

## J-PARC MR における 2 次高調波用高周波加速空洞の開発状況 STATUS REPORT OF DEVELOPMENT OF SECOND HARMONIC RF SYSTEM IN J-PARC MR

原圭吾<sup>#,A)</sup>, 大森千広<sup>A)</sup>, 杉山泰之<sup>A)</sup>, 長谷川豪志<sup>A)</sup>, 古澤将司<sup>A)</sup>, 吉井正人<sup>A)</sup>,  
島田太平<sup>B)</sup>, 田村文彦<sup>B)</sup>, 山本昌亘<sup>B)</sup>

Keigo Hara<sup>#,A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Masashi Furusawa<sup>A)</sup>,  
Masahito Yoshii<sup>A)</sup>, Taihei Shimada<sup>B)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)A)</sup>

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency, JAEA

### Abstract

The upgrade project of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Main Ring (MR) is ongoing to increase the beam power of 750 kW. On the upgrade project, the installation of two new RF cavities for 2<sup>nd</sup> harmonic with reused FT3M cores have been planned to enhance the total acceleration voltage of MR. In this paper, we report the detail of plan and the present status of development.

### 1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Main Ring (MR)は、陽子を 3 GeV から 30 GeV まで加速しニュートリノ実験施設及びハドロン実験施設に向けて陽子ビームを供給している。2018 年 6 月までの運転ではニュートリノ実験のための早い取り出し(FX)運転では 500 kW、ハドロン実験のための遅い取り出し(SX)運転では 51 kW のビーム強度を達成している。FX 運転は 2.48 s 周期の繰り返しで行われている。今後はこの繰り返し周期を 1.32 s に早めることでビームパワーを 750 kW とし、その後さらなる高繰り返し化とバンチあたりの粒子数増加により 750 kW 以上に増強することが計画されている。最初のステップである 1.32 s の高繰り返しを実現するために高周波加速電圧を高める必要があり、基本波電圧は 510 kV、2 次高調波電圧は 110 kV 以上を目標としている。この目標電圧に対する取り組みとして、これまでに従来の金属磁性体コア(ファインメットコア)FT3M より高加速勾配を達成できる FT3L コアの開発を行ってきた [1]。新コア FT3L を採用した空洞に置き換えることで限られた空間に、より多くのギャップを設置することが可能となり、高周波加速電圧を増加させることが出来た [2, 3]。現在の RF 空洞システムは、7 システムで基本波加速電圧を 390 kV、2 システムで 2 次高調波加速電圧を 110 kV 達成している。次の段階では、上記既設の 9 システムをすべて基本波用空洞として利用し、新たに 2 次高調波用空洞 2 システムを追加することで高周波加速電圧の増加を目指している。新システムを導入するにあたり、予算を低く抑える観点から旧コア FT3M を再利用する方針で、2 次高調波用の空洞本体や電源、冷却水、ケーブルの配置についての具体案を検討した。本稿では 2 次高調波空洞増設計画の現状、今後の予定及び課題について述べる。

### 2. 2 次高調波空洞

MR は 3 回対称なリング型加速器であり、四極電磁石の通し番号を使ってリング 1 周にわたり 1 番から 216 番までのアドレス番号を割り当てている。増設予定の 2 次高調波空洞は、直線部 A(Ins-A)のアドレス 002 番に 2 システム設置する。空洞 1 システムあたりのギャップ数は 4 である。アドレス 002 番の電磁石、真空バルブ、空洞、ビームモニター配置図を Fig. 1 に示す。初期案では設置スペースの都合上、新コア FT3L 空洞の設置を考えていたが、予算を低く抑える観点から旧コア FT3M を再利用することにした。新コア FT3L 空洞 2 システムの場合は全長が 4722 mm に収まるが、旧コア FT3M 空洞 2 システムの場合は全長 5234 mm のスペースが必要である。このため各機器グループで調整を行い、ガスシートビームプロファイルモニター(GSM)上流部の真空遮断用ゲートバルブ(GV)をさらに上流のアドレス 001 番に、フライングワイヤーモニター(FWM)下流部にある GV を下流のアドレス 004 番に移動することとし、空洞が設置出来るスペースを確保した。

