

J-PARC 加速器の現状

STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

小栗英知^{#, A)}

Hidetomo Oguri^{#, A)}

^{A)} J-PARC Center

Abstract

The J-PARC facility consists of three accelerator facilities: Linac, RCS (Rapid Cycling Synchrotron) and MR (Main Ring synchrotron), and three experimental facilities: Materials and Life Science Experimental Facility (MLF), Hadron Experimental Facility (HD) and Neutrino Experimental Facility (NU). In MR, the beam operation was suspended for a long time from the summer of 2021, and major upgrades were made to the power supply and other components. Full-scale beam operation was resumed in 2023, and 80 kW and 800 kW beams were supplied to HD and NU, respectively, in FY2024. In the RCS, the beam power has been gradually increased while continuing the beam loss reduction study, and in April 2024, the beam power of 1 MW, which is the nominal power, has been supplied to the MLF target. While steadily increasing the beam power, a fire incident occurred in the linac facility during the summer maintenance in 2024. Beam operation was resumed after investigation of the cause, safety confirmation and measures to prevent recurrence during the summer maintenance period.

1. はじめに

J-PARC 施設は、リニアック、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)およびMR (Main Ring synchrotron)の3加速器施設と、RCS からのビームを利用する物質・生命科学実験施設 (MLF)、MR からのビームを利用するハドロン実験施設 (HD) およびニュートリノ実験施設 (NU) の3実験施設から構成されている。MR においては、2021年の夏に運転を長期休止し、電源等について大規模な更新作業を行った。2023年から本格的にビーム運転を再開し、繰り返し周期の短縮や詳細なビームチューニングを行いながらビームパワーの増強を進めている。RCS においては、ビームロス低減スタディを続けながら徐々にビームパワーを増強し、定格パワーである1 MWのビーム供給を開始している。ビームパワーを着実に増強させる一方で、2024年夏期メンテナンス中にリニアック施設において火災事象(チラー冷凍機電源端子部で熔融痕を

発見)が発生した。本学会では、2024年度の加速器施設の運転状況等について報告する。

2. 運転状況

2.1 2024年度の運転状況

2024年度(2024年4月1日から2025年3月31日まで)のMLFおよびMR(HD、NU)のビームパワー履歴をFig. 1に示す(HDとNUは、同じ緑色のバーで示されている)。

2022年6月にRCSにおいて、12台あるRFシステムのうち10号機の変圧整流器が故障し[1]、それ以降、11台でビーム運転を行っていた。11台体制では加速電圧が不足して1 MW運転時に僅かなビームロスが発生するため、故障以降はビームパワーを下げたまま運転を行っていた。2024年3月に変圧整流器を搬入してRFシステムを12台体制に戻し、同年4月からMLFに対し1 MW連続運転を開始した(MLFターゲット上でのパワーは

