

DEVELOPMENT OF Co-BASED AMORPHOUS CORE FOR UNTUNED BROADBAND RF CAVITY

A.Sugiura^{A)}, T.Misu^{A)}, M.Kanazawa^{A)}, S.Yamada^{A)}, K. Sato^{B)}, K. Katsuki^{B)}

^{A)}National Institute of Radiological Sciences,
4-9-1 Aanagawa, Inage, Chiba, Japan 263-8555

^{B)}Toshiba Corporation,
2-4 suehiro turumi Yokohama, Kanagawa, Japan 230-0045

Abstract

We have developed a cobalt-based amorphous core as a new magnetic-alloy (MA) core for the loaded RF cavity. Because of its permeability found to be approximately twice as high as that of FINEMET, this MA core is an excellent candidate for constructing a compact broadband RF cavity with less power consumption. In this report, we present our recent studies of the Co-based amorphous core's physical properties, performance, and development.

無同調高周波加速空洞で用いるCo基アモルファスコアの開発

1. はじめに

現在放射線医学総合研究所では、重粒子線がん治療装置(HIMAC)を用いて、重粒子線によるがん治療の臨床試験及び高度先進医療を行っている[1]。この実績を基に、重粒子線がん治療装置の普及・小型化の研究開発が進められている[2]。

普及型がん治療装置で検討されているシンクロトロンは、周長63 m、入射エネルギー 4 MeV/u、最大エネルギー 400 MeV/u、である。我々のグループは、このシンクロトロンで使用する高周波加速装置の開発を行っている。

普及・小型用の加速装置として、小型化、小電力化、メンテナンス性を考慮し、加速空洞は無同調方式、また高周波増幅器には半導体増幅器を採用することにした。

加速空洞の仕様は以下の通りである。周波数範囲はハーモニク 1 と 2 の領域を含んだ0.4~7.0 MHz、最大加速電圧(0-p)は3.2 kV、構造としては2gap形式の1/4λ同軸型である。また、1:9の伝送線路トランスを使い、高周波増幅器(50 Ω)から見た空洞のインピーダンスが450 Ωになるようにインピーダンス変換を行っている。そして、高周波増幅器としてプッシュプル2 kW/CW(ピーク電力3.5 kW)×4系統を用いている。最後に、このシンクロトロンで加速空洞が使える空間は2 m以下であるため、出来るだけ小型化をする必要がある。

コアの透磁率μは式1の様に表すことができる。

$$\mu = \mu_s' + j\mu_s'' \quad (1)$$

コアのインピーダンスZは式2で表される。

$$Z = j\omega \mu L_0 = \mu_s'' \omega L_0 + j\mu_s' \omega L_0 \equiv R + j\omega L \quad (2)$$

L₀は空気中のインダクタンスとする。

このとき加速空洞のシャントインピーダンスZ₀は式3のように表され、μ_pQfに比例する。

$$Z_0 = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{R} = R(1 + Q^2) = 2\pi L_0(\mu_p Q f) \quad (3)$$

このとき $Q = \frac{\mu_s'}{\mu_s''}$ とし、 $\mu_p = \mu_s'' \left(\frac{1}{Q} + Q \right)$ とする。

式3から、空洞のシャントインピーダンスを高くするためには、コアのμ_pQfを高くする必要がある。

コア材として一般的には、ファインメットが使われてきた。これを使ったコアはQ値が低いため、無同調で周波数を大きく変化させることが出来る。ファインメットと比較して、Co基アモルファスは我々が用いる空洞の設計値である0.4~7.0 MHz範囲内での比透磁率が高く、空洞用のμ_pQfを高くするコア材料として期待できる。

そこで、Co基アモルファスを使ってコアの開発を行った。

2. 温度耐久性

今回使用したCo基アモルファスコアは、厚さ15 μmのアモルファステープ表面に絶縁層として、SiO₂の膜をつけたものを巻いたものである。また、μ_pQfを上げるため磁場処理を施した。

