

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 PREPARATION STATUS OF RF SYSTEM FOR J-PARC MR UPGRADE

長谷川豪志^{*A)}、大森千広^{A)}、杉山泰之^{A)}、原圭吾^{A)}、古澤将司^{A)}、吉井正人^{A)}
島田太平^{B)}、田村文彦^{B)}、山本昌亘^{B)}

Katsushi Hasegawa^{*A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Yasuyuki Sugiyama^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Masashi Furusawa^{A)}
Masahito Yoshii^{A)}, Taihei Shimada^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}

^{A)}KEK/J-PARC

^{B)}JAEA/J-PARC

Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), an upgrade plan to increase the beam power for T2K experiment is in progress by replacing the magnet power supplies. In this plan, approximately twice the accelerating voltage is required for the RF systems. Therefore, the current nine RF cavities will be used as fundamental cavities and it is necessary to add two second harmonic cavities. The additional two cavities are planned to install by reconstructing the previously used 3-gap cavities into 4-gap cavities. Last year, assembly test of the first cavity was conducted to confirm that there were no problems with the basic structure. And this year, we are manufacturing the second frame and will complete the assembly of the two cavities. In addition, since the failure of inverter unit which is a component of the anode power supply is increasing, the measures are also taken. In this paper, preparation status of the second harmonic cavities and trouble issue of anode power supply are reported.

1. はじめに

J-PARC MR は、前段 3 GeV シンクロトロン (RCS) からの陽子ビームを 30 GeV まで加速し実験施設に供給している。現在の運転ビーム強度は、ニュートリノ実験 (T2K) 用の速い取り出し (FX) 運転で 500 kW 弱、ハドロン実験用の遅い取り出し (SX) 運転で約 50 kW となっている。進行中のビーム増強計画では、2021 年までに電磁石電源を新設し、2022 年の FX 運転で繰り返し周期を現在の 2.48 s から 1.32 s まで早めることで 750 kW 以上到達を目標にしている。

この高繰り返し化によるビーム増強計画が RF システムに要求する電圧は、基本波空胴で現状の約倍となる 510 kV、2 次高調波空胴で 110 kV と非常に高い電圧である。この要求に必要な電圧を得るため、運転当初から使用してきた金属磁性体コア (FT3M) よりシャントインピーダンスが 2 倍以上高い金属磁性体コア (FT3L) の開発、量産を行ってきた [1]。また、FT3L 用の 4 ギャップまたは 5 ギャップ空胴も新規に開発し、2016 年夏までに FT3M 用 3 ギャップ空胴 9 台全ての置き換えを行った [2-4]。現在 FT3L 空胴 9 台は、7 台を基本波空胴、2 台を 2 次高調波空胴として運用されており、順調に稼働している [5]。

一方、2022 年以降の繰り返し 1.32 s の運転では、加速電圧 510 kV 以上を発生させるため既設空胴 9 台全てを基本波空胴として運用することが必要となる。そのため、2 次高調波 110 kV 用の空胴が追加が必要となり、その検討をおこなった [6-8]。検討の結果、費用を抑えられる事からも以前使用していた FT3M-3 ギャップ空胴から 2 台の 4 ギャップ空胴を再構成して使用する事にした。本稿では、2022 年のビーム増強に向けた RF システ

ムの準備状況として、2 次高調波空胴組立の進捗状況と安定運転に関する課題を報告する。

2. 2 次高調波用空胴

2 次高調波の必要電圧 110 kV は、4 ギャップ空胴 2 台の合計 8 ギャップで発生させる。4 ギャップ空胴は、旧 3 ギャップ空胴の FT3M 磁性体コアとコアが設置されているタンクを再利用して組み立てる。

2.1 組立試験

FT3M-3 ギャップ空胴を 4 ギャップ空胴に再構成する際、冷却水配管や配線等空胴構成部品の多くを再利用できるように寸法や配置を旧架台と共通化して新架台の再設計を行った。昨年、空胴用架台を 1 台製作し、以下の項目を確認するため組立試験を行った。

