

低エネルギー入射小型 APF - IH 型線形加速器に関する研究

山本 和男^{1,A)}、服部 俊幸^{A)}、林崎 規託^{A)}、柏木 啓次^{A)}、高橋 康之^{A)}、畑 寿起^{A)}、青木 学^{A)}、

^{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

概要

IH型加速空洞に収束要素を必要としないAPF構造を取り入れることにより、低エネルギーからの入射が可能となる APF-IH 型線形加速器の加速特性に関する研究結果を報告する。実験用加速器は、IH型加速空洞用軌道計算プログラムを一部改良したものをういて設計を行い、入射エネルギー約 10keV/u から出射エネルギー 77keV/u 程度まで加速可能な全長 530mm、空洞径 630mm の小型加速器を製作した。そして、加速実験により投入電力約 40W でプロトンの加速に成功し、その結果、IH型加速空洞特有の高電力効率を保ちつつ低エネルギーからの入射が可能であることが、また、軌道計算プログラムの妥当性も実証された。

1. はじめに

原子核・素粒子分野において活躍してきた加速器は、これまでの基礎研究に対する実験機器の一つではなく、より汎用性の高い、一般社会に密着した方向を目指すものであり、物量的にもある程度余裕の許される加速器開発ではなく、あらゆる要素を突き詰めた性能をもつ実用加速器の研究が必要とされている。現在、工業分野における加速器の利用には、技術的に確立され安定した加速が可能な静電型加速器が用いられている。しかし求められる要求が増すにつれ、放電の問題等によりそれに変わる新しい加速器開発の必要性が高まってくる。そこで、低エネルギー領域において格段に電力効率がよいIH型加速空洞に、高周波位相の選び方により横方向収束要素を必要としない APF 構造を適用し、低エネルギー入射が可能であり、そして小型、省電力である加速器の実現に向けての研究を行った。

2. APF-IH 型線形加速器

IH型加速は高周波加速の一種で、TE₁₁₁モードで粒子を加速するドリフトチューブ型 Linac である。誘導電流によりドリフトチューブ間に発生する強力な電場を利用して粒子を加速し、電場が加速に適さない位相時にはドリフトチューブ内におり影響を受けない構造である(図1)。その特徴は図2に示すように低エネルギー領域においてシャントインピーダンスが他の加速器に比べ格段に高いことである。しかし、

