

イオン注入用 APF-IH 型線形加速器の加速試験

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

^{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

概要

格段に優れた加速電力効率をもつ IH 構造を採用して、電力効率の良い、コンパクトな高エネルギーイオン注入装置を設計、製作した。今回本加速器の空洞特性を調べ、加速システムを構築し、ヘリウムイオン、水素イオンを用いた加速試験における現状を報告する。

1. はじめに

これまでの加速器は主として基礎物理研究を中心として開発されてきた。その加速エネルギーの幅広さ、ビームクオリティ、制御性などの進歩から、近年ではガン治療などの医療分野から半導体や原子力などの産業分野まで広範囲に利用されるようになってきた。そのなかで、半導体製造用イオン注入器は、イオン加速器のなかでももっとも数多く使われているもののひとつである。半導体の生産には不純物をドーピングする必要があるが、その方法としてイオン注入法は高い生産性と制御性をもつ技術として半導体デバイス生産の現場においてドーピング技術の主流となっている。イオン注入装置はタンデム型静電加速器や高周波四重極型線形加速器などが一般に利用されているが、装置の大型化や高周波電力効率の低さなどの欠点がある。そこでそれらの欠点を改善できる装置として、優れた加速電力効率をもつ IH 構造を採用し、電力効率の良い、コンパクトなイオン注入装置をデザインすることにした¹⁾。

我々は小型、省電力の高エネルギー半導体イオン

注入装置として、 O^+ を核子あたり 88keV まで加速できる全長 530mm、空洞径 630mm のコンパクトな IH 型線形加速器を設計、製作した。粒子の収束には alternating phase focus を採用し、十分なアクセプタンスが得られることが計算で得られている。

今回は製作した加速器を用いた加速試験についての現状を報告する

2. ビーム加速試験

本加速器の設計では、電荷対質量比が 1/16 の粒子までを加速することを想定している。しかしながら本研究室のアンプの加速空洞への電力供給可能量や分析マグネットの性能等の関係上、本実験ではヘリウムイオン(He^+)を採用している。イオン加速実験で用いる周辺装置及び加速器の配置図を図 1 に示す。イオン源から 10kV の引き出し電圧で引き出された加速粒子は加速管でさらに 40kV まで引き出され、ソレノイドレンズで収束されてから加速空洞に入射される。出射された加速粒子を ElectricQ で収束したのち偏向電磁石で分析する構成になっている。ビーム電流量は、イオン源から引き出されたビームについては FC1 で、加速ビームについては偏向電磁石後の FC で測定される。

2.1 入射系

加速試験に用いたイオン源は P.I.G 型イオン源である。引き出し電圧 10kV で引き出されたビームスペクトルを図 2 に示す(加速器への投入パワーは 0W)。

