

ガン治療用入射重イオン IH 型線形加速器の研究 ()

山本和男^{1,A)}、服部俊幸^{A)}、林崎規託^{A)}、柏木啓次^{A)}、高橋康之^{A)}、畑 寿起^{A)}、青木 学^{A)}、山田 聡^{B)}

^{A)} 東京工業大学原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{B)}放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

ガン治療用シンクロトロン入射器として、電力効率のよいIH型加速空洞に収束要素を必要としないAPF構造を取り入れることにより、低エネルギーからの入射を可能としたAPF-IH型線形加速器の開発研究を行っている。今回、APF-IH型線形加速器の重イオン加速の実証器として、実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子あたり40keVから2MeVまで加速するテスト機の1/2コールドモデルによる試験結果について報告する。

1. はじめに

重イオンガン治療用シンクロトロン入射器は放射線医学総合研究所や兵庫県立粒子線医療センターの例のようにRFQ型線形加速器とアルパレ型線形加速器の2台の長大な線形加速器システムとなっている。研究用としては適当であるとしても、医療用の実用機として普及するには小型、省電力が重要な要素で、1台で小型の入射器が理想的である。

そこで、小型化に必要な高い加速電力効率を実現する入射器としてIH型加速空洞を採用し、入射器を1台にするために、低エネルギーのビーム収束にはAPF(Alternating Phase Focus)構造を考え、現在東工大で開発研究を行っている。

その第1段階として、APF-IH型線形加速器の低エネルギー入射原理実証機の研究を行い、2002年1月に実証し終えた。第2段階として重イオン加速の原理実証器として、実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子あたり2MeVまで加速するテスト機を検討し、現在開発を行っている。そして、第3段階として核子あたり炭素イオンを6MeVに加速する実用機の開発を予定しているが、ここでは、2MeVテスト機の1/2コールドモデルを用いた電場電圧分布測定結果について報告する。

2. 2MEV/U テスト機の初期設計

テスト機の設計概念として、ECR型重イオン源からの数100 μ AのC⁴⁺イオンを核子あたり40keVに加速して本加速器に入射するものとし、出射エネルギーは核子あたり2MeVとして実用入射器の3分の1のテスト機を想定した。そこで、APF-IH型線形

加速器中の粒子の計算機シミュレーションを行った。その方法として、

粒子収束はAPFの各種の位相シーケンスによる計算を行う

加速電圧はセル長に従って電圧が増加する電圧傾斜型の電圧分布を採用した

ガン治療用入射器の安定性を重視して、加速電界をキルパトリック限界の1.5倍に抑えた設計とした

APF収束の位相は電圧分布の安定性を考慮して位相は \pm とする0度を中心とする同位相を採用した

その結果求めたテスト機の主要パラメータを表1に示す。それを基に1/2コールドモデルを製作し、所望の電場電圧分布を達成すべく測定を行った。製作した1/2コールドモデルを図1に示す。

表1 2MeV/u テスト機の主要パラメータ

Acceleration Particle	q/A > 1/4
Input Energy	40 keV/u
Output Energy	2.0 MeV/u
Operation Frequency	100 MHz
Synchronous Phase	-30, -30, +30, +30
Number of Cell	22
Cavity Length	1380 mm
Diameter of Cavity	560 mm
Focusing Sequence	-30, -30, +30, +30
Transverse Acceptance	97.6 mmmrad
Longitudinal Acceptance	35°
Transmission	65% by Buncher
Acceleration Voltage/Gap	90-540 kV



図1 1/2 コールドモデル

¹ E-mail: 02d19092@nr.titech.ac.jp

3. 低電力試験測定システム

測定システムは信号発生器 SG とベクトル電圧計 VVM、そしてオシロスコープから構成される。測定システムを図 2 に示す。SG の RF 信号をモデル空胴にカプラーを通じて入力し、モデル空胴のピックアップ出力信号との位相差を VVM で測定することによりギャップ間の電場分布を求める。位相差波形はオシロスコープに保存する。摂動体は直径 1mm のアルミニウム球に糸をつけ、インダクションモーターを回転させてモデル空胴内に挿入する。

