

# ANTI-RUST AND CURRENT STATUS OF MR RF CAVITYIES IN J-PARC

Katsushi Hasegawa<sup>\*A)</sup>, Chihiro Omori<sup>A)</sup>, Makoto Toda<sup>A)</sup>, Keigo Hara<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>,  
Taihei Shimada<sup>B)</sup>, Alexander Schnase<sup>B)</sup>, Humihiko Tamura<sup>B)</sup>, Masahiro Nomura<sup>B)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

<sup>B)</sup>JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, JAEA

2-4, Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1194

## Abstract

The Magnetic Alloy (MA) cores of the RF cavities in the J-PARC MR have been used in a cut core configuration to allow Q value adjustment. The coating of the cut surface to protect from corrosion process was difficult, because the cut surface had mirror like appearance caused by diamond polishing. As a result, the impedance reduction of RF cavities caused by corrosion on the cut surface was detected. One of main reasons was the Cu-oxide in the cooling water released by the main magnets and this accelerated the corrosion process. In order to solve corrosion problems on the cut surface, we tried two ways. One is coating of the cut surface by using PerHydroPolySilazane (PHPS) or RTV rubber, and the other is the separation of the cavity cooling water system from the MR magnets. From coating test results, we were able to confirm the effectiveness of the cut surface protection. At present, the impedance of cavities, where cores with cut surface protection are installed is stable.

## J-PARC MR RF 空洞の錆対策と現状

### 1. はじめに

J-PARC MR の RF 空洞では Q 値調整のため金属磁性体コアをカットコアとして使用している。この切断面は、発熱を防ぐためダイヤモンド研磨を行い非常になめらかな鏡面となっており、エポキシ樹脂による防錆処理をすることが困難であった。そのため、実験室で通電試験を 2000 時間程度行い、錆の進み具合、インピーダンスの変化が無いことを確認した上で防錆処理を行わず使用してきた。

MR のビームコミッションは、2008 年 12 月から始められたが、2009 年秋頃から空洞インピーダンスの低下が顕著に測定された。インピーダンスの低下は、空洞の冷却水系が主電磁石と同系統だったためホロコンからの酸化銅により切断面の錆の進行が早められた事が原因で、最終的には印可される電圧によってコアの損傷につながった。その経過は、本学会でも何度か報告している<sup>[1, 2, 3]</sup>。錆問題を解決するため、切断面の防錆処理や空洞用冷却水を主電磁石系から分離した独立系の構築などを行ってきた。結果、切断面保護対策の有効性が確認でき、インピーダンスも安定して推移している。

本論文では、切断面の防錆対策として行ってきた事や冷却水系を独立してからのインピーダンスの変化などを報告する。

### 2. 錆対策

切断面の錆対策は、切断面へのコーティングによる直接保護と冷却水系の分離の 2 つである。特に切断面は、電場が印可される面のため実験室で通電試験を行い問題なく通電できることを確認してからでないと MR トンネル内へのインストールはできない。以下に実験室で

の試験とその結果について述べる。

#### 2.1 ポリシラザンコーティング

ポリシラザン (PHPS : PerHydroPolySilazane) は、室温で高純度シリカ膜に転化する無機高分子のコーティング剤である。テストピースの表面を実機のコア同様に鏡面研磨し、コーティング試験を行ったところ問題無くコーティングされた。また、コーティングの密着性、付着性、耐食性を調べるためクロスカット法や塩水噴霧試験を行ったが問題なかった。よって、一度空洞で使用し切断面を再研磨したコア (再研磨コア) の切断面に 5 $\mu$ m 程度の厚みでコーティングし、通電試験を行った。

図 1 は、実験室で行った約 490 時間通電後の切断面の様子で、上段はコーティング無し、下段はポリシラザンコーティング有りである。コーティング無しは全体的に錆びているのに対し、コーティング有りはコーティングの剥がれや割れた部分で多少の錆は見られるが進行は抑制されている。

