

ファインメットコア片面の間接冷却構造を有する無同調キャビティ

北條悟、三須敏幸、岩田佳之、杉浦彰則、金澤光隆、宮原信幸、村上健、山田聰

放射線医学総合研究所 先進小型加速器事業推進室

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川4-9-1

概要

放射線医学総合研究所で現在検討中のFFAG加速器では、繰り返しが早いため高加速勾配を有し、かつ広い加速周波数帯域の空洞が必要となる。そのため、加速空洞として、コンパクト化のできる、Q値が低く高透磁率を有するファインメットコアを装荷した無同調キャビティを予定している。空洞のインピーダンス特性を低下させずに、コア片面からの間接冷却を行うためのテストを行ったので、その報告を行う。

1. はじめに

今回設計したFFAG加速器では、0.2MHzから2.3MHzといった広帯域で、200Hzの繰り返しで、4kVの加速電圧を必要とする^[1]。そのため、約50cmの限られたストレートセクションで、大電力を投入する必要があり、空洞の磁性体として使用限界磁束密度が高いファインメットコアを用いた加速空洞を用いる必要がある。(図1)

ファインメットコアを用いた加速空洞では、同軸上にコアが置かれており、そのコアによるインダクタンスと加速ギャップのキャパシタンスの並列等価回路により、共振周波数が決まる。また、加速空洞のシャント抵抗を増加させることで、より高い加速電圧を得ることができる。

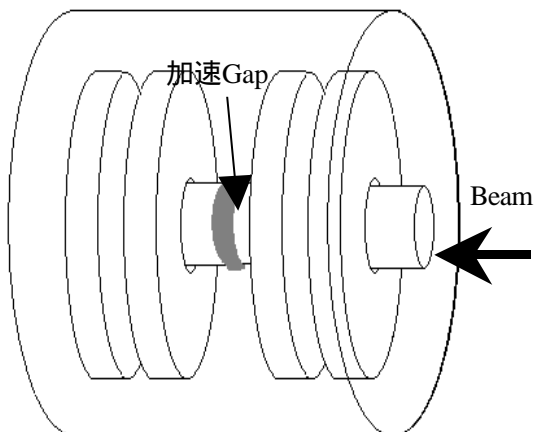


図1：ファインメットコア加速空洞
ファインメットコアを4枚用いた加速空洞
コア1枚のシャントインピーダンスを100
とすると、空洞のシャントインピーダンス
は400 となる。

ファインメットコアは日立金属製であり、近年加速器の分野で活用され始めた高透磁率磁性体で

ある。使用限界磁束密度が高く、キューリー点も500 程度と高い。しかし、必ずしも技術的・特性的に安定したコア製作が確立されている状況ではない。日立金属では、大型丸型コア(80cm)25枚では周波数に対するインピーダンス特性が測定されており、±15%程度のばらつき(個体差)があることがわかっている。コアの巻き方、巻き強度、コアの形状等によっても特性に変化があることが予想される。

2. ファインメットコアの特性

今回設計した、FFAG加速器では約1m×2mの大きさが必要となる。また、形状が丸型ではなくストレート部のあるレーストラック型となる。丸型コアの場合、インダクタンスを考慮すると

$$L_0 = \frac{\mu t}{2p} \log \frac{r_2}{r_1}$$

で表されるがレーストラック型のような形状では、コア断面積をS、磁路長をlとすると、

$$L_0 = \frac{\mu S}{l}$$

のような近似を用いる事になる。

そのため、大きさ及びコアの形状によるファインメットコアの特性の変化を測定し、検討を行った。

2.1 コア特性のサイズ依存性

コアサイズが違う場合に、特性に変化が生じる可能性がある。そこで、外形65cm(1999製作)、23cm(2002製作)大小2種類の丸型コアをそれぞれ8枚及び10枚用意し、FFAGで使用すると思われる0.3-3.0MHzで各コアのインピーダンス(R_s 、 X_s)を測定した。一方、それら測定値及びコア形状から複素透磁率(シャント抵抗 Z_0)を以下の式により算出し比較した。

$$\begin{aligned} Z &= j\omega \mathfrak{M} L_0 = j\omega L_0 (\mathfrak{m}_s - j\mathfrak{m}'_s) = j\omega \mathfrak{m}_s L_0 + \mathfrak{m}'_s \omega L_0 \\ &\equiv j\omega L_s + R_s \equiv R_s + jX_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= R_s (1 + Q^2) = \mathfrak{m}'' \omega L_0 (1 + Q^2) \\ &\propto \mathfrak{m}'' f (1 + Q^2) = \mathfrak{m}''_p f = \mathfrak{m}'_p Qf \end{aligned}$$