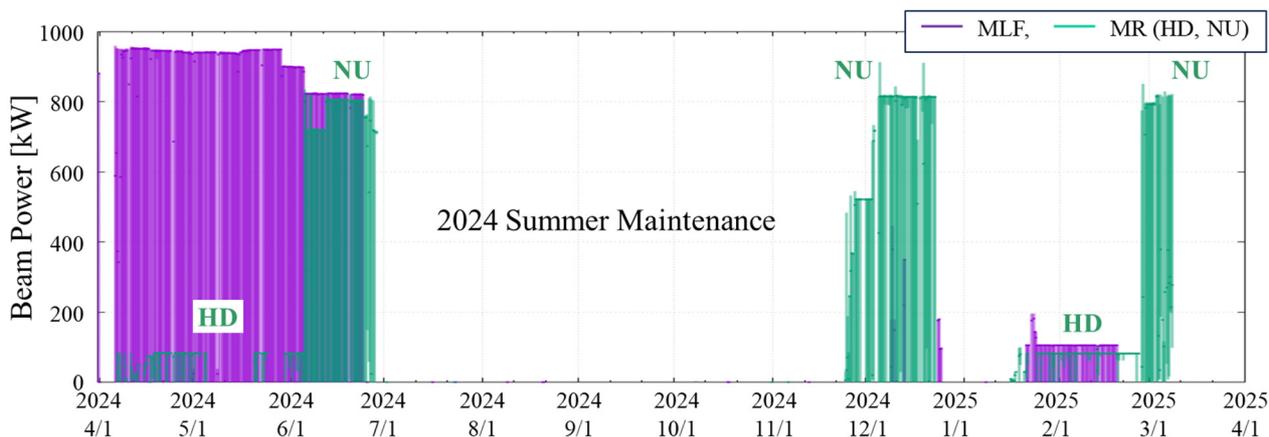


Figure 1: Beam power history for MLF and MR (HD, NU) in FY2024.

[#] oguri.hidetomo@jaea.go.jp

950 kW)。1 MW 運転を2 か月程度を行ったが、電力料金節減のため5月下旬からはRFシステムを1台を停止して再び11台体制とし、ビームパワーを900 kWに下げた(Fig. 1を見ると、6月上旬にさらに820 kWに下がっているが、これはMRの運転モードをHDからNUに切り替えたことによる。)。2024年夏期メンテナンス前のMLF利用運転は7月1日まで計画していたが、6月24日にMLF中性子源のヘリウムベッセル内の水分量が通常値より増加し、詳細な原因調査と対策を検討するために、この日に夏メンテ前のMLFの運転を停止した[2]。

2024年度のMRの運転は、HDへのビーム供給からスタートした。電源等の更新により繰り返し周期を5.20秒から4.24秒に短縮したことで、2024年4月からビームパワー80 kWの連続運転を開始した。NUにおいては、2023年に760 kWを達成後にさらに詳細なビームチューニングを進め、2024年6月から800 kWの連続運転を開始した。6月24日にMR第2機械棟の冷却塔1台が故障し冷却水の冷却能力が低下したため、ビームパワーを700~750 kWに下げた。しかし6月下旬に外気温や湿度が上昇し、RF空洞冷却水温を十分に下げられず空洞で使用しているファインメットコアへの悪影響が懸念されたため、6月28日に夏メンテ前のMRの運転を停止した[2]。

MLFにおいて、2024年夏期メンテナンスで行った水銀循環ポンプの交換作業後に水銀循環システムが所定の性能に達しない不備が発生し、根本的な対策作業を行うことになった。そのため、MLFの利用運転は、2025年3月まで全てキャンセルになった[3](Fig. 1に、2月に100 kW程度の運転記録が残っているが、これはMLFの調整運転であり、利用運転ではない)。

夏期メンテナンス後のMRの運転は、11月にNUからスタートした。ビームパワー830 kWで連続運転を行っていたが、2025年3月4日にニュートリノ生成標的を冷却するヘリウムガスの流量が低下したため、MRからのビーム供給を停止した。原因を特定するためにはターゲットステーションのヘリウム容器内の調査が必要となり、この作業には3か月以上の期間を要する見込みだったため、2024年度のNUビーム利用運転をここでキャンセルとなった[4]。HDのビーム運転は、計画どおり1月から開始し2月末まで行った。この期間のビーム利用効率は91.0%であり、ビーム停止時間の少ない高効率運転ができた。3月に計画していたMLFとNUの利用運転はキャンセルになったため、この期間は加速器のビーム調整運転を行った。

2.2 2024年度の稼働率および各機器停止時間

2024年度の運転統計をFig. 2に示す。MLFの利用運転時間および稼働率は、1,504時間および91%であった。2023年度の運転時間2,478時間の約60%だったのは、前述したように2024年度後期の利用運転がキャンセルになったことによる。NUおよびHDの利用時間と稼働率はそれぞれ847時間、84%および658時間、87%であった。

2024年度の加速器機器ごとのダウンタイムをFig. 3に示す。最も長いダウンタイムが生じたのは、MRの偏向電磁石116号機(BM116)の故障であった(Fig. 3の「_MR_BM」のダウンタイムの一部)。2024年5月5日のビーム運転中にBM116直下流でビームの全ロスが発生

