

# ガン治療用入射重イオン IH 型線形加速器の研究 (VI)

服部俊幸<sup>1,A)</sup>、山本和男<sup>A)</sup>、畑寿起<sup>A)</sup>、林崎規託<sup>A)</sup>、高橋康之<sup>A)</sup>、柏木啓次<sup>A)</sup>、岡田真一<sup>A)</sup>、  
杉田丈也<sup>A)</sup>、青木学<sup>A)</sup>、岡村昌之<sup>B)</sup>、山田聡<sup>C)</sup>、E.Osvath<sup>D)</sup>、D.Dudu<sup>D)</sup>、I.Vata<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>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

<sup>B)</sup>理化学研究所

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

<sup>C)</sup>放射線医学総合研究所

千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

<sup>D)</sup> National Institute for Physics and Nuclear Engineering IFIN-HH

Str. Atomistilor 407, Com. Magurele, jud. Ilfov, P.O.B. MG-6, 76900 Romania

## 概要

ガン治療用シンクロトロン入射器として、電力効率の良い IH 型加速空洞を利用した重イオン線形加速器の開発研究を行っている。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 構造を考え、APF-IH 型線形加速器の低エネルギーからの原理実証機と APF-IH 型線形加速器の重イオン加速の実証機の研究を行っている。

そして実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子当たり 2 MeV まで加速するテスト機を検討しその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<sup>[1]</sup>や兵庫県の施設の例のように RFQ 型線形加速器とアルバレ型線形加速器の 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)構造を考え幾つかの開発研究を行っている。

その 1 つとして、APF-IH 型線形加速器の低エネルギーからの原理実証機<sup>[2-5]</sup>と APF-IH 型線形加速器の重イオン加速の実証機の研究<sup>[6-7]</sup>を行っている。

その第 2 段階として、実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子当たり 2 MeV まで加速するテスト機を検討し開発を行っている。ここでは 2 MeV テスト機について報告する。第 3 段階として、核子当たり炭素イオンを 5 ないし、6 MeV に加速する実用機の開発を予定している。

## 2. 小型入射器へのアプローチ

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の施設の例のように RFQ 型線形加速器とアルバレ型線形加速器の 2 台の長大な線形加速器システムとなっている。

そこで、低、中エネルギー領域でアルバレ型や RFQ 型の 5 から 20 倍の電力効率もつ IH 型共振空洞を採用する。従来型と同じ程度の RF パワーを投入することで高電圧を発生することができ、高加速率、小型の入射器を実現できる。

またアルバレ型や IH 型では transverse 方向の収束を行うために収束用の Q 電磁石を挿入しているが、ガン治療用の入射器として必要とされているビーム強度が炭素で数 100  $\mu$ A であることからビーム収束には APF 構造の採用を検討した。

数値計算シミュレーションの結果、C4+イオンを 65keV/u から 6MeV/u までの収束に APF を用いても十分に加速できる予想がついたことと、複雑な Q 電磁石が無いほうが実用機としてより電力効率も上げることが出来ることを考慮して、APF 収束を採用することにした。実際の加速空洞は 3.1m と予想され、既存の重イオンガン治療装置の入射線形加速器と比較して大幅に短縮できる可能性がある。

そこで、今回は最終的実用型入射器へのアプローチの第 1 段階としての実証機の研究にめどが立ったことより、その第 2 段階として、実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子当たり 2 MeV まで加速するテスト機を検討し、モデル製作、実機の一部製作を開始している。

<sup>1</sup> E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp

### 3. 2 MeV/u テスト機的设计

#### 3.1 テスト機の全体設計と概念

ECR 型重イオン源からの数  $100\mu$  の  $C^{4+}$ イオンを核子当たり 40 keV に加速して、線形加速器に入射することにした。出射エネルギーは核子当たり 2 MeV として、実用入射器の 3 分の 1 のテスト機を想定した。イオン源を 100 kV の高圧ターミナルとして、50 kW の絶縁トランスを考え、10 GHz の ECR 型イオン源を想定した。

