

Impedance measurements of RF cavities in J-PARC synchrotrons

Masahiro Nomura[#], Fumihiko Tamura, Alexander Schnase, Masanobu Yamamoto, Katushi Hasegawa, Taihei Shimada, Keigo Hara, Makoto Toda, Chihiro Ohomori, Masahito Yoshii
 KEK and JAEA J-PARC center
 2-4 Shirakata-Shirane, tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

Abstract

J-PARC 3 GeV RCS and 50 GeV MR employ Magnetic Alloy (MA) loaded RF cavities. We observed the impedance reductions of the RF cavities in RCS three times during 3 years of operation. We figured out that the impedance reductions were resulting from the MA core buckling. The MA core buckling was caused by the thermal stress that was enhanced due to the impregnation with low viscosity epoxy resin. We improved the MA cores without the low viscosity epoxy resin impregnation and replaced all cores in RF cavity 7 with them in March 2010. Up to now we operated the RF cavity 7 for 1500 hours, and measurements of deformation of inner radius of MA cores at the accelerating gap side by using a magnetic sensor showed no buckling. We also observed the impedance reductions of MR RF cavities during 1.5 years of operation. Opening the RF cavities, we found that the impedance reductions were caused by the corrosion on the MA core cutting surfaces. The copper ions and colloids in the cooling water might accelerate the corrosion process.

J-PARC シンクロトロン RF 空胴のインピーダンス測定

1. はじめに

J-PARC シンクロトロン(RCS, MR) RF 空胴では、高い加速電圧を達成する為に、通常用いられているフェライトコアの代わりに金属磁性体コアを採用している。コアの状態を知る為に、シャットダウン期間には RF 空胴のインピーダンス測定を定期的に行ってきた。その結果、RCS 及び MR でそれぞれ別の要因でインピーダンスの低下が観測された[1]。RCS と MR の金属磁性体コアの一番の違いは、RCS がアンカットコアを採用しているのに対し、MR ではカットコアを採用している点である。本論文では、RCS、MR それぞれのインピーダンスの測定結果、インピーダンス低下の原因及び対策について述べる。

2. RCS インピーダンス測定

RCS は 2007 年 9 月からビームコミッショニングを開始し、現在まで約 3 年間運転を行ってきた。RF 空胴のインピーダンス測定結果を図 1 と 2 に示す。図 1、2 から明らかな様に、この間に急激なインピーダンスの低下が 3 度起こった。原因は座屈によるコアの損傷であった。

座屈の原因を解明する為に、運転中のコア内部の熱膨張による応力の計算、座屈の発生率とコアの構造の関係から、座屈は、コアに低粘度樹脂含浸を行ったことにより、熱膨張による応力が解放されていたリボン間の隙間を樹脂で埋めてしまい、その結果、熱膨張による応力が解放されなくなったことが原因であった [2]。実際、調査した 13 枚の低粘度樹脂含浸無しのコアは 3 年間運転後でも座屈を起こしていない。

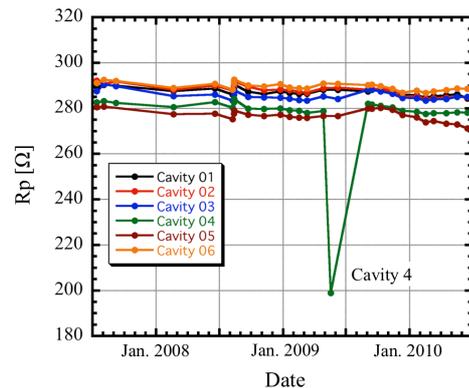


図 1 RCS インピーダンス測定結果(空胴 1-6)。縦軸は共振点でのインピーダンスを示す。空胴 4 は 2009 年 6 月に座屈により損傷したコアを入れ替えた。

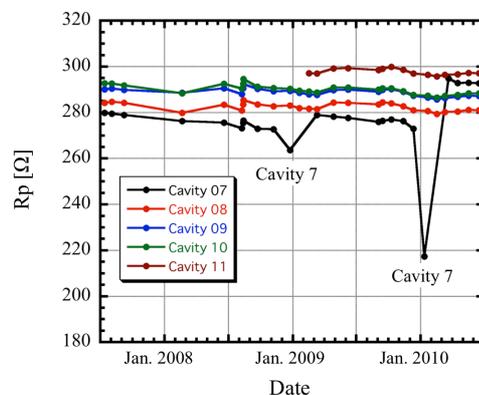


図 2 RCS インピーダンス測定結果(空胴 7-11)。空胴 7 は 2009 年 3 月に座屈により損傷したコアの入れ替えを行い、2010 年 3 月には全てのコアを改良型コアと入れ替えた。

[#] masahiro.nomura@j-parc.jp

現在 RCS で使用している低粘度樹脂含浸無しのコアは、層間絶縁が不十分であること、更に、低粘度樹脂含浸を施したコアと比較してコアの強度が弱いことから、組立時に他の 2 枚のコアの荷重が加わる加速ギャップ側には配置していない。そこで、加速ギャップ側にも配置できる様に、コアの巻き方を縦型から横型に変更することにより層間絶縁を改善し、更に、コアの強度が弱い点を補う為に、コアのサポート部分を FRP から EPDM に変更した。