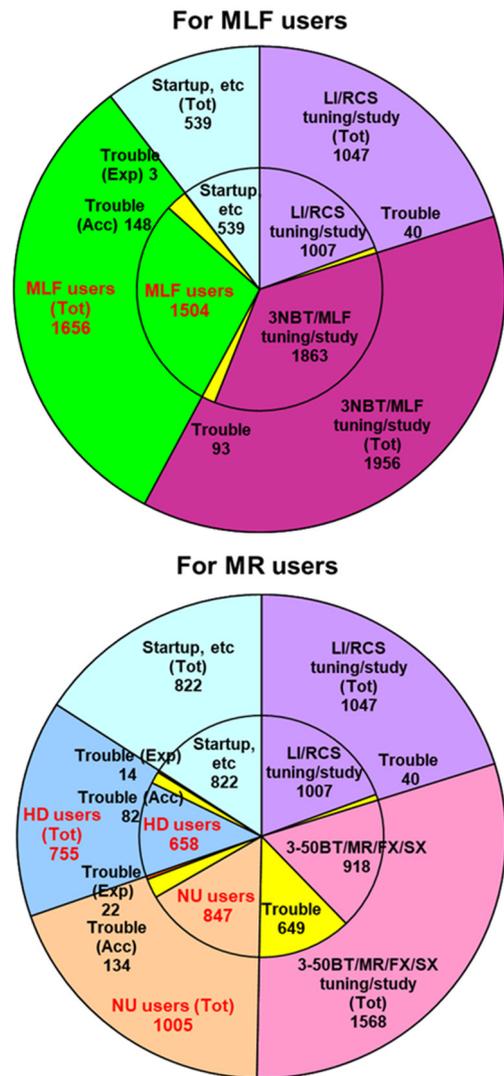


Figure 2: Operation statistics for MLF (top) and MR (NU, HD) (bottom).

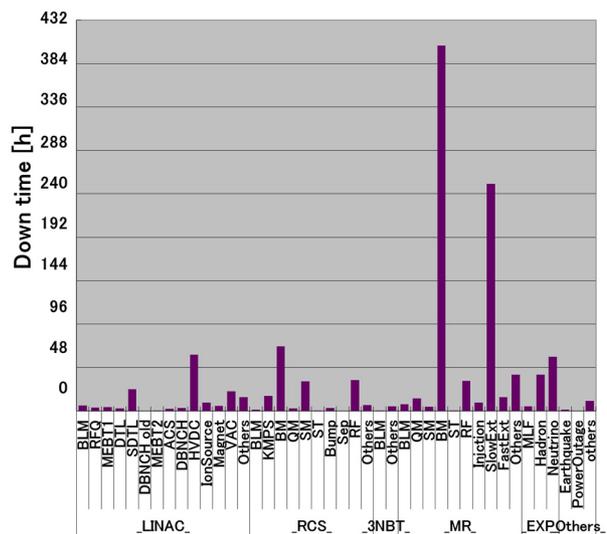


Figure 3: Downtime for each component.

した。ビーム運転を停止し、加速器トンネルに入域して BM116 を調査した結果、電磁石の上下コイルのうち上コイルでレイヤーショートが起きていることが分かった[5]。そのため急遽、予備の偏向電磁石と置き換えることになった (Fig. 4)。当該偏向電磁石は全長 6.4 m、重量 32 t という大型機器であるため、予備機を保管場所から設置場所まで移動させるための重機の手配が必要となった。真空ダクト取付、ビームラインへのインストール、アライメント、通電試験および磁場測定などを行い、5 月 20 日にビーム運転を再開した。この事象により MR のビーム運転は約 2 週間停止した。



Figure 4: Replacement of the MR bending magnet.