1. 架台を脚に設置した状態でのアライメント
架台の支点を 3 脚から 4 脚に変更し、自重を支えながらのアライメント
2. タンクの設置及びアライメント
架台に設置したタンクの水平や傾き、タンク間距離のアライメント
3. ビームダクト接続試験
ビームダクトとダクト接続部品を取付して、寸法等の確認
4. 冷却水用配管の接続

再利用する FT3M コア及びタンクは MR トンネル内に保管されており、そのため項目 1~3 はビームライン横の通路側に臨時で架台脚をアンカー固定し、架台及びタンクのアライメントを行った。

Figure 1 は、タンクアライメント中の様子である。変更した脚への架台の設置及びアライメントは問題無く行う事ができたが、脚と架台を固定する部品の寸法不具合等があり修正を行った。タンクは、架台に対して水平や

* katsushi.hasegawa@kek.jp

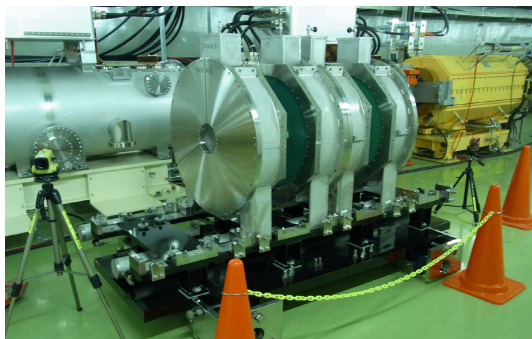


Figure 1: 2nd harmonic RF cavity while aligning tanks with the FT3M cores.

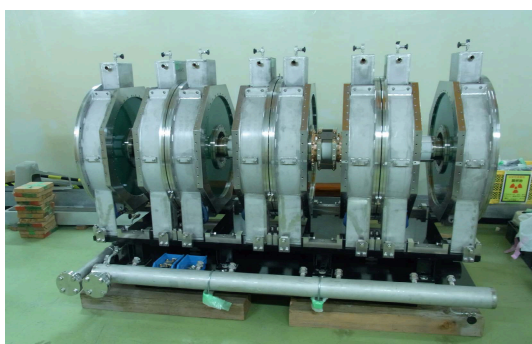


Figure 2: 2nd harmonic RF 4-gap cavity after reconstructing the previously used 3-gap cavities.

傾きをシムで調整されており、今回も許容範囲内であった。ただし、架台端に設置したタンクでは若干の傾き補正が必要となり、カプトンテープ1枚程度の補正を行っており、その都度の再確認と微調整は必要となる。その後、タンク位置の調整を行い、ギャップ間距離など予定寸法の1mm以内に設置する事ができた。

タンクのアライメント終了後、空胴を保管場所へ移動し、ビームダクトの納品をまって接続部品と共に空胴への取付を行った。Figure 2は、取付が完了した時の4ギャップ空胴である。空胴全体の長さを短くするため、ギャップ間距離も短くなっており、それに伴ってビームダクトの長さも変更している。寸法に問題はなく、接続部品も4ギャップ全てで取り付くことが確認できた。

項目4の冷却水配管接続については、一度空胴を解体し新架台を地上に搬出し後、実験室に残っているテスト空胴のタンクを用いて行った。Figure 3は、冷却水配管を接続した時の様子である。接続する事はできたが、空胴の製作年度によって配管取付位置に若干の変更があり、配管の向き等で窮屈な配置になってしまっている。

2.2 2台目の架台製作

1台目の組立試験から空胴の製作年度で変更箇所があり、注意が必要である事が分かった。また、タンクの位置決め部品など変更点をまとめ、今年度は2台目の製作を行う。現在の進捗状況は、2台目架台の設計が完了し、

