

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 to achieve a high accelerating voltage. RCS RF cavities employ MA un-cut cores and MR RF cavities use MA cut cores. We observed the impedance reductions of the RCS RF cavities due to 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 by avoiding the low viscosity epoxy resin impregnation and replaced MA cores in three RF cavities with them. Up to now, we don't observe the impedance reduction of those three RF cavities due to the core buckling. We have a plan to finish the replacement with cores without the low viscosity epoxy resin in the remaining eight RF cavities by 2013. MR RF cavities showed the impedance reductions caused by the corrosion on the MA core cutting surfaces. The copper ions in the cooling water from copper hollow conductors of the main magnets accelerated the corrosion process. To solve the issue of cutting surface corrosion, we have two different approaches. One is improving the cooling water quality. We plan to separate the cooling system of the RF cavities from the main magnets by the end of November. Another is coating of cutting surfaces to prevent rusting. The coating on the cutting surface with inorganic polymer was effective against rusting. We also observed the effectiveness of sealing the whole cutting parts with RTV gum from cooling water. We also report how the RF systems were affected by the great East Japan earthquake.

J-PARC シンクロトロン RF 空洞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 空洞では、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。RCS ではアンカットコアを採用し、MR では Q 値を 0.6 から 26 に高める為に、カットコアを採用している。本論文では、インピーダンスの測定結果から、RCS の座屈対策を施した空洞の状況、MR カットコア切断面の錆び対策の有効性について述べる。また、2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災の影響についても述べる。

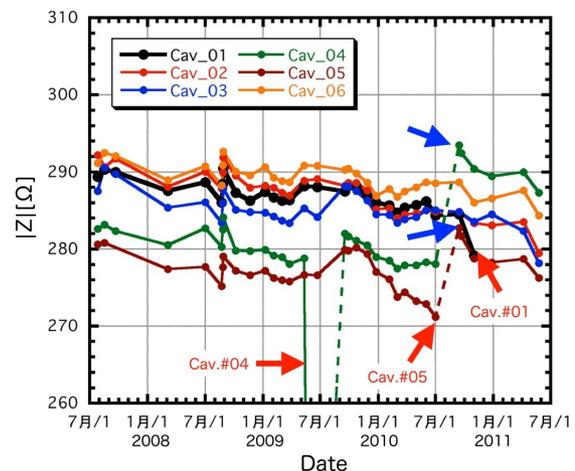
2. RCS 空洞インピーダンス測定

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 4 年間運転を行ってきた。RF 空洞のインピーダンス測定結果を図 1、2 に示す。図 1、2 の赤矢印で示した様に、座屈によるインピーダンスの低下が空洞 7、4、5 及び 1 号機で起きた。

J-PARC で使用している MA コアは厚さ 18 μ m、幅 35mm のリボンを巻いていくことにより作られる。座屈の発生は、コア内部にエポキシ樹脂を含浸したことにより、リボン間にあったリボンの熱膨張を吸収していた隙間を無くしてしまい、そのことにより熱応力が発生した事が原因であった[1]。そこで、コア内部にエポキシ樹脂含浸を行わないコアを製作し、長期メンテナンス期間中に空洞の入れ替えを行って

きた。現在、7、4 及び 5 号機のコア交換が完了し、7 号機は約 1 年間、4 及び 5 号機は約半年間運転を行ってきたが座屈によるインピーダンスの低下は観測されていない。インピーダンスの全体的な変動は温度(コア本体及び冷却水)及び震災後の冷却水の導電率の変化によるものと考えられる。

今年度は、座屈したコアが装填されている空洞 1 号機とガラスクロスが剥がれたコアが装填されている 3 号機のコアを内部エポキシ樹脂含浸無しのコアと交換し、その後は、一年に 2~3 台の割合で夏期メンテナンス期間中に交換し、2013 年には全号機のコア交換を完了させる予定である。



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

図 1: RF 空洞 1 から 6 号機までのインピーダンス測定結果。縦軸は、共振点でのインピーダンスの絶対値を示し、横軸は日時を示す。図中の赤矢印は座屈によるインピーダンス低下を示す。破線はコア交換を示し、青矢印は座屈対策(内部エポキシ樹脂含浸無し)を施したコアとの交換を表す。

