

# RI 蓄積冷却リング用高周波加速空洞のための磁性材料の測定

渡辺真朗<sup>A)</sup>、千葉好明<sup>A)</sup>、小関 忠<sup>A)</sup>、大友清隆<sup>B)</sup>、筒井裕士<sup>A),B)</sup>、片山武司<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

<sup>B)</sup>住友重機械工業株式会社 〒141-8686 東京都品川区北品川 5-9-11 住友重機械ビル

## 概要

我々は、理研 RIBF プロジェクトの第 2 期計画として検討されている蓄積冷却リング (ACR: Accumulator Cooler Ring) に用いる、高周波加速空洞 (周波数帯域 20 - 40 MHz) の開発研究を行っている。本研究は、昨今、加速空洞用の磁性体材料として注目を集めている磁性合金 (MA: Magnetic Alloy) が、これまでに実績のない高い周波数領域 (20 - 40 MHz) において実用可能かどうかを明らかにするものである。

FINEMET、コバルト基アモルファス、鉄基アモルファス等の磁性体材料について、1 MHz - 50 MHz に渡って高周波特性を測定した。その結果、高周波側でより高い  $\mu Q_f$  値が得られること、一連の磁性体サンプルのなかで FINEMET (FT-3M) が最も高い  $\mu Q_f$  値を持つことがわかった。また、実機サイズのコアにおいて、カットコア方式を用いることによって、FINEMET の  $Q$  値を適度に上げられることを ACR の周波数帯域で確認した。

## 1 背景と目的

理研の RIBF プロジェクトでは、第 2 期計画として超伝導サイクロトロン-RIPS で生成された RI ビームを蓄積・冷却して原子核実験に供するための蓄積冷却リング (ACR) が検討されている。ACR では、高周波蓄積法によって RI ビームの入射・蓄積が行われる[1]。高周波蓄積法に用いる加速空洞は、ACR の運転周波数帯域 (20 - 40 MHz) において幅 0.4 MHz 程度の周波数掃引を 10 ms 以内に行う必要がある[2]。

近年、MA を負荷した高周波加速空洞 (MA 空洞) の研究が急速に進み、国内外のいくつかの加速器施設ですでに実用化に至っている[3,4]。MA 空洞の利点は、 $Q$  値が低いため加速やビーム蓄積に伴う共振周波数のチューニングが不要となること、キュリー温度が高いために発熱による特性変化が少ないこと、等があげられる。ただし、これまでに実用化されている MA 空洞の周波数は、主に数 MHz 帯、最も高いものでも 16 MHz 程度であり、20 MHz 以上では全く実績はなく、磁性体としての特性もほとんど評価されていない。

本研究は ACR の周波数領域において MA コアの特性を測定し、MA コアを用いた非同調空洞を ACR に採用する可能性を調べることが目的である。

## 2 MA コアの高周波磁気特性

FINEMET[5]、コバルト基アモルファス、鉄基アモルファス等の磁性体材料について、1 MHz - 50 MHz に渡って高周波特性を測定した。コアは絶縁耐 ( $SiO_2$ ) でコーティングされた約 20 $\mu$ m の厚みのテープをトロイダル状に

重ね巻いた形状を持つ。コア材料のサイズやテープ厚みを表 1 に示す。

表 1: コア材料のサイズとテープ厚み

	Co-amorphous	Fe-amorphous	FINEMET (FT1H)	FINEMET (FT3M)
Tape thickness[ $\mu$ m]	20	20	20	18
Inner diameter[mm]	60	60	60	140
Outer diameter[mm]	155	155	155	200
Height [mm]	25	25	25	25

