

Development of MA core for J-PARC Ring RF Cavity

Masahiro Nomura^{1,A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Alexander Schnase^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Katushi Hasegawa^{A)},
Taihei Shimada^{A)}, Hiromitsu Suzuki^{A)}, Eizi Ezura^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Makoto Toda^{A)}, Chihiro Ohomori^{A)},
Akira Takagi^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Shozo Anami^{B)}, Koichi Haga^{B)}

^{A)} KEK and JAEA J-PARC

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

^{B)} NAT, Tokai, Ibaraki, 319-1112, Japan

Abstract

We have been developing MA core for J-PARC Ring RF Cavity. From long run tests, we found that poor electrical isolation between layers caused damages to the cores. We improved the electrical isolation mainly by introducing a smooth tension control system to the winding process. The degree of the each core's electrical isolation was evaluated by the results of DC resistance and radial RF impedance measurements. The position of the cores in water tanks of a RF cavity is determined depending on the evaluation results because the strength of electric field is depend on the position in the water tank. We set up the good electrical isolation cores near the accelerating gap where the strength of electrical field is higher than other positions.

After long run tests of all of the cores, we installed 10 RF cavities in the RCS tunnel in May 2007 and beam commissioning was started from October 2007. Until now, total operation time of the RF cavities in the tunnel is about 1500 hours. To check the condition of the cores, we measured the RF cavity impedance at intervals of beam operations. The result of impedance measurements shows that no impedance reduction related to core damage was observed.

J-PARCシンクロトロンRF空洞の為のMAコアの開発

1. はじめに

J-PARC RCSでは、高い加速電圧の必要性から、飽和磁束密度が高く、高い加速電圧を得ることができる等の理由から、金属磁性体コアの採用を決めた¹⁾。

本論文では、先ず初めに金属磁性体コアについて簡単に説明を行った後、金属磁性体コアの開発の為にに行ったロングランテスト及び1年間の加速器運転を経た後のインピーダンスの変化について述べる。

2. 金属磁性体コア

金属磁性体コアは、先に述べた、飽和磁束密度が高く、高い加速電圧を得ることができる、の他に、大型コアの製造が可能、Q値が0.6と低く広帯域にわたって高いインピーダンスを持つ、カットコアの技術によりQ値の調整ができる等の特長を有している。Q値の調整に関しては、実際にJ-PARC MR(Main Ring)で、この方法によりQ値を26にしている。

この金属磁性体コアは、図1に示す様に、厚さ約18 μ m、幅35mmのリボンを巻いていくことにより作られる。このリボンには予め層間を絶縁する為の厚さ約2 μ mのSiO₂が片面に塗布されている。

コアの冷却方式は水による直接冷却方式、つまり、金属磁性体コアを直接冷却水中に入れ冷却している。

その為、コアの錆を防ぐ為にエポキシによる防錆コーティングを施している。コーティングの厚さは約300 μ mである。

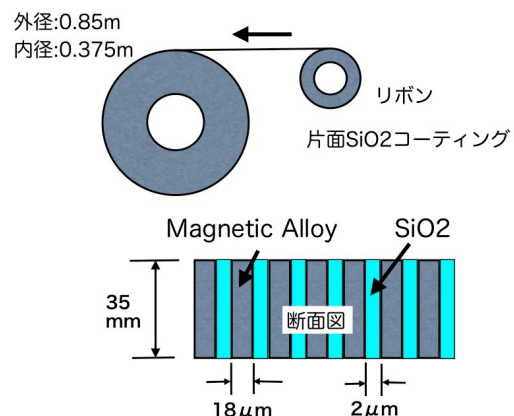


図1金属磁性体コアの製造方法とその断面図。

3. ロングランテスト

ロングランテストの目的は、このテスト以前に、幾つかのコアでは通電により損傷が起きていたので、インストール前に、全てのコアの耐久性、信頼性を確認することである。具体的には、全てのコアに対

¹⁾ E-mail: nomura.masahiro@jaea.go.jp

して最低300時間のロングランテストを行い、健全性を確認し、その後インストールを行うようにした。

最初の試験Run1では、300時間のロングランテストは続けられたものの、試験前後で空胴のインピーダンスが4%程度低下し、テスト終了後にコアを取出してみると、加速ギャップ側のコアに損傷が起り、幾つかのコアでは防錆用のコーティングに剥がれや浮きが観測された。