<sup>#</sup> keigo.hara@kek.jp

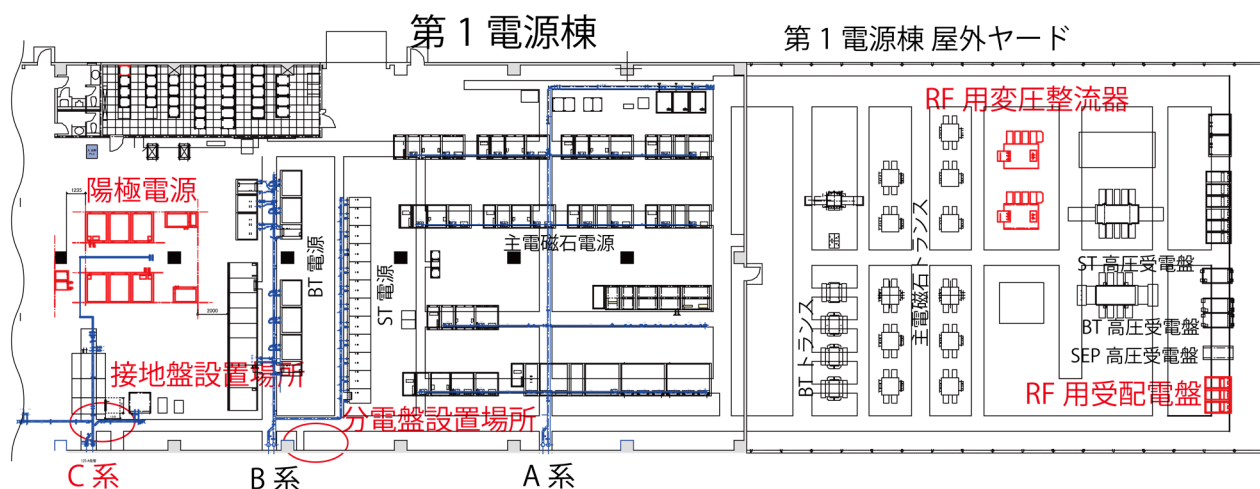


Figure 2: Plan view of the D1 power supply building.

2018 年度はビームパイプ及び空洞架台の製作を進めており、1 台目の空洞を試作する予定である [4]。2019-2020 年度に増幅器 2 式、電源システム 2 式及び 2 台目の空洞の製作を行い 2021 年度に空洞及び増幅器のインストールとゲートバルブ等の機器の再配置を行う。運用開始は 2021 年秋を目指している。

### 3. 電源システム

2 次高調波空洞用電源システムは変圧整流器、陽極電源などで構成し、第 1 電源棟に設置する。第 1 電源棟の平面図を Fig. 2 に示す。赤い文字で記している箇所が今回の 2 次高調波空洞用電源システムに関連する設備の場所を示している。

#### 3.1 高圧受配電設備

高圧受電に関しては配電設備に空きがないため既存システムを改造して利用する。現状及び陽極電源を追加した場合の F-103 電力系統構成概略図を Fig. 3 に示す。赤枠で示した設備が今回追加する設備を表している。Figure 3(a) に示すように、現状は上位側である 50 GeV 特高変電所高圧配電盤(時限要素整定値 300 A 相当)に補正電磁石(ST)電源受電盤、入射路電磁石(BT)電源受電盤、セプタム電磁石(SEP)受電盤が直接接続されている。

Figure 3(b) に示している新システムの特徴を以下に述べる。

- 第 1 電源棟屋外ヤードに受電盤を設け、特高配電盤側ケーブルとの接続点を責任分界点とした。この点を境にして上位を施設側、下位を機器側とする。
- 機器を統括する受電盤を設置する。統括受電盤を切断することで第 1 電源棟の既設機器と RF 機器を独立にメンテナンスすることができる。