磁性体材料の高周波特性を評価するために、2 種類の試験空洞を製作した。試験空洞を図 1 に、試験空洞のサイズを表 2 に示す。ここでは試験空洞 1 を用いた。ネットワークアナライザ (HP4195A + HP41951A) によってアドミッタンス  $Y (=G+jB)$  を測定した。高周波空洞のシャントインピーダンス  $R_{sh} (=1/G)$  はアドミッタンスより直接求めることができる。MA コアはロスが大きいため、測定した周波数領域においては MA 空洞のロスのほとんどがコアによるものである。この場合、高周波加速空洞の等価回路は並列の LC 回路で表現でき、アドミッタンス  $Y_e$  は次式で与えられる。

$$Y_e = j(\omega C - 1/\omega L), \quad (1)$$

ここで  $L$  は以下のように書ける。

$$L = (\mu_0 \mu' d / 2\pi) (1 - j/Q) \ln(R_o/R_i), \quad (2)$$

ここで  $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\mu'$  はコアの比透磁率、 $Q$  はコアの磁気的な  $Q$  値、 $R_i$ 、 $R_o$ 、 $d$  はコアの内径、外形、高さである。

実験では測定した周波数帯域でコアと試験空洞間の浮遊容量の影響を十分小さくするために、コアと試験空洞間に 5 mm 以上の隙間を開けている。 $Y_e = Y$  とすると、これらの実数部より次の関係が得られる。

$$\mu' Q_f (1 + 1/Q^2) = R_{sh} / \{(\mu_0 d) \ln(R_o/R_i)\}, \quad (3)$$

ここで  $f$  は周波数である。式(3)の左辺は一般に  $\mu Q_f$  値と呼ばれ磁性体材料を評価する際に用いられる。

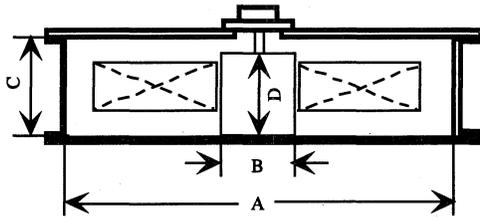


図 1: 試験空洞断面図

表 2: 試験空洞のサイズ

	試験空洞 1	試験空洞 2
A(mm)	270	450
B(mm)	8	132
C(mm)	65	20
D(mm)	55	15

実験から得られたシャントインピーダンスと $\mu Qf$  値を図 2 に示す。ただし、FINEMET(FT-3M) についてはコアサイズが他のサンプルと異なるため、 $Ri/Rold = 60/155/25$  mm に換算したときのシャントインピーダンスをプロットしている。

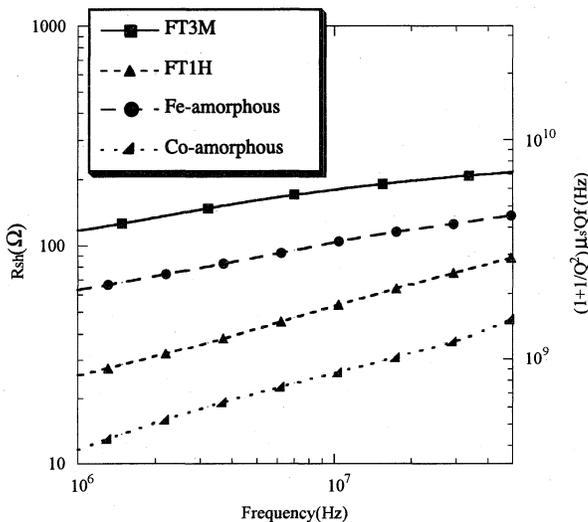


図 2: 磁性合金のシャントインピーダンスと $\mu Qf$  値

図 2 を見てわかるように MA コアは高周波になるほど高いシャントインピーダンスと $\mu Qf$  値を持つ。また、FINEMET (FT-3M) が最も大きなシャントインピーダンスと $\mu Qf$  値を持っており、測定したコアの中では高周波加速空洞に用いるコアとして最も有効であると判断できる。

### 3 カットコアを装填した加速空洞の高周波特性

最大 400 kHz 程度の周波数幅を高速掃引する ACR の高

周波加速空洞としては数 10 の  $Q$  値が適当である。しかし、FINEMET を含めた MA コアの  $Q$  値は非常に低い (1MHz 以上で  $Q$  値は 1 以下)。すでに実用化されているいくつかの MA 空洞では、磁性体を径方向に切断して半円形に二等分し (カットコア)、切断面の間に任意の間隙 (エアギャップ) を設けることにより、MA 空洞の  $Q$  値を大きくする方法が用いられている [6,7]。そこで、我々は ACR の周波数領域で、FINEMET(FT-3M) のカットコアを用いた高周波空洞 (試験空洞 2) の特性を評価した。カットコアを装填した高周波空洞の断面図を図 3 に示す。用いたコアのサイズ (カット前) は外形 300 mm、内径 140 mm、高さ 10 mm である。ACR の高周波加速空洞にはこのサイズのカットコアを複数用いることを想定している。