測定の結果、コアサイズの違う丸型コアに関しては、図2(周波数 vs シャント抵抗に比例する量 $\mu_p Qf$)のようになった。同じコアでの個体差

は最大±15%程度(図2のエラーバー)である。又、測定誤差は±5%程度である。この結果から、サイズの違いによる差は、コアのばらつきに比べて小さく、コアのインピーダンス特性はサイズにあまり依存しないことがわかる。

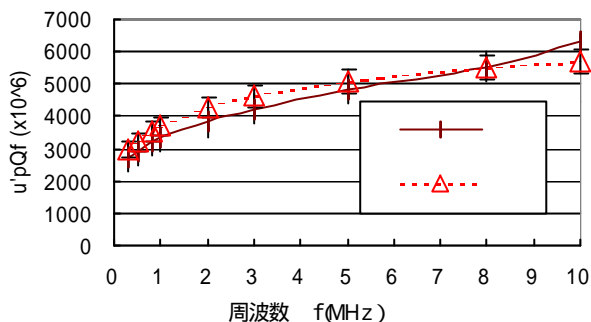


図2：コアの大きさによる特性の比較
 外径 650mm(1999製)
 外径 230mm(2002製)

2.2 コアインピーダンスの形状依存性

ファインメットコアの周波数に対する特性は、丸型以外の形状では磁歪などの影響で特性が変わることも考えられる。

そこで、レーストラック型コア(概念設計の1/3サイズ)を用意し、コアの複素インピーダンスを測定することで、測定値及びコア形状から、コアの複素透磁率(又はシャント抵抗に比例する量 $\mu_p Qf$)を算出し比較した。

その結果、レーストラック型コアのシャント抵抗はMHz領域で丸型コアに比べて20%程度高くなる(図3参照)。

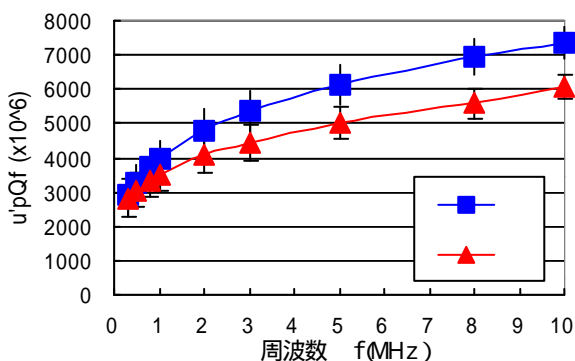


図3：コアの形状による特性の比較
 レーストラック型 丸型
 共に平均磁路長が等しい

レーストラック型のコアは、サンプル数が今回作製した二枚と少ない為、丸型コアと同等の個体差があったとして、エラーバーを表したが、それ

を考慮しても、丸型コアよりもシャント抵抗は高くなると考えられる。

従って、コアのサイズ依存性は少なく、レーストラック型のコアにした場合ではコアの特性は、高くなる傾向があることが分かった。

3. 冷却方法と特性の変化

ファインメットコアを用いた加速空洞に投入された高周波電力のほとんどが、コアでの発熱となるため、コアの冷却が必要不可欠となる。冷却方法としては、直接冷却水の中にファインメットコアを入れる直接冷却と、冷却銅板の間にファインメットコアを挟み込む、間接冷却が用いられている。しかし、直接冷却方式では、空洞の内部を水で満たした状態になるため、冷却水の誘電率により空洞自身の特性を下げる結果となってしまふ為、今回の検討では、間接冷却を用いることとした。

間接冷却を行う場合、コアの構造を考慮しなければならない。ファインメットコアは、高周波損失を下げ特性を出すために、特有のリボン状のものを巻いた構造をしており、各リボン層間をSiO₂により絶縁をとることによって、高い高周波特性を得ている。(図4参照)

そのため、銅板とコアを接触させる際に、リボン層間の絶縁を確保する必要がある。両側を挟み込んだ銅板とファインメットコアのリボンを通した形で、コア内部の磁束に対しての短絡LOOPができてしまい、コアの特性が得られない為であると考えられる。両側から銅板でコアを挟み込み絶縁層として、PPP(ポリプロピレン = 2.8)、を挟み込み、厚みを変化したときのコアのインピーダンスを測定した結果を示す。(図5実数部R_s、図6虚数部X_s)