この電場分布から算出される電圧分布が設計段階におけるそれに近づくように調節する。一般に IH 型加速空胴でギャップ間の電場分布を調節する場合、加速空胴内の共振磁場をステム支持部に加速軸方向に貼り付けられた金属板（リッジ）の長さ、端を切り欠くことにより行う。この磁場の流れの調整機構をインデューサーと呼び、その概念図を図 3 に示す。

また、共振周波数と Q 値の測定は、SG を周波数ごとに変え VVM により測定する。図 4 に共振周波数波形の例を示す。

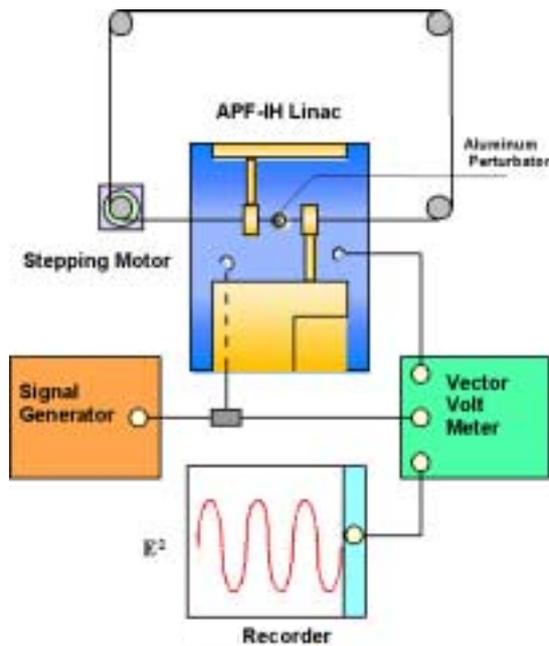


図 2 測定システム図

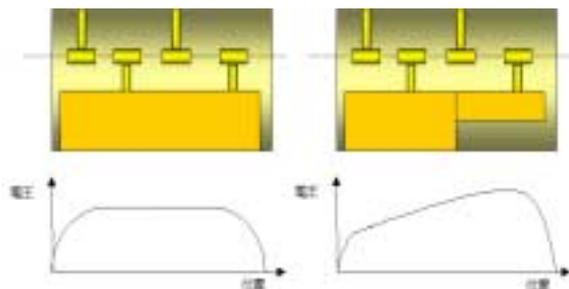


図 3 インデューサーの働き

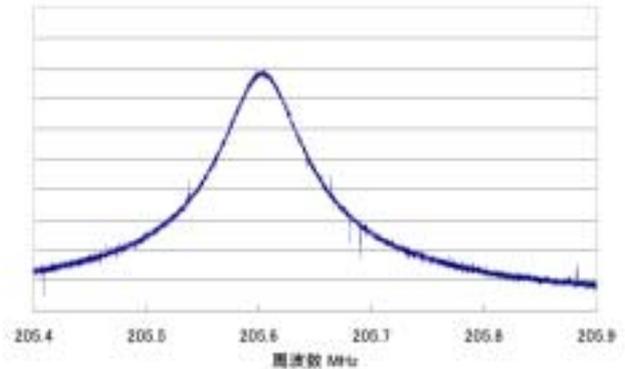


図 4 共振周波数波形の例

4. 測定結果

測定の結果採択されたリッジ状態と電場分布を図 5 に、それを基に算出された電圧分布を図 6 に示す。リッジ長は 460mm、切りかけ部分は下流側に 120mm、端板とリッジとの距離は上流側 10mm、下流側 50mm であり、共振周波数は 205.595MHz、無負荷 Q 値は 5800 であり、この共振周波数波形は図 4 である。電場分布が入射側付近と出射側付近で相対的に高くなるため、中梁と端板との距離を狭めて磁場が流れ込まないようにし、電場強度を下げた。その結果、空洞長が 690mm から 640mm に減少したため共振周波数が増加した。