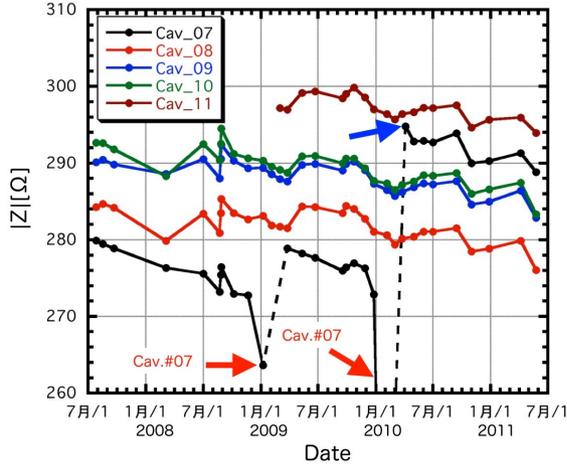


図 2: RF 空洞 7 から 11 号機までのインピーダンス測定結果。縦軸、横軸及び図中の記号は図 1 と同様。

3. MR 空洞インピーダンス測定

MR では 2008 年 12 月からビームコミッションングを開始し、現在まで約 2 年半の間運転を行ってきた。MR 空洞のインピーダンス測定結果を図 3 に示す。

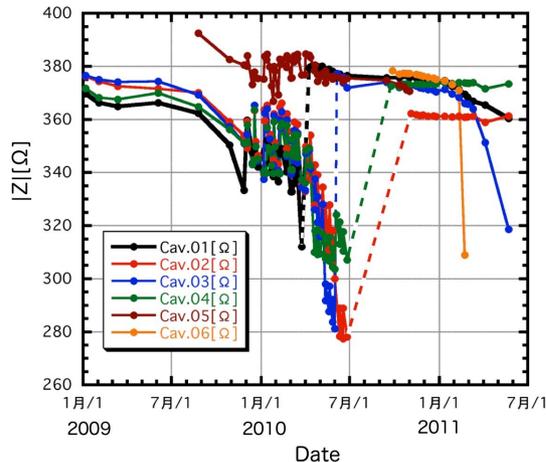


図 3: MR 空洞のインピーダンス測定結果。縦軸は、共振点でのインピーダンスの絶対値を示し、横軸は日時を示す。図中破線はコア交換を示す。

図 3 から分かる様に、ビームコミッションング当初に設置した空洞 1 から 4 号機は約 1 年半の間でインピーダンスが大きく低下した。インピーダンスの低下は、カットコア切断面の錆が原因であった。切断面の錆により徐々にインピーダンスが低下し、最終

的には、コアの内外周にかかる電圧により切断面が損傷し、大きくインピーダンスが低下した。この切断面の錆の発生は、冷却水中に含まれる主電磁石ホロコンからの銅イオンにより錆の進行が早められた結果であった。この時点では切断面にはコーティングを施してはなかった。

カットコア切断面の錆対策として、冷却水中の銅イオンの除去とカットコア切断面のコーティングとの両面から行うこととした。

冷却水中の銅イオンの除去の方法としては、ホロコンを使用している電磁石系の冷却水との分離を行い、RF 空洞独立の冷却水系を構築することとした。今年 12 月の運転再開までには冷却水系の分離を完了させる予定である

コア切断面のコーティングに関しては、先ず、ポリシラザンを切断面にコーティングしたコアをテストベンチで試験した後、空洞 3、4 及び 6 号機に装填した。ポリシラザンは室温近くでシリカに転換する無機高分子のコーティング剤である。但し、空洞 3 及び 6 号機のコアは切断面を再研磨し錆を取り除いたコアを再利用した。ポリシラザンコーティングの効果を確かめる為に、切断面のコーティングを施していないコアに交換した空洞 1 号機とポリシラザンコーティングを施したコアに交換した空洞 3、4 及び 6 号機とのインピーダンスの変化の比較を行った。図 4 から 6 にそれぞれのインピーダンスの変化を示す。

東日本大震災の影響で約半年間しか運転できなかったが図 4 と 5 を比較することによりポリシラザンコーティングの有効性が確かめられた。しかし、図 6 の切断面を再研磨した後にポリシラザンコーティングを施した空洞 3 と 6 は両空洞ともインピーダンスが低下した。空洞 6 のインピーダンスの低下の原因となったコアの切断面の写真を図 7 に示す。このコアは前回の運転でエッジ部分が大きく損傷したコアで、今回の損傷の原因は、前回の損傷によるものと考えられる。つまり、切断面を再研磨し表面の錆を取り除けたとしても、損傷は切断面からコア内部にまでおよんでおり、再研磨では損傷を完全に修復できないと考えられる。

