

J-PARC MR のビームパワー増強に向けた RF システムの準備状況 2024 PREPARATION STATUS 2024 OF RF SYSTEM FOR J-PARC MR UPGRADE

長谷川 豪志 ^{*A)}, 清矢 紀世美 ^{A)}, 大森 千広 ^{A)}, 原 圭吾 ^{A)}, 杉山 泰之 ^{A)}, 吉井 正人 ^{A)}
島田 太平 ^{B)}, 田村 文彦 ^{B)}, 山本 昌亘 ^{B)}, 沖田 英史 ^{B)}, 宮越 亮輔 ^{B)}

Katsushi Hasegawa ^{*A)}, Kiyomi Seiya ^{A)}, Chihiro Ohmori ^{A)}, Keigo Hara ^{A)}, Yasuyuki Sugiyama ^{A)}, Masahito Yoshii ^{A)},
Taihei Shimada ^{B)}, Fumihiko Tamura ^{B)}, Masanobu Yamamoto ^{B)}, Ryosuke Miyakoshi ^{B)}, Hidefumi Okita ^{B)}

^{A)}KEK / J-PARC Center

^{B)}JAEA / J-PARC Center

Abstract

At the J-PARC Main Ring (MR), the upgrade plan is underway to increase the beam power by increasing the repetition rate and the number of protons per pulse. As a result, the initial target of 750kW was achieved in December 2023, and further goal to 1.3 MW is continuing in preparation for the Hyper-Kamiokande experiment. The RF system for this upgrade plan will require a total of thirteen RF systems, including eleven fundamental cavities and two second harmonic cavities. A total of eleven RF systems, including nine fundamental cavities and two second harmonic cavities, have been in operation since the fall of 2023, and preparations for two more RF systems are in progress. We have also taken measures against failures of the anode power supply to ensure stable operation. In operations since the fall of 2019, when the measures were implemented, the number of serious failures of the inverter unit that makes up the anode power supply has decreased, and the results are showing. The preparation status of the RF system upgrade and the present status are reported.

1. はじめに

J-PARC MR は、前段の RCS から入射された 3 GeV 陽子ビームを 30 GeV まで加速した後、早い取り出し (FX) 運転でニュートリノ実験施設に、遅い取り出し (SX) 運転でハドロン実験施設に供給している。2021 年までの 2.48 s 繰り返し周期における運転ビーム強度は、FX 運転で約 520 kW、SX 運転で約 60 kW を供給した。ビーム増強計画では、電磁石電源を新設し繰り返し周期を 2.48 s から 1.36 s に早める高繰り返し化で FX 運転の設計値である 750 kW、更に 1.16 s への短縮と粒子数を増やすことでハイパーカミオカンデ計画で必要とされる 1.3 MW の達成を目標にしている [1]。

高繰り返し化によるビーム増強では、加速時間が短縮される事から RF システムに要求される加速電圧も高くなり、1.36 s 周期の 750kW で 510kV、1.16 s 周期の 1.3 MW で 600 kV となっている。この要求を満たすため、従来よりシャントインピーダンスが高い大型の金属磁性体コア (FT3L) の開発や量産 [2,3]、そして FT3L コアを使用し、加速ギャップ数を 4ギャップまたは 5ギャップに増やした空洞の再設計を行った。これら FT3L 用空洞は、2014-2016 年にかけて順次導入され、基本波空洞 7 台、2 次高調波空洞 2 台の合計 9 台の RF システムが 2021 年 (2.48 s 周期) まで故障無く稼働した [4]。

一方、1.32 s 周期の運転では、加速電圧 510 kV 以上を発生させるため FT3L 空洞 9 台全てを基本波空洞として運用する事と 2 次高調波空洞 2 台の増設が必要となる [5,6]。これら 2 台の 2 次高調波空洞は、2020 年にビームラインに設置され、最初の 1 台が空洞を駆動する増幅器と電源の整備が完了した 2022 年秋から、そしてもう一台が 2023 年秋から運用を始めた。現在は合計 11

台の RF システムが稼働している。繰り返し周期は 2022 年に 2.48 s から 1.36 s に短縮され、2023 年 12 月に設計値 750 kW、2024 年 6 月には 800 kW での定常運転が実現している。

