, “Design and field analysis of a large aperture quadrupole magnet”, Proc. PASJ2014, Aomori, Japan, Aug. 2014, pp.951-954,
[https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/
PDF/SUP0/SUP010.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP010.pdf)
- [7] T. Shibata *et al.*, “The leakage field of the new septum magnets for fast extraction of J-PARC MR”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, TUP18
- [8] S. Iwata *et al.*, “Countermeasures for the failure of the new septum magnet for fast extraction in J-PARC Main Ring”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp.170-174,
[https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/
PDF/FROA/FROA05.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROA/FROA05.pdf)
- [9] SAD code, <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>