

J-PARC MRにおける金属磁性体コア (FT3L) を用いた RF 空洞の運転状況と真空コンデンサの開発

STATUS REPORT OF THE RF CAVITY WITH FT3L MA CORES AND DEVELOPMENT OF A VACUUM CAPACITOR

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)}
 山本 昌亘 ^{B)}、島田 太平 ^{B)}、田村 文彦 ^{B)}

Katsushi Hasegawa^{*A)}, Chihiro Omori^{A)}, Sugiyama^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Furusawa^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}
 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 and this scenario requires the two times higher acceleration voltage for the RF cavities. For this reason, we have been replacing the RF cavities, which are using FT3L cores with an high impedance characteristic since 2014. The all of new FT3L cavities were installed by 2016 and the cavities are working without problems until this summer. One of the main failure to stop the operation for long is the breakdown of the vacuum capacitor which is using the RF cavity. This means that the operation stops for 8 hours or more because it is necessary to work inside the tunnel. Therefore, internal observation of broken vacuum capacitors and design change are in progress. In this paper, status of the RF cavity with FT3L MA cores and development of a vacuum capacitor are reported.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR) では、前段の Rapid Cycling Synchrotron (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。2017 年 6 月までの運転ビーム強度は、ニュートリノ実験用の早い取り出し (FX) 運転で約 470 kW、ハドロン実験用の遅い取り出し (SX) 運転で約 37 kW であった。現在の FX 運転は、2.48 s 周期の繰り返しで運転されている。この繰り返し周期を 1.3 s まで早めることで、2019 年秋以降の運転で 750kW 以上のビーム強度を目指した増強計画が進められている。

高繰り返し化によるビーム増強計画では、RF システムに加速電圧として現状 280 kV の 2 倍に当たる 560 kV が必要となる。この要求に対応した空洞開発として、従来の金属磁性体 (FT3M) コアより高い加速勾配が可能となる FT3L の大型コア開発を 2010 年から進めてきた [1]。2012 年秋からは、FT3M 用 RF 空洞で FT3M コア 6 枚を FT3L コアに置き換え、長期の運転試験で健全性も確認した。これらの結果を基に、2013 年から FT3L コアの量産や空洞本体の設計を行い、2014 年夏から 3 カ年計画で全 FT3M 用 RF 空洞 9 台の入れ替えを順次行ってきた [2-4]。2016 年夏には全 RF 空洞の入れ替えが計画通りに完了し、2016 年秋から 2017 年 6 月まで新 RF システムで運転を続けてきた。

以下に、2014 年秋から 2017 年 6 月までの FT3L コアを用いた新 RF 空洞の運転状況と安定運転に関する課題や今後の対策について報告する。

2. FT3L RF 空洞の状況

FT3L 用 RF 空洞への入れ替えは、2014 年夏に最初の 1 台を行い、2015 年夏に 4 台、2016 年夏に最後の 4 台を行い、全 RF 空洞 9 台の作業が完了した。

2.1 FT3L RF 空洞の使用状況

図 1 は、2014 年から 2016 年まで 3 年間の RF 空洞入れ替えと使用計画及び 2017 年 6 月時点の使用状況を示している。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 RF 空洞が FT3M コアを用いた RF 空洞、5(4) ギャップ RF 空洞が FT3L コアを用いた RF 空洞を示している。

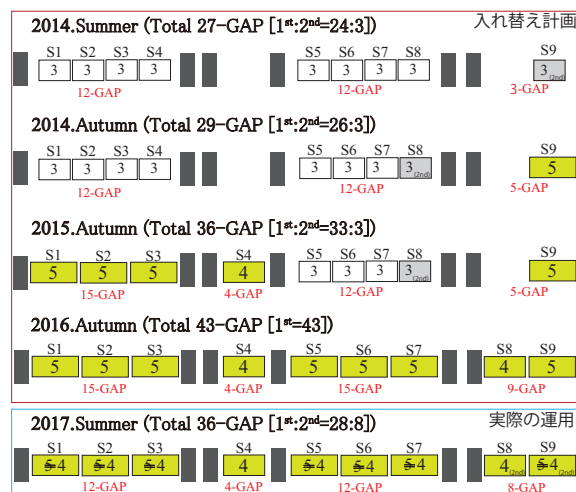


Figure 1: The replacement plan of cavities.