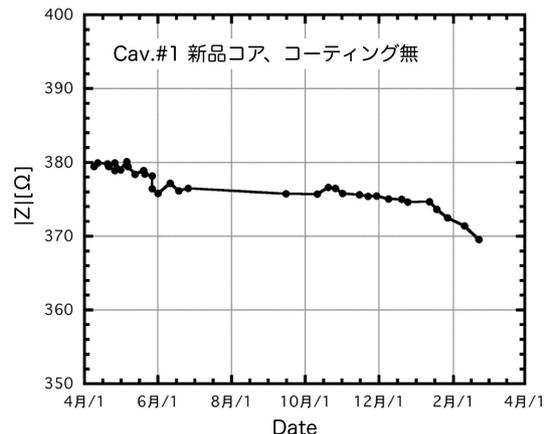


図 4: MR 空洞 1 号機インピーダンス変化。縦軸は、共振点でのインピーダンスの絶対値を示し、横軸は

日時を示す。新品コア、切断面コーティング無しのコアを装填。

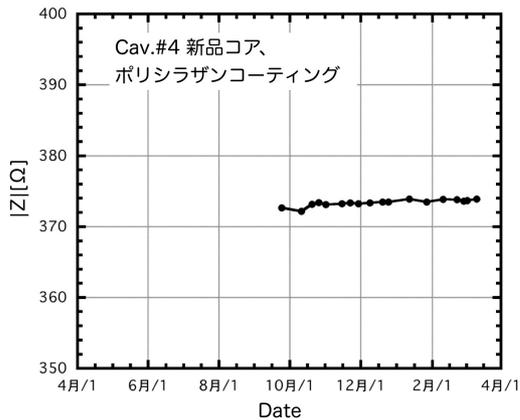


図 5: MR 空胴 4 号機インピーダンス変化。新品コア、切断面ポリシラザンのコーティングコアを装填。

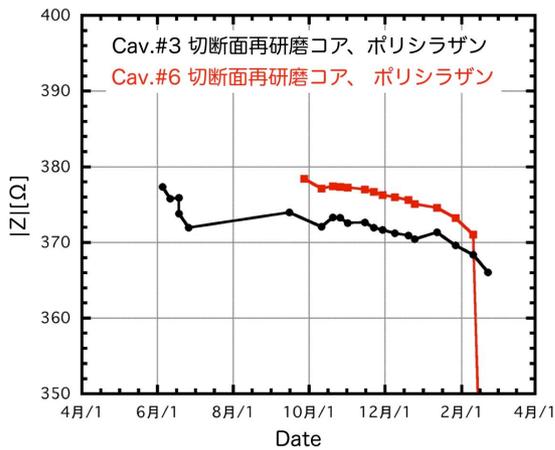


図 6: MR 空胴 3 及び 6 号機インピーダンス変化。切断面再研磨コア、切断面ポリシラザンのコーティングコアを装填。

ポリシラザンによるコーティングの有効性は確認されたが、錆に対する対策を強化する為に、ポリシラザンコーティングを施した切断面を、さらに、向かい合った切断面を、その間隔を FRP 板で調整した後に RTV ゴムで覆い直接水に触れない様にする方式の開発も行った。図 8 参照。この対策を施したコアを装填した空胴のインピーダンスの変化を図 9 に示す。図 6 の空胴 3 及び 6 号機と比較すると、4 ヶ月と運転期間は短いですが、切断面を再研磨したコアを再利用しているにもかかわらずインピーダンスの低下が観測されず、RTV ゴムで覆い直接水に触れない様にしたことが有効であると考えられる。

切断面のコーティングに関しては、ポリシラザンコーティング及び RTV ゴムで切断面全体を覆う方式が約 4 ヶ月のインピーダンス測定結果から有効である事が判明した。今後は、このポリシラザンコーティング+RTV ゴム方式のコアに順次交換し、長期間の有効性について観察を行っていく予定である。更に、MR では、ハイパワービーム加速に向けて空

胴 7 及び 8 号機も今年の 12 月の運転再開前までには設置を行う。



図 7: 空胴 6 号機加速ギャップ側コア端部。前回の運転で損傷した端部のみが大きく損傷。



図 8: コアの間隔を FRP 板で調整した後に、RTV ゴムで切断面全体を覆い直接水に触れない様にした。

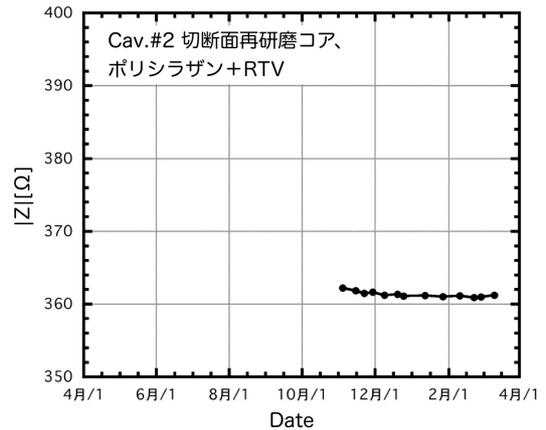


図 9: MR 空胴 2 号機インピーダンス変化。切断面再研磨コア、切断面ポリシラザンコーティング後に RTV ゴムで切断面全体を覆ったコアを装填。

4. 東日本大震災の影響

東日本大震災が起きた時の状況は、RCS は RF 空胴に加速電圧を引加しビーム受け入れ待ちの状態、MR はメンテナンス中で電源 OFF の状態であった。現時点で分かっている範囲で震災による RF 関係の損傷について述べる。

