

## J-PARC MR の FT3M MA コアを用いた 2 次高調波用 RF 空洞と 真空コンデンサの開発状況

### R&D STATUS OF 2ND HARMONIC RF CAVITIES WITH FT3M MA CORES AND A VACUUM CAPACITOR FOR J-PARC MR

長谷川豪志 \*<sup>A)</sup>、大森千広 <sup>A)</sup>、杉山泰之 <sup>A)</sup>、原圭吾 <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>

Katsushi Hasegawa\*<sup>A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Keigo Hara<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)</sup>

<sup>A)</sup>KEK/J-PARC <sup>B)</sup>JAEA/J-PARC

#### Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), a upgrade plan to increase the beam intensity by increasing the repetition rate is in progress and a beam intensity of about 490 kW has been achieved for neutrino experiment. In this upgrade plan, an acceleration voltage of at least about 510 kV or more is required for the RF system to achieve 750 kW or more. The current RF system consists of seven fundamental cavities and two second harmonic cavities in total of nine, which cavities use FT3L cores. In order to generate an acceleration voltage of 510 kV, we plan to use all nine cavities as fundamental cavities and to add two 2nd cavities with four acceleration gaps by recycling the previously used FT3M cavities. Regarding a vacuum capacitor which is one of the causes of failure during operation, we are also continuing to develop a vacuum capacitor with increased withstand voltage in order to reduce failures and increase generated voltage of cavity. In this paper, we report the R&D status of a 2nd harmonic RF cavity with FT3M MA cores and a vacuum capacitor.

#### 1. はじめに

J-PARC MR では、前段加速器 (RCS) から入射された 3 GeV 陽子ビームを 30 GeV まで加速し物理実験施設に供給している。2018 年 5 月までの運転ビーム強度は、ニュートリノ実験の早い取り出し (FX) 運転で約 490 kW であった。また FX 運転では、現状 2.48 s の繰り返し周期を 1.32 s 周期に早めることで 750 kW 以上のビーム強度を目指したビーム増強計画が進められている。このビーム増強計画で RF システムに要求される電圧は、基本波空洞で 510 kV 以上、2 倍高調波空洞で 110 kV 以上となっている。

この要求に対する空洞開発として、従来使用していた金属磁性体 (FT3M) コアよりもシャントインピーダンスの高い金属磁性体 (FT3L) コアの開発及び量産化を行ってきた [1]。また、FT3L 用に 1 台あたりの加速ギャップ数を 3 から 4 (または 5) へ増やした空洞本体の再設計もおこない、2014 年夏から 2016 年夏にかけて全空洞 9 台の入れ替えを順次行った [2-4]。2017 年秋から現在までの運転では、新空洞 9 台全てを 4 ギャップ化し、基本波空洞を 7 台、2 次高調波空洞を 2 台として運用している [5]。

現状の 2.48 s 周期では、基本波空洞 7 台で余裕を持った運用ができています。しかし、加速電圧が 510kV 以上必要となった場合、新空洞 9 台全てを基本波空洞として運用する計画である。その際、2 次高調波空洞を新たに新設しなければならないが、コアへの印可電圧を大きく増やすことなく要求の 110 kV 以上をまかなうためには 4 ギャップ空洞 2 台が必要となる。これら条件を満たすよう空洞の新設に関して、空洞本体製作及びトンネル内

インストール場所、また電源システムやケーブル配線等様々な検討をおこなっている [6]。

本稿では、空洞本体について行った検討結果とその準備状況、今後の予定について述べる。

#### 2. 2 次高調波用の空洞

2 次高調波空洞には 110 kV 以上が要求される。現在の運転では、FT3L 用 4 ギャップ空洞 2 台の合計 8 ギャップで必要な電圧を発生させている。

##### 2.1 FT3M コアの 4 ギャップ空洞

通常運転で RF 空洞が発生するギャップあたりの電圧は、約 14kV である。金属磁性体コアに電場がかかる負荷を同程度で使用すると必要ギャップ数は 8 以上となる。よって、必要な空洞の台数は 4 ギャップ空洞が 2 台、もしくは 3 ギャップ空洞が 3 台となる。