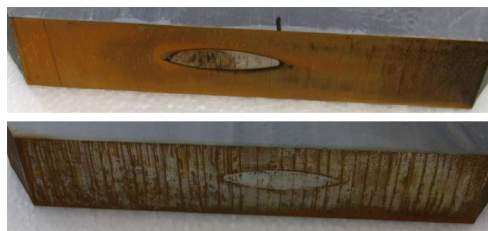


図 1: 約 490 時間通電試験後の切断面の様子。上段がコーティング無し、下段がポリシラザンコーティング有り。

通電試験も問題無かったことから、新品コア+ポリシラザンコーティングの空洞と再研磨コア+ポリシラザンコーティングの空洞の計 2 台を 2010 年秋から MR トンネル内へインストールした。

\* katsushi.hasegawa@kek.jp

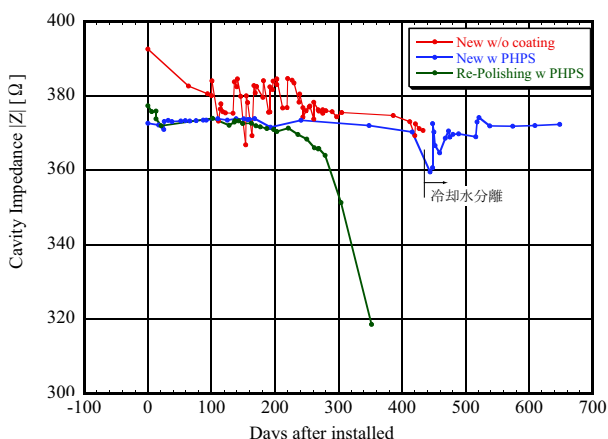


図 2: 切断面をポリシラザンコーティングで保護した場合のインピーダンス変化の比較。横軸は、インストールした日からの経過時間を示している。

図 2 は、新品コア+切断面の保護無し、新品コア+ポリシラザン、再研磨コア+ポリシラザンのコアで構成された空洞のインピーダンス変化を示している。横軸は、インストールからの経過時間を、縦軸は空洞インピーダンスを示している。切断面保護無しコアの空洞は、インストール直後からインピーダンスが低下している。その後の上下は、空洞に大気を導入しインピーダンスの回復を試みた結果であるが、低下傾向は変わらない。他方、新品コア+ポリシラザンでは 400 日までは安定している。その後、震災の影響で冷却水が停止したことで低下し、また冷却水系を分離した後で変動していた。この変動については、分かっていないが最近の 100 時間ではインストール直後のインピーダンスとほぼ同じ値で安定して推移していた。再研磨コア+ポリシラザンの空洞では、約 200 時間後から急激に低下がみられた。切断面保護無しのコアと同様に損傷から低下した物と考えられた。空洞の交換時に損傷したコアの切断面を観察したところ、コーティングが残っている部分も多く、保護なしコアのように切断面全体が錆の影響で損傷したわけではなく、以前の損傷が切断面の深い部分まであり、再研磨で除去しきれずにこの場合の損傷につながったと考えられる。

これらの結果からポリシラザンの有効性は確認されたが、問題点も分かってきた。ひとつは、ポリシラザンコーティングにひびが入りそこから錆が広まること、もう一つはポリシラザンコーティングの乾燥過程で再研磨コアの場合内部から水が出てきてうまくコーティングされない部分があるということである。これら 2 つの問題点とも、後述する RTV ゴムで切断面を被い、冷却水が切断面に直接触れないようにすることで解決できると考えている。

## 2.2 FRP 板

通常カットコアは、長さ 60mm、厚さ 10mm のスペーサーを間に挟み組み立てている。図 3 は、通電後の切断面の典型的な状態である。スペーサーが密着していた部分の錆は進行していないのが分かる。

通電で発熱するコアの除熱は、冷却水に触れている

両表面からおこなっており切断面を何らかで被われても問題ない。よって、幅 35mm×長さ 250mm の FRP 板で切断面全面を挟みコアを組み立て、通電試験を行った。