電源に関しては、電圧印加中であった RCS の陽

極電源 11 台中の 2 台で IGBT がそれぞれ 1 個損傷。IGBT は陽極電源 1 台につき 15 個使用。損傷した IGBT の写真を図 10 に示す。地震の揺れによる物理的な被害は特に見つかってはいない。心配された加速空洞ビームパイプのセラミック部分も破損していなかった。

機器の健全性を確認する為の通電試験は、RCS に関しては、屋外ヤードにある建家受電設備、冷却水系の被害が甚大で通電試験は 11 月以降になる予定である。また、MR に関しては、比較的被害が小さい事もあり、既に通電試験を行い機器の健全性は確認済みである。

その他に RF 関係では、RF 空洞のテストベンチがあるヘンデル棟が大きな被災を受けた。ヘンデル棟のテストベンチ周辺の写真を図 11 に示す。ヘンデル棟は、コアの通電試験以外にも、コア単体測定や空洞組立てにも利用する施設で、今後のコア交換予定にも影響を及ぼすことになる。ヘンデル棟のこの領域は現在も立入り制限となっている。

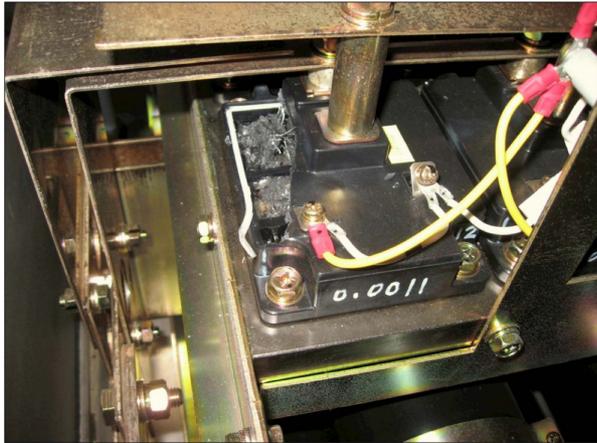


図 10: 損傷した IGBT。



図 11: 被災したヘンデル棟のテストベンチ周辺。

5. まとめ

RCS に関しては、座屈対策(内部エポキシ樹脂含浸無し)を施したコアに入れ替えた 4、5、7 号機は現在座屈によるインピーダンスの低下は無く運転を継続中である。今年の 12 月の運転再開前に 2 台の空洞のコアの入れ替えを行い、2013 年には全ての空洞のコアの入れ替えを完了させる予定である。

MR に関しては、切断面の錆の影響でインピーダンスが徐々に低下し、最終的にはコアが損傷した。この切断面の錆は、冷却水中に含まれる主電磁石ホロコンからの銅イオンにより錆の進行が早められた結果であった。錆対策として、冷却水中の銅イオンの除去とカットコア切断面のコーティングを行うこととした。冷却水に関しては、RF 空洞の冷却水と主電磁石系統との分離を 12 月の運転再開前までに完了させる予定である。また、切断面のコーティングに関しては、ポリシラザンコーティングの有効性及び、切断面全体を RTV ゴムで覆い、直接水が触れない様にする方式の有効性も確認できた。今後は、切断面にポリシラザンコーティングを施し、さらに切断面全体を RTV ゴムで覆ったコアに入れ替えを行ない、長期間の有効性について観察を続けていく予定である。また、MR ではハイパワービーム加速に向けて空洞 7、8 号の設置も行う。

東日本大震災による RF 機器への直接の損傷としては、現在分かっている範囲では、RCS の陽極電源の IGBT の故障が見つかったのみである。RCS では、付帯設備の復旧をまって 11 月に通電試験を行う予定であり、MR では既に通電試験が終了し機器の健全性を確認済みである。その他の震災の影響としては、重要な拠点であるヘンデル棟の RF 空洞のテストベンチが甚大な損傷を受け、現在も立入り制限が行われている事である。

参考文献

- [1] M. Nomura et al., " The origin of Magnetic Alloy core buckling in J-PARC 3GeV RCS ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 623 (2010) 903-909.