運転に使用されている RF 空洞は、2016 年夏 FT3L 用空洞 9 台に置き換えが完了した。そのため初期の FT3M 用 3 ギャップ空洞 (旧空洞)9 台がトンネル内で保管されている (Fig. 1)。8 ギャップはこの FT3M 用空洞 3 台を再利用すれば可能ではあるが、インストール予定場所の設置スペースや新設電源等を 3 セット用意するコストの両面から現実的ではない。よって、設置する空洞は 4 ギャップ空洞 2 台とし、次の 3 つを検討した。

1. FT3L-4 ギャップ空洞 : 2 台  
予定スペースへの設置 : 可  
コスト : 大 (新規製作 2 台)
2. FT3M-4 ギャップ空洞 : 2 台  
予定スペースへの設置 : 現状不可  
コスト : 小 (一部再利用)
3. FT3L と FT3M-4 ギャップ空洞 : 各 1 台

\* katsushi.hasegawa@kek.jp



Figure 1: 3 Gap cavities with FT3M.

予定スペースへの設置：現状不可  
コスト：中 (新規製作+一部再利用)

FT3L-4 ギャップ空胴の場合は全て新設、FT3M-4 ギャップ空胴の場合はコア及びそのタンクを再利用し空胴架台を新設する事になる。コストの面から第2案を採用したいが、現状の設置予定場所は FT3M-4 ギャップ空胴 2 台分の物理的なスペースが足りなかった。しかし、RF 空胴近傍の機器グループとの調整からインストール時に機器を再配置する事で FT3M-4 ギャップ空胴 2 台分の設置スペースを確保できる目処をつけることができた。Fig. 2 に、空胴インストール予定時の機器配置を示す。空胴前後のガスシートモニター (GSM)、フライディングワイヤーモニター (FWM)、ゲートバルブ (GV) の位置を変更している。よって空胴は、FT3M コアを再利用した 4 ギャップ空胴に決定した。

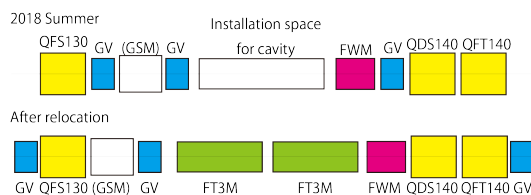


Figure 2: Install plan of FT3M 4 gap cavities.

## 2.2 FT3M コアの状態と使用タンクの選定

旧空胴のインストールコア、タンク内コアの組み合わせを Table 1 で示す。インストールコアは、全体の 4 割が再研磨工程を経て再利用したコアである。また、一つのタンク内には 3 枚のコアがインストールされている。

ここで再研磨コアであるが、これは J-PARC の稼働初期にコアのカット面が錆びた、もしくは錆が元で発熱、放電等による損傷を受けたコアである [7]。要因は、電磁石系と共通であった冷却水にコアのカット面が直接触れていた事であった。この錆対策として、全てのコアのカット面にポリシラザンコーティングとシリコン系ゴムシールで防水対策を施してある。更に現在の空胴設置場所では専用の冷却水系を増設する事で分離してあるが、2 次高調波空胴インストール予定場所では電磁石系と共通である。しかしこれらの防水対策済コアは、冷却水を分離するまでの約 1 年の運転でインピーダンス低下もな

Table 1: Installation History of 3 Gap Cavities with FT3M

| Cav# | Number of FT3M<br>(Condition of Installed FT3M Cores) |          | Number of Tank |                 |
|------|---|----------|----------------|-----------------|
|      | As-is   | Repolish | As-is          | As-is +Repolish |
| 1    | 18*   | 0        | 6*             | 0               |
| 2    | 0   | 18       | 0              | 6               |
| 3    | 6   | 12       | 0              | 6               |
| 4    | 11  | 7        | 3              | 3               |
| 5    | 18  | 0        | 6              | 0               |
| 6    | 9   | 9        | 0              | 6               |
| 7    | 6   | 12       | 0              | 6               |
| 8    | 6   | 12       | 0              | 6               |
| 9    | 18  | 0        | 6              | 0               |

