

RF system of the compact ion synchrotron for cancer therapy

M.Kanazawa^{1,A)}, A.Sugiura^{A)}, T.Misu^{A)}, S.Sato^{B)}, K.Katsuki^{B)}

A) National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

B) Toshiba Corporation, 8,Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523, Japan

Abstract

An RF system for the compact synchrotron, which will be used in the dedicated carbon therapy facility, is under development. In this RF system, compactness is important with easy operation and maintenance. To fulfil these requirements, we have developed the acceleration cavity with Co based amorphous cores. Using these new cores, we can make the acceleration cavity compact with high cavity impedance, that make possible to drive the cavity with a solid state amplifier.

がん治療用小型重イオンシンクロトロンのための 高周波加速システムの開発

1. はじめに

これまで放射線医学総合研究所（放医研）の HIMAC では、2000名以上の炭素線を使ったガン治療をおこない、放射線抵抗性のガンを含めて、良好な治療成績が得られている。この結果を受けて現在、放射線医学総合研究所では、炭素線専用の小型の治療装置を開発中である。治療装置全体の設計検討と平行して、いくつかの技術開発を進めている。この検討でシンクロトロンは最大エネルギーを400 MeV/uとして、周長約60メートルのデザインがえられている。一方、入射器は初段にRFQ、後段をIH（APF方式）の線形加速器のシステムとして、これをビームテストするべく現在制作中である。この入射器のエネルギーは4 MeV/uであり、シンクロトロンの高周波加速システムでは、これを治療に必要な400 MeV/uまで加速する必要がある。又、この加速システムは治療装置として使われることから、出来るだけ運転がしやすく、簡単なシステムにすることが求められる。そこで加速空洞としては無同調型のものを作る事にした。これにより、空洞の同調を取るためのバイアス巻き線を使う必要が無く、空洞の設計が容易になり、寄生共振の原因も同時に無くすことが出来る。又、バイアス巻き線に電流を流すための電源、及び制御システムが不要になり、システムの簡素化と低価格化が実現できる。さらに、高周波電力源としては一般的な4極真空管ではなく、半導体増幅器のみで必要な加速電圧が実現出来れば、さらにシステムの簡素化が実現する。この半導体増幅器のみを使った装置では、使用時間を管理しての真空管の定期的な交換が無くなり、運転維持が簡単に出来る利点もある。現在、半導体増幅器に関しては、周波数が広帯域で7kW程度のものが製造実績を持っている。そこで、加速空洞のシャントインピーダンスを十分高くし、できるだけ必要な高周波

電力を低く押さえる事により、十分に余裕のある加速電圧を、比較的 low 価格で実現する可能性がある。このために、高いインピーダンスを実現できるコアの使用が重要である。これまで、無同調空洞のためのコア材としてファインメットが広く利用されている。さらに高インピーダンスのコア材として、Co基アモルファスコアが可能性を持っていると考えられていた。しかし、これまで、無同調加速空洞に利用できるような、大型コア製造の実績は無く、利用される事は無かった。そこで、このコアを利用して高インピーダンスを実際の大きさ、及び冷却方法を含む使用条件で、必要とする値が得られるかテストを行った。その結果、実際の使用条件で大型コアが使用できる事を確認できた。現在、Co基アモルファスコアを使った加速空洞を制作し、半導体増幅器でドライブしてハイパワーテストの準備が整ったので、システムの現状に付いて報告する。

2. 制御システム

2.1 パターンメモリー

パターンメモリーは HIMAC でビームテストが行えるように既存のシステムと同じ同期信号を受けて動作出来る様にして、周波数と加速電圧のためのものを制作する。ただし、現行の0.2 ガウスクロックより細かい方がエミッタンスの増大を起こさない事がわかっているので[1]、0.2 ガウスクロックより細かい磁場のクロックを受け取れるように、1 MHzのクロックレートでの動作が出来るようにしてある。又、周波数データを表すビット数もこれまでの20ビットから24ビットにしてよりスムーズな周波数掃引が出来るようにしてある。パターンの長さとしては、このクロックレートでも1秒程度の加速周波

¹ E-mail: kanazawa@nirs.go.jp

数のパターンが出来るように、6 MB の長さを持っている。B クロック発生器としては、すでに報告した、改良されたものを使う[2]。パターンデータの変更は HIMAC の制御とは独立出来るように、同じ VME バスに PC ボードをおき、この Windows システムからパターン生成、変更が出来るようにした。