次に長いダウンタイムが生じたのは、MR の SX バンプ電磁石 2 電源故障であった (Fig. 3 の「MR_SlowExt」のダウンタイムの一部)。この電源故障は、2024 年 5 月および 2025 年 1 月に 2 回発生し、それぞれ約 6 日間および 3 日間 MR の運転が停止した。原因は、いずれも電源の IGBT ユニットに使用している IGBT 本体や IGBT 制御基板の故障であった。故障個所の特定や交換、他ユニットの健全性確認などを行う必要があったため、復旧までこのような長期間を要した。

2024 年の 4 月から 5 月にかけて、RCS の偏向電磁石電源システムでダウンが頻発する事象が発生した (Fig. 3 の「RCS_BM」のダウンタイムのほぼ全て)。トータルのダウンタイム時間は 70 時間程度であったが、ダウン回数は 26 回に及んだ。偏向電磁石電源システムは、24 台のチョークトランスと共振コンデンサーバンクから成る共振回路を構成している。ダウンが頻発し始めたときは、屋外に設置されているこれらの大型構成機器の不具合が疑われたが、異常は見られなかった。制御系に目を移し、疑わしい場所にプローブを仕込みダウンするごとに異常の有無を調査した結果、偏向電磁石電源直流電源部の制御系に異常があることが分かった。そこで故障の疑いのある PLC モジュールや基板を交換して経過観察を行ったが、最終的には電流基準信号をアナログに変換している DAC 基板を交換したことで症状は治まり、それ以降は、ダウンは一度も発生していない。

リニアックのダウンタイムは、クライストロン高圧電源のトラブルによるものが最長であった (Fig. 3 の「LINAC_HVDC」のダウンタイム)。ダウンは数回発生したが、復旧に最も時間を要したのは、11 月 30 日に起きたクライストロン高圧電源 5 号機に使用している高圧ケーブルの不具合だった。高圧電源を構成する変圧整流器とコンデンサーバンクを繋いでいる 110 kV 高圧同軸ケーブルのコ

ネクタ部近傍の耐電圧性能が劣化し、ここで放電が発生したことが原因である[6]。不具合個所の特定やケーブルの交換のため、復旧に 20 時間程度を要した。

2.3 2024 年 4 月から 2024 年 6 月までの運転状況

前章で述べたとおり、2024 年の 4 月から 5 月にかけて、RCS や MR で深刻なトラブルが続き、ビーム運転が長時間停止した。その一方で、4 月からは RCS で定格の 1 MW ビームの連続供給や、MR においては、HD と NU でそれぞれビームパワーを更新し、重要なマイルストーンを達成した期間でもあった。MR で 800 kW および 80 kW の達成を記念して撮影した集合写真を Fig. 5 に示す。



Figure 5: Group photo taken to celebrate the achievement of 800 kW and 80 kW at MR.

リニアックで現在稼働中の高周波駆動イオン源は、2014 年の使用開始当初はその寿命が未知数であったため短時間で計画的に交換していた。交換頻度を徐々に減らして連続運転時間の実績を積み、2023 年度に初めて、全ビーム運転期間 (2022 年夏期メンテナンス終了後から 2023 年夏期メンテナンス開始まで) にイオン源を交換無しで連続使用することに成功した。続く 2024 年度も同様に交換無しで運転を行い、連続運転時間は 2023 年度の記録を 550 時間上回る 4,962 時間に達した[7]。

RCS では、これまでの HBC (Hybrid type Boron-doped Carbon) 製荷電変換フォイルに代わる純炭素製フォイルの開発を進めてきた[8]。2023 年 5 月に純炭素フォイルを使用してビーム運転を行ったところ、先端部に若干の変形が生じたものの、HBC フォイルに比べて原形をとどめているという結果が得られた。2023 年夏期メンテナンス後からは純炭素フォイルの本格使用を開始し、MLF で 1 MW、NU で 800 kW の運転成功に寄与した。2024 年夏期メンテナンスで、荷電変換フォイルスタックに収納するフォイル (15 枚収納可能) 全てを純炭素フォイルにして、現在ビーム運転を行っている。

2.4 2024 年夏期停止期間中の主な作業

J-PARC では、各施設において毎年夏期に長期間メンテナンス作業を行っている。

リニアックにおいては、通常の保守作業の他に、2 次電子抑制電圧が印加不可となったイオン源下流ファラデーカップの交換[7]や、微小電波漏えいを確認した SDTL 空洞 2 台について、RF カップラに接続している同軸管の交換等を行った。リニアックでは、2011 年の東日本大震災以降毎年、加速器トンネル床高さの変動を測定してい

