

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洞の開発状況

STATUS REPORT OF DEVELOPMENT OF RF CAVITIES WITH FT3L MA CORES IN J-PARC MR

原圭吾^{#,A)}, 大森千広^{A)}, 長谷川豪志^{A)}, 吉井正人^{A)},
島田太平^{B)}, 田村文彦^{B)}, 野村昌弘^{B)}, 山本昌亘^{B)},
Keigo Hara^{#,A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Masahito Yoshii^{A)},
Taihei Shimada^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Masahiro Nomura^{B)}, Masanobu Yamamoto^{B)}
^{A)} High Energy Accelerator Reserch Organization, KEK
^{B)} Japan Atomic Energy Agency, JAEA

Abstract

The upgrade project of the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) Main Ring (MR) with high repetition rate is in progress to achieve the beam power of 750 kW. A new RF cavity which can generate higher acceleration voltage is required by this upgrade project. For this purpose we develop a new RF cavity system using the material FT3L, which has higher shunt impedance than FT3M one. The first FT3L cavity was installed in 2014. Following 4 cavities were installed in 2015 and more 4 cavities will be installed in this summer. In this paper, we report current status of the cavity replacement plan and the subject to achieve stable operation.

1. はじめに

大強度陽子加速器研究施設(J-PARC)の主リング(MR)は、陽子を3 GeV から30 GeV まで加速しハドロン実験施設およびニュートリノ実験施設に向けて陽子ビームを供給している。ニュートリノ実験のための速い取り出しモードでは陽子ビームを2.48 s 周期で取り出し約420 kW のビームパワーで供給している。この繰返し周期を2.48 s から1.28 s としビームパワーを750 kW 以上に増強することが計画されている。高繰返しを実現するために電磁石電源を増強すると同時に高周波加速電圧を現状の280 kV から500 kV 以上にする必要がある。

要求された高周波加速電圧発生を達成するためには従来の軟磁性合金(FT3M)を使用した空洞以上に高い電圧を発生することのできる加速空洞が必要となる。そのため磁場中で焼成を行うことにより高周波損失が少なく、より高い加速勾配を達成できる FT3L コアを使用した空洞の開発を行ってきた[1,2]。2012年夏にMRトンネル内の空洞を使用し1ギャップ FT3L コア6枚分の運転試験を行い、この結果をもとに2013年からFT3L コアの量産、FT3L 空洞の設計を開始した。その後2014年に最初のFT3L 空洞1台を設置し、運転を開始した。2015年には4台のFT3L 空洞をFT3M 空洞と置き換え運転を行っている[3]。今年度は更に4台の加速空洞を設置しすべてFT3L 空洞とすることが計画されており準備を進めている。

本稿では設置計画の現状及び、これまでの運転状況から得られたビームの安定供給に関する課題と取り組みについて述べる。

2. RF 加速空洞増強計画

FT3L 空洞は、2014年からFT3M 空洞と置き換えはじめ、2016年夏に全台数の置き換えが完了する予定である。図1にRF 空洞の入れ替え計画を示す。枠線四角内中央の数字がギャップ数を示しており、3ギャップ空洞がFT3M、5ギャップないし4ギャップ空洞がFT3L 空洞を示している。

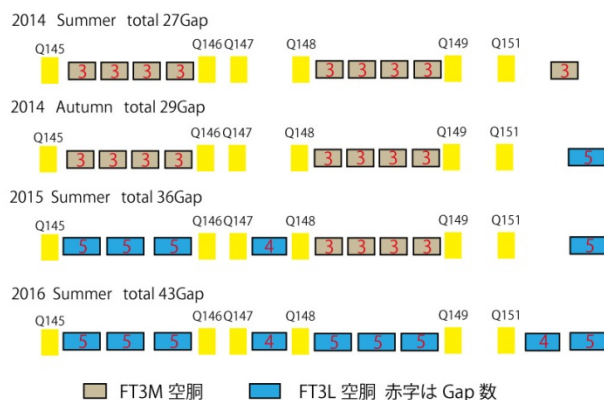


Figure 1: Replacement plan of RF cavity.

