

J-PARC MR 加速空洞のインピーダンス低下 Impedance Reduction of J-PARC MR Cavities in Summer, 2009

C. Ohmori* Keigo Hara, Katsushi Hasegawa, Masahiro Nomura, Alexander Schnase, Taihei Shimada, Fumihiko Tamura, Makoto Toda, Masanobu Yamamoto, Masahito Yoshii
J-PARC Center, KEK & JAEA, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan 319-1195

Abstract

J-PARC ではニュートリノ実験のため約 60kW のビーム供給が開始されている。MR および RCS では従来のフェライト空洞に変えて金属磁性体を用いた加速空洞が使われている。この金属磁性体は防錆処理をされ、直接水冷により効率的に除熱されている。MR では予想されるビーム負荷効果に耐えるためにカットコアの手法を用いて加速空洞の Q 値を上げ、R/Q を減らしている。この際にリング状のコアを切断したカット面は発熱を防ぐためにダイヤモンドを用いた研磨により仕上げられている。この面は極めてなめらかで防錆処理が困難であったため、研磨した状態となっている。MR トンネル内に設置された 5 台すべての空洞で 2009 年の秋にインピーダンスが低下する現象が発生した。これは空洞の運転時間によらず、設置したばかりの空洞でも低下していた。実験室での 2000 時間におよぶ長時間耐久試験でも見られなかった現象であった。ところが、2010 年に同じ MR に設置された空洞ではこのような低下は見られていない。いくつかの実験事実から、切断面では銅成分の付着が見られ、酸化還元反応が関与していると考えられている。インピーダンス低下の考えられる要因、ビーム供給運転のために行った短期的な対処法、低下の再発を防ぐための準備状況について述べる。

INTRODUCTIONS

金属磁性体空洞は大強度のビーム加速を目的として開発され、従来のフェライト空洞では不可能な高い加速勾配を実現している [1, 2]。この空洞により、J-PARC RCS で求められる中性子実験のための大強度ビームを $1\mu\text{s}$ 以下のパルス幅に対応する小型リングで MR への入射に必要なエネルギー (3GeV) を同時に実現することができた。さらに、この磁性体の性能を改良し、将来のニュートリノ実験が要求している MR の高繰り返し化によるビーム強度増強や MLF ユーザーのための大強度化とビームの短バンチ化に対応しようとしている [3]。この金属磁性体空洞の製造プロセスを図 1 に示す。アモルファス状態であった厚さ $18\mu\text{m}$ のリボンを巻くことにより、加速器用の大型コアが形成される。高加速勾配を実現するために、このコアへの RF の投入と効率の良い冷却が求められる。このため、磁性体コアは防錆処理を施され、純水により直接冷却される。MR では 30GeV まで加速する過程でビームバンチ幅が細くなり、設計強度では 200A を超えるピーク電流値となるため、MR の空洞では R/Q を下げ、ビーム負荷に強くすること

が必要であり、コアを切断したカットコアが用いられている。この切断面はコアのリボンの層間絶縁を破壊しないことが求められ、そのためダイヤモンド研磨が用いられている [4]。この研磨面は極めて滑らかになっているため、防錆処理コーティングを施すことが難しかったため、現状では研磨した状態で、純水中に置かれている。実験室での試験では純水を脱酸素処理することにより、研磨面の錆を減らし、安定した特性を得ることができている。

加速空洞内の金属磁性体の様子を図 2 に示す。冷却タンクの中に置かれた 3 枚のカットコアはタンク下部に開けられた 3 つの穴から出る純水により冷却される。カット面に研磨不良がある場合を考慮し、積極的にカット面に冷却水が通る構造としているが、タンク下部への水の入り方により、タンク内部の水の流れ方は非対称になっている (図 3)。

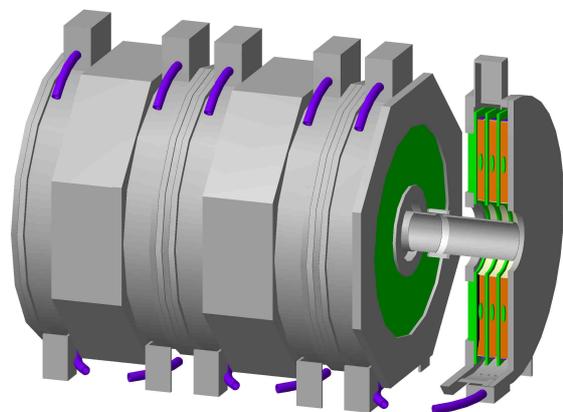


Figure 2: Cut cores in the cavity.