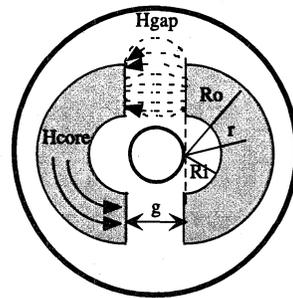


図 3: カットコアを装填した高周波空洞の断面図

測定したアドミッタンスからシャントインピーダンス  $Rsh(=1/G)$  とインダクタンス  $L(=1/(\omega(-B+\omega Cg)))$  を見積もった。試験空洞 2 を接続するコネクタの近辺の寄生容量  $Cg$  は約 30 pF と見積もられる。間隙幅をパラメータとしたシャントインピーダンスとインダクタンスの周波数依存性を図 4, 5 に示す。図 4 からわかるように、低い周波数領域において、間隙幅を広げるほどシャントインピーダンスが小さくなる。一方、30 MHz 以上ではカット前のシャントインピーダンスに近い値を保っている。また図 5 からわかるように、インダクタンスは各間隙幅に対して、周波数に依存せずほぼ一定の値を保っている。このカットコアのインダクタンスを、低周波においてよく用いられる磁気回路の式を用いると

$$L = (\mu_0 d) (Ro - Ri) / (2g) + k, \quad (4)$$

と表すことができる。ここで  $k$  は間隙での漏洩磁束を補正するパラメータで、間隙幅が十分狭く漏洩磁束がない場合は  $k=0$  とできる。図 4 の  $\times$  印は式 (4) で  $k = 8.75 \times 10^{-9} (2g)^{-0.45}$  とした時の計算結果であり、どのギャップ幅に対しても実験結果との良い一致が得られている。