テストベンチでの連続運転試験で FT3L 空洞の健全性を確認したのち2014年夏に一台先行してFT3L 空洞(5ギャップ)を設置した。この空洞が順調に運転実績を重ねていることをうけ、2015年に4台(5ギャップ3台、4ギャップ1台)の空洞を従来の空洞からFT3L 空洞に置き換え運転を開始し現在に至っている。2016年夏に4台のFT3L 空洞を設置し加速ギャップの数は合計して43となる予定である。

[#] keigo.hara@kek.jp

3. 運転状況とビーム安定供給への課題

MR では、2015 年 9 月から 5 台体制で FT3L 空胴の運用を開始し、7 月初めの段階で約 6000 時間稼働している。図 2 は空胴のインピーダンスの変化を表している。空胴 4 号機のインピーダンスが途中変化しているのは共振周波数の調整を行ったためである。そのことを除けば、すべての号機でインピーダンスの大きな変化は見られず安定に推移している。このことから磁性体コアの損傷といった深刻な事態は起こっていないと考えている。しかしながら連続通電を行ってきた間以下のような事象が発生しており安定したビーム供給を行うための課題となっている。

- 加速空胴の共振周波数の低下。
- 共振周波数調整用の真空コンデンサーの耐電圧低下。
- 直流カット用ソリッジコンデンサーの破損
- 加速空胴冷却水系循環ポンプの故障。

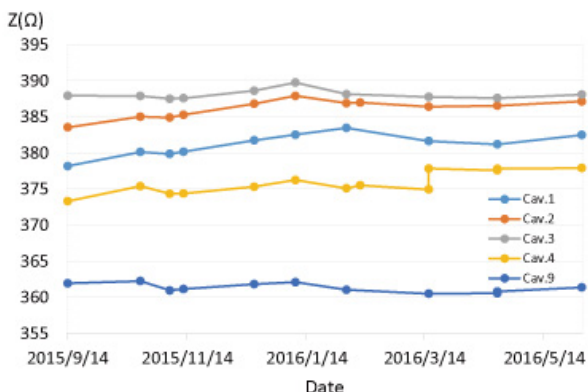


Figure 2: Trends of cavity impedance.

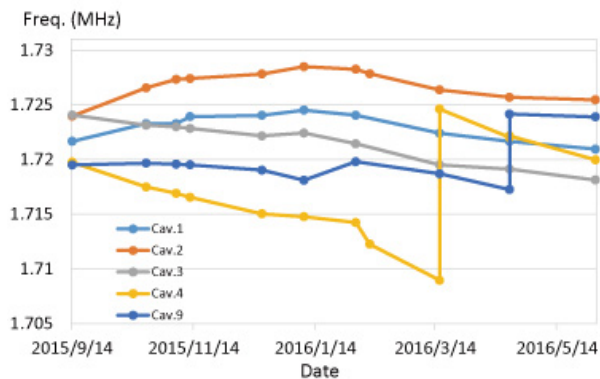


Figure 3: Trends of cavity resonant frequency.

3.1 共振周波数の低下

図 3 は 2016 年 6 月までの、空胴の共振周波数の推移を示している。全体的な傾向として共振周波数は徐々に低下してきている。共振周波数の低下により運転に必要な電力の増加を招いている。共振周波数低下の原因としてカットコア間のギャップの距離が狭くなっていると推測した。対策としてギャップ距離の調整の際に挟み込むスペーサーに極力弾力部のないものを使用することにより距離が変わらないようにしている。しかしながら実際には周波数が低下してしまっている空胴もある。現在は定期的に空胴の共振周波数を測定し必要ならば再調整を行っている。図 3 内で空胴 4 号機及び、空胴 9 号機の周波数が大きく変化しているのはこの再調整を行ったことを示している。

3.2 真空コンデンサー耐電圧低下

共振周波数の調整は加速ギャップ部に取り付けた真空コンデンサー(1 ギャップ辺り約 400 pF×4 個)の容量を変えて行っている。この真空コンデンサーの耐圧が低下し空胴に電圧を発生させることができなくなるという事象が約 2 カ月に 1 度の頻度で発生していた。原因は調査中であり、現在は直流耐圧試験を行い、暗電流が増加、もしくは値自体は低くても安定していないコンデンサーは取り除き、暗電流が極力少ないコンデンサーと交換し発生を防いでいる。

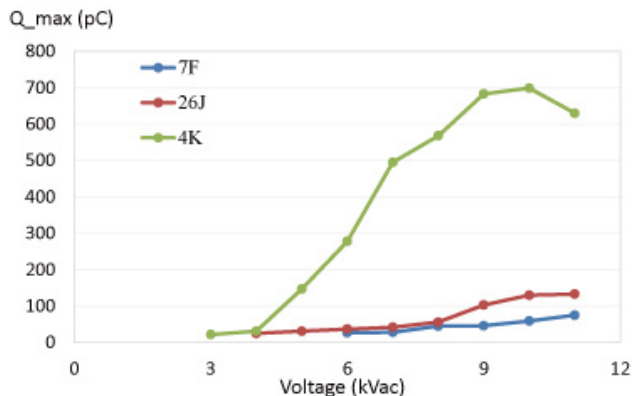


Figure 4: Results of partial discharge test.