次の目標である 1.16 s 周期の 1.3 MW では加速電圧 600 kV が必要となり、更に 2 台分の RF システムが必要となる。一方、周回する粒子数を増やす事でビームパワーも増やしていく。この場合、空洞で発生するウェイク電圧が増えることから、ビームローディング補償の高度化 [7] と増幅器側 (陽極電源) の増強が必要となる [8-10]。また、ビームの縦方向運動シミュレーションから周期短縮による加速電圧パターンを評価した [11]。結果、加速電圧は当初予定していた 510 kV より小さい 450 kV 以上あれば 750 kW 相当のビームを加速できる事がわかった。これらを踏まえ、空洞増設と陽極電源増強の時期をビームパワーが早期に最大化出来るシナリオに修正した。

2. RF システムの構成及び準備状況

基本波空洞は最終的に 11 台を予定しており、よって陽極電源も 2 台追加して 11 台が必要となる。それぞれの陽極電源は、インバーターユニット 15 台で構成されている。これを上部方向に拡張し、19 台構成にする事で出力電流増強を行う [8]。しかし、物理的な空間不足から 1, 2, 9 号機の 3 台は拡張することが出来ない為、これらの陽極電源に接続された空洞 3 台が粒子数を制限することになる [10]。そこで、1, 2, 9 号機の空洞については、加速ギャップを減らした 3ギャップ空洞、それ以外の基本波空洞 3-8 号機及び 2 次高調波空洞 12-13 号機は 4ギャップ空洞で運用する事とした。これにより加速ギャップ当たりの最大インバーター数は、3ギャップ空洞は 5 台/ギャップ、4ギャップ空洞は 4.75 台/ギャップとなりほぼ同程度となる。Table 1 にそれぞれの目標バ

* katsushi.hasegawa@kek.jp

Table 1: MR RF System Configuration

Power [kW]	520	750	1300
$\times 10^{14}$ ppp	2.7	2.1	3.3
Cycle time [s]	2.48	1.36	1.16
Accl. time [s]	1.4	0.65	0.58
4 / 3* GAP Cavity _{acc}			
V _{acc} [kV]	280	510	600
# of Cav. (FT3L)	7	6 / 3*	8 / 3*
# of INV. units/APS	15	16 / 12*	19 / 15*
Resonant freq. / Q-value	1.72 MHz / 21		
4 GAP Cavity _{2nd}			
V _{2nd} [kV]	110	110	110
# of Cav. (FT3L/3M)	2 / 0	0 / 2	0 / 2
# of INV. units/APS	12	12	19
Resonant freq. / Q-value	3.44 MHz / 14		
upgrade schedule	2023 ~		2028 ~

ワーにおける RF システムの構成を示す。

2.1 陽極電源の増強

Figure 1 は、インバーターユニット 15 台の陽極電源上部に、4 台分増設して、19 台に拡張した陽極電源である。2023 年夏に拡張工事を行い、2023 年秋からの運転では、基本波空胴の 3 ギャップ空胴 (1, 2, 9 号機) で 12 台、4 ギャップ空胴 (3-8 号機) では 16 台、また 2 倍高調波空胴の 4 ギャップ空胴 (12-13 号機) は 12 台で運転を始めた。2 倍高調波空胴では、12 号機のノイズ問題調査や 13 号機で電流容量が限界まで到達していた事から台数を追加したが、基本波空胴の 1-9 号機では限度容量以下で 750 kW を超える 800 kW 運転が達成できた。



Figure 1: Anode power supply with 19 inverter units.

2024 年の夏のメンテナンス期間には、基本波空胴で合計 18 台、2 次高調波空胴で合計 16 台まで台数を増やす予定である。これらのインバーターは、本来 MR10 号機として運用予定であった陽極電源のインバーターと更には RCS の空胴入替によって電流容量に余裕が出来た RCS 陽極電源から借用することで可能となった。

2025 年は、10 号機の運用開始を予定している。インバーター台数の増設は基本波空胴及び 2 次高調波空胴で

予定しているが、予算や年間に製造できるインバーター台数の限度から全ての号機で最大個数までは追加できない可能性もある。Table 2 に、2025 年までのインバーターユニット増強スケジュールをまとめる。

Table 2: Inverter Units Installation Schedule

Year	[kW]	APS #1, 2, 9 (Max.15)	APS#3-8 (Max.19)	APS#12-13 (Max.19)
2023	>750	12	16	12
2024	>800	14	18	16
2025		14	APS#3-8, 10 19	17

2.2 2 次高調波空胴

FT3L 空胴 9 台を全て基本波空胴として運用するため、2 次高調波空胴を新たに 2 台増設した [6, 12]。空胴は、旧タイプの FT3M コアを用い以前使用していた 3 ギャップ空胴 4 台から、4 ギャップ空胴 2 台を再構成した。それぞれ、2018 年 12 月及び 2019 年 10 月に組立を行い、2020 年 9 月にビームラインに 2 台設置した。その後、空胴を駆動する増幅器及びその電源、LLRF の整備を進め、2022 年秋からは 12 号機、2023 年秋からは 13 号機の運用を開始した (Fig. 2)。



Figure 2: Two 2nd harmonic RF cavities with FT3M.

