

重イオン用 APF-IH 線形加速器の研究 (II)

畑 寿起^{1,A)}、 柏木啓次^{A)}、 高橋康之^{A)}、 山本和男^{A)}、 林崎規託^{A)}、 服部俊幸^{A)}、 松井信二郎^{B)}、 E.Osvath^{C)}

^{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)} 浜松ホトニクス株式会社

〒438-0193 静岡県磐田郡豊岡村下神増 314-5

^{C)} 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

本研究は P、C²⁺、O³⁺、Xe²²⁺、U⁴⁰⁺等の、荷電質量比 1/6 以上の重イオンビームを、入射エネルギー 30 keV/u から出射エネルギー 300 keV/u までの加速する事を考え、APF (Alternating Phase Focus) 及び IH (Interdigital-H) 構造を用いた線形加速器の設計を行った。実機設計のために行ったシミュレーション結果やモデル機を用いた空洞試験等について報告する。

1. はじめに

近年、加速器の利用分野は大きく拡大し、各分野での実用化が求められている。しかし加速器は装置が大掛かりなため、設計・設置・運転そして維持管理に大きな費用を要してしまう。そこで本研究では加速器の小型化・運転電力効率の向上の重要性を考え、その実現を目的とした。そこで低エネルギー領域において優れた加速電力効率をもつ IH 型構造及び、ビームの収束を行うことが可能で構造が単純な APF 収束を用いて、ドリフトチューブ型線形加速器の設計を行った。

2. APF-IH 構造

APF-IH 構造の概要図を図 1 に示す。

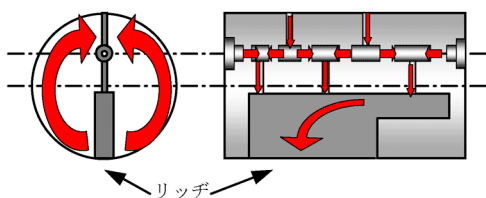


図 1 : APF-IH 構造概要図

図 1 に示したように、IH 構造は Transverse 方向に高周波電場を励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^{[1][2]}。

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。

$$\Delta_{RF} = \frac{\pi e V T \sin \phi}{2 E \beta \gamma^3 \lambda} \quad (2.1)$$

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 という^[3]。

3. APF-IH 線形加速器設計

3.1 加速器設計

加速器の設計の流れとしては、加速空洞の電圧分布、共振周波数等のパラメーターの仮定を行った後 APF 加速位相の決定を行う。APF の線形加速器は加速位相の決定によってビームアクセプタンスが大きく変わるため、この加速位相テーブルの決定が重要となる。そして、それらの値を用いて粒子シミュレーションを行い、ビームアクセプタンスを求める。十分なアクセプタンスが得られる加速位相テーブルを用いてモデル空洞の設計・製作・高周波特性の測定を行う。そして、モデル空洞測定から求めた値から電圧分布及び共振周波数、加速位相テーブルの修正、そして再び粒子シミュレーションを行い実機の設計を行う。本実験の実機製作には 2 度のモデル実験を行った後に実機の設計を行った。

¹ E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp

3.2 第一モデル空洞設計・製作

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、運転周波数を 100 MHz とした。出射エネルギーの目標を 300 keV/u とした。キルパトリックの放電限界を元に、セル数を 38 セルとした。これらのパラメーターからモデルを設計・製作し、高周波特性の測定を行った。

3.3 第一モデル空洞測定

第一モデルのリッジと呼ばれる磁場の流れを制御する板の形状を変化させることにより、ドリフトチューブ間の電圧分布を変化させることが出来る。モデル機で、リッジの形状を幾つか変化させたところ、粒子シミュレーションで仮定したギャップ間電圧と近似したギャップ電圧を得ることが出来た^[4]。しかし第一モデルは 1/2 スケールモデルのため、周波数の目標は 2 倍の 200 MHz であったが、測定結果の共振周波数は 120 MHz 値であった。そこで第一モデルからいくつかのパラメーターの変更を行い再びモデル機の設計を行った。

3.4 第二モデル機の設計・製作

前述したように、第二モデル機の設計では共振周波数の改善を行うために幾つかの修正を加える必要があった。

共振周波数 f は簡易等価回路により、

$$f \propto \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

と表される。第一モデルでは静電容量 C の値が予想より大きかったため、共振周波数の実測値が予定値より下がってしまったと思われる。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。ドリフトチューブ断面積と共振周波数の関係のモデル測定結果を図 2 に示す。

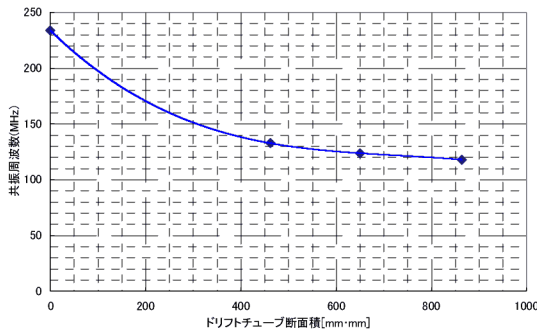


図 2：ドリフトチューブ断面積と共振周波数

これよりドリフトチューブ断面積を小さくすることにより、共振周波数が上昇することが分かる。し

かし尖端放電を考慮し、ドリフトチューブ径を 14 mm とした。続いて幾つかのドリフトチューブを結合させギャップを減らすことにより静電容量の減少を試みた。その結果、セル数 32 の時には 145MHz の値を得ることができた。

続いて、空洞の L (インダクタンス) 成分を減らし、共振周波数を上げる事を考える。空洞インダクタンス L と空洞断面積 S は比例関係となる。そこで、空洞径を減らす事により共振周波数を上げることが可能である。