2.2 デジタルシンセサイザー

パターンメモリーからの 24 ビットの周波数データを受けて高周波のアナログ信号を出力する。高調波の入った高周波信号を調整して出力出来るように、ROM の波形データは PC のシリアルポートから書き込み可能にした。内部クロックには 40MHz を使い、出力部のローパスフィルターの周波数は 10MHz にしてある。最大出力は +10dBm で、振幅は外部デジタル信号により制御出来て、電圧のパターンデータを受ける。このデジタルシンセサイザーは任意の波形を出力して加速出来る。

3 . 高周波加速空洞

加速空洞に使える直線部の長さは現在のリングの検討結果では 2 m 以下であり、開発する空洞の長さは余裕を取って 1.5m におさえた。リングの周長は約 6.3 m で、入射エネルギーは 4 MeV/u、最大エネルギーは 400MeV/u で、周回周波数範囲は 0.44~3.5MHz となる。ハーモニクス (h) を 1 とした場合、必要な電圧が小さくなり、高い周波数での空洞のインピーダンスを考えなくても良くなり、空洞が作りやすくなる。ただし、現在 HIMAC で使っている周波数範囲にほぼ等しくなり、利用しやすい面がある h = 2 でも運転できるように設計した。目標とする電圧は、現在開発中の IH 型線形加速器からのビームの運動量の広がり計算値に 1.5 倍の余裕をみた $p/p = \pm 0.3\%$ のビームをキャプチャーして、磁場の立ち上げの速さ 3 T/s で加速出来る値にした。

ハーモニクスを 2 で加速する場合、必要な最大電圧は 0.9MHz のところで 3.2kV となる。さらに 3 次までの高調波を入れて加速テストが出来るように、4.5kV を最大電圧として設計を行った。この電圧を出すための高周波電力を、半導体増幅器で実績のある大きさに抑える必要がある。このために、空洞のインピーダンスを十分大きくする事が重要になる。一方、一箇所の加速ギャップで、コア枚数を多くした場合、高い周波数でのインピーダンスが小さくなってしまふ。そこで今回は加速ギャップを二つにして、1/4 波長の共振器 4 個からなる加速空洞を採用した。使用した Co 基アモルファスコアの内径は 310mm (この内側に金属のリングがあり、その内径は 290mm となっている。)、外径は 550mm で、厚さ 30mm のものを使った。このコア材を使って無同調加速空洞を作る事は初めてであり、実際に使う大きさのコアを制作する前に、特性の確認のためのテストを行った。また、制作するコアサイズに関しても、実機の半分サイズのものを制作して、その特性を確認した[3,4]。ほぼ実機大のコアで確認できた特性に基づいた、1 / 4 共振器のイ

ンピーダンスの周波数依存性を図 1 に示す。Co 基アモルファスコアを利用することにより、コア 3 枚を使って 450 に近いインピーダンスを持つように設計を行うことができています。ここで加速ギャップの容量は 70 pF になるように設計を行い、内胴体の外径は 200mm とした。コアには 15 μ m 厚のテープを SiO₂ で絶縁したのを使用した。コアの冷却は片面を冷却銅板にエポキシで接着して行っている。このコアの接着面には製造過程から起こる凹凸があり、この凹凸があっても熱伝導を良くするために、熱伝導を改良した接着材を利用した。図 2 は冷却銅板と接着して、組み立てる直前のコアで、図 3 は 3 枚を一組にして組み立てる空洞の断面図。