る[9]。2011 年から 2024 年までの床高さ測定結果を Fig. 6 に示す。震災発生後、50 m 付近(この場所は SDTL セクションに相当する)の床が最も沈降していることが分かる。年間の沈降量は、震災後しばらくは 1 mm 程度であったが、最近では 0~0.5 mm 程度である。

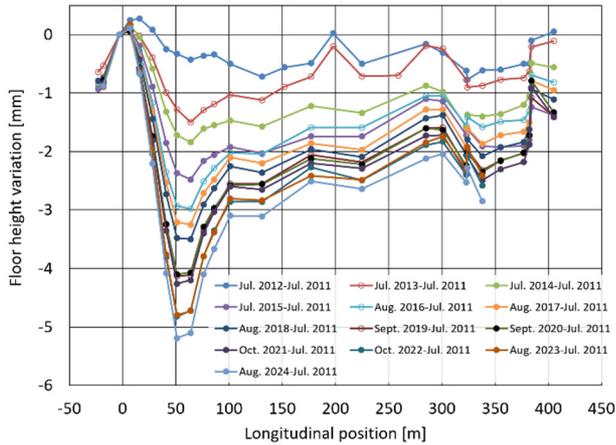


Figure 6: Floor deformation at linac accelerator tunnel since 2011.

RCS においては、通常の保守作業の他に RF 空洞の置き換え作業を実施した。新タイプの空洞(「シングルエンド型」と呼ぶ)は従来タイプ(「プッシュプル型」と呼ぶ)と比較して消費電力を 40%削減できる[10]。そのため RCS では RF 空洞を新タイプに置き換える作業を 2021 年より順次行っており、2024 年夏には 3 台の空洞を新タイプに置き換えた。これにより現在、全空洞 12 台のうち半数にあたる 6 台が新タイプに置き換わったことになり、残り 6 台についても順次置き換えていく予定である。RCS ではビーム不安定性対策として、キッカー電磁石の横方向インピーダンスを低減するためのダンパを開発してきた[11]。2023 年度に 2 台、2024 年度に 2 台のダンパを設置し、キッカー 8 台のうちの半数にダンパ設置が完了した(Fig. 7)。これによりビームパワー 1.5 MW まではビーム不安定性の抑制が期待できる。

MR においては、通常の保守作業のほかに RF システムの増強を行った。2017 年頃まで使用していた RF 空洞から FT3M コアを取り出し、ここに FT3L コアを入れて 3



Figure 7: Transverse instability damper for kicker magnet at RCS.

ギャップ空洞に組み上げて、新 9 号機としてビームラインに設置した(Fig. 8)[12]。また、これまで 9 号機として使用していた 4 ギャップ空洞を、もともと FX キッカー 1 号機が設置されていた場所に移動させた[12]。本空洞は、2025 年秋から 10 号機として稼働させる予定である。また、終段増幅器に使用している 4 極管に電力を供給する陽極電源の増強も行った。3 ギャップおよび 4 ギャップ空洞用電源は、2024 年夏まではそれぞれインバータユニット 12 台および 16 台で運転を行っていたが、2024 年夏にそれぞれ 2 台のユニットを追加して、14 台および 18 台に増強した[12]。これにより MR は、900 kW 強のビームパワーまで対応可能となった。

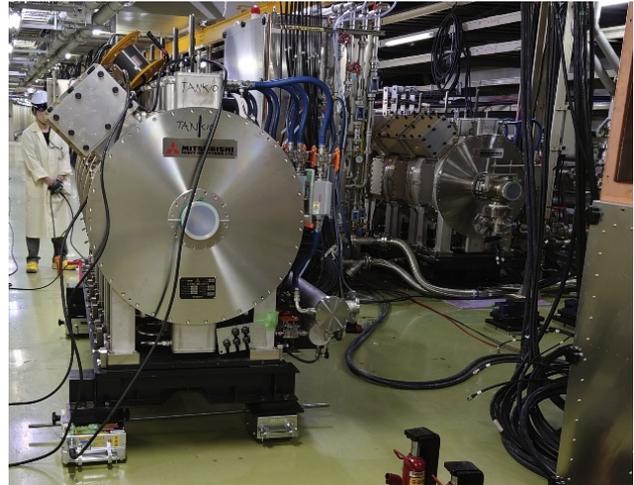


Figure 8: Installation of new MR cavity #9.