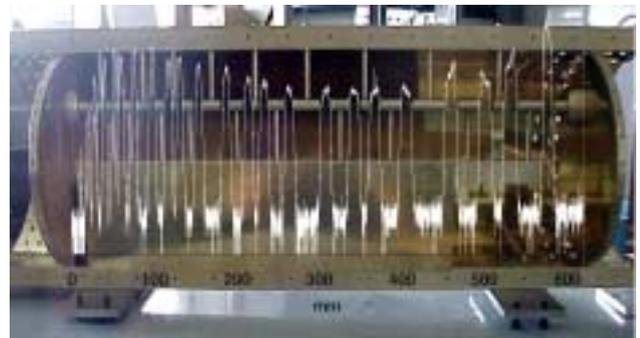


図 5 リッジ状態と電場分布

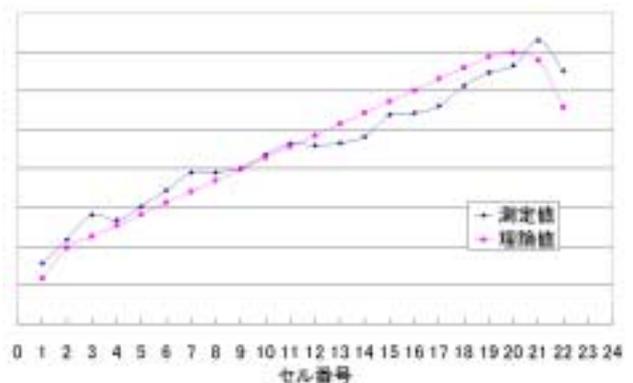


図 6 測定結果の電圧分布と理論値との比較
(横軸はセル番号、縦軸は相対電圧値)