テストに使ったコアの大きさは、外径300 mm、内径150 mm、厚さ30 mmである。

加速空洞では、最大電力を入れた場合に、コアの最大温度を90℃として設計している。

コアの温度耐久性を調査するために、388時間コアの温度を100℃にした後、室温に戻した。

結果として、コアを熱している間は特性が約5%

低下したが、これはコアの透磁率が熱によって一時的に低下していると思われる（図1）。また、室温にもどした時、熱する前の状態に戻っている。

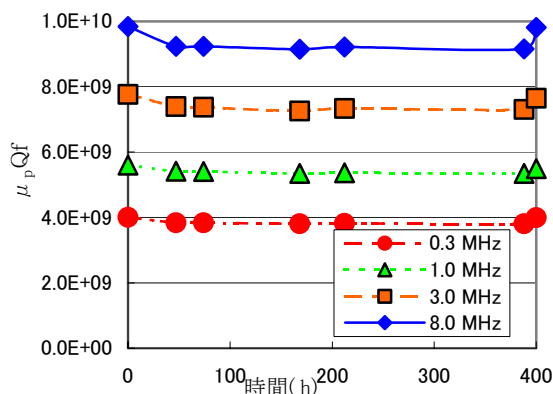


図1 コアを388時間100℃にした後、室温に戻した。その間のコアの特性変化。

3. 電力密度依存性

コアに入れることのできる最大電力密度は0.2 W/ccとして設計している。コアの電力密度依存性を調査するために、コアに入れる電力を変えて、コアの特性が変化するか調査した。試験で使ったコアの大きさは外径50 mm、内径30 mm、厚さ25 mmである。電力は1 mWから600 Wまで入れ、図2で示した電力密度で測定を行った。

結果として0.3 W/ccまでコアの特性の低下は見られなかったため、設計値の0.2 W/ccでは問題なく使えることがわかった（図2）。

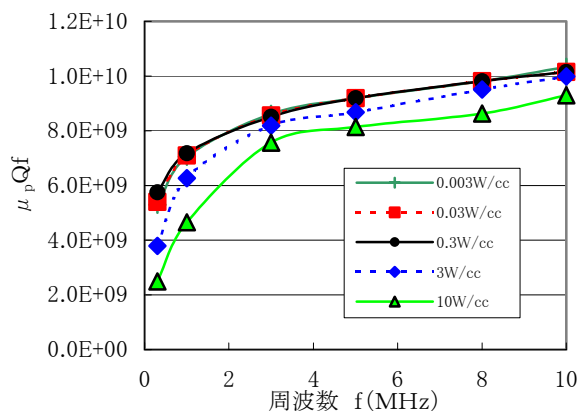


図2 コアに平均電力密度0.003、0.03、0.3、3、10 W/ccを入れたときの $\mu_p Qf$ の変化

さらに、3 W/cc以上電力密度を上げた場合に、特性の低下が見られた。これはCoアモルファスコアの飽和磁束密度が約0.5 Tのため、磁束が飽和した状態に近づいたためと思われる。

4. 実際に使用するコアの特性

今回、実際に使用する、外径550 mm、内径310 mm、厚さ30 mmのコアを12枚作成した。各コアの特性はそれぞれ図3のようになった。コアの $\mu_p Qf$ を以前測定したファインメット（外径650 mm、内径290 mm、厚さ25 mmのコア8枚を測定した時の平均の $\mu_p Qf$ ）と比較すると、Co基アモルファスコアのほうが約2倍高いことがわかる。コアごとに $\mu_p Qf$ のばらつきがあるが、コア12枚の平均は加速空洞の設計仕様を上回っている。

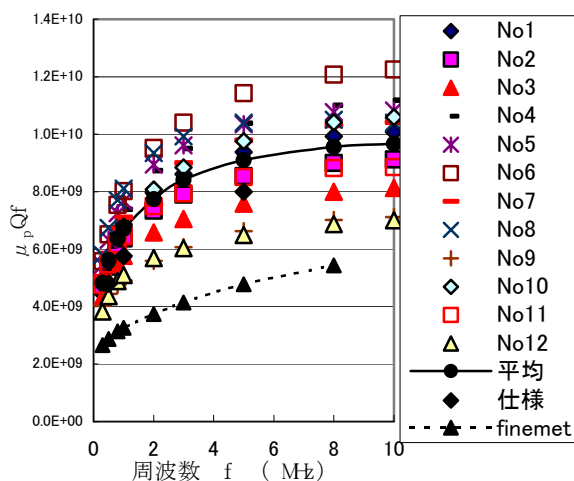


図3 Co基アモルファスコア12枚のそれぞれの $\mu_p Qf$ とその平均及び、加速空洞設計仕様の $\mu_p Qf$ を示す。参考としてファインメットの $\mu_p Qf$ も示す。

（全て占積率等で補正していない値）

5. 冷却銅版接着後のコア特性

今回、コアの冷却方法として、片面間接冷却を用いることにした。

冷却銅板は外径602 mm、内径280 mm、厚さ13 mmの銅板に、幅10 mm、深さ4 mmの冷却用の溝を3周分掘り、厚さ3 mmの銅板を銀蝋付けで蓋をした構造になっている。