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、

- ①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。
- ②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。
- ③ガン治療用入射器の安定性を重視して、加速電界をキルバトリック限界の 1.5 倍に押さえた設計とした。
- ④APF 収束の位相は電圧分布の安定性を考慮して位相は  $\pm\psi$  とする 0 度を中心とする同位相を採用することにした。しかし最初の加速ギャップではビームのパンチング効果を狙って  $-90$  度を挿入した計算を行って見た。

炭素 2MeV/u 加速用テスト加速器の主要パラメータを表-1 に示す。

Table-1  
Main parameters of C-2MeV/u APF-IH Linac

Acceleration Particle	p,He,C
Input Energy	40 keV/u
Output Energy	2.0 MeV/u
Operation Frequency	100 MHz
Synchronous Phase	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Number of Cell	22
Cavity Length	1.5 m
Cavity Length	60 cm
Focusing Sequence	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Transverse Acceptance	$100 \pi \text{ mm mrad}$
Longitudinal Acceptance	$35^\circ$
Transmission	$\geq 65\%$ by Buncher
Acceleration Voltage/Gap	90-540 kV
Acceleration Rate	3.9 MV/m

#### 3.2 粒子のシミュレーション結果

粒子の計算機シミュレーションの結果、位相シーケンスを +、- と +、+、-、- の場合で、 $\psi=30^\circ$  の横方向アクセプタンスと入射エネルギーの関係を図-1 に示す。さらに  $-90^\circ$  のバンチャーセルを作った場合の結果も同図に示す。その結果図-1 に示すイオン源からのエミッタンスを十分にアクセプトする位相シーケンスは  $-30^\circ, -30^\circ, +30^\circ, +30^\circ$  の場合だ

けで有った。また位相シーケンスを -、-、+、+ とした場合の  $\psi$  を  $20^\circ$  から  $40^\circ$  まで変えた条件での計算結果を図-2 に示す。この結果及びその他のシミュレーション結果より、2MeV/u テスト加速器の APF の位相シーケンスを  $-30^\circ, -30^\circ, +30^\circ, +30^\circ$  と決定し、現実的ドリフトチューブの長さ等を考慮して入射エネルギーを 40 keV/u と決定した。

特に図-2 に示す位相シーケンスは加速電圧を変化することが実現でき、実際の加速試験の折にテストすることが出来る。そのため計算機シミュレーションプログラム結果との比較が出来ることになる。

以上シミュレーション結果を含んだ C-2MeV/u APF-IH 型線形加速器の主要パラメータを表-1 に示す。

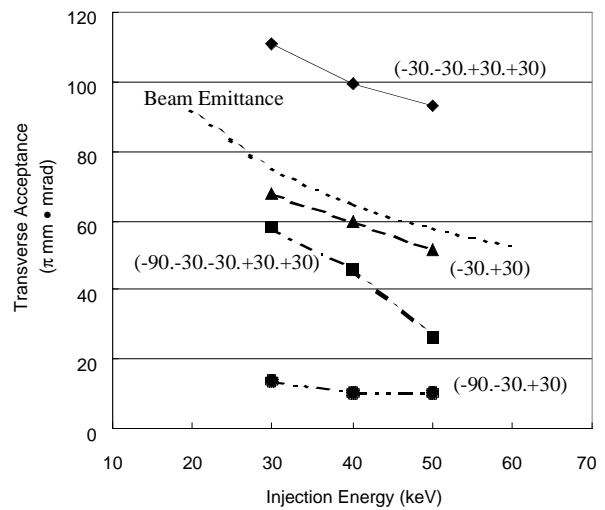


図-1：位相シーケンスによる横方向アクセプタンスと入射粒子エネルギーの関係 (1)

