

## 2MeV/u がん治療用入射テスト器

山本和男<sup>A)</sup>、服部俊幸<sup>A)</sup>、岡村昌宏<sup>B)</sup>、片山武司<sup>B)</sup>、山田 聡<sup>C)</sup>

林崎規託<sup>A)</sup>、柏木啓次<sup>A)</sup>、高橋康之<sup>A)</sup>、畑 寿起<sup>A)</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 〒263-8555千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

### 概要

がん治療用入射器にAPF-IH型LINACの研究を行っている。今回、C4+イオンを40keV/uから2MeV/uまで加速する入射テスト器を製作した。その加速空胴にたいして行ったローパワーテストについて報告する。また、OPERA-3Dを用いた電磁場解析の結果を踏まえた単粒子軌道計算プログラムについての現状を報告する。

### 1.はじめに

加速器によるがん治療装置は、放射線医学総合研究所(HIMAC)を始め、現在では6つの施設が稼働、もしくは建設中である。より幅広く普及するためには加速器の小型化が必須の条件であることはいうまでもない。とくに、加速器全体のデザインを見ても、入射器におけるそれは建設費、運用費、建設スペースともに重要な要素のひとつである。そこで、われわれは現在使用されているRFQ+Alvarezに変わるものとして、APF-IH型LINACの研究を行っている。

IH型加速器はAlvarez型と同じドリフトチューブ型高周波LINACであるが、場の発生方法により $\pi$ モード加速が可能である。そのため、Alvarez型と比べ、高い周波数で運転ができ、加速効率が高い。しかし、空胴内の粒子の収束は、ドリフトチューブ内外に収束用レンズを挿入して行うため、十分なスペースを確保するために運転周波数をさげる必要が、また前段加速が必要となりIH型の利点が生かせなかった。そこで、粒子の収束方法に'Alternating Phase Focus'構造を取り入れた。APF構造とは、粒子の位置により受けるRF-defocusing力を利用した収束方法である。同期位相が負の場合、位相安定性の原理から縦方向は収束するが、横方向にはRF-defocusing力により発散する。同期位相が正の場合、その効果は逆である。同期位相を正負交互にして粒子を収束する方法がAPF構造である。

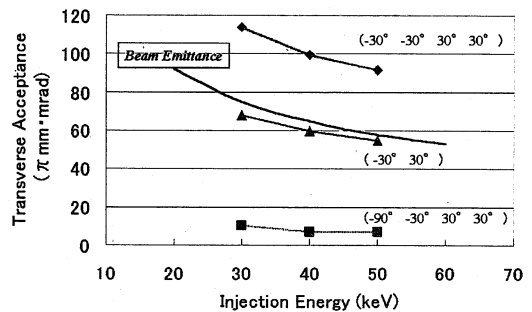
がん治療用入射テスト器として、C4+イオンを40keV/uから2MeV/uまで加速する全長約1.3m、空胴径約0.6mのAPF-IH型LINACを製作した。構造は作業性などを考え、"三枚おろし"構造、上下タンクに挟まれた中間板にリッジとステム、そしてドリフトチューブを搭載した。この出来上がった加速空胴を用いたローパワーテストを行ったので報告する。一方、IH型加速空胴のより深い理解へのアプローチとして、OPERA-3Dを用いた電磁場解析を行っている。従来、IH型加速空胴内のドリフトチューブやステムの多さ、また、リッジによる非対称性から空胴

共振周波数、ドリフトチューブ間に発生する電圧分布は、モデルを製作して摂動法で測定するしか知りようがなかったが、コンピューターの進歩により解析が不可能ではなくなった。電磁場解析を行った結果、いままでは近似で行ってきた粒子起動計算が3次元で行えるようになり、いまそのプログラムを製作中である。

