

金属磁性体コア (FT3L) を用いた RF 空洞の開発 DEVELOPMENT OF THE RF CAVITY WITH FT3L MA CORES

長谷川 豪志 *^{A)}、大森 千広 ^{A)}、戸田 信 ^{A)}、原 圭吾 ^{A)}、吉井 正人 ^{A)}
野村 昌弘 ^{B)}、山本 昌亘 ^{B)}、島田 太平 ^{B)}、田村 文彦 ^{B)}

Katsushi Hasegawa*^{A)}, Chihiro Omori^{A)}, Makoto Toda^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}
Masahiro Nomura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}, Taihei Shimada^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}

^{A)}High Energy Accelerator Reserch Organization, KEK

^{B)}Japan Atomic Energy Agency, JAEA

Abstract

The upgrade scenario by increasing the repetition rate of the J-PARC MR is in progress. This scenario requires the two times higher acceleration voltage for the RF cavities. For this reason, all RF cavities are going to be replaced to the new designed cavity. In a newly designed RF cavity, FT3L cores with an impedance characteristic higher than the conventional FT3M core are used. Six FT3L cores were installed in one of FT3M-loaded RF cavity in 2012 summer and the cavity is operated without trouble. The length of the FT3L-loaded RF cavity can be shorter than FT3M-loaded RF cavity because the thickness of FT3L core is 10 mm thinner than FT3M core. It is possible to allocate the RF straight section to many acceleration gaps. Now, mass production of a FT3L core and development of a new cavity for FT3L are in progress. In this paper, the development of the new cavity, the results of the high power test using mass-produced FT3L cores and an improvement plans are reported.

1. はじめに

J-PARC ではビーム増強計画が進められており、リニアックでは昨年夏に RCS への入射エネルギーが 180MeV から 400MeV へと増強され、RCS でも MLF への 1MW ビーム供用運転へ向けたビーム調整が進められている。そして MR では、RCS からの入射ビーム強度増強と繰り返しを早くする事で 750kW 運転へ向けたビーム増強計画を進めている。この計画では、繰り返しを 0.4Hz から 1Hz まで早くする事を想定しており、これは RF 加速電圧として 280kV の 2 倍に当たる 560kV が必要となる。

MR には現在 9 台の RF 空洞が設置されており、8 台が基本波、残り 1 台が 2 倍高調波用に調整されている。空洞には加速ギャップが 3 つあることから、加速に必要な 280kV の電圧を 24 ギャップでまかなっており、単純には空洞の設置台数か空洞当たりの出力電圧を倍にする事で 560kV を確保できる。しかし、MR の空間的制限から現状の RF 空洞を単純に増やしていくことは難しく、また空洞当たりの電圧を 2 倍にすることもコアの絶縁破壊や冷却、AMP 側の容量を考えると現実的ではない。そこで現在の空洞で使用されているコア (FT3M) よりもインピーダンス特性が高いコア (FT3L) を使用した空洞を新たに設計する事にした。

MR で使用する直径 800mm の大型 FT3L コアは製造設備の問題からこれまで製造できていなかったが、J-PARC において製造試験を行い大型 FT3L コアの製造を確認した^[1,2]。また 2012 年夏から 1 ギャップ分に当たる 2 つの Tank で FT3M コアから FT3L コアに 6 枚を置き換え、インピーダンス低下やトラブルもなく順調に運転で使用してきた。昨年からはメーカーによる大型 FT3L コアの量産化と FT3L 用空洞の設計も開始した。以下に、新しく設計した空洞の概略および置き換え計画、量産 FT3L コアを用いテストベンチで行った通電試験の結果と今後の予定について述べる。

果と今後の予定について述べる。

2. RF 空洞の増強計画

RF 空洞の増強計画では、現状の空洞を高インピーダンス FT3L コアを用いた空洞に同数置き換える事を計画している。よって、終段増幅器や陽極電源などはそのまま使用する予定である。また、最終的に直接水冷方式の RF 空洞 9 台はすべて基本波での使用を考えており、2 倍高調波用に空冷方式を採用した RF 空洞の開発も進めている^[3]。

2.1 FT3L 用空洞

FT3L コアは、FT3M コアと内外径は同じであるが厚みが 35mm から 25mm と 10mm 程度薄くなっている。現状空洞では、FT3M コアが空洞当たり 18 枚使用されており、置き換えて 180mm 程の空間が確保できる。新

Table 1: Cavity Parameter

Material	Present Cavity	New Cavity	
	FT3M	FT3L	
Core Size [mm]	800×245×35	800×245×25	
		(Outer/Inner/thickness)	
Cooling Scheme	Direct Water	Direct Water	
Number of GAP	3	4	5
Total N. of cores	18	24	30
Length [mm]	1776	2015	2519
Weight [t]	4.5	5.8	7.0
Test Voltage [kV]	45	-	80
Total N. of Cav.(1st)	8	2	7
Total N. of GAP	24	8	35
Total N. of Cav.(2nd)	1	-	-

*katsushi.hasegawa@kek.jp



Figure 1: FT3L Cavity(5-GAP).