先ず、この様な改善を行ったコアを加速ギャップ側に配置し、テストベンチで長時間試験を行った。1000 時間運転後に空胴を開けコアの状態を精査した結果、加速ギャップ側に配置したことにより高電圧に晒された影響による損傷等は見られなかった。

このテストベンチでの結果を受け、2010 年 3 月には 7 号機のコアをこの改善した低粘度樹脂含浸無しのコアに全て入れ替えた。現在までに約 1500 時間運転を行ってきたが、インピーダンスの低下は観測されていない。更に、確認の為に、加速ギャップ側のコアの内周部の形状を磁気センサーを用いて測定を行った [3]。測定結果の例としてタンク 1 の測定結果を図 3 に示す。その結果、3 月に据付けた時点とコア内周の形状はほとんど変化しておらず、座屈が起きていない事が確かめられた。

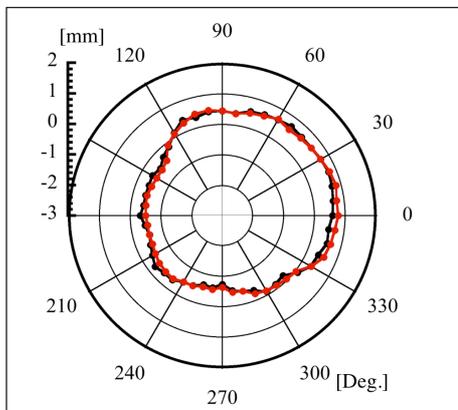


図 3: 磁気センサーによるコア内周部形状の測定結果。データ点は、リファレンス円からの変位を示す。黒点が運転前(2010.3.39)の測定結果を示し、赤点(2010.7.12)が 1500 時間運転後の測定結果を示す。

3. MR インピーダンス測定

MR は 2008 年 12 月からビームコミッショニングを開始し、現在まで約 1 年半運転を行ってきた。MR 空胴のインピーダンス測定結果を図 4 に示す。図 4 から分かる様に 10 月以降全 RF 空胴のインピーダンスが低下し始めた。テストベンチでは 1000 時間以上運転してもこの様なインピーダンスの低下は観測されていない。付帯設備等の影響であると考えられる。

図 5 には 2010 年 1 月以降のインピーダンスの変動部分を示している。この変動は、コアを空気に晒

すことによりインピーダンスが一時的に回復する事が分かった為、それ以降は定期的にコアを空気に晒した結果である。窒素に晒した場合にはインピーダンスは変化しなかったことより、インピーダンスが一時的に回復するのは空気中の酸素が原因と考えられる。