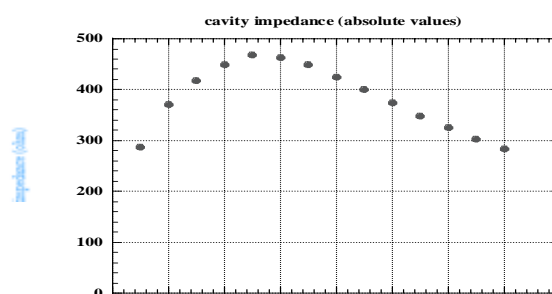


図 1 . Co 基アモルファスコアを使った、1 / 4 波長共振器のインピーダンスの絶対値を示す。



図 2 . 冷却銅板に接着された Co 基アモルファスコア。

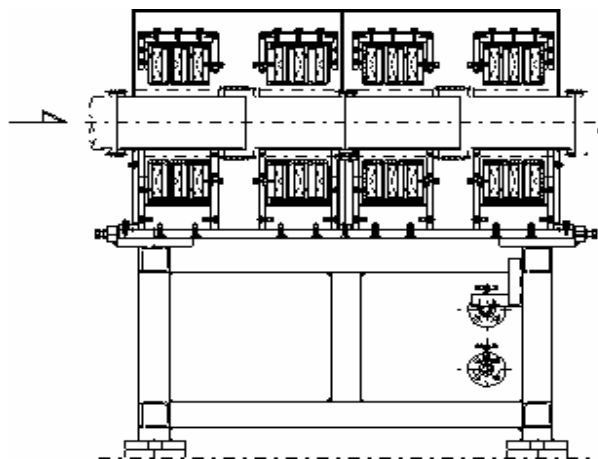


図 3 無同調高周波加速空洞の断面図。4 箇所の 1 / 4 波長共振器がそれぞれ図 1 で示した値を持つ。

4 . 高周波アンプ

アンプの動作周波数は 0.4MHz から 7 MHz をカバーしている。加速空洞の 1 / 4 波長共振器にそれぞれ対応して、高周波アンプ出力を 4 個持つ。このうちの 2 つの出力は 180 度位相を変えてある。この位相の反転した出力を図 4 に示すように加速ギャップを挟んで供給し、push-pull で運転する。アンプの出力インピーダンスは 50 Ω で、加速空洞のところで 450 Ω インピーダンス変換を行って、反射電力を小さくしている。反射電力については 500W までであれば運転でき、それ以上では出力を制限している。又、50 m ケーブルを使っているため、加速空洞とアンプは離れて設置できるようにしている。

必要な出力が最大になるのはハーモニクスが 2 の場合で、加速の初めの時である。基本波だけで加速を行う場合、必要な最大電圧は 3.2kV となり、アンプの一つの出力当たり 1kW で得られる。今回製作したアンプは、3 次までの高調波を利用できるように、一つのチャンネル当たり 2kW までの出力が出来るようにした。図 5 に製作したアンプを示すが、水冷を利用して筐体一つとコンパクトに出来ている。ゲインは 58dB 以上あり、これだけでシンセサイザーの出力 (最大 +10dBm) を、加速に必要な最大電力まで増幅している。

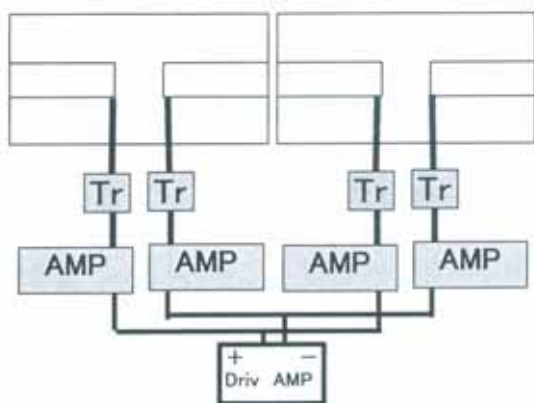


図 4 空洞へのアンプの結線



図 5 高周波アンプで、前面に 2 kW 出力を 4 チャンネル持っている。

5 . まとめ

Co基アモルファスで実際の加速空洞に使う大きさのコアを制作して、その高い透磁率を確認することができた。加速空洞はこのコアを使って、450 の 1 / 4 波長の空洞 4 個からなる高いインピーダンスを持ったかつコンパクトなものを作った。これは必要な加速電圧を半導体アンプのみで発生させる事ができ、治療装置の加速器に必要な運転及び維持が簡単な加速システムを実現できる。今後、ローレベル試験、ハイパワー試験を行って行く予定である。

6 . 謝辞

この加速装置の制作に当たっては、実際に使う大きさ及び使用条件でのCo基アモルファスコアの開発が重要であり、この開発に協力してくれた東芝マテリアルの日下さんに感謝する。

参考文献

- [1] M.Kanazawa, et al., "HIMAC RF system with a digital synthesizer", NIM A 443(2000)205-214
- [2] C.Ohmori, et al., "Beam Diagnostics using A Chopped Beam", to be published NIM A
- [3] T.Misu, et al., "Development of Co-based amorphous core for untuned broadband RF cavity", Proceedings of the 2005 PAC
- [4] A.Sugiura, et al., in this Proceedings.