

HOM analysis of Magnetic Alloy Cavity

Katsushi Hasegawa^{*A)}, K.Hara^{A)}, M. Nomura^{A)}, C. Ohmori^{A)}, A. Schnase^{A)},
F. Tamura^{A)}, M. Toda^{A)}, M. Yamamoto^{A)}, M. Yoshii^{A)},
^{A)} KEK and JAEA J-PARC

2-4 Shirakata Shinane, Takai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

Abstract

The RF cavity using Magnetic Alloy (MA) cores has been developed for achieving the high field gradient in J-PARC synchrotron. Because of adopting the quality factor of 26, cut core configuration has been used in Main Ring RF cavities. Electromagnetic simulations of HOM analysis about RF cavity of MA cores, cut core configuration and between the cut core gap were performed. In this paper, a simulation method of MA core and results of HOM analysis for cut core and MA core are presented.

金属磁性体空洞の高次モード解析

1. はじめに

J-PARC リング RF グループでは、高い加速電場勾配の実現のため従来のフェライト空洞に代わって金属磁性体 (MA) コアを採用した空洞を開発してきた。MA コアは、フェライトコアと比較し高い透磁率を持ち、また Q 値が 0.6 程度と低いいため広い周波数帯域を持つ。そして、J-PARC MR 用 RF 空洞では Q 値を 26 とするため、コアを 2 分割しギャップ間隔を変えることでインダクタンスを変化させ Q 値の調整をするカットコアを用いている。しかし、MA コアを用いた RF 空洞の電磁場解析、更にカットコア空洞、カットコアギャップ間の高次モードについては明らかでない。そこで、MA コアやカットコアについて 3 次元電磁場解析を行い空洞に励起される高次モードについて調べた。

本報告では、MA やフェライトについてアンカット、カットコア空洞に励起されるモードの比較や特徴、及び今後の見通しなどについて述べる。

2. 電磁場解析

J-PARC RingRF で使用している MA コアは、厚さ約 $18\mu\text{m}$ の金属箔の片面に約 $2\mu\text{m}$ の絶縁膜を塗布した 36mm 幅のリボン仕様を仕様の大きさ (MR 用コア: 内-外径 $245\text{-}800\text{mm}$ / RCS 用コア: 内-外径 $375\text{-}850\text{mm}$) まで巻いて製作している。電磁場解析では実際の形状を入力し、解析することは不可能なため形状をモデル化し簡素化する必要がある。

2.1 金属磁性体コアのモデル化

始めにコア内での信号伝搬について考える。MA コアでの信号伝搬は、コアの 1 層に着目した場合リボンの周方向に沿った導電性と径方向への容量性の CR 並列回路で考えることが出来る。現状コアで半径が最小 (周方向の抵抗が最小) となる MR コア内径

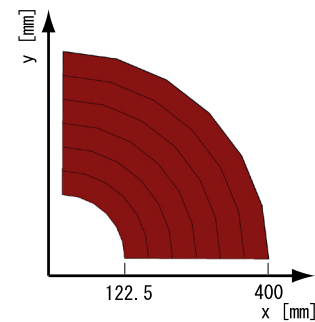


図 1: 径方向 6 分割コア。分割コア境界面 (黒線) に境界条件: 電場垂直 (HFSS なら PerfectE) をそれぞれ設定し、電場成分を E_r に制限する。

($r_{min} = 0.1225\text{m}$) での臨界周波数 (f_{CR}) を求めると $f_{CR} \sim 228\text{KHz}$ となる。RingRF 空洞で使用する周波数は 1MHz 以上であるため、RCS、MR のコア及び使用周波数帯での信号伝搬は、径方向への容量性伝搬が優勢であることが分かる。よって、渦巻き状の形状は単純な積層構造に置換可能である。

次に、マクロな媒質 (円筒座標系) で表現することを考える。コアのマイクロ構造は、金属箔と絶縁膜が交互に並ぶ積層構造であり波長と比較すると十分微細である。また、その中で励起されるモードの電場成分は、構造上径方向成分 (E_r) に制限されると考えられる。よって、径方向には誘電率を持ち、周 (軸) 方向は金属的な性質となる異方性誘電体媒質でコアを表現する。また電場が $\vec{E} = \vec{E}_r$ に制限される特徴は、コアを径方向に分割し、その境界面にそれぞれ電場垂直となるような境界条件を設定する事で模擬できる (図 1 参照)。

2.2 等価誘電率

MA コアをマクロな異方性誘電体で表したときの等価誘電率 (ϵ_{\perp}) を一辺の長さ L 、高さ h の正方形で

*E-mail: khase@post.kek.jp

挟まれた積層コンデンサとみなして求める。ここで金属箔 ($a = 18\mu\text{m}$) と絶縁膜 ($b = 2\mu\text{m}, \epsilon \sim 3$) とし、積層コンデンサの場合と等価誘電率を用いた場合でのそれぞれの静電容量 C を求めると、

$$C_{\text{積層}} = \epsilon \frac{L^2(a+b)}{bh} \quad (1)$$

$$C_{\text{等価}} = \epsilon_{\perp} \frac{L^2}{h} \quad (2)$$

となる。式 (1) と (2) が等しくなるときの値を求めると、等価誘電率は $\epsilon_{\perp} \sim 30$ となる。さらにコアの占率などを考慮し、計算ではおおよその値として $\epsilon_{\perp} \sim 20$ とした。