通電は問題無かったが、向かい合うコア同士の平行度が出ていないためコアと FRP 板との間に隙間ができ水が進入してしまう。直接水に切断面を多くさらす小型スパーサーよりは錆が抑制されるが、抑制効果としては弱い。



図 3: 10mm 厚のスペーサーを用いた場合の切断面の様子。スペーサーと接触している切断面の錆はほとんど進行していない。

## 2.3 サーコンシート

FRP 板とコアの隙間を埋めるため、熱伝導率があり電気絶縁性を持ったシリコンゴム製品である富士高分子工業の「サーコン」を間に挟んでコアを組み立てた(図 4)。使用したサーコンの厚みは、平均 0.34mm である。このコアを使用し、約 830 時間通電試験を行った。

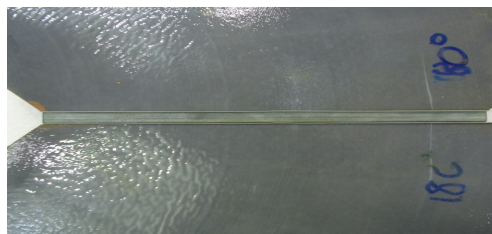


図 4: FRP 板とコアの隙間をサーコンを挟んで埋めている (通電前)。

図 5 は、通電試験後の切断面の様子である。サーコンに付いた黒い部分と相手側切断面の錆の部分は一致しており、密着が不十分な部分に水が入り込んでいることが分かる。厚い他のサーコンシートもしくは何枚かを重ねて使用する事も検討したが、サーコン自体が材質的に固く隙間を埋める事が難しいこと、また表面が滑るこ



図 5: 約 830 時間通電試験後の切断面の様子。切断面とサーコンの密着が不十分な所に水が進入し錆びていることが分かる。

とからコアを組み立ててつり上げた場合、ずれ落ちそうになるなどハンドリングが難しい。

## 2.4 信越シリコーン RTV ゴム

信越化学の信越シリコーン RTV (Room Temperature Vulcanizing) ゴムは、常温硬化する液状ゴムで耐電圧、耐熱性があり硬化後はゴム弾性の特性を持っている。今回使用したのは一液型 RTV ゴム (型番: KE348) で、混合の必要が無く、空気中の湿気と反応して硬化 (縮合反応) するタイプである。

サーコン通電試験で使用したコアの表面をアルコールで拭いた後 (図 6)、RTV ゴムをサーコンの表面に塗布し、挟み込んで固定した (図 7) 後、通電試験を行った。

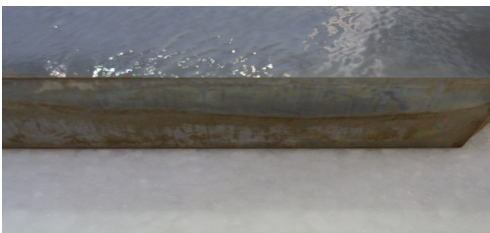


図 6: 通電前、アルコールで切断面を拭いた後の様子。



図 7: サーコンとコアの隙間に RTV を塗布しコアを固定してある。

図 8 に、約 590 時間通電後の切断面の様子を示す。下半分の錆の跡は、前回 (サーコン) のテストで錆びた跡であり、図 6 の表面状態と比較しても新たに錆びたところはなく、元の表面状態を維持している。

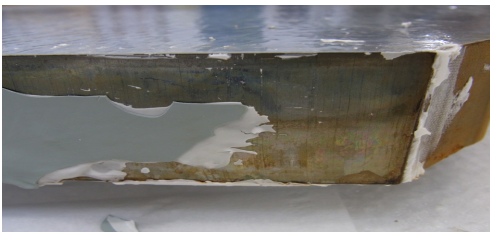


図 8: 通電後の切断面の様子。

錆の抑制効果が非常に高く、通電試験も問題ない事が分かったため、RTV で切断面を保護しながら Q 値調整ができるように組み立て方を変更した。そして、ポリシラザンコーティングと RTV ゴムで保護された再研磨コアで構成された空胴を 2010 年 11 月から MR トンネルにインストールした。