Table 2: The Total Rp of Each Tank

| Cav# | T1 / T2 / T3 / T4 / T5 / T6 [ $\Omega$ ]      |
|------|---|
| 1    | 784.3 / 784.5 / 786.7 / 787.9 / 827.1 / 827.5 |
| 4    | - / 773.1 / 772.2 / 771.8 / - / -             |
| 5    | 736.9 / 736.5 / 737.0 / 736.3 / 737.5 / 736.7 |
| 9    | 769.8 / 769.7 / 769.6 / 769.6 / 768.6 / 768.9 |

く安定して使用できていた。よって、今回の再利用でも損傷にはつながらないと考えている。

上記の理由から全てのタンク (コア) は再利用可能であるが、今回の使用タンクの選定では未損傷コア及び空胴インピーダンスが最大となる組み合わせを選ぶことにした。この条件に当てはまるタンクは、空胴 1、5、9 の全てのタンクと空胴 4 の 3 台である。Table 2 は、インストール時の 1.72 MHz シャントインピーダンス (Rp) のタンク毎合計を表している。空胴 1 のタンク 5、6 は試験的にインストールした FT3L コアを使用している。これらからタンクの組み合わせは、空胴 1 (6 タンク)+ 空胴 4 (T2 と T3) と空胴 9 (6 タンク)+ 空胴 3 (T2 と T3) とした。

## 2.3 4 ギャップ空胴用架台

4 ギャップ空胴用の新架台は、旧空胴のタンク (コア) を再利用する事から基本構造は 3 ギャップ空胴の拡張とし、更に流量計やギャップショート機構等の再利用も可能とするため変更点を少なくするように設計した。全体の強度が上げるため梁など細かい変更もしているが、その中でも次の 2 点について大幅な変更を行った。

### 1. 架台の脚：3 → 4 脚に変更

旧空胴は 3 脚で空胴を支えていた。しかし、空胴を乗せたまま上下方向の微調整ができないなどアライメントしづらい部分もあった。FT3L 用空胴では、支点を 4 脚に変更し、自重を支えながら上下できる構造に改良してある。今回は、同様の機構を盛り込み架台設置部分も含めて変更した。

## 2. タンク間距離の変更

空洞全体の長さを短くするため、FT3L 空洞と同じく加速ギャップ側タンク間距離 (4 カ所) を 190mm から 175mm に縮小した。また、新規架台に移設した時のずれを吸収するためタンク同士が設計上隙間 0mm で設置されていた所 (3 カ所) を +2mm とした。最終的な全体長は 2346mm となるが、これは FT3L 4 ギャップ空洞と比べ +259mm となっている。

基本的に空洞のタンクは、架台に対してアライメントされておりタンク同士を入れ替えてもきちんと組み上がるはずである。しかし、以前タンクの入替えを行った際には再調整が必要となった。また今回は、4 ギャップ空洞として再構成する事から新しく製作した架台にタンクを移設する。よって、架台製作、タンクの移設とアライメント、ビームダクトの組み込み、配線等を含め空洞が完成するまでの一連の工程を確認する組み立て試験を計画している。

### 2.4 組み立て試験と今後の予定

今年は MR がロングシャットダウン中であり、12 月までトンネル内作業が可能のため、ビームダクト組み込みまでの試験を予定している。新規製作の架台は設計が終了し、10 月上旬に納品予定である。また、ビームダクトも 12 月上旬納品を目標に製作が進められている。

試験の準備としては、旧空洞 1、4、5 の 3 台の解体が終了している。Figure 3 は、空洞から解体された再利用予定タンク (10 台) である。10 月上旬からは新規製作した架台が納品されるため、架台本体や変更点である脚の検査を行う。問題が無ければ、10 月中旬からトンネル内に架台を移動し 2 週間程度の予定でタンクのアライメントや再利用品の接続作業を行う。更に 12 月中旬には、ビームダクトを組み込む予定である。

今年中にビームダクト組み込み試験まで終了できれば、ほぼ一連の工程を確認できた事になる。ここで設計変更など大きな問題がなかった場合、1 台目の不足部分及び 2 台目の製作を 2019 年度初めからスタートできる。製作が順調に進めば、2019 年秋には 2 台の 2 次高調波空洞のインストール準備が整う。また、設計変更や作業工程の遅延があった場合でも 2020 年秋には完成予定である。



Figure 3: 10 recycle tanks installed FT3M cores.

