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 1µs 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 18μm 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.



酸化銅や銅イオンが空洞の中に蓄積しカット 面に付着

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、冷却水に直接触 れることになる。冷却水に流れには図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 -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 Fe2O3、Fe3O4) と銅 (Cu) と良く -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 られいない。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。

Figure 3: 冷却水槽内の水の流れ

2010年夏の停止期間中に冷却水系にフィルターを設置 する他、冷却水の入れ替え作業をおこなう予定であり、 今後のインピーダンスの低下が緩和されることが期待 される。



Figure 4: Variation of cavitiy impedances



Figure 5: 加速空洞運転初期のインピーダンスの変動



Figure 6: 酸化銅により目詰まりした MR 冷却水機械棟 の大型ストレーナー.

今後の対策

MRの冷却水系はフィルターを設置するなど、電磁石から放出された酸化銅粉を取り除くための対策を強化



Figure 7: コア表面の付着物の分析結果

した。また、電気伝導度を維持するためのイオン交換樹 脂の交換をおこなう予定である。さらに、秋からの運転 に備え、初めての冷却水の水抜き作業を電磁石ごとに 行う予定である。根本的な解決として、鉄を含む加速空 洞の冷却系と銅を含む電磁石の冷却系を分離すること が考えられているが、大規模な工事となるため MR の ビーム増強のための MR の速い繰り返し化の工事と同 時期まで待つことになる可能性が高い。

加速空洞側の対策として、2010年6月に設置した空 洞ではカット面にシリカを主成分としたコーティングを 施したものを設置した。今後、このようなコーティング したコアを使うことにより、酸化銅の付着やカット面の 錆が減ることを期待している。また、カット面がを水に 触れないようにカット面のスペーサーを改良する試験も 行われている。

CONCLUSIONS

J-PARC 加速器は順調に稼働し、ユーザーへのビーム 供給をおこなっている。昨年夏から秋にかけて発生した MR 加速空洞でのインピーダンス低下は冷却水タンクか ら水を除き、カットコアの表面を酸化させることで一時 的に回復し、これを頻繁に繰り返すことで、今年夏まで の加速器運転を継続することができた。インピーダンス の低下は冷却水中に含まれる酸化銅に関連があると考 えられている。2010年に設置した空洞では急激なイン ピーダンス低下は見られていない。冷却水品質の向上と 空洞の改良により、高加速勾配での加速空洞運転を継続 する予定である。

REFERENCES

- C. Ohmori et al., HIGH FIELD-GRADIENT CAVI-TIES LOADED WITH MAGNETIC ALLOYS FOR SYN-CHROTRONS in Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999, p. 413.
- [2] M. Yamamoto et al., HIGH POWER TEST OF MA CAVITY FOR J-PARC RCS in Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, p. 1322.
- [3] C. Ohmori *et al.*, POSSIBLE UPGRADE SCENARIO FOR J-PARC RF, in *Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy* (European Physical Society Accelerator Group, 2008), p. 799.
- [4] M. Yoshii et al., NEW CUTTING SCHEME OF MAG-NETIC ALLOY CORES FOR J-PARC SYNCHROTRONS in Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, p. 1313.
- [5] M. Nomura *et al.*, IMPEDANCE MEASUREMENTS OF MA LOADED RF CAVITIES IN J-PARC SYS-NCHROTRONS, to appear in *Proceedings of PAC09, Vancouver, BC Canada* (2009).