空洞は Tank 当たりを使用するコアの枚数、コアを冷却する水の流路、隙間などの基本構造は FT3M 用空洞から最小限の変更にとどめ、部品の細部や設置場所での空間配置を見直すことで空洞当たりの加速ギャップ数を 1~2 増やした 5-Gap(4-Gap) 空洞としている。表 1 は新旧空洞の比較、図 1 はテストスタンドに設置した FT3L 空洞 (5-GAP) である。現状 RF 空洞が 9 台設置されている直線部に、4 ギャップ空洞を 2 台、5 ギャップ空洞を 7 台設置する。

2.2 FT3L 空洞のインストール計画

図 2 に RF 直線部における今後 3 年間の RF 空洞入れ替え計画を示している。四角内の数字が空洞当たりの加速ギャップ数を示しており、3 ギャップ空洞が FT3M コアを用いた現状の RF 空洞、5(4) ギャップ空洞が FT3L コアを用いた RF 空洞を示している。

今年夏のメンテナンス停止期間中は、5-GAP 空洞を 1 台インストールし、空洞 2 台 (6-GAP) を 2 倍高調波用空洞に調整する予定である。2015 年は、新たに基本波用で 5-GAP 空洞 3 台と 2 倍高調波用に 4-GAP 空洞 2 台をインストールする。2016 年は、5-GAP 空洞 3 台と 2 倍高調波用 RF 空洞 (空冷方式) をインストールし、水冷却方式の 9 台はすべて基本波空洞として使用する

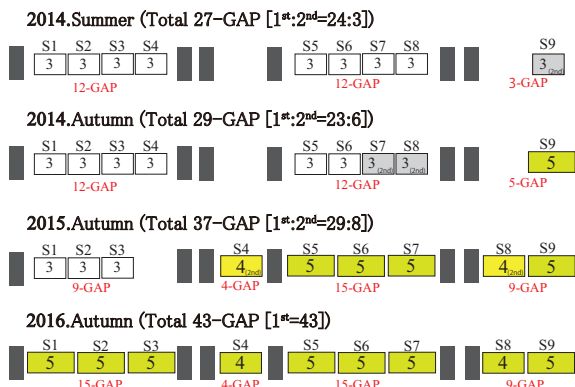


Figure 2: The replacement plan of cavities.

予定である。

3. 通電試験

3.1 組み立て確認と通電試験

新型空洞と量産型 FT3L コアの組み立て確認およびコアの健全性確認のため通電試験を行った。コアはこれまでと同様に、カット面の防錆対策として FRP 板を RTV で貼り付け、その後 Q 値調整を行った。組み立ては、特に問題となることなくコアをインストールし、空洞を組み立てる事ができた。

Tank 当たりの冷却水流量は、MR トンネル内では 48~50L/min を確保しているが、テストベンチ施設の容量不足から約 40L/min であった。また、水系は非温調系のため外気温が上がると水温全体が上がってくる。出の水温が 40 度を越えそうな場合は通電パターンのフラットトップを変更した。運転時のギャップ電圧は 31~32kVpp、周波数は測定した共振周波数 (1.72MHz 近傍) に固定、通電パターンは 3 秒周期、立ち上がり (下がり) 100ms、フラットトップ 1.1s or 1.3s とした。

これらの条件の下、J-PARC 運転期間中の 2014 年 5 月 27 日~7 月 1 日に 24 時間連続通電試験を行った。連続通電中、周波数調整用真空コンデンサの性能劣化によるインターロック発報で 4 回程中断をはさんでいるが、合計通電時間は約 787 時間であった。

図 3 は通電期間中 (毎日正午) のギャップ電圧、水温のトレンドを示しており、図 4 は空洞インピーダンスを示している。6 月 20 日前後のインピーダンスの変化

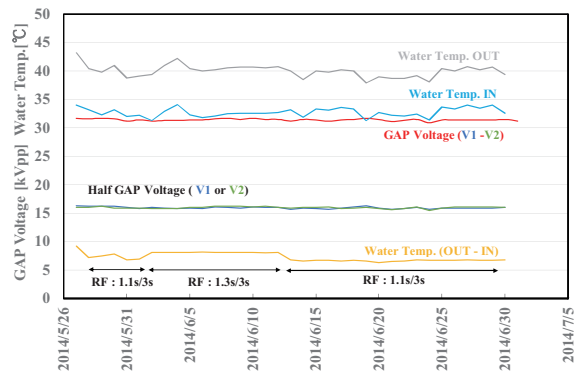


Figure 3: Trend of gap voltage and water temperature.