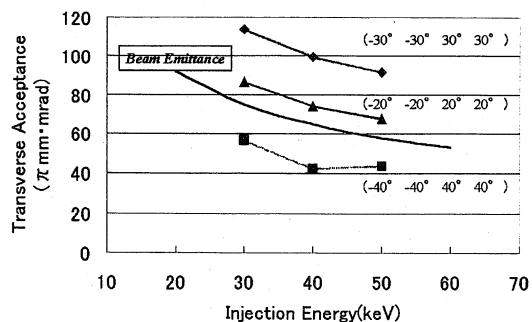
### 2.がん治療用入射テスト器

#### 2.1 主要パラメーター

APF-IH型LINACによるがん治療用入射テスト器として、出射エネルギーはHIMAC入射器の1/3スケールの2MeV/uとし、加速粒子はがん治療に使われるC4+イオンを想定して、対電荷質量比 $\geq 1/3$ とした。定電場分布を採用し、キルパトリック放電限界の2倍にした。APFを有効に作用させるような同期位相の繰り返しパターンを数値計算により求めた。その結果を図1に示す。空胴共振周波数と電圧分布は1/2モデルを作成し決定した(図2参照)。主なパラメーターを表1に示す。



(a)位相変化1



(b)位相変化2

図1 同期位相変化の比較

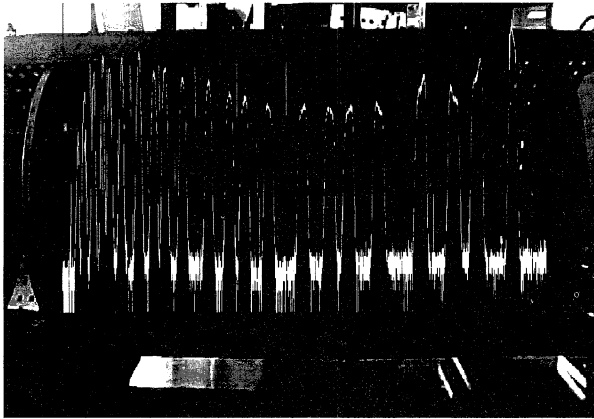


図2 モデルによる電場分布測定

表1 2MeV/u APF-IH型LINACのパラメーター

Acceleration Particle	$q/A \geq 1/3$
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	$99.5\pi$ mmmrad
Longitudinal Acceptance	$30^\circ$
Acceleration Voltage/Gap	120-560 kV

## 2.2 製作とアライメント

入射テスト器は、作業性を考え‘三枚おろし’構造とし、上下タンクと中間板とを個別に製作、加工、銅メッキを行った(図3参照)。ドリフトチューブのアライメントは、ステムの同軸度を $40\mu\text{m}$ 以下の精度とし、ドリフトチューブ間の長さに対応するスペーサーをかませながら、ドリフトチューブ内径14mmに対し、13.92mmのロッドを通して行った。その結果、ドリフトチューブ間の長さの誤差は $\pm 1.0\%$ 以内に収まった。上下タンクにより中間板をはさみ、Heガスリークテストを行い、 $1.1 \times 10^{-11}$  pa m<sup>3</sup>/sec以下であることを確認した。

