

[13P-06]

## Design of APF-IH Linac for Heavy-Ion (Simulation of Acceleration-Characteristic and Model Test)

T.Hata<sup>\*</sup>, T.Hattori, K.yamamoto, S.matsui<sup>A)</sup> and E.Oxvath<sup>B)</sup>

Research Laboratory for Nuclear Reactors Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

A) Hamamatsu Photonics, Ltd.

B) National Institute of R&D physics and Nuclear Engineering

### Abstract

We are studying APF-IH Linac for Heavy-Ion. The IH linac was designed to accelerate from the C<sup>2+</sup> to the Xe ion form 30keV/u to 300keV/u with an APF(Alternating Phase Focus) and an operation frequency of 100MHz. We make a 1/2 scale model cavity of this linac by numerical orbit calculation and measure its RF characteristics.

### 重イオン用 APF-IH 線形加速器の設計 (加速特性シミュレーションとモデル測定)

#### 1. はじめに

現在、低エネルギー領域での重イオンの加速では一般的に RFQ 型線形加速器が使われる。しかし RFQ 型線形加速器は、その特性上大幅な小型化及び電力効率の向上は望めない。そこで、優れた加速電力効率をもつ IH 構造を採用するとともに、またビーム収束には構造が単純でより低エネルギーから加速が可能な APF 収束を採用した設計を行うことにより、重イオン用線形加速器の小型化かつ電力効率の向上を図った。実用機設計のための加速特性シミュレーション及びモデル測定について報告する。

#### 2. APF-IH 構造

本設計で採用した IH(Interdigital-H)構造はビーム加速軸に垂直に高周波電場を共振させたものである。ドリフトチューブ間のギャップにはπモー

ドの高周波電場がたつ。これにより低・中エネルギー領域においては他の線形加速器と比較すると5~20倍強の加速電力効率の向上と同時に、小型化が可能となる。<sup>[1][2]</sup>

ビーム収束には APF(Alternating Phase Focus)を採用した。粒子が加速ギャップを通過するとき、高周波電場から Transverse 方向には次のような力が働く。

$$\Delta_{RF} = \frac{\pi e V T \sin \phi}{2 E \beta \gamma^3 \lambda}$$

Vは加速電圧、Tはtransit time factor、Eは加速される粒子のエネルギー、λは高周波の自由空間波長、φは高周波の位相である。つまり高周波の位相φがプラスならば収束、またマイナスならば発散の方向へ力が働く。この収束・発散を組み合わせることにより、Longitudinal 方向及び Transverse 方向にビーム収束を行うことが可能である。この方法を APF(Alternating Phase Focus)という。<sup>[3]</sup>

<sup>\*</sup>) T.Hata,03-5734-3055, thattori@nr.titech.ac.jp

### 3. 加速特性シミュレーション

#### 3.1 加速特性シミュレーションの流れ

加速特性シミュレーションの流れを図1に示す。

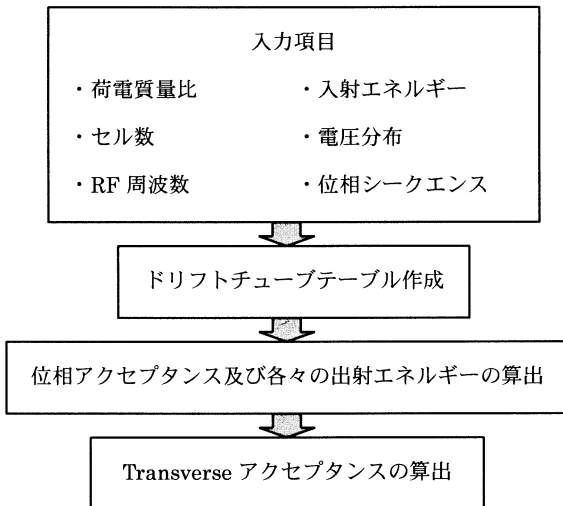


図 1 加速特性シミュレーションの流れ

本研究では炭素 2 価から、Xe のようなより重い粒子の多価チャージイオン、荷電質量比 1/6 の重イオン加速を想定して設計を行った。また入射エネルギーを 30 keV/u、RF 周波数を 100 MHz とした。出射エネルギーの目標を 300 keV/u としたため、キルパトリックの放電限界を元に、セル数を 38 セルとし、また電圧分布を図 2 と仮定した。

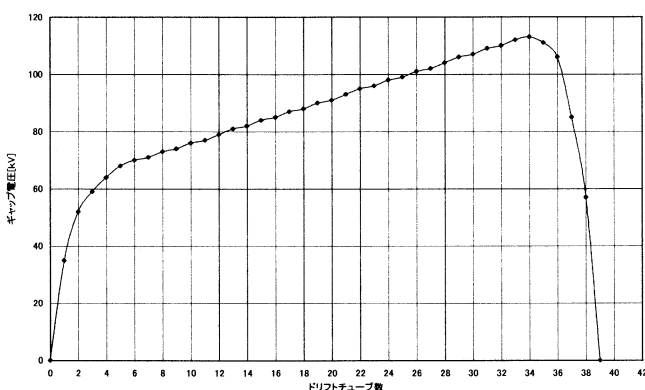


図 2 空洞内電圧分布

#### 3.2 位相シーケンスの検討

前述のように APF では位相シーケンスによってビームの収束を行っている。そのためこの位相シーケンスによって Transverse 及び Longitudinal