高圧設備に関するスケジュールは以下のとおりである。

2019 年度: 陽極電源 1 式、キュービクル型高圧受電盤制作。特高配電盤～第 1 電源棟屋外ヤード受電盤間ケーブル増設。

2020 年度: 陽極電源、高圧受電盤設置。陽極電源 2 式

目制作。

2021 年度: 陽極電源設置。特高配電盤の時限要素整定値を 600 A 相当に変更、ケーブルを接続し、運用を開始。

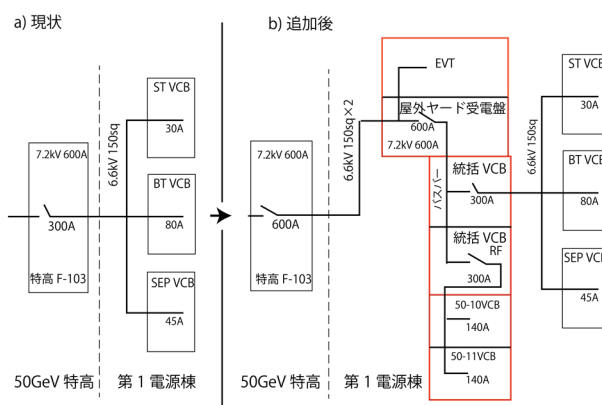


Figure 3: Power system diagram of the F-103.

#### 3.2 低圧設備

低圧設備に関しては分電盤の増設工事を 2018 年度から実施している。単相は既存の一般・実験電力 No. 1 系統に、三相は電磁石 No. 1 系統に増設する。各系統の定格電流と増設前後の最大需要電流量(MDA)を Table 1 に示す。実績をもとに算出した新システムに必要な電流量は、単相が 13 A、三相が 300 A であり、増設しても定格電流を越えることはない。したがって変圧器を変更せずとも増設可能である。また、電力投入時の突入電流は単相が最大 76 A、三相が最大 429 A である。それらに対して瞬時遮断電流量は単相、三相ともに定格電流の 5 倍程度に設定しているため突入電流で遮断機が遮断されることはない。また他の機器同様に専用の接地極が必要のため、分電盤増設と併せて接地極設置工事も開始している。接地極の接地抵抗値は 10 Ω 以下でなければならない。これまでの実績から接地抵抗は 3 Ω 程度になると見積もり、今回は直径 28 mm、長さ 1.3 m の溶融亜鉛めっき鋼棒を 16 本継ぎ足し最終深度 21.7 m まで打ち込むことにしている。

Table 1: Power Consumption of Low Voltage

盤名称	定格電流 (A)	MDA (A)
一般・実験電力 No. 1 (单相) 増設前	1429	271
電磁石 No. 1 (三相) 増設前	825	228
一般・実験電力 No. 1 (单相) 増設後	1429	284
電磁石 No. 1 (三相) 増設後	825	528

## 4. 冷却水設備

### 4.1 MR トンネル

MR トンネルにおける 2 次高調波空胴設置場所と冷却水配管システムの配置を Fig. 4 に示す。図中の星印で示した場所に空胴を設置する。赤、青、緑色のラインがそれぞれ第 1、2、3 機械棟冷却水システムを示している。2 次高調波用加速空胴及び終段増幅器の冷却には第 3 機械棟(M3)冷却水システムを利用する。現状 M3 冷却水システムは、循環ポンプの送水能力 11700 l/min に対して負荷容量が 9000 l/min と小さいので、過剰流量はバイパスしている。2 システムの空胴及び増幅器冷却に必要な追加流量は合計 1600 l/min なので、バイパス流量を 2700 l/min から 1100 l/min に変更することでポンプの負荷を変えずに M3 冷却水に空胴及び増幅器を組み込むことが出来る。運転開始当初は電磁石系冷却水と空胴冷却水は同一冷却水システムで利用する。将来的には MR トンネル内に熱交換器及び循環ポンプを設置し、機械棟から送られてくる冷却水を二次冷却水として使用することで電磁石系と空胴冷却水系を分離することも検討している。

### 4.2 第 1 電源棟

Figure 2 に示すとおり第 1 電源棟の冷却水は 3 システムあり、A システムが主電磁石用、B システムが入射路電磁石機器用、C システムが入射電磁石機器用に使用されている。3 システム合わせた負荷容量は 2610 l/min であり、循環ポンプの送水能力 2380 l/min を上回っている。使用電流はモーターの定格内に収まっているが、これ以上負荷を追加することは望ましくない。2 次高調波空胴用電源システムは C システムを利用し、2 システム全体で必要な冷却水流量は 360 l/min である。通水開始時期は偏向電磁石電源(流量 380 l/min)が 1 台使用停止になる 2021 年度を計画している。流量が同程度の偏向電磁石電源の通水停止と空胴用電源の通水開始を同時期にすることで循環ポンプの負荷が変わらずに済む。