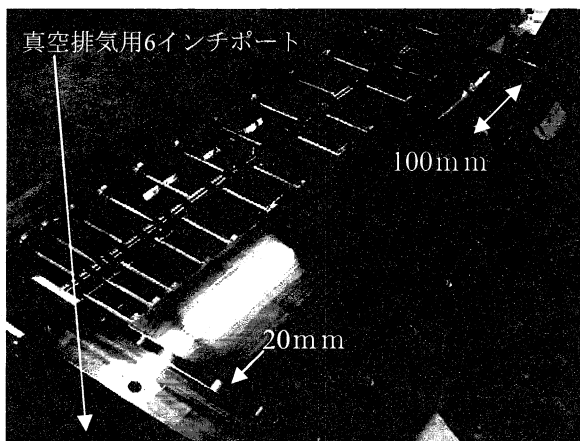


図3 下部タンク上の中間板の様子

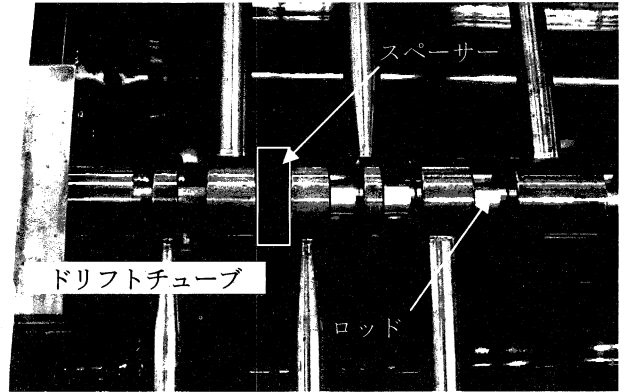


図4 ドリフトチューブアライメントの様子

## 2.3 ローパワーテスト

ネットワークアナライザーからのホワイトノイズを加速器に投入し、その反射を測定し空胴共振周波数、Q値を測定した。空胴共振周波数は97.60MHz、Q値は19000であった。また、ドリフトチューブ間に発生する電圧は、LabVIEWによりコントロールされたステッピングモーターによりアルミニウム球を摂動し、空胴共振周波数の変化から求めた。その結果を図6に示す。空胴共振周波数のモデルからの5%以上のずれ、電圧分布の約 $\pm 20\%$ のずれは予想外のものである。考えられるのは、リッジと端板との距離が20mmしかない入射側に、真空排気用の6インチポートが開いてあることで、端板肉厚分(20mm)磁場fluxが流れ込んだためにこのような誤差が発生したと考察される。そこで、出射側ではリッジと端板との距離が100mmと十分開いているので、中間板を取り外して、逆さにしてから再度上下タンクではさむ予定である。

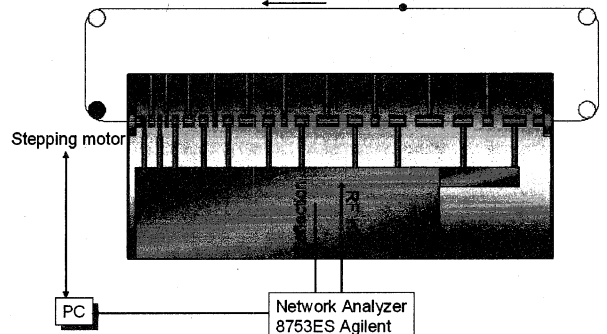


図5 摂動法模式図

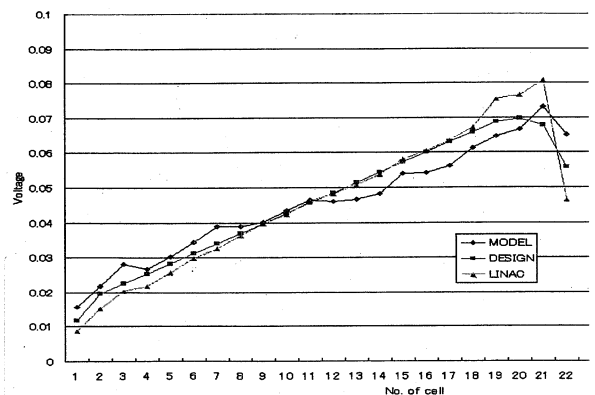


図6 電圧分布の比較

### 3. 粒子軌道計算プログラムの開発

#### 3.1 OPERA-3D

電磁場解析用ソフトOPERA-3Dを用いて、本加速器の電磁場解析を行った。メッシュ間隔はドリフトチューブ間で2mmステップ、ドリフトチューブ内は4mmステップ、ドリフトチューブ内径(φ14)は10分割、空洞の対照性のある軸で2等分して行い、メモリー10GBytes、計算時間は4時間を費やした。円柱であるステムを四角柱で置き換えたために、電圧分布、共振周波数は予想できる範囲でずれてしまったが、その計算精度は、加速軸方向の電場分布をフーリエ展開したところ、0次の項に対し、1次は0.22% (これはステムにより発生したdipole成分であると考えられる)、2次以降 (multi-pole成分) は0.073%以下であり、精度よく計算されていることがわかる。

電磁場解析を行ったことにより、モデルによる電場分布測定以上の精度を持って空洞内の電場分布が把握できた。これはつまり、低エネルギー側におけるドリフトチューブ内へのしみこみ量や、出射側付近におけるステムによるdipole成分の影響 (本来は円柱であるため、今回の四角柱で代用した結果よりかはその影響は少ないと思われる) を考慮に入れた単粒子軌道計算を行えば、より空洞内での粒子の運動を把握することができる。