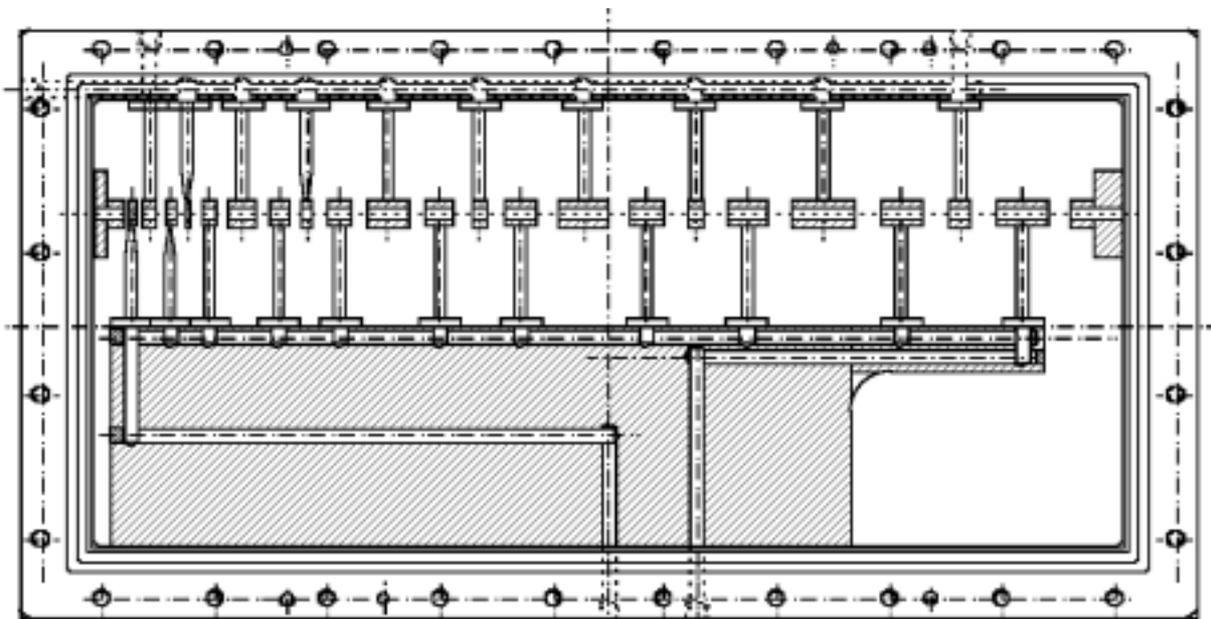


図7 中間板の設計図

5 . 電場測定後のテスト機設計

モデル電場測定より求めた図6の電場分布、共振周波数を用いて再び計算機シミュレーションを行った。共振周波数の増加に伴い入射エネルギーは増加したが、位相シーケンス「-30、-30、+30、+30」で出射エネルギー、全体のセル長、ビームアクセプタンスがほぼ予定どおりの結果を得ることが出来た。そこで、このデータを用いてテスト機を製作することにした。テスト機のパラメータを表2に示す。

加速空洞は組み立ての容易さ、実験環境、メンテナンスの容易さから上下タンクと中間リッジ板から構成される3枚下ろし構造とした。図7に中間板の図面を示す。加速空洞上下タンクはチャンネルを溶接してチャンネル内を空冷し、中間板はドリル穴工作により直接冷却する。ドリフトチューブは中間板中の冷却水からSTEMの熱伝導で冷却される。

表2 2MeV/u テスト機の主要パラメーター

Acceleration Particle	$q/A > 1/4$
Input Energy	42 keV/u
Output Energy	2.0 MeV/u
Operation Frequency	102.7 MHz
Synchronous Phase	-30, -30, +30, +30
Number of Cell	22
Cavity Length	1280 mm
Diameter of Cavity	560 mm
Focusing Sequence	-30, -30, +30, +30
Transverse Acceptance	99.5 mmmrad
Longitudinal Acceptance	30 °
Transmission	65% by Buncher
Acceleration Voltage/Gap	120-560 kV

6 . まとめ

重イオン加速の原理実証機として実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子あたり2MeVまで加速する実用機の3分の1テスト機を検討した。初期設計により製作された1/2コールドモデルにより電場分布測定を行い、インデューサーにより所望の電場分布を達成すべく調整を行い、その結果採用されたデータを基に再度数値シミュレーションを行いテスト機の設計を行った。その結果、入射エネルギー42keV/u、出射エネルギー2.0MeV/u、共振周波数102.7MHz、加速空洞長1280mm、加速空洞径560mmのテスト機の設計を行った。

今後はこの製作する加速器を用いてC⁴⁺イオンの加速実験を行い重イオン加速の原理を実証する。

参考文献

- [1] S.Yamada, et .al. ; Proceeding 1990 International Conference on Linear Accelerator, Albuquerque, NM, USA, LA-12004-C1990, pp593-595
- [2] T.Hattori. et.al ; Proceeding 23rd Linear Accelerator Meeting, 23 (1998) 352-354
- [3] S.Matsui, et.al ; Proceeding 24th Linear Accelerator Meeting, 23 (1999) 149-151
- [4] T.Hattori, et. al. ; Proceeding 25th Linear Accelerator Meeting, 25 (2000) 294-296
- [5] S.Matsui, et. al. ; Nucl. Inst.and Meth., B161-163(2000)1178-1181
- [6] K.Isokawa, et. al. ; Nucl. Inst. and Meth., A145(1998)287-290
- [7] T.Hata, et. al. ; Proceeding 26th Linear Accelerator Meeting, 26 (2001) 186-188
- [8] K.Yamamoto et. al. ; Proceeding 26th Linear Accelerator Meeting, 26 (2001) 189-191
- [9] A.ITANO ; Proceedings of 4th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 4(2001)1-4