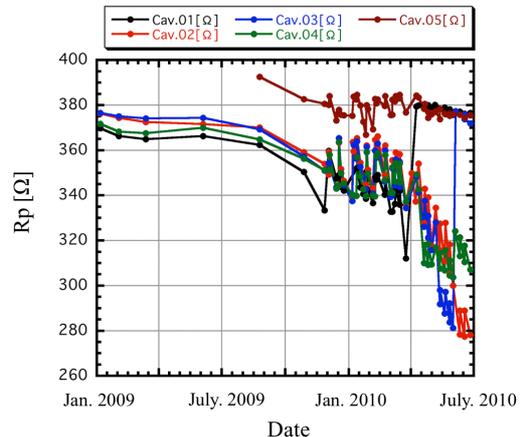


図 4 MR インピーダンス測定結果

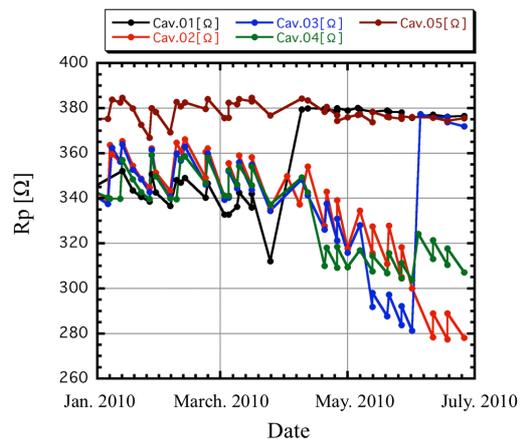


図 5 MR インピーダンス測定結果(2010 年以降)。

5 月に大きくインピーダンスが低下した空胴 3 号機の前前後での空胴のインピーダンスの変化を図 6 に示す。

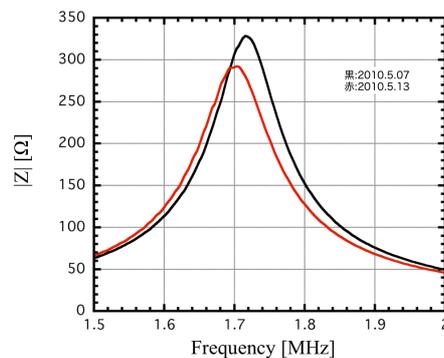


図 6 空胴 3 号機インピーダンス変化。

インピーダンス低下の原因を調べる為に、空胴 1 を 2009 年 12 月と 2010 年 3 月、空胴 3 号機を 2010 年 6 月、空胴 2 と 4 を 2010 年 6 月に解体しコアの状態を調査した。その結果、全てのコアの切断面が錆、インピーダンスの低下が大きかったタンクの加速ギャップ側のコアの切断面は RF 電場により損傷していた [4]。図 7 に切断面の写真を示す。カットコアの切断面は層間絶縁を保つために、ダイヤモンド研磨をおこなっている。その結果表面が滑らかになりエポキシによるコーティングは施していない。ゆっくりとしたインピーダンスの低下は切断面の錆が原因で、急激なインピーダンスの低下は切断面の損傷によるものと考えられる

特筆すべきこととして、損傷していた切断面は水流が直接当たる面であること、切断面に酸化銅が付着していたことが挙げられる。この銅イオン、その化合物は主電磁石系のホロコンからのものと考えられている。10 月以降全体的にインピーダンスが下がり始めた時期は、加速器のデューティを高めたため、ホロコンからの酸化銅が増加したと考えられる。これらから、切断面の錆や損傷は冷却水系に含まれる酸化銅が関係していると考えられている。これは、テストベンチではインピーダンスの低下が起こらなかったこととも合致する。



図 7 空胴 3 タンク 5 の加速ギャップ側コアの切断面。水流の当たる面②の加速ギャップ側のエッジ部分が大きく損傷していた。①は②の対面の切断面。

今後の対策としては、フラッシングやフィルターによる冷却水系の品質の改善及び主電磁石系との冷却水系の分離等を考えている。また、切断面のコーティングの開発も開始した。コーティングの候補としてはポリシラザン（無機ポリマー）・シリカコーティングを考えている。まずは、テストベンチを用いてこのポリシラザン・シリカコーティングを施したコアの試験を行った。テストベンチでの 280 時間後の切断面の様子を図 8 に示す。コーティングを施していない切断面は全体的に錆びているのに対し、ポリシラザン・シリカコーティングを施している切断面は一部コーティングの剥がれている部分やコアのリボンの隙間部分は錆びているが大部分は錆びていない。この結果を受け MR 3 号機にこの切断面にポリシラザン・シリカコーティングを施したコアを入れて 2010 年 6 月から運転を開始した。今後は注意して観察してく予定である。

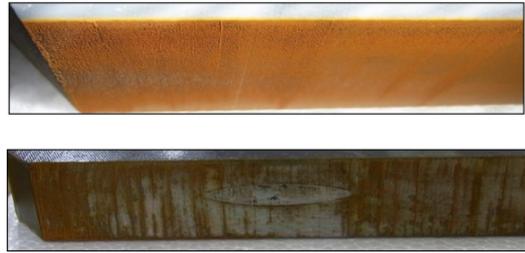


図 8 テストベンチで 280 時間運転後の切断面の様子。上がコーティングを施していない切断面の写真、下がポリシラザン・シリカコーティングを施した切断面の写真。

4. まとめ

コアの状態を調べる為に、定期的に RF 空胴のインピーダンス測定を行ってきた。

RCS では座屈によりコアが損傷し急激なインピーダンスの低下が 3 度測定された。座屈の原因は、低粘度樹脂含浸により熱膨張による応力が解放されなくなった為である。この結果を受け、層間絶縁を改善した低粘度樹脂含浸無しのコアを 2010 年 3 月に空胴 1 台全て入れ替え運転を継続してきた。現在まで、約 1500 時間運転を行ってきたが、インピーダンスの低下も無く、確認の為にいった、磁気センサーによる座屈調査でも座屈が起きていない事が確かめられた。座屈の原因を解明し、座屈しないコアの製造方法を確立することができた。

MR に関しては、冷却水中の銅イオンあるいはコロイドが切断面の錆や損傷に影響していると考えられる。対策としては、冷却水の水質の改善や主電磁石系統との分離等を考えている。また、2010 年 6 月には、空胴 1 台分のコアを全て切断面にポリシラザン・シリカコーティングを施したコアに入れ替えた。今後のインピーダンスの変化が注目される。

参考文献

- [1] M. Nomura, et al., " Condition of MA cores in the RF cavity of J-PARC synchrotrons after several years of operation ", Proceedings of the 2010 International Accelerator Conference, Kyoto (2010), to be published.
- [2] M. Nomura et al., " The origin of Magnetic Alloy core buckling in J-PARC 3GeV RCS ", to be published in NIM.
- [3] A. Schnase et al., " Core buckling position measurement for J-PARC RCS cavity ", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting in Japan (2009) 1077
- [4] C. Ohmori et al., " Impedance Reduction of J-PARC MR Cavities in Summer, 2009 ", this conference THPS034.