その後、損傷したコアの調査を行い、損傷の原因が、層間絶縁の不良によるものであることが判明し、さらに、層間絶縁不良を引き起こす要因としては、

- 1) 縦巻きの際の背板との擦れ
- 2) 強すぎるコア巻きのテンション
- 3) 製造工程中のコア表面の傷

であることが分かってきた。そして、これまでに製造されたコアでは、高い電圧のかかる加速ギャップ側での長時間の使用には耐えられないことが判明してきた。そこで、以下に示す様な製造方の改善を行いながら層間絶縁の確かなコアを追加製造し、それらのコアを加速ギャップ側に設置することとした。

- 1) 巻き方を縦巻から横巻へ
- 2) 適切なテンションコントロール
- 3) リボンの品質管理の徹底
- 4) 製造工程の見直し

層間絶縁の評価方法としては、DC抵抗値と動径方向RFインピーダンス比を採用した。動径方向RFインピーダンス比とは、コアを水タンクに入れ、空中でコアと水タンクの内外筒とを、電氣的に接触させた場合と非接触の場合とで測定したインピーダンスの比である。層間絶縁が良く、動径方向のインピーダンスが高い場合は、両方の値は近づき、動径方向RFインピーダンス比は1に近づく。詳しくは参考文献^[2]を参照されたい。動径方向RFインピーダンス比の測定結果を図2に示す。

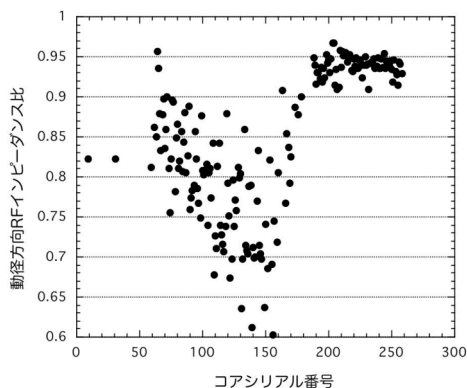


図2. 動径方向RFインピーダンス比測定結果。

シリアル番号166までは縦巻によるコアの製造、その後、横巻でシリアル番号189まで製造し、その後は、最適なテンションコントロールの導入及びリボンの品質管理を徹底し製造を行った。改善を行う毎に、層間絶縁が改善されていく様子が理解できる。

先に述べた様に、全ての対策を施した後のコア、シリアル番号190以降の層間絶縁が確かなコアを高い電圧のかかる加速ギャップ側に配置した。その他のコアについては、DC抵抗値と動径方向RFインピーダンス比の測定結果を基に配置した。

また、防錆コーティングに関しては内部に低粘度のエポキシを含浸することによりコーティングの剥がれや浮きは無くなった。

このような改善を行いながら全てのコアに対してロングランテストを行った。全てのランでの試験前後のインピーダンスの変化率を図3に示す。

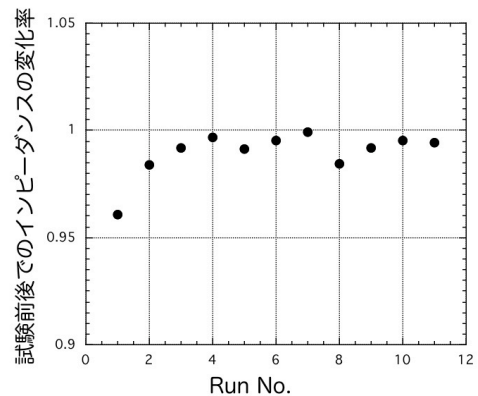


図3. ロングランテスト結果。

Run2では、縦型で製造したコアの中から層間絶縁の比較的良いコアを加速ギャップ側に配置し、更に、Run3では横型で製造したコアを加速ギャップ側に配置した。そして、Run4以降は、加速ギャップ側に全ての改善策を施したコアを配置して試験を行った。耐久性をより確実に調べる為に、このRun4は1000時間の試験を行った。結果は、コアに損傷は見られなかった。これ以降は、同様のコア配置で試験を継続し、その後の試験でもコアに損傷は見られなかった。図3を見ると、コアに損傷の見られたRun1と比べ、試験前後でのインピーダンスの減少が1%程度と低くなっていることが分かる。

4. 1年間運転後のRF空胴のインピーダンスの変化

ロングランテストで全てのコアの健全性が確認された後、2007年5月には10台のRF空胴の据付けが完了し、10月からはビームコミッションが開始された。その後、2008年6月末までの約1年間、運転時間にして約1500時間の運転が行われた。