第二モデル機の空洞設計は、ドリフトチューブ径、加速セル数を減少させると共に、空洞径を第一モデル機の 300 mm から 220 mm として設計を行った。また電圧分布も第一モデル機の測定結果を用いて再び粒子シミュレーションを行ない、ドリフトチューブのテーブルに修正を加えて第二モデル機の設計・製作・高周波特性の測定を行った。

3.5 第二モデル高周波特性の測定結果

第二モデル空洞の共振周波数は 200 MHz と設定していたが、測定値は 190 MHz と 5% 程度の誤差が生じた。これは空洞径を減少させたことにより、ドリフトチューブと空洞壁間に生じる静電容量の増加したために起こったものと思われる。

続いて、摂動法により求めたギャップ間電圧を図 3 のようになった。

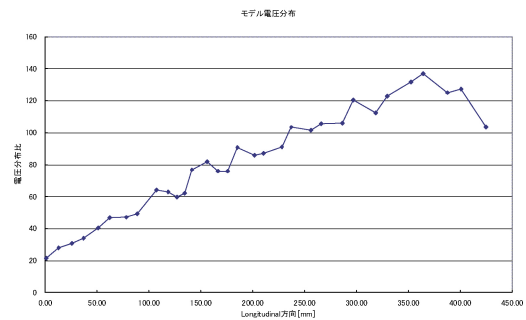


図 3：第二モデル機ギャップ間電圧分布

4. 実機設計

第二モデル測定より求めた、図 3 の電圧分布を用いて再び粒子シミュレーションを行った。その結果、第二モデル機設計に用いた APF の位相と同等の位相で、十分なビームアクセプタンスを得ることが可能なことが分かった。そこで、この加速位相を用いてドリフトチューブテーブルを作成した。

ドリフトチューブ径・リッジ形状は第二モデル空洞のものを 1/1 スケールにスケールした。また共振周波数の調整のため空洞径を 220mm から、207mm とし、1/1 スケールにスケールし、実機設計を行った。実機設計の概要図を図 4 に示す。

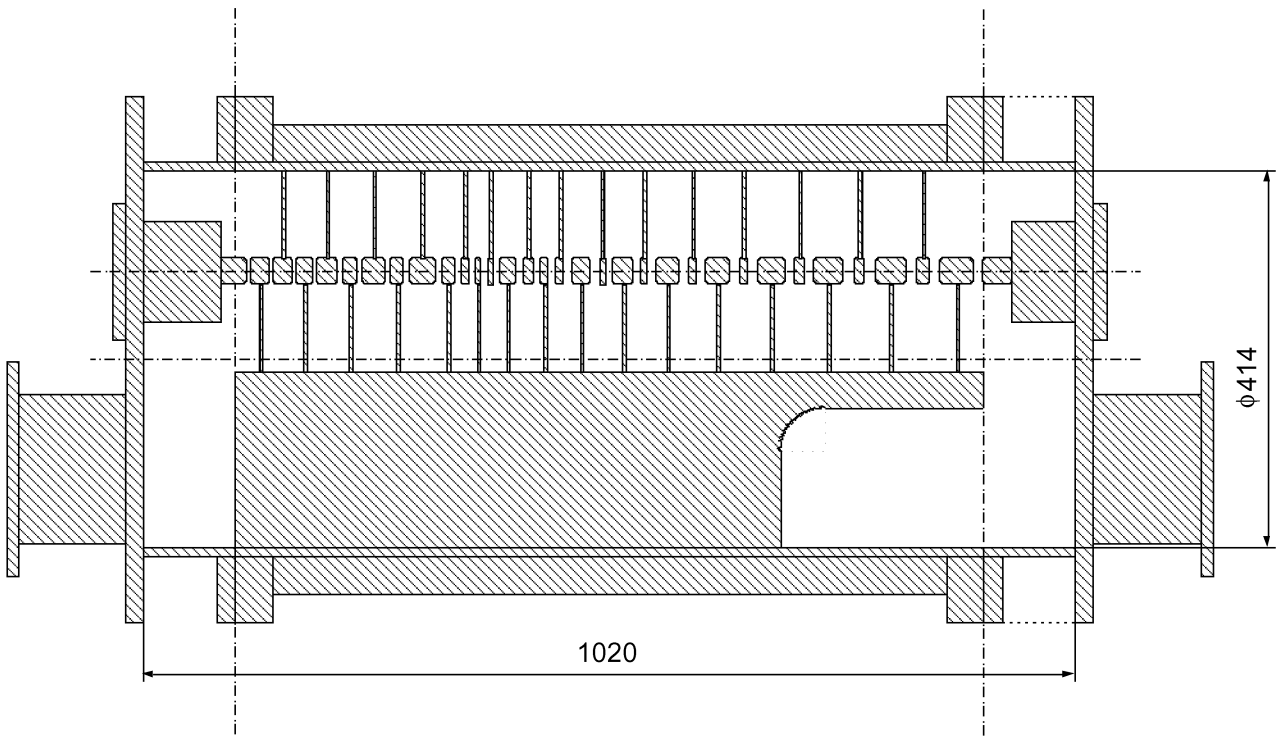


図 4 : 実機設計概要図

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 型のものと比較してもそう困難なものとは思われていなかった^[4]。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。

今後は実機製作と、加速試験を行う予定である。また空洞形状についても電磁場シミュレーションを行う予定である。

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] T.hata, T.Hattori, et. al., "Design of APF-IH Linac for Heavy-Ion (Simulation of Acceleration-Characteristic and Model Test) ". Proc. 25th Linear Accelerator Meeting , 2000, pp. 297-299
- [5] S.Matsui, T.Hattori, et. al., "The Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy (IV) ". Proc. 24th Linear Accelerator Meeting , 1999, pp. 152-154