3.3 DC カットコンデンサー破損

その他にも終段増幅器出力部の直流成分除去用ソリッジコンデンサーの放電、損傷も上記稼働時間中 4 回起こっている。図 4 は調査のためにおこなった部分放電試験の結果を示している。ここには生産ロットごとの典型的な結果をプロットした。横軸は電圧、縦軸は発生頻度を 50 pps に設定した時の最大放電電荷量を示している。この試験によりコンデンサーの作成時期によって放電電荷量に差があることが分かった。放電電荷量が多いものほど絶縁性能が低いのであるが、今のところ部分放電試験ではコン

デンスーごとの絶縁性能の比較ができるだけであり絶対値の評価には至っていない。そのため現在は絶縁破壊の起こしにくいロットから使用することで対処している。今後統計を増やしていき使用できるものできないものを絶対値評価できるようにしていくことを検討している。既にトンネル内で使用している物については、部分放電試験では多かれ少なかれ被試験物の劣化を引き起こすこと、測定に多くの時間を必要とすることから直流耐電圧試験を行うことを計画している。

3.4 冷却水循環ポンプ故障

加速空洞用の冷却水系はトンネル側の1次系に循環ポンプ3台、2次系にチラー循環ポンプ2台、冷水循環ポンプ2台を交互に切り替えながら運転している。2016年の春1次側の冷却水循環ポンプ1台がモーター過負荷により停止し、空洞冷却水流量低下インターロックが働いた。幸いビーム停止期間中だったこと、予備機を所有しており交換が短期間で終了できたことで、ポンプ故障によるビーム停止は免れることができた。故障したポンプは稼働時間が30000時間と最も長く2015年夏に一度オーバーホールを行っている。直接の故障原因は回転軸のグリース不足によるベアリングの発熱、損傷であったが、グリース不足に至った原因については記録している運転状況の情報が多かったため今のところ不明である。図5に破損したモーターベアリング部を示す。原因を突き止めるためと、故障に至る前に察知し防止できるようにするために、監視する運転状況の情報量をこの夏に増加する予定である。



Figure 5: Picture of the damaged pump.

4. 今後の予定

FT3L コアの量産、カットコア制作、切断面処理の全行程は終了している。加速空洞の組み立ては4台中2台の組立が終了し、3台目の組立を行っている。MR トンネ

ル内では現在設置されている FT3M 空洞の撤去、FT3L 空洞用の配管、配線作業、端末処理が行われており、9月の下旬には真空コンデンサーの試験も兼ねた連続通電を開始する予定である。図6はインストール可能な状態まで組み立てられた FT3L 空洞である。地上でこの状態まで組み上げておき、トンネル内に設置後、配管、配線、ビームパイプの接続を行う。



Figure 6: FT3L Cavity.

電源棟内では5ギャップ空洞に対応するための電源の改造、配線作業を行っており8月下旬に終了する予定である。

機械棟内では冷却系の整備を行っている。加速空洞は1ギャップに対し100 l/minの冷却水流量が必要なため43ギャップになると現在の冷却水循環能力の3600 l/minでは足りなくなる。冷却水循環量を3600 l/minから5000 l/minにするため、循環ポンプ(30kW;1700 l/min)を従来の2台体制から3台体制に増設し運転できるように準備を進めている。循環ポンプ自体は既に3台設置済みであり、流量計や負荷側の配管については3台運転に対応できるように改造を行っている。先ほど述べたように中央監視システムで記録できる運転パラメーターの種類の増設も行っている。現在は系全体の流量、圧力監視のみだが、各ポンプの運転周波数、電流、個々の状態異常に関しても信号を中央に送り監視、記録できるように工事を進めている。また冷水、チラー、循環ポンプは運転時間が25000時間に達しているものもある。特に循環ポンプでは吐出圧に6%程の低下がみられるものもあるため運転時間の長いものはメーカーに送りオーバーホールを行う予定である。

参考文献

- [1] C. Ohmori *et al.*, Proc. of IPAC15, Richmond, VA, USA, May 2015, p. 50 (2015).
- [2] C. Ohmori *et al.*, Proc. of IPAC11, San Sebastian, Spain, September 2011, p. 2885 (2011).
- [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).