

# 低エネルギー入射 APF-IH 型重イオン線形加速器の建設

畑 寿起<sup>1,A)</sup>、柏木 啓次<sup>A)</sup>、高橋 康之<sup>A)</sup>、山本 和男<sup>A)</sup>、上田 晋太郎<sup>A)</sup>、土屋 和利<sup>A)</sup>  
高野 淳平<sup>A)</sup>、長江 大輔<sup>A)</sup>、高野 智<sup>A)</sup>、林崎 規託<sup>A)</sup>、服部 俊幸<sup>A)</sup>、E.Osvath<sup>B)</sup>、C.Usurelu<sup>B)</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 1-14-1

<sup>B)</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

本研究は P、C<sup>2+</sup>、O<sup>3+</sup>、Xe<sup>22+</sup>、U<sup>40+</sup>等の、電荷対質量比 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 までの加速を行なう事を考え、APF (Alternating Phase Focus) 及び IH (Interdigital-H) 構造を用いた線形加速器の開発研究である。APF-IH 型線形加速器は突出した加速効率と小型化が可能な加速器ということで知られるが、一方、空洞共振と加速ビームの不安定性という問題を抱えている。近年の電磁場解析プログラムの発展により、空洞共振についての解は解明しつつあるが、未だ安定したビーム加速理論については解明されていない。現在は、ビーム安定性に視点を置いた APF-IH 型線形加速器の設計は終え、ビーム加速に向けてのビームラインの建設中である。現在の状況を報告する。

## 1. はじめに

近年、加速器の応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という問題がある。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。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。IH 構造の概要図を図 1 に示す。

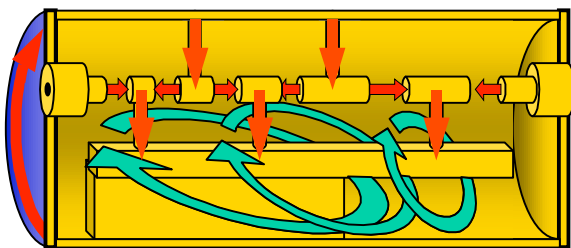


図 1 : IH 構造概要図

## 2. APF-IH 構造

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  $\pi$  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を持ち、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。

$$F_{RF} = \frac{q_e V T \sin \phi}{2E \lambda^3 \phi} \quad (2.1)$$

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、 $\lambda$  は高周波の自由空間波長、 $\phi$  は高周波の位相である。つまり高周波の位相  $\phi$  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。<sup>[3]</sup>

## 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、この加速位相シークエンス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、十分なアクセプタンスが得られる加速位相シークエンスを用いてモデル空洞の設計・製作・高周波

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

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的设计を行う。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的设计を行った。

### 3.2 加速器パラメーターの決定

一般的にはビームの使用用途に合わせ加速器、RF電源、イオン源の性能の決定を行う。しかし、当研究は純粋加速器の研究であるため、「一般的に使用が可能である性能」及び「当研究室が入手可能な電源の性能」という値を基準にして加速器パラメーターの決定を行った。

一般的には電荷対質量比が小さい、つまり重イオン程加速が困難とされている。本研究では、ECRイオン源等を用いることにより、Uまで加速が容易に行うことが可能として、加速粒子の電荷対質量比を1/6とした。また、RF電源の性能により、運転周波数を108 MHzとして、またIHキャビティの入射エネルギーを35 keV/u、出射エネルギーを350 keV/uとした。ギャップ電圧の上限をキルパトリックユニットの1.5倍以内として、セル数を38セルとした。これらのパラメーターからコンピューターシミュレーション、1/2スケールモデル機的设计・製作・高周波特性試験の流れを踏み、実機的设计を行った。今回は不確定要素が多かったために、2度の1/2スケールモデル機设计・製作・高周波特性試験及び、3度のコンピューターシミュレーションを行った。

### 3.3 加速器パラメーターの変更

2度の1/2スケールモデル機の高周波特性試験の結果、内部構造を保ったままではキャビティの共振周波数は100MHz程度となり、108MHzを満たすことが不可能であった。当初予定していたRF電源の運転周波数も100MHzまでは変更が可能なので、運転周波数を100MHzに変更した。またそれに伴い、キャビティの大幅な変更を行わないために、ビームの入射エネルギーを30keV/u、出射エネルギーを300keV/uと変更した。また、同時に過去のシミュレーションプログラムに入射付近では大きな誤差を持つことを発見したため、その誤差を補正するため、入射付近に4箇所3πモードのセルの代入を行った。そして加速セルの数も38セルから32セルに変更した。

パラメーター変更を余儀なくされた最大の理由としては、加速粒子の電荷対質量比を1/6という重イオンに設定したためである。キャビティの共振周波数 $f$ は簡易等価回路により、

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

と与えられる。LとCはそれぞれキャビティのインダクタンスとキャパシタンスを表す。今回の設計では、入射付近の10セルの平均セル長は12.5mmとなっている。そのため、IH型キャビティのドリフトチューブの、ギャップに電場が極端に集中するという特性により、このキャパシタンスが極端に増加してしまい、キャビティの共振周波数が低下してしまったことである。