リニアック施設において、2024 年夏期メンテナンス開始後間もない 7 月 5 日に、冷却水設備のチラー冷凍機の電源端子部(400 V、3 相交流)で溶融痕が発見され(Fig. 9)、公設消防により火災であると判定された[13]。電源端子部を調査すると、3 相ラインのうち T 相一次側において圧着端子と端子台プレートを固定するボルトが破断し、また圧着端子の接触面に酸化銅が 10 層程度積層して付着していることが分かった。さらに、圧着端子、端子台プレートおよびワッシャーに放電痕が認められた。また、本チラー冷凍機の完成図面や年次点検シートに



Figure 9: The chiller in which the scorch mark was found (left) and the scorch mark in the power supply terminal box (right).

当該端子部の記載が無く、設置から発災まで一度も状態を確認していなかったことも判明した。以上の調査結果より本事象は、①T相一次側の圧着端子と端子台プレート間の接触抵抗が何らかの原因で大きくなり、ジュール熱により温度が上昇し酸化銅が生成、②当該冷凍機は年5回程度ON/OFFを繰り返すため、酸化銅の生成が数年間かけて進行、③ワッシャーと圧着端子のギャップが次第に増大し最終的にアーク放電が発生、④赤熱現象によりボルト付近の温度が1,000°C以上に達し、端子部が熔融した、と推定している。この推定に基づく、今回の熔融痕の発生は、定期的な外観検査およびボルトの増し締めなどにより端子部の健全性を確認することで未然に防止できると考えられる。そのため、①当該チラー冷凍機の点検要領書の改訂し、点検すべき機器が定期点検対象から抜けていないことを確認、②J-PARC全施設の動力機器の電源ケーブル接続点について、図面と実際の状態に相違が無く点検が確実に実施されていることの確認、などの再発防止策を講じた。

2.5 2024年11月から2025年3月まで運転状況

前述のとおり2024年度後半は、MLFの利用運転は全てキャンセルとなり、NUおよびHDの利用運転のみを行った。ビームパワーは、NUで800-830 kW、HDで80 kWであった。MRでは、利用運転と同時にビームチューニングも進め、12月に900 kW相当の1ショットビーム加速に成功した(Fig. 10)。今後さらに調整を進めてビームロスの低減を図り、900 kW連続運転を目指す。

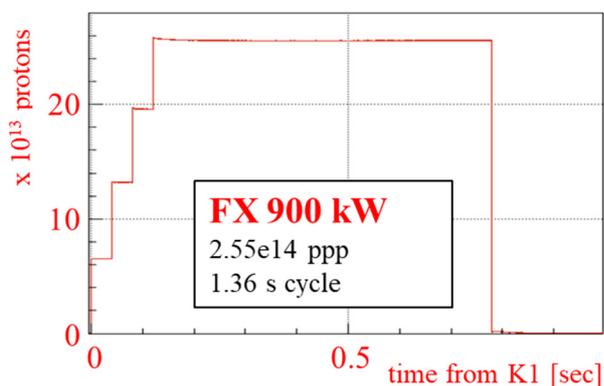


Figure 10: Circulating beam intensity during the 900 kW beam study.