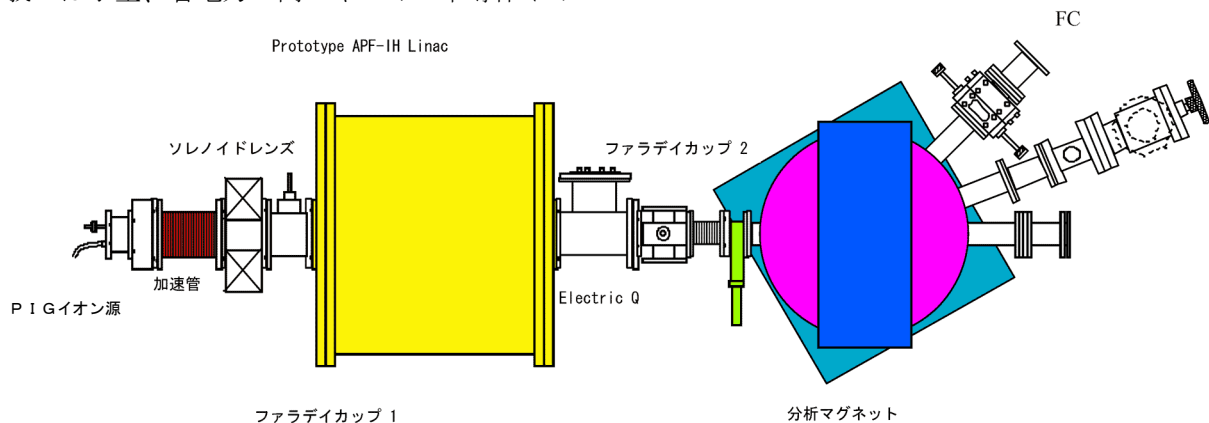


図 1 : 実験配置図

¹⁾ E-mail:00m19315@nr.titech.ac.jp

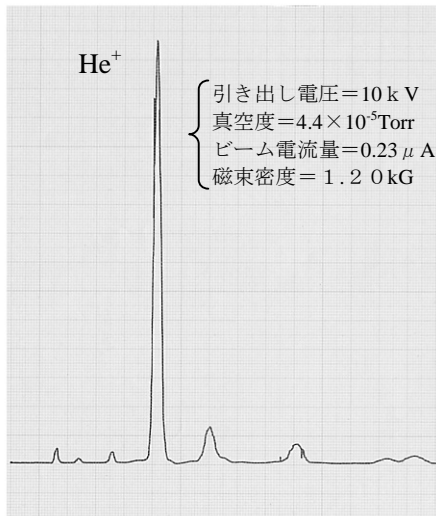


図 2 : ビームスペクトル

横軸は分析マグネットの磁場強度、縦軸はビーム強度を示す。イオン源から引き出されたビームは加速の対象となる He^+ だけではなく全ての粒子が加速されるが、実際に加速される時には q/A が異なるイオンはセル長が異なるためほとんどの粒子が加速されずに落ちこぼれる。従って、加速後に偏向電磁石で分析を行えば目的とする粒子を測定することができる。引き出されたビームはソレノイドレンズで収束され加速空胴に入射される。

2.2 加速空胴

製作した加速空胴は、長さ 530mm、径 630mm、セル数 16 の APF-IH 型加速器である。電荷対質量比が $1/16$ の粒子までを格子当たり 10.8keV を 88keV まで加速するように製作された。運転周波数は 65.2MHz、 Q 値は 7685 となっている。

加速空胴に投入する高周波電力は S.G (Signal Generator) からの基準信号をアンプによって増幅し、同軸ケーブルを用いてインプットカプラーに接続することによって供給する。実際カプラーを製作して高周波を入力してみた際のカプラーの面積に対する加速空胴 pickup 電圧の関係を図 3 に示す。このグラフよりカプラー面積が 42cm^2 のとき最も多く電力を入力することがわかる。

電力投入の際にインプットカプラーと加速空胴のインピーダンスのマッチングが取れている必要がある。方向性結合器とピックアップ電圧から算出した結果、入力パワーに対する反射パワーはおよそ 6%程度と小さいのでカプラーと加速空胴は十分にインピーダンスマッチングが取れているといえる。

また、加速空胴に投入される高周波電力の繰り返し周期の調整を行ったところ、周期を 30ms にした場合に透過電流量が比較的大きくなった。したがって、本実験では電力の周期を 30ms に固定、Duty を 10% (パルス幅/パルス周期 = 3ms/30ms) で行うことにした。

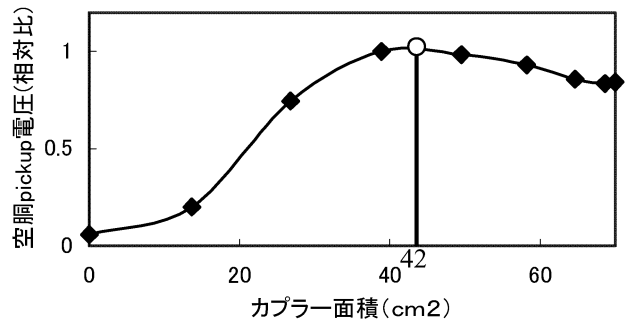


図 3 : カプラー面積と吸収される電力の関係

2.3 偏向電磁石

偏向電磁石は H 型電磁石であり、加速空胴から射出されたビームは ElectricQ で収束したのち偏向電磁石で分析される。格子当たり 88keV まで加速された He^+ を偏向させるためには 6.2kG 必要となり、これはこの偏向電磁石の許容範囲内である。

3. 主な問題点

以上のシステムを用いて加速試験を行う予定であったが、いくつかの問題が生じた。

加速空胴に電力を供給しようとした際、電極間でマルチパクタリング放電が起こる。図 4 は真空度 2.5×10^{-5} Torr、入力電力 1.04kW (pickup 電圧から算出) の時のマルチパクタリング放電図である。このようにイオン源が稼動可能な真空度のもとでは、投入電力約 1kW で放電が起きてしまう。そのためイオン源と加速空胴の間に真空排気系を増設して空胴内の真空度を改善する予定にしている。

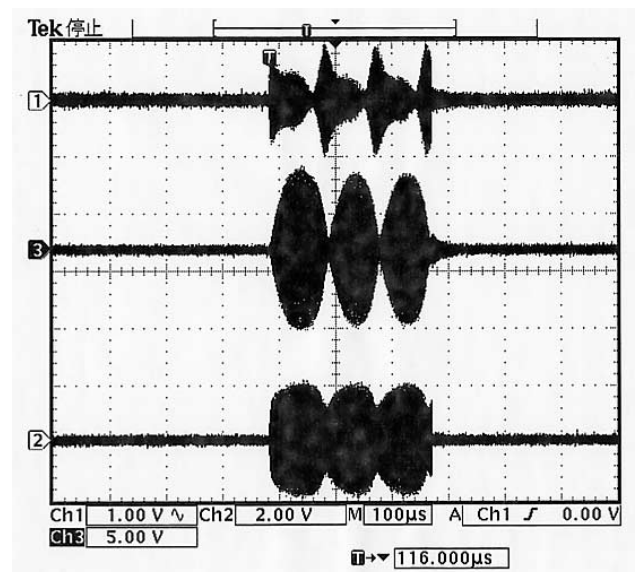


図 4 : マルチパクタリング放電図
(①反射電圧②入力電圧③pickup 電圧)