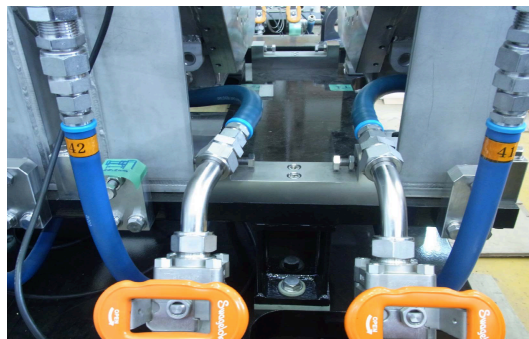


Figure 3: Water pipe connection test.

製作に入っている。完成予定は9月末であり、納品後昨年同様トンネル内でアライメント調整及びビームダクト取付まで行う。

2.3 空胴の組立予定

昨年の1台目の組立試験は、組立確認に必要な最低限度の部品で行った。今年度は2台分の空胴部品を発注済みであり、年末までに2台の空胴組立を完成させる予定である。ただし、年度初めにあったRCSからMRへのビームトランスポートライン偏向電磁石の故障[9,10]から運転計画が変更され、10月下旬からの運転が決まっている。トンネル内での作業期間が制限され空胴完成が来年にずれ込む可能性もあるが、ビームライン設置時期への影響はない。

3. 安定した利用運転に関する課題

安定したビームを継続的に供給するためには、システムの故障による運転停止をできる限り最小限にする事が重要である。

Table 1は、RFシステムにおける利用運転中に起こった重故障(復旧までに数時間以上を要する故障)の回数を2015年以降についてまとめている。スタディー中や利用運転をしていない時の故障は含まれていない。ここで、INVは陽極電源のインバーターユニット、VACはRF空胴の共振周波数調整用真空コンデンサ、DC-Cは終段増幅器内部に設置されている真空管プレートDC電圧が空胴側に印可されないようブロックしているDCカットコンデンサ、VTは真空管を示しており、括弧内の値は重故障の回数より故障した個数が多い場合の値となって

Table 1: Summary of Serious Failures that Occurred during Operation from 2015 to 2019

Year	Total	INV	VAC	DC-C	VT	others
2015	3	1	2	0	0	0
2016	14	9	1	3(4)	1	1
2017	8	5(7)	3	0	0	0
2018	9	5	2	1	2	0
2019	0	0	0	0	0	0

いる。2016年にDCカットコンデンサが多く故障しているが、これは1日で3個が集中的に故障したもので真空管を交換したあとは起こっていない。このことから真空管の動作不良が原因と考えているが正確には分かっていない。DCカットコンデンサの通常故障頻度は1年に1回以下となっている。その他に分類した故障は、陽極電源に組み込まれている接地器の動作不良であり、MRの陽極電源では運転当初から1回だけである。2019年は、運転時間が短いこともあり、重故障は起こっていない。よって、主な重故障の原因は、インバーターユニットと真空コンデンサであり、真空コンデンサの改良についてはこれまでも報告してきた [7]。これら重故障の復旧作業のうちインバーターユニットと接地器は地上部電源棟内の作業であるが、それ以外はトンネル内での作業となり、入域が必要となることから復旧まで半日程度要する。以下にインバーターユニットの現状について述べる。

3.1 インバーターユニットの現状

インバーターユニットの故障台数は、2016年以降増加した事がわかる。Figure 4は、2015年以降のMRのビームパワーとインバーター故障台数(一ヶ月毎)の推移である。ビームパワーが50kW前後のところはSX利用運転、300kW以上の所がFX利用運転を示している。ビームパワーが400kW弱を越える2016年初頭から故障台数が増加しており、実際に大部分がFX運転時の故障である。そのため、ビームパワー増加に伴いビームローディング補償が増えることで陽極電源への負荷が増大したためと考え、利用運転時の出力電流を定格以下に抑えるように調整している。しかし、調整以降も故障は起こっており、また50kWのSX運転時にも2台故障した事もあり、故障原因は特定できていない [11]。