## 3. 真空コンデンサの開発

真空コンデンサの耐電圧低下による MPS 回数は、2017 年秋からの運転でも 3 回発生し、合計 4 個交換している。現在の運転では、基本波空洞に台数的余裕があるため交換作業は直近のメンテナンス日に行う事ができる。しかし、今後の基本波空洞 9 台体制に移行後は故障時に対処せざるを得ず、安定したビーム供給のため真空コンデンサの改良を続けている。

### 3.1 真空コンデンサの設計

コアの性能向上により空洞のインダクタンスが増加した分、共振周波数調整に必要なコンデンサ容量は少なくなり 250-300pF の範囲で設計を行っていた [5]。その後のメーカーとの打合せから更に大幅な変更を行った。

使用場所の制限から径方向の寸法変更はしていない。セラミックの長さ方向は、放電対策から許容できる最大値として +20mm 長くした。また、電極の厚みも 1mm から 2mm へと厚くした。これは、電極を厚くすることで加工性 (精度) や剛性が上がり、組み立て精度が上がる。結果、耐電圧を上げることができているというメーカー側からの提案である。次にセラミック内側表面の最大電場強度の法線成分 ( $E_s$ ) を SCF-353.7k から約半分程度まで下げる用に最外周電極位置を調整した。そして、250-300pF の範囲におさまるように内部電極を配置した。Table 3 に、現在使用している 370pF コンデンサ (SCF-353.7k) とメーカー側が提示してきた寸法の比較をまとめる。セラミック内側表面の最大電場強度の法線成分比 ( $E_s/E_s^{353.7k}$ ) は、寸法を元に KEK 側で計算した値である。設計変更に伴い定格ピーク試験電圧 (1 分間放電なし) を 35 kV<sub>peak</sub> から 40 kV<sub>peak</sub> に、良否判定 (暗電流 <100 μA) の印可電圧も 25 kV<sub>peak</sub> DC から 28.5 kV<sub>peak</sub> DC へと変更した。

Table 3: Parameter of Vacuum Capacitor

|                                       | SCF-353.7k | SCF-402.5H132C |       |
|---------------------------------------|------------|----------------|-------|
| Capacitance [pF]                      | 370        | 265            |       |
| Distance (Electrode - Insulator) [mm] |            |                |       |
|                                       | 2.0        | 3.6            | +1.6  |
| Insulator Length [mm]                 |            |                |       |
|                                       | 45         | 65             | +20   |
| $E_s/E_s^{353.7k}$                    | 1          | 0.50           |       |
| Electrode                             |            |                |       |
| Distance [mm]                         | 2.7        | 3.3            | +0.6  |
| Thickness [mm]                        | 1          | 2              | +1    |
| Number                                | 13         | 9              | -4    |
| Fabrication                           |            |                |       |
| Mechanical processing                 |            |                |       |
| Head processing                       | R0.5       | R1.0           |       |
| Distance(electrode - flange)          |            |                |       |
|                                       | 5.25       | 6.5            | +1.25 |
| Acid cleaning + Pure water cleaning   |            |                |       |

### 3.2 SCF-402.5H132C の印可試験

今回 SCF-402.5H132C は 5 個製作した。Figure 4 は、試作品の SCF-402.5H132C と SCF-353.7k である。Table 4 に出荷時の検査記録と納品後に KEK 側で行った暗電流測定結果を示す。測定器は、メーカー側が「MATSUSADA HAR-60R1-LF」、KEK 側が「MATSUSADA HAR-60R1-LN」を用いている。出荷時の検査では全てが  $2\mu A$  であった。しかし受け入れ検査時点では No.1、2、5 は  $0\mu A$  と良好な結果が得られていたが、No.3 が  $44\mu A$  と若干の暗電流が測定され、更に No.4 は 27.6kV で  $100\mu A$  以上と基準を満たしていなかった。以前から出荷検査時の暗電流測定値と比較し納品後の測定値が悪くなる個体が見られる。