*katsushi.hasegawa@kek.jp

入れ替えは計画通りに行われたが、使用状況が当初の予定から変更されている。変更点の1つめは5ギャップ空胴の4ギャップ化運用、2つめがFT3L空胴の2倍高調波空胴としての使用である。2015年秋以降の運用でFT3L 5ギャップ空胴は、全て3ギャップ目をショートした4ギャップ空胴として運用している。また2倍高調波空胴は、2015年秋以降はFT3M 3ギャップ空胴2台(S7,S8)の6ギャップ分を、2016年秋以降の運用ではFT3L 4ギャップ空胴2台(S8,S9)の8ギャップ分を運転で使用している。元々、2倍高調波空胴は他の場所に別途インストールする予定であったが、2019年夏までは加速電圧も現状の280 kVで足りる事からS1-S7の7台(×4ギャップ=28ギャップ分)を基本波空胴として、残り2台を2倍高調波空胴として使用している。

2.2 FT3L RF 空胴の運転状況

図2及び図3は、5ギャップ空胴の4ギャップ化運用が始まった2015年秋以降の空胴インピーダンスと共振周波数の変化を示している。実線が基本波(h=9)空胴、破線が2倍高調波(h=18)空胴であり、空胴9号機は2016年秋以降は2倍高調波空胴として使用している。

インピーダンスは、共振周波数調整を行った時以外は比較的安定しており、大きな減少も見られない事から運転初期にあったコアの錆による損傷等はないと考えている。ただし、空胴8号機だけはインピーダンス及び共振周波数が増加傾向にある。増加傾向で、損傷は考えにくいだが他と違う傾向を示しているため注視している。

共振周波数を見ると、大小の違いはあるが全体的に減少傾向を示している。特に空胴3号機と4号機は、一貫して減少傾向である。これは、カットコアの錆対策として弾力性のあるRTVシリコンゴムを導入してか

ら見られる現象である。今回のFT3Lコアには、塗り方を変更し、対策を施したコアを使用しているが未だ完全ではないように見られる[3]。RTVに若干の吸水性がありそれが要因になっていないかを調べるため運転に使用していない2個のTANKに通水+通電したTANKとの比較をする予定である。また、2016年秋に全空胴の共振周波数が1.73~1.74 MHzに調整されたあと1.72~1.73 MHzに戻している。これは、通常共振周波数は1.72 MHzを目安に調整しているが、計算結果から高い周波数に調整することで陽極電流を低減できる事が分かった為試験的に調整した。しかし、以前のビーム強度まで調整する事ができず、原因を突き止める時間も限られていた事から元の周波数に戻した。

2.3 RFシステムに起因する運転停止

RFシステムに起因する運転停止の主な事象として、頻度から以下の2つが上げられる。

- 陽極電源を構成するインバーターユニットの故障
復旧作業：該当するユニットを切り離し、減数してシステムを立ち上げる(数時間)。
- 共振周波数調整用真空コンデンサの耐電圧低下
復旧作業：真空コンデンサのDC耐電圧試験及び交換(トンネル内入域作業、半日程度)。

インバーターユニット故障での復旧作業は、地上部電源棟内の作業であり、数時間程度で再開可能である。しかし、15台で構成されているユニットの一台を減数して運転するため残り14台の負荷が大きくなる。現状では、14台での運転再開はしているが、更に同号機でユニット故障が起こり13台になった場合はインバーターユニットの入れ替え作業ののち再立ち上げとしている。この場合は、復旧まで半日程度を要している。現在、原