インピーダンス低下

MR の加速空洞のインピーダンスの変化を図 4 に示す。2009 年の秋以降 MR のすべての加速空洞においてインピーダンスの低下が観測されている [5]。その約 1 年半前に 4 台の空洞が設置されたが、その間には見られなかった現象である。5 台のうち 1 台で磁性体コア 1 枚で損傷が発生し、交換を行った。幸い、インピーダンスは冷却水を抜き、一時的に空気に触れさせることである程度回復することが分かった。図 4 においてインピーダンスが激しく変動しているのは、加速器運転中のインピーダンスの低下と停止期間中の水抜きによる回復の

* chihiro.ohmori@kek.jp

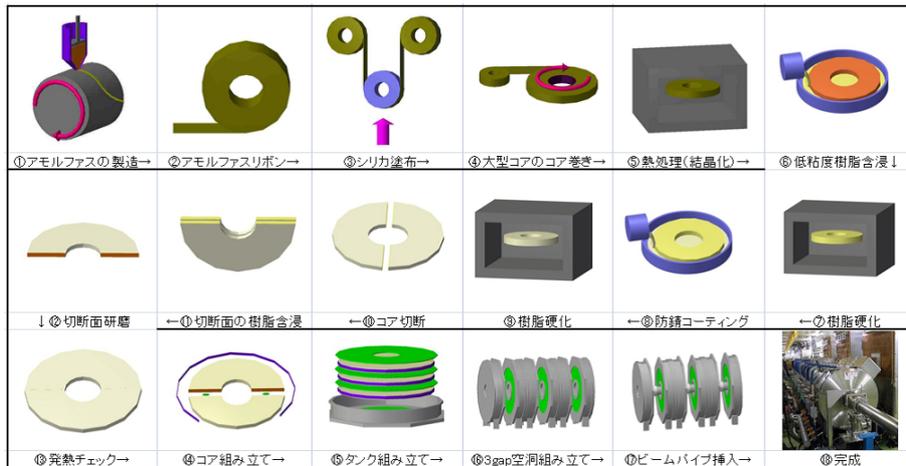


Figure 1: Production process of MA cores for MR.

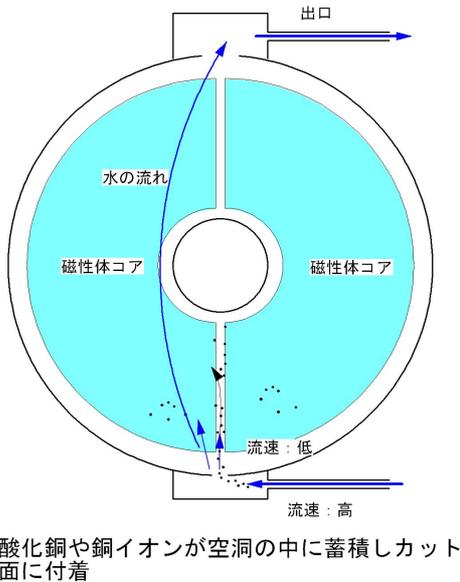


Figure 3: 冷却水槽内の水の流れ

ためである。水抜きの際に窒素ガスでパージしてもこの回復は起きないことから、空気中の酸素によるものと考えられている。

5 台のインピーダンスの低下は 2009 年夏から秋にかけて、ほぼ同じ振る舞いをしている。水抜きをすることにより、5 号機のインピーダンスの低下量は減少し、水抜き周期を減らすことができた。これに対し、1~4 号機では、低下量は大きい。これらの号機では、加速器運転上の都合で水抜きが行えずインピーダンスが低下した場合、水抜きをおこなってもインピーダンスは元の水準までは回復しなかった。

磁性体コアの損傷によって空洞のインピーダンスが低下し、空洞の発熱量が増加する現象が 1、3、2 号機で発生した。冷却水の温度上昇から、どの空洞タンクが損傷したかを判別することができた。損傷は限定的であ

り、空洞の加速電圧を下げることにより、損傷したタンクにも電圧を安定に出力することができ、加速器運転を継続し、予定された定期点検時に空洞の交換または修理をおこなった。損傷はカットコアのカット面で発生しており、図 1 に示したように製造工程ではこのカット面はコーティングにより保護されておらず、冷却水に直接接触することになる。冷却水の流れには図 3 のように対称ではなく、冷却水が当たり易い面がある。以後発生した損傷も含めて、損傷はこの冷却水が当たりやすい面で発生している。

水抜きにより回復すること、冷却水が当たりやすい面で損傷が発生すること、インピーダンスの低下が冷却水のストレーナーに酸化銅が詰まりだした時期 6 と合致することから、インピーダンスの低下には純水系に一時的に多く流れていた電磁石のホローコンダクターを発生源とする酸化銅が関与していると考えられている。特に 2009 年 7 月は目詰まり対策として冷却水系のストレーナのメッシュサイズを粗くした時期でもある。さらに、カット面からはコアの主成分の鉄に対して 28 %もの銅が検出されている⁷。この付着物の X 線解析パターンは酸化鉄 (は Fe_2O_3 、 Fe_3O_4) と銅 (Cu) と良く一致している。この銅の析出と導電性を持つ金属酸化物がインピーダンスの低下に関与している可能性が高い。これらは金属磁性体の鉄が水中へと溶けだすことを促進し、カット面に穿孔を作っていると思われる。また、2009 年秋の運転が遅い取り出し実験の時期と重なることから速い取り出し運転に比べ電磁石の温度が高くなったことによる酸化銅の水中への放出も一因の可能性もある。

図 5 に空洞の初期運転時におけるインピーダンスの変化を示した。実験室で行った長時間運転 (2000 時間) では昨年秋のような低下は見られなかった。2008 年 3 月に設置した 2 号機でも、このような明確な低下は見られない。2010 年 3 月に 1 号機の空洞を新しいものに入れ替えているが、この 3 カ月間ではこのような明確な低下はない。

MR の冷却水系で頻発した酸化銅の詰まりはその後、減少している。しかし、試験的にフィルターを設置したところ、酸化銅がまだ循環していることも分かった。