2.3 基本波空胴

縦方向運動シミュレーションの評価から、1.36 s 周期の場合でも加速電圧が 450 kV 以上であれば安定的に加速できる事がわかった [11]。これにより当初予定していた増設計画からの大きな変更点は、拡張が難しい陽極電源 1, 2, 9 号機の空胴をギャップ数を減らした 3 ギャップ空胴として運用する事である。

Figure 3 は、2022 年から 2027 年にかけての空胴増設計画を示している。空胴の号機は、接続している陽極電源の号機に合わせているため、例として APS#1 が空胴 1 号機となる。また、陽極電源が記載されていない破線の号機は空胴は設置しているが運用されていない号機、赤塗りはその年の新規増設や仕様変更を行った号機を示し

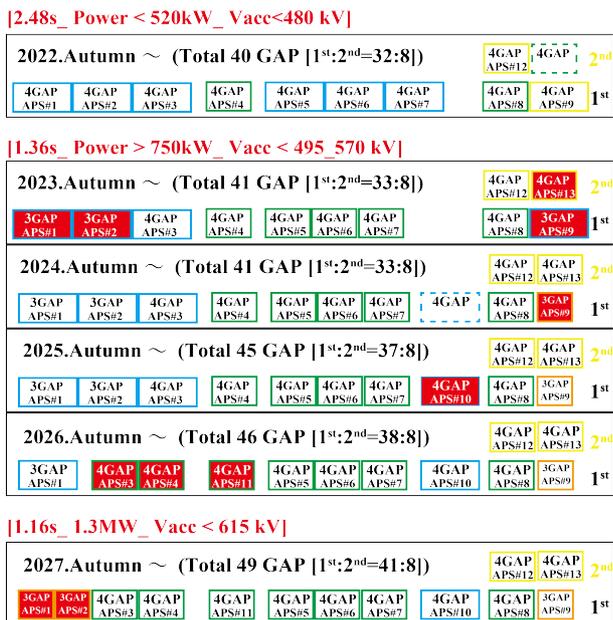


Figure 3: Cavity installation schedule.

ている。2023 年は、全 FT3L 空胴を基本波空胴で運用し、かつ空胴 1, 2, 9 号機は 3 ギャップ化を行った。加速ギャップとして 33 ギャップあることから、加速電圧は最大 495 kV 程となる。空胴 10 号機は 2024 年に設置のみ行い、運用は 2025 年秋からを予定している。空胴 10 号機運用後は、基本波空胴 10 台体制及びギャップ数が 37 となり、加速電圧として最大 550 kV が発生可能となる。この構成は、加速する粒子数にも依存するが、1.16 s 周期にも対応した構成となっている。その後 2 年ほどかけて、空胴の仕様変更を行い、11 台体制が完成する予定となっている。

3. RF 空胴の運用状況

J-PARC RCS 及び MR の RF 空胴は、運転初期から大型の FT3M 金属磁性体コアを使用した空胴を使用している。また MR では、2014 年～2016 年にかけてより高性能な FT3L 金属磁性体コアを用いた空胴に置き換えを行い、10 年弱運用してきた。

3.1 空胴インピーダンスと共振周波数の経年変化

Figure 4 及び Fig. 5 は、それぞれ FT3L 空胴の運用が始まった 2015 年秋以降の空胴インピーダンスと共振周波数の経年変化を示している。実線と丸マーカー及び左縦軸が基本波 (h=9) 空胴、破線と三角及び右縦軸が 2 倍高調波 (h=18) 空胴を示している。ただし、2023 年以降の空胴 1, 2, 9 号機は 3 ギャップ空胴として運用されているため、インピーダンスは右縦軸となる。

MR 稼働初期には、金属磁性体コアが錆び、損傷した場合などはインピーダンスの低下として観測されることもあった。しかし、空胴冷却水の分離や錆対策を施して以降のこの期間は、空胴の共振周波数を調整、変更した場合などで急激に変化している所 (例：2019 年 8 月付近の 4 号機) を除くと、10 年弱の長期変化でも全体的に