No.4 は、メーカーと協議の上再コンディショニングを行う事とした。今回は、時間経過による性能劣化を出荷前に判別できるかを調べるため、保管期間をもうけその前後に暗電流測定を複数回行う事とした。また追加測定として、内部の真空度が  $10^{-3}$  Pa 以下かどうかをマグネトロン法で行う真空度測定も試験的に行った。これらは、メーカーが長期間保証の為に他の部品に課している試験を参考にした。また、No.3 も輸送中の保護材不良と推測される打痕があったため、交換する事になった。

Table 5 にメーカー側で測定した 3 回の結果と KEK 側の 1 回を示している。真空度測定は、最初の 2 回のみ測定しいずれも  $10^{-3}$  Pa 以下であった為、3 回目は行わなかった。再コンディショニングの効果がみられ、測定時に  $1\mu A$  程度の変化はあるが耐電圧低下は見られなかった。

### 3.3 今後の課題

構造の見直しから、耐電圧の高い真空コンデンサ製作の目処をつけることができた。今後は、時間経過後に耐電圧が劣化するコンデンサの選別をするためどのような

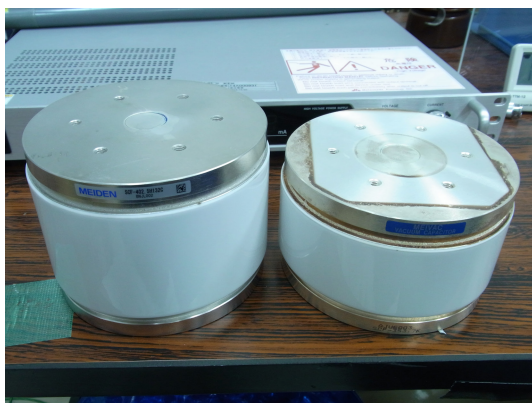


Figure 4: SCF-402.5H132C and SCF-353.7k.

Table 4: Dark Current of SCF-402.5H132C (28.5 kVDC)

|                     | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| in mfr. [ $\mu A$ ] | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    |
| in KEK [ $\mu A$ ]  | 0    | 0    | ~44  | -    | 0    |

Table 5: Leak Current after Conditioning (No.4)

| DC Volt. [kV]     | 5/24        | 5/31        | 7/3 | 7/20(KEK) |
|-------------------|-------------|-------------|-----|-----------|
| 25.0              | 0           | 0           | 0   | 0         |
| 26.0              | 0           | 1           | 0   | 0         |
| 27.0              | 1           | 1           | 1   | 0         |
| 28.0              | 1           | 2           | 1   | 1-2       |
| 28.5              | 2           | 3           | 2   | 2         |
| Deg. of Vac. [Pa] | $< 10^{-3}$ | $< 10^{-3}$ | -   | -         |

な試験が製造過程もしくは出荷前検査に効果的かを検討する。

## 4. まとめ

750kW ビームを加速するには新たに 2 台の 2 次高調波用 4 ギャップ空胴を新設する。この空胴について、FT3M コアを使用した旧空胴のタンクを再利用し、4 ギャップ空胴として再構成する事でコストを抑えながら準備を進めている。2018 年は、1 台の架台及びビームダクトを製作し、10 月に新架台とタンクの移設及びアライメント、更に 12 月にはビームダクトの組みこみ試験を行う予定である。早ければ 2019 年度には 2 台の 2 次高調波空胴の組み立てが完了し、インストール準備が整う予定である。

また現状品より 3kV 以上検査電圧が高い真空コンデンサの設計と試作を行い、全数ではないが満足する結果を得られた。今後は、時間経過で耐電圧が劣化するコンデンサの選別方法や試験方法を検討していく。

## 参考文献

- [1] C.Ohomori *et al.* "HIGH GRADIENT MAGNETIC ALLOY CAVITIES FOR J-PARC UPGRADE", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011.
- [2] K. Hasegawa *et al.*, "第 11 回日本加速器学会年会", 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.*, "第 12 回日本加速器学会年会", 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.*, "第 13 回日本加速器学会年会", 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.*, "第 14 回日本加速器学会年会", 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.*, "第 15 回日本加速器学会年会", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018.
- [7] K. Hasegawa *et al.*, "第 9 回日本加速器学会年会", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 1192-1195.