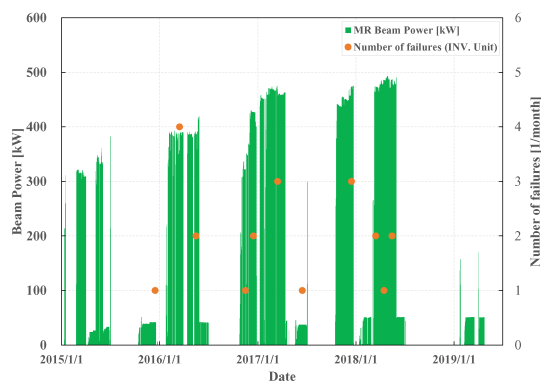


Figure 4: History of MR beam power and number of failures (inverter units) since 2015.

3.2 インバーター故障対策

運転当初から使用しているインバーターユニットの故障として、油タンク内で冷却水配管つぎめからの水漏れによる放電、油タンクシール材部分の不良による油のシミだし等があった。これらの問題は、配管接続方法の改良など製造方法の変更で解決しているが、油のシミだしに関してはまだ若干数ではあるが見られる。

一方、ここ数年の故障は、ほとんどがゲート基板異常や

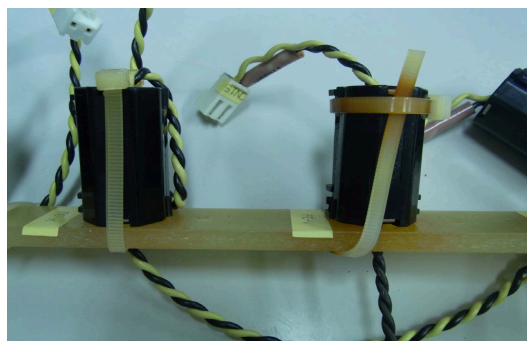


Figure 5: Example of noise filter in the failed inverter unit.

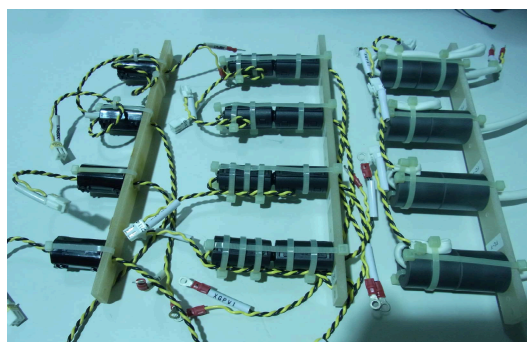


Figure 6: Comparison of three types of filters.

IGBTの破損であった。Figure 5は、ゲート基板に配置されたノイズ対策用フェライト (KEMET ESD-SR-150) である。故障時にゲート基板を交換すると結束バンドやフェライト内部を通してケーブル部分の変色が見られる物があった。また故障していない号機でも、同様な状態の物が見られた。通常仕様の結束バンドの使用温度は100度弱であり、変色している事からもフェライト自体が高温になっているのは間違いなく、キュリー点を超えているとノイズフィルター効果も期待できない。

ケーブル長や配置空間の制限から大幅な改良は難しいが、対策としてフィルター機能強化のため2個直列に配置した2S化や動作温度範囲が高いフェライト (TDK HF70RH26×29×13) への変更などを行ってきた。Figure 6は、左が初期のフェルター、中央が同じフィルターを2直列に配置した2S化版、右がフェライト自体を (TDK HF70RH26×29×13) に変更した現状態である。これらは、夏の長期メンテナンス期間の保守作業で順次現状態に置き替えを行っている。

また、陽極電源内部の雰囲気積極的に冷やすため電源棟エアコン吹き出し口の位置変更も行った。陽極電源内部は、2列3段が一区画となり前面下側から空気を取り入れ、上部のファンで排出する構造になっている。これまでのエアコン吹き出し口の位置では、電源棟内部で暖められた空気を取り込むことになりRFの陽極電源冷却としては効率的ではなかった。Figure 7は、陽極電源6号機の現状であり、空気の流れの一例を示している。エアコン吹き出し口が、陽極電源の空気取り入れ口上部



Figure 7: Airflow in case of APS#50-6.