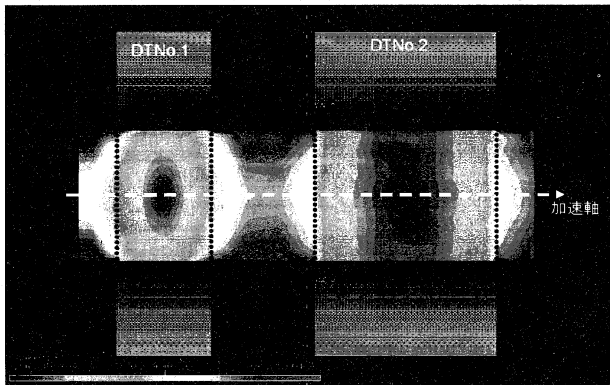


図7 入射側における電場のしみこみの様子

#### 3.2 計算プログラムの開発

電磁場解析用ソフトOPERA-3Dの計算結果から、空洞共振周波数、ドリフトチューブ内の電場 ( $E_x, E_y, E_z$ ) 成分を0.5mm間隔で値を抽出する。単粒子軌道計算プログラムでは、時間分解能を共振周波数の1/72間隔でRunge-Kutta法を用いて計算する。粒子が受ける電場は1次の内挿式を用いた。まず、加速軸に傾き0で入射した単粒子の運動により、出射パンチ幅が最大になるような入射エネルギーと電場の強度 ( $V\_factor$ ) を決定する(表2)。つぎに、パンチ幅内の位相時のTransverse Acceptance ( $x-x', y-y'$ ) を求めるために、 $200(x方向) \times 200(x'方向)$ の粒子を空洞内に入れ、出射エネルギーの±5%まで加速された粒子から出射ビームのエミッタンスを求め、それを元に戻すことによりアクセプタンスを求める(図8)。単粒子運動のみに注目して(空間電荷効果は除いて)、空洞内でのベータatron振動、シンクロtron振動を求める予定である。

表2 入射エネルギーとV\_factorの決定(例)

Input Energy (keV)	V_Factor	Phase	Extraction Energy(MeV)
40	100	0	1.74659
40	100	5	1.75404
40	100	145	2.00491
40	100	155	1.65135
40	100	160	1.63369
40	100	165	1.60244
40	100	170	1.7174
40	100	175	1.75947
40	100	345	1.85893
40	100	360	1.74659

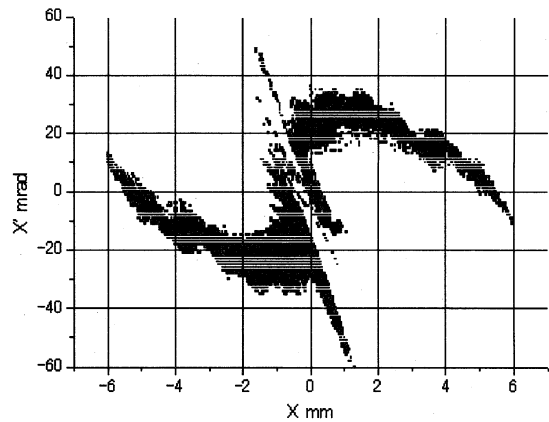


図8 Transverse Acceptance(155°)(例)

### 4.まとめと今後の予定

製作した入射テスト器の空洞共振周波数と電圧分布のずれは予想以上に大きかったが、3枚おろし構造の利点である作業性により、中間板を逆にして付け替える試みを今後行う。また、OPERA-3D内で構造を作成する段階での考察が必要 (ステム形状四角柱⇒円柱) であるが、これを基にした単粒子軌道計算プログラムの開発は、OPERA-3D以外での電磁場解析ソフトによる計算結果を用いても有効であるため、更なる計算能力を持たせることが今後の予定である。

### 文献

- [1] S.Matsui,et.al.;Proceeding 24th Linear Accelator Meeting,24(1999)149-151
- [2] T.HAttori,et.al.;Proceeding 25th Linear Accelator Meeting,25(2000)294-296
- [3] K.Yamamoto,et.al.;Proceeding 26th Linear Accelator Meeting,26(2001)189-191
- [4] K.Yamamoto,et.al.;Proceeding 4th Symp. on Accelerator and Related Technology for Application, 4(2001)27-30
- [5] K.Yamamoto,et.al.;Proceeding 27th Linear Accelator Meeting,27(2002)66-68
- [6] K.Yamamoto,et.al.;Proceeding 28th Linear Accelator Meeting,28(2003)230-232