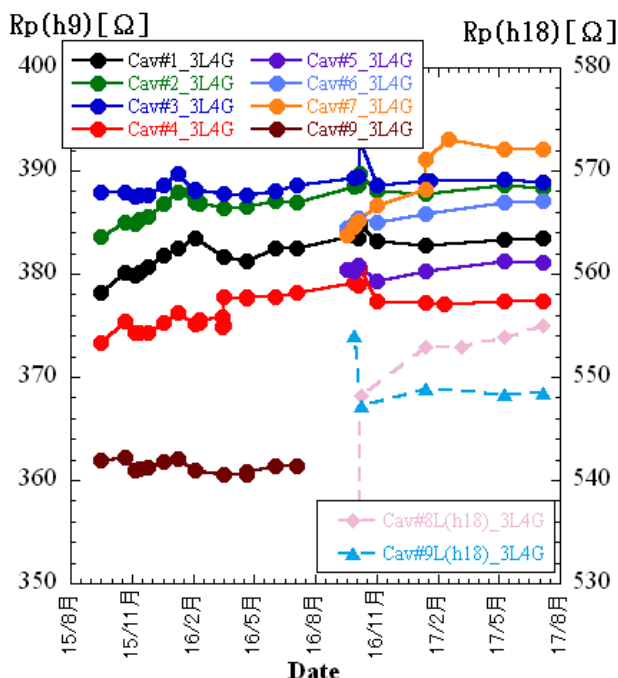


Figure 2: Trend of cavity impedance from 2015.

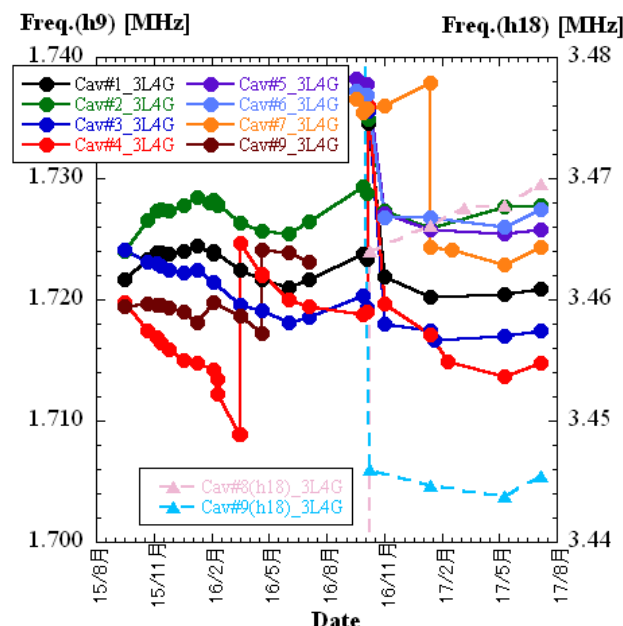


Figure 3: Trend of cavity resonance frequency from 2015.

因究明と対策として製造履歴の調査や通電試験を行っている。また、周辺機器の通電状態を確認しながらのノイズ調査も予定している。

真空コンデンサの復旧作業は、トンネル内入域作業となるため約半日程度運転を止めることになる。使用されている真空コンデンサの個数は、空胴の各ギャップに約4個、空胴全体では16~18個である。全ての真空コンデンサで20 kVDCで漏れ電流測定をおこない、原因コンデンサの特定及び交換を行っている。

3. 真空コンデンサの開発

安定したビームを継続的に供給し続けるためには、故障による運転停止時間を最低限に抑えたい。この点からも、トンネル内作業を伴う真空コンデンサの耐電圧低下は、解決しておかなければならない問題である。以下に、FT3L空胴運用後のコンデンサの状況について述べる。

3.1 使用状況と耐電圧低下

FT3L空胴で周波数調整用に使われている真空コンデンサは、大部分が明電舎製 SCF-373.7k(370 pF)であり、微調整用に SCF-354(400 pF) や 200 pF や 50 pF、ジェニングス社製 400 pF、100 pF を組み合わせている。370 pF コンデンサは、2009年に400 pFをベースに改良したコンデンサであり、FT3L空胴9台での延べ使用個数は111個である。