のビームアクセプタンスが決定するといっても過言ではない。しかしこの値の決定をシミュレーションで行おうとした場合、本設計においては、たとえ 2 種類の位相で収束発散を行ったとしても  $2^{38}$  個ものケースが考えられることになる。この方法はあまり現実的とは言えない。そこで今までこのような設計で考えられてきた最も一般的な  $\pm 30^\circ$  や  $\pm 45^\circ$  の収束-発散の繰り返し、収束収束-発散発散の繰り返し等の位相シーケンス代入を行った。しかし十分なアクセプタンスを得ることが出来なかった。そこで様々な試行錯誤を繰り返した結果、入射付近での収束が出射のアクセプタンスに大きく影響することが分かった。

しかし入射付近では粒子速度が遅いため、位相がプラスからマイナスへ移行するとき十分なセル長が取ることが困難となる。その場合は  $3\pi$  モードの位相を挿入することにより十分なセル長を確保することが可能なことが判った。

#### 3.3 ドリフトチューブテーブルとアクセプタンス

前述をふまえて位相シーケンスを決定し、ドリフトチューブテーブルを作成した後、コンピュータシミュレーションによって Longitudinal 及び Transverse のアクセプタンスを求めた。下表 1 に示した位相シーケンステーブルは十分なアクセプタンスを得られたものである。網掛けの部分は  $3\pi$  モードとなっている。

表 1 位相シーケンステーブル

-90	90	-90	75	60	-60	-45	60
60	-45	-45	60	45	0	-45	45
0	-45	45	0	-30	30	-30	30
-30	30	-30	30	-30	30	-30	30
-30	30	-30	30	-15	15		

このときの Longitudinal アクセプタンスは  $30^\circ$ 、Transverse アクセプタンスは  $143\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  となった。

#### 4. モデル空洞による高周波特性の測定

加速特性シミュレーションから得られたドリフトチューブテーブルを基に実機を製作する前に空洞内の共振周波数や加速軸上の加速電場分布などの加速空洞の高周波特性を調べる必要がある。本研究では1/2スケールのモデル機を製作し、実験を行った。電場分布の測定には直径1mmのアルミニウム金属球による摂動法を用いた。

このモデル実験で重要となるのは、いかにして共振周波数と電場分布を、シミュレーションで仮定したRF周波数と電場分布にあわせることが出来るかということである。今回のモデルは1/2スケールモデルのため、周波数の目標は2倍の200MHzであった。

電場分布はリッジの形状を変えることにより行った。具体的には予想以上にドリフトチューブ間の静電容量が大きかったため、リッジの切り欠きがない状態では、セルレングスの短い入射側に電場が集中した。調整後、各ギャップの電界がほぼ一定となる、リッジの出射側をを半分近く切り欠いた形状となった。加速軸上の電界分布を図3に示す。

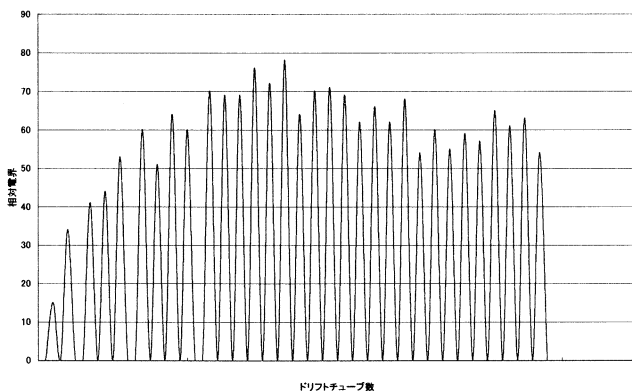


図3 加速軸上の電界分布

次に共振周波数  $f$  は簡易等価回路により、

$$f \propto \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

と表される。こちらの値も静電容量  $C$  の値が予想より大きかったため、共振周波数は予定の6割にも満たない低い値であった。そこで静電容量を下

げるためにドリフトチューブの径を小さくすることを試みた。その結果を図4に示す。

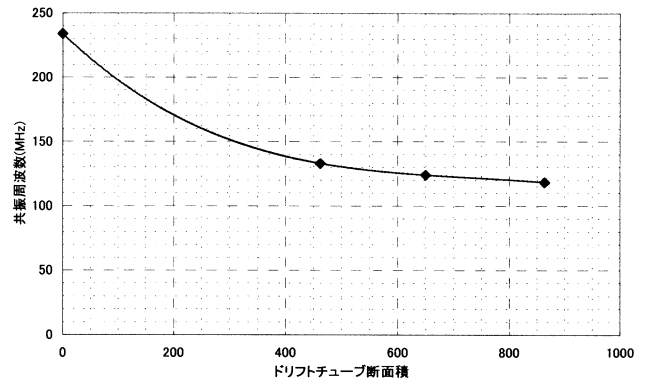


図4 ドリフトチューブ断面と共振周波数

#### 5. まとめと将来計画

重イオン用APF-IH線形加速器の設計を行った。今回の設計にあたり当初の予定では、今まで設計されてきたAPF-IH型のもと比較してもそう困難なものとは思われていなかった。<sup>[4]</sup>しかし結論から言えばAPF型の加速器は加速率よりもむしろ、ドリフトチューブ数に比例してビーム収束が困難だということが判明した。結果、位相シークエンスは規則的な周期を繰り返すよりも入射直後に強収束をかけ、出射側に近づくとつれて加速効率を上げてゆく方が Longitudinal 及び Transverse の両面でよいアクセプタンスを示すことが判った。

今後の予定としては実機を製作し、加速試験を行う予定にしている。

#### 参考文献

- [1] T.Hattori, et. al., Nucl. Instrum. Methos B99(1995)807-809.
- [2] K.Isokawa, T.Hattori, et. al. : Nucl. Inst. And Meth., A145(1998)287-290
- [3] D.A.Swenson,; Proc. 1976 Proton Linear Accelerator Conference,(1976),pp.234-237
- [4] S.Matsui, T.Hattori, et. al., "The Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy(IV) ". Proc. 24<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting , 1999, pp. 152-154