図 9 は、切断面の保護無しコアの空胴と RTV ゴムで保護されたコアの空胴 (新品コア、再研磨コア) の比較

である。横軸は、インストールしてからの経過時間を、縦軸は空胴インピーダンスを示している。保護無しコアの空胴インピーダンスが低下傾向に対して、RTV ゴムで保護されたコアの空胴は、コアが新品、再研磨の違いなく安定に推移しており、錆対策として有効である事が分かる。

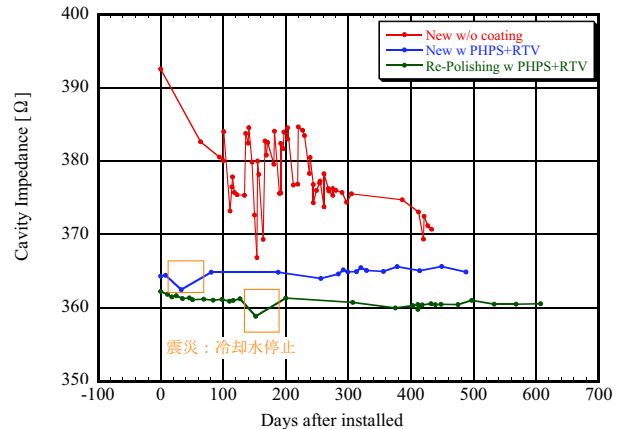


図 9: 切断面をポリシラザンコーティング+RTV ゴムで保護した場合のインピーダンス変化の比較。横軸は、インストールした日からの経過時間を示している。

## 2.5 独立冷却水系の構築

2011 年夏のメンテナンス期間を利用し、空胴の独立冷却水系を構築した (図 10)。配管は、通路の頭上に配置し、流量は 1 空胴あたり 45 ~ 50L/min × 6Tank、電気伝導度 < 10 $\mu$ S/m、溶存酸素濃度 (原水) < 0.3ppb で稼働している。



図 10: RF 空胴専用の冷却水系。

## 3. MR RF 空胴のインピーダンス変化

MR は、2008 年 12 月からビームコミッショニングを開始し、約 3 年半の運転をしてきた。その間測定してきたインピーダンス変化を図 11 に示す。横軸が時間、縦軸が空胴インピーダンスを示している。

運転開始から 2010 年夏までの運転では、インストールした空胴のほとんどでインピーダンス低下が測定された。その都度、損傷したコアの Tank があるギャップをショートした 2 ギャップ運転やデューティの低い

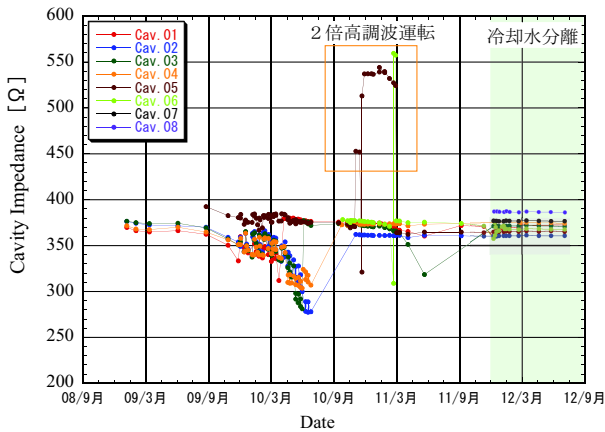


図 11: 空洞インピーダンスの測定結果。縦軸は、共振点でのインピーダンス、横軸は日時を示している。

2倍高調波運転、更にメンテナンス期間を利用してコアや空洞の交換に対応してきた。2010年秋以降の運転では、順次ポリシラザンコーティングもしくはポリシラザン+RTV ゴムで切断面を保護したコアを導入することで比較的安定に推移している。