2014年秋から2017年6月まで運転で真空コンデンサの耐電圧低下によるMPS回数は、10回起こっており、合計26個のコンデンサを交換した。内訳は、復旧作業で行ったDC耐電圧試験で基準(20 kV-1minで<100 uA)を満たさず交換した370 pFの個数が15個、基準は満たすが閃絡や暗電流にふらつきが有り予防的に交換した370 pFの個数が8個、370pF以外のコンデンサで交換した個数が3個となっている。

真空コンデンサの耐電圧を劣化させる原因の一つとして、ビーム取り出し時に10 us程度であるが電圧跳ね上がりと考えられ、2016年4月にLLRF側で対策を行った[5]。しかし、対策以降も耐電圧低下によるMPSが4回起きています。

3.2 真空コンデンサの状態

現状の真空コンデンサの状態を把握するため、耐電圧が低下したコンデンサと比較用に使用可能コンデンサを切断し内部観察を行った。切断したコンデンサは、明電舎製 400 pF:4個、370 pF:5個、ジェニングス社製 400 pF:1個、100 pF:1個の合計11個である。

図4は、切断前DC耐電圧試験では15 kVで過電流となり通常運転時には使用できない漏れ電流があったコンデンサである。電極先端部分は、全体的に変色し、目で見て分かる大きさの放電痕が全周に渡って見られる。

図5は、切断前DC耐電圧試験で20 kVで3 uAと漏れ電流が小さかったコンデンサである。電極は、全体的に綺麗で放電痕も少ないが、最外周電極先端部と向かい合うセラミック内側表面に放電痕が見られる。このセラミック表面の放電痕は、切断前漏れ電流の大小にかかわらず多くで見られた。また、ほぼ全周に渡って放電痕が見られるコンデンサもあった。

図6は、完全にショートしていたコンデンサである。切断前の抵抗測定でも0 Ωであり、融けた電極同士が完全にくっついている。電極表面の変形は、セラミックを取り除く際にぶつけた可能性もありすべて放電でできた痕かどうかの判断はつかない。

3.3 改良真空コンデンサ：SCF-373.7k

初期の真空コンデンサ SCF-354でも使用中に耐電圧低下がおこる個体があった。この頃のコンデンサは、今でも使用可能なコンデンサがある一方、故障するコンデンサも多かった。そこで、2009年にメーカー側の協力の元、改良を行った。表1に変更点をまとめる。大きな変更点は、電極の製作部分である。以前の電極厚0.3 mmでは、放電部分で熱による形状変形が見られ、電極間距離が近くなり、更に放電しやすくなっているように見えていた。また、電極先端部分の機械加工上の理由からも電極厚1 mmが選ばれた。本体も削り出しで寸法を出しているため真円度も良い。厚みが増えた分は、電極枚数を減らし、その他の距離間を変えないよう再設計を行った。電極枚数が減った分で容量は、1.72 MHzでの実測で425 pF程度から365 pF程度に減少したが、コアの性能があがりインダクタンスが大き



Figure 4: Top of the electrode.



Figure 5: Discharge trace on ceramic surface.



Figure 6: 400 pF vacuum capacitor (Jennings).