## 4. 実機設計と製作

2回の1/2スケールモデル機の高周波特性試験の結果から変更を行ったパラメーターより再度コンピューターシミュレーションを行いモデル機の内部構造を保ったまま1/1スケールにスケールアップを行い実機的设计を行った。本実機的设计で最大の注意点は製作誤差である。前述のようにAPF収束法は加速位相によりビームの収束を行う。そのため、製作誤差はそのまま加速器のアクセプタンスの性能誤差となる。コンピューターシミュレーションから特に入射付近での加速位相が、特に加速器のアクセプタンスに影響することが解った。さらに、入射付近では前述のようにセル長は12.5mm程度しかないため、さらに設計誤差が影響してくる。加速器のビームアクセプタンスの誤差を10%程度と取る場合でも製作誤差を0.15mm以内に抑える必要がある。

## 5. ビームラインの建設

本研究にて設計を行ったAPF-IH型線形加速器は、ルーマニアでの製作を終え、現在日本へ輸送中である。そこで、現在は加速器の入射系・出射系装置の製作及び準備を行っている。図2に本実験で使用するPIGイオン源の概要図を示す。

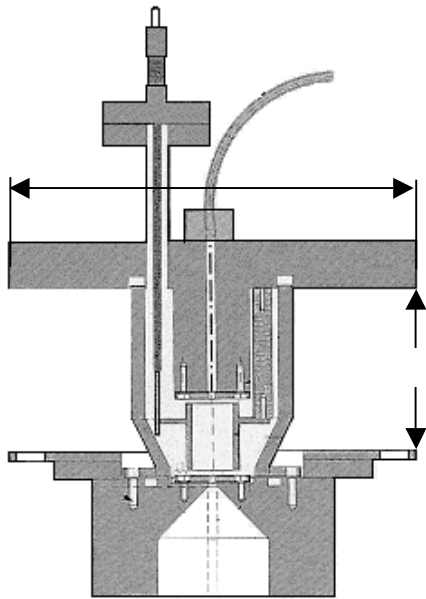


図2 アノード直接注入型 PIG イオン源

本イオン源はアノード電極内に直接ガス注入するように改良を行った。プロトンでイオン源性能試験を行った結果、真空度  $3.3 \times 10^{-6}$  [torr]、引き出し電圧 5kV のとき  $1.0 \mu\text{A}$  のプロトンビーム電流を観測す

ることができた。右図 3 にそのときの実験結果を示す。

また以下図 4 に今後予定するビームラインの概要図を示す。

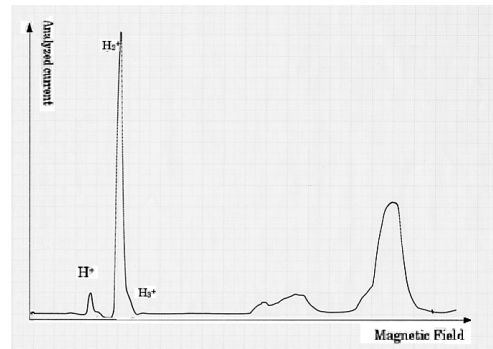


図3 PIG イオン源性能試験

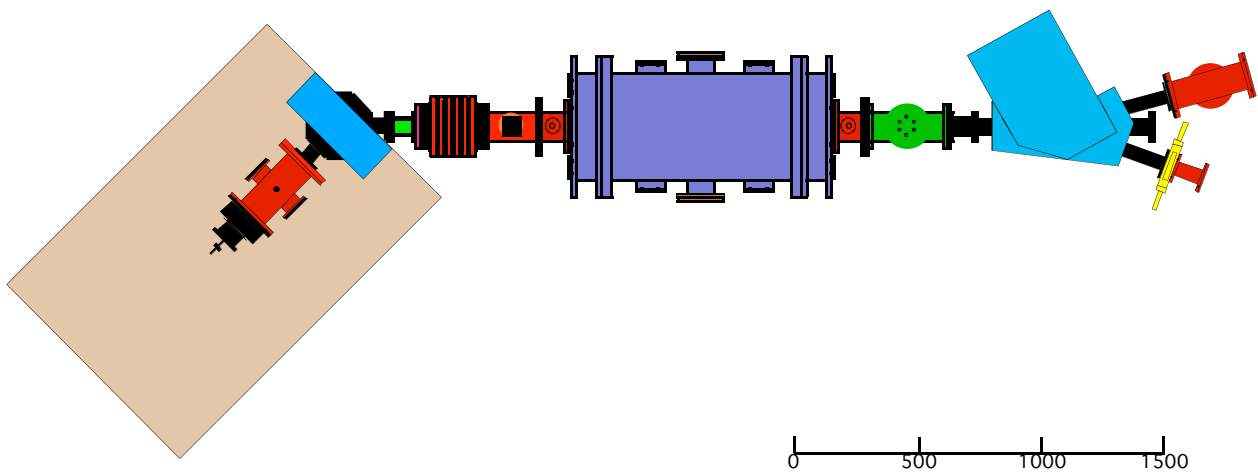


図4 本研究ビームラインの概要図

## 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。

現在、加速器本体以外の、イオン源ほか RF 電源分析マグネット等、全て入射系、出射系の動作試験を行っている。今後はルーマニアから加速器本体の到着の後、直ちに性能試験に取り掛かる予定となっている。また前述の PIG イオン源以外にも ECR イ

オン源も現在製作・性能試験中である。PIG イオン源でプロトンの加速試験を行った後、ECR イオン源を用いた  $\text{C}^{4+}$  の加速試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] T.Hattori, et. al., Nucl. Instrum. Methos B99 (1995) 807-809.H.Kobayashi, et al.,“リニアック技術研究会論文投稿要領 Proceedings of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [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. 25<sup>th</sup> 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. 24<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting , 1999, pp. 152-154