数 % 以下で非常に安定しており、損傷等はないと考えている。同じく共振周波数も長期的には非常に安定している。その中で、基本波 4 号機と 2 次高調波 9 号機で単純減少の傾向が続いていたが、両空胴ともインピーダンスは安定しており、減少が見られないことから経過観測としている。

Figure 4 の右下、三角の黄色色及びピンクは、それぞれ 2 次高調空胴 12 号機及び 13 号機のインピーダンスであり、非常に安定した傾向となっている。これらの空胴 2 台は、2020 年にビームラインに設置し、2022 年及び 2023 年に運用を開始しているが、設置スペースの不足から基本波空胴とは別の直線部 (Ins.A) に設置している。また、初期に使用していた FT3M コアを再利用して組み

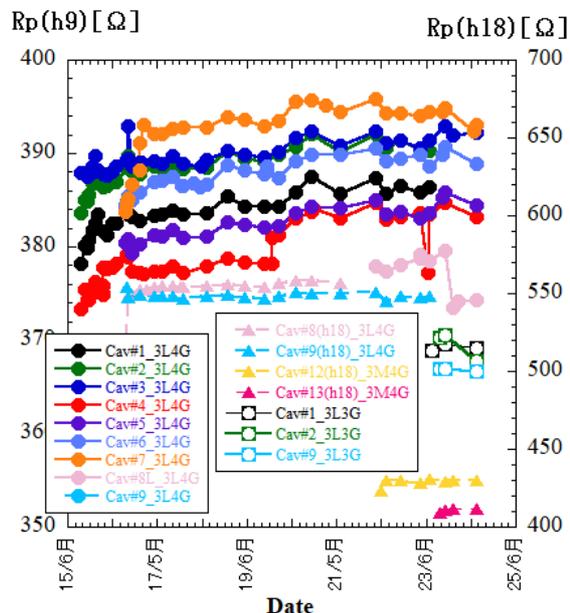


Figure 4: Trend of cavity impedance from 2015.

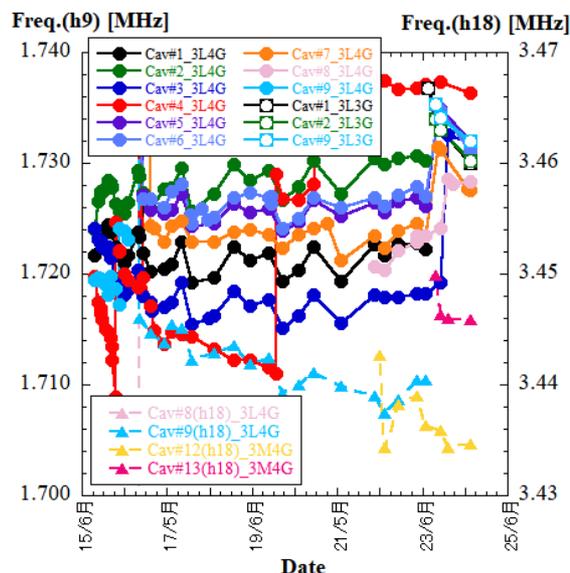


Figure 5: Trend of cavity resonance frequency from 2015.

立てられており、更に Ins.A 区間には空胴専用の冷却水系も整備出来ていない。そのため、増幅器及び電磁石系と共通の冷却水を空胴でも使用している。同じ冷却水系に銅系(電磁石のホローコンダクター等)と鉄系(金属磁性体コア)が混在するとイオン化傾向の違いから鉄系の錆びが促進されコアの損傷につながる。現在使用しているカットコアのカット面には2重の防錆対策を施しており、インピーダンス低下は見られない。しかし、今後注意深く経過を見ていく必要がある。

3.2 インバーターユニットの現状

Figure 6 は、2015 年以降のビームパワーの推移(左縦軸)と利用運転中に起こったインバーターユニットの故障回数(右縦軸)を示している。ビームパワーは、大まかに 80 kW より低い場合が SX 利用運転、それ以上の場合が FX 利用運転である。インバーターユニットの故障は、2015 年以降の FX 利用運転でビームパワー増加に伴い増えており、多くがゲート基板異常や IGBT の破損であった。対策としてゲート基板ノイズ対策用のフェライトを動作温度範囲の高い物に交換し、更に2個を直列に配置することで強化した。また、電源棟エアコン吹き出し口の位置変更によって陽極電源内部の雰囲気積極的に冷やす等の対策を行った [12]。これらの対策の後、ビームパワーは増加しているが、利用運転中の故障は一度も起きていない。