一般にその収束方法として、磁場レンズ等の収束要素をドリフトチューブに装着させて行っているが、

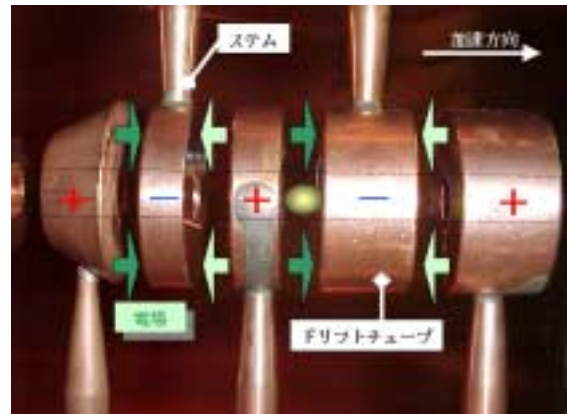


図1 IH型加速空洞の加速原理

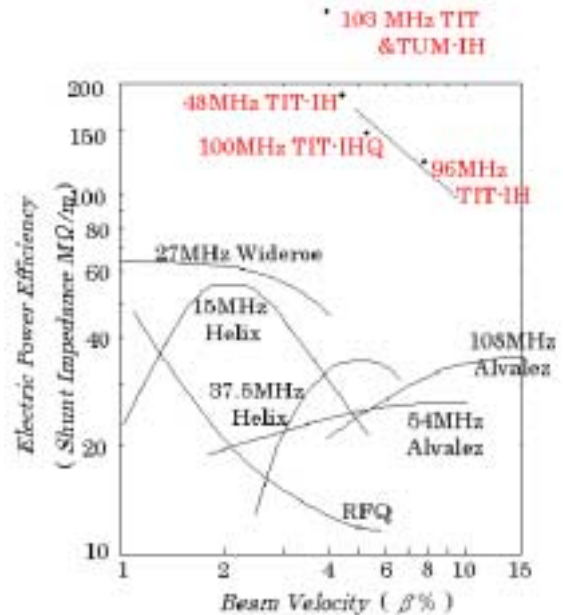


図2 各加速器のシャントインピーダンス

その為にセル長が大きくなり大型に、また、前段加速が必要となる等のIH型加速空洞特有の利点を失う結果となる。その問題を補うために、各セルの同期位相を正負交互に繰り返して、横方向に働く rf defocusing 力を利用して加速粒子を収束する APF 構造(Alternating Phase Focus、図3)を適用したのが APF-IH 型線形加速器である。その結果セル長を短くすることができ前段加速が必要なくなり、また IH 型

¹ E-mail: 02d19092@nr.titech.ac.jp

加速空洞特有の高電力効率が維持されるので小型・省電力の加速器となる。

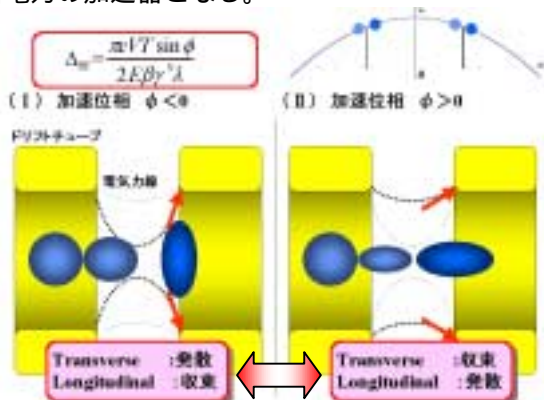


図3 APF 構造原理
(正負の加速位相を繰り返して収束する)

3. 実験用 APF-IH 型線形加速器

従来、東工大で IH 型加速空洞製作用の粒子シミュレーションプログラムが開発されてきた。しかし、このプログラムは本加速器のように低エネルギーからの入射を目的とし、加速増加量が非常に大きい条件には不適切であることが考えられる。そこで、低エネルギーからの入射を計算可能とするため、ドリフトチューブテーブルを作成するときの漸化式の一部(セル長)を変更した。そして、改善された軌道計算プログラムによるシミュレーション結果を使用し、ドリフトチューブの配列を行った。製作した加速器を図4に、パラメーターを表1に示す。