Figure 8: A thermometer installed to measure the temperature at the air outlet in the APS.

に配置され、冷風をそのまま取り込むことができる。他の号機も同じように配置されている。さらに、陽極電源内部の温度上昇を測定するためデジタル温度計を配置した。Figure 8 は、陽極電源上部の排出口に配置した温度計である。試験的に同様の物を空気取り込み口 3 カ所と排出口 3 カ所に配置した。電源棟内が暑くなる 5 月~7 月の FX 運転中の温度変化を測定する予定だったが、加速器側の故障から利用運転がキャンセルされたため秋からの運転で温度上昇を測定する予定である。

3.3 真空管の寿命

MR RF システムでは空胴 9 台で 18 本の真空管を使用しており、フィラメント通電時間は稼働開始時期の違いはあるが概ね 3 万時間弱から 4 万数千時間超となっている。これまでの交換履歴は、3 回ある。そのうち 2016 年は同じ号機で相次いで DC カットコンデンサが故障したため、真空管動作不良を疑い他の号機で使用していた真空管に交換した。その後順調に運転できていた事から原因が真空管であった事は推測できるが、理由ははっきりとしていない。2018 年は、真空管 2 本の出力が他のものと比較し明らかに減少していた事で寿命と判断し交換した。交換時の通電時間は、約 4 万 1 千時間であった。

メーカーが示している寿命は 1 万 5 千時間である。いずれの真空管も 2 倍以上運転時間を越えており、何時故障してもおかしくはない。しかし、真空管が高額なこともあり、トンネル内に予備品を準備し、寿命(故障)での

交換対応という事になっている。

4. まとめ

2022 年のビームパワー増強に向けた RF システムの増強を進めている。昨年は 1 台目の空胴組立試験を行い、ビームダクト接続まで確認した。今年度は 2 台目の架台製作を進めており、秋以降に 2 台の空胴組立が完成する予定である。また、安定した利用運転継続のための対策を行っている。真空管は、予備をトンネル内に準備し、故障時の対応とした。インバーターユニットについては、今後も原因の追求と対策を継続する。

参考文献

- [1] C. Ohmori *et al.*, "High Gradient Magnetic Alloy Cavities for J-PARC Upgrade", Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011, pp. 2885-2887.
- [2] K. Hasegawa *et al.*, "金属磁性体コア (FT3L) を用いた RF 空胴の開発", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, August 9-11, 2014, pp. 621-623.
- [3] K. Hasegawa *et al.*, "金属磁性体コア (FT3L) を用いた RF 空胴の開発 (2015)", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, August 5-7, 2015, pp. 951-953.
- [4] K. Hara *et al.*, "J-PARC MR における金属磁性体 FT3L コアを使用した高周波加速空胴の開発状況", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, August 8-10, 2016, pp. 811-813.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Yoshii *et al.*, "Present Status and Future Upgrades of the J-PARC Ring RF Systems", Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29 to May 4, 2018, pp. 984-986.
- [9] M. Shirakata *et al.*, "J-PARC 3-50BT B15D 電磁石の層間短絡", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 to Aug. 3, 2019.
- [10] J. Takano *et al.*, "J-PARC 3-50BT B15D 電磁石におけるレイヤーショートの間接的推察", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 to Aug. 3, 2019.
- [11] M. Furusawa *et al.*, "J-PARC MR-RF 陽極電源におけるインバーターユニット故障増加に関する調査", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 to Aug. 3, 2019.