Table 1: Comparison of Vacuum Capacitor Design

部品	SCF-354	SCF-353.7k
電極	溶接電極	機械加工電極
電極厚	0.3mm	1mm
電極枚数	14 枚	13 枚
先端加工	バリ、カエリ等が 無きこと	R0.5
フランジ		電極セット部 のみ変更
治具		一部改良
電極間距離	2.7mm	2.7mm
電極先端-フランジ間距離	5.25mm	5.25mm
電極-セラミック間距離	2.0mm	2.0mm
電極製作後の酸洗、純水洗浄は共通		

くなってきたため許容範囲であった。

3.4 新コンデンサ用の再設計

現在の FT3L 空胴 (4 ギャップ空胴) で周波数調整に使用している真空コンデンサの合計容量は、約 5000 pF である。現状ギャップあたり 4 個のコンデンサを配置しており、最大 5 個まで設置可能である。よって、再設計のコンデンサ容量は、250-300 pF/個の範囲に収まるよう電極枚数、電極間隔を調整すれば良い。

内部観察の結果から、大部分の放電箇所は電極先端-電極と最外周電極先端-セラミック表面であることが見て取れる。このうち最外周電極先端-セラミック表面の放電痕は、ほぼ全てのコンデンサで見られた。よって、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。次に、残りの空間領域から電極枚数及び間隔を調整して容量を計算した。表 2 に SCF-353.7k との比較をまとめる。電極の厚み (1 mm)、長さ、製作方法等に変更はない。

今回の電極配置では、コンデンサ制作時に使用する

Table 2: Parameter of Vacuum Capacitor

容量 [pF]	SCF-353.7k	285	272	260
電極-セラミック間距離 [mm]	2.0	3.5	3.5	3.5
$E_s/E_s^{353.7k}$	1	0.50	0.55	0.55
電極間距離 [mm]	2.7	3.0	3.1	3.2
電極枚数 [枚]	13	11	11	11
電極	機械加工電極 (変更無し)			
電極厚	1 mm (変更無し)			
先端加工	R0.5 (変更無し)			
電極先端-フランジ間距離	5.25 mm (変更無し)			
電極製作後の酸洗、純水洗浄は共通				

治具の大きさなどが分からなかったため、フランジ形状を変更しないようにしている。この部分については、実際の製作前に微調する予定である。

形状設計の他に、電極製作やロウ付け時の組み立て治具を含む製造管理の見直しも必要と考えている。図 7 は、切断したコンデンサの中心部分で真ん中にはコンデンサ内の真空度を保つための NEG 材が設置されている。しかし、その上にロウ材と思われる材質が乗っており、十分な機能を果たしていない。今回切断したコンデンサ 11 個の内、400 pF と 370 pF で 1 個ずつ見られた事から共通する組み立て治具もしくはロウ付け方法が原因と考えられる。



Figure 7: Center of the vacuum capacitor.

4. まとめと今後の予定

2014 年から 3 年がかりで進めてきた FT3L RF 空胴への入れ替えは、2016 年夏に全 9 台が完了した。2016 年秋からの運転では、5 ギャップ空胴全てを 4 ギャップ化し、基本波空胴 7 台と 2 倍高調波空胴 2 台として使用している。約 2 年半の運転から、空胴インピーダンスは安定に推移しており損傷等の兆候は見られないが、共振周波数の減少はまだ続いており、今後も注意深く観察していく必要がある。また、RF システムに起

因する運転停止は、インバーターユニットの故障と真空コンデンサの耐電圧低下が主な要因となっている。

これらの要因について、インバーターユニットに関しては製造履歴調査や通電試験、ノイズ対策を夏のメンテナンス期間に予定している。また、真空コンデンサでは設計変更も含めた開発を進めている所である。

更に、新しい2倍高調波空洞の設計も進めている。これは、FT3L 空洞全てを基本波空洞として使用する場合に備えての計画で、以前使用していた FT3M 空洞の TANK(コア含む)16 台を再利用し、2 台の 4 ギャップ空洞に作り直す設計である。

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] K. Hasegawa *et al.*, 第 11 回加速器学会年会プロシーディングス, p. 621 (2014).
- [3] K. Hasegawa *et al.*, 第 12 回加速器学会年会プロシーディングス, p. 951 (2015).
- [4] K. Hara *et al.*, 第 13 回加速器学会年会プロシーディングス, p. 811 (2016).
- [5] F. Tamura *et al.*, 第 13 回加速器学会年会プロシーディングス, p. 808 (2016).