一方、本加速器の軌道計算は、本研究室で開発された『APF-IH軌道計算プログラム』を用いて行った。これはドリフトチューブテーブルを作成し、これを基に位相振動解析と Transverse Acceptance 計算を行うものである。しかし、今回ドリフトチューブテーブルを作成するための漸化式の一部に誤りがあることが判明し、再度新しい漸化式でドリフトチューブテーブルを作成し直した。具体的にはセル長の漸化式を

$$Lc(i)=(Ls(i-1)+Ls(i))/2$$

から

$$Lc(i)=Ls(i)+(Lg(i)-Lg(i+1))/2$$

に変更した。これを用いて再度軌道計算を行ったところ、Total Acceptance が 250π (mm mrad) から 9π (mm mrad) に大幅に減少してしまった(表1参照)。Acceptance とは入射された粒子を最後まで加速させられるかの指標であり、この時点で当初に予定していたビーム量の 3.6% しか出射されないことになった。そのためドリフトチューブの配列をやり直すことにしている。

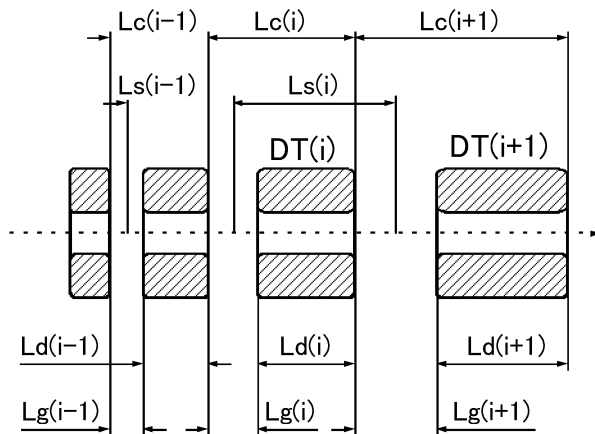


図5：各セルにおける区間の定義

表1：新旧プログラムのパラメーター

	旧プログラム	新プログラム
加速される粒子の電荷対質量比	$\geq 1 / 16$	$\geq 1 / 16$
入射エネルギー	1 0.8 keV	1 0.8 keV
出射エネルギー	8 8.0 keV	8 2.8 keV
運転周波数	6 5.3 MHz	6 5.3 MHz
セル数	1 6	1 6
キャビティ長	5 3 0 mm	5 3 0 mm
キャビティ径	6 3 0 mm	6 3 0 mm
位相シーケンス	-30,-30,+30,+30	
Transverse Acceptance	250π mm mrad	9π mm mrad
Longitudinal Acceptance	30°	30°

4. 今後の課題

高周波投入電力は摂動球実験より求めて $362M\Omega/m$ である。これによると He^+ を加速させるために必要な高周波電力は約 600W であり、 H^+ の場合は約 40W となる。40W はイオン源稼動可能な真空度での加速空洞への投入可能電力内である。図6は加速空洞に 40W (pick up 電圧から算出) を投入した時の電力投入図である。この図より H^+ が加速可能であることを示している。したがって、当初予定していた加速粒子 He^+ を H^+ に変更し、再軌道計算により予定していたビーム量を得ることが出来ないため、加速空洞のパルス運転を CW 運転で行うことによりビーム量を補正し実験を行う。さらにドリフトチューブ配列を修正して加速実験を行う予定である。

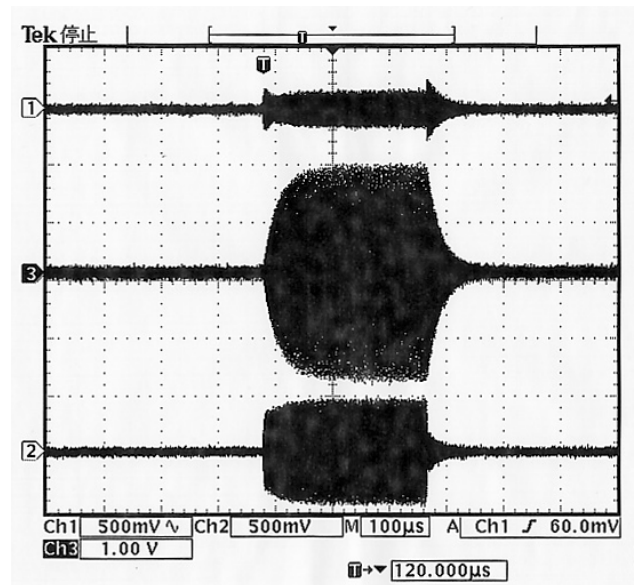


図6： H^+ 加速可能証明図
(①反射電圧②入力電圧③pick up 電圧)

参考文献

- [1] 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,
- [2] T.Ito, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 139(1998)401,
- [3] T.Ito, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 113(1996)46,
- [4] T.Hattori, et al., Proceeding of the First Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 1998, p99,
- [5] K.Isokawa, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 415(1998)287,