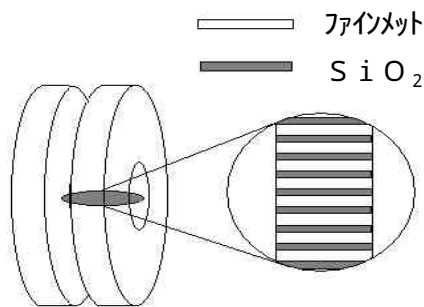


図4：ファインメットコア断面形状

ファインメットとSiO₂の積層になっており、表面は凸凹している。ファインメット自身が導体であるため、両側に導体があると短絡Loopが出来てしまう。

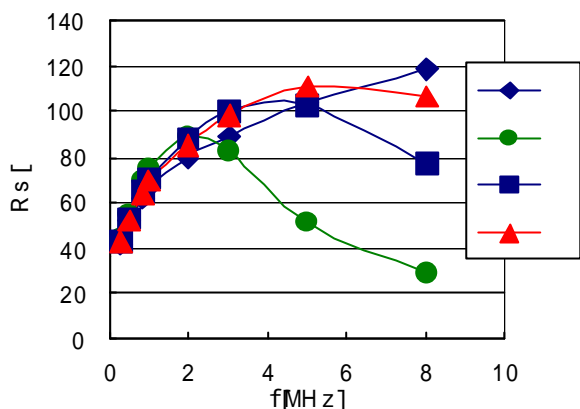


図 5 : 銅板コア間PPP厚みによる実部変移

銅板無しコア単体
 ホリフ 0.1mm
 ホリフ 0.2mm
 ホリフ 0.4mm

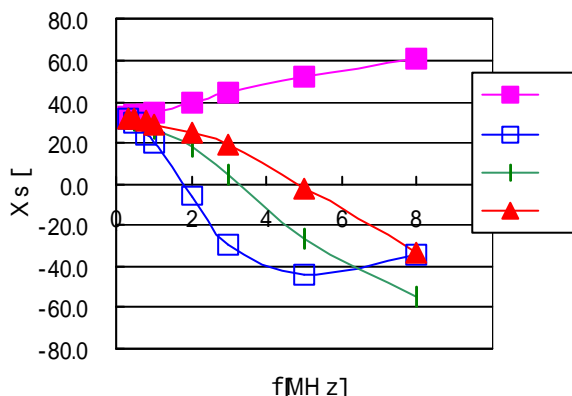


図 6 : 銅板コア間PPP厚みによる虚部変移

銅板無しコア単体
 ホリフ 0.1mm
 ホリフ 0.2mm
 ホリフ 0.4mm

この結果より、銅板とコア間の絶縁層は、誘電率 = 2.8の物質で4mmあっても、インピーダンスの虚数部に低下が生じており、さらに熱伝導率が低いと熱コンタクトが悪く、冷却効率が低下する。そのため、インピーダンス及び冷却効率を低下させずに、冷却を行う方法を考慮した。

その方法として、両側から挟み込むのではなく、片側だけを銅板と接触させ、反対側を開放した状態、つまり、銅板と直接接触して冷却を行う面と、

高周波特性を保つための開放面を片面ずつで役割を分ければ、インピーダンスが保たれるのではないかと考えた。

直接両側から銅板でコアを挟み込んだ状態でコア単体のインピーダンス測定を行ったが、短絡状態に等しかった。次に、片側のみを銅板と接触させ測定を行うと、銅板が無い状態との変化がほとんど見られなかった。(図7: 銅板の接触によるインピーダンスの変化)

したがって、片側だけであれば、ファインメットコアと銅板を直接接触させることができることが分かった。

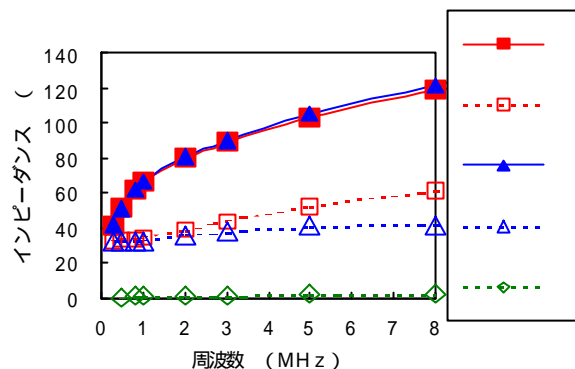


図 7 : 銅板の接触状態によるインピーダンス変化

銅板無しコア単体実数部 R
 銅板無しコア単体虚数部 X
 片側銅板コア単体実数部 R
 片側銅板コア単体虚数部 X
 両側銅板コア単体実数部 R
 両側銅板コア単体虚数部 X

4. まとめ

レーストラック型のコアの特性は、丸型と比較して、高くなる傾向があることがわかった。また、片面のみを直接銅板に接触させても、特性の変化は非常に少なく、熱コンタクトを良くすることが出来ることがわかった。このため、十分な電力密度に耐えうる、冷却方法となりえる。今後、冷却銅板の構造製作方法等の検討、ファインメットコアとの接合及び冷却テスト等を引き続き行っていく予定である。

参考文献

- [1]三須敏幸他、「がん治療用小型FFAG加速器の開発研究 I」、Proceedings of the Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003