この期間の代表的なトラブルとして、11月22日にリニアックで発生したターボ分子ポンプ(TMP)の故障が挙げられる[14]。リニアックの中間エネルギービーム輸送ライン2(MEBT2)のバンチシェーブモニタ(BSM)に設置しているTMPの動翼が定常回転中に急停止し、高トルクがフランジにかかったためフランジの締結が緩み、そこから真空リークが発生した。当該TMP無しでもビーム運転は可能であったことから、当面の措置としてTMPをBSMから切り離す作業を行いビーム運転を再開した。ビームラインや加速空洞の一部に大気が侵入したが、到達真空圧力の悪化など深刻なダメージは無かった。動翼が急停止した原因は現在調査中である。このトラブルによりビーム運転は約1日停止した。

第2.2章でも述べたように、2024年5月につづき、1月21日にもMRのSXバンパ電磁石2電源でIGBTが短絡し、ヒューズ断およびIGBTゲート基板故障が発生した。今回は、故障したIGBTやゲート基板の交換のほか、スナバコンデンサの交換や、常時OFF状態でしか使用していないIGBTのゲートを短絡するなどの追加措置を行った。この措置を講じた以降は、同種のトラブルは発生していない。

3. まとめ

2024年度は、RCSで定格の1 MW連続運転を開始、MRではNUに800 kW、HDに80 kWと記録を更新するなど、重要なマイルストーンを達成できた。一方で、MR偏向電磁石のレイヤーショートやRCS偏向電磁石電源システムでのダウン頻発など、ビームを長時間停止するトラブルも数回発生した。また、ビーム運転スケジュールには直接影響しなかったものの、夏期メンテナンス中にリニアック施設のチラー冷凍機電源端子部に熔融痕が見つかり火災と判定された。

2025年度は、安全を第一にしてMRのビームパワーをさらに増加させるとともに、各加速器の稼働率向上や高経年化対策等に取り組む予定である。

謝辞

J-PARC加速器の運転や高度化は、多くの方々のご支援により達成できているものである。関係者の皆様に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] K. Yamamoto *et al.*, "Recent status of J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron", Proc. 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC2023), Venice, Italy, May 7-12, 2023, pp. 2339-2341.
- [2] J-PARC Project Newsletter No.96, October 2024, <https://j-parc.jp/c/en/topics/2024/10/25001406.html>
- [3] J-PARC Project Newsletter No.98, April 2025, <https://j-parc.jp/c/en/topics/2025/04/23001505.html>
- [4] J-PARC Project Newsletter No.99, July 2025, <https://j-parc.jp/c/en/topics/2025/07/23001590.html>
- [5] S. Iwata, *et al.*, "Attempt to locate an inter-layer short in the J-PARC MR bending magnet coil via resistance and field measurements", Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, WEP69, this meeting.
- [6] S. Mizobata, *et al.*, "Trouble case report of high power RF source equipment at J-PARC Linac", Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRP056.
- [7] K. Shinto *et al.*, "Operation status of the J-PARC high-intensity RF-driven negative hydrogen ion source in 2023/2024", Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Jul. 31- Aug. 3, Yamagata, Japan, 2024, pp. 525-528.
- [8] T. Nakanoya *et al.*, "Challenge to charge exchange with pure carbon foil in the J-PARC 3GeV synchrotron", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Aug. 29- Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 937-941.

- [9] T. Morishita, “Precise Survey and Alignment Results of the J-PARC Linac”, JPS Conf. Proc. 33, 011013 (2021).
- [10] M. Yamamoto *et al.*, “Development of a single-ended magnetic alloy loaded cavity in the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid cycling synchrotron”, Prog. Theor. Exp. Phys., 2023, 073G01.
- [11] Y. Shobuda *et al.*, “Demonstration of a kicker impedance reduction scheme with diode stack and resistors by operating the 3 GeV rapid cycling synchrotron of J-PARC”, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 26, p. 053501, 2023.
- [12] K. Hasegawa *et al.*, “Present status of RF system upgrade in the J-PARC MR”, Proc. 16th International Particle Accelerator Conference (IPAC2025), Taipei, Taiwan, June 1-6, 2025, pp. 1479-1482.
- [13] J-PARC News 第 233 号,
<https://j-parc.jp/c/topics/2024/09/27001395.html>
- [14] Y. Morohashi *et al.*, “Vacuum system troubles and countermeasures at J-PARC linac MEBT2”, Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, THP013.