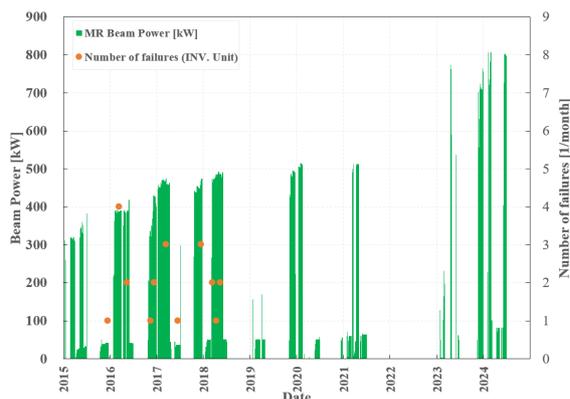


Figure 6: History of MR beam power and number of failures (inverter units) since 2015.

4. まとめと今後

J-PARC MR は、繰り返しを短縮する事と粒子数を増やすことでハイパーカミオカンデ計画で必要とされる 1.3 MW のビームパワーを実現する増強計画を進めている。2022 年に周期が 2.48 s から 1.36 s へと短縮され、2023 年 12 月に設計値の 750 kW、そして 2024 年 6 月には 800 kW の利用運転が実現した。その間 RF システムでは、2020 年から 2023 年に 2 次高調波空胴 2 台の増設、陽極電源の拡張及び拡張が難しい陽極電源に接続する 3 台の空胴を 3 ギャップ空胴として運用する事などを行った。現在の 1.36 s 周期で更にビームパワーを増やすためには粒子数を増やす事が必要であり、陽極電源の容

量拡張が重要となる。2024 年夏のメンテナンス期間は、来年度運用予定の 10 号機からと RCS から借用したインバーターユニットを既存の号機にインストールすることで、陽極電源の容量を増やす作業を行っている。また、2025 年には 4 ギャップ空胴の 10 号機の運用開始を予定しており、2027 年には更に 1 台追加した RF システム合計 13 台運用の準備が整う予定となっている。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring,” Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2021, no. 3, pp. 33 – 34, Mar 2021.
- [2] C.Ohmori *et al.*, “High gradient magnetic alloy cavities for J-PARC upgrade”, IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 2011, pp. 2885-2887.
- [3] C.Ohmori *et al.*, “Recent progress on the development of a high gradient RF system using high impedance magnetic alloy, FT3L”, IPAC2013, Shanghai, China, May 2013, pp. 1152-1154.
- [4] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC MR における金属磁性体コア (FT3L) を用いた RF 空胴の運転状況と真空コンデンサの開発”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 924-928.
- [5] K. Hara *et al.*, “J-PARC MR における 2 次高調波用高周波加速空胴の開発状況”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 312-315.
- [6] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC MR の FT3M MA コアを用いた 2 次高調波用 RF 空胴と真空コンデンサの開発状況”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 943-946.
- [7] Y. Sugiyama *et al.*, “Next generation LLRF control system for J-PARC MR”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Oct18-22, 2022, pp. 92-96.
- [8] K. Hasegawa *et al.*, “Status and Upgrade Plan of the MR Ring RF System in J-PARC”, in Proc. IPAC’22, Bangkok, Thailand, Jun, 2022, pp. 2031-2033.
- [9] K. Seiya *et al.*, “RF System Upgrade for 1.3 MW Operation of J-PARC Main Ring”, in Proc. IPAC’2024, Nashville, USA, May 19 - 24, 2024, pp. 1017-1020.
- [10] Y. Sugiyama *et al.*, “Estimation of the anode power supply current of the J-PARC MR RF system for 1.36 s cycle operation”, in Proc. IPAC’2023, Venice, Italy, May 2023, pp.2320-2322.
- [11] Y. Sugiyama *et al.*, “Beam Longitudinal Dynamics Simulation for High-Power Upgrade of J-PARC MR”, Proceedings of the 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul 31 - Aug. 3, 2024, this meeting.
- [12] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC MR のビームパワー増強に向けた RF システムの準備状況”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul 31 - Aug. 3, 2019, pp. 1169-1172.