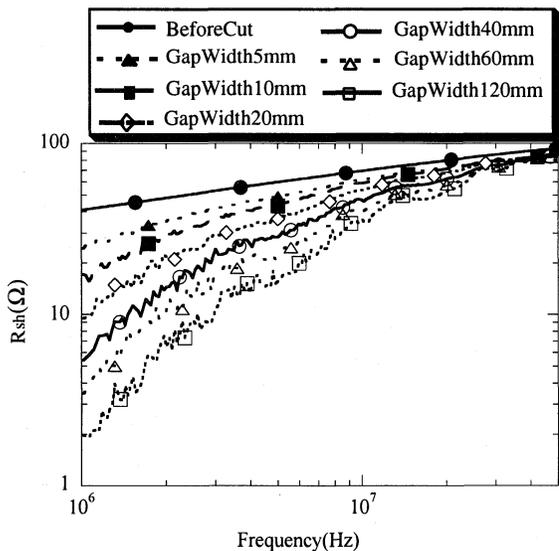


図4：FINEMET(FT-3M)のカットコアを装填した高周波空洞のシャントインピーダンス

た  $Q$  値の計算結果であり、測定結果とよく一致していることがわかる。

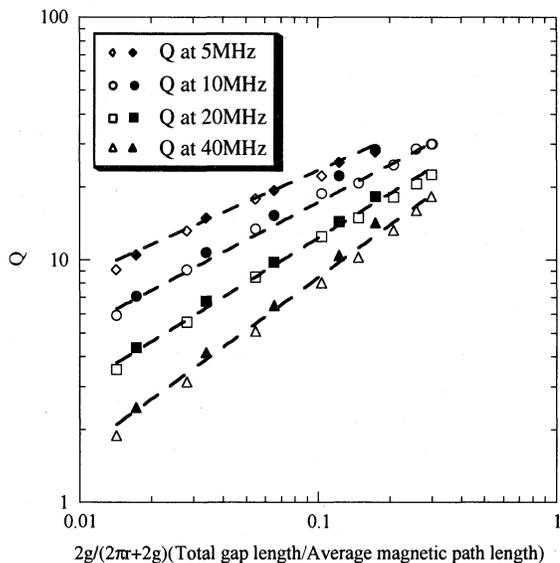


図6：周波数をパラメータとした  $Q$  値の平均磁路長に対する間隙幅依存性

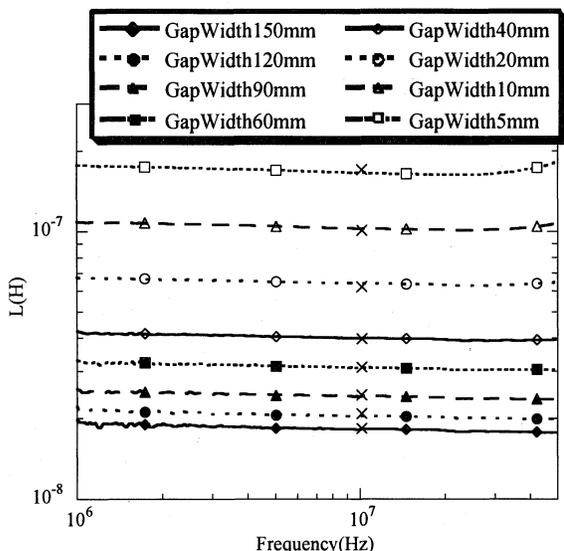


図5：FINEMET(FT-3M)のカットコアを装填した高周波空洞のインダクタンス

図6に周波数をパラメータとした  $Q (= Rsh/\omega L)$  値の結果を示す。横軸はトータルの間隙幅  $2g$  を平均の磁路長  $(2\pi r+2g)$  で割った値である。ここで  $r$  はトロイダルコアの平均半径、 $g$  は間隙幅である(図3参照)。図中での黒いマークはコアサイズが  $Ri/Rold = 140/300/10$  mm、白抜きマークは  $Ri/Rold = 140/200/25$  mm の測定結果である。図6より  $Q$  値と間隙幅及び周波数の関係式

$$Q = a \{2g/(2\pi r+2g)\}^b, a = 86.0 f^{-0.182}, b = 0.30 f^{0.236} \quad (5)$$

が得られた。ここで  $f$  は周波数で単位は MHz である。図6の破線は周波数をパラメータとして、式(5)から得られ

## 4 結論

ACR において非同調 MA 空洞を用いる可能性を調べるため、1 MHz - 50 MHz の領域で MA コアの周波数特性を測定した。その結果、一連の磁性体サンプルは高周波側でより高い  $\mu Qf$  値が得られること、FINEMET (FT-3M) が最も高い  $\mu Qf$  値を持つことが明らかになった。また、カットコアを用いた高周波空洞が、間隙を広げることにより、20 MHz 以上でシャントインピーダンスをカット前の値程度を保ちつつ、 $Q$  値を約 20 程度に上げられることを確認した。さらにカットコアのトータルの間隙幅  $2g$  に対する平均の磁路長  $(2\pi r+2g)$  の比を取ることで、異なるサイズのコアにも適用できる  $Q$  値の実験式を得た。以上の結果より ACR の周波数帯域において FINEMET を用いた非同調空洞は十分可能であると考えられる。

## 参考文献

- [1] K. Ohtomo *et al.*, Proc. of EPAC2000 (2000), p. 566.
- [2] K. Ohtomo *et al.*, Proc. of EPAC1998 (1998), p. 2126.
- [3] Y. Mori *et al.*, Proc. of EPAC1998 (1998), p. 299.
- [4] M. Boehnke *et al.*, Proc. of PAC1999 (1999), p. 851.
- [5] Y. Yoshizawa *et al.*, J. Appl. Phys. 64, 10(1988) p. 6047.
- [6] J. Dey *et al.*, Proc. of PAC2001 (2001), p. 882.
- [7] M. Yoshii *et al.*, Proc. of EPAC2000 (2000), p. 984.