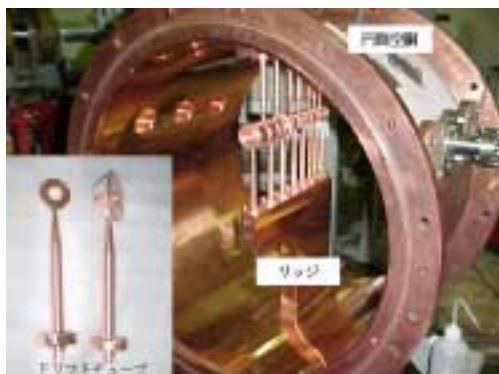


図4 実験用 APF-IH

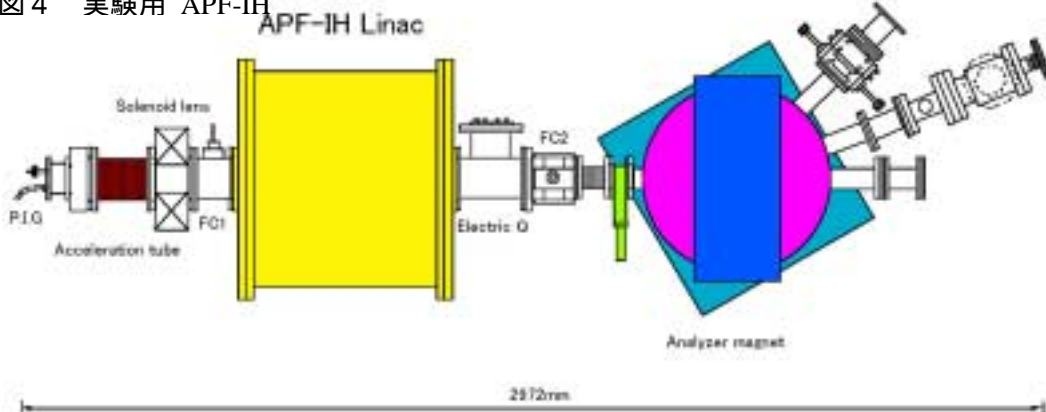


図5 加速実験システム

表1 実験用加速器のパラメーター

Acceleration Particle	q/A	1/16
Input Energy		10.8 keV/u
Output Energy		77.2 keV/u
Operation Frequency		65.0 MHz
Number of cells		16
Total Length of Cavity		530mm
Cavity inner diameter		630mm
Q factor		15370
Transverse Acceptance		88 mmmrad
Longitudinal Acceptance		30 °
Acceleration Voltage/gap		74-145kV

4. 加速実験システム

製作された実験用加速器を用いた加速実験システムと、その周辺機器を図5に示す。入射側には加速粒子を 10.8kV で引き出す小型の永久磁石 P.I.G 型イオン源、入射エネルギーまで加速する加速管、そして収束用ソレノイドレンズ、出射側には三連の静電四重極レンズ、分析マグネット(分解能 3.0%)、そして幅 10mm のスリットを配置し、全長約 3m のコンパクトな加速実験システムを構成した。電流量は入射側に 1 つ、出射側に 2 つ設置されたファラデーカップにより測定する。

また、加速実験に用いる加速粒子にはプロトンを選択した。イオン源に水素ガスを注入した際のプロトン生成率はおよそ 4~10% である。なお、入射側に加速粒子分別用偏向電磁石を設置していないため、透過効率は F.C.1 で測定した総電流量からイオン源からのビームスペクトルのプロトン占有率に比例した値を入射電流量とみなし、出射電流量をマグネット後方に位置する F.C.3 により測定し算出する。

5. 加速実験と解析結果

投入電力 46.5W、CW 運転による加速実験結果の出射ビームスペクトルを図6に示す(横軸は磁場強度、縦軸は F.C.3 で測定した電流量)。入射エネルギー 10.8keV/u に対して、出射エネルギーは 76.4keV/u、ソレノイド等を印加させた最大出射電流量は 4.8nA の結果を得た。

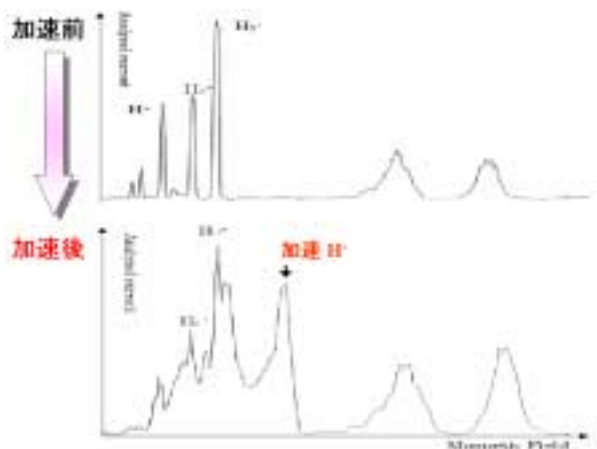


図6 加速粒子スペクトル

また、従来の軌道計算プログラムにより製作された APF-IH 型線形加速器を用いた加速実験結果との比較を図7に示す。出射ビームのスペクトルが増大したのは APF 収束がより有効に働いたためであり、改善した新計算プログラムの妥当性が実証できた。

そして、出射エネルギーと出射電流量の関係を図8に示すが、出射エネルギーが 74keV/u から 82keV/u まではほぼ一定の出射電流量を得られており、より大電流を発生可能なイオン源との組み合わせを考え、ピーク電流量がある程度下がったとしても電流が確保できるとすると、63keV/u から 90keV/u までエネルギー利用が可能であると言える。透過効率を F.C.1 で測定した総電流量 1.8 μA、その時のプロトン生成率は 4.1%より入射電流量は 75.5nA、出射電流量は 4.8nA より、6.36%と求まる。