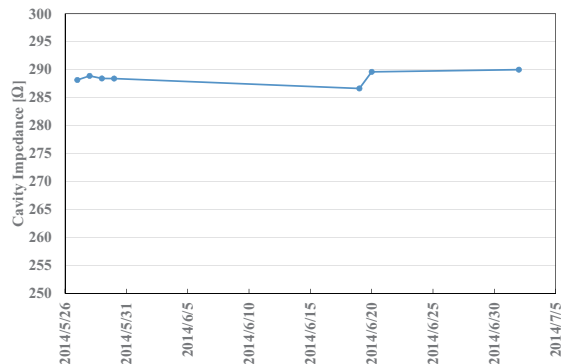


Figure 4: Cavity impedance.

は、真空コンデンサ交換時の測定によるもので、交換がない場合は安定して推移しているのがわかる。

3.2 連続通電中のトラブル

連続通電中に起こった唯一のトラブルが、真空コンデンサの放電によるインターロック発報であり、連続通電中合計4回(5月28日、5月29日、6月19日、6月20日)の発報があった。今回の空胴では、合計20個が使われており発報後は直流電源を用いDC20(25)kVで耐電圧測定を全個数に行い、性能劣化していた物(暗電流 $>100\mu\text{A}$)を交換した。しかし、発報4回のうち5月29日と6月20日の2回は前日に全数検査をしたにも関わらず放電が起きている。また劣化していた真空コンデンサのうち2個は、コロナ放電が多い物と再コンディショニング装置(AC35kV)で最後までコンディショニングできない物だった。

この件についてはメーカーと打ち合わせを行い、上記の2個を引き渡して原因を調査中である。

3.3 通電後のコアの確認

試験終了後、空胴を解体し使用したコア30枚の全数検査を行った。コアを展開して見られたのは、流路を確保するために使われているEPDM製舟形コマがコアに張り付いて、ほぼすべてのコアでその跡(コーティングの変色)がみられた。中間およびショート側配置のコアは変色のみであったが、ギャップ側に配置されたコアのギャップ面(一部はその反対面)については、表面だけでなく内部に焦げらしき跡とコーティングの浮きが見られた(図5)。試験前後でコアのインピーダンスに大きな違いがないことから、損傷の程度としては小さい。しかし、今後損傷が進む可能性もあり、局所的にコーティングがはがれる温度まで上がっていることから冷却対策と再試験が必要である。



Figure 5: Core surface after the test.

4. 対策

損傷およびコーティングの変色は、EPDM舟形コマが当たっている表面のみで起こっているため、対策として以下の変更を行うことにした。

- 舟形コマの材質、形状変更
EPDM(10mm巾)からFRP(8mm巾+C0.5)にする事でコア表面での接触面積の減少および密着防止。

- 舟形コマの配置場所変更
カットコアは、カット面の内(外)周部分でC面を3cm程とっているため発熱が小さい(図6)。よって、コマの位置をすべてこの部分に移動する。
- ギャップ側配置コアへの冷却強化
ギャップ側コアとギャップ絶縁板の距離を3mmから4mmに変更。冷却水バッファータンク出口のスリット巾変更またはスリット板取り外し。
- 全体の冷却水強化
試験通電のギャップ数を3つまで減らすことで全体流量を確保。
- FT3M空胴のデザイン踏襲
スリット形状、舟形コマ配置、材質等。

上記の対策を組み合わせ、4種類を3ギャップ分(6Tank)で再度組み立て再試験を行う。

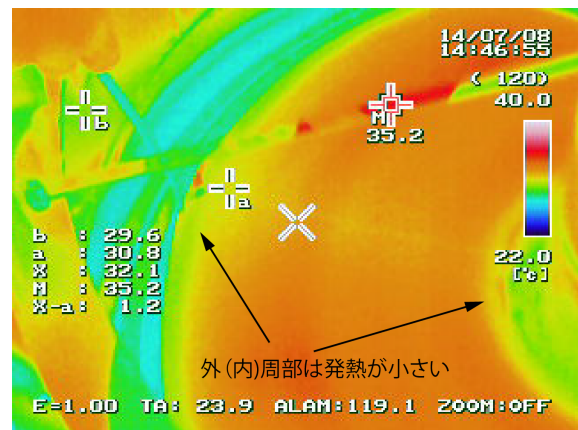


Figure 6: Thermal distribution of cut core.

5. 今後の予定

対策を行った部品が納品されしだい、再度空胴組み立てを行う。再通電試験は8月18日~9月12日を予定しており、その後再度解体してコアの状態確認を行う。試験6Tank中1Tankは、損傷がおこった前回と同じセットアップである。このTank内コアに損傷や変色が見られ、かつ他のTank内コアに変化がない場合は対策が有効であると判断し、9月下旬のMRトンネルインストールへ向けて準備を行う予定である。

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] C.Ohomori, et al. "Development of a high gradient rf system using a nanocrystalline soft magnetic alloy", Phys-RevSTAB.16.112002, 2013.
- [3] C.Ohomori, et al. "AIR-COOLED MAGNETIC ALLOY CAVITY FOR J-PARC DOUBLED REP-RATE SCENARIO", Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC '14, Dresden, Germany, Jun. 15-20, 2014.