## 5. ケーブルルート

第 1 電源棟から 2 次高調波空胴までのケーブルルートは、電源棟から MR トンネルまでは第 1 電源棟サブトンネルを、サブトンネルから空胴までは Ins-A を通すことを予定している。サブトンネルのケーブル敷設では、すでに設置されている入射ダンプ用のケーブルラックを使用する。入射ダンプは現在廃止されておりラック上のケー

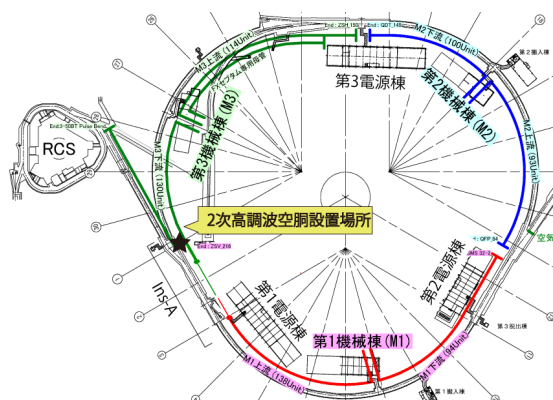


Figure 4: Layout of cooling-water pipe lines.

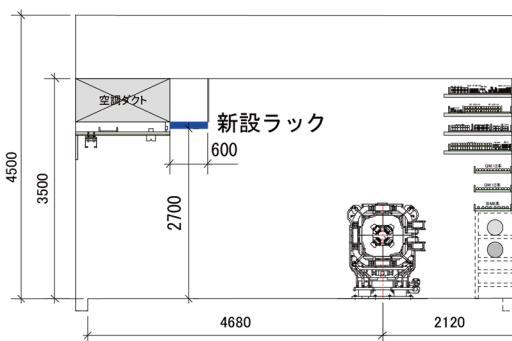


Figure 5: Cross-sectional view of the Ins-A.

ブルは撤去済みである。ラックの大きさは 600 mm×100 mm で今回敷設するケーブルがちょうど収まる大きさである。

Ins-A の断面図を Fig. 5 に示す。Ins-A に関しては、既設ケーブルラックに空きがないため通路側の送風機ダクトに沿ってケーブルラックを新設する。ラックの設置高さは、他の機器と干渉しない及び敷設作業を容易にするために床面から 2700 mm とした。Ins-A コリメータ部は非常に残留線量が高いため敷設作業は慎重に行う必要がある。敷設は 2019-2021 年にかけて行う予定である。

## 6. おわりに

本稿では 750 kW ビームパワー増強に向けた J-PARC MR における加速空胴増設計画について紹介した。旧コア FT3M を再利用した 2 次高調波空胴を 2 システム追加し、既設 9 台の空胴を基本波用空胴として利用する計画である。2 次高調波空胴増設に伴う機器の配置、水や電力等の施設全体にかかわる事柄の具体案を検討した。今回の検討を基礎として更に最適化を進めながら、今後は 2021 年度の運用開始を目指して設計及び製作を進めていく。

## 参考文献

- [1] C. Ohmori *et al.*, "HIGH GRADIENT MAGNETIC ALLOY CAVITIES FOR J-PARC UPGRADE", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011.
- [2] K. Hara *et al.*, "Status report of development of RF cavities with FT3L MA cores in J-PARC MR", Proceedings of PASJ2016, Makuhari, Aug. 2016.

- [3] K. Hasegawa *et al.*, “Status report of the RF cavity with FT3L MA cores and development of a vacuum capacitor”, Proceedings of PASJ2017, Sapporo, Aug. 2017.
- [4] K. Hasegawa *et al.*, “R&D status of 2<sup>nd</sup> harmonic RF cavities with FT3M MA cores and a vacuum capacitor for J-PARC MR”, Proceedings of PASJ2018, Nagaoka, Aug. 2018.