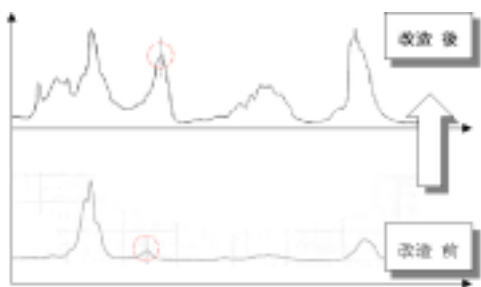


図7 新旧軌道計算プログラムの加速結果

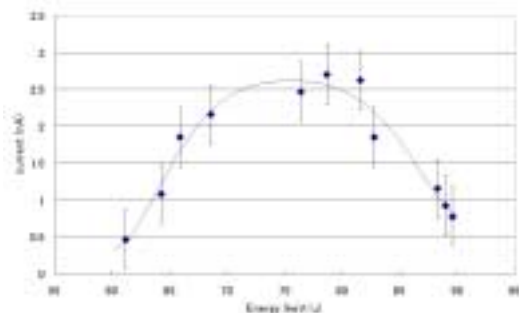


図8 出射エネルギーと出射電流量の関係

一方、本加速器の実効シャントインピーダンスは実験結果より、392M / mと算出される。TE モードの加速器は次式の近似式から実効シャントインピーダンスを求めることができる。

$$Z_{eff} = C\beta^{-2} D^3 f^{3.5} \quad \dots (1)$$

ここで、C は係数、 β は加速粒子の平均速度、D は空洞直径、そして f は共振周波数である。(1)式を用いて世界の IH 型加速空洞の係数 C を導出し、 β の関数としてプロットしたものを図9に示す。この近似直線より係数 C を求め、(1)式より実効シャントインピーダンスを求めた結果、405M / mとなり加速実験結果と誤差 3.3%とよく一致している。そして、本加速器も同図にプロットするとその近似直線上にあることから、APF 構造を取り入れても IH 型加速空洞の特徴を維持していることが、また IH 型加速空洞では踏み入れたことのない低エネルギー領域での加速に成功したことがわかる。

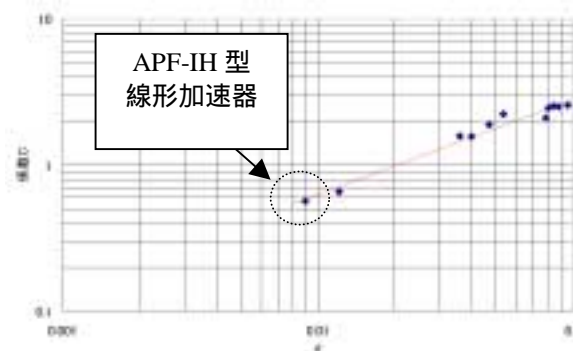


図9 世界の IH 型加速空洞との比較

6.まとめ

本研究により、APF-IH 型線形加速器の加速原理が実証された。その特徴は APF 構造を採用したことにより、IH 型加速空洞特有の高電力効率を保持したまま低エネルギーからの入射が可能となり、小型で省電力の加速器となった。そして、本加速実験により改良を試みた軌道計算プログラムの妥当性が証明され、APF-IH 型線形加速器の製作方法が確立したといえる。

参考文献

- [1] K.Yamamoto, et al., “イオン注入用 APF-IH 型線形加速器の加速試験”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 189-191
- [2] S.Matsui, et al., “Compact IH-APF type linac for heavy ion implantation”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 161-163 (2000) 1178-1181
- [3] T.Hattori, et al., “Compact IH-APF type linac for PIXE and RBS analysis”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 161-163 (2000) 1174-1177
- [4] T.Hata, et al., “重イオン用 APF-IH 型線形加速器の研究 ()”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 186-188