この冷却銅板とコアの接着には、熱伝導性を上げる為、アルミナを添加したエポキシを用いて約1 mm厚以下で接着している。冷却銅板接着後のコアの写真を図4に示す。用いた接着方法は、真空バックに未固着のエポキシで接着した冷却銅板とコアを入れ、真空を引き、約2.3 tの力を加えた後、温度を上げてエポキシを固着させている。また、12枚

のコアに冷却銅板を接着した後の特性は図5になる。
5～20 %程の特性低下がみられる。



図4 冷却銅板を接着したコア

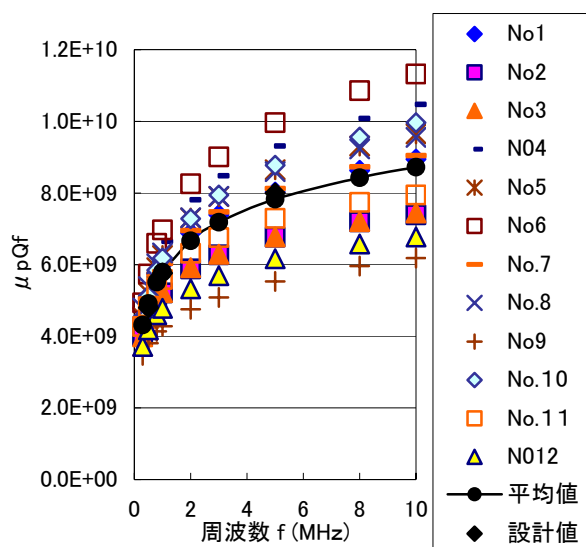


図5 冷却銅板接着後のコア特性

6. 3枚組み立て後のコア特性

加速空洞では $1/4\lambda$ 毎に3枚のコアを装荷する。3枚のコアを1グループとして空洞に固定するため、3枚組立後のコア特性を測定した。12枚のコアを計4グループに分けて測定した。

グループ毎の特性を合わせるように、No3、No11、No6(1G)、No5、No10、No2(2G)、No12、No1、No4(3G)、No8、No7、No9(4G)と配置した。各グループの特性値を図6を示す。

1 MHzでの各グループの平均は設計値を超えているが、5MHzで平均値が設計値を2 %程下回っている。

アンプの最大電力の2 kWを必要とするのは、0.9 MHzであり、5 MHzでは入力電力が1.4 kWで設計されているため、アンプの電力に余裕があり、問題ないと考えている。

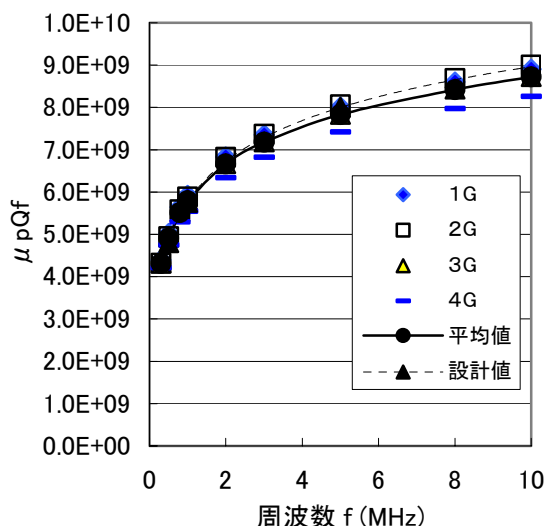


図6 コア3枚を1グループとした時のグループ毎の特性

7. まとめ

空洞の設計値である、周波数が0.4～7.0 MHz範囲でCo基アモルファスコアは $\mu_p Qf$ が高く、加速空洞の小型化及び高周波増幅器の低電力化に適している。そして、我々の空洞設計の範囲内の電力密度であれば十分コアとして用いることができる。

また、Co基アモルファスコアは1 MHz以上の高周波数領域で、性能を向上させるような開発は行われていないため、今後はさらにコアの特性を上げるテストをする予定である。

参考文献

- [1] Y.Hirao, Proc.of Int.Conf. on Cyclo. and Their Appl., East Lancing, May 2001
- [2] K.Noda et al., proc. of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, P.2631-2633
- [3] T.Misu et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 7, 094701(2004)
- [4] T.Misu et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 7, 122002(2004)