コアの状態を調べる為に、Runの合間に空胴毎の

インピーダンスの測定を行った。測定結果を図4に示す。図4を見ると全体的にインピーダンスが変動しているのが分かる。これはロングランテスト中にも見られ、水温(物温)の影響によるものと考えられる。各測定日の水温を表1に示す。水温のインピーダンスに与える影響を定量的に評価することは難しいので、この影響は全ての空胴について同じであると考えて各空胴のインピーダンスを平均し、水温との関係を実験値から求めるようにした。結果を図5に示す。確かに、水温と空胴のインピーダンスには相関が見られる。

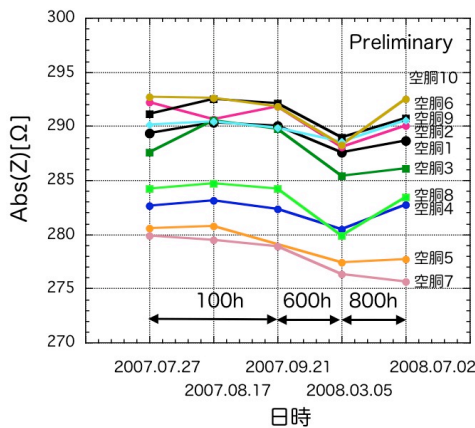


図4 空胴毎のインピーダンス

測定日	水温(物温)[°C]
2007.07.27	29.9
2007.08.17	31.9
2007.09.21	33.0
2008.03.05	15.0
2008.07.02	28.2

表1. 測定日の水温(物温)。

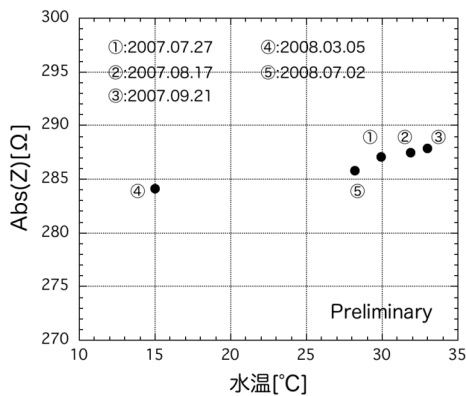


図5. インピーダンス(平均値)と水温の関係

この結果を基に、試験開始日の温度(29.9°C)に規格化したインピーダンスの変化を図6に示す。図6を見ると確かに全体的な変動が無くなっている。測定

したインピーダンスの値に数Ω程度のバラツキがあり、細かな議論はできないが、ロングランテストの結果では、コアの損傷に起因するインピーダンスの減少は4%程度あったことを考えると、コアの損傷を示唆する様なインピーダンスの減少は無いと思える。また、この間の冷却水の導電率は0.07 μS/cmと低い値を維持していることから、コアのコーティングに関して、大きな剥がれ等が起こり、コアが錆始めたとは考えにくい。

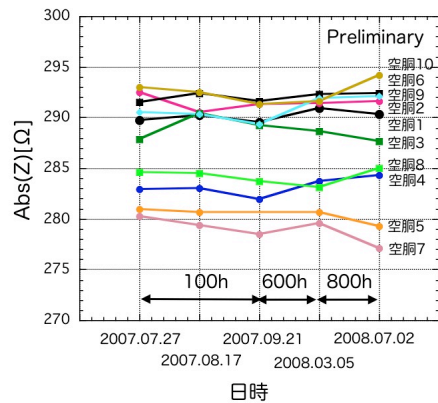


図6. 空胴毎のインピーダンス

5. まとめ

J-PARC RCSに不可欠な金属磁性体コアの開発を行ってきた。ロングランテストでは、コア損傷の原因が層間絶縁不良であることが判明し、その改善策として、コアの巻き方を縦巻から横巻へと移行したり、コア巻きのテンションコントロールを行うことによりこの問題を解決した。コアの配置は、DC抵抗値と動径方向RFインピーダンス比の測定結果を基に配置し、全てのコアに対して、最低300時間のロングラン試験でその健全性を確認した。

空胴据付け後、1年間、約1500時間の運転を行った。コアの損傷に関しては、コアの損傷を示唆する様な明らかなインピーダンスの減少は観測されなかった。また、冷却水の導電率が0.07 μS/cmと低い値を維持していることから、コーティングに大きな剥がれ等も起きていないと考えられる。

6. 謝辞

長期間のロングランテストは、東北大学、東京大学、京都大学、大阪大学、J-PARC加速器グループの協力無くしては行えませんでした。忙しい最中、通電試験のシフトに協力して下さいました方々全員に感謝いたします。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", J-PARC 03-01, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044.
- [2] Masahiro Nomura *et al.* "Development of J-PARC Ring RF cavity", Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, August 2-4, 2006