2.3 計算コード

使用する計算コードは、以下の条件を念頭に何種類かて試みた。

1. 異方性誘電体を円筒座標系で設定できる事。
2. カットコアのため3次元計算*が出来る事。
*RCSは対称性から2次元計算も可
3. 高損失 ($\tan\delta_M \sim 1.833$) を設定した Q 値計算

実際には MAFIA、MWStudio、HFSS それぞれで計算を行ったが、MAFIA は条件 2 と 3 での解の収束性及び精度、MWStudio は条件 1 と 3 での設定及び収束性の理由から断念し、HFSS を用いることにした。ただし、HFSS で使用できる座標系は xyz 座標だけである。よって、計算するコアを周方向に分割し、分割コアそれぞれに回転軸を設定することで、 $x \rightarrow r, y \rightarrow \varphi$ のように円筒座標を近似し、異方性を設定した。妥当性を評価するためこの近似で固有値計算を行い、結果の周波数を MAFIA 2次元円筒座標系で計算した結果と比較すると 1% 以下で良い一致となっている。

2.4 計算形状

今回計算で使用した HFSS での形状 (MR カットコア: Gap10mm) を図 2 に示す。

空洞本体は極力単純化し、内部はコアと水のみとした。また実際の空洞に設置されている共振周波数調整用真空コンデンサ (MR:約 1700pF/Gap) の容量は、加速ギャップのセラミックスの比誘電率を変えることでその容量を模擬した。

カットコアは、真円のコアから中央部を 3mm 幅でカットし、その Gap 間隔を必要に応じて設定した。またカット有り、無しでモードを比較する場合の計算では、Gap0mm をカット無しのコアとすることでカットコアと体積が等しい状態で計算を実行した。

3. 空洞の電磁場モード

J-PARC MR RF 空洞では、MA コアとそのカットコアという 2つの新しい技術を用いている。そこで始めに、これまで空洞に用いられてきたフェライトコアでのカット有り、無しで励起されるモードの比較を行った。次にカットコアにおける MA コアとフェ

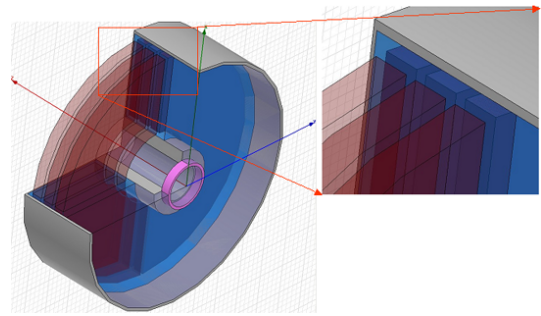


図 2: 計算に使用した HFSS での形状 (MR カットコア:Gap10mm)。空洞本体は単純化し、内部はコア 3 枚と水のみとした。また加速ギャップのセラミックスの比誘電率を変えることで共振周波数調整用真空コンデンサの容量を模擬した ($\epsilon_r = 2800$ で 1764pF に相当)。

ライトとの励起モードの比較を行った。尚、計算での物性値はコア ($\epsilon_{r(\perp)}: 12, \mu_r: 1000$)、加速ギャップセラミックス ($\epsilon_r: 1000$)、水 ($\epsilon_r: 81$) を設定し、無損失を仮定した固有値計算を行った。

3.1 励起モードの比較: カット無し or 有り

カット無し (Gap0mm) と有り (Gap10mm) の計算結果を表 1 示す。Gap0mm の Mode3 と 4、5 と 6、8 と 9 は直交モードである。Gap10mm の場合は、Gap0mm のモードに対応するように並べている。同じモードとしたモード 2 と 5 は、周波数が異なる。これは、モード 5 の磁場分布をみるとギャップ部分で向きが逆になっており、Gap0mm で打ち消しあいダイポールモードと見なせるためモード 2 と同じモードとした (図 3 参照)。モード 4 と 7 についても同様の理由である。カットコア独自の励起モードが存在していないことが分かる。

次にカットコアの Gap 間隔を変化させ、共振周波数の変化を調べた (図 4)。基本モード (TEM) は、Gap を横切る磁場成分があるため Gap 間隔が広がると実効的なインダクタンスが減少し、共振周波数が高くなる。対して高次モードは、磁場分布がカットコア内で完結しているため影響を受けにくい。

Mode	Gap0mm	Mode	Gap10mm
1	0.826 MHz	1	2.713 MHz
2	5.616 MHz	3	5.906 MHz
3	5.896 MHz	2	5.882 MHz
4	5.897 MHz	5	6.690 MHz
5	6.653 MHz	4	6.637 MHz
6	6.654 MHz	7	7.742 MHz
7	7.295 MHz		
8	7.704 MHz	6	7.682 MHz
9	7.707 MHz		