2010年秋以降で、対策を施したコアをインストールした空洞のインピーダンス変化を図 12 に示す。横軸が時間、縦軸が空洞インピーダンスを示している。また、空洞を構成しているコアの構成を表 1 に示す。2011年12月以降は空洞冷却水系も独立して稼働している。

ポリシラザン+RTV ゴムで保護されている空洞では、空洞 # 2 が約 1 年半以上、それ以外でも半年以上安定している。更に今夏のメンテナンスを利用し、空洞 # 1 の入れ替え、及び空洞 # 9 の新設を行う予定である。

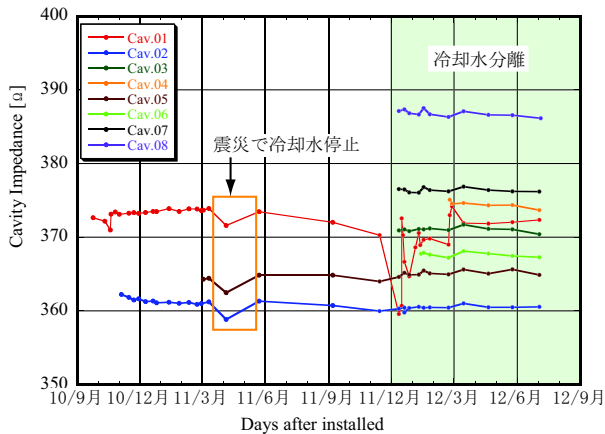


図 12: 最近の空洞インピーダンスの測定結果。空洞 1 は新品コア+PHPS、それ以外の空洞はすべて PHPS+RTV で切断面が保護されている。

#### 4. まとめ

切断面の防錆対策としてポリシラザンコーティング及び RTV ゴムによる保護を行い、一番運転時間の長い空洞 # 2 では 2010年11月から約 1 年半以上安定

表 1: 切断面保護対策済み空洞のコア構成

空洞	コアの状態 (枚数)	切断面の錆対策
# 1	新品 (18)	PHPS
# 2	再研磨 (18)	PHPS+RTV
# 3	新品 (6) + 再研磨 (12)	PHPS+RTV
# 4 *	新品 (11) + 再研磨 (7)	PHPS+RTV
# 5	新品 (18)	PHPS+RTV
# 6	新品 (9) + 再研磨 (9)	PHPS+RTV
# 7	新品 (6) + 再研磨 (12)	PHPS+RTV
# 8	新品 (6) + 再研磨 (12)	PHPS+RTV

\*Tank5&6 : RTV の塗布方法が他と異なる

に運転で使用している。また、RF 空洞の独立冷却水系を構築し、2011年11月から稼働を開始した。

ポリシラザンと RTV ゴムで保護したコアは、冷却水の状態及び再研磨コアなどコアの状態に依存せずインピーダンスの低下は見られていない。また冷却水の分離によって、ポリシラザンコーティングのみのコアでもインピーダンスを保持したまま推移していた。

現状では 8 台の空洞がインストールされており、そのうち 7 台はポリシラザンコーティングの有無、及び新品コア、再研磨コアの違いはあるがすべて RTV ゴムで切断面が保護されている。今年の夏には、空洞 # 1 と新規空洞一台もポリシラザン+RTV ゴムで保護されたコアで空洞を組み立てインストールする。

今後も定期的にインピーダンス測定を行いながら、長期間の有効性について観察を行っていく。

#### 5. 謝辞

空洞冷却水分離では、ニュートリノ Gr. 多田将氏の陣頭指揮のもと稼働までこぎ着けることができました。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] M.Nomura, et al., "Impedance Measurements of RF Cavities in J-PARC Synchrotrons", Proceedings of the 8th Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [2] M.Nomura, et al., "Impedance measurements of RF cavities in J-PARC synchrotrons", Proceedings of the 7th Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [3] C.Ohmori, et al., "Impedance Reduction of J-PARC MR Cavities in Summer, 2009", Proceedings of the 7th Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.