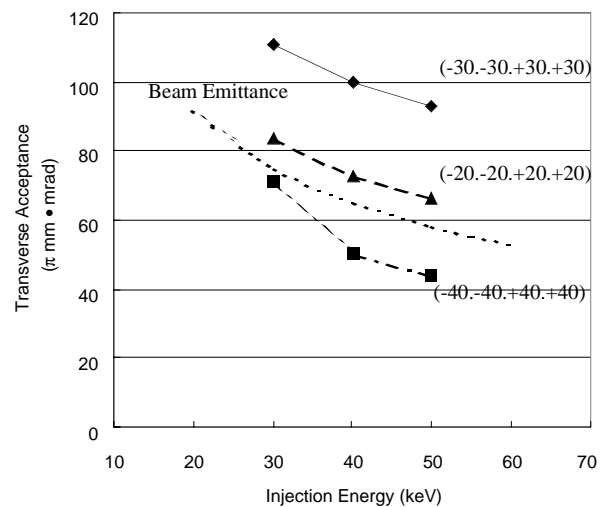


図-2：位相シーケンスによる横方向アクセプタンスと入射粒子エネルギーの関係 (2)

実機に採用した位相シーケンスによる粒子のシミュレーションの位相振動データを図-3 に示す。

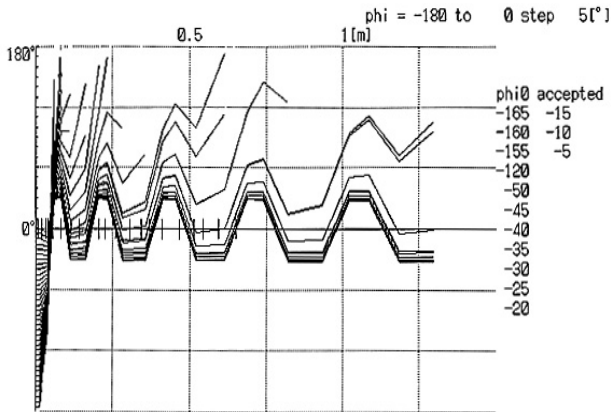


図-3：採用した位相シーケンスによる粒子の位相振動の図

#### 4. まとめと将来計画

ガン治療用シンクロトロンの入射線形加速器として、小型、省電力型で1台の加速器で可能な APF-IH 型線形加速器を検討した。数値計算シミュレーションの結果、C4+イオンを 65keV/u から 6MeV/u までの収束に APF を用いて十分加速できることが分かった。そこで APF-IH 型線形加速器の低エネルギーからの原理実証機と APF-IH 型線形加速器の重イオン加速の実証機の研究を行っている。

そして実際のガン治療に必要な炭素イオンを核子当たり 2 MeV まで加速す実用機の3分の1のテスト機を検討した。シミュレーションの結果、APF の位相シーケンスを-30°、-30°、+30°、+30°と決定し、現実的ドリフトチューブの長さ等を考慮して入射エネルギーを 40 keV/u と決定した。

この結果 100 kV ターミナルの上にC4+イオンを生成する重イオン ECR 型イオン源を設置して 24 MeV まで加速するテスト APF-IH 型線形加速器を建設することを予定している。

#### 参考文献

- [1] S.Yamada, T.Hattori, et. al.; Proc. 1990 International Conf. on Linear Accelerator, Albuquerque, NM, USA, LA-12004-C1990, pp.593-595
- [2] T.Hattori, K.Isokawa, S.Matsui, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, N.Sakamoto, S.Yamada, S.Yamaki, E.Osvath, D.Dudu and H.Schubert ; Proc. 23<sup>rd</sup> Linear Accelerator Meeting, 23(1998)352-354
- [3] S.Matsui, T.Hattori, N.Hayashizaki, T.Yoshida, H.Tomizawa and S.Yamada ; Proc. 24<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting, 23(1999)149-151
- [4] T.Hattori, S.Matsui, N.Hayashizaki, T.Yoshida, Y.Takahashi, K.Kashiwagi, S.Okada, K.Yamamoto et. al. ; Proc. 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting, 25(2000)294-296
- [5] S.Matsui, T.Hattori, N.Hayashizaki, K.Isokawa and T.Ito Nucl. Inst. And Meth., B161-163(2000)1178-1181
- [6] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada; Proc. 21<sup>st</sup> Linear Accelerator Meeting, 21(1996)281-283
- [7] K.Isokawa, T.Hattori, T.Ito, N.Hayashizaki, S.Majima and S.Yamada ; Nucl. Inst. And Meth., A145(1998)287-290