表 1: カット無し (Gap0mm) と有り (Gap10mm) の場合に励起されるモードの計算結果

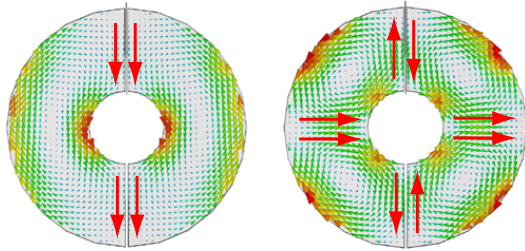


図 3: Gap=10mm のモード 2 (左) と 5 (右) の磁場分布。モード 5 は、Gap 近傍の磁場の向きが逆になっており、Gap0mm で打ち消しあう。よって両モードともダイポールモードとした。

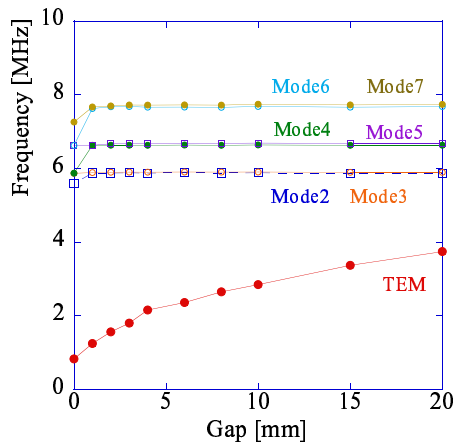


図 4: Gap 間隔に対する周波数の変化。基本モード (TEM) は、Gap を横切る磁場成分があるため Gap 間隔が広がると実効的なインダクタンスが減少し、共振周波数が高くなる。それに対し高次モードの磁場分布は、カットコア内で完結しているため影響を受けにくい。

以上のことから、カットコアでは独自に励起されるモードはなく、また Gap への漏れ磁場もほぼ無いことが分かる。

3.2 フェライトコアと金属磁性体コア

表 2 は、カットコア (Gap10mm) のときフェライトコアと MA コア (異方性誘電体及び対称性から 1/4 形状で計算) の結果を共振周波数順に示している。フェライトで励起されていた高次モード (TM モード) が励起されていないことから、異方性誘電体で MA コアの電場成分が E_r に制限される特徴を良く模擬できている。また、MA コアで示したモード 2 (16.16MHz) 以上のモードについては、電磁場分布やパラメータを変えた計算から実際には存在しないモードと考えている。

図 5 は、MR 空洞: 1Gap (真空コンデンサ: 1706pF) をネットワークアナライザで測定した結果である。20MHz 以上の 4 ピークは空洞と 4 つの真空コンデンサの組み合わせからくる共振であり、それを除くと基本モード以外に高次モードが存在しないことがわかる。

Mode	フェライト	Mode	MA コア
1	2.713 MHz	1	2.841 MHz
2	5.882 MHz	2	16.16 MHz
3	5.906 MHz		
4	6.637 MHz		
5	6.690 MHz		
6	7.682 MHz		
7	7.742 MHz		
8	8.861 MHz		

表 2: カットコア (Gap=10mm) でのフェライトコアと MA コアでの励起モードの比較。MA コアでは、電場成分が E_r に制限されるためフェライトで励起されていた高次モード (TM モード) が励起されていないことが分かる。

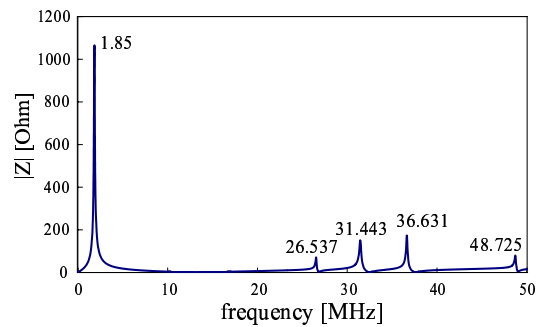


図 5: MR 空洞: 1Gap (真空コンデンサ: 1706pF) をネットワークアナライザで測定した結果。20MHz 以上の 4 ピークは空洞と 4 つの真空コンデンサの組み合わせからくる共振である。

4. まとめ

J-PARC RF 空洞で使用している MA コアのモデル化及びカットコアについて電磁場計算を行い、励起される高次モードについて解析を行った。カットコアで励起されるモードの特徴は、磁場がカットコア内で完結し向かい合った 2 つのカットコアで対称になるモードであり、ギャップ間に高次モードは励起されないことが計算の結果分かった。また MA コアを異方性誘電体で表した計算は、構造上電場成分が E_r のみの基本モードに制限されることをよく再現している。

今後は、現在進めている高損失を設定した Q 値計算と実機との比較を行う。

5. 謝辞

今回の解析を進める上で KEK 影山達也氏には助言や HFSS の融通など大変お世話になりました。また 絵面栄二氏、高田耕治氏にも貴重なご意見をいただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。